第２０１５-０２号

防災監視網による観測データの
データベース化とフィードバック手法の研究

国立大学法人東京大学大学院工学系研究科　航空宇宙工学専攻
准教授　上西　幸司

平成２８年１１月

平成 27 年度一般財団法人日本建設情報総合センター研究助成　第 2015-02 号

防災監視網による観測データのデータベース化とフィードバック手法の研究

平成 28 年 9 月

国立大学法人東京大学　上西幸司

国立大学法人山口大学　清水則一

三井住友建設株式会社　大津慎一・山地宏志

目　次

1. 研究の概要 …… 1
1.1 研究目的 …… 1
1.2 研究方針 …… 1
1.3 地盤監視網構築とそのフィードバックに関する現況の課題 …… 2
1.4 防災監視網の定義と研究開発項目 …… 3
1.4.1 地盤観測網構築における研究開発項目 …… 3
1.4.2 地盤観測データ採取における研究開発項目 …… 4
1.4.3 地盤観測データ評価における研究開発項目 …… 6
(1) Kriging 法の未観測箇所データ推定への適用 …… 7
(2) Big data 分析手法の地盤安定性評価への適用 …… 7

2. 加速度センサーを用いた傾斜計とこれを用いた試験観測網の設営 …… 9
2.1 加速度センサーを用いた傾斜計 …… 9
(1) 加速度センサーの測定原理 …… 9
2.2 試験観測網の設営 …… 12
2.2.1 試験観測網設営の概要 …… 12
2.3 試験観測期間に測定されたデータ傾向とその測定精度に関する考察 …… 19

3. 観測データのデータベース化とその図化処理 …… 27
3.1 観測データのデータベース化 …… 27
3.1.1 XML と RDBMS …… 27
3.1.2 GENESIS/GHQ の XML ファイル構造 …… 29
(1) <construction>タグの構造と属性 …… 31
(2) <siteMap>タグ下の構造と属性 …… 32
(3) <siteInformation>タグの構造と属性 …… 33
3.2 観測データの空間図化機能の操作 …… 36

4. 観測データの Big data 処理への考察 …… 39
4.1 はじめに …… 39
4.2 傾斜量データの降雨応答に関する検証 …… 40
(1) 強雨に影響された傾斜量増大の経緯 …… 40
(2) 強雨期間の傾斜データ特性 …… 40

(3) 傾斜量の降雨応答に関する考察 …… 48
4.3 観測データのビッグデータ解析への適用に関する考察 …… 51
(1) Deep learning とその展開 …… 51
(2) 工学的知見や観察を基にした教師パターンの設定と Neural network への展開 …… 53

5. Kriging による広域分布推定 …… 57
5.1 Kriging と観測データ分布推定のための定式化 …… 57
(1) 地域化変数理論とバリオグラム …… 57
(2) Kriging による空間データ推定 …… 62
5.2 Kriging を用いた観測データ分布推定の手順 …… 65
(1) 経験的セミバリオグラムの作成 …… 67
(2) 未計測点の推定 …… 69
5.3 Kriging による観測データ分布推定の実際 …… 71

6. まとめ …… 77

Appendix A XML の基礎的事項について
Appendix B MySQL の基本操作

1. 研究の概要

1.1 研究目的

2011 年 3 月 11 日の東日本大震災以後の地震活動の活発化や、異常気象に伴う爆弾豪雨等により、近年、地すべり、斜面崩壊、土石流等の地盤災害が頻発化し、発生箇所が広域化するだけでなく、その災害規模も増大する傾向にある。このような、地盤災害から人的資源や財産を守り、社会生活、生産活動を維持する取り組みに参画することは地盤技術者の使命であると考える。

本研究は、その取り組みのひとつとして、通信情報技術を援用した地盤監視網を構築し、採取されたデータを速やかに分析・フィードバックを測ることで、防災・減災に資するシステムを構築することにある。

1.2 研究方針

政府は、強くしなやかな国民生活の実現を図るため防災・減災に資する国土強靭化基本法（平成 25 年法律第 95 条）第 10 条第 1 項 [1)]の規定に基づき、平成 26 年 6 月 3 日に制定された国土強靭化基本計画 [2)]を閣議決定した。

その、具体的施策である国土強靭化アクションプラン 2015[3)]を見ると、‘あってはならない災害の事例’のひとつに‘大規模な火山噴火・土砂災害等による多数の死傷者発生’が挙げられ、その推進計画のとして、‘災害のおそれがある箇所の観測・調査に基づいた訓練・避難体制の整備等のソフト対策と連携した総合的な土砂災害対策等の実施’が謳われ、地盤災害観測の必要性が示されている。

一方、国土強靭化基本計画では、（データベース化、オープンデータ化の推進）が示され、‘国と地方、官と民が適切に連携・役割分担しつつ、地形・地質等の基盤情報をはじめ各主体が有する様々な情報の共有・データベース化を推進するとともに、このための統一的なプラットフォームの整備を図る。またこれらの情報のオープンデータ化を推進する。’とされている。

本研究は、国土強靭化計画で示された上記二つの方策にしたがって、システムの開発を進める。具体的には、以下のようなシステムの構築を図るものである。

a. 地盤観測データの総合的な土砂災害対策へのフィードバック手法の設計と実装
b. 地盤観測データのデータベース化、ならびにオープンデータ・ベース化

1.3 地盤監視網構築とそのフィードバックに関する現況の課題

地盤挙動を監視し、これをソフト面も含めて、防災・減災対策に効果的にフィードバックするためには、各情報処理の段階で以下のような課題がある。

a. 地盤観測網構築段階

今日、地盤挙動測定で用いられている地盤伸縮計、傾斜計、孔内傾斜計、地下水位計等は、いずれも局所的な地盤挙動を観測するセンサーであり、対象斜面の巨視的挙動を観測するセンサーではない。また、センサーの設置箇所は地形・地質的知見を、元に選定されるが、これが必ずしも災害発生箇所に設置されることを担保するものではない。

b. 地盤観測データ採取段階

地盤災害の発生が懸念される地点は、観測機器の稼動に供する電源や観測データを送信する通信網が整備されていないことが、一般的である。このため、地盤観測網を運営するための電力供給線や通信線を敷設しなければならない。

しかしながら、その敷設範囲は長大となるため、観測網の稼動規模に比して稼動経費が莫大となるだけでなく、敷設は地形的要因で危険・苦渋作業を伴う。

c. 地盤観測データ評価段階

得られた観測データは、地質学的・地形学的知見を踏まえて、総合的に評価・判断され、危険予知や避難勧告・命令の判断材料に供されるだけでなく、補強対策の範囲と規模を決定する基礎資料として供されねばならない。

しかしながら、今日の観測体制を見ると、予め定められた管理基準値を超えた時点で初めて観測データを評価する、あるいは点検パトロール時に不具合や法面が発見された時点で観測データ等の見直される等の利用が一般的であり、あまり有効に観測網が活用されている現況にはない。

本研究は、「防災監視網による観測データのデータベース化とフィードバック手法の研究」の研究名称が示すとおり、上記 c.の地盤観測データ評価段階に重点を置いた研究であるが、真に実用的な地盤観測網の構築と運用を志すとき、評価手法の開発・改良に伴い、これに最適に運用できるよう a.、b.の地盤観測網構築、地盤観測データ採取に関する技術も併せて開発改良しなければならないと考えるものである。

1.4 防災監視網の定義と研究開発項目

本研究で定義する防災監視網は、以下の二つの要求性能を満たす監視網である。

a. 各地盤監視センサーが当該地点の観測網を管理運営する基地局と双方向の通信網で結ばれていること。
b. 当該地点にある地盤センサー群が、幾何学的なネットワークを構成することで、対象地点の巨視的な地盤挙動を監視しうる観測網を構成すること。

以下、1.3 に示した現況の課題を踏まえ、本研究の開発項目を整理する。

1.4.1 地盤観測網構築における研究開発項目

今日、地盤観測に採用されている観測項目は、地表の地盤伸縮変位、地表傾斜計、坑内傾斜計、ならびに地下水位計測を主とする。また、GPS（Global positioning system）による座標測量も地盤観測に広く取り入れつつあり、本研究ではその導入も視野に入れた地盤観測網の構築を志向して行く。

現在供用されている GPS を含む地盤観測機器は、いずれも局所的な測点や測線のみを観測する計器であるため、巨視的に地盤挙動を観測するためには、これらの観測機器を効率的に配置した観測網を構築する必要がある。しかしながら、各計器の価格は相対的に高く、その設置や電源供給・通信網確保にも多大な経費を要するため、観測網を構築するに足る測点・測点数を設置することは難しい。このため、観測網と称しながら、最もすべりの発生する蓋然性の高い箇所にのみ測線や測点が設けられることが一般的である。このとき、蓋然性の高い箇所に必ずしもすべりが発生しないことが、今日の課題のひとつであることが言を俟たない。

(a)加速度センサーを用いた傾斜計

(b)傾斜計の設置例

図-1.1 加速度センサーを用いた傾斜計とその設置例

このような現況の中で、今日、注目を集めている計測機器が、**図-1.1** に示すような加速度センサーを用いた傾斜計である。このタイプの傾斜計の特徴は消費電力が小さいためリチウムイオン電池で 1 年以上可動が可能で、デジタル出力のため小電力無線通信等によるデータ送信に適する点にある。さらに比較的製品価格が安価であり、かつ軽量なため一人で複数個を容易に運搬し、ハンドハンマー等で簡便に設置できる。

したがって、これまで対象地域で数箇所程度であった測点・測線を、比較的安価に数十点規模に増大させることが可能となる。これは、対象地域全体の挙動を把握することの出来る観測網を、少なくとも地盤傾斜については、構築できることを示している。本研究では、加速度センサーを用いた観測網を構築し、得られたデータから地盤全体の巨視的挙動を把握し、かつ観測網内で地盤災害の発生箇所を特定することの可能性に関して、検証を実施する。

1.4.2 地盤観測データ採取における研究開発項目

地盤観測データ採取は、観測されたデータをデジタルデータとして、現場事務所、あるいは管理事務所に設置された PC に送信する過程と、それをデータベース化することで共有する過程とに分かれる。

前者について、研究実施者らは「自立型防災監視システムの開発に関する研究：助成番号第 2018-8 号」において、太陽光パネル発電とパケット通信を組み合わせた自立型地盤監視局 GENESIS[1]/FPS(Field Power Station)を開発し、これまでいくつかの実務に供してきた。近年、類似の自立型監視局が、各社から提案されているが、GENESIS/FPS の特徴は、双方向通信方式と発電量・蓄電量の常時モニタリング機能の採用により、電力状況に応じてデータサンプリング間隔や通信頻度を制御することで安定的に観測運用を行うことを可能にした点にある。

また、研究実施者らは監視局から数 100m 離間した観測点を設ける場合、監視局と観測点間を双方向型特定小電力無線により接続するシステム GENESIS/FDL(Field Data Link)も、併せて開発し、これもいくつかの実務に供している。なお、GENESIS/FPS で使用する特定小電力無線は、1 時間 1 回程度の通信であればリチウムイオン電池で 1 年以上可動可能で、遠隔からの設定変更、プログラム更新、ならびに自己診断機能を搭載している。また、当該無線機に接続する観測機器も同等の性能と機能を備えるものである。

本研究では、これまでの実績を踏まえ、測定した観測データを管理 PC へ送信する機構としての GENESIS/FPS を採用することとする。**図-1.2** に、GENESIS/FPS および FDL により観測を実施した道路トンネル両坑口斜面の観測ネットワークの系統図を示す。図において、GENESIS/GHQ(Ground Head Quarters)は、地盤観測データのためのデータベースマシンとして、三井住友建設が運用するデータサーバーで、本研究でもこのサーバーの使用を想定する。**表-1.1** に、当該データサーバーの仕様を示す。

---

[1] GENESIS: Geo-engineering Network Sensors and Intelligent Synthesis 研究実施者らが提唱する IT を援用した地盤エンジニアリング手法の名称。地盤関連の各種センサーをネットワーク化し、採取されたデータを数理科学手法を援用することで包括的に分析処理し、実務へフィードバックする系の総称。

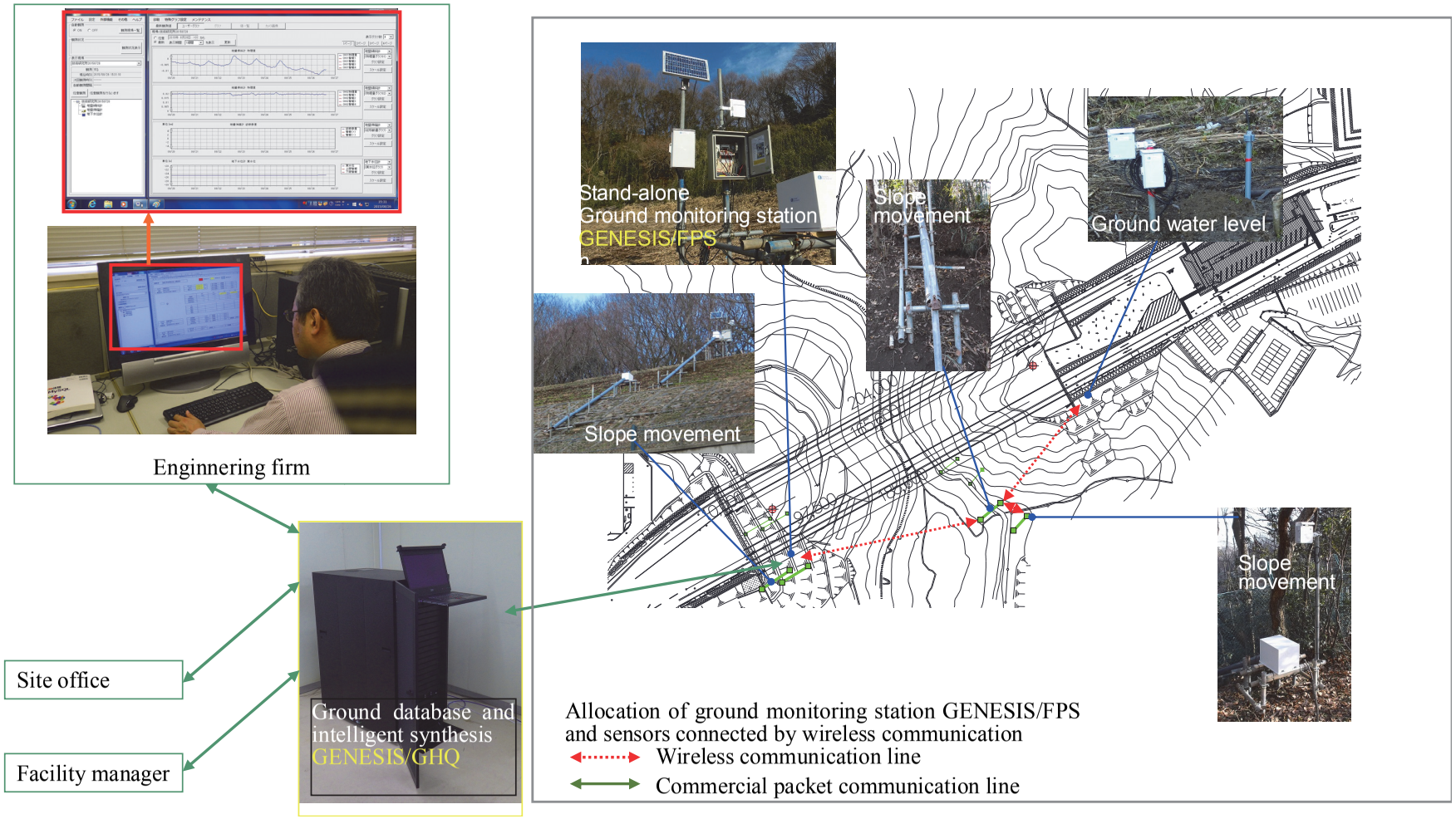


図-1.2　GENESIS/FPS、FDL、GHQ で構成された地盤観測ネットワークの例

表-1.1　予定するデータサーバーの仕様

CPU	Xeon E-3 2267v2(8C/3.3Ghz)×2
Memory	96GB
HDD	300GB×3(RAID 1+1)
UPS	UPS2200VA LCD
OS	Windows7 Pro DSP 版

観測データをデータベース化することの利点は、事業者、管理者、あるいは設計・施工者の間で情報を共有することのほかに、データベース化された他の情報、すなわち地形・地質情報、設計情報、施工情報等を、観測データのデータ処理や分析に包括的に供することの出来る点にある。したがって、ここでのデータベース化は、単に観測データのデータベース化に留まらず、地盤観測データの分析・処理、あるいは帳票や図化に必要な情報群のデータベース化も併せて実施しなければならない。

そのデータベース構造の設計と実装は、本助成研究開発項目のひとつであるが、Open 化を志向して開発するものとする。このため、開発に供する DBMS(Data Base Management System)として、オープンソースの DBMS として最も普及し、かつ実績の高い MySQL[2]を採用することとした。また、データの記述には、他のデータベースとの共有・交換を考慮し、XML（eXtended Mark-up Language）[3]を使用する。

1.4.3 地盤観測データ評価における研究開発項目

地盤観測データの評価は、以下の目的のために実施される。

① 常時、地盤の安定性を評価することで、適宜、避難勧告・命令を発令する
② 特異な自然事象、たとえば地震、豪雨時に地盤挙動を監視することで、災害の発生を事前に予知し、必要な対策を実施する
③ 地盤挙動を基に必要な防災設備、防災工等の計画、設計を実施する

上記の目的を実現するためには、多くの地盤観測データ評価手法を整備しなければならない。しかしながら、現在、喫緊に求められる評価手法は、客観的な地盤の安定性評価手法と、未計測箇所における地盤挙動の評価手法ではないかと考える。本研究では、この 2 点に焦点

