

(社)日本地すべり学会関西支部シンポジウム

斜面健康診断の可能性

日 時：平成21年6月10日(水) 10:00~17:00

場 所：建設交流館8階グリーンホール(大阪市西区立売堀)

TEL: 06-6543-2551 <http://www.wjcs.net/kaigi/img/fukinannai.pdf>

----- プログラム -----

10:00~11:00 特別講演 「物理探査による盛土の健康診断技術の現状」

京都大学大学院工学研究科 松岡俊文・宮川歩夢
国土交通省近畿地方整備局近畿技術事務所 山本 剛

11:00~11:40 話題提供(質疑応答含む)

(1) GPS を利用した斜面監視サービス(Shamen-net)の開発と成果

Shamen-net 研究会 岩崎智治
山口大学 清水則一

11:40~12:10 (社)日本地すべり学会関西支部総会

12:10~13:30 昼 食

13:30~15:30 話題提供(質疑応答含む)

(2) RTK-GPS を用いた斜面定期健康診断構想

京都大学防災研究所 福岡 浩
日本GPSソリューションズ株式会社 佐藤一敏・松浦友紀

(3) 電波位相差変位計測の斜面防災への応用

地層科学研究所 里 優
京都大学工学研究科 西山 哲

(4) 谷埋め盛土地盤の安全性評価事業

太田ジオリサーチ 太田英将
京都大学防災研究所 釜井俊孝

15:45~17:00 パネルディスカッション「斜面健康診断事業は成立しうるか？」

司 会 太田英将(太田ジオリサーチ)
パネラー 特別講演と話題提供者

17:30~19:00 意見交換会

主 催 (社)日本地すべり学会関西支部
後 援 (社)砂 防 学 会
(社)地盤工学会関西支部

(社)日本地すべり学会関西支部長
藤村 尚(鳥取大学)

シンポジウム実行委員

委員長	福岡	浩(京都大学防災研究所)
委員	釜井	俊孝(京都大学防災研究所)
委員	松岡	俊文(京都大学大学院工学研究科)
委員	太田	英将(太田ジオリサーチ)
委員	岩崎	智治(Shamen-net 研究会)
委員	里	優(地層科学研究所)

物理探査による盛土の健康診断技術の現状

京都大学工学研究科社会基盤工学専攻 松岡俊文・宮川歩夢
国土交通省近畿地方整備局近畿技術事務所 山本 剛

1. はじめに

近年国内においても、人的災害を引き起こす様な堤防の決壊と洪水の被害などが生じており、これまで以上に堤防の質的整備の重要性が高まっている。河川堤防の決壊を引き起こす要因として、堤防内に存在する大小の空洞や異常な不均質性が挙げられる。堤防を含む盛土構造物の健康診断では、空洞などの異常箇所の把握や、盛土内の土質、強度や含水率などの性状を把握することが必要である。堤防の内部構造の調査にはボーリングを主体とした調査手法が用いられているが、ボーリング調査は膨大な延長を有する河川堤防においては、点の情報しか得られず、また経済的な理由から、調査地点数が限られることが多い。このため十分な調査結果が得られない場合もある。そこでボーリング調査を補完し、調査精度とコストの面から調査を効果的に行うための手法として、物理探査の適用が期待されている(高橋ほか、2007)。

一方、堤体や堤防付近の基礎地盤は複雑かつ変化に富んだ土質構成であって、単独の物理探査法で土質性状を正確に把握することは困難である(渡辺ほか、2007)。すなわち各々独立したボーリング調査や物理探査ではなく、ボーリング調査と複数の物理探査手法を複合的かつ効果的に組み合わせ、統合して解析することにより、堤防の評価を行うことが必要である。これまでに、複合物理探査を利用した河川堤防調査のための技術開発(装置、解析法の開発)が行われてきている(渡辺ほか、2007；稲崎ほか、2007；林ほか、2007a；今村ほか、2007；林ほか、2007b；松尾ほか、2007；高橋ほか、2007；畠中ほか、2007；山本ほか、2008)。

複合物理探査では、複数の異なる探査手法によって取得された物理探査データを統合して解析することが求められる。楠見ほか(2006)は、トンネル建設時に取得された弾性波速度と比抵抗値を用いて、間隙率と体積含水率への変換解析式を構築し、複合物理探査法が工学的に必要とされるパラメータの推定に大きく寄与できることを示した。さらに林ほか(2007)は、複合物理探査データを利用した河川堤防における土質性状の分布評価を試み、S波速度と比抵抗値とのクロスプロットを作成することにより、堤体内の土質や締固め度の分類が可能であることを示した。

しかしながら、林ほか(2007)が提案した手法の課題として、扱える物理探査デ

ータの種類が少ないと、分類の基準となるしきい値の設定が困難な点があげられる。2次元平面上のクロスプロットを用いる分類手法では、扱える物理探査データが2種類に限られる。さらに3次元空間内でのクロスプロットを用いても、扱える物理探査データは3種類である。同様の手法でそれ以上の種類の物理探査データを扱う事は、クロスプロット上での分類を解析者の手によって行っているため困難である。また分類を行う際にしきい値を設定するには、物理探査によって取得される物理探査データから、堤防の土質や強度と言った工学的パラメータを一意的に推定する必要がある。しかし、実際には物理探査データと工学的パラメータの相関関係は一意的ではなく、相関関係を網羅したデータベースも十分に整備されてはいない。そのため、しきい値の設定には技術者の専門的な知識や経験に基づく、高度な判断が要求される。分類に技術者の判断が介入することによって、解析結果の客観性が低下すると同時に、技術者の能力により成果品質にばらつきが生じる。

複合物理探査による多数種のデータから、土質構成パターンを抽出するといった、定式化が困難な問題におけるパターン認識やデータマイニングには、ニューラルネットワークによる解析が有効であることが知られている。そこで、本研究ではニューラルネットワークの一種である自己組織化マップ (SOM) (Kohonen, 1982, 1984) とクラスタリング手法の一種である k-means 法 (麻生ほか, 2003) を複合物理探査に導入することにより、多種類のデータから土質性状を客観的に分類することを試みた。

2. 複合物理探査

本研究では京都府宇治川左岸に位置する堤防 (旧巨椋池排水樋門周辺) で行われた複数の物理探査データを用いた (図 1a)

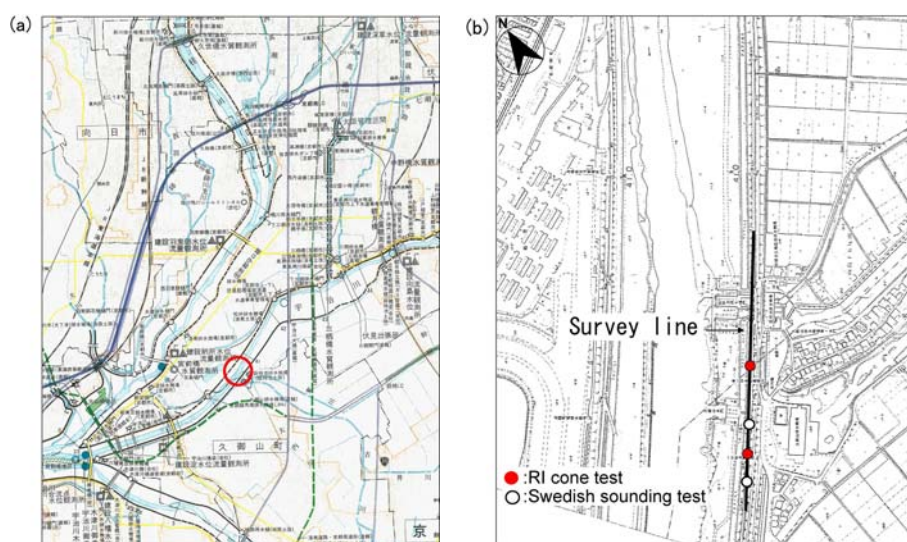


図 1.a (左) 宇治川調査地点

図 1.b (右) 調査測線と土質調査地点

この探査は、国土交通省近畿地方整備局近畿技術事務所が京都大学に委託し、河川堤防調査に適した手法を現地での試験探査を通して評価、選定し、調査目的にあった最適な探査システムを設計することを目的として実施された開発研究の一環として行われたものである（山本ほか、2008）。この探査地では、平成 17 年に旧排水樋門の開削工事やボーリング調査が実施され、堤体の内部構造がよく把握されている。探査測線上には、三箇所の開削埋め戻し部が存在し、うち二箇所に樋門が埋設されている。開削断面調査から、現在の堤防はかつての堤防を覆う格好で建設されたことが確認された。さらに、旧堤防の天端は、現堤防の天端から深度 3m 付近に位置し、堤防と基礎地盤との境界は、堤防の天端から深度 9m 付近に位置することも確認された（図 2）。また、この地域の地下水位は堤防と基礎地盤の境界よりもさらに深く、堤防の天端から 12～13m と推定されている。

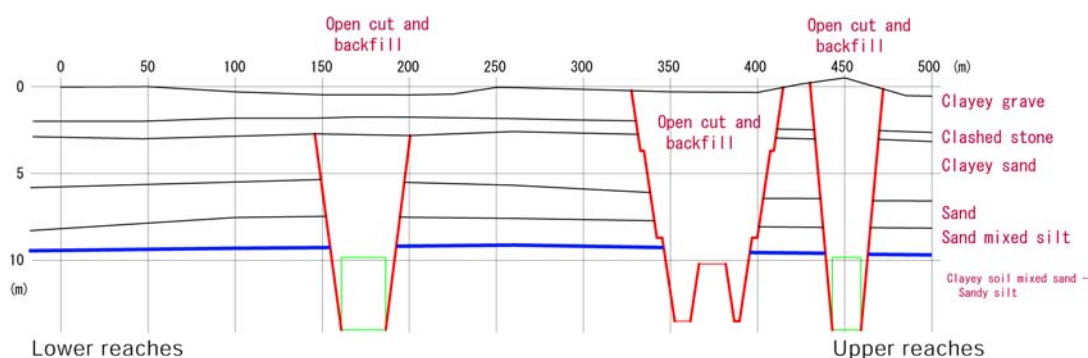


図 2 調査地点での土質分布。この場所は過去に開削され埋め戻されていた場所であり、青色より下部は基盤となっており、盛土はそれより上部である。

今回の複合物理探査においては、地中レーダ探査、表面波弾性波探査、電気探査、電磁探査が行われた（山本ほか、2008；鈴木ほか、2008）（図 1b）。本研究では、堤防内の構造的・土質的特徴を分類するために、地中レーダ探査、表面波弾性波探査および電気探査（牽引型）で取得されたデータを解析に用いた。地中レーダ探査から反射波形を取得したが、反射波形をそのまま堤防の構造的・土質的特長を評価するのに用いることは困難である。そこで、反射波形情報からサイズミックアトリビュート解析（Taner et al、1979）を行い、電磁波エンベロープと電磁波センブランスを計算した。表面波弾性波探査（Hayashi & Suzuki、2004）からは S 波速度を、電気探査からは比抵抗値を求めた。

2. 1 地中レーダ探査（電磁波エンベロープ・電磁波センブランス）

測線距離は 508m とし、データ取得には連続波レーダ探査装置（UGR-1 川崎地質製）を用いた。周波数は 5～160Mhz を使用し測定間隔は 0.5m とし、サンプリング間隔とデータ長はそれぞれ 2.5ns と 645ns とした。得られたデータは各測定点毎に 200

回のスタックを行った。測線中央部でのワイドアングル測定を行い速度解析を実施した。その結果電磁波の伝播速度は $89.4\text{m}/\mu\text{s}$ ($0.0894\text{m}/\text{ns}$)、比誘電率 11.2 を得た。解析ソフトには KIGAM 製 RAD Pro Ver.4.3 を使用した。取得された地中レーダのデータは、推定された電磁波速度を用いて深度変換を行った。

地中レーダの反射波形は位相情報を含む波形データであるのに対して、他の 2 つの物理探査データ (S 波速度、比抵抗値) は波形データではない (位相情報を含まない)。そのため、反射波形を他の 2 つのデータと同等に評価することは困難である。そこで本研究では、反射波形データに対してアトリビュート解析 (Taner et al、1979) を行った。アトリビュート解析とは反射法地震探査で開発された手法であり、波形データに何らかの数学的な変換を適用して求められる値であり、様々な種類のアトリビュート解析が提案されている。本研究では、以下に示すエンベロープ (Envelope) と、センブランス (Semblance) の 2 種類のアトリビュートを計算した。

エンベロープは位相情報を含まず、反射強度を表すアトリビュートである。エンベロープは時間に依存する振幅 $A(t)$ として、次式で定義される (Taner et al、1979)。

$$A(t) = \sqrt{f^2(t) + g^2(t)} \quad (1)$$

(1) 式において、 $f(t)$ は反射波トレースであり、 $g(t)$ は反射波トレース $f(t)$ にヒルベルト変換を施して得られる虚数成分である。今回の調査で取得された地中レーダに対して計算された電磁波エンベロープを図 3 に示す。区間 0-300m において、深度 2-5m の間に水平方向へ連続的に高い値が分布している。

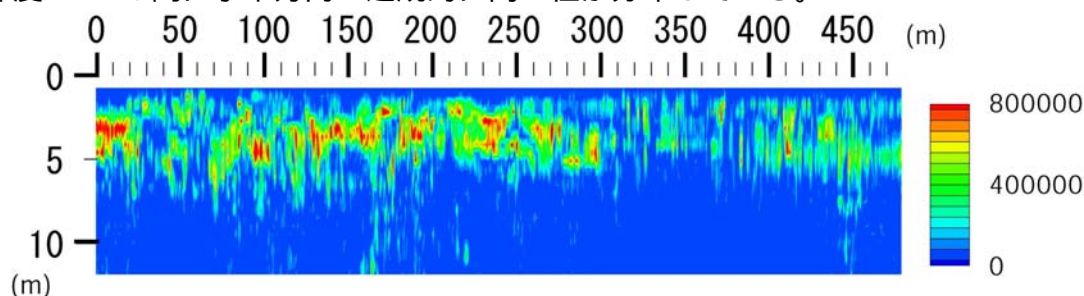


図3 地中レーダデータのエンベロープの値

センブランスは、ある時間ウィンドウの中に存在する、水平方向への反射イベントの連続性を表すアトリビュートである (Taner et al、1992)。高いセンブランス値を示す地点は水平方向への連続性が高いといえる。センブランス $\text{Semb}(t)$ は、次式で定義される。

$$Semb(t) = \frac{\sum_{\tau=-N/2}^{\tau=N/2} \left\{ \sum_{m=1}^M f_m(t+\tau) \right\}^2 - \sum_{\tau=-N/2}^{\tau=N/2} \sum_{m=1}^M f_m^2(t+\tau)}{\sum_{\tau=-N/2}^{\tau=N/2} \sum_{m=1}^M f_m^2(t+\tau)} \quad (2)$$

(2)式において、 $f_m(t)$ は m 番目のトレース波形、 M はセンブランスを算出する際に考慮するトレース数、 N は時間ウィンドウ幅である。本研究では、 $M=6$ (トレース)、 $N=2$ (サンプル)としてセンブランスを計算した。電磁波センブランス (図 4) は、0-300m の区間において、深度 0-7m の間に高い値を示す。

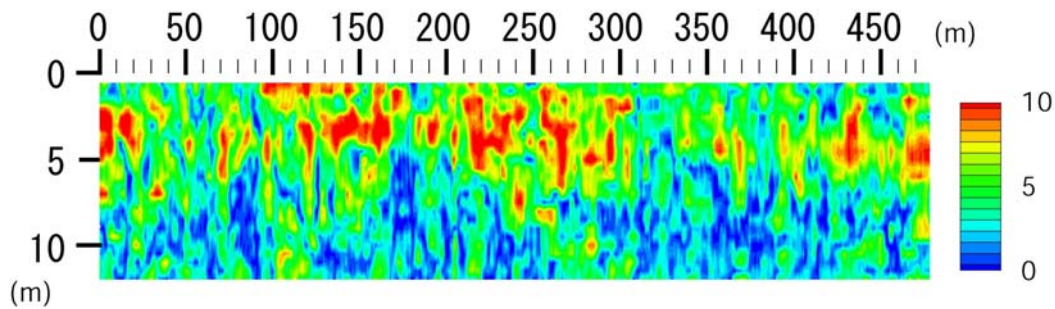


図 4 地中レーダデータのセンブランスの値

2. 2 表面波弾性波探査 (S 波速度)

本研究ではマルチチャンネル表面波弾性波探査 (Hayashi & Suzuki, 2004) を適用した。発震方法はかけや起振で、受信器は 4.5Hz 速度型ジオフォンを使用した。データ収録装置には、24ch デジタルデータ収録器 OYO 製 McSEIS-SXW を使用し、サンプリングレート 1ms、データ長 1024 とした。測線距離は 522m で、起振点間隔は 2m、重合数は 1 回 (スタックなし) とした。取得されたデータより、分散曲線を推定し、インバージョンを行って S 波構造の推定を行った。

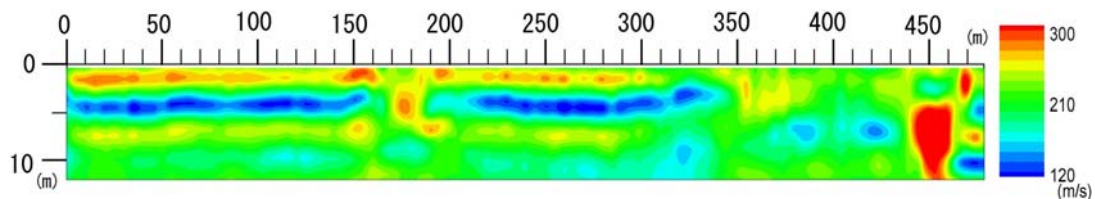


図 5 S 波速度分布

推定された S 波速度を図 5 に示す。S 波速度は、0-160m 区間と 200-310m 区間で層状の分布を示す。この層状の分布は、深度 3m、3-6m、6-9m、9-12m の区間で、それぞれ高い値、低い値、高い値、低い値を交互に示す。浅い部分で大きな絶対値を示し、深くなるにつれて絶対値が小さくなる。一方、160-200m 区間と、310-478m

区間ではブロック状の分布を示す。160-200m 区間では、深度 5m 付近に高速度域が存在している。310-430m 区間では、深度 7m 付近に低速度域が分布している。430-478m 区間では、深度 5m 以下に非常に高い速度領域が分布している。

2. 3 牽引型電気探査（比抵抗値）

牽引型電気探査装置（Geometrics 製 OhmMapper）を使用し、電極配置はダイポール・ダイポールとした。測定チャンネル数は 4ch で、測定回数は 4 深度同時測定を 2 回（計 8 深度）行った。測線距離は 482m である。

推定された比抵抗値の分布を図 6 に示す。上記の電磁波エンベロープ、電磁波センブランス、S 波速度に見られるような水平方向に卓越した分布は見られない。0-150m 区間に高比抵抗値域が広がっている。150m から上流側（図 6 右側）に向かって徐々に比抵抗値が低下している。ただし、150m 付近と、430-460m 区間では非常に低い比抵抗値の領域が広がっている。

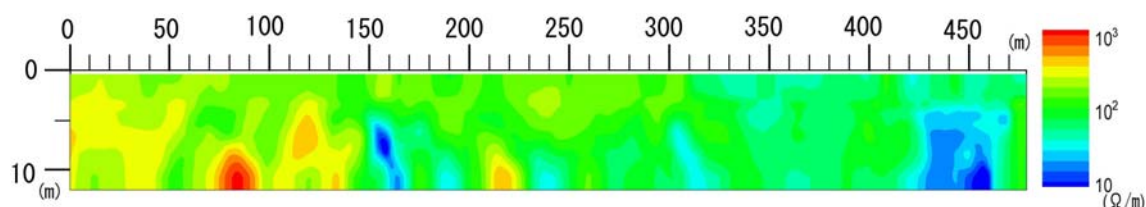


図 6 比抵抗値分布

3. 自己組織化マップを用いた分類

3. 1 自己組織化マップ（SOM）の概要

自己組織化マップ（SOM (Self-Organizing Maps)）(コホネン、2005) は、高次元のデータ間に存在する非線形な統計学的関係を、簡単な幾何学的関係を持つ像に変換するニューラルネットワークの一種である。図 7 に示すように、SOM は高次元のデータを持つ入力データを、類似度によって 2 次元のノード格子上に写像することができる。類似度を表現する基準としては、データ間のユークリッド距離を用い、ユークリッド距離が近いほど 2 つのデータは似ていると判断される。また、SOM はニューラルネットワークの中でも「教師なし」のニューラルネットワークであり、事前にデータの出力値がどの分類（クラス）に属するかを与える必要がなく、データ中に隠れた特徴を自動的に抜き出すことが可能である。

SOM はこれまでも、土木分野では斜面崩壊の安定性評価や（日外ほか、2004）地質分野ではアトリビュート解析による南海トラフ沈み込み帯におけるプレート境界面の物性評価（辻ほか、2004）や、元素分布から鉱物分布の推定（辻ほか、2007）など、データマイニングの手法として利用されて来た。河川堤防の評価に SOM を適用した場合には、上記のような特性から（1）多種類の探査データを同時に考慮す

ることが可能であること、(2) 探査データと地盤の工学的パラメータの相関について事前に検討する必要がないことが期待される。

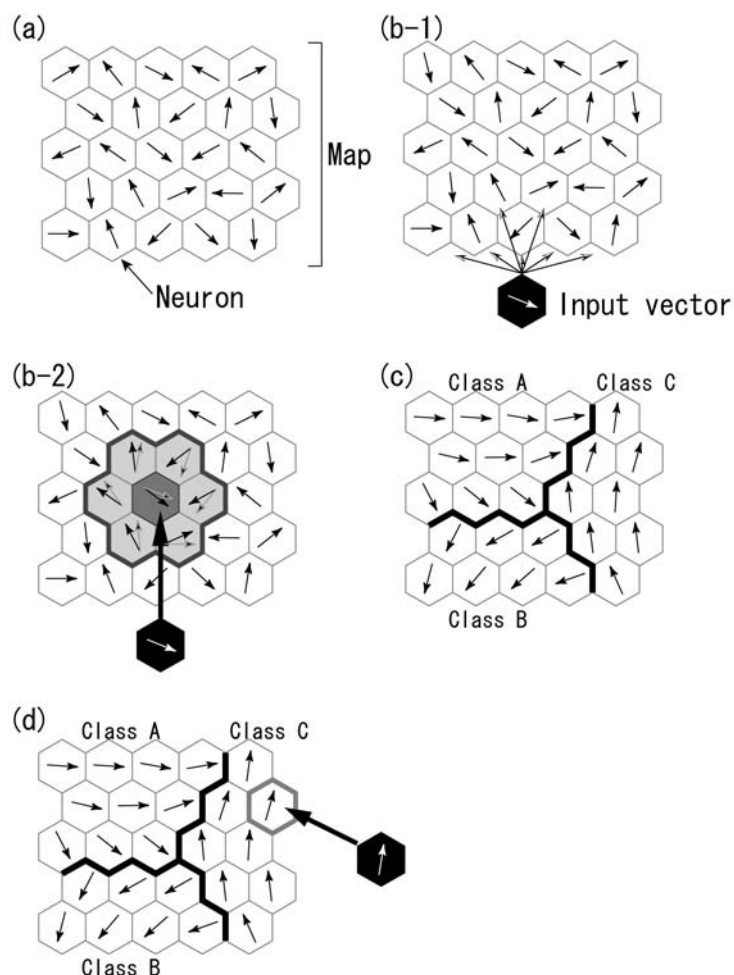


図7 SOMの概念図。(a)解析しようとするデータに対して複数の属性を選び、属性ベクトルを作る。次に属性ベクトルと同じ次元のランダムベクトルを2次元マップ上に分布させる。(b-1)解析しようとするデータベクトルを2次元マップ上のベクトルと比較し、ユークリッドの距離で最も近いものを選ぶ。(b-2)選ばれたベクトルを2次元マップ上で入力ベクトルで置き換え、さらに周りのベクトルをこれに合わせて少量修正する。(c)この操作を繰り返し行くと最終的に2次元マップ上のベクトルは、幾つかのクラスに分類される。(d)このマップ上で、解析したい属性ベクトルと比較し、どのクラスに分類されるかを確認する。

3. 2 探査データの規格化

今回用いる地中レーダ探査断面、S 波速度断面、比抵抗値断面はデータの取得方法が異なるため、取得された測線長、探査深度とサンプリング間隔が異なる。そこでデータの内挿を行い、データの規格化を行った。規格化後の測線距離を 478m とし、トレース間隔を 0.5m とした。一方深度方向には、深度を 12m、深度間隔を 0.5m として統一した。先に示した電磁波エンベロープ(図 3)、電磁波センブランス(図 4)、S 波速度(図 5)、比抵抗値(図 6)の断面図はすでに規格化されたものである。

3. 3 自己組織化マップ(SOM)による複合探査データの分類

(i) 入力データの選択

複合探査においては、分類したい地盤の数や目的によって、SOM に入力するべきデータを選択する必要がある。本研究では、水平方向に連続な構造(堤体部)と不連続な構造(埋め戻し部)の区分、含水率、土質粒径、締め固め度(N 値)を反映した分類を目標として、入力データを選択した。一般に地中レーダは地下の誘電率の違いによって反射するため、反射強度を表す電磁波エンベロープの値が大きければその地点は顕著な誘電率境界と考えられる。本調査地域では、誘電率の違いは土質の含水率によると考えられる。電磁波センブランスは水平構造の連続性を表し、値が大きければその地点の水平方向への連続性は高い。S 波速度は土の締め固め度(N 値)と相関があり(例えば今井・吉村 1970)、S 波速度が高ければその地点のN 値は高いと考えられる。また、S 波速度と比抵抗値は土質粒径を反映することが知られており、粒径の大きい土質では高いS 波速度・比抵抗値を示す傾向にある(例えば松尾他 2007)。地中レーダと同様、比抵抗値も土質の含水率を表し、含水率が低いほど高い比抵抗を示すと考えられる(例えば楠見ほか、2006)。

(ii) 入力データの基準化

今回 SOM に入力する 4 種類のデータは、値の範囲(最大値と最小値の差)や分散の度合いが異なる。分散の小さな変数は、相対的に SOM による出力結果への影響度が小さくなってしまう。各データの重みを等しくするために、分散が 1 になるように線形基準化を行った。

(iii) 初期マップの作成

SOM では、入力ベクトルとは別に、複数のノードを 2 次元平面の配列した学習マップを用意する。各ノードは、入力ベクトルと同じ次元を持ち、SOM での学習を行う上で事前に、ノードが持つベクトルを初期化する必要がある(図 7 (a))。初期の SOM においては、マップにランダムなベクトルを入力することによって初期化を行っていた。本研究では学習効率を上げることと、初期マップのランダム性によ

て生じる出力結果のばらつきを防ぐために、線形の初期化を行った（コホネン、2005）。

（iv）バッチ学習

マップに入力ベクトルを学習させる方法として、初期の SOM では入力ベクトル一つ一つ順に学習させていた。この学習方法は入力ベクトルの学習順序によって最終結果に偏りが生じること、学習に多くの時間がかかること、学習率係数と呼ばれる学習範囲を左右するパラメータが必要であることといった欠点があった。それに対し、本研究では一度に全ての入力ベクトルを学習させるバッチ型学習を採用した（コホネン、2005）。これにより、学習順序により生じる出力結果のばらつきを無くし、計算時間を短縮すると共に、学習率係数といったパラメータ設定を省略することができた。

（v）k - means 法

上記（iv）の学習によって最終的に得られるマップは、隣り合うノードが類似したベクトルを持つように配列している。このマップ上のベクトルの類似性に基づき、分類を行う。技術者が出力マップ上で分類することも可能であるが、本研究は客観的かつ半自動的な分類を行うために、k-means 法（麻生ほか、2003）を利用した。

k -means 法は、はじめに分類するクラス数（分割数）を入力し、分類を行う。本研究では、分類の結果を評価するための評価関数として、次式で表される Davies-Bouldin Index（DB index）（Davies & Bouldin、1979）を用いた。

$$DBindex = \frac{1}{c} \sum_{i=1}^c \max_{i \neq j} \left\{ \frac{\Delta(X_i) + \Delta(X_j)}{\delta(X_i, X_j)} \right\} \quad (3)$$

ここでは、c はクラスタ数、 $\delta(X_i, X_j)$ はクラスタ X_i と X_j におけるクラスタ中心間のユークリッド距離、 $\Delta(X_i)$ は X_i におけるクラスタ中心と各クラスタ要素とのユークリッド距離の平均値を表す。この DB index の値が小さい程、クラスタがコンパクトにまとまり、クラスタ間が綺麗に分かれている事を表す。k-means 法は計算の特性上、局所最適解しか求められないため、初期クラスタの中心位置によって最終結果に多少の差異が生じる。そこで、ランダムに 20 パターンの初期値を設定し、DB index を最小とする結果を適切な分類であるとした。

4. 分類結果

SOM と k-means を組み合わせた分類手法は分類するクラスの数に任意に決定することができるが、分類クラスの増加は解釈を複雑にし、結果として分類する実務的

な意味が薄れる。そのため、本研究では分類クラス数を 4 とした。SOM によって出力されたマップに対し、異なる 20 パターンの初期値を用いて k-means 法を実行し、DB index が最小となった分類結果（パターン c）を最も適切な分類結果とした（図 8）。

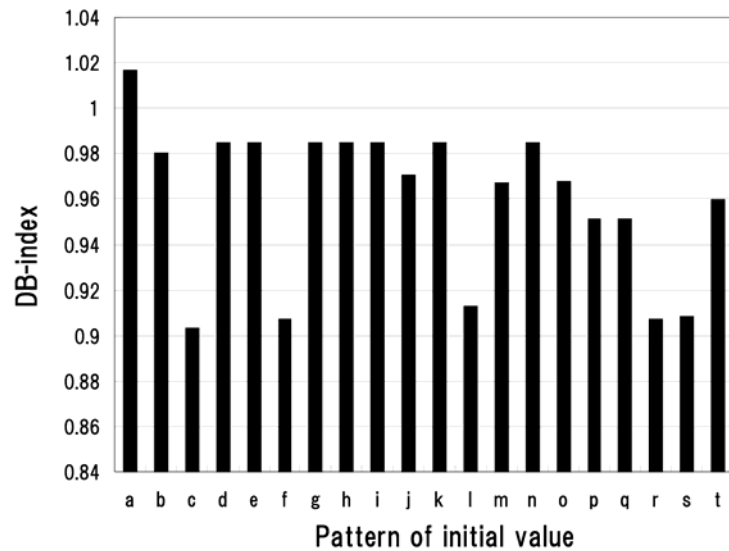


図 8 20 の異なる初期値に対する DB index 値。最小値は C の場合。

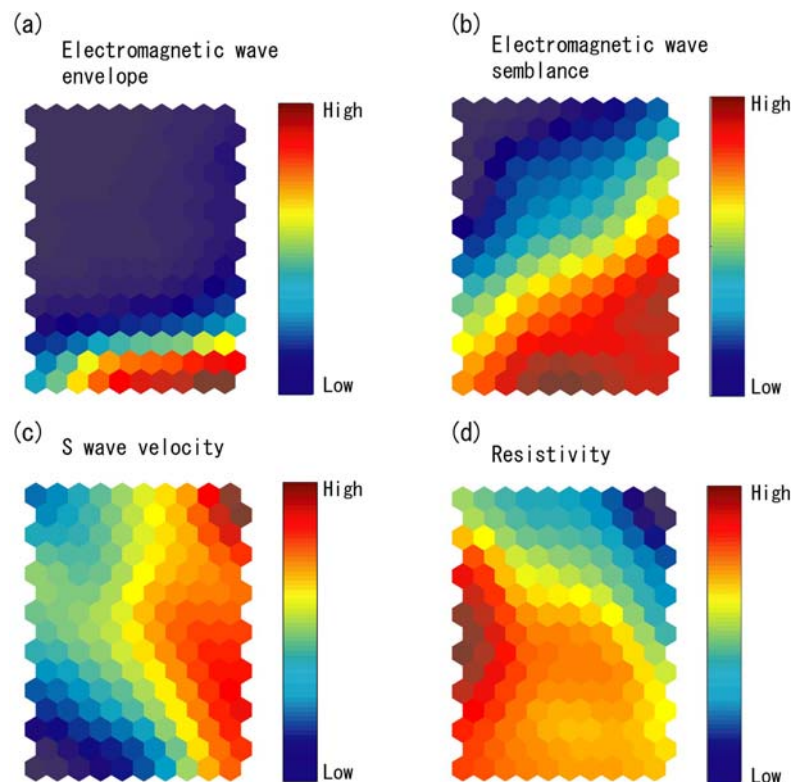


図 9 4 つの属性の分布。

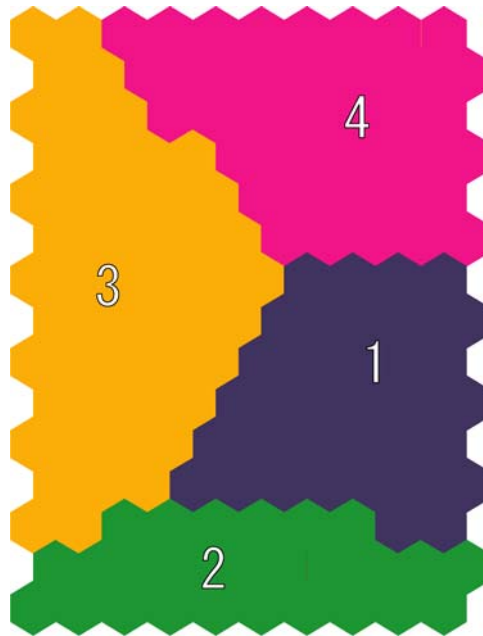


図 10 4つのクラスに分類された2次元マップ

出力マップ上での各物理探査データの分布を図 9 に、分類されたクラスマップを図 10 に示す。電磁波エンベロップと電磁波センブランスはマップの下方に高い値が分布し、マップの上方に向かって値が低下していく。S 波速度はマップの右側に高い値が分布し、左側に向かって値が低下していく。比抵抗値はマップの左側に高い値が集中し、右上に向かって値が低下していく。また、分類されたクラスの堤防内での分布図を、すでに掘削や開削に伴う調査の結果から推定されている土質断面図と共に示す(図 11)。