[2] MySQL：TCX DataKonsultAB 社などが開発している、オープンソースのリレーショナルデータベース管理システム（RDBMS）。マルチユーザ、マルチスレッドで動作し、高速性と堅牢性に定評がある。オープンソースなので基本的には無償で利用することができ、Windows や各種 UNIX 系 OS など、多くのプラットフォームで動作するのも特長の一つ。

[3] XML：文書やデータの意味や構造を記述するためのマークアップ言語の一つ。マークアップ言語とは、「タグ」と呼ばれる特定の文字列で地の文に情報の意味や構造、装飾などを埋め込んでいく言語のことで、XML はユーザが独自のタグを指定できることから、マークアップ言語を作成するためのメタ言語とも言われる。XML により統一的な記法を用いながら独自の意味や構造を持ったマークアップ言語を作成することができるため、ソフトウェア間の通信・情報交換に用いるデータ形式や、様々な種類のデータを保存するためのファイルフォーマットなどの定義に使われている。

を当て研究開発を実施することとした。

このような問題は、従来、地盤工学的なアプローチにより研究されることが多かったが、近年、数理科学的なアプローチが試みられるようになった。本研究は、この数理科学的なアプローチによる研究を指向するものである。もとより数理科学的アプローチは、災害発生のメカニズムを考慮することがないため、当然のことながらその適用には限界があるが、研究実施者らは地盤エンジニアを自負する技術者であり、その適用限界を判断し得るものと考える。具体的な研究方策は以下のようなものである。

(1)Kriging 法の未観測箇所データ推定への適用

鉱物資源の埋蔵量、降水量などの気象データなどのように、地理的な広がりを持つデータは一般に空間データと呼ばれる。未観測地点の空間データは、観測点のデータを用いて Kriging 法により推定することが出来る。

Kriging とは、推定したい点の周囲にある観測データの平均を用いて未知データを推定する手法であり、数値を推定すべき点と全ての観測データ点の距離を計測し、推定すべき地点に近い観測データの重みは高く，遠い点にある観測データの重みを低くして平均を計算し、その平均値を未知データの推定値とする。当然のことながら、地盤の傾斜も空間データであり、Kriging による未知データの推定が可能である。

一般に、地盤挙動は複雑で、観測網を構築したとしても、これが必ずしも適確に地盤挙動を把握しうるとは限らない。また、実際に発生する斜面崩壊領域内に観測点が設置される保証はない。未計測点の挙動を推定する手法を確立することは、このような観測網構築に係る問題点を補う手段のひとつとなり得る。ここでは比較的多数の測定点数を計画する地盤傾斜データを対象に Kriging 分析手法を設計・実装するものとした。

(2)Big data 分析手法の地盤安定性評価への適用

地盤の安定性評価は、これまで管理基準値によることが一般的であった。すなわち、変位量や変位速度に対して、管理レベル毎に基準値を設け、観測データがこれを超えると注意、避難勧告、避難命令等の対策を発令するというものである。

この管理基準値は、過去の事例を参考に地盤工学的知見を踏まえて、行政や事業者が設定することが一般的であるが、それには地質学的知見や地形的要因がほとんど考慮されない。このため、定められた管理基準値は、必ずしもその地点に適したものであるとはいえない場合があり、また安全の側を考慮しなければならないため、住民らに過度の負荷を与える場合すらもある。当然のことながら、地質、地形、気象等の地域特性を反映した管理基準値を設定しようとする試みが行われているが、自然事象の不確かさや複雑さ等の、必ずしもや所期の成果を挙げているとは言いがたい現状である。

このような現状を鑑み、災害発生のメカニズムを考慮しないアプローチがどの程度まで有効であるかを検証することを企図し、地盤観測データの評価に、近年注目される Big data 分析の

手法を適用することとした。Big data 分析は'Not causality, but correlation'[4)]のキャッチフレーズからも推察されるように、事象の因果関係（メカニズム）ではなく、事象データ相互間の相関関係に着目した分析手法である。この手法を、地盤安定性評価へ適用する意義は、従来、人間の分析では認知できなかった特異観測データ、あるいは特異データトレンド等を抽出することで、地盤の特異挙動（地盤災害）を検出し得る可能性のある点にある。ここでは比較的多数の測定点数を計画する地盤傾斜データを対象に Big data 分析手法の適用について考察を加えた。

参考文献

1) 内閣官房：国土強靭化基本法、www.sangiin.go.jp/japanese/joho1/kousei/.../t051800151800.pdf、 2012.
2) 内閣官房：国土強靭化基本計画、http://www.cas.go.jp/jp/seisaku/kokudo_kyoujinka/kihon.html、2016.
3) 内閣官房：国土強靭化アクションプラン 2015、http://www.cas.go.jp/jp/seisaku/kokudo_kyoujinka/pdf/ap2016.pdf、2015.
4) Mayer-Schnberger, V. and C. Kenneth: Big Data -A Revolution That Will Transform How We Live, Work and Think.-, Cukier, John Murray, 2013.

2. 加速度センサーを用いた傾斜計とこれを用いた試験観測網の設営

本章では、観測網の設営に使用する加速度センサーを用いた傾斜計の測定原理とネットワーク化のための特定小電力無線の仕様を示し、これを用いて本研究のために設営した試験観測網の設営状況を示す。

2.1 加速度センサーを用いた傾斜計

(1)加速度センサーの測定原理

近年、市販されている傾斜計の加速度センサーはそのほとんどが静電容量式のセンサーが使用されており、本研究でも当該センサーを搭載した加速度計を採用するものとした。加速度センサーは、自動車の姿勢制御等に多用されるセンサーであり、**図-2.1** に示すように、その基本構造は可動電極である錘が固定電極で挟められた構造である。今、加速度により錘に力が発生すると、可動電極である錘と固定電極間の距離 d は変化し、静電容量が変化する。この変化した静電容量を、**図-2.2** のように Capacitance-voltage 変換（以下、C-V 変換）により電圧変換し、実用的な電圧に増幅して出力するものである。

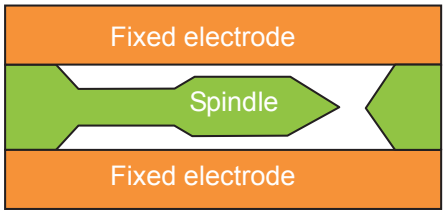


図-2.1 加速度センサーの基本構造

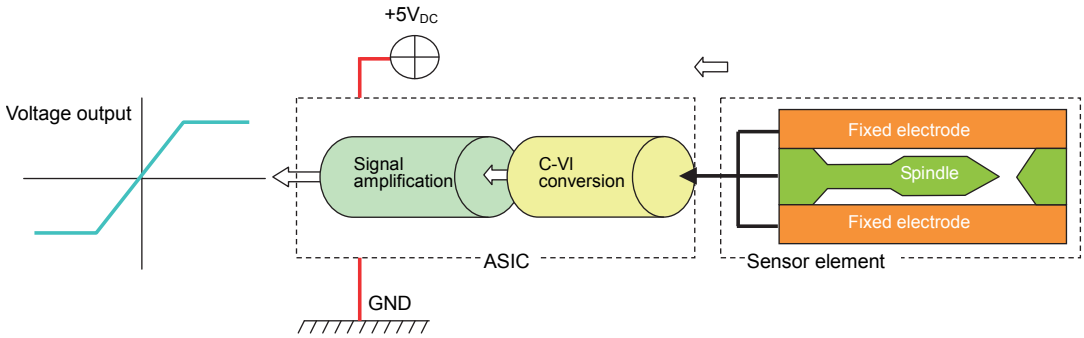
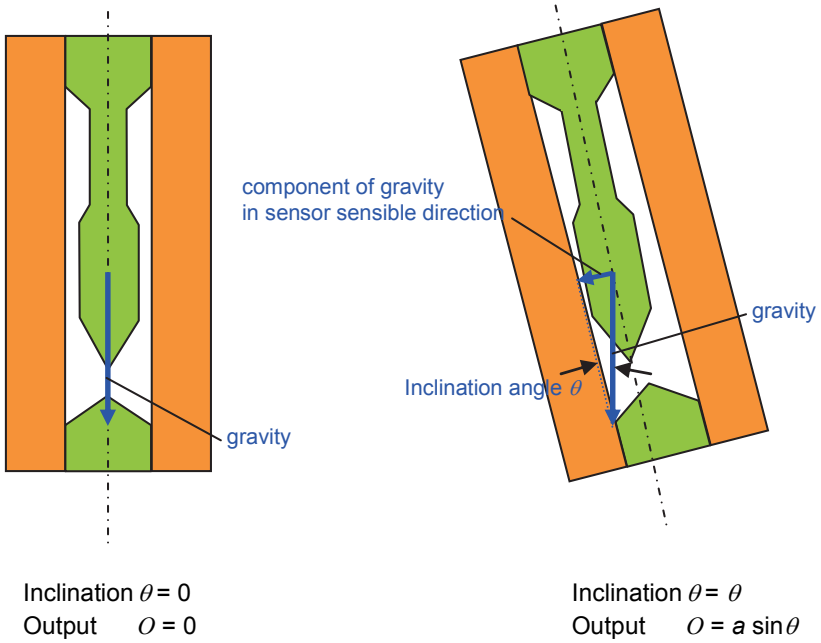


図-2.2 加速度センサーの測定ブロック図

近年、市販されている傾斜計の加速度センサーはそのほとんどが曙ブレーキ株式会社のセンサーが使用されており、本研究でも当該センサーを搭載した加速度計を採用するものとした。なお、曙ブレーキ株式会社の加速度センサーは以下のような特徴を持つ。

a. センサエレメントと ASIC[1]の 2 チップ構造
b. 2,000G 以上の耐衝撃性
c. E[2]PROM[2]搭載により電子トリミングでオフセットの感度の変更が可能
d. 自己診断機能 CAN[3]内蔵

上記のような加速度センサーを援用した傾斜計の角度検知は、加速度センサーに対して作用する重力加速度方向を検知することに他ならない。いま、図-2.3(a)のように加速度センサーをセンサーの度感度方向と直交する方向、すなわち鉛直（$\theta = 0$ °）に設置する。このとき、加速度センサーは鉛直方向に作用する重力加速度 g を検知するから、このときセンサーからの出力電圧 O は $O = 0\ V$ を出力する。



(a) Initial State　　(b) After Inclined

図-2.3　静電容量式加速度センサーによる傾斜角測定原理

[1] ASIC(Application Specific Integrated Circuit)：ある特定用途のために設計、製造される集積回路のこと。カスタムチップ、カスタム IC とも呼ばれる。
[2] E[2]PROM(Electronically Erasable and Programmable Read Only Memory)：不揮発性メモリーの一種で、電気（電圧）の操作により、データの消去や書き換えが可能な半導体記憶装置。一般に高い電圧によりデータを消去する。
[3] CAN(Controller Area Network)：ボッシュにより制定されたネットワーク規格。その主要な企画は以下の通り。a.最大1Mbps の高速アクセス、b.送信テキスト2 系統、受信テキスト3 系統のエラー検出機能、c.0～8byte の短いメッセージ構成、d.マルチマスター方式、e.低順位 ID を優先するバスアクセス優先順位の採用

この加速度センサーが、**図-2.3(b)**のように角度θだけ傾いた時、加速度センサーの感度方向の分力 T は $T = g \sin\theta$ であり、これが加速度センサーの出力となる。ただし、出力電圧は加速度センサーの固有の感度係数が乗じた $O = a \sin\theta$として与えられる。したがって、傾斜角度θは次式で与えられる。

$$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{V}{a}\right) \tag{2.1}$$

このような原理に基づく静電容量式加速度センサーを用いた傾斜計は、様々な製品が販売されているが、本研究では既往研究で開発した自立型地盤災害監視局 GENESIS/FPS への接続の容易さから、**写真-2.1** に示す傾斜計 NetBC-30（製造・販売：株式会社オサシ・テクノス）を採用することとした。NetBC-30 は特定小電力無線通信により測定データを転送することが可能であり、GENESIS/FPS も特定小電力無線通信機能が搭載されているため、山岳部における観測網設営に適すると判断した。**表-2.1** に、NetBC-30 の仕様を示す。

表-2.1 NetBC-30 の仕様

外形寸法（データロガー）	本体部	158.5 mm(H)×144 mm(W)×120 mm(D) ：アンテナ含まず
	収納箱	416.0 mm(H)×275 mm(W)×160 mm(D) ：単管取付金具含まず
重量（データロガー）	本体部	約 1.0kg
	収納箱	約 4.5kg ：本体・単管取付金具含
外形寸法（センサー）	無線部	411 mm(H)×125 mm(W)×102mm(D) ：背面板含
	検出部本体	55 mm(H)×80 mm(W)×30 mm(D)
	検出部固定板	95 mm(H)×120 mm(W)×4 mm(D)
重量（センサー）	無線部	約 1.3kg ：背面板・U ボルト含む
	検出部	約 0.5kg
使用周波数		923.9～927.5MHz の範囲で、適宜、選択
空中線電力		20 mW
通信距離	有視界時	400m 以上
	林間	100m 以上

写真-2.1 使用した傾斜計 NetBC-30

2.2 試験観測網の設営

試験観測網は、国土交通省 関東地方整備局 甲府河川国道事務所のご指導・ご協力のもとに、中部横断塩沢トンネル工事終点側坑口斜面に設営した。

中部横断塩沢トンネル工事は、新東名高速道路をはじめ、中央自動車道、上信越自動車道を結ぶ中部横断自動車道の一部として、山梨県区間(富沢 IC～六郷 IC 間:L = 約 28.3 km)に位置する塩沢トンネル(工事延長 L = 1,012.1 m、内トンネル延長 L = 649.0 m)の工事を行うものである[1)]。中部横断自動車道は、日本海及び太平洋の臨海地域と長野・山梨県との連携・交流を促進し、ネットワークの構築、物流体系の確立や広域的観光ゾーンの開発・支援等に寄与するものと期待されている。**図-2.4** に中部横断塩沢トンネルの地質縦断図を、**表-2.2** には工事諸元を示す[1)]。

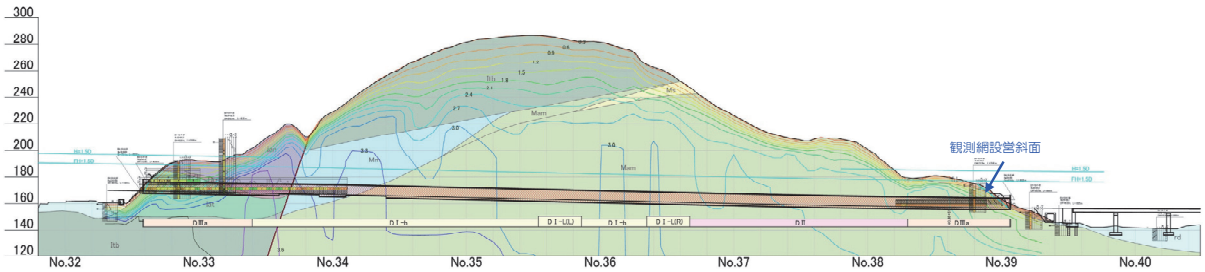


図-2.4 中部横断塩沢トンネルの地質縦断図[1)]

表-2.2 中部横断塩沢トンネルの工事諸元[1)]

発注者	国土交通省 関東地方整備局
工期	平成 27 年 1 月 28 日～平成 28 年 11 月 18 日
工事内容	・トンネル延長 L = 649.0 m ・内空断面 A = 84.7 m^2 (DI-b) ・機械掘削方式(NATM) ・地質:砂岩・泥岩互層

2.2.1 試験観測網設営の概要

試験観測網設置を計画した中部横断塩沢トンネル工事終点側口斜面部では、トンネル施工に先立つ地質調査時等により、**図-2.5** の地質平面図に示された地すべりブロックの存在が確認された。また、平成 19 年度に実施された表面波探査では、**図-2.6**、**2.7** に示されるように S-2 ブロック上部に地すべりブロックと同等の低速度領域が存在が確認された。該当部の地表には、変状等は認められないものの地山には空隙が発達し、緩みが進行していると想定され、わずかな刺激でも不安定化する危険性が高い。坑口切土によって足元がさらわれ、さらにトンネル直上にあるため掘削による緩みの影響を強く受ける。崩落土砂は坑口に直接落下することになる。