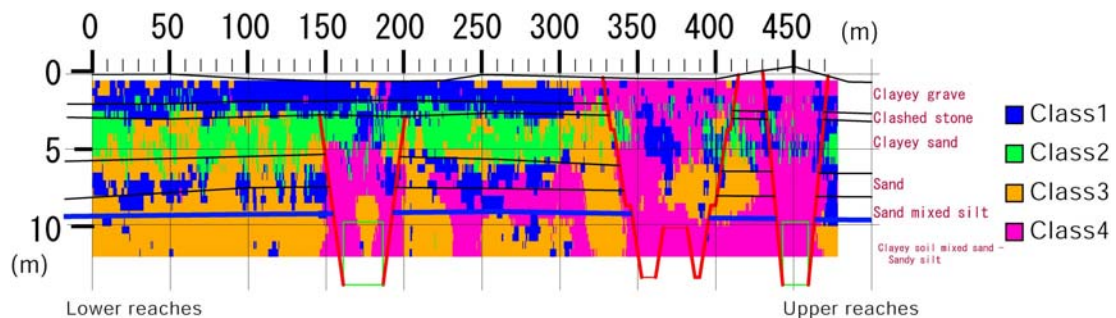


図 11 図 10 を用いて分類された堤防を構成している土質分布

5. SOM による地盤分類の有効性の検証

SOM と k-means 法によって、多種類の複合物理探査データに基づいた客観的な分類結果を得た(図 10 参照)。ここでは、分類結果の有効性を検証するために、解析

結果を 3。3(i)に挙げた分類目標に照らし合わせて評価する。

水平方向に連続な構造（堤体部）と不連続な構造（埋め戻し部）の区分

各クラスの電磁波センブランスの大きさをみると、クラス 1 とクラス 2 が高く、クラス 3 とクラス 4 が低い。クラス 1 とクラス 2 は開削・埋め戻しを受けていない堤防内に分布し、それぞれ水平方向に連続的に分布する。一方クラス 3 とクラス 4 は開削・埋め戻しの影響を受けた箇所と基礎地盤内に垂直方向に連続的に多く分布している。このことから、電磁波センブランスの違いを反映した分類結果は堤体の水平層と、開削・埋め戻し部および基礎地盤を適切に分類できている。

含水率 土質粒径

本調査地域では、地下水位が解析領域よりも深い（天端より深度 13m 付近に位置する）ことから、含水率は土質中の含水しやすい粘土の割合によって左右され则认为られる。また、含まれる粘土の割合が多ければ土質粒径も小さくなることから、本研究では含水率と土質粒径を土質における粘土の割合によって議論する。

まず、堤体の水平層を表すクラス 1 とクラス 2 の含水率と土質粒径について検証する。クラス 1 とクラス 2 の違いは電磁波エンベロープと S 波速度に表れており、クラス 1 は高い S 波速度を示し、クラス 2 は高いエンベロープを示す。クラス 1 は大粒径の土質であると推定され、逆にクラス 2 は小粒径の土質であると认为られる。実際に堤体内の推定土質分布との対応は、クラス 1 は粘性土質砂礫・碎石・砂といった粒径の大きい土質に対応し、クラス 2 は粒径の小さい粘性土質砂に対応している。粒径が大きい土質（クラス 1）は含水率が低く、粒径の小さい土質（クラス 2）は含水率が高いと推定される。クラス 2 で高いエンベロープを示すのは、含水率の低い土質（クラス 1）に含水率の高い土質（クラス 2）が挟まれることによって生じる、誘電率の差を反映していると推測される。

次に、開削・埋め戻し部および基礎地盤に分布するクラス 3 とクラス 4 の含水率と土質粒径について検証する。クラス 3 とクラス 4 の違いは比抵抗値の大きさに顕著に現れている。比抵抗値の大きいクラス 3 は大きい土質粒径を表し含水率は低いと推定され、比抵抗値の小さいクラス 4 は小さい土質粒径を表し含水率が高いと推定される。実際に堤体内の推定土質分布との対応で、クラス 3 は砂混じりシルトおよび粘性土混じり砂～砂質シルトといった粒径の大きい土質に対応し、クラス 4 は粒径の小さい開削・埋め戻し土に対応している。

締め固め度（N 値）

締め固め度について、RI コーン調査とスウェーデン式サウンディングにより取得された 4 地点での N 値と、その掘削区間に対応するクラスの分布を図 12 に示す。図 12 において、各クラスの境界と N 値の急変する深度がほぼ一致する（RI-1:5.25m、6.25m、RI-2:7.25-7.75m、SW-2:6.25-6.75m に顕著）。本分類結果では、このことから N 値の違いを反映してクラス分けが行われていることがわかる。土質の締め固め

度には S 波速度が対応していると考えられ、SOM の出力マップの S 波速度の分布から、クラス 2 は締め固め度が小さく、クラス 1 とクラス 4 が締め固め度が大きいと推定される。取得された N 値を対応するクラス毎に表示すると、推定通りクラス 2 はもっとも低い N 値を示し、クラス 1 とクラス 4 は比較的高い N 値を示す。ただし、クラス 3 については RI コーン調査の結果は高い N 値を示すが、スウェーデン式サウンディングの結果は低い N 値を示し、分類結果についての評価は困難である。

以上の検討から、SOM と k - means 法を用いることで堤防内の土質的特徴を反映した分類が可能であり、また SOM の結果における複数の物理探査データを読み取る事で、各クラスの表す地質工学的な土質性状を推定することが可能であることが示された。

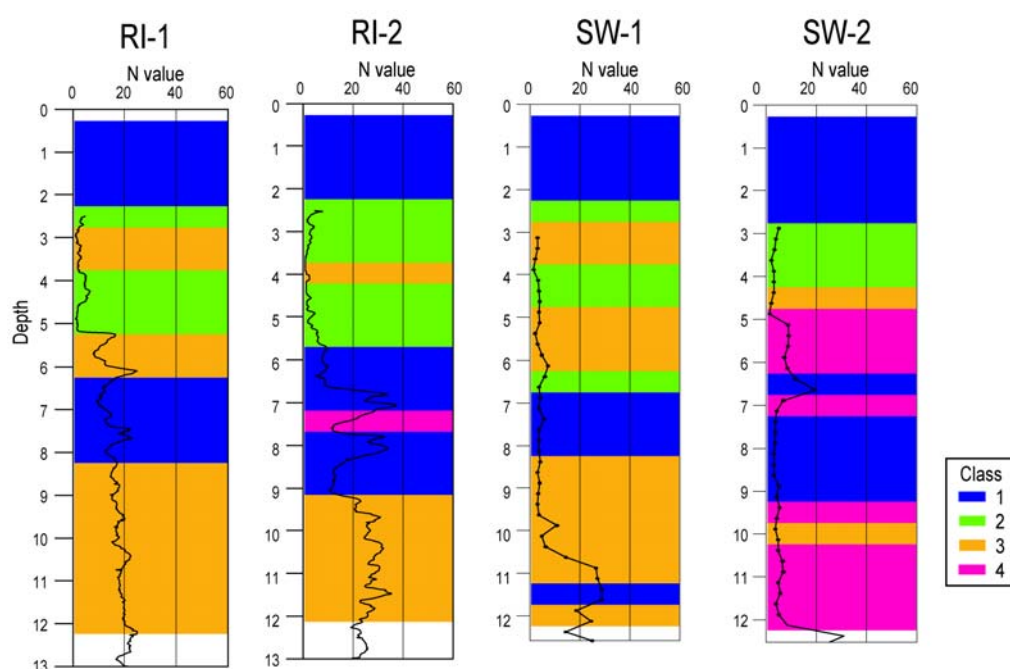


図 12 分類された土質と N 値との比較

6. まとめ

SOM を用いた分類は、理論的には無限に多くの種類の複合物理探査データに対して適用が行える。これは、クロスプロットを用いた分類手法で生じている同時に検討できる物理探査手法の数の制限を克服するものである。入力できる物理探査の種類に制限が無いことから、本研究で用いた物理探査データと異なる種類の物理探査データを入力することで、更なる土質情報の抽出が期待できる。例えば反射法弾性波探査から取得出来る反射波形データを入力することで、堤体内の音響インピーダンスを反映したクラス分けが可能となる。

“教師なし”のニューラルネットワークである SOM と、k-means 法を組み合わせることで、事前に各物理探査データと土質性状に関する詳細な予備知識無し

で、分類を行うことが可能である。さらに分類を行う上で事前に、分類の基準とするしきい値の設定を必要としないことから、客観的な出力結果が得ることができる。これは同時に、技術者の能力によらず、短時間に均質な解析結果を得られることを意味する。このような特徴は、長大な堤防における、複合物理探査の膨大なデータから迅速に異常箇所を抽出することを可能にする。この様に本研究で提案した複合物理探査データの解析手法は、より高度な調査や検討を行うための事前調査や概査への広い利用が期待できる。

[参考文献]

- 日外勝仁・斎藤敏明・伊東佳彦・橋本祥司 (2004): 数量化理論 II 類および自己組織化マップによる岩盤斜面危険度評価法に関する研究, *土木学会論文集*, **771**, 51-60.
- 麻生秀樹・津田宏治・村田昇 (2003): パターン認識と学習の統計学 新しい概念と手法 統計科学のフロンティア, 岩波書店
- Davies, D.L. and Bouldin, D.W. (1979): A cluster separation measure, *IEEE Transactions on Pattern Recognition and Machine Intelligence*, **1**, 2, 224-227
- 畠中与一・今里武彦・山口伸治・山本剛・糸川政孝・船曳誠二・京都大学, 河川堤防の内部構造調査と機器の開発研究 研究委員会(委員長: 芦田譲)(2007): 河川堤防の内部構造調査と探査機器の開発研究(その2)-三次元電気探査の適用性評価のための試験探査結果-, *物理探査学会第117回学術講演会論文集*, 123-125.
- 林宏一・稲崎富士・河川堤防の統合物理探査適用検討委員会 (2007a): 河川堤防への統合物理探査手法の適用性検討(その3)-物理探査情報の河川堤防評価への利用-, *物理探査学会第116回学術講演会論文集*, 116-119.
- 林宏一・稲崎富士・河川堤防の統合物理探査適用検討委員会 (2007): 河川堤防への統合物理探査手法の適用性検討(その5)-開削面におけるS波速度測定による表面波探査結果の検証-, *物理探査学会第117回学術講演会論文集*, 111-114.
- Hayashi, K. and Suzuki, H. (2004): CMP cross-correlation analysis of multi-channel surface-wave data, *Exploration Geophysics*, **35**, 7-13
- 今井常雄・吉村正義 (1972): 地盤の弾性波速度と力学的性質, *物理探査*, **25**, 283-292
- 今村杉夫・徳丸哲義・光畑裕司・林宏一・稲崎富士・河川堤防の統合物理探査適用検討委員会 (2007): 河川堤防への統合物理探査手法の適用性検討(その4)-比抵抗値探査手法の比較検討-, *物理探査学会第116回学術講演会論文集*, 120-123.
- 稲崎富士・河川堤防の統合物理探査適用検討委員会 (2007): 河川堤防への統合物理探査手法の適用性検討(その2)-千曲川堤防における統合物理探査-, *物理探査学会第116回学術講演会論文集*, 112-115.
- Kohonen, T. (1982): Simultaneous order in nervous nets from a functional standpoint, *Biological Cybernetics*, **50**, 35-41.

- Kohonen, T. (1984): Self-organization and associative memory, Heidelberg: Springer.
- コホネン, T.・徳高平蔵,・堀尾恵一・大北正昭・大藪又茂・藤村喜久郎 (2005): 自己組織化マップ, シェプリンガーフェアラーク東京.
- 国土交通省近畿地方整備局近畿技術事務所(2007): 平成19年度河川堤防の内部構造と探査機器の研究報告書; Internal paper.
- 楠見晴重・高橋康隆・中村真 (2006): 比抵抗値・弾性波速度の変換解析によるトンネル建設時の岩盤評価法, 土木学会論文集 *F*, **6**, 603-608.
- 松尾公一・徳丸哲義・河川堤防の統合物理探査適用検討委員会・稲崎富士・中西利典 (2007): 河川堤防への統合物理探査手法の適用性検討(その6)-比抵抗値・表面波探査結果と堤体物性の対比-, 物理探査学会第117回学術講演会論文集, 115-118.
- 高橋亨・田中荘一・山本剛・糸川政孝・船曳誠二・京都大学. 河川堤防の内部構造調査と探査機器の開発研究 研究委員会(委員長: 芦田譲)(2007): 河川堤防の内部構造調査と探査機器の開発研究(その1)-研究の全体計画と平成18年度研究成果の概要-, 物理探査学会第117回学術講演会論文集, 119-122.
- Taner, M. T., Koehler, F. and Sheriff, R. E. (1979): Complex seismic traces analysis, *Geophysics*, **44**, 1041-1063.
- Taner, M. T., Koehler, F. and Sheriff, R. E. (1992): Attributes revisited; Internal paper, Rock Solid Images.
- 辻健・松岡俊文・中村恭之・徳山英一・倉本真一・Bangs, N. (2004): 自己組織化マップを用いたアトリビュート解析による南海トラフ沈み込み帯におけるプレート境界面の物性評価, 物理探査, **57**, 121-134.
- 辻健・山口はるか (2007): ニューラルネットワークによる鉱物マッピング手法の改良: 電子線マイクロプローブアナライザー(EPMA)を用いた元素マッピングへの適用, 物理探査学会第117回学術講演会論文集, 1-4
- 渡辺文雄・河川堤防の統合物理探査適用検討委員会 (2007): 河川堤防への統合物理探査手法の適用性検討(その1)-河川堤防健全度評価への統合物理探査の役割とコンソーシアムの取り組み-, 物理探査学会第116回学術講演会論文集, 277-280.
- 山本剛・小段栄一・糸川政孝・京都大学. 河川堤防の内部構造調査と探査機器の開発研究 研究委員会(委員長: 芦田譲)(2008): 河川堤防調査における物理探査の適用性に関する研究-国土交通省近畿技術事務所 河川堤防の内部構造調査と探査機器の開発研究の成果-, 物理探査学会第119回学術講演会最新の物理探査事例集, 113-122.

GPS を利用した斜面監視サービス(shamen-net) の開発と成果

shamen-net 研究会 岩崎 智治
山口大学大学院理工学研究科 清水 則一

1 . はじめに

GPS (Global Positioning System) は、衛星からの電波を受信できる環境であれば、天候に関係なく地表面の三次元座標を取得できるため、ナビゲーション分野や測量分野では早くから利用が始まり、最近では主流を占めているといっても過言ではない。

地すべり計測の分野においても、10 年以上前から GPS の利用が始まり、近年ではかなり多くの計測事例が報告されている。しかし、必ずしも急速に普及しているとはいえず、その理由としては、計測精度、計測コスト、利便性に問題があるとされてきた。そこで、筆者らは、地すべり計測分野での GPS 計測の普及促進を目的に、GPS 計測技術・精度の向上や計測コストの低減、利便性（使いやすさ）の向上に取り組んできた。

本発表では、地すべりおよび道路切土斜面での計測事例を紹介し、当該 GPS 自動計測システムの「斜面健康診断」への適用性について考える。

2 . GPS 自動計測システムと監視センター

2.1 システムの概要

ここで用いる GPS 自動計測システム¹⁾²⁾は、地すべり計測などの地盤計測用に開発されたもので、従来の測量用 GPS 機器を流用した自動計測システムに比較して、小型・軽量・安価である（図 - 1）。

図 - 2 に、GPS 自動計測システムの概念図を示す。

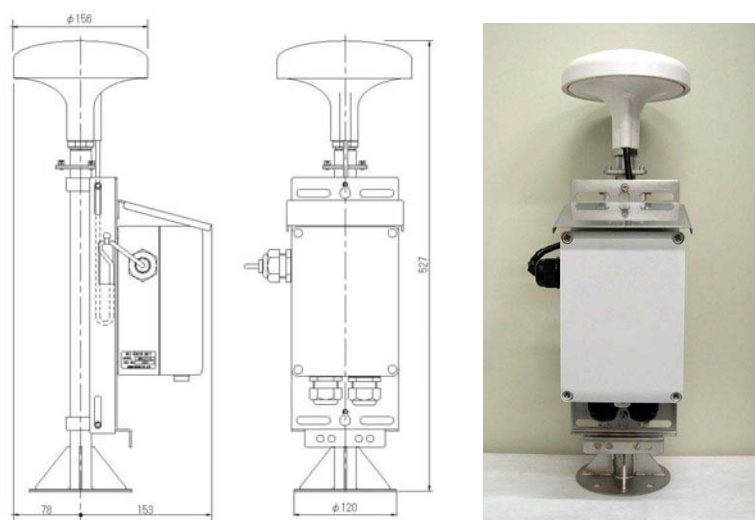


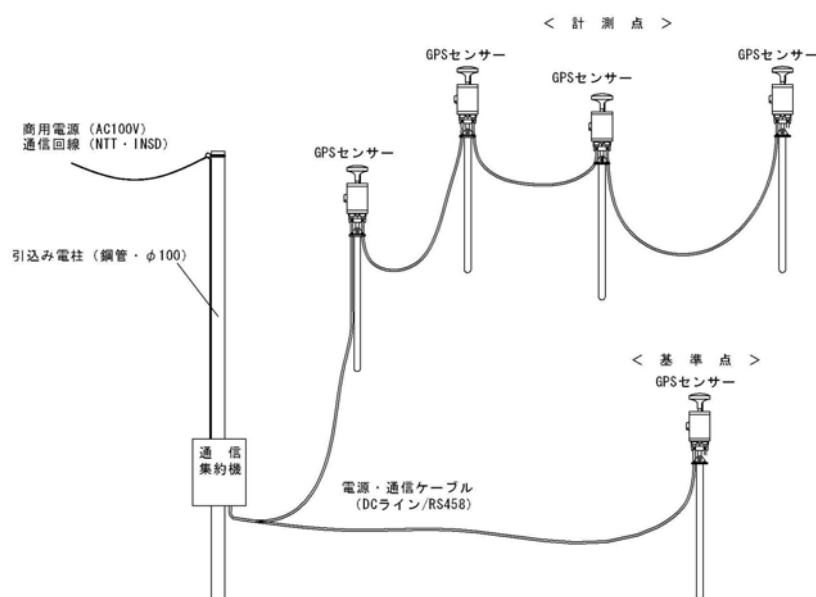
図 - 1 地盤計測用の GPS センサー

計測現場には、複数の GPS センサー（1 周波型）を設置し、それらを 4 芯ケーブルで数珠繋ぎに配線して通信集約器に導き、30 秒ごとに取得されるデータ（30 秒エポック）をインターネット回線で解析サーバーに送信する。

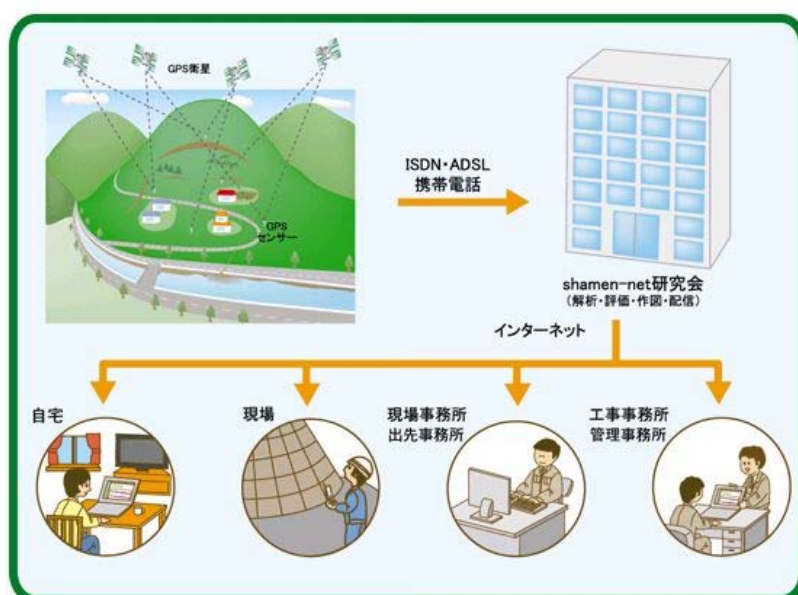
解析サーバーでは、基線解析（座標計算）および誤差処理を実施して地盤変位量を算出する。算出された変位量は、インターネットを介して関係者に常時配信される。

計測頻度は 1 回/時で、インターネットにアクセスできる環境であれば、PC や携帯電話を用いていつでもどこからでも計測結果を閲覧可能である。なお、情報セキュリティについては、現場ごとに設定される ID/PW により確保される。

また、当該 GPS 自動計測システムでは、インターネットを利用して計測結果を配信するため、計測現場が複数の場合にも統合管理・情報の共有化が容易である。



a) GPS 計測機器の構成図



b) システム全体の概念図

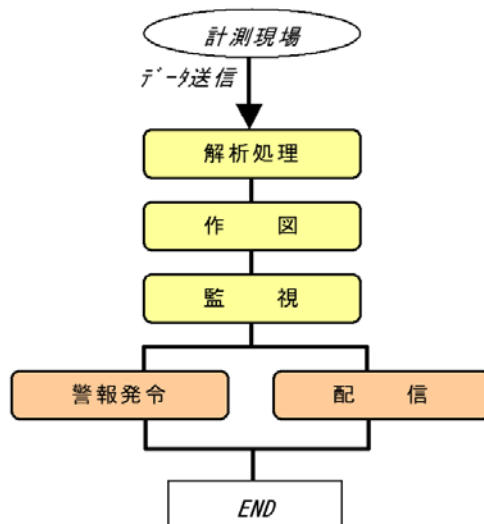
図－2 GPS 自動計測システムの概要

2.2 監視センター

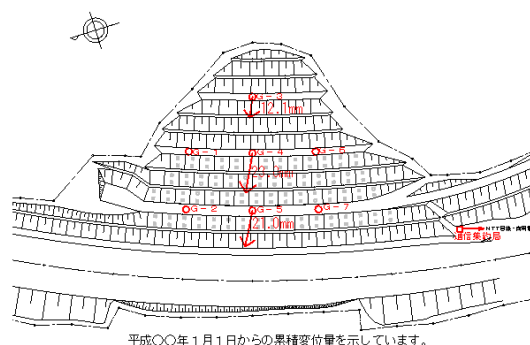
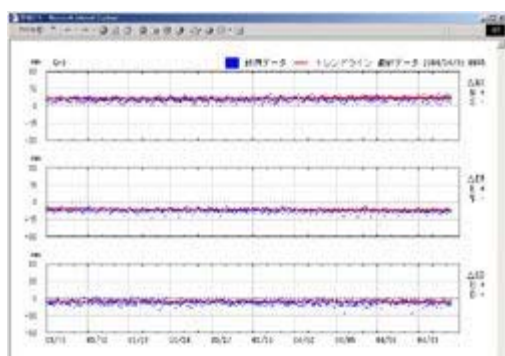
監視センターでは、データを受信した後に図－3の作業フローにしたがって解析・作図・監視・配信・警報発令を行なう。

解析処理作業では、1時間分のデータを使用してスタティック測位による基線解析（座標計算）を行うと共に、トレンドモデルと呼ばれる時系列統計処理³⁾⁴⁾⁵⁾による誤差処理を実施して水平方向で±1mm、鉛直方向で±1.5mm程度の精度で地盤変位量を算出する。

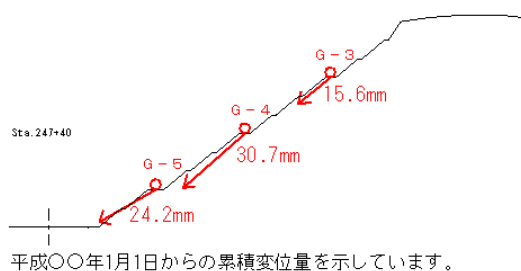
解析結果は、図－4のような各種図表にとりまとめ・作図されて、インターネットを通じて配信される。



図－3 監視センター作業フロー



b) 平面ベクトル図



測点番号	測点名称	測点座標	測点高さ	測点傾斜	測点方位	測点変位	測点変位率
001	測点001	100.000	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000
002	測点002	100.000	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000
003	測点003	100.000	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000
004	測点004	100.000	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000
005	測点005	100.000	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000
006	測点006	100.000	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000
007	測点007	100.000	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000
008	測点008	100.000	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000
009	測点009	100.000	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000
010	測点010	100.000	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000
011	測点011	100.000	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000
012	測点012	100.000	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000
013	測点013	100.000	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000
014	測点014	100.000	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000
015	測点015	100.000	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000
016	測点016	100.000	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000
017	測点017	100.000	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000
018	測点018	100.000	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000
019	測点019	100.000	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000
020	測点020	100.000	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000
021	測点021	100.000	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000
022	測点022	100.000	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000
023	測点023	100.000	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000
024	測点024	100.000	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000
025	測点025	100.000	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000
026	測点026	100.000	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000
027	測点027	100.000	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000
028	測点028	100.000	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000
029	測点029	100.000	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000
030	測点030	100.000	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000
031	測点031	100.000	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000
032	測点032	100.000	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000
033	測点033	100.000	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000
034	測点034	100.000	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000
035	測点035	100.000	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000
036	測点036	100.000	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000
037	測点037	100.000	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000
038	測点038	100.000	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000
039	測点039	100.000	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000
040	測点040	100.000	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000
041	測点041	100.000	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000
042	測点042	100.000	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000
043	測点043	100.000	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000
044	測点044	100.000	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000
045	測点045	100.000	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000
046	測点046	100.000	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000
047	測点047	100.000	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000
048	測点048	100.000	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000
049	測点049	100.000	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000
050	測点050	100.000	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000
051	測点051	100.000	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000
052	測点052	100.000	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000
053	測点053	100.000	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000
054	測点054	100.000	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000
055	測点055	100.000	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000
056	測点056	100.000	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000
057	測点057	100.000	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000
058	測点058	100.000	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000
059	測点059	100.000	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000
060	測点060	100.000	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000
061	測点061	100.000	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000
062	測点062	100.000	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000
063	測点063	100.000	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000
064	測点064	100.000	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000
065	測点065	100.000	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000
066	測点066	100.000	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000
067	測点067	100.000	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000
068	測点068	100.000	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000
069	測点069	100.000	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000
070	測点070	100.000	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000
071	測点071	100.000	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000
072	測点072	100.000	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000
073	測点073	100.000	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000
074	測点074	100.000	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000
075	測点075	100.000	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000
076	測点076	100.000	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000
077	測点077	100.000	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000
078	測点078	100.000	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000
079	測点079	100.000	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000
080	測点080	100.000	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000
081	測点081	100.000	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000
082	測点082	100.000	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000
083	測点083	100.000	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000
084	測点084	100.000	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000
085	測点085	100.000	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000
086	測点086	100.000	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000
087	測点087	100.000	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000
088	測点088	100.000	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000
089	測点089	100.000	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000
090	測点090	100.000	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000
091	測点091	100.000	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000
092	測点092	100.000	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000
093	測点093	100.000	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000
094	測点094	100.000	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000
095	測点095	100.000	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000
096	測点096	100.000	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000
097	測点097	100.000	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000
098	測点098	100.000	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000
099	測点099	100.000	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000
100	測点100	100.000	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000

d) 計測結果一覧

図－4 計測結果の表示例

また、監視センターでは、様々な管理基準値を設定することができ、管理基準値を超える変位が計測された場合には、PC や携帯電話へのメールや電話連絡等々の方法で警報を発令することができる。

＜管理基準値の一例＞

【累積変位】・・・ある時点からの累積変位量

【変位速度】・・・一定期間の変位量（例：mm/時、mm/日、mm/月等）

【傾 斜 角】・・・2 点間の距離と沈下量から 2 点間の角度（度 or ラジアン）を求める

3. 地すべりでの GPS 計測事例

まず、shamen-net 研究会で実施中の大規模地すべりでの長期計測の結果および GPS と他の計測との比較について紹介する。なお、第 3 章の内容は、第 46 回および第 47 回日本地すべり学会研究発表会講演集⁶⁾⁷⁾からの抜粋・一部調整したものである。

3.1 計測地の概要

GPS の長期計測は、高知県吾川郡仁淀川町長者地内の長者地すべり⁸⁾で実施している（図－5）。長者地すべりは、仁淀川水系長者川の右岸に位置し、幅 200m、長さ 900 m にわたり、平均傾斜約 20° をもって長者川に向かって滑動している。地質的には古生層の地すべりに分類され、古生層粘板岩の間に挟まれた蛇紋岩境界層地すべりでは我が国でも代表的なものの一つである。

長者地すべりは、昭和 38 年の台風 9 号を機に激しく活動を始め、昭和 39 年から地すべり調査および集水井や排水トンネル等の対策工が施工されている。その結果、昭和 39 年ごろに年間 2m 程度の移動が観測されていたが、現在は年間数 cm 以下にまで収束している。

3.2 GPS 計測点の配置

GPS 計測点は、長者地すべり A ブロックの下部Ⅱブロックに G-1、下部Ⅲブロックに G-2、長者川を挟んだ対岸の地すべり末端隆起部に G-4 の計 3 基を設置した（写真－1, 2 参照）。

G-1、G-2 の近傍には孔内傾斜計や地表面伸縮計、水位計等が設置されており計測結果の対比が可能な配置とした。

また、基準点 K-1 は、不動地盤と思われる長者川対岸の露岩部に設置した。なお、K-1 が不動であるかの確認を行うために、200m 程度離れた不動地盤上の仮基準点から通常の GPS 測量により定期的に基準点測量を行っている。

3.3 GPS 計測結果

GPS 自動計測システムによる地表面移動量の計測は、平成 18 年 11 月 1 日から開始した。



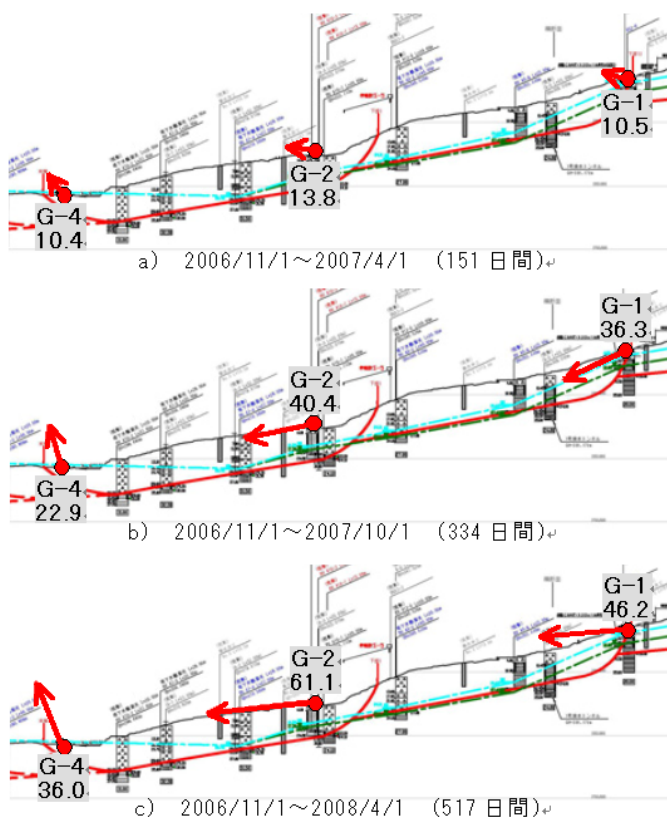
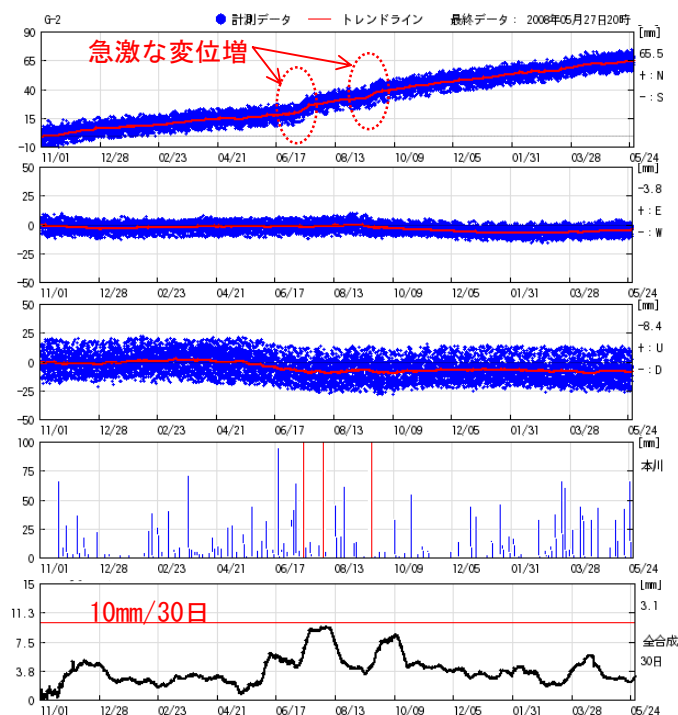
図-6 に G-2 の時系列グラフを示す。上から順に NS、EW、UD 方向の変位量、近傍のアメダス観測点（本川）の日雨量、最下段は 30 日当りの変位量である。

図のように、計測開始(2006/11/1)から現時点(2008/5/27)までの574日間の累積変位量は、N方向に65.5mm、W方向に3.8mm、沈下方向に8.4mmである。また、100mm/日を超える降雨時には急激な変位増加が認められる。現状は排水トンネルの着工直後であり、地下水排除工の効果がまだ発揮されていないためと考えられる。

図-7、図-8は、GPS で計測された三次元変位量を平面図および断面図上にベクトル表示している。

これら GPS で計測された変位ベクトルは、すべり方向とほぼ一致しており、GPS による地表面変位計測が非常に実用的であることが推察される。特に、G-4 の断面変位ベクトルは、明瞭な隆起方向の変位を示しており、G-4 付近が地すべり末端隆起部に位置していることがわかる。

一般に、地すべり末端部は境界が不明瞭で変位計測も難しいが、GPS 計測により境界の判別を明確化できる可能性が示唆される。

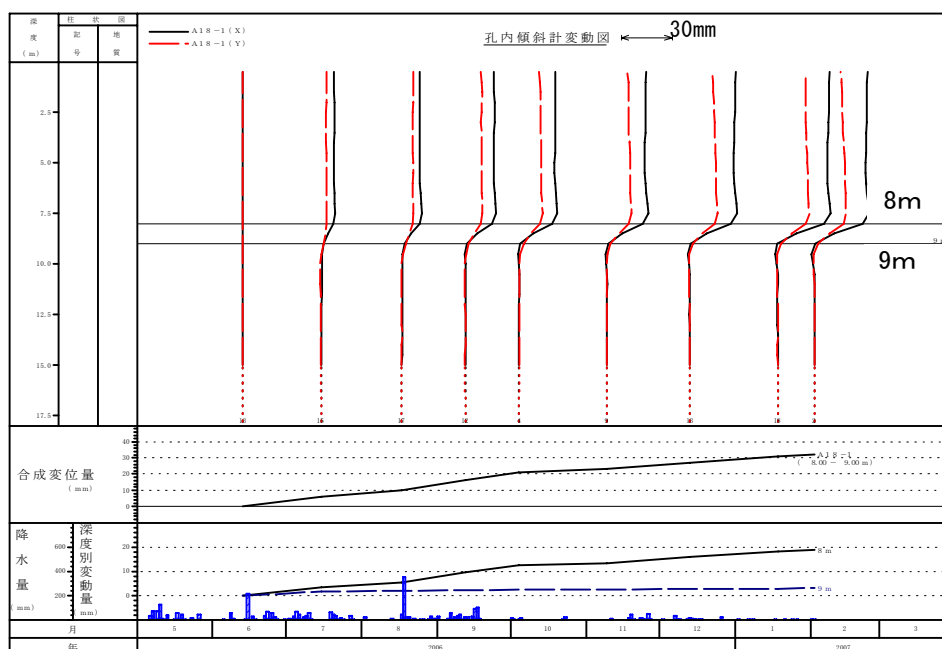


3.4 他の計測手法との比較（すべり面の変位と地表面変位）

従来の伸縮計や光波測量による移動杭計測では、三次元的な地表面変位量を連続的に計測することが難したため、孔内傾斜計などで計測されるすべり面の変位と地表面変位との比較が容易ではなかった。しかし、GPS は高い精度で地表面の三次元的な変位を得ることができる。そこで、GPS 計測で得られた地表面変位と孔内傾斜計によるすべり面変位を比較する。

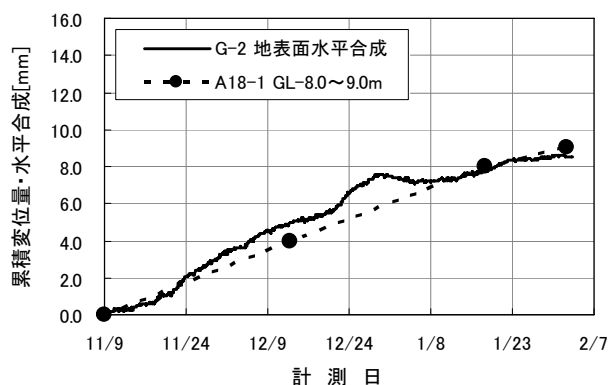
GPS 計測点の G-2 は、孔内傾斜計 A18-1 と同じ位置に設置されている。G-2 の計測結果を図－6 に、A18-1 の計測結果を図－9 に示した。

孔内傾斜計 A18-1 は、GL-8.0～9.0m で明瞭な変位の累積が計測されており、平成 18 年 6 月 13 日（初期値）から平成 19 年 2 月 2 日までに XY 合成で 32mm の累積変位量である。図－7 には、孔内傾斜計（すべり面）と GPS（地表面）の変位方向を矢印で示してある。両方の変位方向はほぼ一致し、共にすべり方向を示していることがわかる。



図－9 孔内傾斜計 A18-1 の計測結果

ここで、GPS・G-2 と孔内傾斜計 A18-1 の両計測が実施された平成 18 年 11 月 9 日～平成 19 年 2 月 2 日までの水平合成変位量を比較した（図－10）。図のように、両者はほぼ同じ変位量を示していることがわかり、先の変位方向が一致していることと合せて、G-2 地点ではすべり面と地表面の変位はほぼ同様であることがわかった。



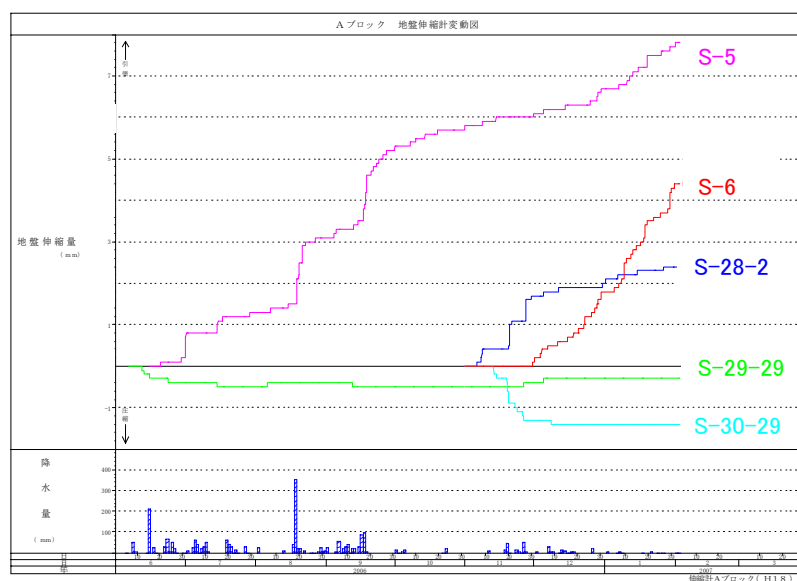
図－10 GPS・G-2 と孔内傾斜計 A18-1 の比較図

3.5 伸縮計と GPS の計測結果比較

伸縮計は、G-1 の近傍に S-28-2、S-29-2、S-30-2 が、また、G-2 の数 10m 上方に S-6 が設置されている。それら伸縮計の変動図を図－11 に示す。

伸縮計と GPS はやや離れているため直接の比較は難しいが、伸縮計の変位量は GPS や孔内傾斜計に比較してかなり小さな値を示しているのが特徴である。

これは従来から指摘されている①伸縮計はインバー線方向の一次元変位計測である、②伸縮計の方向がすべり方向に完全には一致しない、③高さ方向の変位が計測できない、④固定側の杭も変動していることが多い等々の理由によると思われる。



図－11 伸縮計変動図

3.6 3章のまとめ

地すべり地表面の変位計測は、従来から、光波測量による移動杭観測を行うことである程度可能であったが、ターゲットまでの見通しや計測手間、計測費用、高精度の常時確保が難しい、降雨時や夜間の計測ができない等々の問題があった。

GPS 自動計測は、天候や昼夜に関わらず連続的に高精度な三次元計測ができ、変位量、変位速度、変位方向の把握が容易で地すべり地表面計測として非常に有用である。

以下、長者地すべりでの長期計測の成果を列挙する。

- ① 約1年半の計測期間中に欠測や故障、再設置の必要はなく(メンテナンスフリー)、安定した計測が継続された。
- ② 他の地すべり計器に比較してメンテナンス費用が非常に安価である
- ③ 計測結果をインターネットで常時配信するためリアルタイムで変位状況の把握が容易である
- ④ 長者地すべりのように、分化が進んだ活動性地すべりでは、ブロックを跨ぐ伸縮計の変位は2点間の相対変位を計測することとなり、地表面の絶対変位を計測していない。このような場合にはGPS計測が適しており、逆に、GPS計測結果から伸

縮計の設置位置の選定や結果の解釈を行うことも有効である

- ⑤ 地すべり活動が活発な場合には孔内傾斜計が短期間で計測不能となることも多い。当該地のように、孔内傾斜計によるすべり面変位と GPS による地表面変位の相関性が高い場合には GPS 計測で孔内傾斜計の一部代替が可能となりコスト的にもメリットがある

4. 道路切土斜面での計測事例

つぎに、道路建設に伴う崩壊性地山の切土のり面施工時の計測ツールとして、GPS 自動計測システムが利用された事例を紹介する。なお、第 4 章は、第 12 回岩の力学国内シンポジウム論文集⁹⁾からの抜粋・一部調整である。

4.1 はじめに

近年、工事に対する厳しい社会的要請や市街地での近接施工の増加によって、情報化施工の重要性が高まっている。情報化施工は、設計段階での地盤情報の不確実さを施工中の現場計測によって明らかにして、次段階の設計・施工に反映させる手法であり、その中核技術である現場計測は、高い精度、リアルタイム性、迅速な計測情報の共有化が求められる。

特に崩壊性地山での切土工やトンネル坑口の施工では、施工時の安全管理と共に、岩盤斜面崩壊の早期把握による対策工事の効率化・低コスト化が求められ、情報化施工が必須と言える。

これまでは、切土工やトンネル坑口の施工時には、光波測量や孔内傾斜計等による地盤計測が一般的だが、多くの場合は人力による手動計測が主体であり迅速な地盤挙動の把握が難しい。また、これら従来の計測手法を自動化すると計測コストや計測精度に問題がある。

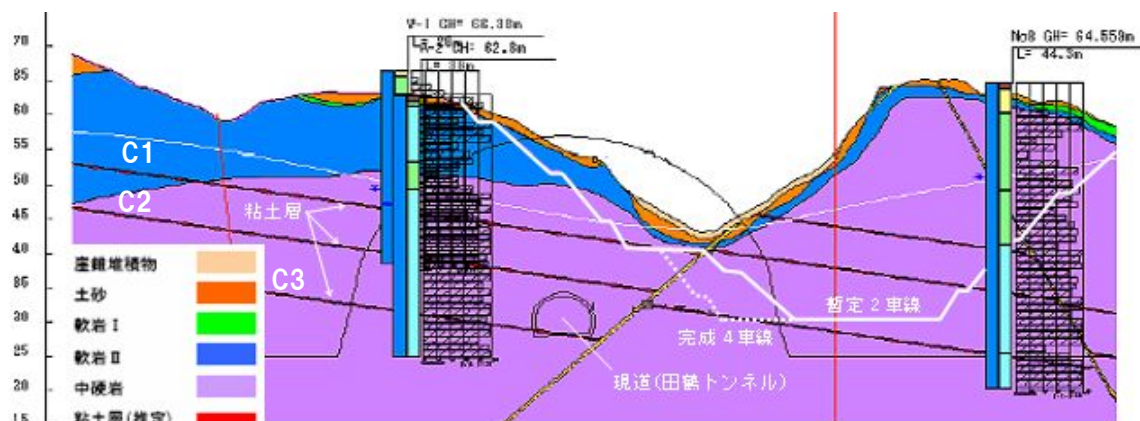
そこで、最新の GPS 自動計測システムによるリアルタイム地表面計測を、情報化施工のツールとして導入し、高精度リアルタイム計測を行うと共に、計測結果をインターネットで施工関係者に配信することで、常時の情報共有と迅速な変位状況の把握・対策工の実施を目指した。

4.2 施工現場の概要

GPS 自動計測システムを用いた情報化施工を実施した現場は、国道バイパス建設現場で、現道トンネル（延長 139m）の道幅が狭く大型車の離合が困難なため、トンネルの南側山地を開削し道路を拡幅することとなった。

しかし、当該地は、表層の風化が進んだ田辺層郡・砂岩泥岩互層地帯に位置し、図ー12のように事前調査で地すべり性崩壊発生の可能性がある低角度の粘土層 C1 および C2 が確認され、切土施工中の安全性だけでなく近接する現道トンネル（供用中）への影響が懸念された。

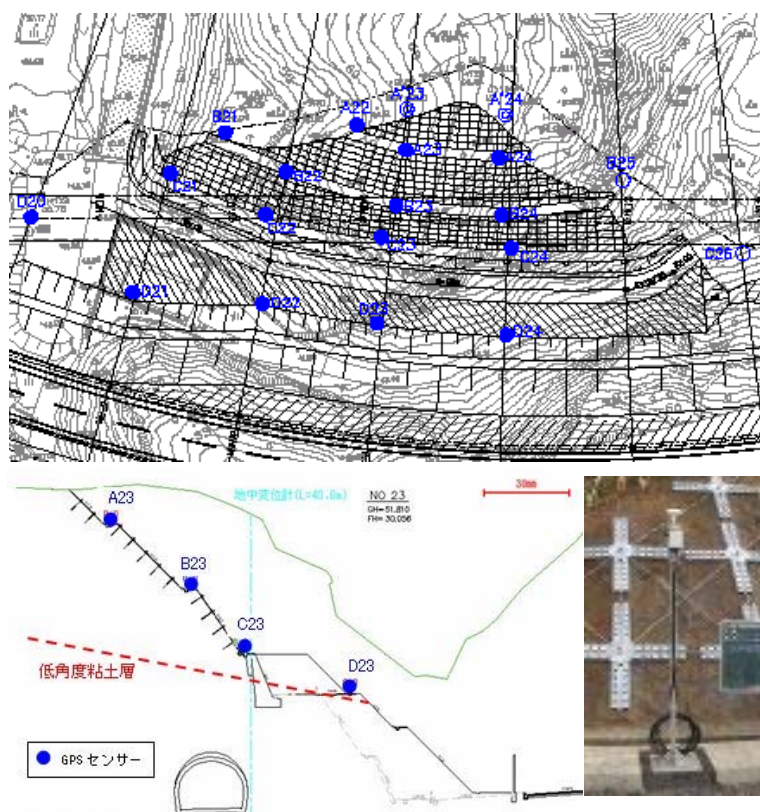
そこで、開削工事に際しては、まず、GPS 自動計測システムで地表面を常時観測しながら暫定 2 車線化の工事を行い、切土に伴う地すべり性崩壊の発生をリアルタイムに監視して必要に応じた早期の対策工を実施し、最終的に完成 4 車線化に至る工法を採用した。



図－１２ 切土工事の標準断面図

4.2 GPS センサーの配置

当現場においては、多数の GPS センサーを格子状に配置することで、のり面全体の変状を面的に把握することが可能であると考えた。そこで、GPS センサーは、事前の検討業務で判明した地すべり危険範囲に、20m ピッチで配置することとし(図－１３)、のり面小段上に切土施工の進捗にしたがいながら順次増設した。



図－１３ GPS センサーの配置図

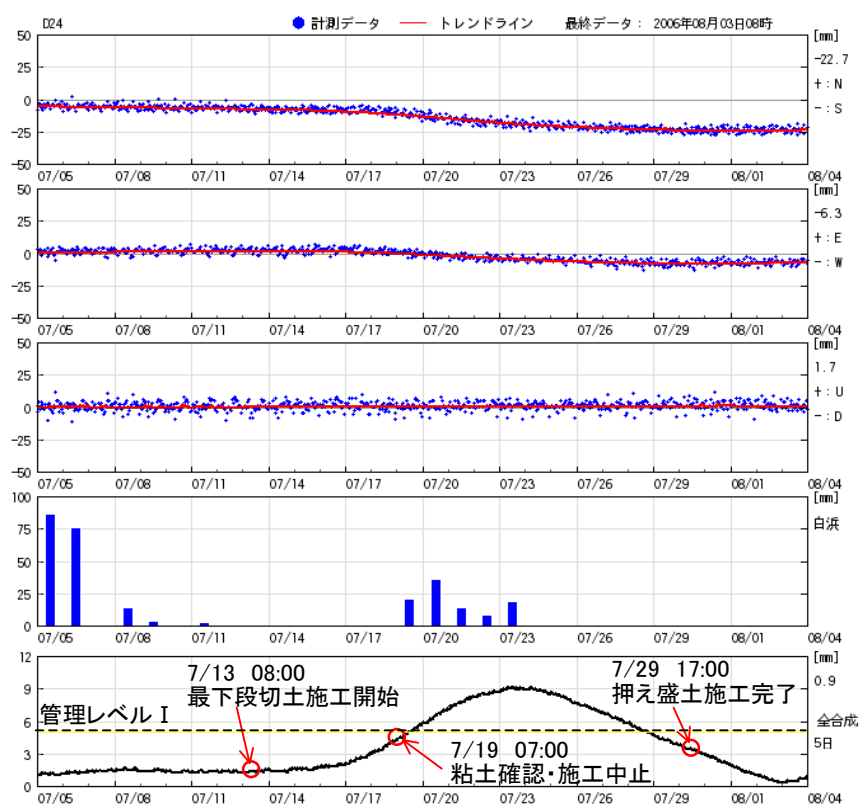
4.3 GPS 計測結果

当該工事では、暫定 2 車線化のための最下段切土施工中に低角度の粘土層 C1 をすべり面とする岩盤すべりが発生した。

図－14 は、GPS 自動計測結果の一例（計測点 D24）である。上から順に、南北・東西・上下方向の累積変位量、日降雨量および 5 日当りの変位量(変位速度)のグラフである。

図のように、最下段切土施工開始後の 7/16 から変位が発生し、変位速度が上昇し始め、7/19 朝に粘土層 C1（すべり面）を確認した時点で施工を中止したが、同日夜半には管理基準値(5mm/5 日)を超えた。また、施工を中止した 7/19 から 7/23 まで連続降雨があり、変位速度が上昇を続けた。

降雨が止んだ 7/24 以降は変位速度が低下したが、今後も降雨により変位速度が上昇する可能性が高いため 7/28 に緊急対策として押え盛土を実施し変位は収束した。



図－14 GPS 自動計測の結果図 (D24)

図－15 は、GPS で計測された変位量を面的に表現したものである。上図が平面変位ベクトル図、下図は平面変位コンター図で、最下段切土開始時から押え盛土施工完了時までののり面変位を時系列で示している。

この図から、のり面変位を面的に時系列で把握できたため、変位の方法や変位量の大きなエリアを視覚的にかつリアルタイムに検知することが可能であった。

なお、変位発生中の 7/20 には従来の光波測量では一時的に計測不能になるほど雨量強度が大きかったが、GPS 自動計測システムは問題なく計測できることが確認できた。

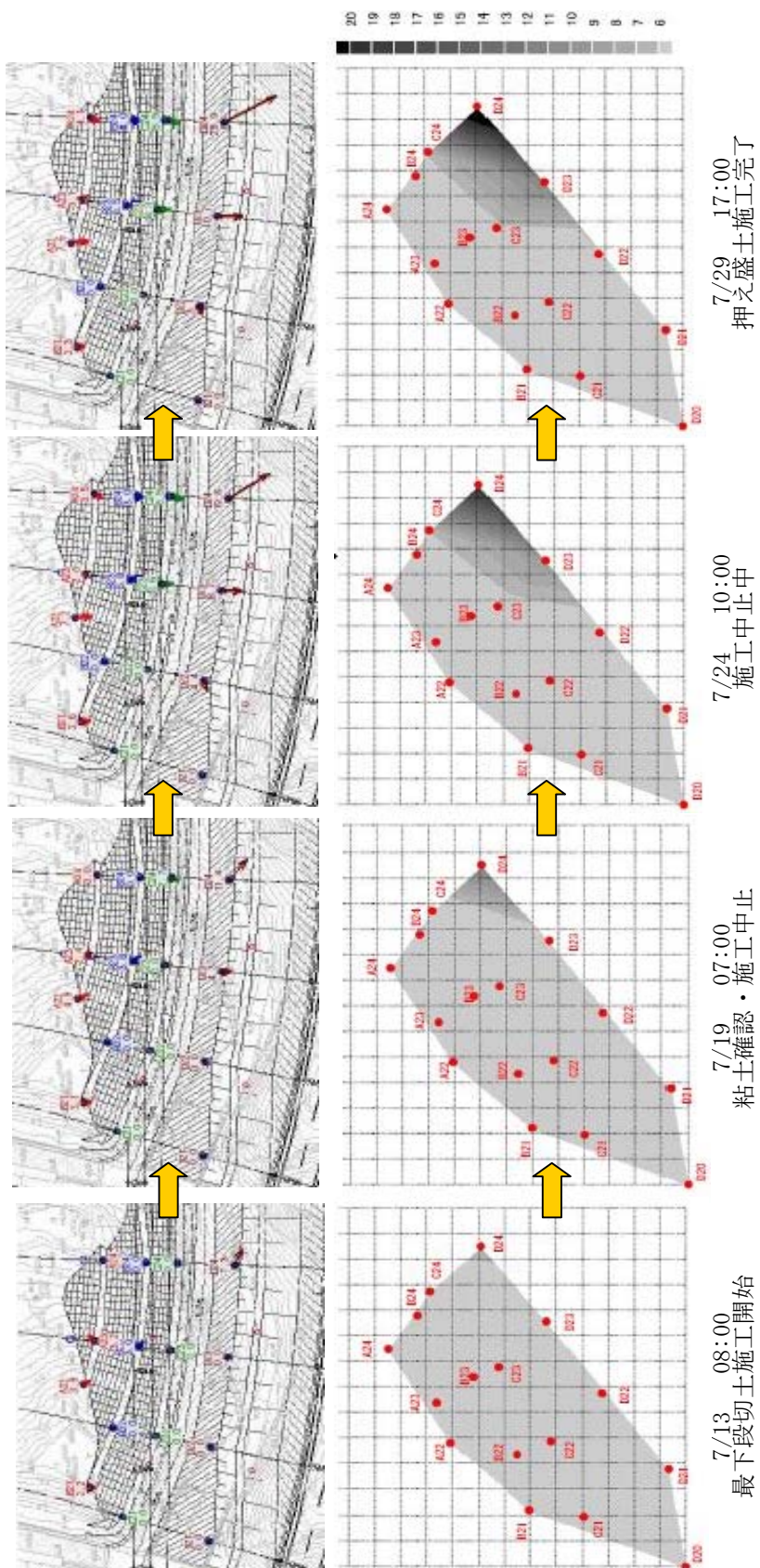


図-1 1 5 GPS 自動計測による面的な変位量の推移
(上段：平面変位ベクトル図, 下段：平面変位コンター図)

4.4 第4章のまとめ

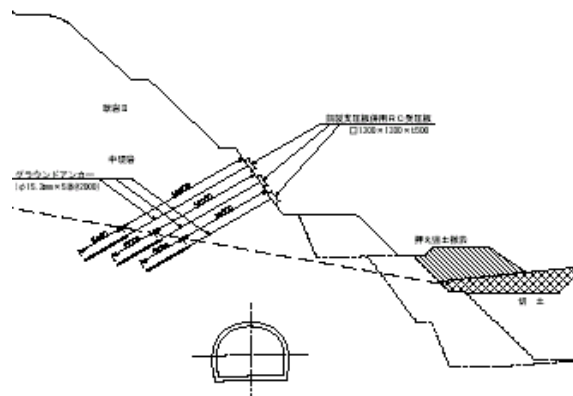
今回発生した初成の岩盤すべりは、低角度の粘土層 C1 をすべり面とし、すべりが進行すると非常に大規模な地すべりに発展すると考えられる。

しかし、本工事で用いた GPS 自動計測システムは、地表面の変位量を図－14 や図－15 のようなグラフや図面上にまとめ、常時インターネットで工事関係者に配信・情報共有したため、極く初期の段階で緊急対策を実施でき、比較的小規模な抑止力で恒久対策が可能となった(図－16、グラウンドアンカー工)。

恒久対策工の実施後に押え盛土を撤去したが、その後ののり面変位は認められず、結果として工事の安全性確保とともに対策工事費用の低減が実現できた。

本成果をまとめると、次のとおりである。

- ① GPS センサーを面的に配置することで初期段階の変状を面的に三次元で把握できた
- ② GPS は、従来の光波測量では計測できない豪雨時にも安定して計測できた
- ③ リアルタイムに計測結果を情報共有することで、工事の安全性確保と早期の対策実施による工事の効率化・コスト削減が可能であることが分かった
- ④ 一方、今後の課題として、インターネットによりリアルタイムに情報共有できるものの夜間や休日などは人的な対応が遅れることがあり、リアルタイムの施工体制確立が必要であることが明確になった。



図－16 恒久対策工断面図

5. おわりに

GPS 自動計測システムは、数年前に比較して、機器の小型軽量化や計測コストの低減、計測精度の向上が飛躍的に進み、地すべり計測の他にも切土施工時やフィルダム堤体の計測等々にも広く利用され始めている。

なかでも注目すべきは、既設道路のり面の維持管理・予防保全を目的とした GPS 自動計測システム利用の試みである¹⁰⁾¹¹⁾。

道路のり面の維持管理の計測では、1つの管理区域内に100を越す多数のり面があり、それら多数のり面を限られた数の計測機器で繰り返し計測(健康診断)する必要がある。そのため、計測手法としては、設置・移設が容易な地表面変位計測が主体となり、GPS 自動計測システムへの期待は大きい。

今後は、道路維持管理や地すべり等斜面防災における「健康診断ツール」として、GPS 自動計測システムの更なる利便性向上に尽力したい。

<参考文献>

- 1) shamen-net 研究会. 2006, GPS 自動計測システム. 平成 18 年度地すべり学会研究発表会新技術紹介セッション
- 2) 岩崎智治, 清水則一他. 2002, 道路斜面の維持管理を目的とした計測評価システムの開発. 土と基礎, Vol. 50 , No. 6, Ser. No. 533, pp25-27
- 3) 清水則一他. 1998. GPS 変位モニタリングシステムによる斜面変位計測結果の平滑化に関する研究. 資源と素材, Vol. 114, pp. 397-402
- 4) 松田浩朗, 清水則一他. 2002. GPS による斜面変位計測結果の平滑化処理法と変位計測予測手法の実用性の検証. 土木学会論文集, No. 715/Ⅲ-60, pp. 333-343
- 5) 岩崎智治, 清水則一他. 2003. 斜面維持管理のための GPS 計測評価システムー計測精度と誤差処理についてー. 平成 15 年度全国大会第 58 回年次学術講演会, Ⅲ-222
- 6) shamen-net 研究会. 2007. GPS による地すべり地表面計測の実用性検証①. 第 46 回地すべり学会研究発表会研究発表講演集, pp. 313-316
- 7) shamen-net 研究会. 2008. GPS による地すべり地表面計測の実用性検証②. 第 47 回地すべり学会研究発表会研究発表講演集, pp. 347-348
- 8) 全国地すべり対策協議会. 1972. 長者地すべり. 地すべり記録集, NO. 6
- 9) 岩崎智治, 清水 則一他. 2008. 情報化施工のツールとしての GPS 自動変位計測システムの適用事例. 第 12 回岩の力学国内シンポジウム論文集, pp. 641-645
- 10) 下野宗彦, 清水 則一他. 2009. 予防保全を目的とした GPS 自動計測監視システムの導入. 第 28 回日本道路会議講演集 (発表予定)
- 11) 岩崎智治, 清水 則一他. 2009. 高速道路の予防保全を目的とした GPS 自動計測監視システムの開発. 第 28 回日本道路会議講演集 (発表予定)

RTK-GPS を用いた斜面定期健康診断構想

京都大学防災研究所 福岡 浩

日本GPSソリューションズ株式会社 佐藤一敏・松浦友紀

1. はじめに

GPS 測量技術は地上受信機の改良などによって、近年精度が急激に向上している。特に移動する測点の位置を正確にリアルタイムに求める、いわゆる RTK (リアルタイム・キネマティック) GPS は図 - 1 に示すように、測点間で (基地局から移動局へ) 受信データを即時に伝送し、移動局側で受信したデータと併せて干渉解析を高速で行うことによりリアルタイムに移動局のアンテナの位置を出力するシステムである。カルマンフィルタ演算等を用いた効率的なファームウェア (受信機内部の ROM に書き込まれたソフトウェア) の性能向上により、現在では 1 秒から最高 20 Hz 程度の高速サンプリングで測位を行うことができるようになった。受信開始後、移動点側の測点をフィックスするまでに 5 衛星必要であるが、その後は、4 衛星からの信号を受信できていれば測位可能である。基準局から移動局へのデータ転送には、国内では特定小電力無線が最も多く、携帯電話や FM などが試されていたが、電波の到達範囲には数 km 程度と制限が多かった。そこで 2000 年にインターネット経由でデータを転送するネットワーク対応型の RTK-GPS 受信機が登場しており、より長基線での RTK-GPS の利用が可能になりつつある。RTK-GPS の応用分野としては従来、道路や露天掘り鉱山の簡易測量 (大村他, 1998) や、長周期地震計としての応用、火山活動中の地殻変動等への応用研究が進展中である。国土地理院では、電子基準点のうちの一部 RTK-GPS の基地局として運用を始めており (図 - 1) 広範な普及を目指している。

RTK-GPS による地すべり移動の連続観測は既に国内で実施され始めており、荒井他 (1997)、丸山他 (1998) らは長野県・倉並地すべり地において有線で接続した DGPS の国産受信機によって 5 分サンプリングを行い、連続的に三次元移動量を観測することに成功した。さらに、GPS 測量技術の応用と普及グループ (1998) らは、上記倉並地すべり地において観測された RTK-GPS のデータのノイズを統計的に処理する中で、数ミリオーダーの微小変位を検出するために必要な最小時間・データ数を決めるための研究を実施している。これらの研究から、RTK-GPS の地すべり地への応用は十分実用的な精度を有することがわかってきた。しかし、連続観測に用いる場合、国産受信機を用いても、1 台 60 万円程度かかり、伸縮計と比べるとまだ高価な印象がある。

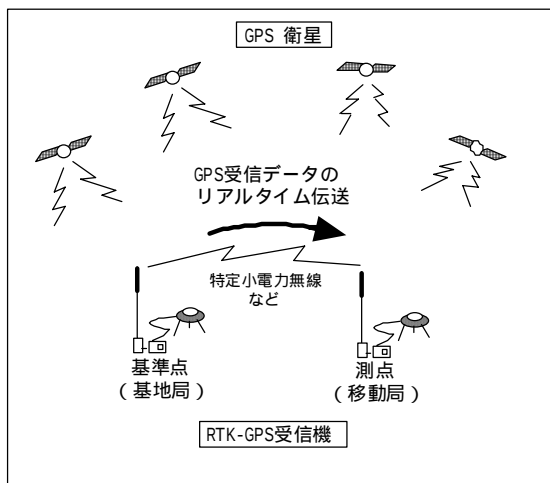


図 - 1 RTK - GPSの原理(左)と国土地理院が設置している基地局

従来のGPS静止測量では測量に数時間かかり、しかも受信機データをすべて回収してコンピュータで解析して初めて測位結果が得られた。これは、現場では結果がわからないことを意味する。しかし、RTK-GPSは、現場でリアルタイムに測位結果を得ることが出来るという特徴を有し、GISや適当なソフトウェアと組み合わせることで、過去の観測結果とその場で比較できる。さらに、従来地すべり移動観測に利用されてきたGPS静止測量では1cm+1ppmの測量精度のために20秒～30秒のサンプリング間隔で1測点あたり2時間～4時間の観測が必要であった。一方、数分間程度の短い時間のRTK-GPS観測でも高速サンプリングによって従来の静止測量と同程度の精度を確保できる可能性がある。これは、既存のRTK-GPS受信機の出力は、通常の後処理方式の干渉測位可能な形式のデータを出力できないが、1秒以下のサンプリングとデータ出力が可能のため、測点上でアンテナを固定し、多数のデータを短時間に取得すれば、正規分布型のばらつきが得られる可能性が高く、適当な統計処理を施すことで短時間に高精度の測位が可能であると思われたからである。そこで、地すべり移動観測にRTK-GPSによる短時間測位が利用できるかどうか、(1)測位結果の安定性の試験、(2)微小変位時の精度評価、および(3)地すべり地における試験観測を行った。

2. 安定性評価

2. 1 連続測位試験

地すべり移動観測は通常、定期的に1年～数十年という長期にわたり行う。そのため、RTK-GPSの測位結果が衛星配置によって変わらないことが絶対必要条件である。衛星配置は約12時間周期で一巡するので、1秒サンプリングで24時間連続観測を実施し、時間による測位位置の片寄り・変化等がないかを確

認した．使用した受信機は Trimble Navigation 4700 二台で，国土地理院の敷地内で実施した．データ転送は有線で行った．基線長は 2.5m である．結果を図 - 2 に示す．図 - 2 (a)(b) はそれぞれ，最初の 1 2 時間，後の 1 2 時間の測位点の平面分布である．約 2 cm のほぼ円形の範囲内に収まっており，時間と共に大きくずれることはないことがわかる．なお，この同じ試験をビルの屋上で行った際には，ばらつきが異常に大きくなった．これは，周辺のビルや，屋上の壁からの反射によるマルチパスの影響だと思われる．RTK-GPS による短時間測位はビルが乱立する都市中心部では精度が期待できない可能性がある．

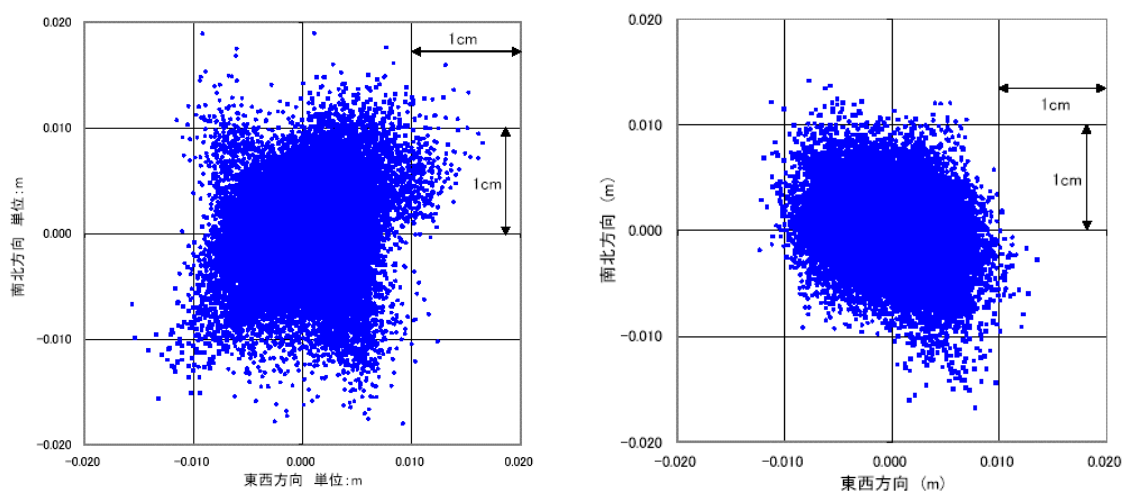


図 - 2 1 2 時間の連続 R T K - G P S 測位結果の平面分布．(a) 1999 年 1 月 26 日 15:00-2:59, (b) 同, 3:00 - 14:59．

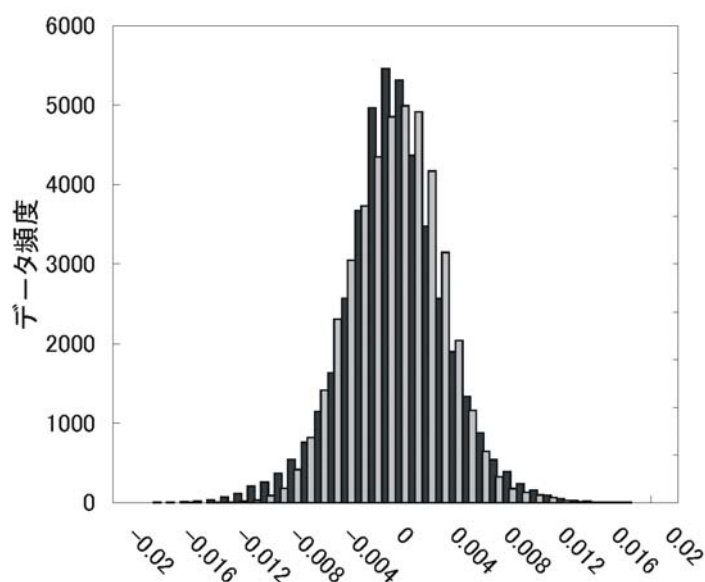


図 - 3 1 2 時間の連続 R T K - G P S 測位結果の東西，南北成分のヒストグラム．濃：南北方向（北が+），淡：東西方向（東が+）単位はm．

図 - 3 は 1 秒ごとの測位点の東西および南北のヒストグラム（1 mm 単位）である。平均値（ゼロ）の周囲に左右対称，正規分布形を示した。標準偏差は 3 mm となり，静止測量で得られる標準偏差とほぼ同程度の精度を示すことがわかる。RTK-GPS の出力結果からは干渉測位など後処理を再びおこなうことができないので，静止測量の精度と簡単に比較は出来ないが，オーダー的にはほぼ同等の精度を有することがわかる。