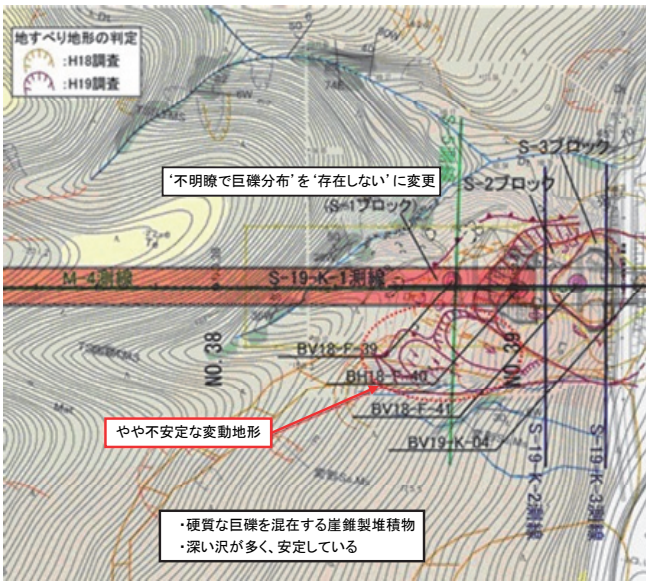


図-2.5　終点側坑口の地質平面図

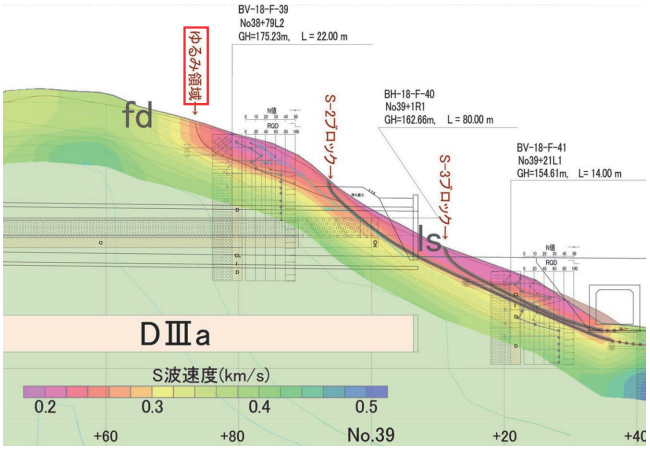


図-2.6　終点側坑口の地質平面図

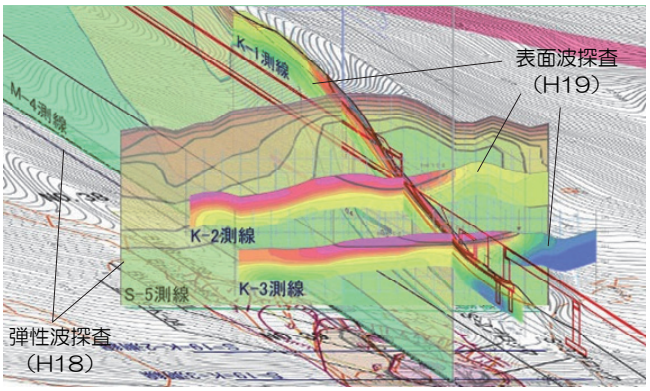


図-2.7　終点側坑口の弾性波速度コンターの鳥瞰図

以上のような地質調査結果を基に、トンネル施工に先立ち当該斜面に対する地すべり対策工が設計・施工された。**図-2.8** に、その平面図を示す。**図-2.8** に示されるように、当該地点で施工された地すべり対策工は、鋼管杭工や仮設グランドアンカー工等の地すべり抑止工だけでなく、急傾斜部の排土工、吹付枠工、および植生基吹付け工等の抑制工、さらには L = 56.4 *m* 区間での排水工も施工されており、必要にして十分な地すべり対策であると判断する。なお、**図-2.9** に鋼管杭工、および仮設グランドアンカー工の施工縦断図を示す。

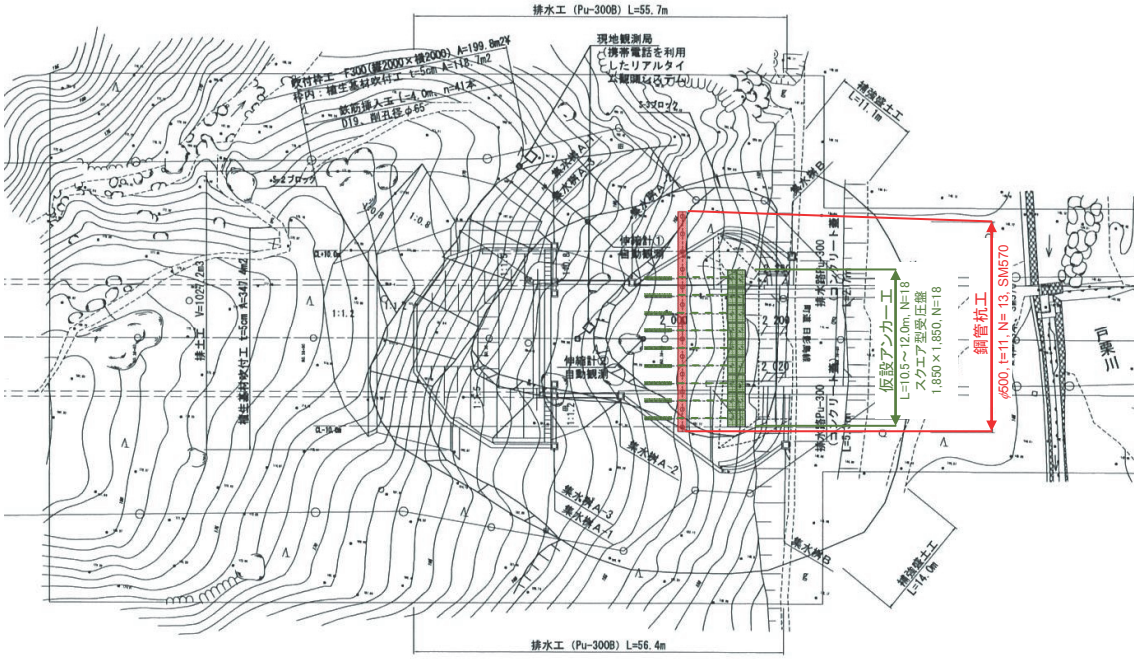


図-2.8 終点側坑口斜面地すべり対策工平面図

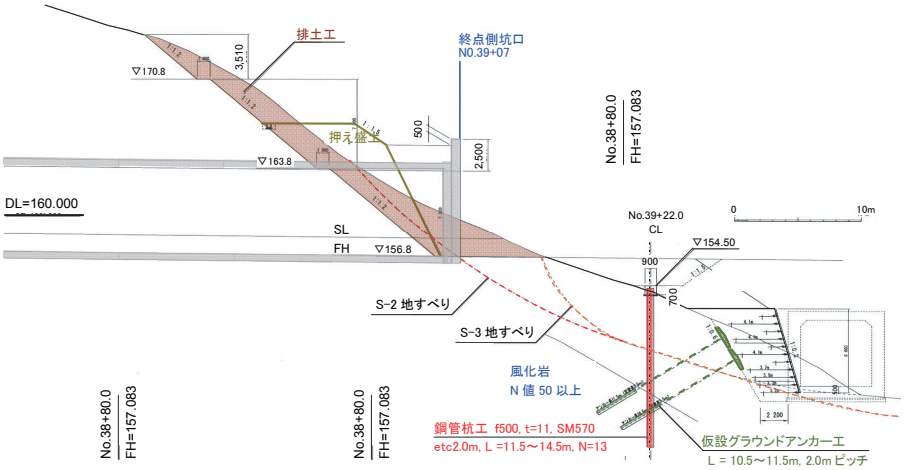


図-2.9 鋼管杭工、および仮設グランドアンカー工等の施工断面図

また、上記の地すべり対策工に付随して、対策工実施後の斜面挙動と対策工の効果を施工することを目的として、地すべり変位計等による動態観測も計画されている。本研究のために設営する試験観測網は、この動態観測計画を基に計画するものである。その試験観測網の設営平面図を**図-2.10** に示し、**写真-2.2** に、設置した傾斜計配置の全景を、また斜面中央、および東西部の設置状況を**写真-2.3** にそれぞれ示す。図や写真に示されるように、観測網内に設置された傾斜計は $N = 10$ であり、前述のように予め計画されていた地盤伸縮計測定計画を参照して、設置箇所を選定したものである。

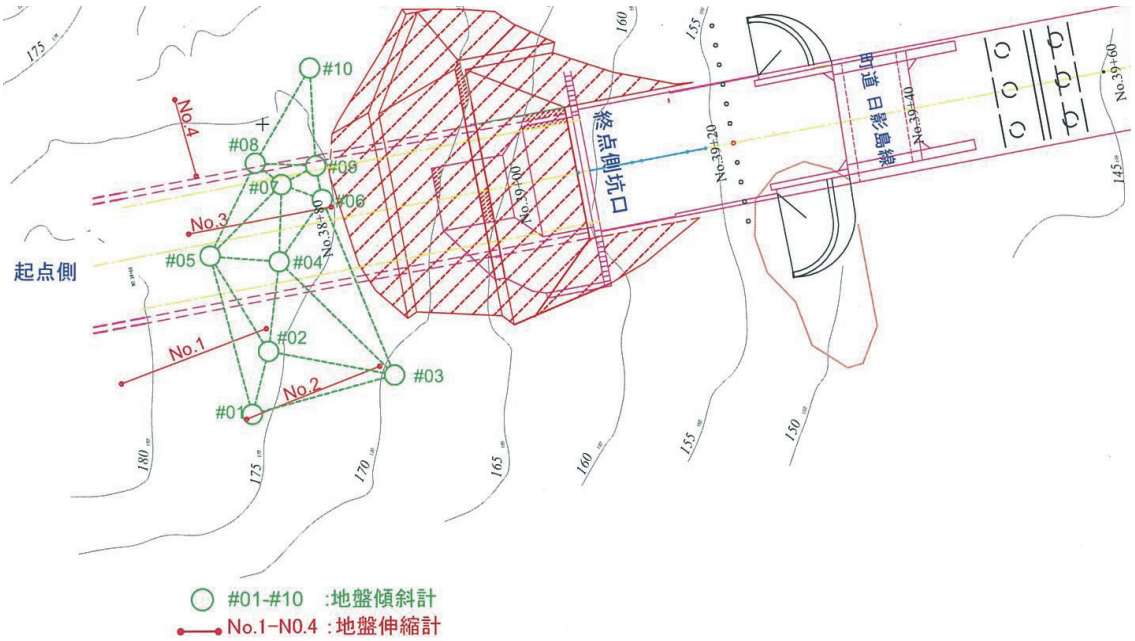


図-2.10 試験観測網の設営平面図

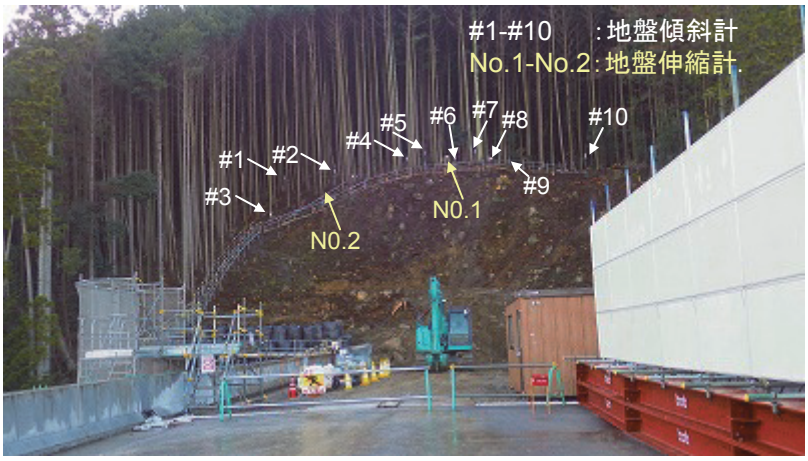
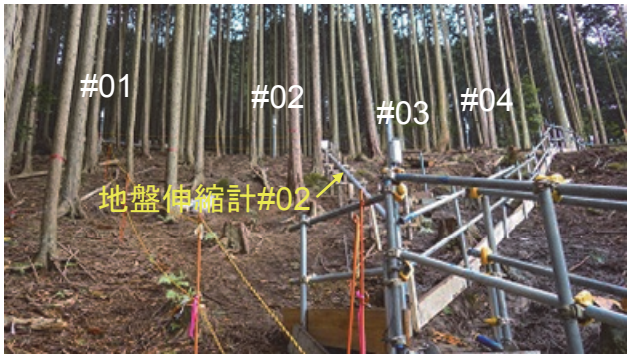


写真-2.2 試験観測網設置全景

(a) 斜面中央部地盤傾斜計相対位置関係



(b)斜面東部の傾斜計設置状況　　(b)斜面西部の傾斜計設置状況

写真-2.3 斜面各部の傾斜計相対位置関係

写真-2.4 に設置工程を示す。今回の設置工では、測定時に日照による金属部材の膨張が傾斜測定値に影響を与えないよう、計測器を土中に埋設することとした。このため、**写真**-2.4(a)のように、予め傾斜計設置スペースが確保できる範囲の地盤を深さ d = 200～300 mm 程度掘削することとした。

設置工は、まずベースプレートを**写真**-2.4(a)のようにスパイクで地盤に固定し、そのベースプレート上に x-軸、y-軸の水平を確保して（**写真**-2.4(c)参照）、ベースプレート上に傾斜計を搭載する。今回の観測網設営斜面は北向き斜面であるため、全傾斜計の x-軸の正方向を北に、また y-軸の正方向を西として設置した。なお、方位はベースプレート打込み時に調整した。ベースプレート上に傾斜計搭載後、**写真**-2.4(e)、(f)のように傾斜計とデータ・トランスミッタである特定小電力無線機とを接続し、測定・通信条件設定をおこなう。全ての計器の設定の終了後、観測網の基地局である GENESIS/FPS の設置と設定を実施した。今回の観測網は北向き斜面上に設営され、また**写真**-2.2 に示されるように、観測網背面には高い樹木が繁茂するためいたって日照条件が悪い。このため、**図**-2.10 に示される位置に GENESIS/FPS を設置し、

その電源となる太陽光パネルを南向きに据えた**写真-2.5** に GENESIS/FPS の設置状況を示す。

今回の 10 個の傾斜計設置作業には、事前準備を除き、作業員 2 名で約 2 時間を要し、各傾斜計のチャンネル番号設定等に約 0.5 時間を要した。これは、他の地盤観測機器設置に比較して、大幅な工期短縮を実現したものと評価する。

(a)ベースプレート打込み

(b)ベースプレート設置状況

(c)地盤傾斜計のベースプレートへの搭載

(d)地盤傾斜計搭載状況

(e)特定小電力無線機設置・接続

(f)測定・通信条件設定

(g)地盤傾斜計埋戻し

写真-2.4 通信型地盤傾斜計設置手順

計測された傾斜データは、各傾斜計から特定小電力無線網で GENESIS/FPS に送信され、GENESIS/FPS からは、**図-1.2** に示したパッケト通信網で、三井住友建設が運営する地盤観測データベースサーバーGENESIS/GHQ(Ground Head Quarters)上に送信され、データベース化される。このデータは、ネットを介して共有され、東京大学上西研究室、および塩沢トンネル作業所の PC 上からデータをモニターできるだけでなく、必要に応じてテンポラリーな観測実施指令を各 PC から発信することも可能である。今次の試験観測では、標準の計測頻度を、1 時間に 1 回としたが、PC からの指令で任意時刻における観測も可能であり、その観測データも、上記の要領で GENESIS/GHQ 上に送信され、データベース化される。

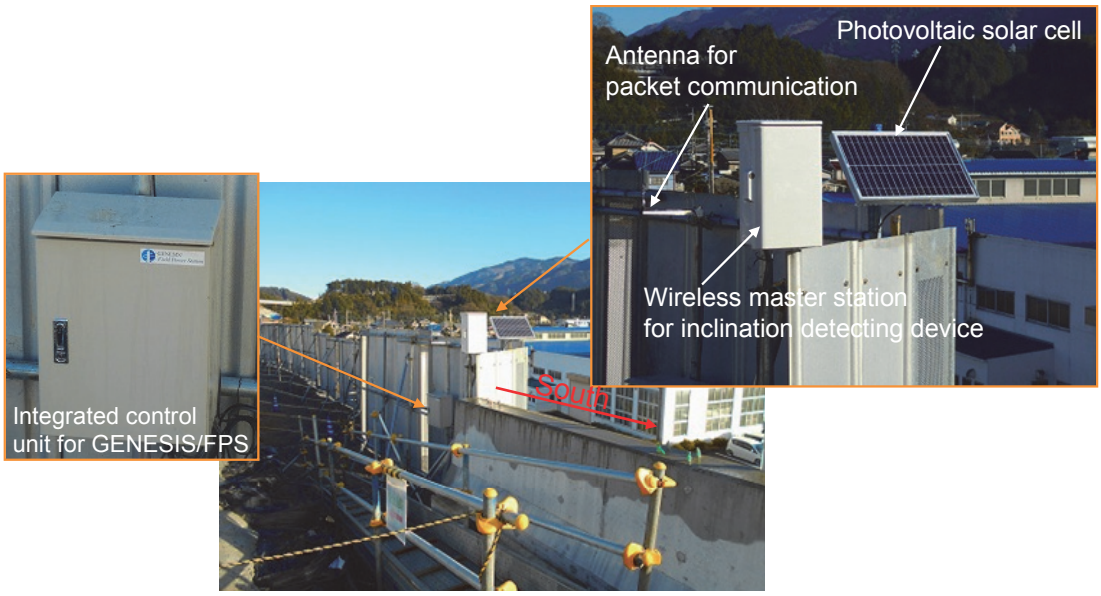
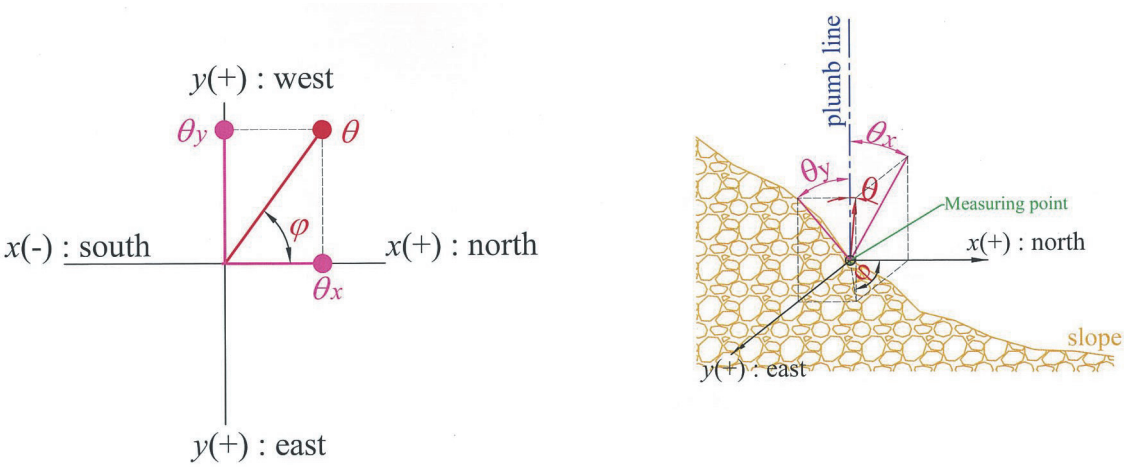