2. 2 繰り返し電源投入試験

GPS の干渉解析では，最初整数値バイアスを決定する際に，真値とは異なるローカルミニマムに解が落ちてしまい，本当の位置から数 cm ～ 数十 cm 離れたところの周辺に測位点がばらつく可能性がある。これは再現性の信頼性の問題であり，ファームウェアの性能に依存する。この影響は受信機の電源を投入するたびに，全く同じ点付近でばらつくのか，あるいは離れた点付近でばらつく，という現象として現れる。そこで，繰り返し電源を投入する試験を行った。具体的には，1）電源を投入し，2）50 点ほど表示したところで電源を落として，3）再投入する，という手順を 25 回繰り返した。試験地は日立造船情報システム本社ビル屋上である。図 - 4 に結果を示す。図 - 4 (a) は，25 回の電源投入後，各回 50 点ずつの測位点のばらつきである。17 回目に右下にのびる不規則な結果があったが，マルチパスの影響と考えられる。その他の回ではこのような飛びは見られなかった。その他の 24 回ではこのような飛びは見られなかった。図 - 4 (b) に各回の 50 点の平均値の点のばらつきを示す。グリッドは 1 cm 間隔である。すべての点が ± 1 cm 以内に入っており，繰り返し電源投入試験において高い安定性を示した。

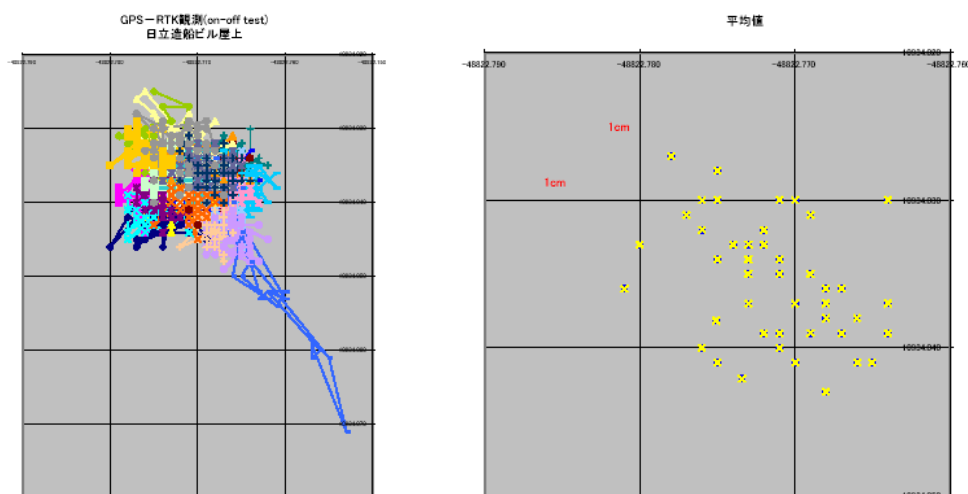


図 - 4 受信機の電源投入を繰り返した際の測位点分布。(a) 25 回の電源投入後，各回 50 点ずつの測位点のばらつき。グリッド間隔は 1 cm。(b) 各回の 50 点の平均値の点のばらつき。グリッドは 1 cm 間隔。

3. 短時間測位での微小変位試験

RTK-GPSを地すべり移動観測に使用するためには1～2cmの変位でも正確に捉えられることが必要である．そこで水平面上で直交方向へ可動なアンテナ台を作成し，RTK-GPSが2cm程度の地すべり移動を5分間(300 epochs)で正確に捉えることができるか調べた．片方のアンテナは固定し，もう片方を東西，南北にそれぞれ，2cm および 10cm 動かし，移動量を測定した．上下方向にも1.3cm 移動させた．使用した受信機はTrimbleNavigation 4700 二台で，データ転送は有線で行った．試験地は前述と同じ，国土地理院のグラウンドである．東と北に移動させた試験結果の経時変化を図 - 5 に示す．東方向に 2cm，10cm 動かしたところ，ばらつきの平均値と移動量との誤差は 4mm 以内で，標準偏差は約 3mm であった．北に移動させた場合は東西方向の移動量は0のはずだが，若干西方向の変位が認められる．これは移動方向が真の南北から外れていたためと思われる．南北方向の移動試験では誤差は 4mm 以内，標準偏差は 6mm 以内であった．上下方向の移動試験では誤差は 6mm で，標準偏差は従来の静止測量と同様，8 mm と大きくなった．これらの標準偏差を RTK-GPS の精度と見なすと，1～2cm 程度の移動を短時間 RTK-GPS により検出することは可能であると思われる．

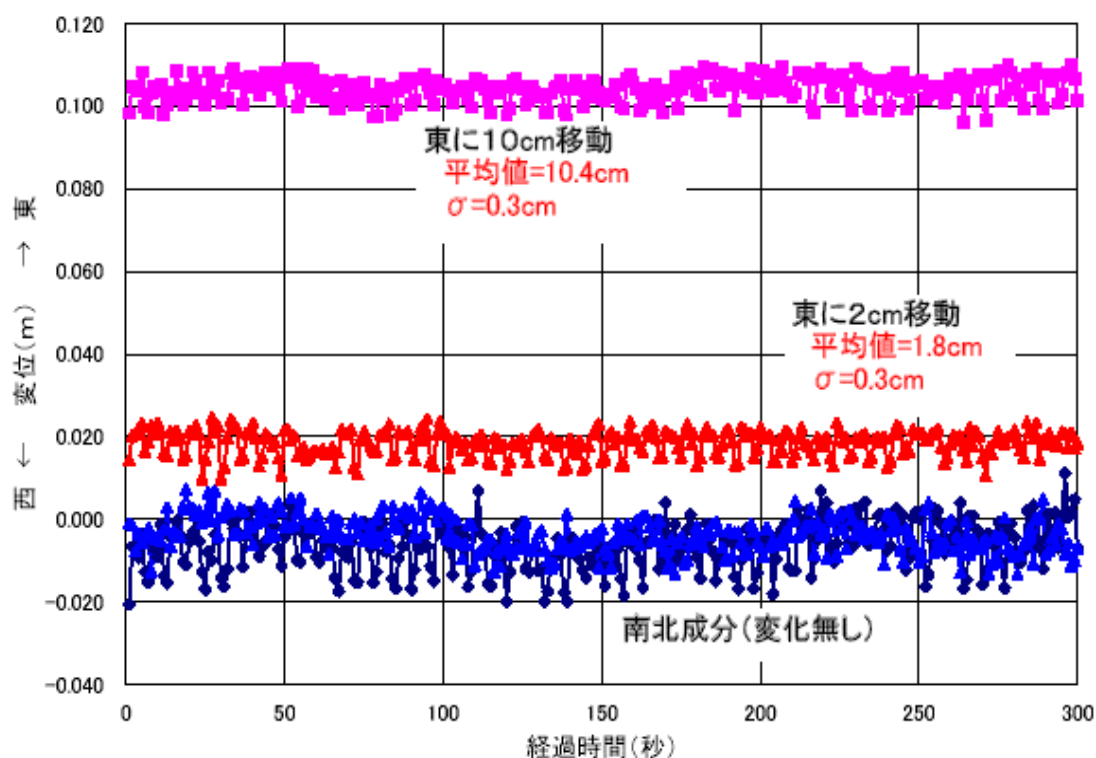


図 - 5 短基線でアンテナを水平に 2 cm，10 cm 動かした微小変位試験の測位結果 (経時変化)．

4. 地すべり地での試験計測

斜面により衛星配置に制限を受ける地すべり地の測点において，RTK-GPS 測量がどの程度の分散を持つかを調べた．従来GPS 静止測量による移動観測が実施され，現在は連続観測も行われている高知県・怒田地すべり地を試験地とし，受信機は Trimble Navigation 4700（基地局）と 4800（移動局）を使用し，平成 10 年 4 月と 10 月，平成 11 年 10 月の 3 回，それぞれ 2 日間にわたり，各点 2 回ずつ観測を行い結果を比較した．不動点が不明であること，山間地域では特定小電力によるGPS データの長距離転送が難しいことから，国土交通省により連続観測を行っている点を基準点として，対岸に電波中継点を設置して，他の測点の位置をRTK-GPS により測位を行い，測位結果のばらつきを調べることにした．図 - 6 (a)は現地の測点配置図，図 - 6 (b)は測点 A での RTK-GPS 受信機と国土交通省の連続観測点(図 - 6 (a)中の測点 A)である．国土交通省が設置した連続静止観測点は怒田地すべり地の縦断方向に設置しているが，RTK-GPS の測点は横断方向の移動状況を調べるため，国土交通省のもうひとつの連続静止観測(図 - 6 (a)中の測点 E)を含み，測点 B～N のように 13 点を設置した．なお，国土交通省の連続静止観測点の基準点は，約 1 km 北の地すべり地外に設置されている．

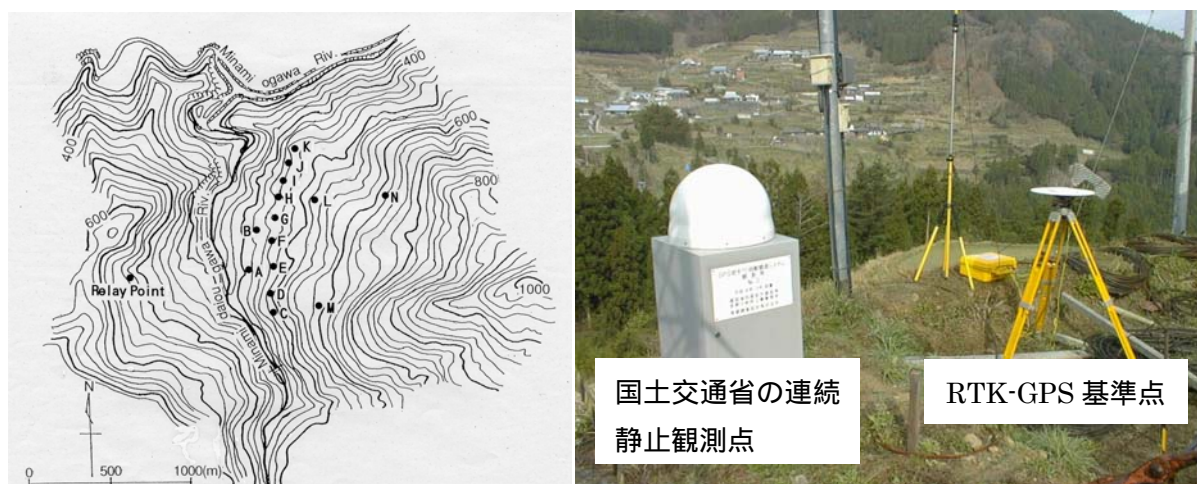


図 - 6 怒田地すべりでの RTK-GPS 観測．(a) 測点分布図，(b)測点 A での RTK-GPS 受信機と国土交通省の連続観測点．

図 - 7 は測点 D で 5 分間，1 秒サンプリングで得られた 300 エポックの測位点の東西，南北それぞれの成分の分散を示すヒストグラムである．平均値を 0 として表示した．受信機メーカーによる公称精度の水平 $1\text{cm} \pm 2\text{ppm}$ ，上下 $2\text{cm} + 2\text{ppm}$ より狭い範囲内に分布し，標準偏差は東西方向 2mm，南北方向は 3mm であった．この試験では，手持ちの二脚で気泡管の簡易水準器によって支えており，安定した条件ではなかったが，上記の結果を得ることが出来た．この結果から，RTK-GPS

は従来の静止測量と大差ない3～6mmの精度が可能で、地すべり移動観測にも十分応用可能であること、また従来の静止測量（2時間以上）と比べると20倍以上のコストパフォーマンス向上をもたらす可能性があることがわかる。

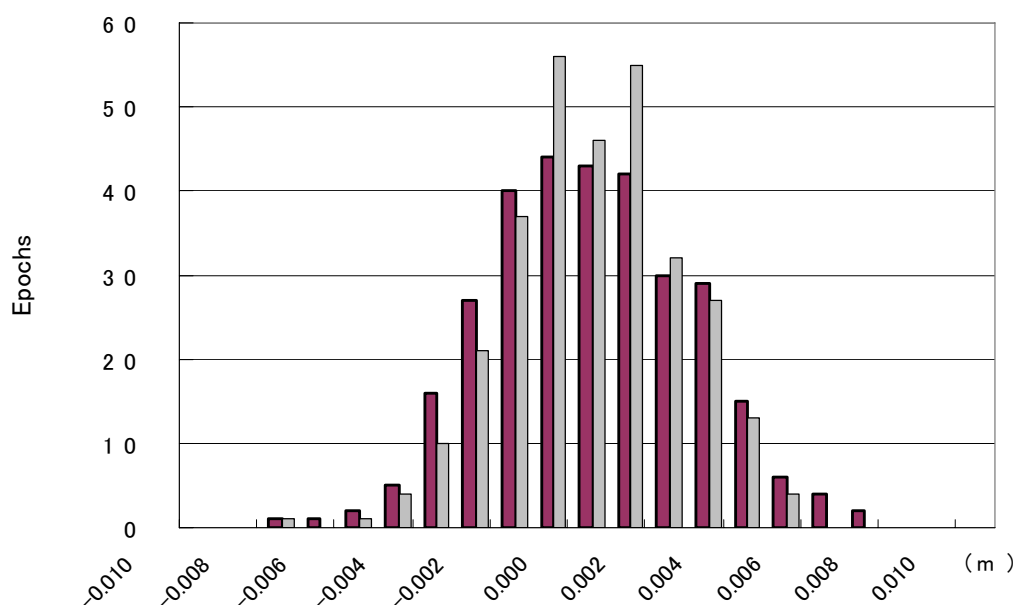


図 - 7 怒田地すべり地のD測点の5分間の測位データのばらつき．淡：東西，濃：南北，平均値を0とした．

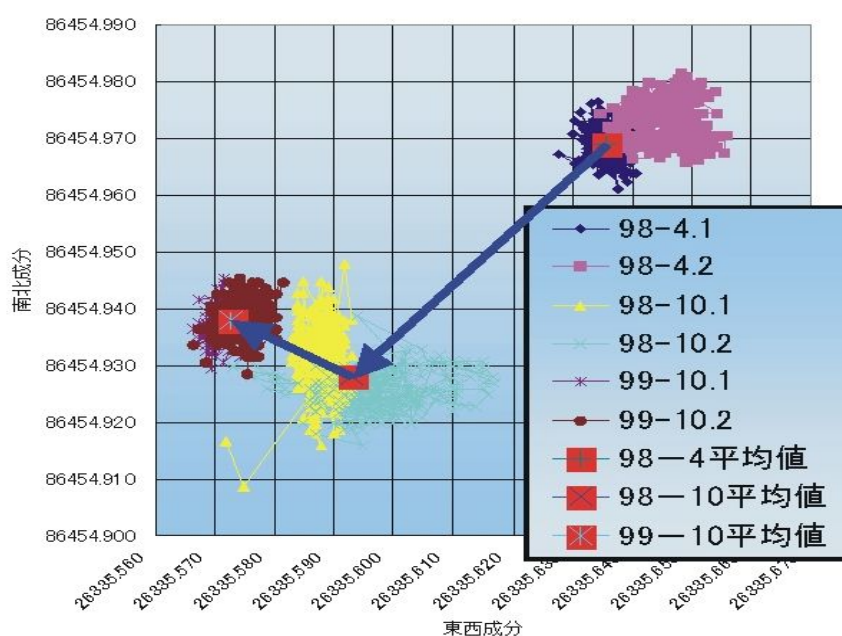


図 - 8 怒田地すべり地のGPS連続静止観測点近くのB点で平成10年4月，10月，平成11年10月に5分間×2回の観測で得られた測位点に国土交通省の連続観測点（A点）の移動量を加えた測点移動の平面分布．

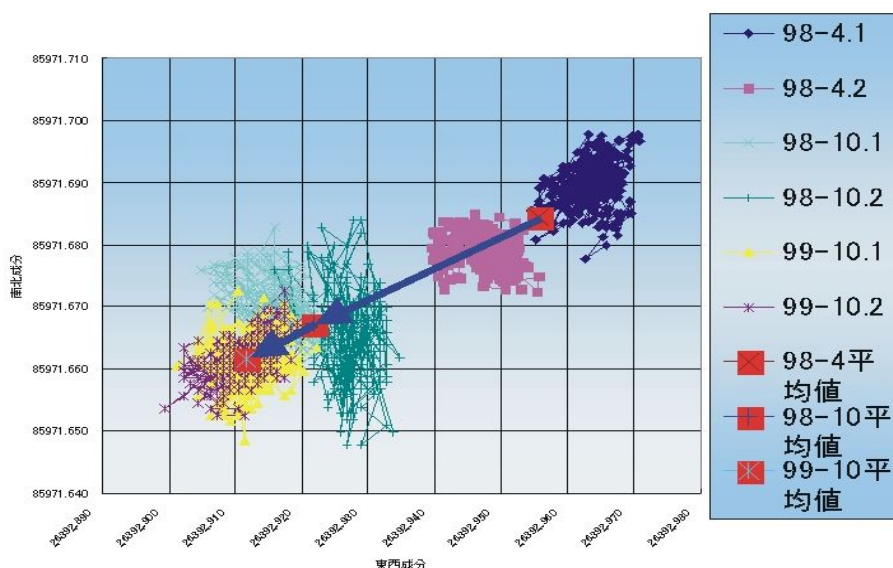


図 - 9 怒田地すべり地の G P S 連続静止観測点近くの C 点で平成 10 年 4 月 , 10 月 , 平成 11 年 10 月に 5 分間 × 2 回の観測で得られた測位点に国土交通省の連続観測点 (A 点) の移動量を加えた測点移動の平面分布 .

怒田地すべりの測点に対し , 数回にわたり観測を実施した . 測点 B の観測結果に対応する A 点の国土交通省の連続静止観測点の移動量 (ベクトル) を加えた測点の平面分布を図 - 8 に示す . 各回全測点に対し 2 日間に 2 回ずつ 5 分間の測位を行ったが , 各回において測位点分布は最大 2cm 程度以内に収まっている . 各回の平均の点間距離を変位とすると 1 年半の間に約 7 c m の南西方向へ移動したことがわかる . 南西方向は斜面方向に対応しており , 妥当な結果である . また , 図 - 9 に C 点の観測結果を示す . ほぼ一直線に斜面方向に約 5 c m 移動していることがわかる .

G P S の測点は路面上の測量釘だけであり , 縦断方向のみならず , 横断方向に測線を設けることで , 面的な移動状況の把握が可能となる . 現在は RTK-GPS のデータ転送に用いている特定小電力無線の到達距離が視通できる範囲の 1 km 程度に限定されており , 地すべり地外に RTK-GPS の基準点を設けることは困難であるが , ネットワーク対応型の RTK-GPS が普及すれば可能となり , 連続静止観測点がない地すべり地においても難なく RTK-GPS のみで精密測位による地すべり移動観測が可能となると思われる .

5 . 自動三脚の試作

RTK-GPS は 1 点あたり 5 分という短い時間で測定できるが , 測点は道路の場合 , 端にあることがほとんどであり , アンテナ設置に測量用三脚を用いる場合 , 測量釘の真上にアンテナを設置するだけで 1 0 分以上かかる場合も多い . さらに , 三

脚の足を不安定な土壌に差し込む場合、三脚の自重で観測時間中に沈み傾くこともある。測位時間より受信機の移動、設置に時間がかかるのは問題であり、簡便かつ短時間に高精度でアンテナを測量釘の鉛直真上の指定した高さに設置でき、また5分程度の測位時間の間、高精度にアンテナを保持できる機構が必要である。そこで、福岡らは科研費を得て、市販のGPSポールに高精度傾斜計をとりつけ、測量用三脚にサーボモータをとりつけることにより、高速高精度にアンテナを測量釘の鉛直真上2 m程度において0.1 ミリ以内に設置、維持できる自動三脚を開発した。図-10にシステム試作機全体の写真を示す。GPSアンテナを載せたポールのとがった先端を道路上の測量釘にあわせ、三脚を任意の位置に置き、サーボアンプ部の電源を投入すれば数秒程度で0.5 ミリの精度で測量釘の鉛直真上にアンテナを設置できる。制御はポールにとりつけた2軸の傾斜計が水平になるようにサーボアンプから三脚のうち二脚にとりつけたモーターを回転させて、水平を保つ。観測中0.5 ミリという高精度の制御が可能になり、田んぼのようなぬかるんだ超軟弱地盤上や三脚の近くに立つ観測員の体重により生じる歪みも関知し制御することが可能になった。市販モデルも開発され、丸東製作所より発売予定である。また、手元のディスプレイに前回の測点を表示すると共に、リアルタイムに観測した測点の分布を表示し、移動を瞬時に判定できるためのリアルタイム測位点表示ユニット装置も開発中である。これは点の分布の特性やデータの質も評価でき、実用的なリアルタイムの斜面危険度判定に資すると思われる。



図-10 RTK-GPSを用いた斜面定期健康診断用の移動局側試作システム。一人ないし二人で観測が可能。

6. 斜面定期健康診断システムの構想

G P S 測定の測点設置と測定手順は伸縮計や孔内傾斜計に比べ簡便であり，多数の測点の定期測定に適している．従来地すべり移動観測は地表に変状が現れてから移動ブロック内に設置しており，移動のない場所での観測例は少なかった．地すべり予知予測のためには斜面移動観測を地すべり地と認識されていない地域でも移動観測を実施すべきである．測点の中で地すべり性の移動が認められるものがあれば，伸縮計や孔内傾斜計等の精密観測を実施するという斜面定期健康診断的な構想（図 - 1 1）が可能である．ここで RTK-GPS による年 1，2 回程度の定期観測が定期健康診断に相当する．人間の健康診断では X 線や各種検査によりスクリーニングを行い，問題が見つければさらに精密検診を行い，病状が確定すれば必要な治療や手術を行う．同様に，宅地等の重要な保全対象となる斜面，盛土地盤上の宅地等において RTK-GPS による観測を定期的の実施すれば，安価に相当に広い地盤の変動監視が可能になり，スクリーニング手段として活用することができるはずである．問題が抽出できれば，精密検診に対応する伸縮計，孔内傾斜計，ボーリング等の調査を行い，さらに地すべり危険度が確定すれば，治療に相当する対策工を施工すればよい．

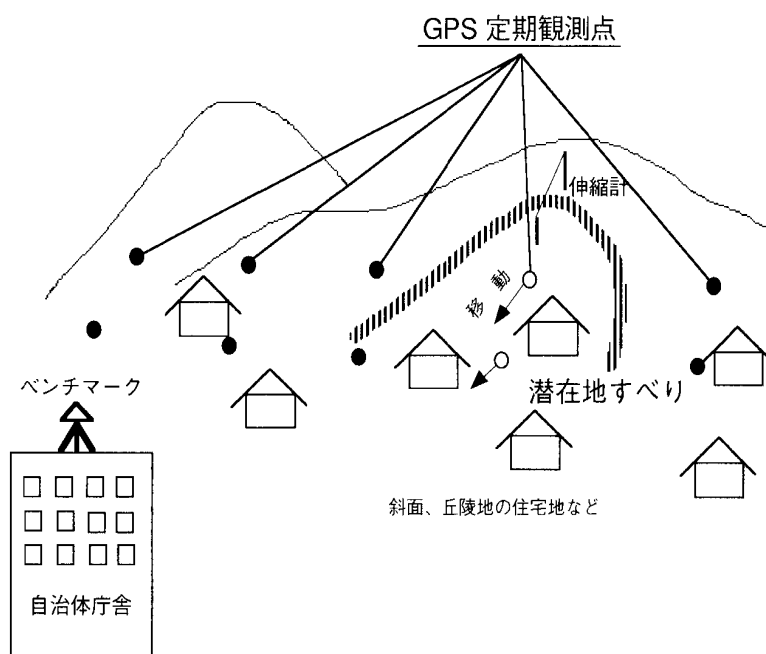


図 - 1 1 斜面定期健康診断構想の模式図．保全対象のある地域に測点を設け，定期的に G P S 測定を行う（定期検診に相当）．変状が現れれば，踏査を行い，伸縮計等のより精密な計器を設置して観測（精密検診に相当）する．差し迫った地すべり危険度が認められれば対策工（治療、手術に相当）を施工する．

RTK-GPS による短時間測位などの高速・高精度測位法の進展とともに，近年小型軽量化，モバイル化が進みつつある GIS 機器との併用が進めば，現場で多数の点の精密測量が簡単にでき，過去のデータとの比較，すなわち移動量の検討が即座に容易になる．これらの技術の組み合わせにより，具体的な斜面定期健康診断のためのシステム構築は十分可能である．

著者らが現在検討し提案しているのは，都道府県，市町村だけでなく，背後に不安定斜面がある宅地，造成した手の盛土あるいは切土上の宅地，大規模地震や豪雨災害の被災地域内の宅地や重要保全対象がある斜面のうち，特に危険度監視に関心がある自治会程度の小規模な単位でも負担可能なコストで年 1，2 回程度の計測を行い，明らかな変状があり，緊急を要する場合には連続観測を実施し危険度を評価するシステムからなるビジネスモデルである．

7．平成 19 年新潟県中越沖地震後の宅地の斜面健康診断

斜面定期健康診断構想の実現可能性を検討するために，平成 19 年新潟県中越沖地震により広域に地盤変動の影響を受けた柏崎市内の宅地のうち 2 カ所を選び，RTK-GPS による 1 年程度をかけた繰り返し観測と明らかに不安定となっている宅地盛土地盤の連続観測を実施した．以下にその結果を報告する．著者らは中越沖地震発生直後より現地調査を開始した．試験地として選んだのは 1) 柏崎市番神地区，(2) 上田尻・池の峰地区である．両地区の位置を図 - 12 に示す．



図 - 12 柏崎市内の地盤変動調査地区のインデックスマップ (Google map) ．

7．2 番神地区の斜面変動と移動計測

柏崎市番神 2 丁目地区では多数の家屋が全壊，半壊の被害を受けた．地震発生直後の 7 月 29 日に現地に入り変動状況調査を実施した．番神 2 丁目地区の住宅地図を図 - 13 に示す．同地区は砂丘地形であるが，特に甚大な被害を被った被害家屋は砂丘の縁の崖直上付近に集中していた．被害家屋の多くの基礎地盤，路面にクラックや移動の変状が見られ，コンクリート擁壁にもクラックが見られた．

これは崖の肩で地震動が増幅される効果により地盤変動が誘起されやすかったためと思われる。しかし，肩以外の部分でも家屋への被害，地盤への被害が広範に見られた。同地区は地質的には古砂丘堆積物の上に新砂丘堆積物が堆積しており，地下水は地表から約 1 m 程度と極めて高いため，特にこの地区で広範に地盤変動が発生したと思われる。



図 - 1 3 番神地区の住宅地図，GPS 測点の位置(Google map)，RTK-GPS で計測した移動ベクトル → (2007 年 8 月～2008 年 4 月)，→ (2008 年 4 月～2009 年 3 月)。



図 - 1 4 番神地区の道路法面崩壊 (図 13 中の P1)



図— 1 5 番神地区における地盤変動に伴うコンクリート擁壁内のクラック (図 13 中の P2)。この周辺が最も家屋の被害も甚大であった。



図— 1 6 番神地区における長さ約 30 m の擁壁の転倒 (図 13 中の P2)。擁壁下部の家屋に倒れかかった。擁壁上部の地盤には多数の開口クラックが現れた。

番神地区での目立った斜面災害は、図 - 1 3 の P1 と記した箇所において谷に面した道路が崩落した(図 - 1 4)他、P2 では宅地およびその基礎で多くの地すべり的な変動が見られ(図 - 1 5), さらに P3 では擁壁が転倒し、その下の家屋に倒れかかった箇所(図 - 1 6)もあったが、幸い家屋の位置が擁壁に接近しており、擁壁はわずかに傾いてよりかかっただけで、その重みで家屋が全壊することはなかった。また、この地区の地下を通るトンネル内にも変状が現れた。これらの変状が番神 2 丁目地区に集中してみられたことから、この地域に表面で見られた浅い地盤変動だけでなく、深い地すべり活動があった可能性が考えられた。

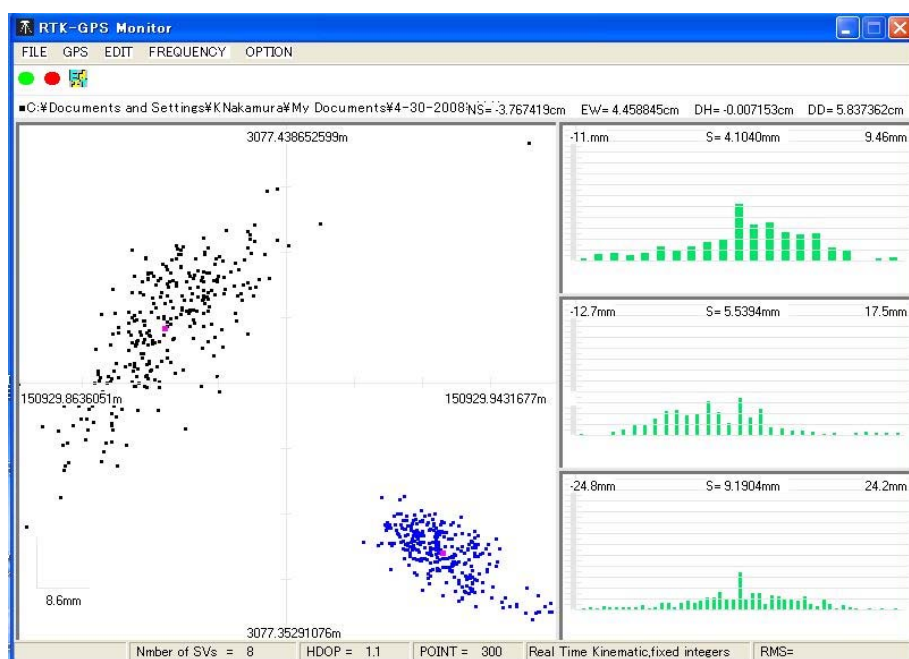
地すべり調査のためのボーリング等を掘削できなかったため、地表変動量を計測することで深い地すべりの活動度を評価することにした。そこで平成 19 年 8 月 10 日(初回)と平成 20 年 4 月 30 日(2 回目)、平成 21 年 3 月 17 日(3 回目)に番神地区を南北に縦断する道路沿いに測量釘を設置するか構造物の角を測点として、RTK-GPS 測量を実施した。基準点は付近にある国土地理院の電子基準点柏崎 2 (960567)を用いた。基線長は約 2.3 km である。測量は GPS アンテナを測点上に置き、1 秒サンプリングで 300 エポック計測することにより 3mm 程度の標準偏差(測位精度)を確保し、かつ、福岡らが開発した現地でリアルタイムに前回の計測結果と比較し、かつヒストグラムでデータの標準偏差、ピークと平均値を確認しながら計測できるモニタリングソフトで確認しながら実施した。図 - 1 7 に計測中の状況、表 - 1 に得られた主要な数値データを示す。測点 A は 3 回目の際に測点が失われていた。測点 C、D は 2 回目、3 回目のみ計測した。

表 - 1 RTK-GPS で計測した測点 A ~ E の各移動量。dN: 南北成分(+が北), dE: 東西成分(+が東), dU: 上下成分(+が上), 水平変位量(mm)。dN, dE, dU のあとの括弧内(σ)は標準偏差。各欄の上段は 2007 年 8 月 10 日から 2008 年 4 月 30 日まで、下段は 2008 年 4 月 30 日から 2009 年 3 月 17 日までの移動量。単位はすべて mm。

	dN (σ)	dE (σ)	dU (σ)	水平変位量
測点 A	- 36 (4) -	+46 (6) -	- 68 (9) -	58 -
測点 B	+2 (4) - 13 (4)	+47 (4) - 4 (10)	4 (9) 20 (24)	47 14
測点 C	- 3 (5)	- - 1 (5)	- - 95 (160)	- 3
測点 D	- - 9 (5)	- 1 (4)	- - 18 (8)	- 9
測点 E	- 8 (9) - 20 (7)	+74 (9) - 14 (5)	- 11 (32) - 34 (13)	75 24



図 - 1 7 番神地区での RTK-GPS による移動観測の状況(測点 E) .



図— 1 8 RTK-GPS による番神地区の測点 A の移動観測結果 .左側画面の黒点群が平成 19 年 8 月 10 日(1 回目)の観測時 , 青点群が平成 20 年 4 月 30 日(2 回目)の観測時の観測時に得られた 1 秒サンプリングの測位点データのばらつき . 赤点は各回の平均(重心)の位置を示し , 赤色矢印は移動ベクトル . 右側画面には南北 , 東西 , 上下の各成分のヒストグラムと標準偏差を示す .

図 - 1 8 に測点 1 の移動観測結果を示す .左側画面の黒点群が平成 19 年 8 月 10 日(1 回目)の観測時 , 青点群が平成 20 年 4 月 30 日(2 回目)の観測時の観測時に得られた 1 秒サンプリングの測位点データのばらつきを示す . 各測点群の中心にプロットした赤点は各回の平均(重心)の位置を示し , 赤色矢印は得られた移動ベクトルである . 右側画面は南北 , 東西 , 上下成分のヒストグラムと標準偏差を示す . データの分布は 2 回ともに東西成分の標準偏差が若干大きいが概ね正規分布に近

い形を示したので良好な結果であるといえる．分布が楕円形に見えるのは衛星配置と観測時間中の衛星の移動方向によると考えられる．

1 回目と 2 回目の間の水平移動量は測点 A, B, E の三点ともに東または南東方向にそれぞれ, 58mm, 47mm, 75mm 移動していることがわかった．各測点での水平移動ベクトルを赤い矢印で図 - 13 中に示す．標準偏差は測点 1 の東西成分以外はすべて 9mm 以下であり, 上記移動量はこの標準偏差と比べて十分大きいので 47 ~ 75mm の移動量は信頼できる移動量と考えられる．一方, 上下変位量(UD)は 3 点ともほとんどゼロであることと, 標準偏差が水平成分と比べ大きいこともあり, ここでは評価できなかった．変位観測期間が 8 月から 4 月までの約 8 ヶ月半余りであり, 地震後の余効変動の影響も考えられるが, 基線長が約 2.3 km と短いこと, 本震および余効変動は北西方向のセンスであること, 本観測と同じ期間の柏崎 2 基準点の移動量は $NS=-0.54$ mm, $EW=0.40$ mm, $UD=-23.19$ mm で, 水平移動量については今回得られた移動量より十分小さく無視できる．さらに測点 1, 2, 3 とともに 150 m の範囲内で水平移動量にして 20mm も異なる移動ベクトルを示しているため, これらのベクトル分布は局所的な地盤変動を表していると考えるのが妥当である．基本的な移動方向は道路崩落が発生した谷に向かう方向である．

2 回目と 3 回目の間では測点 E で 20mm を越える移動が認められる．2 回目の測定の際に新設した測点 C と D ではほとんど移動は認められなかった．測点の B では 14mm の移動があるが標準偏差が約 10mm 程度あり確実とは言えない．この間, 現地ではアンカー工が施工され, 倒れた擁壁の修復が行われ, 地下水位の低下も認められた．これらの対策工事の効果として測点 E 以外の地盤変動が停止したと考えられる．測点 E は盛土の上であり, 地震後も特に対策を何もしておらず, 地震後 2 年近く経ってもゆっくりクリープしている可能性がある．

番神地区の表層地盤は新砂丘の未固結の砂であるが, すぐ西の鯨波地区では広く表層に古砂丘堆積物が露出していることから, 番神地区の新砂丘の砂は厚くはなく, その下に古砂丘堆積物があると考えられる．現地で採取した材料の物理特性, 土質試験結果は Igwe・Fukuoka 他 (2008)によると, 非排水条件では古砂丘堆積物は新砂丘堆積物に比べピーク強度も残留強度も小さくなった．先述したように地下水は常時地表から 1 m 程度と極めて浅いことから古砂丘堆積物は化学風化が進行し粘土分が増えていたと考えられ, そのことが強度の違いの原因となったと推定された．またこの強度の違いが地震後の継続的な深部のすべりの原因となったと思われる．

7. 3. 上田尻地区の宅地盛土擁壁と周辺地盤の連続変動監視の試み

中越沖地震では盛土地盤で多くの変動が現れたが, 柏崎市上田尻・池の峰地区(図 - 12)の盛土地盤では北西の市道に面した擁壁が倒壊しかけたため, 緊急に

トンパックと呼ばれる大型土嚢を積み上げ、倒壊を抑止した(図 - 19)。擁壁上部の市道内にはクラックが発生し沈下していた(図 - 20)。図 - 21に Google Map に掲載されている地震前の空中写真を示す。この宅地の周囲は水田であり、宅地造成時に北西、北東、南東の三方に L 字型擁壁を鉛直に立て元の地盤との間に粘性土を裏込めして宅地を拡張した構造である。擁壁の排水口から液状化した土砂が流出していたことから地震時に裏込め土部分が軟化し変動して擁壁を押し出したと思われる。倒壊しかけた擁壁は図 - 21 の A 付近だけであるが、B、C 点付近の擁壁の張り出しおよび周辺地盤でのクラック発生等の変状が顕著で、放置すると倒壊する可能性があった。当該地区は民間業者が造成し分譲したことから、柏崎市当局は市道に面している A 点付近の擁壁は対応できたが、特に市道に面しない点 B については市による震災復旧検討地区とはみなされず、擁壁の補強等は法制度上対応できない事情があり、何の対策も施せないという状況であった。

そこで、日本 GPS ソリューションズ(株)の協力を得て、静止 GPS 連続観測による観測点を図 21 中の A、B、C および、基準点として不動と思われる R 点に GPS を設置し、平成 19 年 8 月より平成 20 年 3 月まで観測を行った。各観測点の観測期間および最終変位量については、表 2 に示す。また、C 点の観測点の設置状況を図 - 22 に示す。高さ約 2 m のポールの先端に GPS アンテナを設置し、地面に設置したボックスに電源、GPS 受信機、携帯電話を格納し、1 時間毎にデータを東京の日本 GPS ソリューションズ(株)に送信し自動解析を実施した。また、1 週間毎に解析結果のグラフおよびベクトル図をネットに掲載し、地域住民および柏崎市の防災担当者に閲覧できるようにした。

A 点では土嚢の効果があり、ほとんど変位は見られなかった。しかし、対策工を施工しなかった B、C 点では夏期を通じて累積する変位が認められた。図 - 23 に東西、南北、上下の 3 成分の経時変化と日雨量を示す。各成分の縦軸はそれぞれ東、北、上方向を正にとった。



図 - 19 上田尻地区の宅地擁壁倒壊現場と押さえ土嚢(トンパック)。

表 - 2 . 観測点 A,B,C の観測期間と最終変位ベクトル量

観測点	観測期間	最終変位方向	最終変位ベクトル量
A	2007/08/10 ~ 2007/11/22	N	0.070 mm
B	2007/08/10 ~ 2008/02/02	NE	1.396 mm
C	2007/08/10 ~ 2008/03/25	SSW	1.648 mm



図 - 2 0 上田尻地区の倒壊擁壁上部の市道内のクラック .



図— 2 1 柏崎市上田尻地区池が峰住宅地の空中写真 (Google Map , 上が北) および静止 GPS 連続観測点の配置 . 青点 (R) は基準点 , 赤点 (A, B, C) は移動観測点 . 擁壁が倒壊しかけたのは A 点の北側 . 白矢印は平成 19 年 8 月から 3 月までに得られた水平移動ベクトル .



図 - 2 2 上田尻地区に設置した連続 GPS 観測点 .

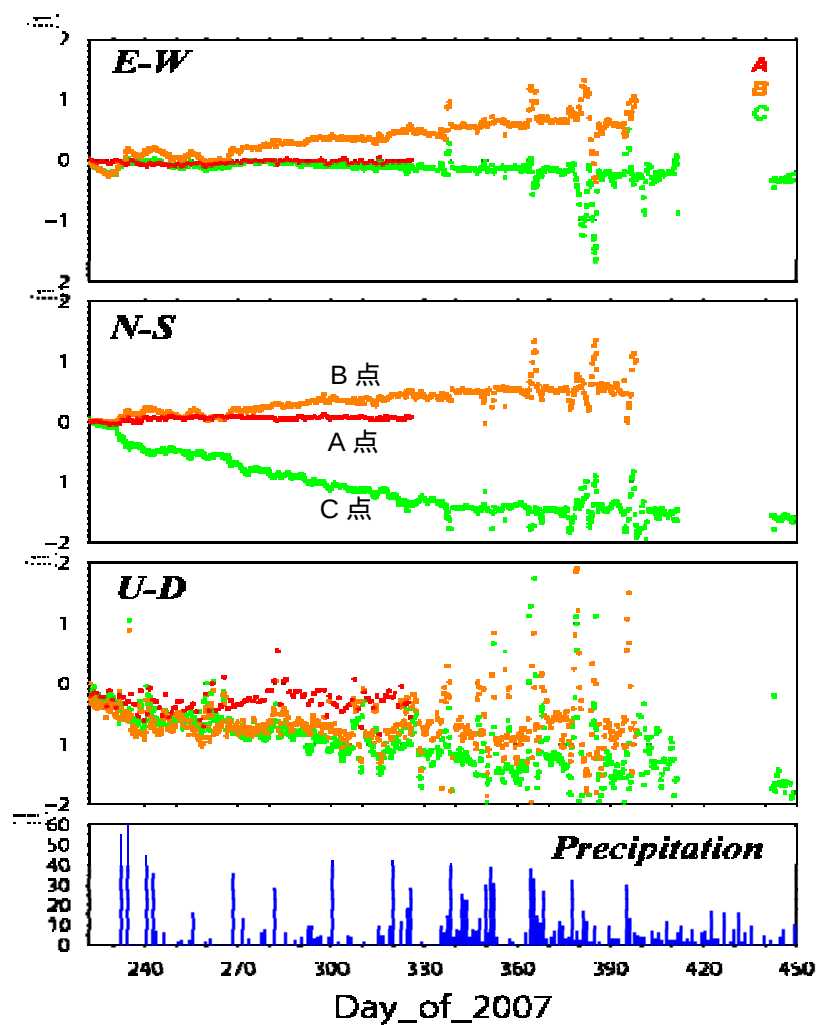


図 - 2 3 上田尻地区の測点 2、測点 3 の移動量の平成 19 年 8 月からの経時変化 . 横軸は 1 月 1 日からの日数 . 上から東西成分 (cm) , 南北成分 (cm) , 上下成分 (cm) , 日雨量 (mm) . 移動量は赤 (濃) が A 点 , 橙 (薄) が B 点 , 緑 (中間) が C 点 .

赤色のプロットが A 点，橙色のプロットが B 点，緑色のプロットが C 点の変位を表す．横軸は平成 19 年 1 月 1 日からの日数である．各観測点の最大変位方向を正にとった時系列変化を図 - 2 4 に示す．また，B 点および C 点の移動変化について，図 - 2 5 にパーティクルモーションを描いて示した．2008 年 1 月以降は積雪の影響により，GPS 信号を受信しにくい環境となったことで，変位のばらつきが大きくなっているため描画していない．

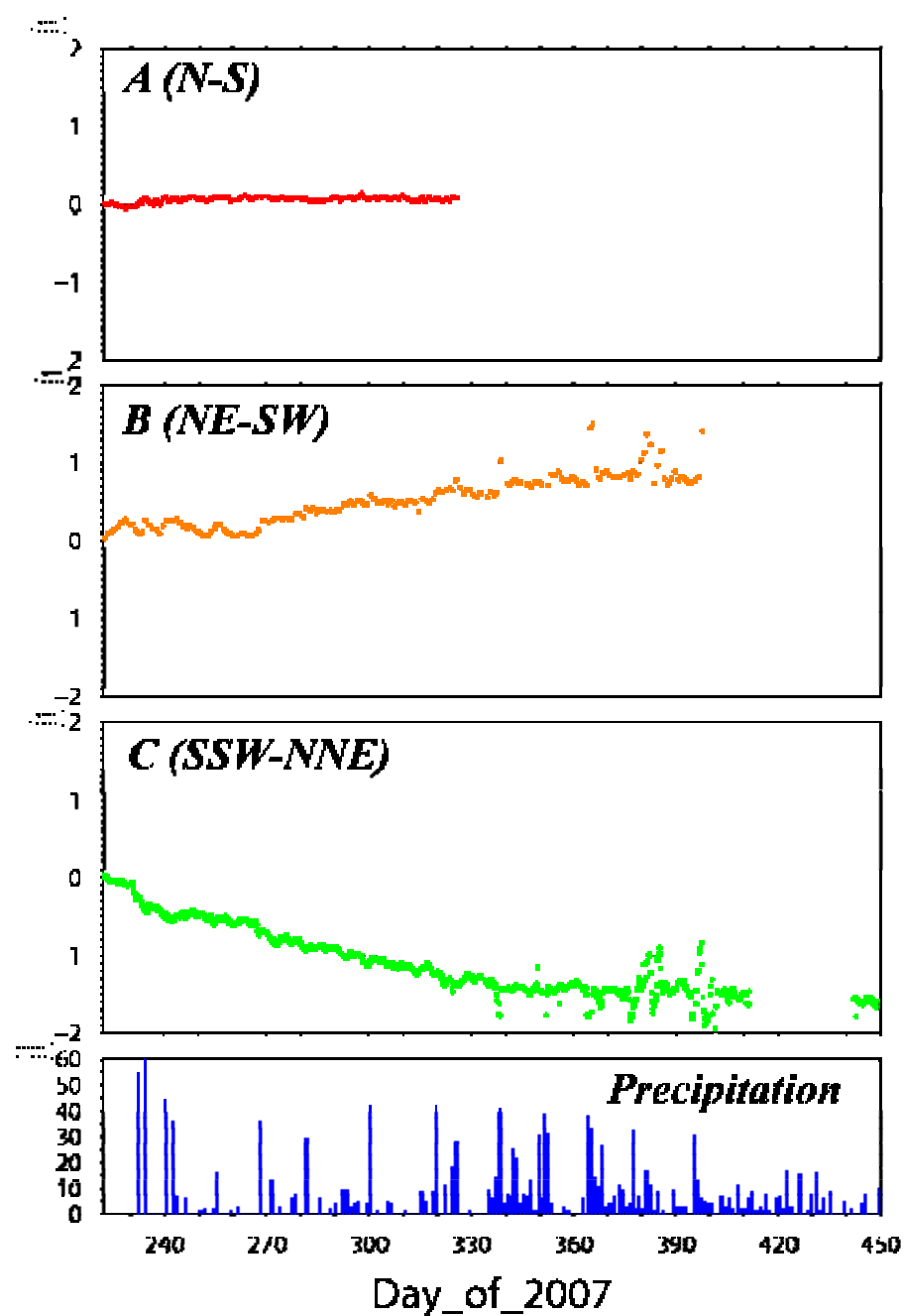


図 - 2 4 各観測点の最大変位方向を正にとった時系列変化．上から A 点（北 - 南方向），B 点（北東 - 南西方向），C 点（南南西 - 北北東方向），日雨量(mm)．

B 点は 270 日(9 月下旬) から 370 日(2008 年 1 月初旬) 頃まで継続してほぼ一定速度で概ね北東方向の移動を示した。北東は擁壁に直交する方向で、裏込め土の押し出しに伴い地表面に擁壁に平行なクラックが多数現れていること、擁壁が傾斜し転倒しかけていることと調和的である。

C 点については、設置 10 日後の 230 日過ぎの雨に対応するように移動を始め、ほぼ一定の速度で変位し続けたが、350 日頃に速度が大きく減じた。C 点の GPS ポールを設置している場所は畑でありクラックが明瞭に現れにくかったが、そのすぐ北側の舗装道路(市道)上にはクラックが現れたことから、同様に概ね擁壁に直交する方向に変動していることがわかった。いずれの観測点も、観測初期に西側に移動しているが、これはこの地域に共通した変動であることから、この地域の局所的な変動を示しているわけではない。また、B 点、C 点においては大きな降雨の直後に一時的に大きく変動し数日間かけて回復するという挙動を何度も繰り返している。水平方向への一時的な張り出しと収縮、上下方向の膨張と収縮を繰り返すが平均的な移動速度はほぼ一定で移動している。これらは雨水の浸透により、裏込め土が軟化し擁壁への側方応力が増大することによる張り出ししている可能性がある。また、裏込め土、盛土底部での地盤変動を助長していることも考えられる。

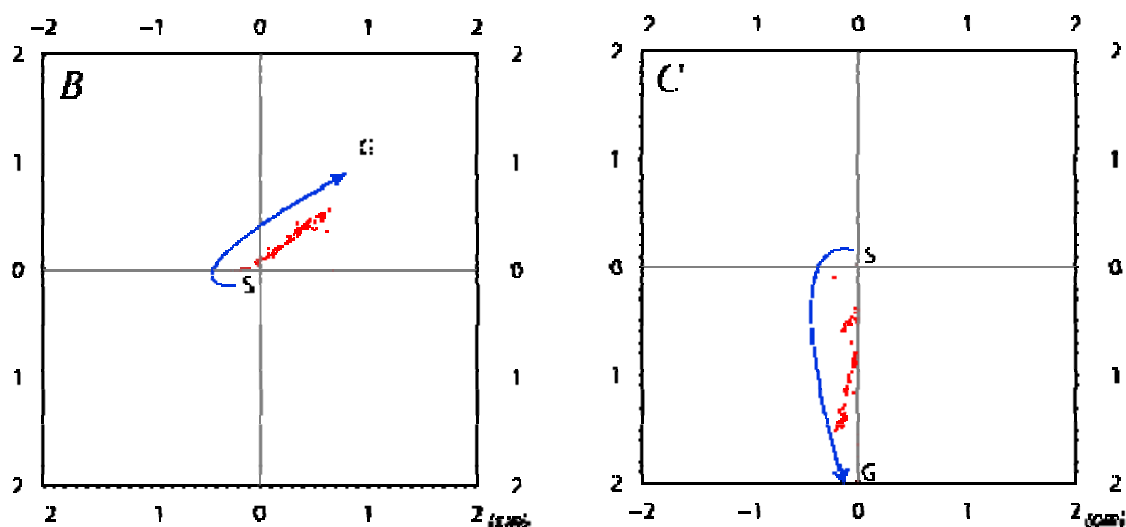


図 - 2 5 B 点、C 点の水平面内パーティクルモーションによる地表移動変化。期間は 2007 年 8 月 10 日から 2007 年 12 月 31 日までである。S が開始点、G が終了点である。

7. 4 移動機構とその後の自治体の対応

上田尻地区では裏込め土を採取し含有鉱物の X 線解析を行ったところ、雲母、ハロイサイト、スメクタイトを含んでおり、新潟地域に堆積する各種火山降下物が風化した材料を造成に用いたものと思われる。明らかに透水性の低い粘性土で

あることから，地震後も長期間高い過剰間隙水圧を維持できる材料であることが地盤変動の主たる原因であると思われる．

当初，柏崎市は市道に面している A 点のみトンバックを設置し，B，C 点に面する私道，私有地については対策しない方針であった．しかし本稿で実施した監視データと当該自治会の熱心な働きかけにより，最終的に柏崎市は擁壁の周囲に擁壁高の約半分の高さの押さえ盛土を施工し安定化させた．



図 - 2 6 柏崎市が施工した不安定擁壁の押さえ盛土．

結論

新しいGPS測位方式であるリアルタイムキネマティック（RTK-GPS）受信機を用いた短時間測位法による地すべり移動観測の可能性について試行し，以下の結論を得た．

- 1) RTK-GPSによる1秒のサンプリング，5分間の観測で3ミリ程度の精度（標準偏差）が可能である．宅地等重要な保全対象があり，かつ盛土地盤等の将来不安定になる潜在的可能性の高い地盤に対し，地すべり発生前に1年に1，2回程度，定期的にRTK-GPSを用いて地すべりの前兆変位を捉える斜面定期健康診断を提案した．数多くの点を繰り返しRTK-GPSで測定する手法であればコスト的にも実用的であり，自動制御三脚の開発にも成功した．
- 2) 平成19年新潟県中越沖地震により多くの表層地盤や基礎の被害，家屋の被害が見られた柏崎市番神2丁目地区の住宅地の地盤を対象に，RTK-GPSによる

3 回の観測の結果，計測誤差の大きさより遙かに大きく，かつ概ね同じ方向を向いた変位ベクトルが得られた。これは地震後も移動していたことを示しており，地震後，表層のすべりだけでなく，深層の地すべりがあり，地震後も活動していたことが示された。

- 3) 柏崎市上田尻地区の人工地盤の住宅地で見られた転倒の危険が迫っている擁壁の裏込め盛土上で連続 GPS 観測を実施し，防災対策を施した箇所ではほとんど変位が出ず，対策効果を確認した一方，対策工を施工していないところでは 1cm 程度の連続的かつほぼ一定速度の変位を観測した。
- 4) 当該地区は民間業者が造成し分譲したことから，特に市道に面しない点 B については対策工の対象外とされていたが，上記の計測結果から柏崎市は最終的に対策工を施工する必要性を理解し，擁壁高さの半分程度まで周囲に盛土を施工することとなった。幸い周囲は田圃であり，盛土に必要な土地は容易に取得できた。
- 5) これらの成果は，本稿で提案した R T K - G P S による定期健康診断が十分実用に耐えうること，かつ，1 点 1 回あたりのコストが連続観測に比べ低く自治会程度の小規模な自治組織でも必要があれば負担できる程度まで低減でき，普及しうることを示した。また，連続観測は繰り返し計測に比べるとコスト的に高いものの，ミリオーダーの高精度の変位監視が可能であることを示すことが出来た。今後，定期健康診断の主要な技術として普及することを期待する。

謝 辞

本文を作成するにあたり、国土交通省四国地方整備局四国山地砂防工事事務所（当時）の小山内信智氏，復建調査設計株式会社の江崎豊充氏には高知県怒田・八畝地すべり地のデータについて協力いただいた。日立造船（株）の丹野貴之氏，日本 GPS ソリューションズ（株）の佐藤伊津英氏らには受信機の貸与および，観測の実施を手伝っていただいた。記して感謝致します。

参考文献

- Fukuoka, H., Tamari, Y., Furuya, G. and Fujikawa, H. 2001. Application of Realtime Kinematic GPS to Landslide Monitoring. ISSMGE TC-11 (Landslides) Proc. of Conference on Transition from Slide to Flow - Mechanisms and Remedial Measures -, Trabzon, Turkey, pp. 211-220.
- Igwe, O., and Fukuoka, H. 2008. Field and Laboratory Investigation of Soils Affected by the 2007 Chuetsuoki Earthquake. Proc. the First Landslide Forum, Parallel Session Volume, pp. 285-288.

- 荒井 正・水谷宣明・会津隆士・近藤仁志. 1997. GPSを用いた連続変位量観測による地すべり移動特性についてー長野県倉並地すべりの例ー, 第 36 回地すべり学会研究発表講演集, pp.365-368.
- 大村 誠・伊藤俊秀・西山 孝. 1998. 露天掘り鉱山の地形測量におけるRTK-GPS測量の適用, 資源と素材, Vol.114, No.10, pp.699-703.
- 福岡 浩・古谷 元・末峯 章・小山内信智・丹野貴之・高橋 毅. 1999. RTK-GPSによる斜面移動観測の試み. 平成 11 年度砂防学会研究発表会概要集, pp.142-143.
- 福岡 浩・古谷 元・末峯 章・小山内信智. 1999. リアルタイムキネマティックGPSによる地すべり移動観測の試み.(社)日本地すべり学会第38回研究発表講演集, pp.175-178.
- 福岡 浩・古谷 元・末峯 章・小山内信智. 2000. RTK-GPSによる地すべり移動観測と斜面定期健康診断の可能性. 第 39 回(社)日本地すべり学会研究発表会(地すべり2000)講演集, pp.489-490.
- 福岡 浩・古谷 元・末峯 章・小山内信智. 1999. RTK-GPS の短時間測位による地すべり移動観測の試み. 第 38 回地すべり学会研究発表会講演集, pp. 175-178.
- 福岡 浩. 2001. RTK-GPSを用いた斜面定期健康診断システムの開発, 平成12年度科研費(基盤研究(C)(2))(研究課題番号:11680468)研究成果報告書, 60 pages.
- 福岡 浩. 2001. GPS等を用いた地すべり地の移動観測(その3). 地すべり技術, Vol. 28, No.1, pp. 14-21.
- 福岡 浩・古谷 元・玉利吉章・小山内信智 (2001) 短時間RTK-GPS測量を用いた地すべり監視法の開発, 平成13年度(社)日本地すべり学会研究発表概要集, pp.541-544.
- 福岡 浩. 2004. 平成 14 年度科学研究費補助金(基盤研究(B)(2))(研究課題番号:13558052)研究成果報告書「RTK-GPS を用いた「斜面定期健康診断」実用システムの開発」, 64 pages.
- 丸山英司・会津隆士・荒井正・竹内均. 1998. 降水量と地表面移動量との関係ーとくにGPS自動観測を用いた長野県倉並地すべりの例(その2), 第 37 回地すべり学会研究発表講演集, pp.285-288.
- GPS 測量技術の応用と普及グループ・増成友宏・清水則一. 1998. 地すべり地におけるリアルタイムキネマティック(RTK)連続観測データの処理方法の検討, 第 37 回地すべり学会研究発表講演集, pp.475-476.

電波位相差変位計測の斜面防災への応用

地層科学研究所 里 優
京都大学工学研究科 西山 哲

1. 計測システムの概要

本計測手法では、従来より知られている GPS とは逆に、斜面あるいは法面において変位を計測する必要のある箇所に電波発信機を設置する。図-1 にシステムを構成する装置の概観を示す。発信機は寸法が約 W:34mm × H:96mm × D:20mm であり、単三乾電池にて駆動する。本研究では一つの発信機につき単三乾電池を 4 つ使用した。乾電池の寿命は 1 時間に 1 点の計測値を測ったとして約 1 年である。発信機は安価な部品から構成されるため、観測対象の斜面に数多く配置することが可能である。受信アンテナはアンテナ部の寸法が約 W:104mm × 104mm、受信機の寸法は約 W:380mm × H:450mm × D:240mm、計測装置の寸法は約 W:680mm × H:650mm × D:290mm であり、既存の斜面モニタリングの計器に較べて小型である。

■ 発信機

寸法: 約W:34mm × H:96mm × D:20mm
発信機単体で技適を取得(免許不要)



↓
発信機に電池を付属し防水ケースに収容
(アンテナ部分外付も可能)

■ 発信機収容箱

【発信機, 電池, 小型ANT収容時の参考】
寸法: 約W:120mm × H:160mm × D:92mm



■ 受信アンテナ【平面アンテナタイプ】

アンテナ部の寸法(金具別): 約W:104mm × 104mm



■ 受信機

寸法: 約W:380mm × H:450mm × D:240mm



■ 計測装置

寸法: 約W:680mm × H:650mm × D:290mm



図-1 システムを構成する装置

図-2 に電波の位相差を利用した変位計測系の基本構成を示す．各計測点に設置された電波発信機は周波数 f_c を基準にそれぞれ $(f_1 + f_c)$, $\dots$, $(f_n + f_c)$, $\dots$, $(f_N + f_c)$ の周波数の電波を送信する．ここで , f_1 , $\dots$, f_n , $\dots$, f_N は f_c に比べ十分に小さな値とする．これらの電波を , 少なくとも 4 個のセンサ (受信アンテナ) で受信する．ここで , 第 j アンテナの位置を $\mathbf{q}_j = [X_j, Y_j, Z_j]^T$ (T は転置) と表すことにする．それぞれのセンサで受信された信号は , ダウンコンバータで f_c の局発信号と乗じられそれぞれ f_1 , $\dots$, f_n の周波数の信号に変換される．これらの受信信号は A/D 変換器でデジタル信号に変換されたあと , 帯域通過フィルタを通過することにより , 発信機毎の信号に分けられる．すなわち , 帯域通過フィルタから出力される信号は , 第 n 計測点の電波発信機からの受信信号 $r_{n,j}$ のみになる．このように , 複数の発信機からの電波を独立して処理することができるので , 以降 , 第 n 計測点の位置 $\mathbf{p} = [x, y, z]^T$ を推定する測位処理の動作について代表して説明する．

第 n 計測点に設置された電波発信機から放射された電波 $s(t) = \exp[i2\pi(f_c + f_n)t]$ は , 各センサで受信される．第 1 のセンサ , 第 2 のセンサの受信信号はそれぞれ次式で与えられる．

$$r_{n,1}(t) = s(t) \exp[i\phi_1] \quad (1.1)$$

$$r_{n,2}(t) = s(t) \exp[i\phi_2] \quad (1.2)$$

ここで , i は虚数単位 , ϕ_1 , ϕ_2 は各受信アンテナにおける受信信号の位相であり , 次式のように表すことができる．

$$\phi_1 = \frac{2\pi}{\lambda} (\|\mathbf{p} - \mathbf{q}_1\| - k_1 \lambda) \quad (1.3)$$

$$\phi_2 = \frac{2\pi}{\lambda} (\|\mathbf{p} - \mathbf{q}_2\| - k_2 \lambda) \quad (1.4)$$

ここで , $\|\mathbf{p} - \mathbf{q}_j\|$ は計測点 $\mathbf{p}$ (発信機) から第 j 受信アンテナまでの距離を意味し , $\lambda \equiv c/(f_c + f_n)$ は電波の波長 (c は電波伝搬速度) , k_j は整数である．

帯域通過フィルタから出力される受信信号 $r'_{n,1}$, $r'_{n,2}$ はそれぞれ次式のようになる．

$$r'_{n,1}(t) = \exp[j2\pi f_n t] \exp[i\phi_1] \quad (1.1')$$

$$r'_{n,2}(t) = \exp[j2\pi f_n t] \exp[i\phi_2] \quad (1.2')$$

受信信号の位相差 $\Delta\phi_{12} \equiv \phi_1 - \phi_2$ は , 受信信号の相関を次式のように求めることにより測

定することができる．

$$\text{Arg}\langle r'_{n,1}(t) \cdot r'_{n,2}*(t) \rangle = \exp[i(\phi_1 - \phi_2)] = \Delta\phi_{12} \quad (1.5)$$

ここで， $\cdot$ は時間 t に平均操作， $\cdot^*$ は複素共役を表す．同様にそれぞれ，アンテナ 1 受信信号とアンテナ 3 受信信号の位相差 $\Delta\phi_{13} = \phi_1 - \phi_3$ ，アンテナ 1 受信信号とアンテナ 4 受信信号の位相差 $\Delta\phi_{14} = \phi_1 - \phi_4$ が測定できる．

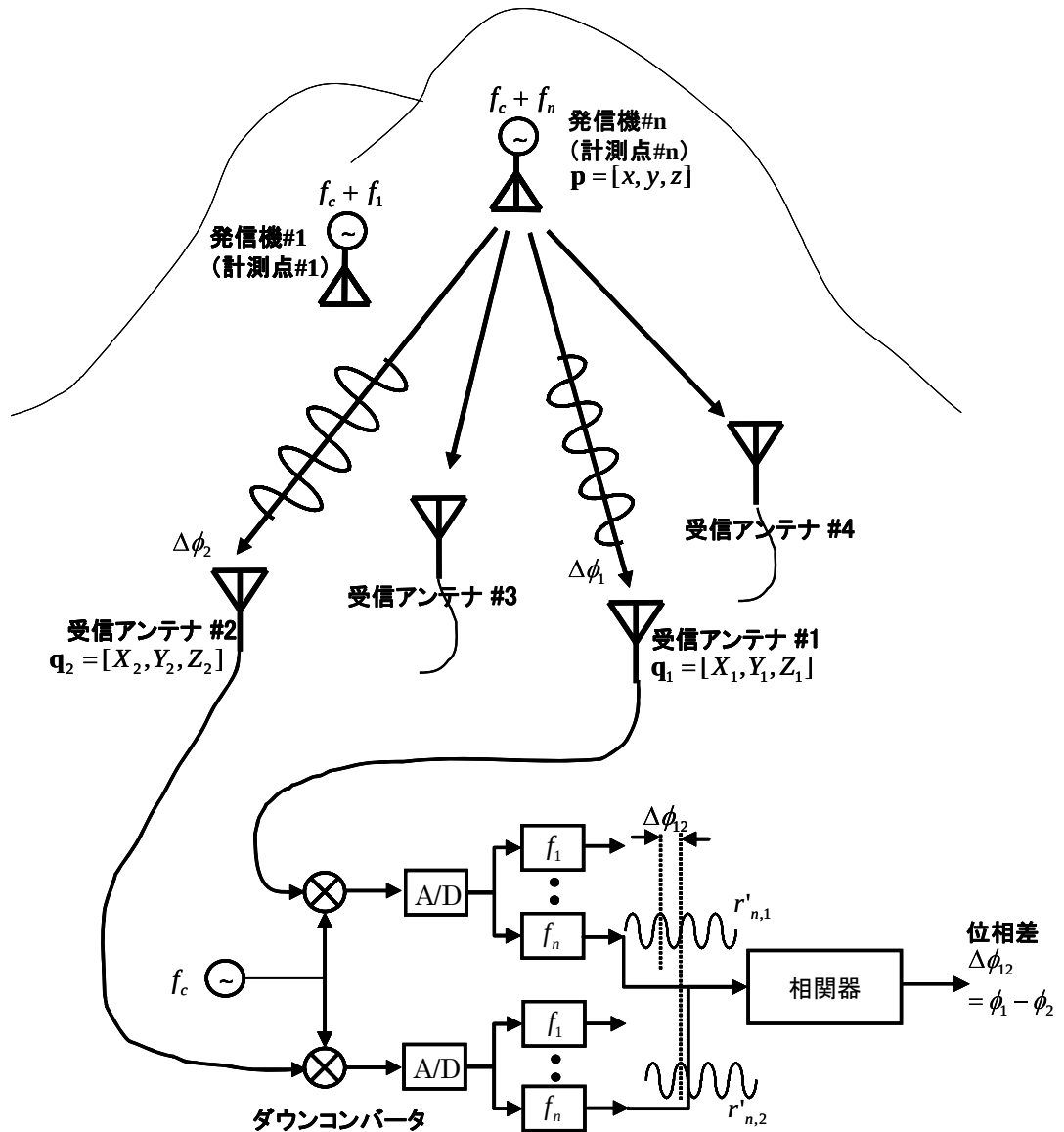


図-2 電波の位相差を利用した変位計測系の基本構成

計測点の位置 $\mathbf{p} = [x, y, z]^T$ に関する方程式は，式(1.3)，(1.4) などから次のように与

えられる．

$$\sqrt{(x-X_i)^2 + (y-Y_i)^2 + (z-Z_i)^2} - \sqrt{(x-X_j)^2 + (y-Y_j)^2 + (z-Z_j)^2} = \Delta r_{ij}$$

$$(i=1; j=2,3,4) \quad (1.6)$$

ここに， Δr_{ij} は計測点から受信アンテナ i までの経路長と計測点から受信アンテナ j までの経路長との距離差を意味し，次式により与えられる観測値である．

$$\Delta r_{ij} = \frac{\lambda}{2\pi} (\Delta\phi_{ij} + 2\pi \cdot N_{ij}) \quad (1.7)$$

なお， N_{ij} は電波の経路差の整数値パイアスであり，既知または推定できる値である．計測点の位置 $\mathbf{p} = [X, Y, Z]^T$ は，各位相差 $\Delta\phi_{ij}$ を測定すれば，式(1.6)に示した 3 次元連立方程式の解として推定することができる．なお， $i=1, j=2$ についての式(1.6)を満足する $[x, y, z]$ は，図-3 に示すような放物面で表される位相差 $\Delta\phi_{12}$ の等位相差面上にあることになる．計測点の位置は，別の受信アンテナの組み合わせから得られる等位相差面との交点から推定されるものと考えることができる．

なお，この測位方式では，電波発信機の周波数ゆらぎは相殺されるため，計測箇所に設置する発信機は周波数安定度が比較的低いもので済み，小型，安価なものを使用できる利点がある．

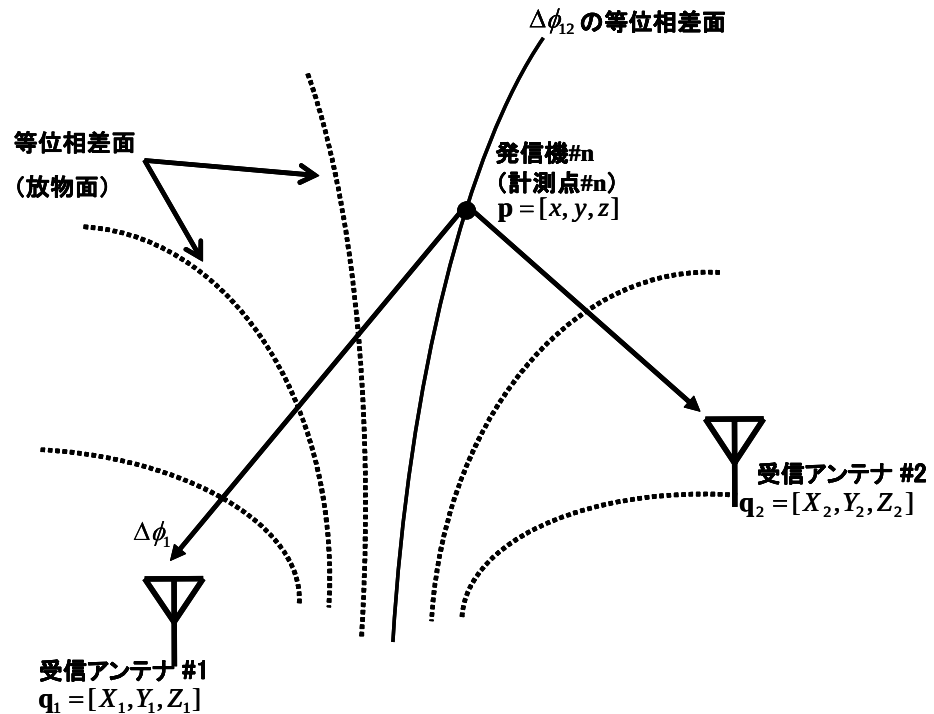


図-3 等位相差面の一例

前節で示した測位法では，計測点（電波発信機）の位置は式(1.6)の3方程式の解から決定されるが，これらの方程式は未知数 $[x, y, z]$ について2乗や平方根があり非線形であるから，直接 $[x, y, z]$ を解くことは難しい．また，位相差 $\Delta\phi_{ij}$ の観測誤差の存在により，実際には3個の等位相差面は一点で交わらない．