写真-2.5 GENESIS/FPS 設置状況

2.3 試験観測期間に測定されたデータ傾向とその測定精度に関する考察

前述のように、今回設営した斜面観測網では、x-方向の正の軸を北に採り、90 度離れた 2 方向の傾斜量成分θ_x、θ_yを測定した。斜面の安定性を評価する場合、傾斜量成分θ_x、θ_yよりも総傾斜量θ、ならびに傾斜方位φを用いることが望ましい。傾斜量成分と傾斜量θ、傾斜方位φは、**図-2.11** に模式的に示す関係にあるから、次の関係が与えられる。

$$\theta = \sqrt{\theta_x^2 + \theta_y^2}$$
$$\varphi = \tan^{-1}\left(\frac{\theta_y}{\theta_x}\right) \tag{2.2}$$

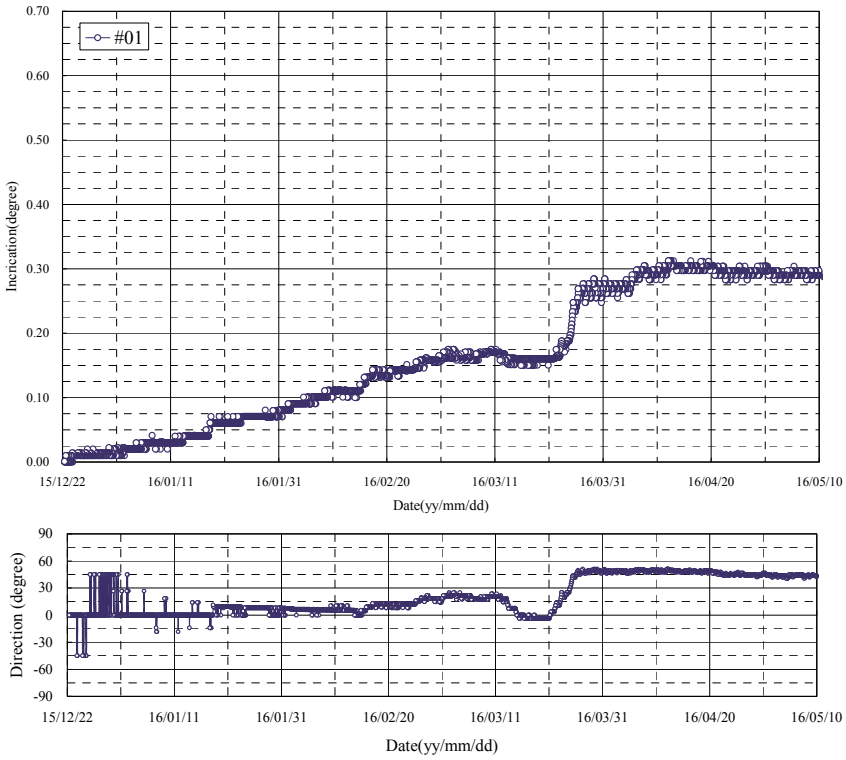


(a) 傾斜量θと傾斜量成分θ_x,θ_yの関係　　(b)測定点における傾斜量概念図

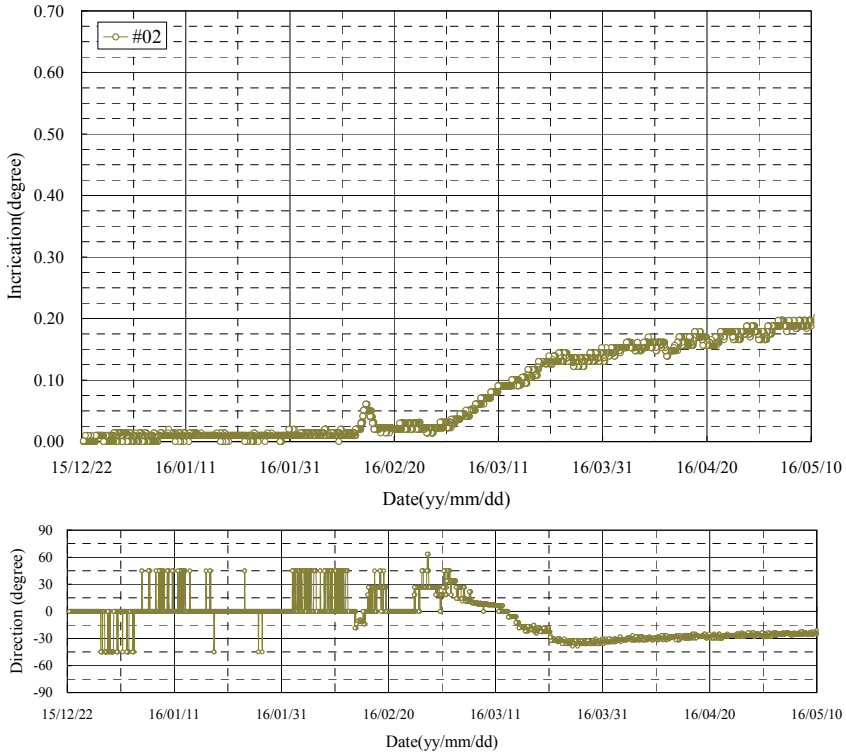
図-2.11 傾斜成分θ_xと傾斜量θ、傾斜方位φの概念

図-2.12 に、式(2.2)、および**図-2.11** に従い求めた各系測点の傾斜量θと傾斜方位φの経時変化を示す。図に示されるように、傾斜方位φは、一部で激しい摂動を繰り返す領域が見られる。式(2.2)において、傾斜量成分θ_xは傾斜方位θの分母であるから、θ_xの値が小さい領域では、わずかな変動でも、傾斜方位φが大きく変動するためである。このような、特殊な領域を除けば、いずれの観測点でも安定した観測が行えているものと判断できる。

傾斜量θを見ると、測点により違いはあるが、2016 年 2 月 13 日、および 2016 年 3 月 15 日を起点として、明瞭な増大傾向が生じていることがわかる。このうち 2 月 13 日を起点とする変動は同日の降雨に影響を受けた傾斜であり、3 月 15 日を起点とする変動はトンネル掘進に影響を受けた傾斜である。**図-2.13** は、降雨により発生したと考えられる傾斜量（2016 年 2 月 11 日～2 月 25 日間の傾斜量増分）と、トンネル掘削によると考えられる傾斜量（2016 年 3 月 1 日～4 月 27 日間の傾斜量増分）とを比較して、坑口法面等高線上に表したものである。

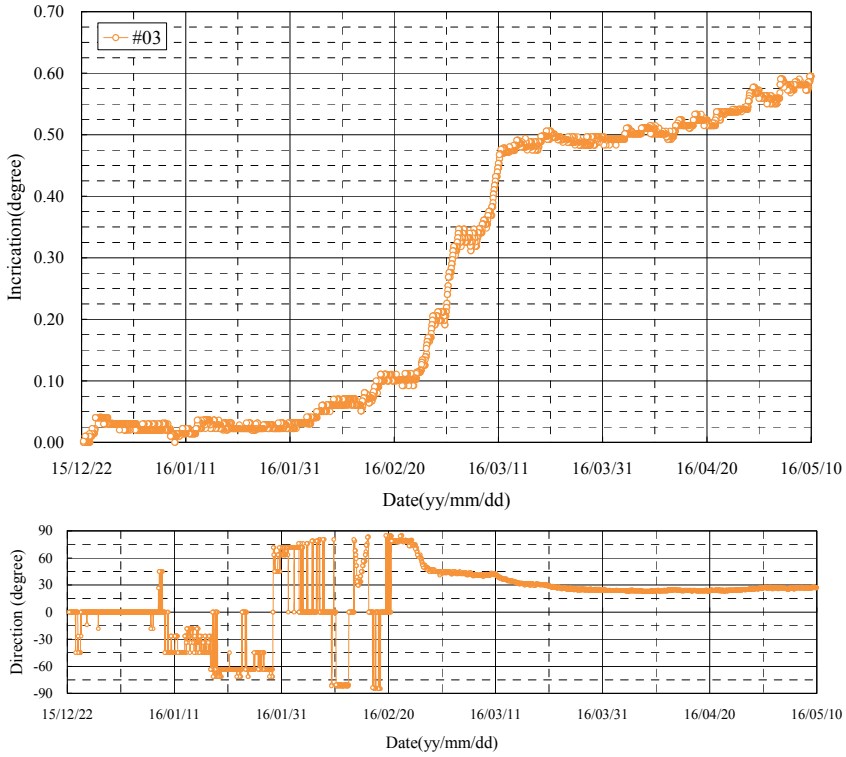


(a)#01-測点の傾斜量/傾斜方向

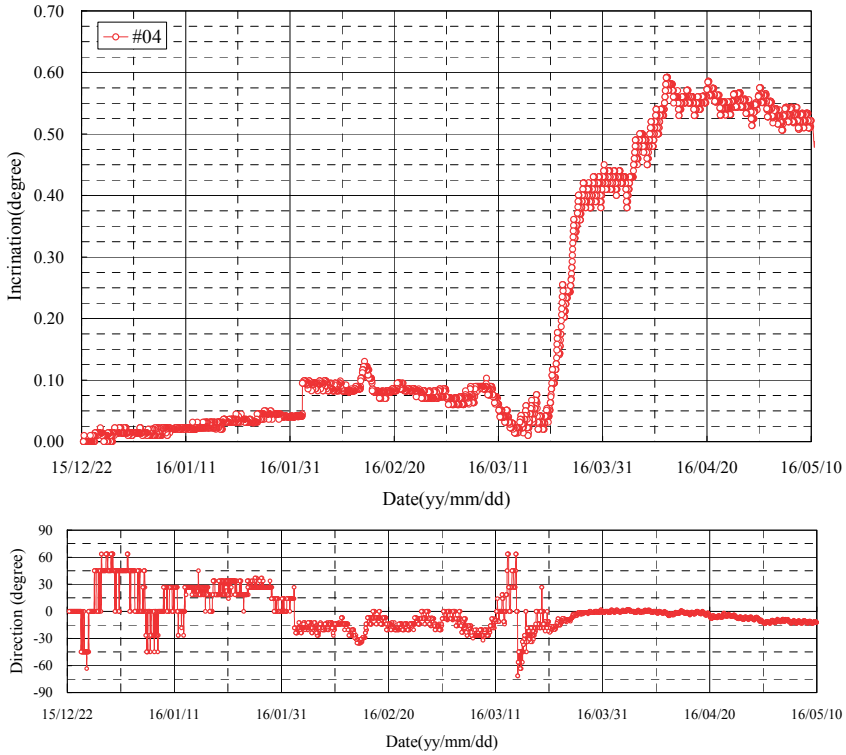


(b)#02-測点の傾斜量/傾斜方向

図-2.12　試験観測期間の傾斜量/傾斜方向経時変化(1)

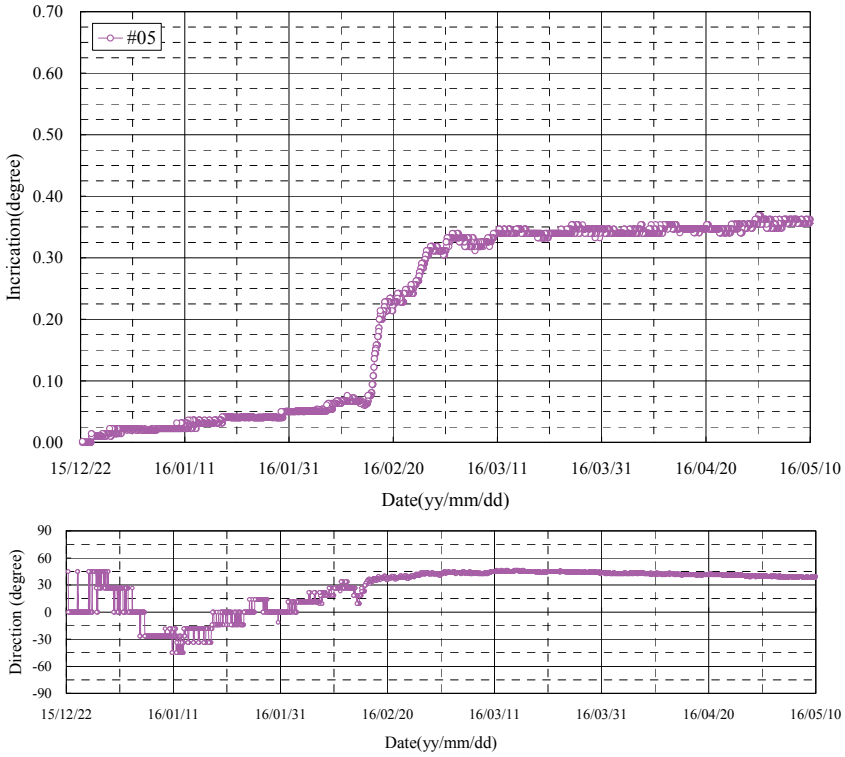


(c)#03-測点の傾斜量/傾斜方向

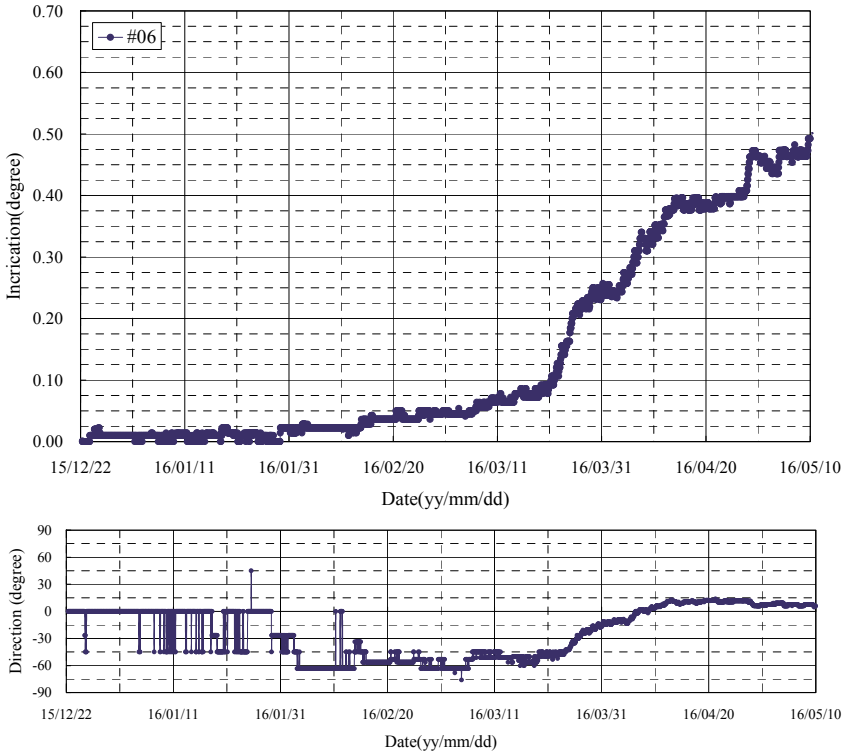


(d)#04-測点の傾斜量/傾斜方向

図-2.12　試験観測期間の傾斜量/傾斜方向経時変化(2)

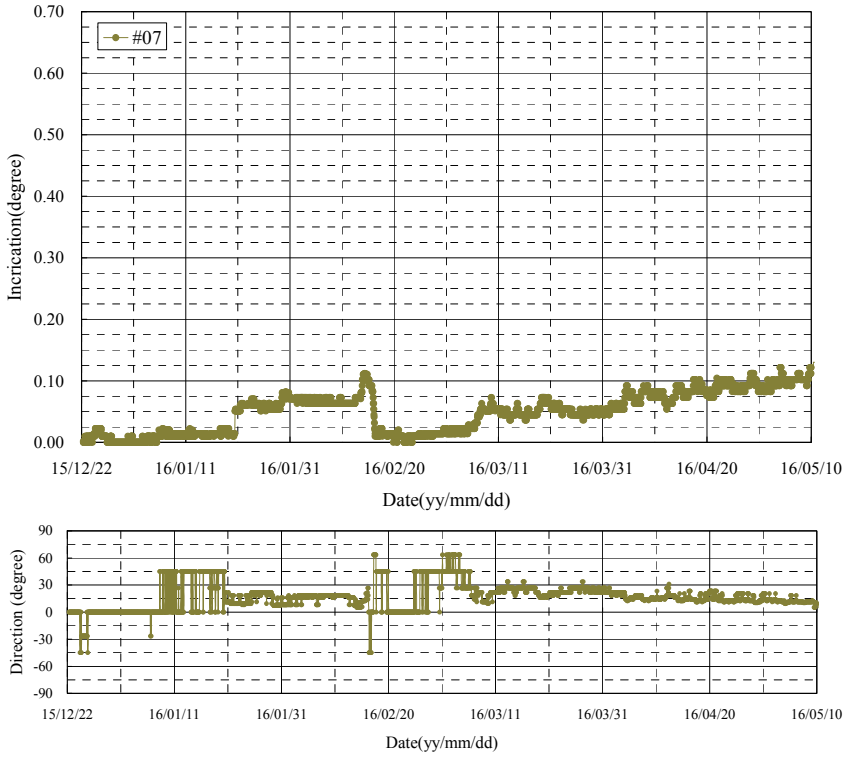


(e)#05-測点の傾斜量/傾斜方向

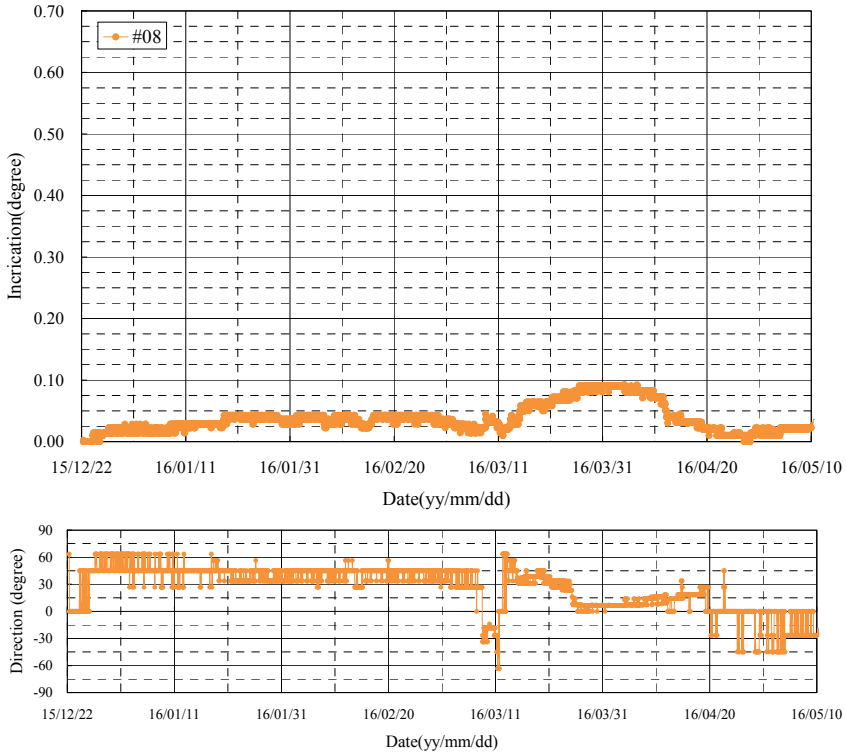


(f)#06-測点の傾斜量/傾斜方向

図-2.12　試験観測期間の傾斜量/傾斜方向経時変化(3)