そこで， $[x, y, z]$ を近似値 $[\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}]$ 周りに展開し，近似値から真値への補正量 $[\delta x, \delta y, \delta z]$ を求めて発信機の位置 $[x, y, z]$ を推定する方法を用いる．すなわち， $[x, y, z]$ を次のように展開する．

$$\begin{aligned} x &= \hat{x} + \delta x \\ y &= \hat{y} + \delta y \\ z &= \hat{z} + \delta z \end{aligned} \quad (1.8)$$

ここで，式(1.6)の左辺を $f_{ij}(x, y, z)$ とおいて， $[\delta x, \delta y, \delta z]$ の2次以上の項を無視すると，次のような近似式が得られる．

$$\begin{aligned} f_{ij}(x, y, z) &= f_{ij}(\hat{x} + \delta x, \hat{y} + \delta y, \hat{z} + \delta z) \\ &= f_{ij}(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}) + \frac{\partial f_{ij}(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})}{\partial x} \delta x + \frac{\partial f_{ij}(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})}{\partial y} \delta y + \frac{\partial f_{ij}(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})}{\partial z} \delta z \end{aligned} \quad (1.9)$$

これを $(i = 1; j = 2, 3, 4)$ について書き直すと次式が得られる．

$$\hat{\mathbf{A}} \delta \mathbf{p} = \delta \mathbf{r} \quad (1.10)$$

$$\hat{\mathbf{A}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_{12}(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})}{\partial x} & \frac{\partial f_{12}(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})}{\partial y} & \frac{\partial f_{12}(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})}{\partial z} \\ \frac{\partial f_{13}(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})}{\partial x} & \frac{\partial f_{13}(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})}{\partial y} & \frac{\partial f_{13}(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})}{\partial z} \\ \frac{\partial f_{14}(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})}{\partial x} & \frac{\partial f_{14}(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})}{\partial y} & \frac{\partial f_{14}(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (1.11)$$

$$\delta \mathbf{p} = [\delta x, \delta y, \delta z]^T \quad (1.12)$$

$$\delta \mathbf{r} = \begin{bmatrix} f_{12}(x, y, z) - f_{12}(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}) \\ f_{13}(x, y, z) - f_{13}(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}) \\ f_{14}(x, y, z) - f_{14}(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}) \end{bmatrix} \quad (1.13)$$

式(1.9)～(1.13)において， $f_{ij}(x, y, z)$ は式(1.7)の観測値から求めた距離差 Δr_{ij} を意味する．

$$f_{ij}(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}) = \sqrt{(\hat{x} - X_i)^2 + (\hat{y} - Y_i)^2 + (\hat{z} - Z_i)^2} - \sqrt{(\hat{x} - X_j)^2 + (\hat{y} - Y_j)^2 + (\hat{z} - Z_j)^2} \equiv \Delta r_{ij} \quad (1.14)$$

すなわち，式(1.13)に定義された $\delta \mathbf{r}$ の要素は観測値の距離差 Δr_{ij} と近似距離差 $\Delta \hat{r}_{ij}$ との差である．式(1.10)より補正值 $\delta \mathbf{p} = [\delta x, \delta y, \delta z]^T$ は次式のように求められる．

$$\delta \mathbf{p} = \hat{\mathbf{A}}^{-1} \delta \mathbf{r} \quad (1.15)$$

行列 $\hat{\mathbf{A}}$ の要素は式(1.6)の定義から具体的に次式により与えられる．

$$\frac{\partial f_{ij}(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})}{\partial x} = \frac{2(\hat{x} - X_i)}{\sqrt{(\hat{x} - X_i)^2 + (\hat{y} - Y_i)^2 + (\hat{z} - Z_i)^2}} - \frac{2(\hat{x} - X_j)}{\sqrt{(\hat{x} - X_j)^2 + (\hat{y} - Y_j)^2 + (\hat{z} - Z_j)^2}} \quad (1.16)$$

$\partial f_{ij}(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}) / \partial y$ ， $\partial f_{ij}(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}) / \partial z$ についても同様である．

計測点の推定装置は，式(1.15)より補正值 $\delta \mathbf{p} = [\delta x, \delta y, \delta z]^T$ を求め，これを式(1.8)に代入することにより得られる．但し，推定精度を上げるため，算出された推定位置 $[\hat{x} + \delta x, \hat{y} + \delta y, \hat{z} + \delta z]$ を新たな近似位置 $[\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}]$ に置き換えて，このような補正を逐次的に繰り返して用いる．

上記逐次近似法による測位計算のアルゴリズムは以下のようにまとめられる．

[STEP1] 受信信号の位相差を測定し，式(1.7)より観測値の距離差 Δr_{ij} を得る．

[STEP2] 適当な初期の近似位置 $[\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}]$ を定める．

[STEP3] 近似位置 $[\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}]$ における近似距離差 $\Delta \hat{r}_{ij} = f_{ij}(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})$ を式(1.14)により求める．

[STEP4] 観測値の距離差 $\Delta r_{ij} = f_{ij}(x, y, z)$ と近似距離差 $\Delta \hat{r}_{ij}$ との差 $\delta \mathbf{r}$ を式(1.13)により求める．

[STEP5] $\partial f_{ij}(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}) / \partial x$ ， $\partial f_{ij}(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}) / \partial y$ ， $\partial f_{ij}(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}) / \partial z$ を式(1.16)などにより求めて，式(1.11)に従って行列 $\hat{\mathbf{A}}$ を定める．

[STEP6] 式(1.8)より補正值 $[\delta x, \delta y, \delta z]$ を求める．

[STEP7] 補正值 $\delta \mathbf{p} = [\delta x, \delta y, \delta z]^T$ が十分に小さいなら $[\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}] \leftarrow [\hat{x} + \delta x, \hat{y} + \delta y, \hat{z} + \delta z]$ として[STEP3]に戻る．

[STEP8] $[\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}]$ を推定位置として出力する．

本研究においては，計測結果の誤差を大きく系統誤差と偶然誤差に分類する（図-4）．

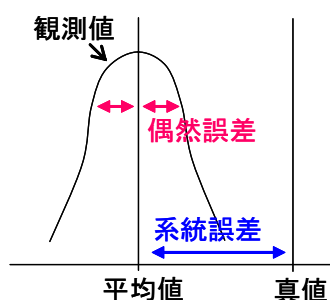


図-4 誤差の概念図

これらの誤差についての定義は次の通りである．

系統誤差・・・ある測定における測定値と，真の値に対して系統的にずれがあるとき，それを系統誤差という．誤差の因果関係や発生機構がわかりやすく，その誤差が補正可能であるか，または観測方法の変更により除去可能な誤差である．原因が判明すれば測定値から取り除くことは可能であるが，完全に取り除くことは不可能である．原因と傾向からでき得る限り系統誤差を取り除き，除去不可能な系統誤差に関してはその上限を把握する必要がある．また，平均値と真値の偏りを示す値は外的精度と称される．

偶然誤差...上述の系統誤差と機器の誤作動等の過失誤差を取り除いた後に残る誤差を偶然誤差という．この誤差は測定方法によって決まるもので，系統誤差とは異なり決定論的には不規則な誤差に見える．しかし確率論的には規則性のあるものとして取り除くことができる．繰り返し計測を行うことで特定の分布を得て，ケースバイケースの方法（平均をとる，最頻値をとる等の方法）で真の値の推定値精度をあげる必要がある．また，計測値の分散は内的精度と称される．

本研究では，系統誤差の要因を温度，偶然誤差の主要因を DOP(Dilution of Precision)と想定する．前者については温度により発信機，受信機，受信センサの取り付け金具が伸縮することで系統的な誤差が生ずるものと考え．偶然誤差に関しては，発信機と受信機の配置によって観測値の精度が異なるという本手法に特有の点に着目し，誤差感度指標として DOP を用いることを以下に検討する．

2. 測位精度の解析

本節では前節にて偶然誤差の評価指標として提案した DOP の概念と理論について述べる．

) DOP(Dilution of Precision)の概念

図-5 に DOP の概念図を示す．図-5(A)はセンサを直線配置した場合の図，図-5(B)はセンサを直交配置した場合の図である．図-5(A)の発信機位置 の場合を例にとって説明する．

細い青線(ア)が青の2台の受信機が受信した電波の等位相差面を表す。線(ア)に重ねてひいている太い青線(イ)は位相誤差を含んだ等位相差面である。細い赤線(ウ)は赤の2台の受信機が受信した電波の等位相差面、太い赤線(エ)は位相誤差を含んだ等位相差面である。正確な発信機位置は(ア)と(ウ)の交点として求められるが、実際には位相誤差を含んだ等位相差面である(イ)と(エ)の交わる面積内の一点として発信機位置が計算される。この、(イ)と(エ)によって作られる面積が、発信機の変位算出において生ずる測位誤差である。

図-5(A)と図-5(B)と発信機位置を比較してみると、同位置の発信機でも、センサ配置により誤差の広がり(面積・方向)が変わる。一般的に(A)の直線配置に比べて(B)の直交配置の方が誤差の広がりが少ない。また、図(A)発信機位置と の下方にある発信機位置を比較してみると、同センサの組み合わせでも、発信機位置により誤差の広がり(面積・方向)が変わる。一般的に(A)の直線配置の場合、センサに近い方が角度が取れて誤差が少ない。

) DOP の定義

DOP とは受信センサ数と配置に依存する誤差感度指標であり、従って、発信機、受信センサの幾何学的配置から以下のように数学的に導出することができる。

受信信号の位相差を実際に求める際には、式(1.5)の相関演算に受信機雑音の影響が加わる。また、各受信アンテナの位相パターンも存在し、その補償誤差が混入する。よって、受信信号の位相差 $\Delta\phi_{ij}$ には誤差 $\varepsilon_{\phi_{ij}}$ が加わる。ここでは、測定位相誤差 $\varepsilon_{\phi_{ij}}$ による計測点の位置推定誤差(測位誤差) $[\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z]$ を見積もる。

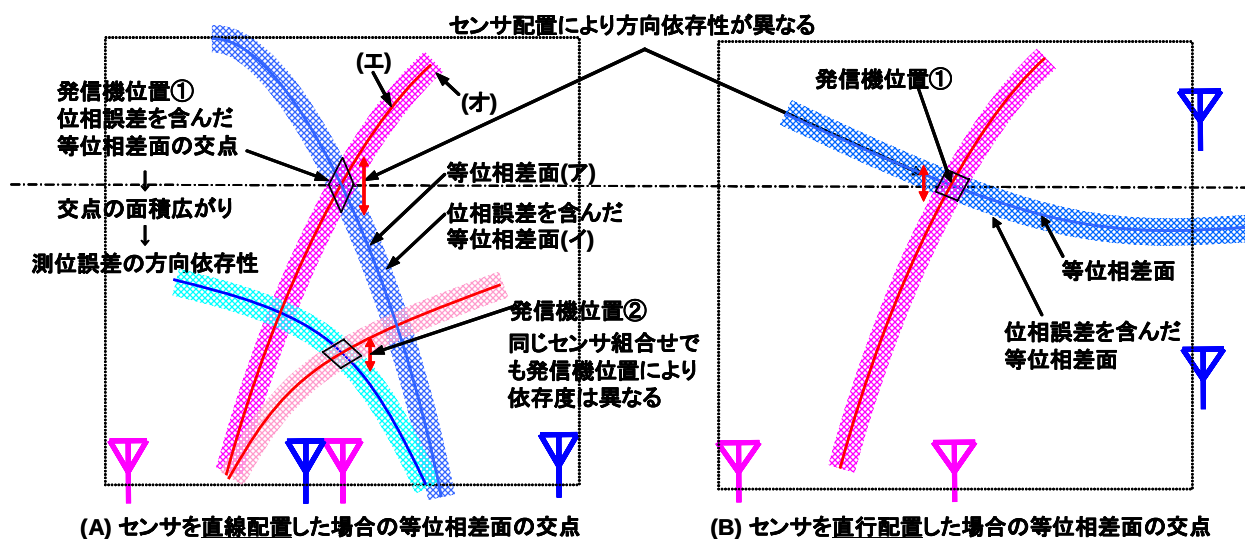


図-5 DOP の概念図

位相誤差 $\varepsilon_{\phi_{ij}}$ が加わったときの式(1.6)の関係は、 $[x, y, z]$ が $[x + \varepsilon_x, y + \varepsilon_y, z + \varepsilon_z]$ のように誤差を持つために、次式のように変わる。

$$\begin{aligned}
& \sqrt{(x + \varepsilon_x - X_i)^2 + (y + \varepsilon_y - Y_i)^2 + (z + \varepsilon_z - Z_i)^2} \\
& - \sqrt{(x + \varepsilon_x - X_j)^2 + (y + \varepsilon_y - Y_j)^2 + (z + \varepsilon_z - Z_j)^2} \\
& = \frac{\lambda}{2\pi} (\Delta\phi_{ij} + \varepsilon_{\phi_{ij}})
\end{aligned} \tag{1.17}$$

$[\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z]$ が微少な値として式(1.17)の左辺を展開すると、

$$\begin{aligned}
& \sqrt{(x - X_i)^2 + (y - Y_i)^2 + (z - Z_i)^2} \\
& + \frac{2(x - X_i)\varepsilon_x + 2(y - Y_i)\varepsilon_y + 2(z - Z_i)\varepsilon_z}{\sqrt{(x - X_i)^2 + (y - Y_i)^2 + (z - Z_i)^2}} \\
& - \sqrt{(x - X_j)^2 + (y - Y_j)^2 + (z - Z_j)^2} \\
& - \frac{2(x - X_j)\varepsilon_x + 2(y - Y_j)\varepsilon_y + 2(z - Z_j)\varepsilon_z}{\sqrt{(x - X_j)^2 + (y - Y_j)^2 + (z - Z_j)^2}} \\
& = \frac{\lambda}{2\pi} (\Delta\phi_{ij} + \varepsilon_{\phi_{ij}})
\end{aligned} \tag{1.18}$$

となる。

式(1.18)で式(1.6)の関係を用いて整理すると、位相誤差と測位誤差の関係式を次のように得ることができる。

$$\begin{aligned}
& \frac{2(x - X_i)\varepsilon_x + 2(y - Y_i)\varepsilon_y + 2(z - Z_i)\varepsilon_z}{\sqrt{(x - X_i)^2 + (y - Y_i)^2 + (z - Z_i)^2}} \\
& - \frac{2(x - X_j)\varepsilon_x + 2(y - Y_j)\varepsilon_y + 2(z - Z_j)\varepsilon_z}{\sqrt{(x - X_j)^2 + (y - Y_j)^2 + (z - Z_j)^2}} \\
& = \frac{\lambda}{2\pi} \varepsilon_{\phi_{ij}}
\end{aligned} \tag{1.19}$$

これらの関係を式(1.11)、(1.16)で $[\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}]$ を $[x, y, z]$ に置き換えた行列 $\mathbf{A}$ で表現すれば、測位誤差ベクトル $\mathbf{e}_p = [\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z]^T$ は次式で与えられる。

$$\mathbf{A}\mathbf{e}_p = \frac{\lambda}{2\pi} \mathbf{e}_\phi \quad (1.20)$$

$$\mathbf{e}_\phi = [\varepsilon_{\phi 12}, \varepsilon_{\phi 13}, \varepsilon_{\phi 14}]^T \quad (1.21)$$

従って，測位誤差の分散 $\sigma_p^2 = E[\varepsilon_x^2] + E[\varepsilon_y^2] + E[\varepsilon_z^2]$ は次のように与えられる．

$$\begin{aligned} \sigma_p^2 &= E[\mathbf{e}_p^T \mathbf{e}_p] \\ &= (\lambda/2\pi)^2 \text{trace}[(\mathbf{A}^{-1})^T \mathbf{A}^{-1} E[\mathbf{e}_\phi \mathbf{e}_\phi^T]] \end{aligned} \quad (1.22)$$

ここで位相誤差 $\varepsilon_{\phi 12}$ ， $\varepsilon_{\phi 13}$ ， $\varepsilon_{\phi 14}$ が互いに独立でその分散が共通に ε_ϕ^2 であるとする，測位誤差の大きさ σ_p は式(22)により次のように与えられる．

$$\sigma_p = \varepsilon_\phi (\lambda/2\pi) \sqrt{\text{trace}(\mathbf{A}\mathbf{A}^T)^{-1}} \quad (1.23)$$

ゆえに，本提案の測位における DOP は次式となる．

$$DOP = \sqrt{\text{trace}(\mathbf{A}\mathbf{A}^T)^{-1}} = \sqrt{\text{trace}(\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1}} \quad (1.24)$$

この DOP を利用して，測位演算における測位誤差は次式により求められる．

$$\text{全方向誤差： } \varepsilon_{total} = \frac{\lambda}{2\pi} DOP_{total} \cdot \varepsilon_\phi \quad \varepsilon_\phi : \text{位相誤差の rms 値(rad)} \quad (1.26)$$

次に上式内の ε_ϕ について説明する． ε_ϕ は位相誤差の rms 値（平均 2 乗誤差）であるが，本研究では位相誤差を次のような精度の足し合わせであるとする．

$$\text{位相誤差} = \text{機器誤差} + \text{設置誤差} + \text{空界雑音誤差} \quad (1.27)$$

ここで，機器誤差（図-6）とは受信機と受信センサをつなぐケーブル長等の加工により生ずる誤差，信号処理を行う A/D 変換器のクロック誤差，環境条件等の時間変化に伴う受信系遅延位相量等の総称である．これらは校正にて補償することが可能である．また，設置誤差（図-6）とは，センサの取り付け金具の剛性や位置信頼性等の，設計・施工要因に依存する誤差である．

また，空界雑音誤差（図-7）とは，建物の反射等によるマルチパス，樹木等の影響による減衰や移送により生ずる誤差である．

図-8 に本研究にて定義する位相誤差の一例を示す．希望波に機器誤差，設置誤差，反射波や移送波を加えたものが観測波となる．

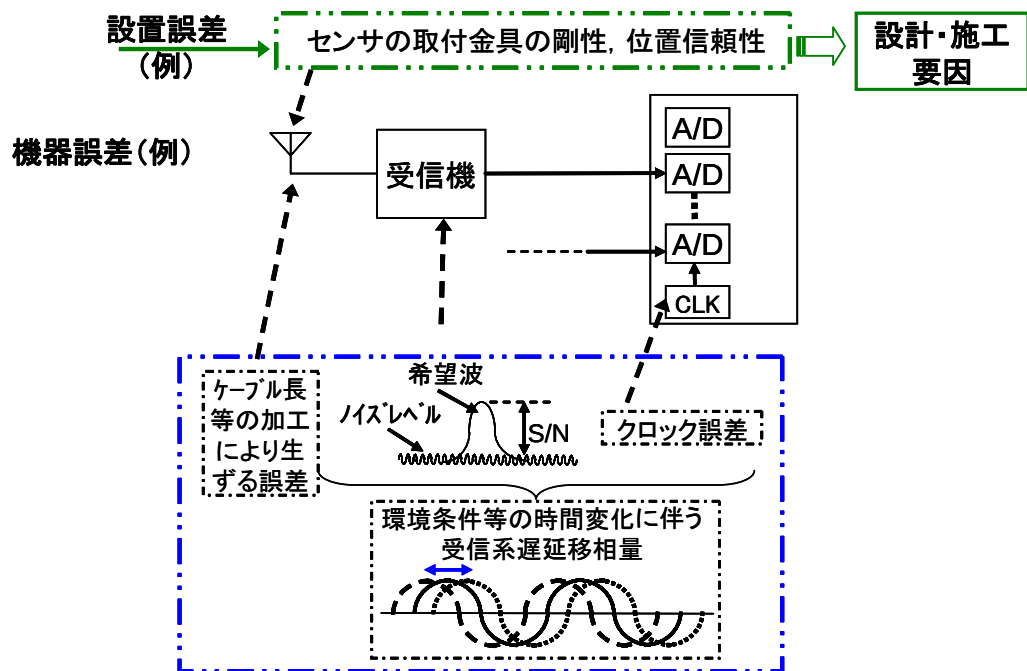


図-6 機器誤差と設置誤差の例

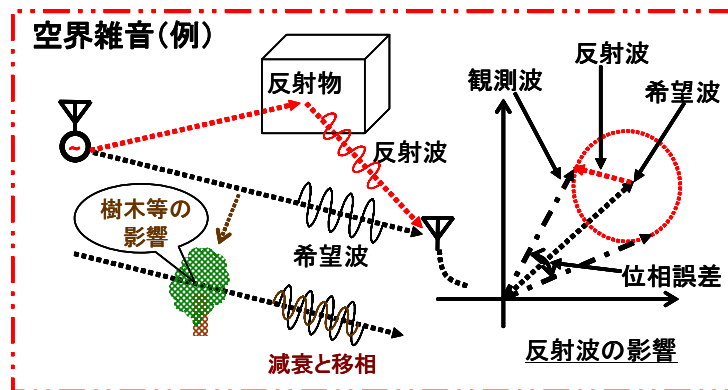


図-7 空界雑音の例

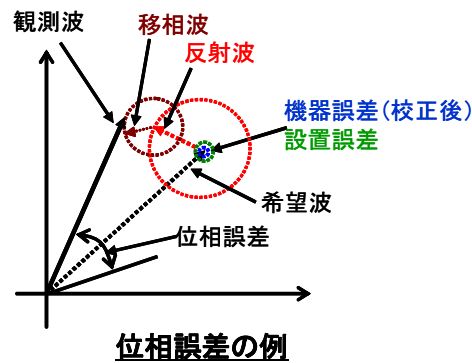


図-8 位相誤差の例

つまり，観測地点に機器を設置する際の状況等から位相誤差を決定すれば，DOP を用いて式(1.26)によりセンサ配置による変位誤差を算出することができる．

3．計測実験例

図-9 および図-10 に試験フィールド図を示す．発信機を取り付ける場所としてフィールドに隣接した位置に法面を作成した．法面に発信機を取り付け，受信センサを 2 つのパターンに配置する．本実験で全長 6m の受信センサ取り付け用ポールを用いた．図における赤丸は発信機を，青丸は受信センサ取り付けポールの設置位置を示し，各ポールには 4 つの受信センサを取り付ける．

実験 1：直線配置（図-9）

発信機（図-9(a)）と受信センサ（図-9(b)）を図-9 のように配置する．最も高い位置の受信センサの高さは 4m とする．Tx#1 は Y，Z 軸方向に変位させ，Tx#2 は連続静止状態とし，変位計測と精度評価を行う．直線配置における各発信機の DOP を表-1 に示す．

実験 2：L 字配置（図-10）

発信機（図-10(a)）と受信センサを図-10 のように配置する．X，Y 軸の各方向の DOP を同等とした配置で Tx#1 は Y 軸方向に，Tx#2 は X 軸方向に変位させ，変位計測と精度評価を行う．L 字型配置における各発信機の DOP を表-2 に示す．

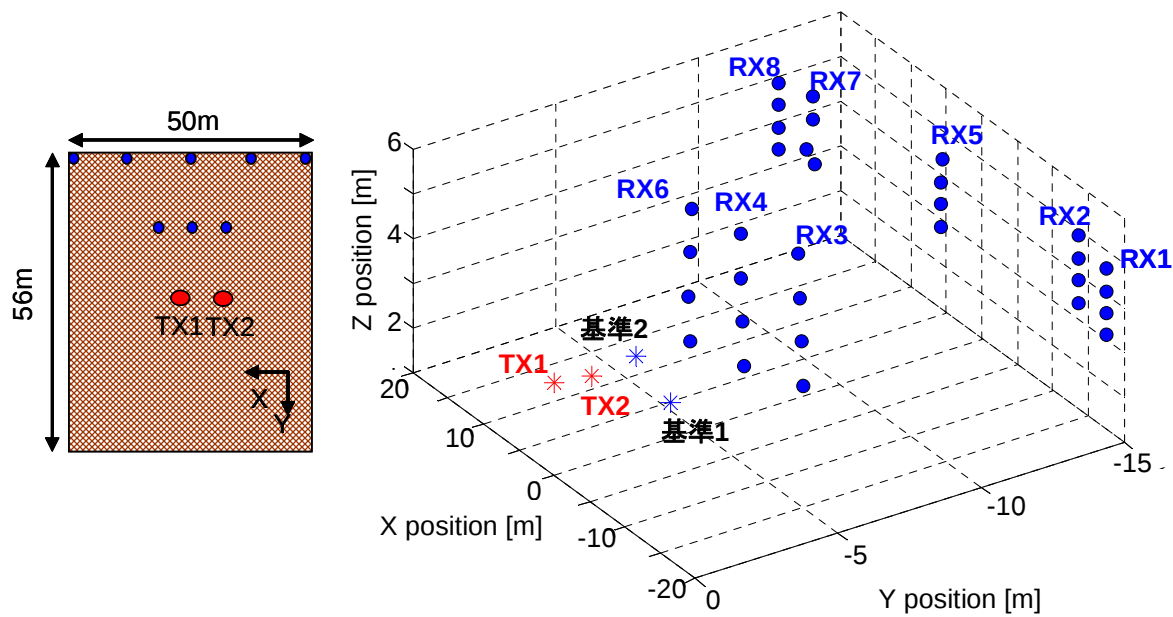


図-9 配置パターン 直線配置

表-1 直線配置での各発信機の DOP

	XDOP	YDOP	ZDOP	Total DOP
Tx#1	0.30	1.20	2.00	2.30
Tx#2	0.30	1.10	1.80	2.10



写真-9 (a) 発信機 (Tx#1,2)



写真-9(b) 受信センサ (Rx)

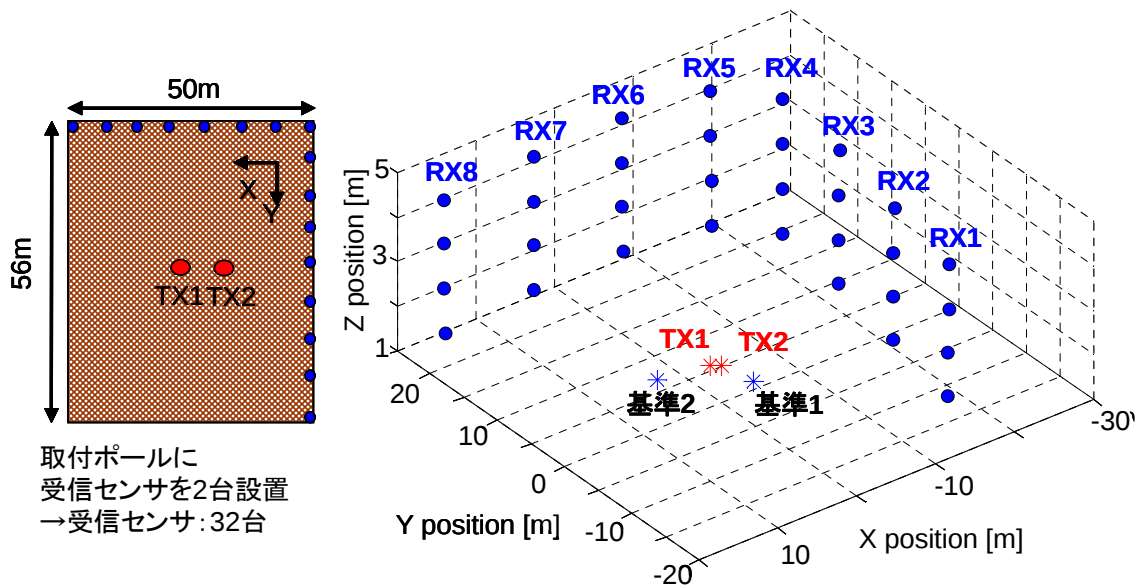


図-10 配置パターン L字配置

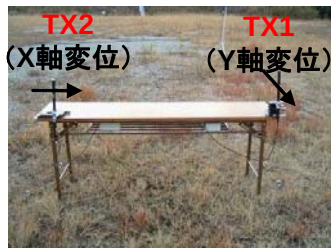


写真-10(a) 発信機 (Tx1,2)

表-2 L字型配置での各発信機の DOP

	XDOP	YDOP	ZDOP	Total DOP
Tx#1	0.397	0.359	3.538	3.578
Tx#2	0.382	0.346	3.410	3.449

表-3 に図-9 に示す配置での計測結果の一例を示す．発信機，受信センサ取り付けポールを図-9 のように配置して，Y，Z 軸方向に発信機 Tx#1 を時間間隔 24 分で動かし，X 軸方向は静止状態に保った．本節では発信機に変位を与え，真値と計測値平均の差を検討することにより外的精度を評価する．また，計測値のぶれを検討することにより内的精度を評価する．

また，発信機 Tx#2 は全方向静止状態に保った．また，図-9 のような配置では発信機と受信センサの距離はせいぜい 25m 程度しか離れていず，本実験の目的である長距離での精度検証を十分に行うことができない．そこで，空气中を伝播する間に伝達電力が失われる

という電波の性質を利用して発信機に減衰機を挿入することで電波の伝達電力を弱め、擬似的に発信機と受信機との距離を延長する工夫を行った。電波が伝播するに従って伝達力が弱められる性質は自由空間損失と呼ばれ、次式で求められる。

$$L[\text{dB}] = 32.4 + 20\log f + 20\log d \quad (1.28)$$

ただし、 $L[\text{dB}]$ ：自由空間損失

$f[\text{MHz}]$ ：周波数（本研究では、2440MHz/時 の電波を使用している。）

$d[\text{km}]$ ：送受信点間距離

直線 2 列配置において実際は、発信機と受信センサの間の距離が $d=25\text{m}$ であり、このときの自由空間損失は上式より、

$$L[\text{dB}] = 68\text{dB}$$

と計算できる。

発信機と受信センサ間の距離を 250m と想定すると、自由空間損失は、

$$L[\text{dB}] = 88\text{dB}$$

である。従って、空間損失の差である 20dB を減衰器の値として設定すれば、擬似的に発信機と受信センサ間を 250m 離れたことになる。本実験では発信機 Tx#1 の減衰機レベルを 0dB と 20dB に設定して計測を行い、測位結果を比較した。

また、発信機と受信センサ間の距離を 500m と想定すると、自由空間損失は、

$$L[\text{dB}] = 94\text{dB}$$

である。上と同様に、空間損失の差である 26dB を減衰器の値として設定すれば、擬似的に発信機と受信センサ間を 500m 離れたことになる。本実験では発信機 Tx#2 の減衰機レベルを 0dB と 26dB に設定して計測を行い、測位結果の比較を行った。

図-11 は直線 2 列配置において発信機-受信センサ間の距離を擬似的に 250m としたときの計測例を示す。本実験では変位を与えて計測しているケースについては、 24 分周期で変位を与えているのでカットオフ周波数 w_c を $1/24 = 0.041$ とした。また、変位を与えていないケースについても同様のカットオフ周波数を与えた。図では、発信機 Tx#1 の Y 軸方向の変位計測の結果を示す。横軸の真値というのは、発信機に強制的に与えた変位量である。計測値と示しているのは、何ら処理を施していないデータである。この結果より、簡単なフィルタを施すことで、高精度の計測結果を得ることができるのが分かる。平均値に関しては平均値と真値の比は $1:1$ であることが望ましく、理想的な計測値が得られた場合、近似直線の傾きは 1 となるべきである。そこで各方向について近似直線の傾きを調べたところ、Y 方向では 0.655 、Z 方向では 0.779 という値が得られた。ここで、Y、Z 方向では、標準偏差が 1.5 以上のデータは平均値に関しても真値からのずれが非常に大きい。標準偏差が 1.5 以上となる計測期間においては機器のバグが生じていたことが判明しており、このバグは発信機からの電波を受信する際に起こるものであり、これはハード機器に対して対策を施すことで解決できる。

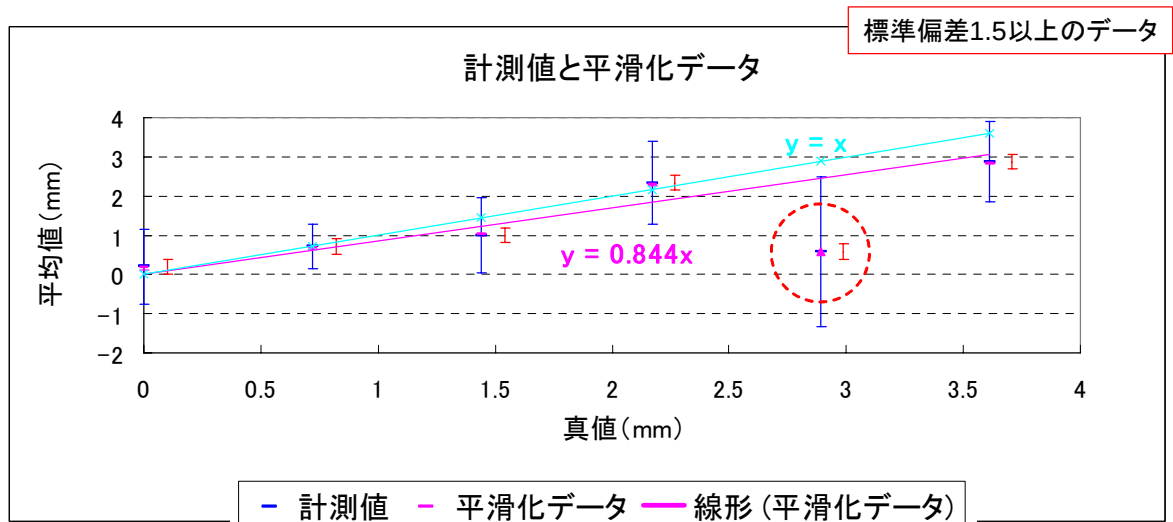


図-11 変位計測結果例

また標準偏差が 1.5 以上のデータを使わないものとし近似直線を求めた場合、近似直線の傾きは図に示すように Y 軸方向では 0.844、Z 軸方向では 1.2627 となり、理想的な傾き 1 と非常に近くなる。

このローパスフィルターにより偶然誤差を除去した後の各方向の外的精度、内的精度を表-3 に示す。X、Y、Z の 3 軸とも 1 mm 近い外的精度、内的精度を得ることが可能となった。なお、データは各強制変位を与えた際の平均値である。

表-3 直線配置 Tx#1 平滑化データの外的誤差、内的誤差
(mm)

	X 方向	Y 方向	Z 方向
外的誤差	0.113	0.767	1.07
内的誤差	0.001	0.061	0.036

次に L 字型配置における計測結果を図-12 および図-13 示す。前述と同じく発信機 Tx#1 に Y 軸方向に時間間隔 24 分で変位を与え、X、Z 軸方向は静止状態に保った。発信機 Tx#2 には X 軸方向に 24 分間隔で変位を与え、Y、Z 軸方向は静止状態に保った。また、それぞれの結果に対してカットオフ周波数 $w_c=0.041$ のデジタルフィルタにより平滑化処理を行った。

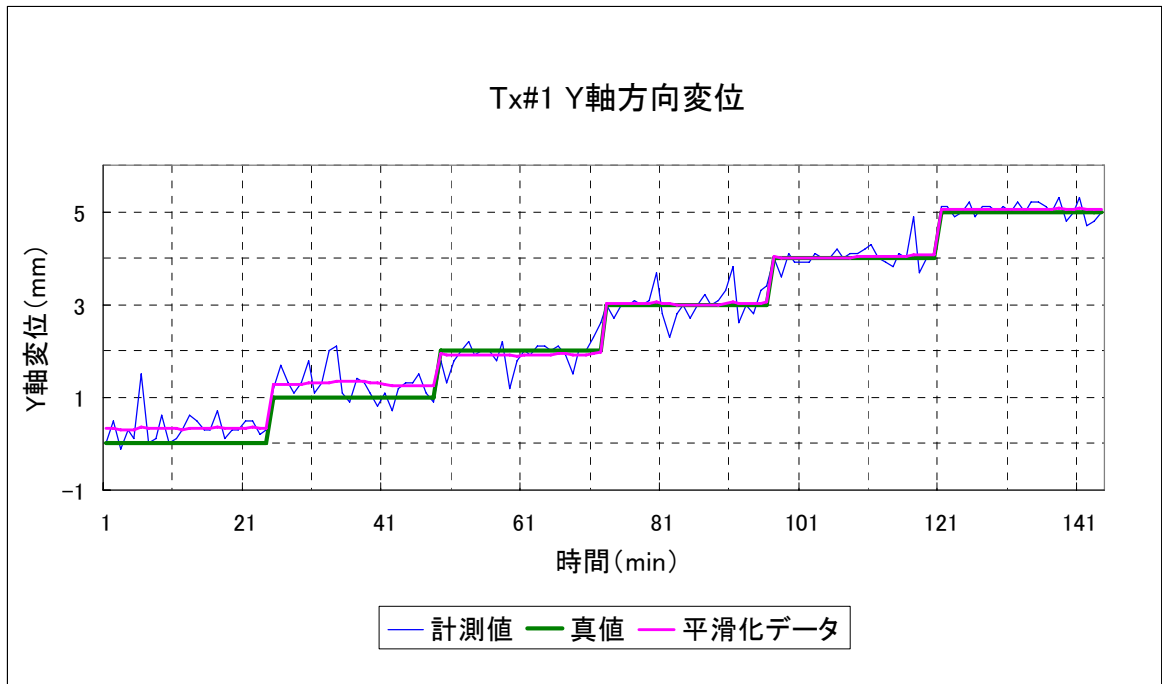


図-12(a) L字型配置 Tx#1 Y軸方向変位計測結果

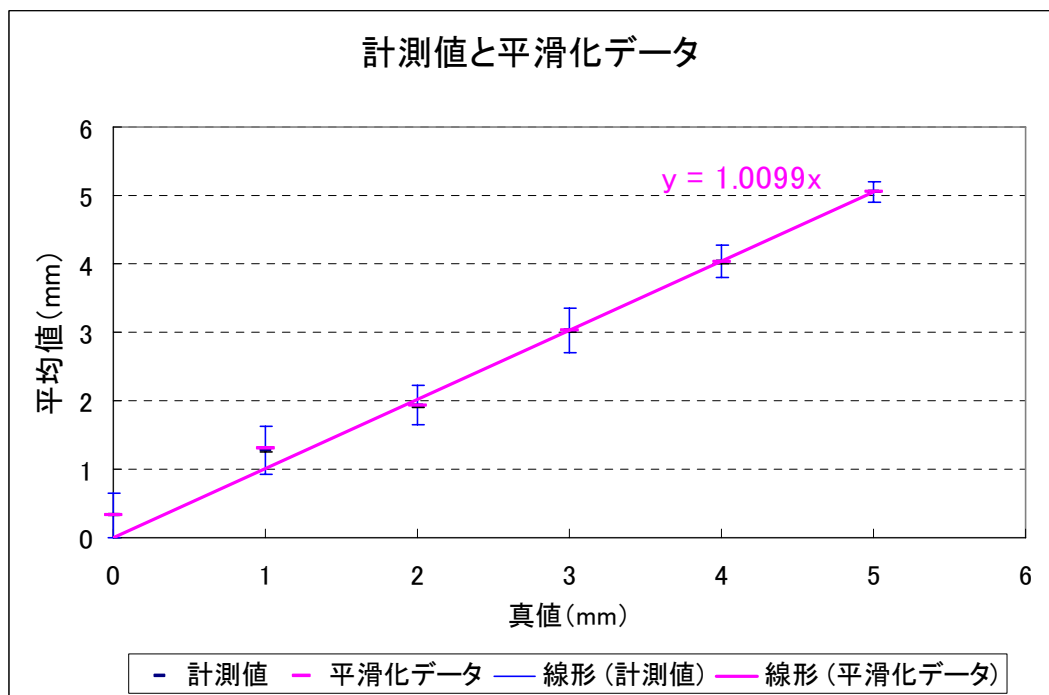


図-12(b) L字型配置 Tx#1 Y軸方向 計測値の比較

L字型配置においては、直線配置に較べて高い精度が得られた。L字型配置においても計測値と平滑化データの平均値は近い値となっている。X軸方向に関しては、平滑化处理

後の標準偏差は計測値に較べて 1/3 程度となっている。また，Y 軸方向は X，Z 軸に較べて非常に精度が良く，真値と平均値の比は 1.01 である。X 軸に較べて Y 軸の精度が良い理由としては，Y 軸方向の受信センサ数が多いこと X 軸方向の受信センサの広がり が 25m であるのに対し Y 軸方向の受信センサの広がり が 28m と大きいことが挙げられる。これら 2 点は DOP 値によって数値でも表されており，計測値は DOP 値に見合った値であると考えられる。

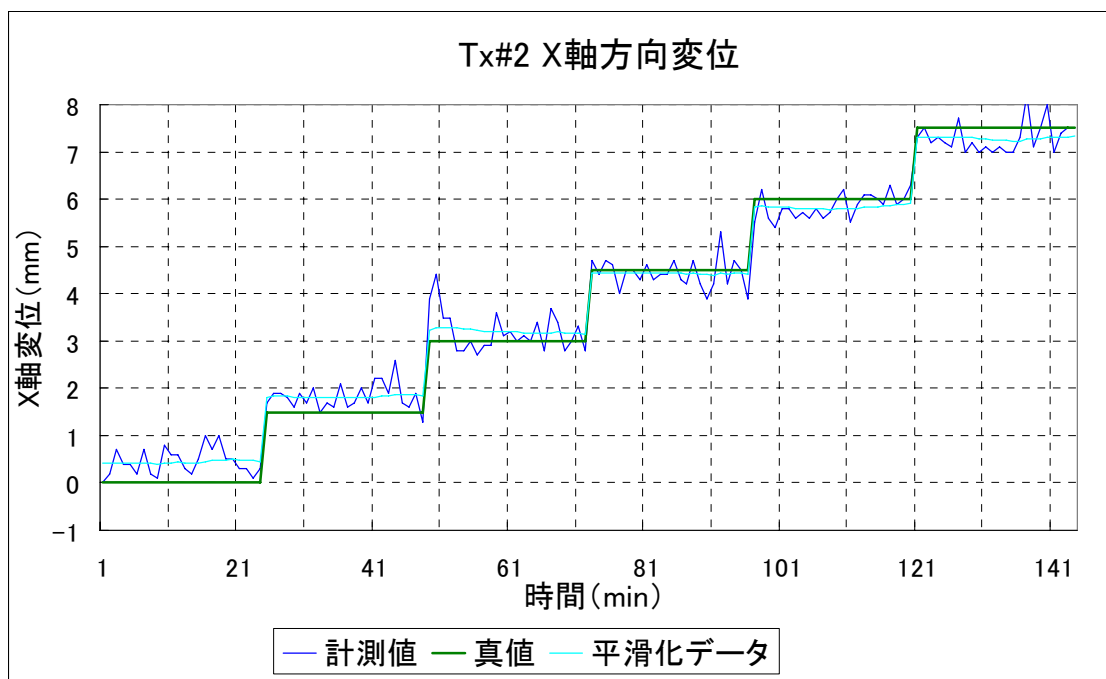


図-13(a) L字型配置 Tx#2 X 軸方向変位計測結果

また計測値には偶然誤差をフィルタリングした後にもトレンドが見られた。トレンドの要因として考えられるものの一つに温度がある。直線 2 列配置，L 字型配置において受信センサ取り付けポールに熱電対温度計を設置し発信機を静止状態に保ったときの計測値と観測温度の変化を図-14 および図-15 に示す。発信機と受信センサの配置は図-9 および図-10 とほぼ同じである。

図が示すように，温度変化と計測結果は似た形で変動していることが明らかとなった。温度が計測値の精度に影響を与えることは明らかである。しかし，DOP 値が良い値をとる場合には温度による誤差が抑えられる傾向もみられる。例えば，L 字型配置の X,Z 方向の計測値を比較してみると X 方向の方が真値からのずれ，計測値のぶれが少ない。この温度の影響は，機器が温度特性を持つのではなく，機器を取り付けている柱等の温度特性であることが後に判明した。従って，本システムは柱の温度特性を計測できる高精度な計測システムであることが言えると同時に，現場での設置には取り付け柱の工夫等が必要なこと

が示唆される．

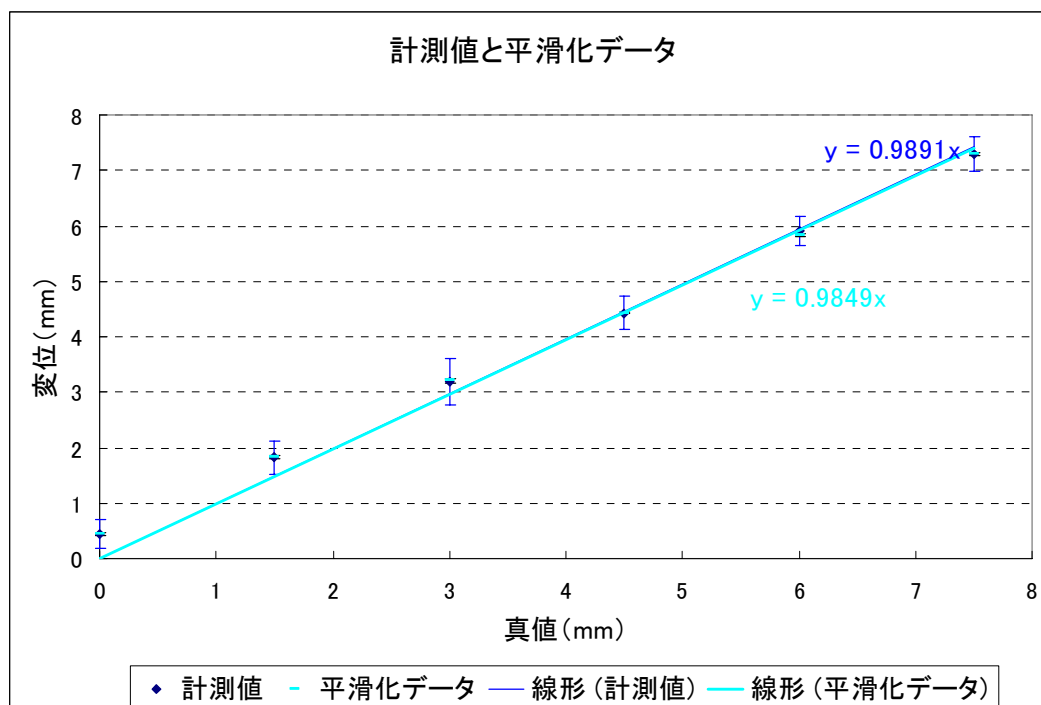


図-13(b) L字型配置 Tx#2 X軸方向 計測値の比較

5. 結 言

本論文は電波を用いて斜面の動態観測をリアルタイムに行う手法を計測し，斜面崩壊予測や道路法面の維持管理への適用に向けて精度の評価実験を行ったものである．本研究の成果をまとめると以下のようになる．

1) 本計測手法の利点

斜面動態観測における GPS 測量の利点を考慮して，発信機を計測地点に，受信機を固定点に設置し，受信する電波の位相差から発信機の三次元座標を計測地点の位置座標として計測する手法の利点について検討を行った．本計測手法の利点は以下の通りである．

- ・ 発信機と受信機の間は数百 km の距離であり，発信機と受信機間が約 20,200km 離れている GPS と較べて高精度な計測ができる．
- ・ 発信機は耐久性に優れた安価な部品で構成しているため，計測対象斜面の任意の位置に数多く発信機を設置することが技術的・経済的に可能である．電波を発信するタイミングを調整することで斜面の多点の変位を同時に観測でき，リアルタイムで

面的に斜面を観測することが可能である。

- ・ 電波を用いているためワイヤレスであり，耐天候性にも優れている。

2) 本計測手法の現場への適用実験結果

本計測手法の発信機と受信センサ配置によって異なる誤差感度の指標として DOP (Dilution of Precision) を用いた。精度評価指標としての DOP の妥当性を検討するために発信機の変位算出に用いる受信センサの配置を様々に変えて，DOP と精度の関係を調べた。その結果，DOP という指標で内的精度の評価を行うことが可能であるということが確認された。

また，その結果を反映するように，直線配置と L 字型配置では L 字型配置の方が，計測精度が高いという結果が出た。また，簡単なフィルタリングによって計測値から偶然誤差を取り除くことが可能で，高精度のリアルタイム 3 次元計測の可能性を示す結果となった。

参考文献

橘 翔子．2007．電波を用いた新しい 3 次元リアルタイム斜面モニタリング法に関する研究，京都大学大学院 工学研究科 都市環境工学専攻修士論文。

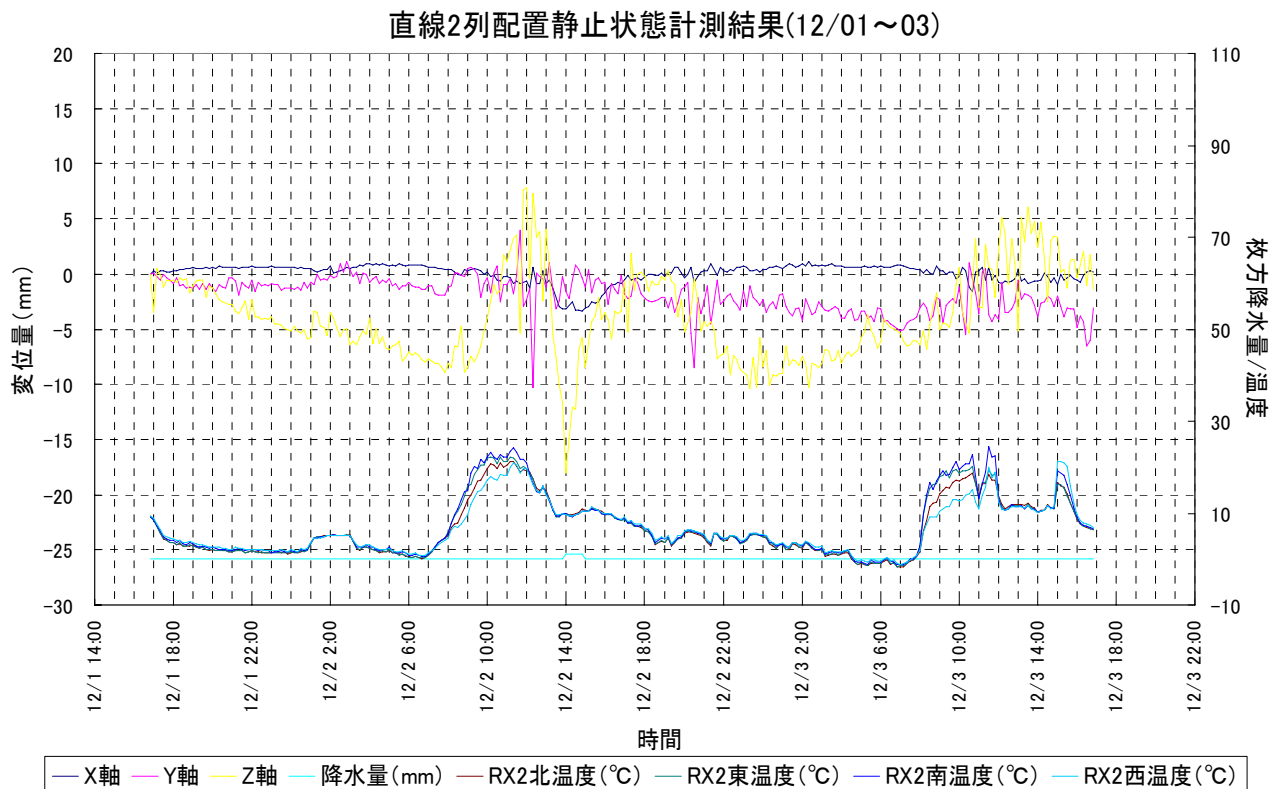


図-14 直線 2 列配置 静止状態連続静止結果と観測温度

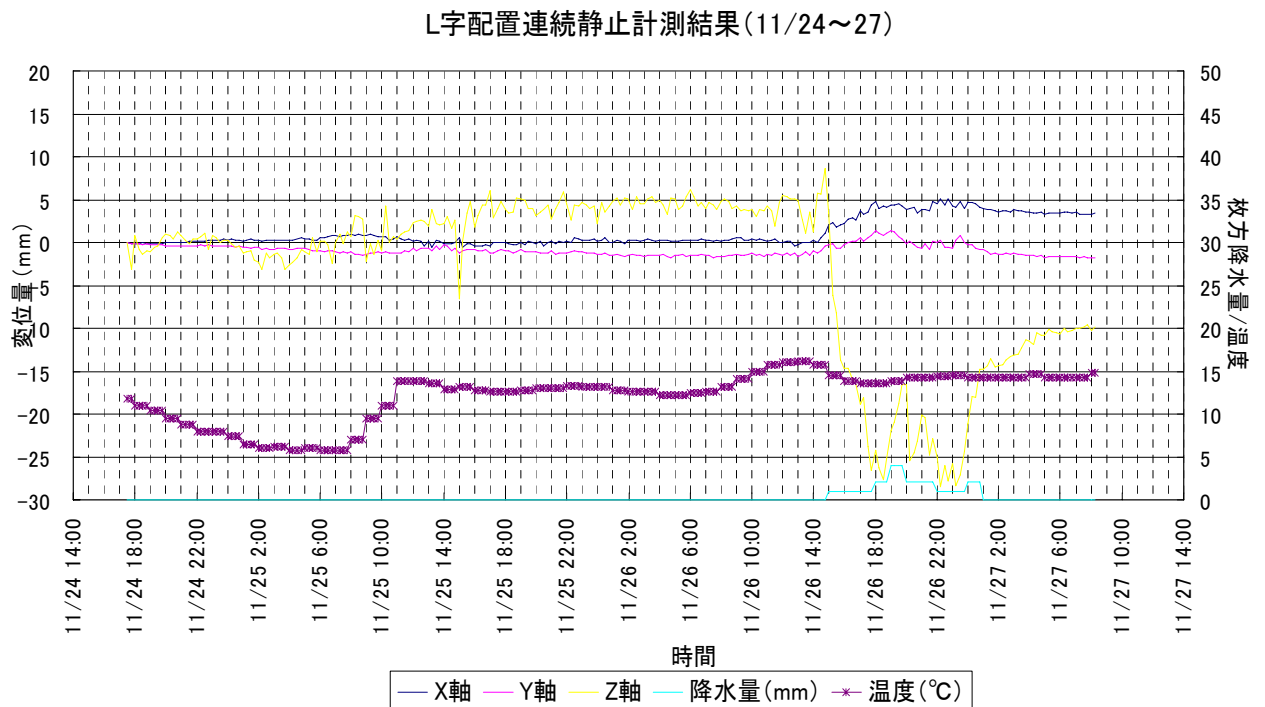


図-15 L 字型配置 静止状態連続静止結果と観測温度

谷埋め盛土地盤の安全性評価事業

太田ジオリサーチ 太田英将
京都大学防災研究所 釜井俊孝

1. はじめに

人は定期的に健康診断をする（もちろん例外はあるが）。その理由は、健康診断をすることによって病気が悪化する前に発見し、早期治療を行うことができることを知っているからである。その結果として、自分自身や家族、所属する会社、その他自分が関係する範囲の中で健康で快適な暮らしを送ることができる確率が高くなると信じているからである。

そのように信じることができるのは、医学の発達によるところが大きい。数多くの臨床例の研究で、血液検査等の各項目の値と病気との因果関係が明らかとなり、その医学の成果が「信頼に足る」と信じられているからである。そして、検査機器の開発や、新薬の研究に民間企業が参加し、一大産業が形成されている。病気になった場合には、国民皆保険制度などのお陰で、不安無く病院にかかることができるので、健康保険のきかない健康診断に投資する価値があると判断しているのである。もちろん、その背景には、不本意な病気での死の恐怖や、病気の長く辛い苦しみ、長期治療になったときの家族の影響等々への「不安」が強い動機付けになっていることは言うまでもない。

明確にイメージされる「不安」と、公的健康保険や民間の生命保険などによる経済的側面の「安心システム」、医学・医療の技術水準と技術者（医者）への「信頼感」、および医薬品市場という多くの人が仕事として取り組める「大産業の存在」、これらが同時に存在していることにより人の健康診断があたりまえのこととして実施されているのである。

翻って、斜面の健康診断、その中でも宅地谷埋め盛土地盤の健康診断において上記に対応するものはどうなっているであろうか。全項目ともはなはだ頼りない状況にあるように思える。このため、客観的に見て、現状で谷埋め盛土地盤の安全性評価事業が成立するのは絶望的に感じられる。表-1 に人の健康診断と谷埋め盛土の安全性評価事業の違いをまとめて示す。

しかし、1995 年兵庫県南部地震や 2004 年新潟県中越地震などで発生した谷埋め盛土被害を教訓にして、宅地造成等規制法が改正（2006 年 4 月）され、宅地耐震化推進事業が始まるなど、それ以前と比較すると産業としての成立性がないとは言えない状況になりつつある。

この公的事业では、補助金・低利長期融資・所得税控除などの制度が同時に成立しているので、経済的側面での支えはシステムとして作り込まれている。しかし一般市民からは「防災はお上がやるもの」という意識が抜けきれていないこと、および、造成宅地防災区域の指定は「地価が下がる大きなお世話」、デベロッパーや不動産業者にとっては「過去をほじくり返す余計なこと」とネガティブにとらえられがちである。

こうした難しい状況の中で、宅地谷埋め盛土の安全性評価事業を民間レベルで行うということは無謀な行為なのかも知れないが、敢えて以下にこの事業の成立可能性について論じていきたい。

表-1 人の健康診断と谷埋め盛土の安全性評価事業の違い

要因	人の健康診断	谷埋め盛土地盤の安全性評価事業
動機としての「不安」	不本意な死への恐怖や、病気の長く辛い苦しみ、長期治療になったときの家族の影響等々のイメージが明確である。	被災しても「命だけが助かれば何とかなる」という根拠希薄な安心感が支配し、具体的な不安をイメージできない。自分だけは大丈夫という「正常性バイアス」が正しく不安を持つことを妨げる。
	家族の責任あるもの（大黒柱）にはそれを意識し対処することが義務と考える文化がある。	宅地購入前であれば不安を持つ人もいるが、購入手付けを打った後は、出来る限りネガティブな情報をシャットアウトしたい願望が起き、多くの不安は心の中で圧殺され忘れ去られる。
	マスコミ等で健康不安を題材としたものはウケがよいので繰り返し番組がつくられる。	防災番組は視聴率や販売部数の伸びにあまり貢献しないので、マスコミはたまにしか取り上げない。それでも以前と比較すると多くなった。
経済的側面としての「安心システム」	健康診断で病気が見つかった場合でも、公的医療保険制度が充実しており「国民皆保険」となっている。	調査（全額公費）後に、危険と判定され造成宅地防災区域に指定された場合に 住民負担 がある。工事をしなかった場合 罰則 がある。 工事費に対する補助（負担割合は下記） 国 1/4 + 地方 1/4 + 宅地所有者等 1/2 又は国 1/4 + 地方 3/4 融資制度があり、工事費の 90%（上限 1030 万円）が低利で償還期間 15 年で借りられる。 http://www.mlit.go.jp/crd/web/gaiyo/gaiyo02.htm
	それに加えて、民間の生命保険会社が様々な特約付きの生命保険商品を販売している。	3000 m ² 未満の造成地では公費による調査対象外となる。（ミニ開発の方が相対的に危険な場合が多い）
		対策をせずに被災した場合の経済的損失の方が遙かに大きい、それを実感できていない。得をするはずなのに損をする気分である。
技術水準と技術者への「信頼感」	「医は仁術なり」という文化が根付き社会的地位が高く信頼がある。	「建設業・不動産業は算術なり」といった悪いイメージがネガティブ報道等によってつくられてしまっている。このため、地盤技術者の社会的地位は相対的に低く、一般市民から明確な理由なく信頼されていない。
	高度な医療技術の発達著しく、それを報道等によって一般市民がよく知っている。	高度な技術開発があっても、一般市民にその情報はほとんど伝わっていない。専門技術者でさえも十分に理解できていない人が多いため、信頼感は高くない。
	時代の要請に応じて「セカンドオピニオン」を定着させる努力をしている。	地盤情報は不動産取引における重要事項説明に含まれておらず、セカンドオピニオンも普及していないため、購入者は著しく貧困な情報によって土地を購入している。
専門技術者の生業と成り得る「産業・市場の存在」	医薬品業界（600 万人）は巨大産業であり、また金融・保険産業（160 万人）も巨大である。	建設業（540 万人）・不動産業（80 万人）も巨大産業であるが、宅地谷埋め盛土の安全性に関してビジネスとして興味を持つ企業ほとんど無いのが現実である。（労働別人口は総務省統計局資料より）
	上記産業は利益も十分あり存続可能な産業として社会に定着している。	構造物の建設・建築や、不動産の売買は定着した産業であるが、安全性評価事業はまだボランティア的であり産業として定着していない。

2. 谷埋め盛土の地震時災害と一般災害との違い

谷埋め盛土の安全性評価事業が人の健康診断並みに普及するかどうかを論じるのは、まだまだ4つの要因において圧倒的な違いがあり比較にならない。そこで、谷埋め盛土の地震時災害と一般災害の違いについて考察することにする。表-2 に自然災害・事件・事故等の30年発生確率を示す。谷埋め盛土の地震時に滑動崩落する危険度判定の正答率は、簡易的な力学モデル（太田・榎田モデル、ローラースライダーモデル）を、他の地域に適用した場合の現時点でのおおよその正答確率である。この解析モデルは、兵庫県南部地震の阪神間の谷埋め盛土変動・非変動データでキャリブレーションされている。

ここで特に重要なことは、自然災害や・事件・事故が「いつ・だれが・どこで」被害を受けるのか予測不可能なのに対し、谷埋め盛土の地震時滑動崩落は「だれが・どこで」被災し、生活再建が可能かどうかまで予測可能という点である。

表-2 自然災害・事件・事故等および谷埋め盛土滑動崩落の30年発生確率
（谷埋め盛土を除き、ネット検索による）

災害・事故などの種類			発生確率	記 事
事故	交通事故	負傷	24 %	日本海側の人口密度の小さい県で死傷事故率が相対的に高い。
		死亡	0.20 %	
	航空機事故	死亡	0.002%	大雨で死傷する確率と同等
事件	殺人事件	死亡	0.03 %	地域差あり（沖縄県・大阪府は発生率大）
	自殺	死亡	0.75 %	東北地方が高い（高齢者の健康要因）
自然災害	火災	罹災	1.9 %	地域や地形条件などで若干の違いがあると思われるが、基本的に「いつ」「だれが」「どこで」被災するか予測不可能なので、損害保険などでリスクを管理するしかない。
		死傷	0.24 %	
	大雨	罹災	0.50 %	
		死傷	0.002%	
	台風	罹災	0.48 %	
		死傷	0.007%	
病気	癌	死亡	6.8 %	健康診断を定期的に行い、病気を早期に治癒させ、生活習慣の改善をすることによって若干改善できるかもしれない。
	心疾患	死亡	2.0 %	
谷埋め盛土 （首都圏直下）	造成地全体	変動	2.2 %	盛土の被災率 3.2% × 地震の発生確率 70%
	危険盛土	変動	60 %	危険判定の正答率 85% × 地震の発生確率 70%
	危険盛土 かつ総資産 5000 万円以下 （次章参照）	再起 困難	9.3 %	60%（危険盛土）× 15.5%（ダメージ率が 1 を超える確率） 「40 歳代かつ持ち家有り」の人はさらに再起困難の確率が高くなる 「だれが」「どこで」被災するか予測可能

3. 生活再建の可能性

宅地谷埋め盛土が地震時滑動崩落により変動し被災するかどうかという物理的現象とは別に、被災した世帯が生活再建可能かどうかという点も重要である。高坂健次（2005）は、震災による「被害」は、単に地震による直接的な被害だけでなく、その後の生活再建ができたかどうかという点に着目して分析を行っている。そして、資産ダメージ率を定義し、資産ダメージ率が1の時、災害が起こって住宅再建をした場合の手持ち資産が「すっからかん」の状態とし、1を超える場合には負債が手持ちを上回り（生活再建困難）、0～1の時には手持ちの資産保有率（生活再建可能）を表す指標とした。総資産および資産ダメージ率は以下のように定義されている。

総資産 = [不動産資産評価額 + 金融資産 - 住宅ローン]

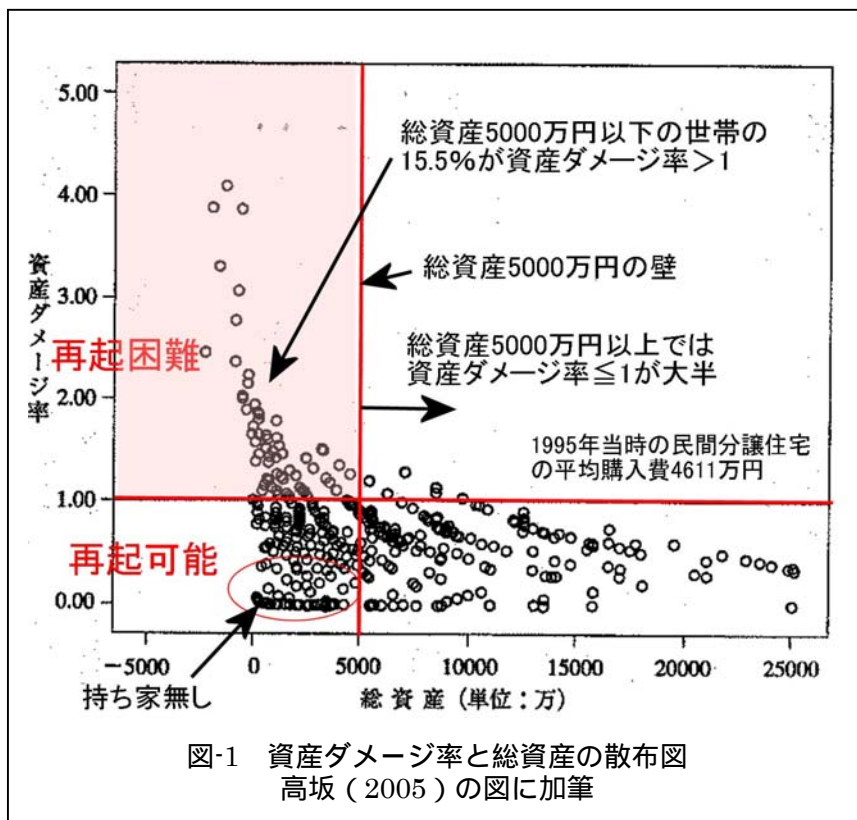
資産ダメージ率 = [災害後予想される負債額] / [災害後資産総額]

分析の結果、総資産が5000万円を超える人でダメージ率が1を超える人は少なく、5000万円以下だと15.5%の人がダメージ率1を超えていた（すなわち生活再建困難となった）ことが報告されている（図-1）。そして、この結果から以下の3つの命題を発見し、「総資産5000万円の壁」という言葉で表現している。

命題1 資産ダメージ率が1を上回るリスクは、総資産が5000万円以上あればきわめて小さい。

命題2 資産ダメージ率は40歳代で、持ち家のある世帯の間で高くなる。

命題3 持ち家なしの世帯は、住宅ローンも少ないために身軽で資産ダメージ率も低い。



簡単に考えれば、1995年当時の分譲住宅購入価格（4611万円）以上の資産をもっている人は生活再建で困るという事態には陥らなかった、ということである。

40歳代で生活再建困難に陥ると、子どもの教育機会の減少が発生し、それが結果として貧困の連鎖（負のスパイラル）を生むと言われている。

土木・建築の専門家は、家屋倒壊や宅地変動などといった地震時の現象に着目しがちである。しかし、宅地谷埋め盛土地盤の安全性評価事業を「産業」として考えたとき、顧客は住民であり、顧客が必要とするのは「生活再建可能かどうか（家族の将来を危うくしないかどうか）」「防災対策に投資すべきかどうか（必要最小限の投資額はいくらか）」ということに対する回答である。

資産ダメージ率を小さくするためには、分子の〔災害後予想される負債額〕を小さくし、分母の〔災害後資産総額〕を大きくすればよい。

谷埋め盛土の地震時安全性の観点から言えば、分子の〔災害後予想される負債額〕を小さくする方法としては、以下のようなものがある。

- (1-1) 持ち家を持たず借家に住む（住宅ローンを抱え込まない）
- (1-2) 被災したら持ち家を放棄して借家に住む（二重ローンを抱えない）
- (1-3) 被災しない家に住むか、そういう場所に引っ越す（切土地盤、耐震家屋）
- (1-4) 被災しても軽微となるように対策する（滑動崩落防止対策、家屋の耐震補強）

一方、分母の〔災害後資産総額〕を大きくする方法は、安全性評価事業では何もなく、以下の自助・共助・公助に頼らざるを得ない。

- (2-1) 資産家になり絶対安全な社会層に食い込む（「自助」；できる人は少ない）
- (2-2) 共済制度による給付金（「共助」；例えば 兵庫県の住宅再建共済制度は 5000 円/年の掛け金で最大 600 万円の給付金、地震保険は建物 5000 万円、家財 1000 万円を限度に火災保険の 30～50%の範囲内）
- (2-3) H19 改正された被災者生活再建支援法（「公助」；全壊のとき上限 300 万円）

谷埋め盛土地盤の安全性評価事業として可能なことは、上記(1-3)、(1-4)の助言、および宅地購入時の「第三者としての助言（セカンドオピニオン）」である。

4. 「あんしん宅地」の失敗事例

2008 年 1 月に市民からの宅地相談に門戸を開いていた地盤調査会社 2 社（環境地質、太田ジオリサーチ）と不動産会社 1 社（ファーストフロアー）及び賛同する技術者・研究者が共同で「あんしん宅地」というグループを作り宅地販売と宅地地盤鑑定を組み合わせたサービスを開始した。しかし、結果として現時点でうまくいっていない。