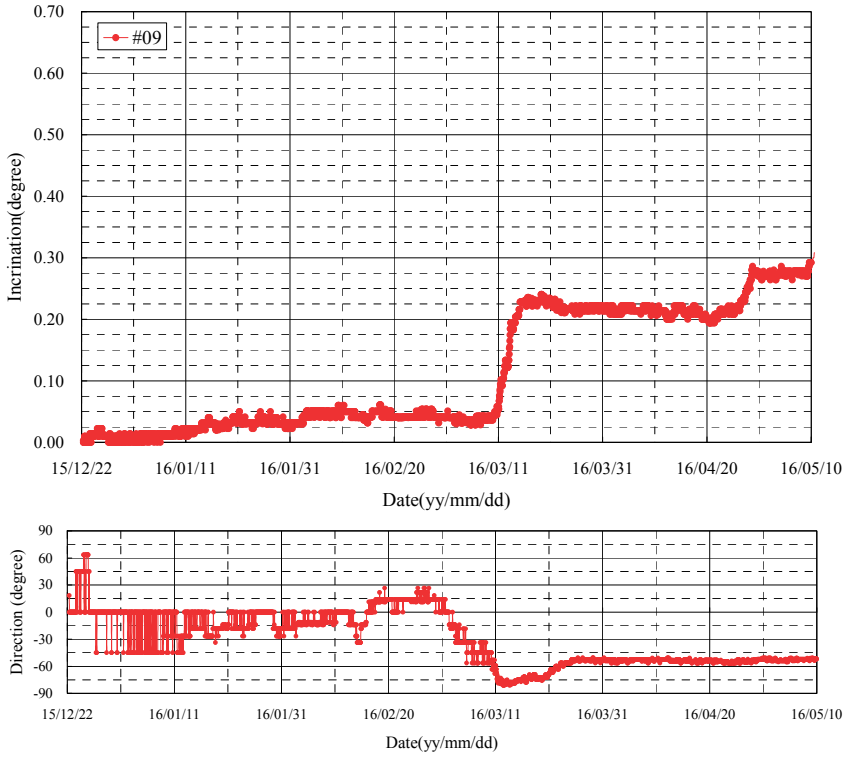


(g)#07-測点の傾斜量/傾斜方向

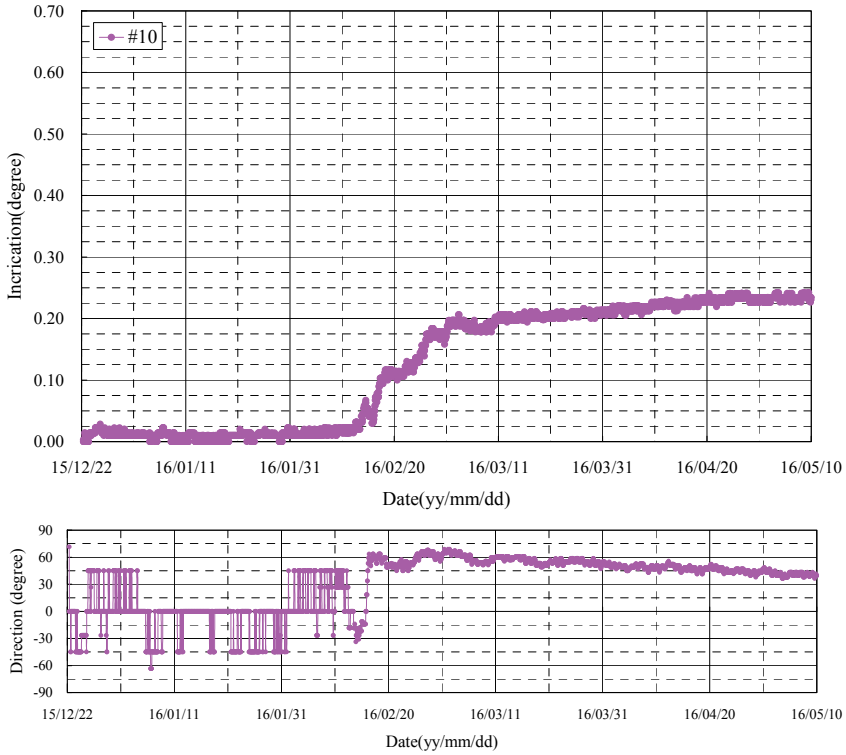


(h)#08-測点の傾斜量/傾斜方向

図-2.12　試験観測期間の傾斜量/傾斜方向経時変化(4)



(i)#09-測点の傾斜量/傾斜方向



(j)#10-測点の傾斜量/傾斜方向

図-2.12 試験観測期間の傾斜量/傾斜方向経時変化(5)

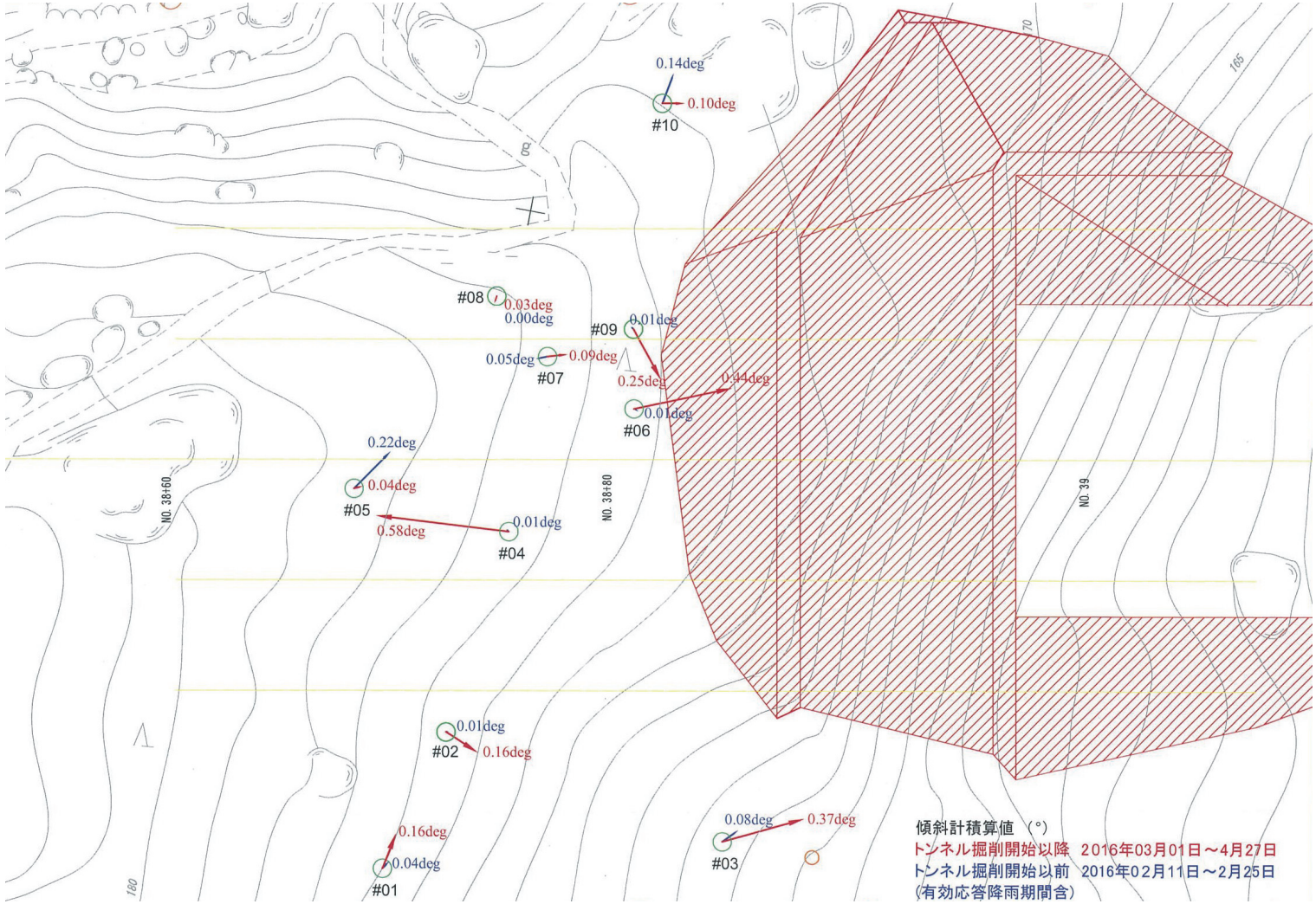


図-2.13 降雨とトンネル掘削による傾斜量発生の比較

観測点により、前者の影響が卓越する点、あるいはいずれの影響も受けない点などが存在するが、傾斜量の絶対値としてはトンネル掘進による値が大きく卓越する。すなわち、降雨による傾斜量が最大でもθ= 0.22°、ほとんどがθ= 0.1°以下であるのに対し、トンネル掘進の影響を受けた傾斜量は最大θ= 0.58°、ほとんどがθ = 0.1°以上発生している。

位置的な分布を見ると、トンネルに影響された傾斜はトンネル天端からトンネル左側方部の測点#01,02,03,04,06,09 で卓越しているが、降雨に影響された傾斜量の位置的な発生傾向は明瞭ではない。当然のことながら、傾斜量の発生は測定点の平面的な空間配置ではなく、測定点の地形勾配、降雨強度、ならびにトンネル掘進距離等に支配されるものであるから、傾斜挙動予測にはこれらとの相関を検証しなければならないが、これらに関しては、別途、稿を改めて議論する。

最後に、これらの傾斜計測実施期間中に、**図-2.10** 中の地盤伸縮計 No.1～No.4 に有意な伸縮量は計測されていない。これらの地盤伸縮計が適正な機器を用いて、正確に設置されていることは確認しており、これは計測技術上の問題ではなく、測定項目の地盤挙動に対する鋭敏性の差と判断する。

地盤傾斜は地盤変位の微分項に相当し、地盤挙動に敏感に反応する。したがって、斜面変形が微小な範囲でこれを評価・把握し、事後の挙動を予測することが可能である。これに対し、地盤変位、とくに伸縮計のような相対変位測定は、地盤傾斜に比して、地盤挙動に鈍感であり、少なくとも数 *mm* 程度以上の相対変位が 2 点間に発生しなければ、有意な測定データを得ることが難しい。しかし、今日、斜面の安定性は変位に基づいて評価されているため、現場計測項目として変位計測を欠くことはできない。

今回の試験観測網設営の目的は、地盤挙動に鋭敏な地盤傾斜計をネットワーク化して設置することで、比較的小さな発生傾斜量から斜面全体の挙動を把握し、事後の挙動予測を行うことの可能性を検証することにあるが、これまでに測定された傾斜データはこの目的に供し得る鋭敏性と精度を備えるものと判断される。これに基づき、以下では地盤挙動の評価手法と予測手法の開発と実装を示す。なお、本助成研究の研究範囲ではないが、変位規則との併用による斜面安定性評価とその予測も、併せて研究を進める必要がある。

参考文献

1) 三井住友建設株式会社：中部横断塩沢トンネル工事、http://www.shiozawa-tunnel.com/、2016.

3. 観測データのデータベース化とその図化処理

前章に示した観測網が採取したデータは、三井住友建設が運用する地盤モニタリング専用のサーバーに送信され、データベース化される。このデータベースは、当該の斜面管理に係るステークホルダー間で共有され、分析・解析され、斜面管理業務へとフィードバックされねばならない。これをサーバー上で実行するためには、測定データを包括的に管理し、データを実行するデータベースシステムをわれわれは GENESIS/GHQ（Ground monitoring HeadQuarters）と名付け、本章においてその設計とその実装を行う。

3.1 観測データのデータベース化

3.1.1 XML と RDBMS

データベースは、データを格納し操作する仕組みとして定義される。今日まで汎用的に用いられてきた RDB（Relational DataBase）は「リレーショナル・データ」と呼ばれる表形式のデータ構造でデータを格納され、SQL 言語によりデータ処理される。代表的なオープンソースの SQL 言語 MySQL の処理機能を Appendix B に示す。Appendix B から推測されるように、RDBMS は、コンピュータ・リソースを有効活用し、膨大なデータ群を効率的に処理することを目的に設計されており、このために表形式のデータ構造が有効とされた。その大容量・高速データ処理性能が担保されるためには、表形式が恒常的に不変であることが求められることは自明であろう。

近年、各種データベースは XML（eXtensible Markup Language）により記述されることが多い。これは、Appendix A に示すように XML が、ネットワーク空間上でのデータ共有や交換に供するため設計されているためである。さらに、XML の大きな特徴はそのデータが可変であることが認められている点にある。したがって、時間とともに変化するデータ系列の追加や変更、さらにはデータそのものの書き換えにも柔軟意対応することができる。

XML データは、データの要素を「タグ」という記法で記述し、その要素を入れ子にすることで階層構造を表現できる。タグによる記法は HTML でも採用さているが、HTML ではあらかじめ使用できるタグが定義されているのに対し、XML では自由にタグを設定し使うことができるという違いがあり、XML のデータ構造は無限の自由度を有するともいえる。

これは、Appendix A から分かるように XML フォーマットが、データ変更に対してデータ構造を容易に維持することができるためであり、新しい要素名を追加してもデータ構造は変更されず、ツリー構造が維持される。すなわち、新しい要素名を追加する場合には、その要素名がツリー構造の中でどのような役割を果たし、どのように関係するかを記述する XML スキーマを変更すればよい。これは XML が、個々の要素を説明的なラベルを使って分類することができるフォーマットを採用しているためであるが、このことは同時に、データ要素の粒度[1]が細かくなり、

[1] データの粒度とは、テーブルや表などのデータセットのデータの細かさを表す指標であり、データベースにおけるプライマリキー（Primary Key）に相当する。プライマリキーが定義されていないテーブルでは、そのテーブルの使用形態を調査する必要があり、どのようなユースケースの際にレコードが挿入されるのかをプログラム等で確認しなければならない。

データサイズが増大する傾向があることを意味する。

このように、XML で構築されるデータベースは RDBMS の適用が難しく、多様なデータ形式をもつデータベースを柔軟に構築・運用することはできるものの、RDBMS が有する多様なデータアクセス機能、処理機能を利用できないという難点があった。

このような問題の解決の一提案として、共同研究者の一人は XML データベースを RDBMS により処理し得るよう以下のようなデータ構造を考えた。すなわち、全ての時空データは、空間情報 SD（Spatial Data）、時間的に鋭敏な特性 FCA（Frequently Changing Attribute）、ならびに時間的に安定な特性 SA（Static Attribute）の関係スキーマ（Relational Schema）によって記述されるものとし、そのリレーショナル・テーブル（Relational Table）を次のように定義されるものとする [1),2),3)]。

$$
\begin{aligned}
&\mathrm{SD(OID, SD, SMBB, TMBB)} \\
&\mathrm{FCA(OID\ , TMBB, A)} \\
&\mathrm{SA(OID\ , TMBB, A)}
\end{aligned}
\tag{3.1}
$$

(3.1)は、SD、FCA、ならびにSAがOID（Object Identifier）、SMBB（Spatial Minimum Bounding Box）、TMBB（Temporal Minimum Bounding Box）、およびA（Attribute）の属性列ファミリによって表現されるものと考えるものである。ここで、OIDは地学オブジェクトのIDであり、関係データモデルの関係の主キーとなる。また、SMBBとTMBBはSDを表記する上で最小限必要な空間領域、ならびに時間領域をそれぞれ規定する属性列ファミリである。

さらに、FCAとSAは、いずれも時空間以外の地学データの属性を示す属性列ファミリであるが、FCAとSAとでその属性は異なり、互いに排他的な属性変数が用いられることに注意が必要である。これは、一つの地学オブジェクトに対して、静的な情報と動的な情報とに分離されるためであり、いうまでもなく静的な情報はSAの属性となり、動的な情報はFCAの属性となる。たとえば、任意の位置に設置された計測センサーの空間位置はSA属性であるが、その測定された値はFCA属性である。また、坑道内を移動する車両の空間位置はFCA属性であり、車両の運転者はSA属性である。これらの例にみられるように、同じ空間位置でも地学オブジェクトによって、SA属性になったり、FCA属性になったりすることに注意が必要である。

このように、SA 属性と FCA 属性を峻別して情報管理することの利点は、FCA 属性の変化だけを更新することで任意の地学オブジェクトの変化を記述することにより、データの冗長（Redundancy）を減少することが可能な点にある。いいかえれば、SA のみを検索キーとして RDBMS による検索、結合等のデータ処理を行い、これに随伴する可変な情報 FCA（本研究で言えば、観測データ群がこれに分類される）は、別個のデータ処理プロセスにより演算や図化を行うことは可能となる。しかしながら、このような処理は RDBMS の限定された機能しか利用できず、またシステム構造も複雑とならざるを得ないことは言を俟たない。

ところが、近年、サーバー等のメモリ資源の爆発的な増大に伴い上記の諸条件が変化しつ

つある。前述のように、RDBMS は限定されたメモリ資源を有効に利用できるよう設計されたシステムであったが、メモリ資源の巨大化に伴い、巨大なメモリ資源を前提として設計された DBMS（DataBase Management System）がオープン・ソースとして利用できる環境が整いつつある。その開発方向性は、RDBMS を拡張し、XML データベースを処理可能にするよう設計された DBMS と、XML のデータ構造を前提として設計された DBMS とに大別されるが、前者のシステムは利用できる XML のデータ構造に制約があるようである。以上のような検討から、本研究では XML によるデータベースを構築し、その処理システムとしてオープン・ソースの XML 用 DBMS を採用した。以下に、その具体的構造を示す。

3.1.2 GENESIS/GHQ の XML ファイル構造

GENESIS/GHQ（Ground monitoring HeadQuarters）において、防災監視網、ならびにその観測データを管理する XML ファイル構造を図-3.1 に、またそのフィル記述例を図-3.2 に示す。図-3.1 は、GENESIS/GHQ のシステム管理者が、複数地点の地盤観測網を同一システムにより管理し得るよう設計した構造である。

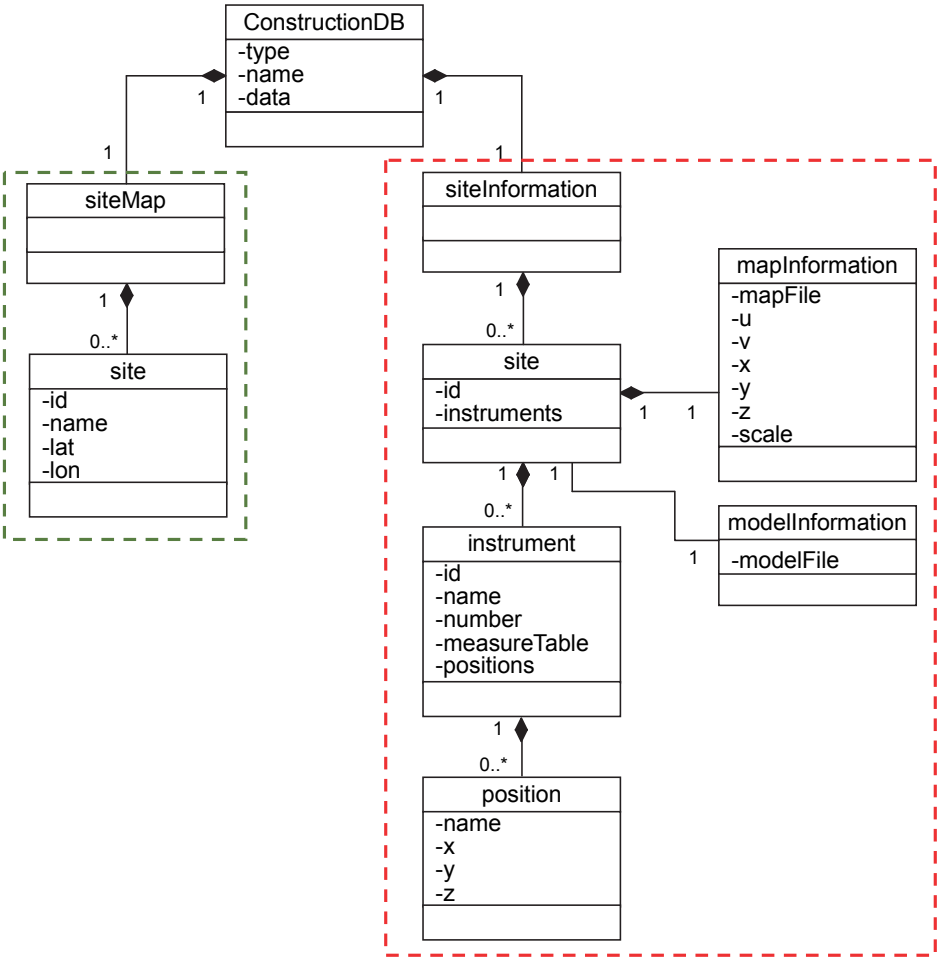


図-3.1 防災監視網観測データ管理 XML ファイルの XML ツリー構造

```xml
<?xml version="1.0" encoding="shift_jis" ?>
- <constructionDB>
- <siteMap>
- <site id="1">
  <name>中部縦断道塩沢トンネル</name>
  <lat>35.284688582734546</lat>
  <lon>138.44099521636963</lon>
  </site>
- <site id="2">
  <name>流山技術研究所</name>
  <lat>35.88224394610227</lat>
  <lon>139.936283826828</lon>
  </site>
  </siteMap>

- <siteInformation>
- <site id="1">
- <instruments>
- <instrument id="1">
  <name>BC-30L</name>
  <number>10</number>

- <positions>
- <position id="1">
  <name>P-1</name>
  <x>-31.026</x>
  <y>-17.687</y>
  <z>176.000</z>
  </position>
        .
        .
        .
- <positions>
- <position id="10">
  <name>P-10</name>
  <x>-18.815</x>
  <y>15.435</y>
  <z>173.950</z>
  </position>
  </positions>

  <measureTable>ID00101</measureTable>
  </instrument>
  </instruments>
  </site>
- <site id="2">
- <instruments>
- <instrument id="1">
  <name>BC-30L</name>
  <number>3</number>
  <positions />
  <measureFile>ID00201.csv</measureFile>
  </instrument>
- <instrument id="2">
  <name>SLG-100</name>
  <number>3</number>
  <positions />
  <measureFile>ID00202.csv</measureFile>
  </instrument>
  </instruments>
  </site>
  </siteInformation>

</constructionDB>
```


図-3.2　XML ファイル例

図-3.1 から明らかなように、当該 XML ファイルは、<constructionDB>タグの下に、<constructionDB>タグ、ならびに<siteMap>タグが連なるツリー構造となっている。**図-3.1** 中で赤枠で囲まれる<siteInformation>タグは防災監視網設営地点の移動経度等の地理情報、ならびにその観測網の構成要素諸元等から構成され、緑枠内の<siteMap>タグ以下のツリー構造には、各防災監視網における設置機器情報、その可視化に関する情報などが格納される。以下、各部の実際を記述する。

(1) <construction>タグの構造と属性

ルート部における XML ツリー構造を**図-3.3** に、またそのタブ属性を**表-3.1** に示す。**図-3.3** に示すように、ルート部では、<constructionDB>タグにより XML ファイルのルート部であることを宣言するとともに、その下部に<siteMap>タグ、ならびに<siteInformation>タグが生成することを宣言するものである。

```
<constructionDB type='genesisGHQ'>
<name>genesisGroundHeadQuarter_DB
</name>
<date >2016/03/01</date >
<sitemap/>
<siteInformation/>
```

図-3.3 <constructionDB>タグの構造

表-3.1 <constructionDB>タグにおける属性

type	XML ツリー構造の定義種別。本システムでは genesisGHQ 固定
name	データベース名称示す
date	データベース初期構築日を示す。書式は yyyy/mm/dd となる。

<siteMap>タグ下に格納される情報は、防災監視網を設置した地点の緯度経度など地理的位置情報が格納され、システム管理者が各地点の観測網を管理するために供せられる。ここでは、セキュリティ確保のため、各観測網が独立したツリー構造を形成するものとした。

また、<siteInformation>タグには、防災監視網毎の設置情報、すなわち観測器機種別、設置位置等の諸元が定義され、GENESIS/GHQ ではこの下に観測データがデータベース化される。したがって、<siteInformation>タグも各観測網毎に独立したツリー構造を持つ。したがって、一般システムユーザは、そのユーザが関係する防災監視網の定義情報へのみアクセス権が付与され、その下で観測データの検索・閲覧、分析等が可能となる。

(2) <siteMap>タグ下の構造と属性

<siteMap>タグの構造を**図-3.4** に示し、**表-3.2** にその属性情報を示す。<sitMap>タグは、システム管理者が、多地点の地盤観測網を管理、運用するために供される。たとえば、XML ファイルに格納された、観測網の位置情報（緯度、経度）、観測網名称等を国土地理院が提供する電子国土地図上 [4]にプロットすることで、**図-3.5** のようなシステム管理者のためのポータルサイトが容易に構築できる。

```
<site id='1'>
  <name>中部縦断道塩沢トンネル</name>
  <lat>35.284688582734546</lat>
  <lon>138.44099521636963</lon>
</site>
```

図-3.4 <siteMap>タグ下における XML ツリー構造

表-3.2 <site>タグにおける属性

id	防災監視網 ID 番号、防災監視網ごとにユニークであること
name	防災監視網の名称
lat	防災監視網の緯度
lon	防災監視網の経度

図-3.5 <siteMap>タグを利用したシステム管理者のためのポータルサイト例

図-3.5 は、**図-3.2** の XML ファイル記述例に従い作成したポータルサイトである。**図-3.2** では、観測網設置地点として<site id="1">に<name>中部縦断道塩沢トンネル</name>が、また<site id="2">に<name>流山技術研究所</name>が登録されているから、それぞれの<lat>属性、<lon>属性に格納されている緯度・経度に従い、電子国土地図上に観測網位置を示すマークが示される。マウスカーソルを、いずれかのマークに近づけると、そのマーク上に観測網名称が記述される。さらに、右上にはマウスカーソルを近づけた地点の最新の観測データ一覧が表示される。観測データに、何らかの異常値等が確認された場合、システム管理者はその地点の詳細な分析を<siteInformation>タグを経由して行うことが可能である。

このように、多数の地点で地盤観測が運用されたとしても、システム管理者は比較的容易に、全国の地盤監視を行うことができる。なお、観測地点が近接し、マウスカーソルが地点を特定できないなどの場合は、**図-3.6** ように電子国土地図を拡大して操作すればよい。

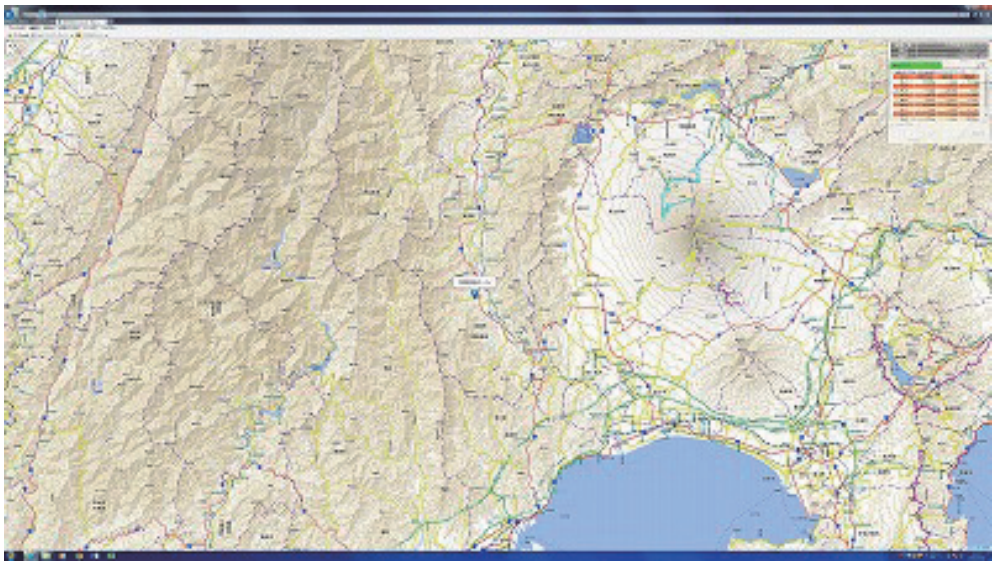


図-3.6 電子国土地図を拡大したポータルサイト

(3) <siteInformation>タグの構造と属性

<siteInformation>タグの構造を**図-3.7** に示す。また、**表-3.3～3.7** には、<site>タグ、<mapInformation>タグ、<modelInformation>タグ、<instrument>タグ、ならびに<position>タグの属性を示す。

前述のように、<siteInformation>タグには、防災監視網毎の設置情報、すなわち観測器機種別、設置位置等の諸元が定義され、GENESIS/GHQ ではこの下に観測データがデータベース化されるとしたが、具体的には**表-3.6** に示されるように、各計測器毎のデータベールテーブルの名称が<instrument>タグ内の<measureTable>に登録され、これにアクセスしてデータの図化や分析を実施することになる。

```
<site id='1'>
  <mapInformation>
    <mapFile>sitemap001.png</mapFile>
    <u>0</u>
    <v>6399</v>
    <x>-58.000</x>
    <y>-32.000</y>
    <z>0.000</z>
  </mapInformation>
  <modelInformation>
    <modelFile>mesh.csv</modelFile>
  </modelInformation>
  <instruments>
    <instrument id='1'>
      <name>BC-30L</name>
      <number>1</number>

<measureTable>ID00101</measureTable>
      <positions>
        <position id='1'>
          <name>P-1</name>
          <x>-31.026</x>
          <y>-17.681</y>
          <z>176.000</z>
        </position>
      </positions>
    </instrument>
  </instruments>
</site>
```

図-3.7 <siteInformation>タグの構造

表-3.3 <site>タグの属性

id	防災監視網 ID 番号、<siteMap>下における<site>タグの id 属性と対応する
instruments	防災監視網内に設置される観測機器に関する諸情報を示す<instrument>タグの一覧を登録するタグとなる。

表-3.4 <mapInformation>タグの属性

mapFile	二次元図面ファイルの格納場所を示す
u	二次元図面上の基準点の画像座標（u,v）
v	
x	二次元図面上の基準点の現場座標（x,y,z）
y	
z	
scale	二次元図面の分解能（*mm*/*pixel*）

表-3.5 <modelInformation>タグの属性

modelFile	三次元モデルファイルの格納場所を示す

表-3.6 <instrument>タグの属性

id	観測機器 ID 番号、観測機器の機種名称ごとにユニークであること
name	観測機器機種名称
number	設置観測機器数、設置した同一機種の台数を示す
measureTable	観測データのデータベーステーブル名称
positions	設置観測機器ごとの名称および位置情報を示す<position>タグの一覧を登録するタグとなる。

表-3.7 <position>タグの属性

name	機器設置位置名称
x	観測機器の設置位置現場座標（x,y,z）
y	
z	

また、従来の地盤観測データ処理は、データの時系列変化に着目した図化や分析が主流であった。これまで述べたように、本研究は地盤挙動の空間的分布を評価することを目的とするため、観測データの図化も空間分布を視覚的に理解しやすい図が求められる。このため、<position>タグに各観測機器の位置座標を、また<mapInformation>タグと<modelInformation>タグには、観測網設営地点の地形等高線図と 3 次元地形モデルの情報を格納した。

3.2 観測データの空間図化機能の操作

観測データの空間図化機能の基本的な操作手順を以下に示す。当該図化機能を立ち上げると、**図-3.8** のように最新の地盤傾斜データが等高線上にプロットされた画面が呼び出される。データ表示期間の変更は、**図-3.9** のように、{表示期間設定}ウィンドウを呼び出して行う。現在、同時に 3 つの観測期間の傾斜データ分布を表示することが可能であり、各観測期間について、**図-3.9** 中の A でその初期日時を、B でその最終日時を指定することができる。また、C はその観測期間の傾斜データ分布の表示・非表示を選択するボタンである。