「あんしん宅地」のコンセプトは以下のようなものだった。

- (3-1) 宅地購入者に経済的負担をかけず、宅地地盤の鑑定を行い安心・安全な宅地を供給する。
- (3-2) 地盤調査・鑑定費用は宅地販売手数料から捻出する。宅地販売手数料は、販売価格の一定比率と定められているので、地価が比較的高い地域でのビジネスとなる。
- (3-3) 高価な宅地を求める層は、資産保全の意識が高いはずなので、「安全・安心」が無償で手

に入るのであれば、「そちらを選択するはず」である。

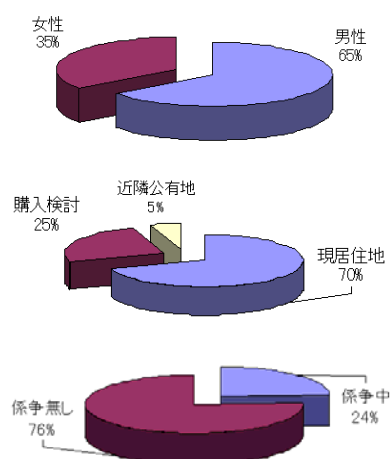
現時点で考えられる失敗の理由は以下の通りである。なお、今回の失敗のパターンは、「利用されなかった」ということであり、利用された際に発生したトラブルではない。現在は、下記の失敗理由を参考にして、ビジネスモデルを修正し、新たな段階で事業の可能性を探っているところである。

- (4-1) 2007～2008年に米国の住宅バブル崩壊によって世界金融危機が始まり、2008年春頃から土地取引が目立って減少し、不動産不況に陥った。2008年秋にはリーマンショック等によるさらなる金融危機・不況が始まったことによる影響があった。
- (4-2) 地盤調査・鑑定と土地取引をセットにする方法は、顧客にとって経済的負担が少なく有利な方法と考えた仕組みであるが、顧客は地盤調査・鑑定を依頼すると土地取引の不動産会社が固定される（紐付きになる）と感じ、むしろ逆効果になる場合があった。
- (4-3) 有益な情報を提供するという「教えたい、伝えたい」という気持ちはこちら側の勝手な思いこみで、一般市民は「知りたい」とは思っていないことが多い。
- (4-4) あんしん宅地グループ側も、失敗可能性を十分認識した上でパイロット事業的にはじめたため、人的・時間的・資金的資源の投入が不十分だった。

5．相談事例

本章では一般市民の方々からの相談事例（太田ジオリサーチへの）について紹介する。「どこに相談したらよいかわからない」という状況の中で、タウンページや人伝でコンタクトしてこられた方々の相談事例から、相談者側の「相談したい動機」と、それを請ける民間コンサルタント側の「諸事情」が浮き彫りになるからである。

表-3 に一般市民からの相談事例のうち、宅地地盤の関係するものを一覧表にして示す。また相談者・相談内容の分類を図-2 に示す。



〔相談者の性別〕

男性が2/3を占めるが、相談に乗っている時間は圧倒的に女性の方が長い。家庭内でご主人が問題提起し、奥さんが相談してくる例もある。

〔相談する土地の種別〕

現在ご自身がお住まいの宅地の相談が70%で、これから土地を買おうという人が25%。近隣の公有地を自治会から相談されてきたものもある。相談内容は擁壁が関係するものが多い。

〔法的な係争〕

法的な係争（裁判など）になっているものがおよそ1/4ある。民間コンサルタントが相談に及び腰となる大きな理由である。

図-2 一般市民からの相談事例の分類

表-3（その１） 一般市民からの相談事例

	対象物	相談内容	現状	相談人	係争中	年齢
1	地すべり	戸建て住宅を建てたい場所があるが、すぐ近くに地すべり防止区域がある。そこに建てても大丈夫だろうか。何を調べたらよいだろうか。	購入検討	男性		50代
2	造成地の斜面	段丘面から谷底にかけて住宅が密集している。段丘面に集合住宅の建設計画があるが、それによって大地震時に斜面上の住宅が危険になることはないか。	居住	男性	○	60代
3	大規模盛土造成地	昭和40年代に造成された団地であるが、谷埋め盛土が沢山ある。いろいろな人に相談すると谷埋め盛土部は地震時に滑る可能性があるといわれている。県に地すべり防止区域に指定して欲しいと要望したが、被害が発生していないのでできないと言われた。どうしたらよいか。助言が欲しい。	居住	男性		40代
4	宅地盛土	大阪層群の丘陵地を造成したひな壇状の建て売り住宅を購入しようと思っているが、間取りを見ると欲しいと思う物件は盛土位置にある。どうしたらよいか。自分の家と土地だけは傷まないようにするような工法はあるだろうか。	購入検討	女性		50代
5	宅地盛土	分譲住宅を購入しようとしているが、図面を見て夫が「盛土が厚いけど大丈夫だろうか」と言っていた。心配で気になってしょうがないのでアドバイスが欲しい。	購入検討	女性		30代
6	宅地盛土	地震により地盤が大きく不同沈下し家屋が傾いた。ジャッキアップして住んでいるが、今後同じ場所に家を建て直しても良いだろうか。この宅地は売却して、他のところに移り住んだ方がよいかアドバイスが欲しい。	居住	男性		70代
7	谷埋め盛土	NHKスペシャルをみて、いま話を進めている宅地購入が不安になった。谷を埋めた盛土地にあるのだが、地震の時に大丈夫か。	購入検討	男性		50代
8	谷埋め盛土	急傾斜地の上の台地の見晴らしの良いところに宅地を購入しようと考えているが、その敷地の下の崖は法枠工があり、宅地には細径の鋼管杭が打たれている。この宅地を購入して問題ないか。その場所が良くない場合には近隣の土地で何処が安全か。	購入検討	男性		40代
9	谷埋め盛土	擁壁や宅地にクラック変状等が発生し、進行している。現時点での評価と対応策を教えて欲しい。（谷埋め盛土だった）	居住	女性		50代
10	擁壁	擁壁（空石積み擁壁）が老朽化しており改築をしたいと考えている。その擁壁の上の借家（原告の所有物件）の住人（被告）に立ち退きを求める裁判を起こしているのだが、この擁壁の健全度と法的な位置づけの鑑定を行ってほしい。	居住	女性	○	50代

表-3（その2） 一般市民からの相談事例

	対象物	相談内容	現状	相談人	係争中	年齢
11	擁 壁	大雨で擁壁が倒壊した。擁壁を再建してもう一度同じ場所に住むことはできるかどうか教えて欲しい。	居住	男性		30代
12	擁 壁	隣接する家屋が、擁壁の増し積み（ブロック積み擁壁＋ブロック塀増し積み＋塀の背後に盛土）になっている。隣家の方は高齢でいま入院されているのでどうしたものか。危険そうに感じるのだが。	居住	男性		40代
13	盛土斜面	残土処分地で谷を埋めたところに雨の度に水浸しになる。道路からの排水もこの盛土に入り込んでいる。盛土末端部から時々落ちてくる石が水路を落ちていく音が響きとても怖い。市に何とかして欲しいと言っても対応してもらえない。どうしたらよいか。	公有地	女性		40代
14	盛土斜面	大雨の際に、道路（市道）側溝に集まった水が、側溝の継手開口部から地下浸透し崩壊に至ったと考えられる。原因を特定し責任の所在を明らかにして欲しい。	居住	男性	○	60代
15	擁壁・斜面	宅地から下に斜面があり、その末端に約100年前につくられた擁壁がある。隣人（斜面の下で宅地内で新築）から、危ない斜面なので補修して欲しいと要求があった。要求がのまれない場合には裁判に訴えるということだ。どうすればいいか。	居住	男性	○	80代
16	擁壁・斜面	隣接する土地（地形的に高い位置）に数年前に家が建った。その人が、2段の積みブロックをしていたが、今度その上に3段の積みブロックをしようとしている。とても危ないように見える。市役所に行っても建築協定で制限が掛けられていないのでどうしようもないとのこと。	居住	男性		60代
17	擁壁・斜面	家の横に斜面があり、古い擁壁があるが不安定そうである。市に相談すると「既存不適格」だが法的に存在は認められているとのこと。大学の研究室に相談したところ「個人の相談には乗れない。役所からの依頼でないと受けられない」との回答だった。相談に乗ってくれるところを紹介して欲しい。	居住	女性		50代
18	擁壁・盛土	宅地の裏にH＝3mの擁壁があり、最近その擁壁に近接して家屋が建った。擁壁や盛土が豪雨や地震で倒壊してこないかどうか心配。その家屋新築時に市や施工業者の責任について交渉したが問題にされなかった。	居住	女性		50代
19	擁壁・盛土	阪神淡路大震災から10年以上経って、家屋基礎にクラックを発見した。その後宅地を守っている擁壁にもクラックがあることがわかった。家屋の耐震化をしようと考えているが地盤が不良だと意味がないと建築士に言われた。どうすればよいか。現在弁護士を介して、建築業者と係争中。	居住	男性	○	50代
20	擁壁・盛土	ブロック積み擁壁（練石積み）に変状が出ている。宅地は盛土だが、年老いた家人が日中は一人で行っているところに地震がきたら擁壁および宅地が倒壊するのではないかと心配。評価し対策をして欲しい。	居住	男性		60代
21	切土斜面	ゴルフ場の小規模な法面に表層崩壊が目立ち、保全したい。工事を外部に委託せず、維持管理の範囲内で対応出来ないか検討してほしい。	営業中	管理者		50代

相談のきっかけがテレビや新聞での防災に関する報道(図-3)である場合も多く、マスコミへの情報発信がこの種の事業には不可欠であることを感じる。相談内容は、擁壁など「目に見える不安」が多くを占め、谷埋め盛土など地中の問題まで関心が及ぶのは希である。



図-3 マスコミ報道事例

6．事業化の可能性

宅地谷埋め盛土の地震時滑動崩落に対する安全性評価事業の事業としての可能性は、現時点で予測困難である。「地震時滑動崩落現象」に関して、専門家であっても正しい知識を身につけていない場合が多く、問題の重要性の理解が乏しく、社会的認知度が低いのが現状だからである。

阪神大震災クラスの地震が発生した際に、大規模造成地の中で被災するのは、阪神の事例から推定すると 2.2% である。1000 世帯ある団地であれば、22 世帯が被災したことになる。この被災率だけの情報では地震保険的な商品には重要な情報ではあっても、個人相手の事業可能性は低いと考えるのが普通だろう。

しかし、事前にスクリーニングを行い安全性評価を行えば、「滑動崩落に対して危険な盛土」はピンポイントで指摘可能である。ピンポイントで危険と予測された世帯は、例えば首都直下型地震のように今後 30 年で 70% の発生確率をもっているとする、危険度判定精度と掛け合わせて、30 年以内に大きな被害を受ける可能性が 60% もあることになる。これは他の自然災害や事故・事件などの被災確率と比較して桁違いに高い危険性である。そして、そのうち総資産が 5000 万円に満たない世帯のうちの 15% 強が生活再建困難に陥るのである。具体的には 40 歳代の持ち家ありの世帯の危険性が最も高い。その世帯の子どもは教育機会が減少することによって、将来にわたって貧困の連鎖に巻き込まれる可能性が高くなる。

現在は、具体的に地震が発生していないから顕在化していないだけであって、地震による宅地の滑動崩落でたいへんな目に遭う人・世帯はすでに決まっているのである。逆に、滑動崩落に関してはあまり心配する必要のない人・世帯も地盤条件からすでに決まっている。しかも地震が今後 30 年の間に発生する確率わかっているのである。

谷埋め盛土の安全性評価の頻度は、どれくらいであろうか。盛土は施工後に時間の経過とともに劣化する。特に滑動崩落に関与すると考えられる地山・盛土境界付近の劣化はかなり急速と考えられる。そう考えると、人の健康診断のように毎年行う必要はなく、一度診断すればそれで十分なので安全性評価の事業化は十分可能と考えられる。しかし、こちらの思いを、一般市民である顧客に理解してもらえるかどうかに関してはまだまだ未知数である。

7．事業化・産業化に向けての課題

技術的に解決可能という目処が立ったとしても、それを事業化し軌道に乗せるということは容易なことではない。失敗の繰り返しを積み重ねノウハウ化していくことしか成功への道は無いものとする。これまで、地盤防災は公共事業が担ってきた分野であり、民間企業は事業化のことまで考える必要がなかった。しかし、地震の活動期、気候変動といった自然環境の変化や、高度経済成長期に不良地盤に対して行われた開発のツケなど、今後個人が被る災害リスクが増加している。これらのリスク回避のためには、個人宅地を守るための産業が必要と考えるが、課題は多い。

以下に、前述の 4 つの要因について課題を述べる。

(1) 動機としての「不安」

宅地地盤の変動という問題がこの世に存在する、ということはある程度知られるようになってきていると思われる。しかし、それを自分自身に降りかかる問題として認識している人はごく僅かで、認識していても例えば地震が起きた瞬間だけのことととらえ、その後の生活再建困難まで想像が及んでいることはほとんど無いと言い切っても良い状況である。個人にとっての災害とは、単にモノが壊れることではなく、生活や家族が壊れるということだということをマスコミ・学会等との協力を得ながら情報発信し続けなければならない。

また、TV・新聞などでは災害によって困窮したお年寄りを中心に報道されているが、阪神・淡路大震災被災者の調査から明らかになっているのは「生活再建困難者は40歳代持ち家有り世帯に多い＝二重ローンで負のスパイラルに陥る世帯」である。その実態を正しく伝える必要もある。このため、このような被災後の研究をしている社会科学系のグループとの連携も必須である。

(2) 経済的側面としての「安心システム」

「安心」は、事前と事後の両方で用意されている。事後の安心システムは、地震保険・共済（兵庫県住宅再建共済の場合上限600万円）・被災者生活再建支援法による支援金（上限300万円）などである。なお、住宅建設時の民間地盤保証制度は、住宅基礎の不同沈下を対象としたものであり、地震時の滑動崩落等には対応していない。

宅地耐震化推進事業は「公助による事前の安心システム」である。補助金（工事費の1/2）・補助金（工事費の90%）・税制（所得税の雑損控除）がセットになっている。この公助の安心システムはまだ適用事例がほとんど無いので課題も想像に過ぎないが、以下のようなものが考えられる。

宅地耐震化推進事業から漏れる谷埋め盛土（腹付け盛土も含めて）が多数存在すること。

造成地の宅地は購入したものであるため自己負担で対策をすることに対する抵抗感が強いこと。

造成宅地防災区域の全世帯の合意を取り付けることが容易でなさそうなこと。

公助による安心システムが健康保険に相当すると考えると、自助の安心システムは健康診断に相当するものと考えられる。健康診断には健康保険がきかないので、簡易でかつ安価でなければならない。また、異常が見つければ（即ち、危険盛土であることがわかれば）処置をしなければならないが、同じ一団の盛土上にある世帯に説明し合意を取り付け対策をするというところまで行き着くのは相当の困難を伴うものと想像できる。このため一団の盛土内の1世帯だけを安全にできる対策方法も必要になるだろう。

このように自助による安心システムは、サービスの提供側が経済的負担を最小限にする技術開発によって実現するということが、現時点でできる精一杯のことである。

なお、将来的にはある一定レベル以上の耐震化（宅地・家屋ともに）対策をしてあることを条件にした保険・共済制度をつくることができれば、その中で家屋の再建・生活の再建まで安心できるようになるものと考えられる。現時点の制度は、耐震化対策の有無は掛け金・補償額に関与していないので、自助で耐震化した世帯が加入しないという不都合もあると言われている。

(3) 技術水準と技術者への「信頼感」

宅地の問題は、土木と建築の狭間にあって関心が持たれていなかったため放置されてきた問題である。このため、宅地所有者（一般市民）と技術者・専門家との接点が極端に少なく、信頼を得る機会がなかった。また、建設業の公共事業に関わる不祥事や不透明さからマスコミ等によって悪いイメージが作り上げられ、それに対して正面切って反論してこなかったことも信頼感が低下した大きな要因である。

しかし、公共事業の調達の透明化や、行政の情報公開は確実に進んでおり、今後技術者・専門家が一般市民との接点を多くもつことによって不信感は解消され、信頼感が増してくるものと考えられる（楽観的すぎるか？）。実際、一般市民からの相談事に対応していて不信感を感じたことはない。一般市民との接点を増やすことによってこの虚像（悪いイメージ）は解消されていくものと期待している。

次に、宅地谷埋め盛土の地震時滑動崩落の危険性評価の「信頼性」についてはどうだろうか。これに関しては、評価する技術者のレベルが滑動崩落現象というものを正しく理解できているかどうかという点について非常に不安がある。現在公表されている「大規模盛土造成地の変動予測ガイドラインの解説」は、担当者の混乱を回避するために既存の調査法・解析法を適用することにこだわってつくられている。しかし、滑動崩落現象は、いままで斜面安定問題の土質力学が扱っていなかった現象で、当然滑動原理も異なる。既存の安定計算手法を用いる場合、滑動崩落現象への理解が不十分だと容易に「安全判定」に導かれてしまう危険がある。当事者・担当者に安全だという答えを出したいバイアスがかかっている場合にはなおさらである。そういうことが起こると谷埋め盛土の安全性評価技術への信頼性は失われるだろう。専門技術者の責任は重大である。

正しく谷埋め盛土の滑動崩落現象を理解するための資料を、図-5～12に示す。専門技術者に対する一般市民の信頼を崩さぬよう十分理解していただきたいと願う。

(4) 「産業・市場の存在」

上記の「信頼感」の問題とも関連するが、専門技術者が長期的に従事でき、生業とすることが可能な産業とならなければ全てが絵に描いた餅になってしまう。宅地谷埋め盛土の安全性評価という防災事業が社会の安全・安心に寄与するためには産業化・市場化が必須要因で、前述の3要因はそのための手段と位置づけることもできる。

我々のグループで試行した「あんしん宅地」の第一弾はうまくいかなかったが、その中で得られた貴重な教訓・ノウハウもある。そういった失敗の積み重ねに果敢にチャレンジすることが大切であり、天から市場が降ってくるということなどあり得ないと覚悟を決めることが重要であろう。

参考文献・資料

釜井俊孝・守随治雄(2002):『斜面防災都市 - 都市における斜面災害の予測と対策 - 』、理工図書 (ネット書店等で購入可能)

高坂健次(2005);“進む階層化社会の中で「被害の階層性」は克服できるか - 総資産 5000 万円の壁をどう考えるか - ”、世界 12 月号、岩波書店、pp.190-198
(<http://www.iwanami.co.jp/sekai/> からバックナンバー購入可能)

太田英将・榎田充哉(2006):谷埋め盛土の地震時滑動崩落の安定計算手法、(社)地盤工学会関東支部シンポジウム DS1「既設造成宅地の耐震性調査から対策まで」pp.27-35
(http://www.ohta-geo.com/tech_rep/20061110taniume.pdf 簡易力学モデルのエクセルシートは、<http://www.ohta-geo.com/morido/morido.html> からダウンロード可能)

大規模盛土造成地滑動崩落防止事業における負担割合(国土交通省):造成宅地の耐震化に係る支援制度の概要(<http://www.mlit.go.jp/crd/web/gaiyo/gaiyo02.htm>)

産業別労働者数:総務省統計局労働力調査集計表(2009 年 1~3 月)「産業・従業上の地位,年齢階級・世帯の種類・従業者規模別就業者数」
(<http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/Xlsdl.do?sinfid=000002787389>)

太田英将(2009):“盛土の耐震設計について - 工事・設計 - ”宅地造成設計・施工研修テキスト、(財)全国建設研修センター(http://www.ohta-geo.com/tech_rep/20090602taniume.pdf)

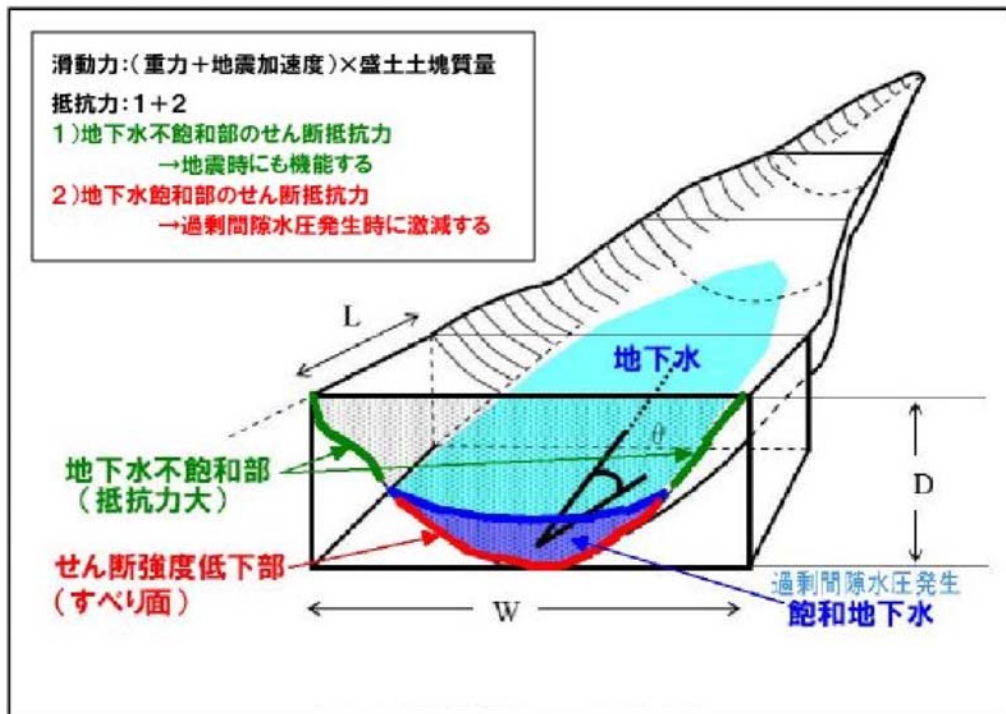
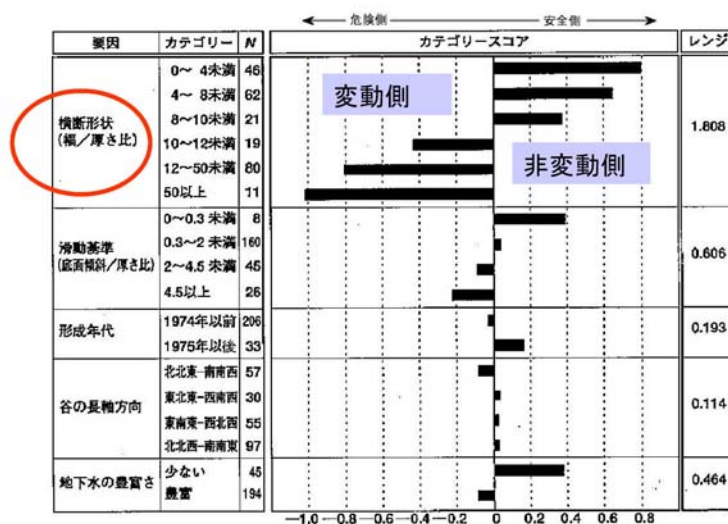


図-5 盛土の滑動崩落基本概念図 (太田・榎田モデル)

地震による急激な震動で盛土底部の飽和地下水の排水が間に合わず過剰間隙水圧が発生して滑動する現象。このため地山傾斜角が緩くても滑動する。滑動に対する抵抗は側部などの不飽和部。

幅／深さ比が圧倒的要因



注) カテゴリースコアが大きい(正に)ほど安全側。Nはサンプル数

抜群の相関

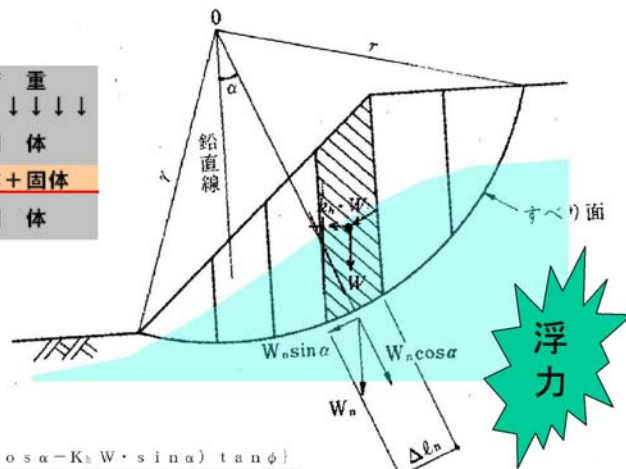
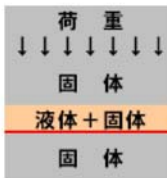
図-6 阪神・淡路大震災時の谷埋め盛土変動の数量化解析結果

釜井・守随(2002)より引用。変動・非変動の決定要因は、2次元断面法で用いられる縦断形状ではなく、横断形状が支配的だった。この解析結果を力学的に説明したものが図-5のモデルであり、他の地域での検証結果も良好である。

教科書に載っている安定計算は、 湯船で滑る計算



固体はずっと接触している
(浮力は邪魔をしているだけ)



計算式

$$F_s = \frac{R \sum \{CL + (W \cdot \cos \alpha - U_b \cdot \cos \alpha - K_h W \cdot \sin \alpha) \tan \phi\}}{\sum (RW \cdot \sin \alpha + K_h W \cdot y)}$$

「すってんころりん」現象を「湯船」理論で解こうとすると混乱が生じる

図-7 有効応力法による2次元極限平衡法安定解析手法

「大規模造成地の変動予測調査ガイドラインの解説」では、この手法が谷埋め盛土の滑動崩落現象を解析するための標準手法とされている。(このことが滑動崩落現象の理解を難しくしている一面もある)

谷埋め盛土の地震時滑動崩落 現象は「すってんころりん」型



上の固体と下の
固体は非接触



身近な現象なのに

この現象に対応した安定計算手法は教科書に載っていない！

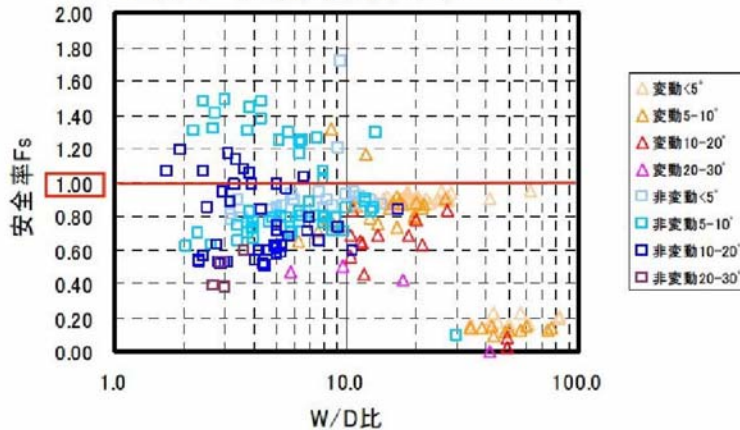
図-8 地震時滑動崩落現象を単純化した説明図

滑動崩落現象を、上側の土塊と下側の土塊の間に液体(液状化した部分)が挟まり、上の土塊が摩擦を著しく失い滑動する現象ととらえたモデルである。

用いた安定解析式は修正 Fellenius 式対応の式である。

$$F = \frac{c' L / \cos \theta + (W_t - U - U_s) \cos \theta \tan \phi' - W_t K_h \sin \theta \tan \phi'}{W_t \sin \theta + W_t K_h \cos \theta}$$

地震時 (過剰間隙水圧高さ 1.5m)



側方摩擦が考慮
されていないこの
モデルでは、安全
率は基盤傾斜角
の関数となり、**現
場データを再現で
きない。**

安全率(地震時)-W/D比 関係図

図-9 2次元断面法で阪神・淡路大震災時のデータを解析した結果
実際に起きた現象(変動・非変動)を区別することができない。

$$F_s = R/T \quad \text{安全率}$$

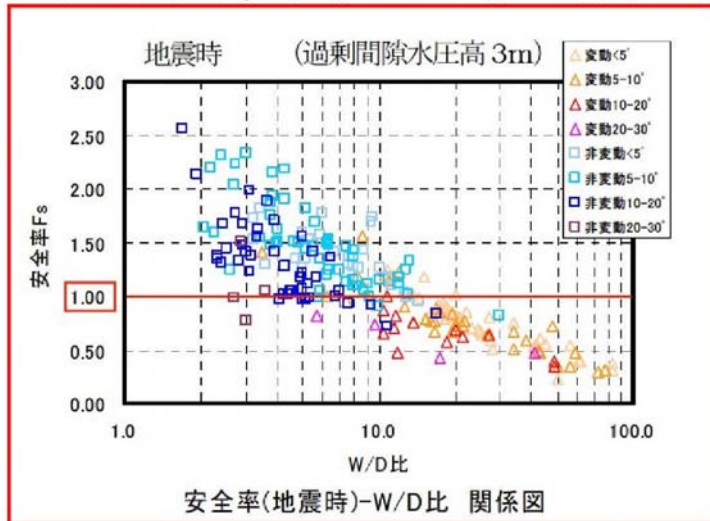
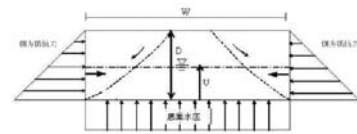
$$T = W_t \cdot \sin \theta \quad \text{滑動力 (kN)}$$

$$R = R_s + R_b - W_t \cdot k_h \cdot \sin \theta \cdot \tan \phi'_2 \quad \text{抵抗力 (kN)}$$

$$R_s = c'_1 \cdot A_s + P \cdot \tan \phi'_1 \quad \text{側方抵抗力}$$

$$R_b = c'_2 \cdot A_b + (W_t - U_b - U_s) \cdot \cos \theta \cdot \tan \phi'_2 \quad \text{底面抵抗力 (kN)}$$

阪神大震災の再現



側方摩擦が考慮
されているため、
安全率で変動・非
変動を区別するこ
とができる。

側面強度の違い
も反映できる。

ただし、側面傾斜
角は反映できない。

図-10 簡易力学モデル(太田・榎田モデル)で阪神・淡路大震災時のデータを解析した結果
変動した盛土は相対的に安全率が小さいグループに、変動しなかった盛土は相対的に安全率
が高いグループに分かれた。土質定数などのパラメータを調整することにより、安全率 1.0
を境界として変動グループと非変動グループが分かれるようにキャリブレーションされて
いる。

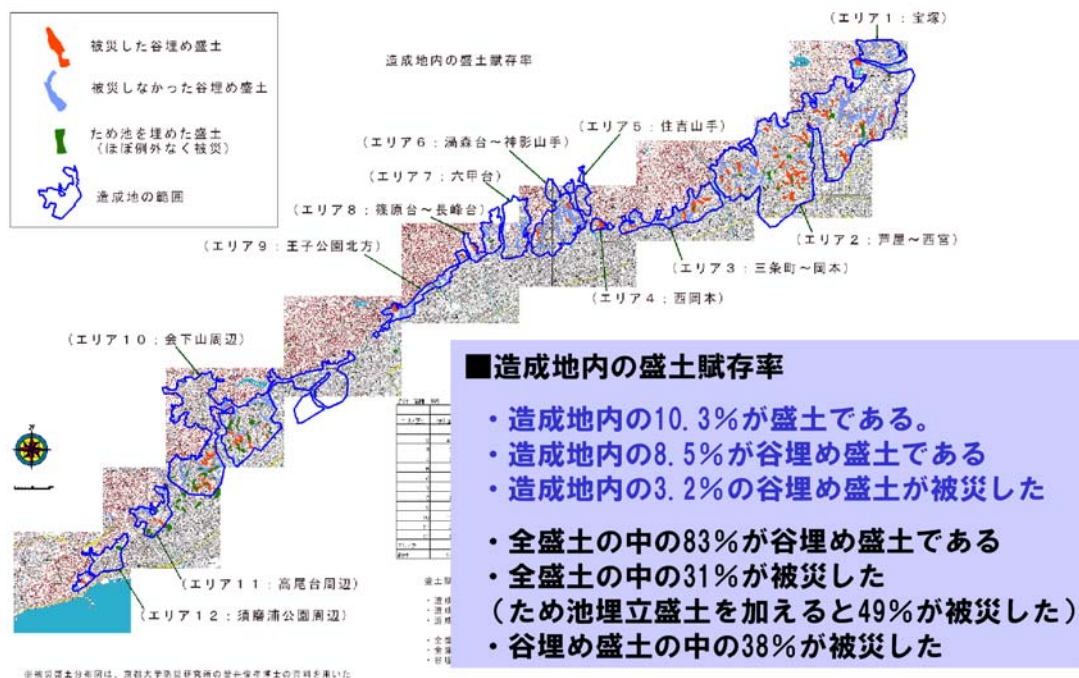


図-11 阪神・淡路大震災時の大規模造成地内にある谷埋め盛土の変動・非変動事例の集計

震度5では被害は出ない

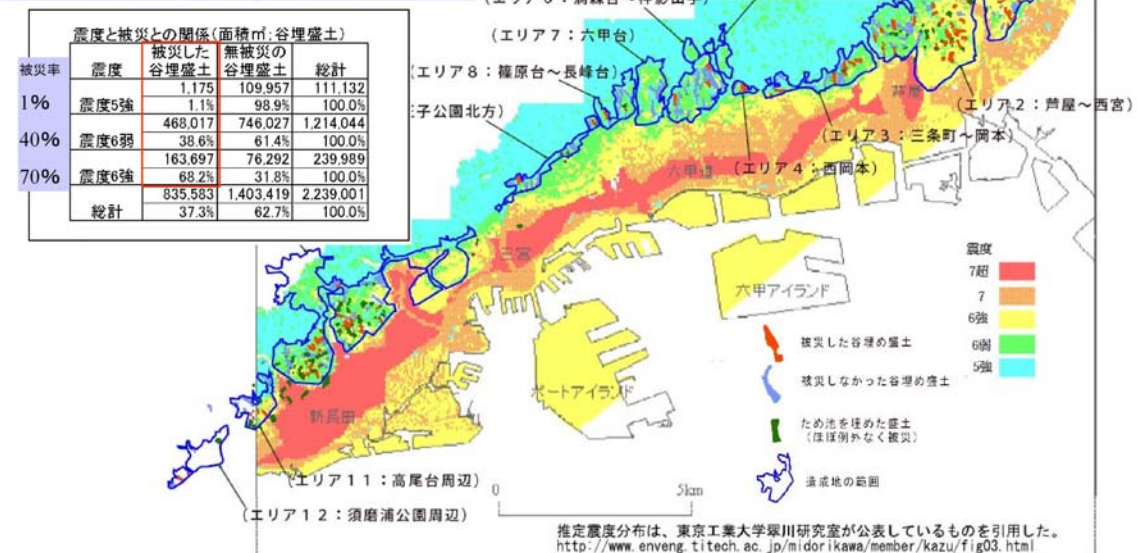


図-12 震度と谷埋め盛土の変動・非変動の関係

阪神・淡路大震災の事例では、滑動崩落現象は震度6以上で発生する現象である。