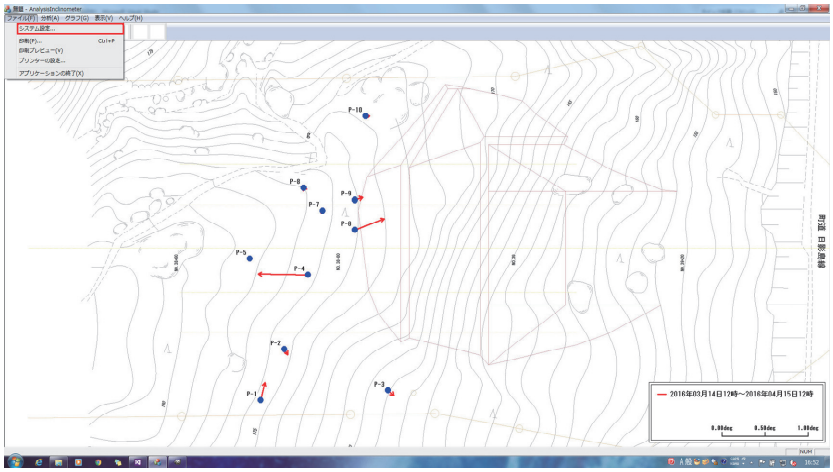


図-3.8 観測データ図化機能の初期画面

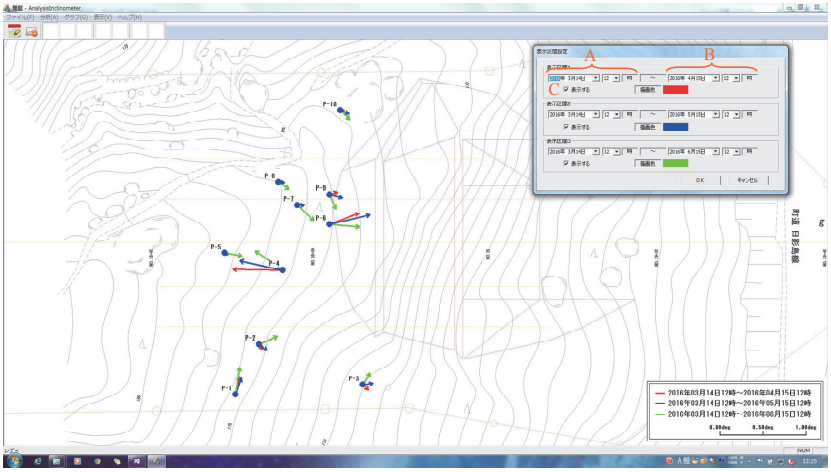
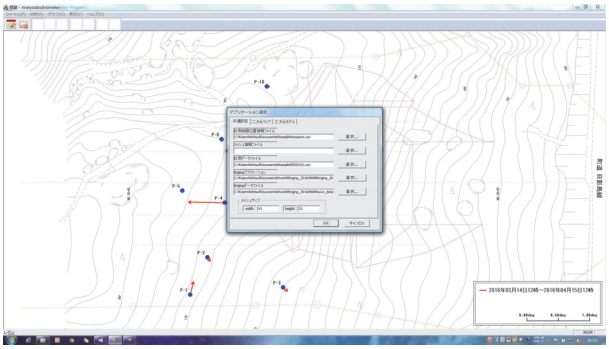
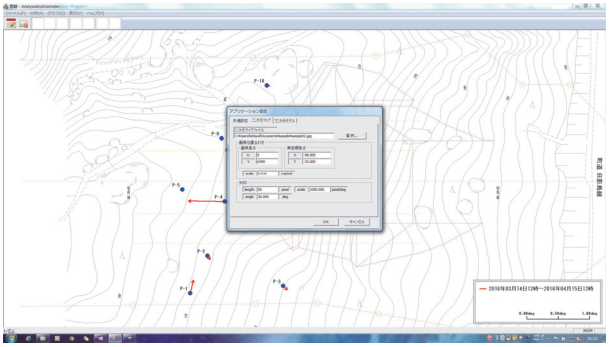


図-3.9 傾斜データ表示期間の変更

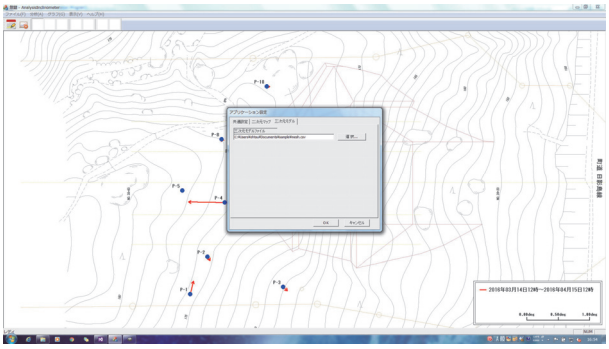
なお、描画に関する各種設定は、**図-3.8** に赤く囲んだ{ファイル}プルダウンメニューから、**図-3.10** に示す{データ表示設定}ウィンドウを呼び出して行う。なお、各タブのデフォールト値は、<siteMap>タグ、<siteInformation>タグに格納された値が読み込まれる。



(a) [共通設定]タブ



(b) [二次元マップ]タブ



(c) [三次元モデル]タブ

図-3.10 観測データ表示設定ウィンドウの各タブ

また、**図-3.11** のように、{分析}プルダウンメニューから[3 次元モデル]を選択すると、当該観測網地点の 3 次元地形モデルが描画される。これは、**図-3.12** のように、**第 5 章**で定式化し、実装した Kriging 法による斜面傾斜分布推定をコンタやベクトル等で描画するプラットフォームとして供せられる。

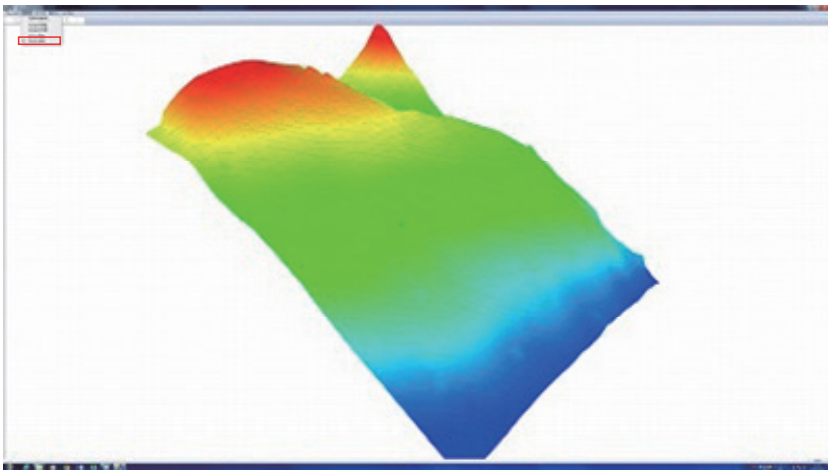


図-3.11 観測網設置地点 3 次元地形モデル

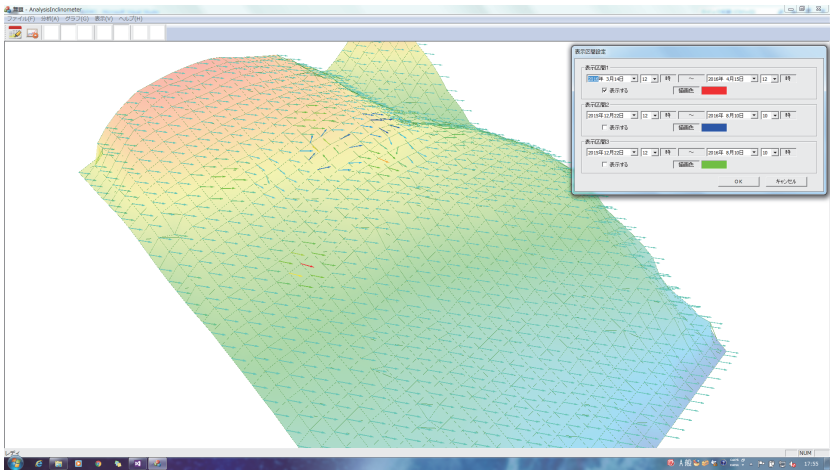


図-3.12 Kriging 法による地盤挙動分布推定結果の 3 次元図化例

参考文献

1) 板倉賢一、佐藤稔紀、山地宏志:Web3D と RDBMS を援用した大規模地下開発システムの開発報告書、日本建設情報総合センター平成 18 年度研究助成報告書(助成番号 第 2006-03 号)、2007.

2) 板倉賢一、松井裕哉、佐藤稔紀、早野明、山地宏志、大津慎一:トンネルライフサイクルマネージメントに供するプロダクトデータモデルの研究、日本建設情報総合センター平成 22 年度研究助成報告書(助成番号 第 2010-13 号)、2011.

3) 徐招峰、山地宏志、佐藤稔紀、松井裕哉、板倉賢一:Web3D と時空間データベースを援用した地下空間開発支援システムの設計とその実装、土木学会論文集(土木情報学)、Vol.71、 No.1、 pp.43-55、2015.

4) 国土交通省国土地理院:電子国土基本図(地図情報)、http://www.gsi.go.jp/kibanjoho/mapinfo_what.html、2014.

4. 観測データの Big data 処理への考察

4.1 はじめに

SARS（重症急性呼吸器症候群、Severe Acute Respiratory Syndrome）は、SARS コロナウイルスにより引き起こされる感染症で、2002 年 11 月に中華人民共和国広東省で発生し、2003 年 7 月に新型肺炎制圧宣言が出されるまでの間に 8,069 人が感染し、775 人が死亡した [1),2)]。

このとき、Google は、任意の地域で、キーワード‘SARS’を検索する頻度が高まると、その後しばらくして、その地域で SARS 感染者が発生する相関関係を Nature 誌に投稿し、そのデータ処理手法を‘Big data’と名付けた。これが、今日、各分野での応用が爆発的に広がる Big data の嚆矢とされる [3)]。

Big Data とは、‘Not causality, but correlation’のフレーズで表されるように、事象の因果関係ではなく、相関関係のみに着目して、事象を評価し、以降を予測する手法である。この方法論は、Descartes 以来の還元主義的な科学手法を無視する手法ではあるが、IT 技術の飛躍的な進展でサンプリングされるデータ量が級数的な増大をつつける今日においては、一つの新しい方法論を提示するものであると考える。すなわち、‘もっとも単純な要素から始めてそれを演繹していけば最も複雑なものに達し得る’という Descartes の方法論、およびそのための 4 つの規定[1]は、人間の理解・処理し得る限界を超えるデータ量の分析には適さない面がある。

地盤防災の面から考えると、地形・地質の複雑さや広域・狭域の地下水挙動の複雑さなどにより、今後、地盤観測網は巨大化し、観測点数も膨大な数に達するであろう。このような観測網を防災に資するよう運用するためには、リアルタイムで斜面挙動を分析し、事後を予測する必要があり、この目的のために Big data の手法は有効であると考える。

一方で、今日、斜面崩壊のメカニズムは全てが詳らかにされているわけではない。したがって、これを解明するための努力は今後もなされて行かねばならないが、この目的のために巨大観測網から得られた観測データは活用されるべきであり、この分野では Descartes の方法論は今日も有効であると考える。

Big data では、事象の因果関係（メカニズム）を基本に構築された力学体系は無視されるものとされ、事象の相関関係のみが着目されるが、どのようなパラメータ間においてその相関を求めるかという問題では、力学的なセンスや知見を欠かすことはできないと考える（rock engineer としてのささやかな矜持であるが）。地盤力学の教えるところでは、斜面挙動は降雨やトンネル掘削に大きく支配される。今回の観測においても、斜面傾斜と降雨明瞭な関係があるように思われるデータが確認された。以下では、斜面監視に Big data 手法を導入する端緒として、今次観測における、これらの相関関係を整理・考察し、Big data 手法の適用性について検証する。

---

[1] (1)明証的に真であると認めたもの以外、決して受け入れないこと：明証、(2)考える問題を出来るだけ小さい部分にわけること：分析、(3)最も単純なものから始めて複雑なものに達すること：総合、4.何も見落とさなかったか、全てを見直すこと：枚挙/吟味

4.2 傾斜量データの降雨応答に関する検証

(1)強雨に影響された傾斜量増大の経緯

2016 年 2 月 13 日ころから、**図-4.1** 中に赤丸で示す#01,#03,#05,#10 の傾斜量が急増し、一方、青丸で示す#07 傾斜計では傾斜量の急減が見られた。問い合わせたところ、2 月 13 日夜半から 2 月 14 日に掛けて当該地点で強い降雨があったとことが確認された。傾斜量の増大勾配としては、明らかにこれまでと異なる傾向を示したが、傾斜量としては最大でもθ = 0.23°と比較的小さいこと、並行して計測している地盤伸縮計に顕著な変異増大が発生していないこと、および点検により斜面に変状や不具合が確認されなかったことから、当該法面の安定性には問題がないものと判断し、観測を強化するにとどめた。

第 2.3 節で述べたように、地盤傾斜は地盤挙動に敏感で、微小な挙動を把握できるものの、直接、安定性を検証することが難しい。このため、傾斜急増に過剰に反応する場面もあり、実務の面からも傾斜と斜面安定性評価に関する研究も不可欠と考える。

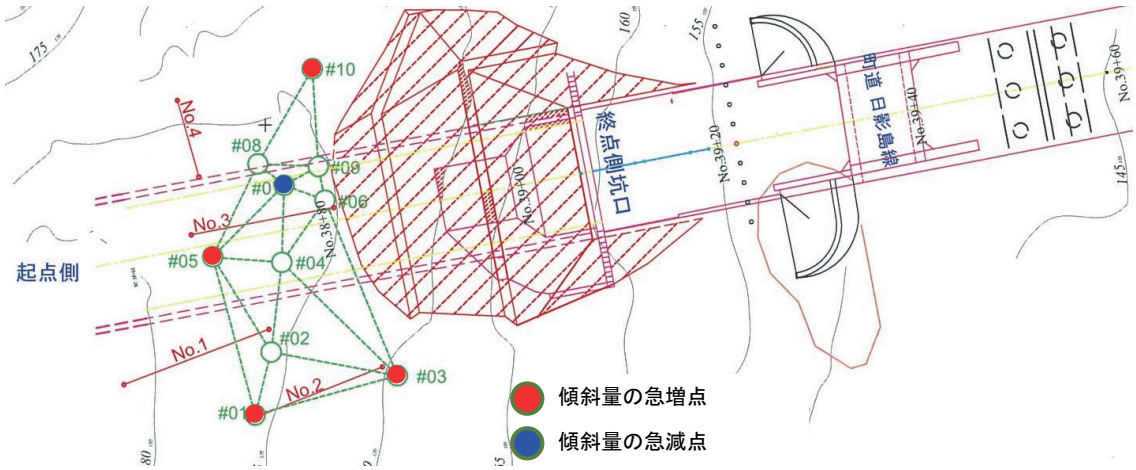
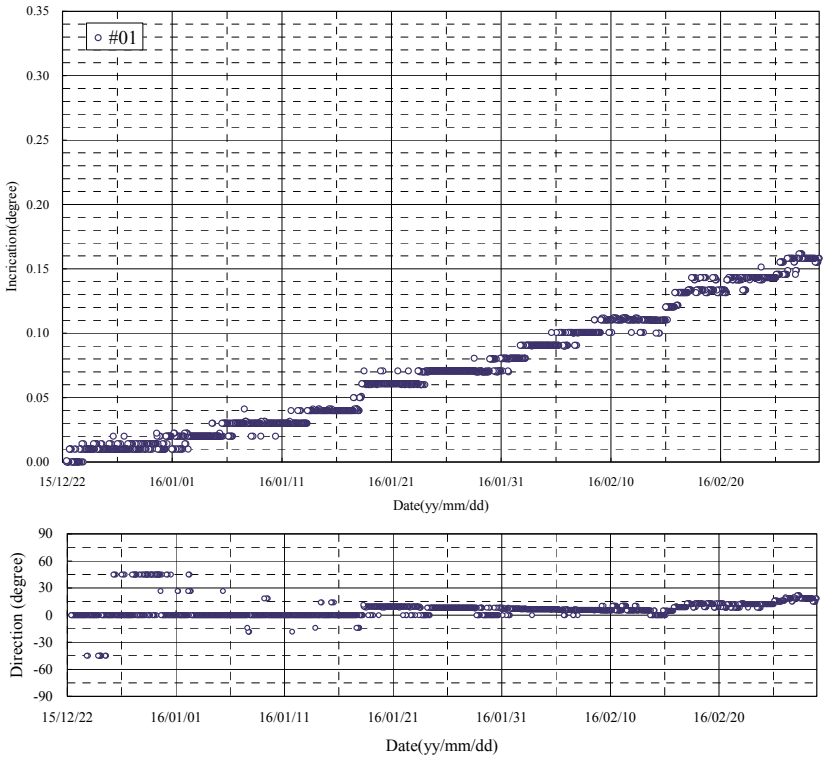


図-4.1 降雨により傾斜量が急変した観測点

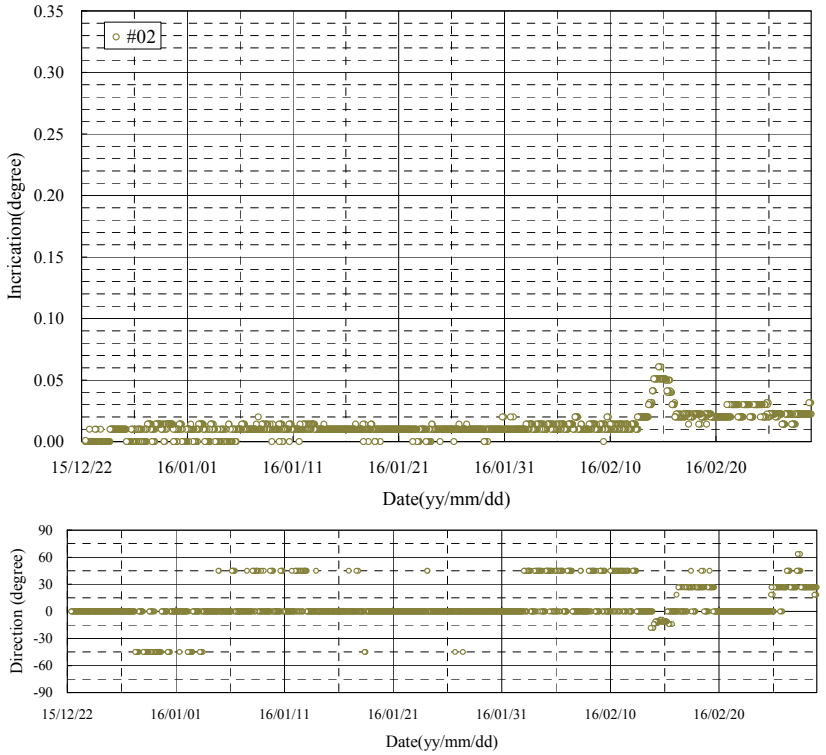
(2)強雨期間の傾斜データ特性

図-4.2 に観測開始から 2 月 29 日までの各傾斜計の経時変化を示し、**図-4.3** には観測開始からの各測点の傾斜方位と傾斜量を坑口法面等高線上に表したものである。**図-4.2** より明らかなように、2 月 13 日夜半頃から#01,#03,#05,#10-傾斜計の傾斜量が顕著に増大し、逆に#07-傾斜計は急激な低下を示した。

図-4.4 に示す#07 傾斜計の x,y-方向傾斜成分をみると、それまで大きく卓越して増大していた x-方向成分が、2 月 14 日 18:00 から 2 月 16 日 15:00 に掛けてθ_x = 0.11°からθ_x=0.00°に急落し、y-方向成分もθ_y = 0.02°からθ_y = -0.02°に低下している。これは、**図-4.3** に示されるように、傾斜方向が北西 30° から、斜面勾配とは逆の南東へ遷移したことを示す。

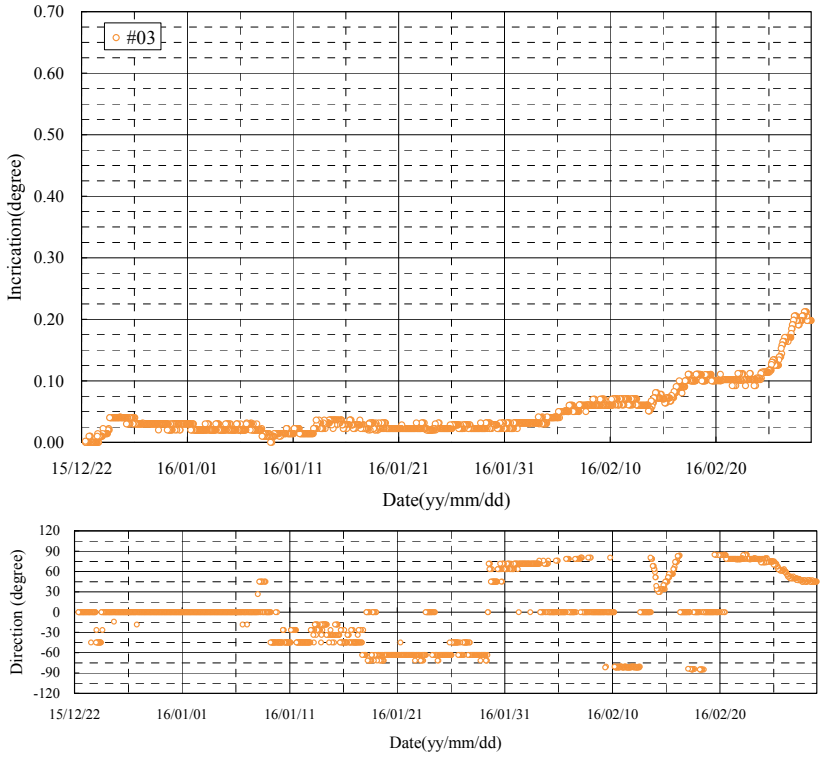


(a)#01-測点の傾斜量/傾斜方向

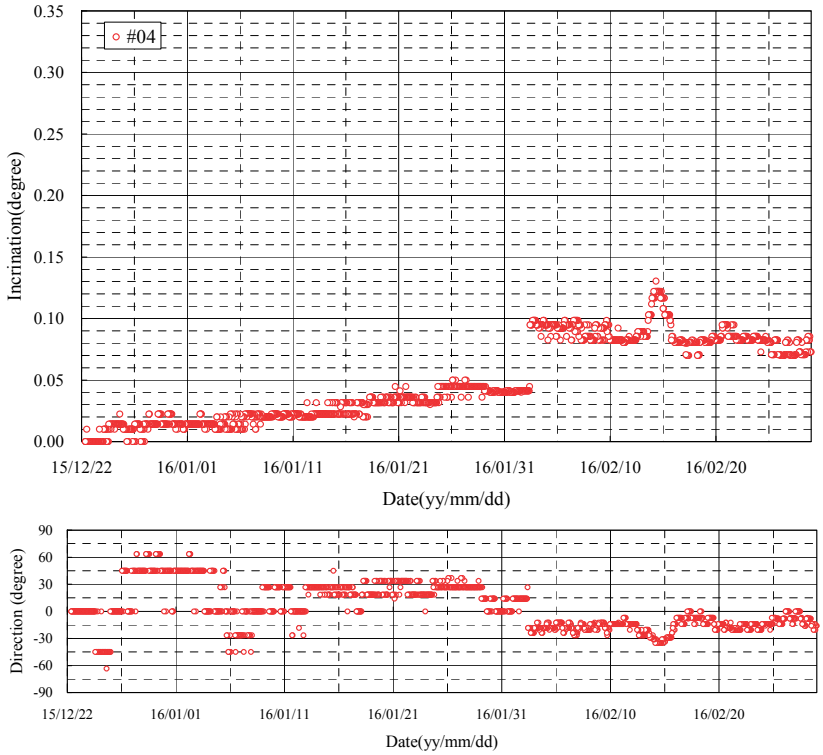


(b)#02-測点の傾斜量/傾斜方向

図-4.2 試験観測期間の傾斜量/傾斜方向経時変化(1)

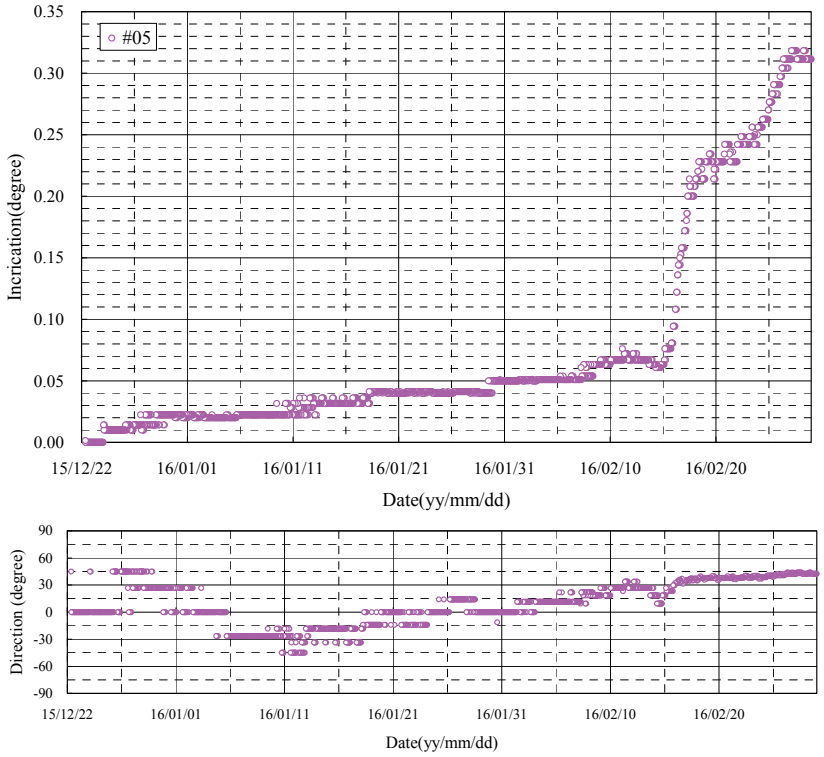


(c)#03-測点の傾斜量/傾斜方向

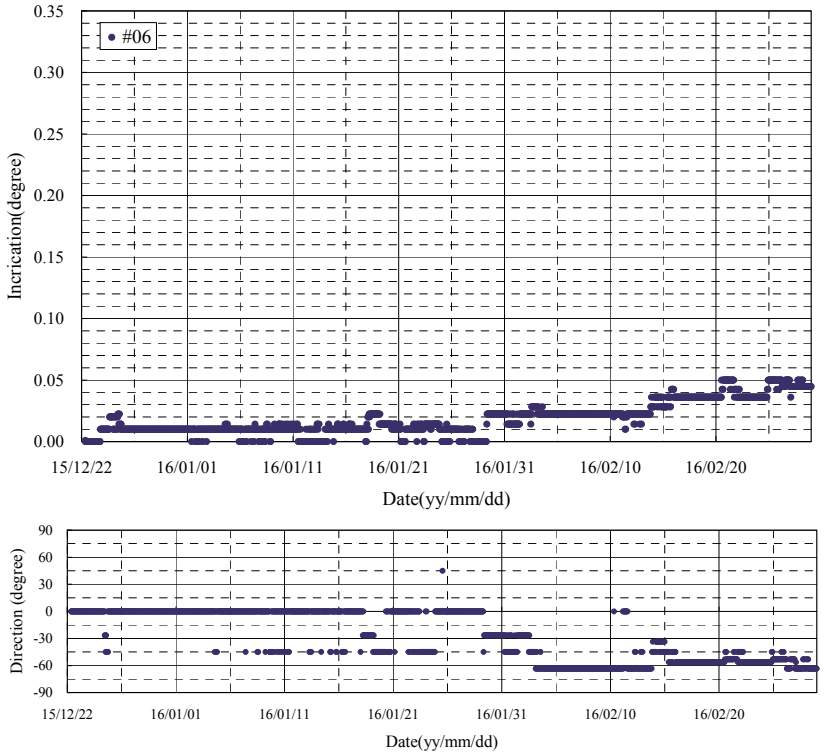


(d)#04-測点の傾斜量/傾斜方向

図-4.2 試験観測期間の傾斜量/傾斜方向経時変化(2)

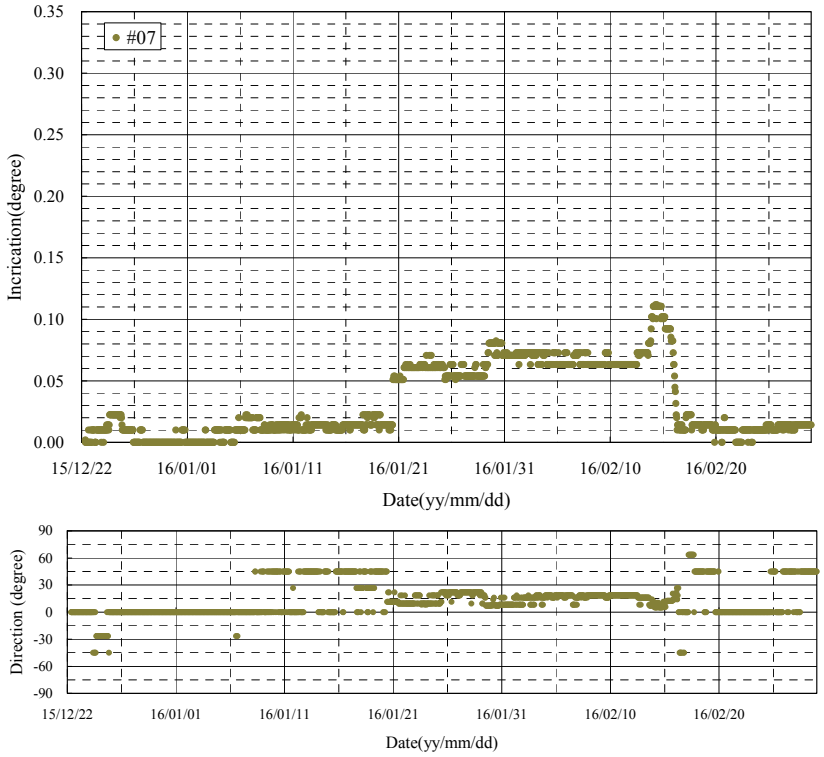


(e)#05-測点の傾斜量/傾斜方向

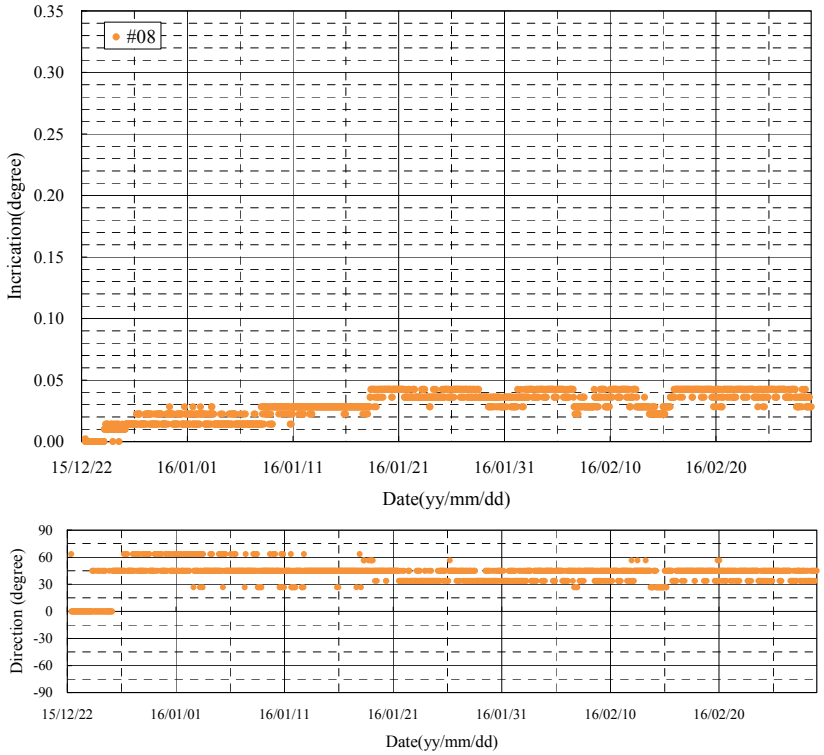


(f)#06-測点の傾斜量/傾斜方向

図-4.2 試験観測期間の傾斜量/傾斜方向経時変化(3)

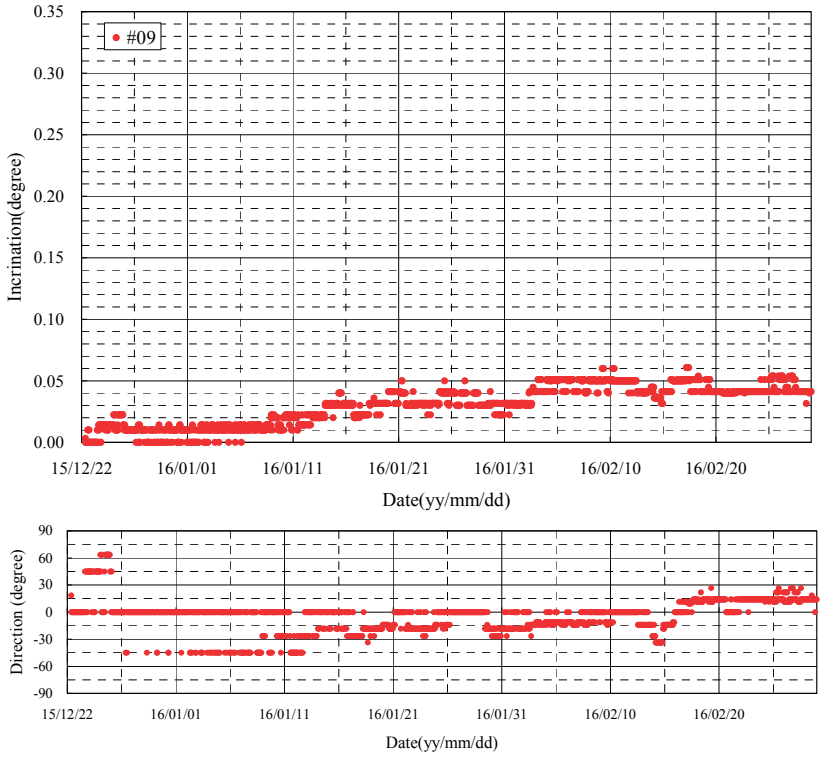


(g)#07-測点の傾斜量/傾斜方向

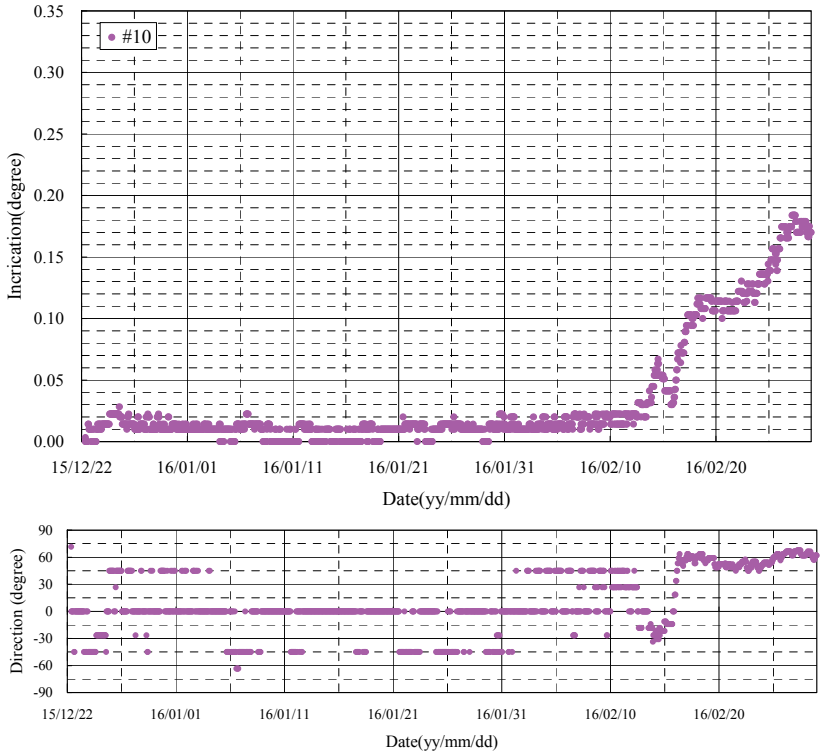


(h)#08-測点の傾斜量/傾斜方向

図-4.2 試験観測期間の傾斜量/傾斜方向経時変化(4)



(i)#09-測点の傾斜量/傾斜方向



(j)#10-測点の傾斜量/傾斜方向

図-4.2 試験観測期間の傾斜量/傾斜方向経時変化(5)

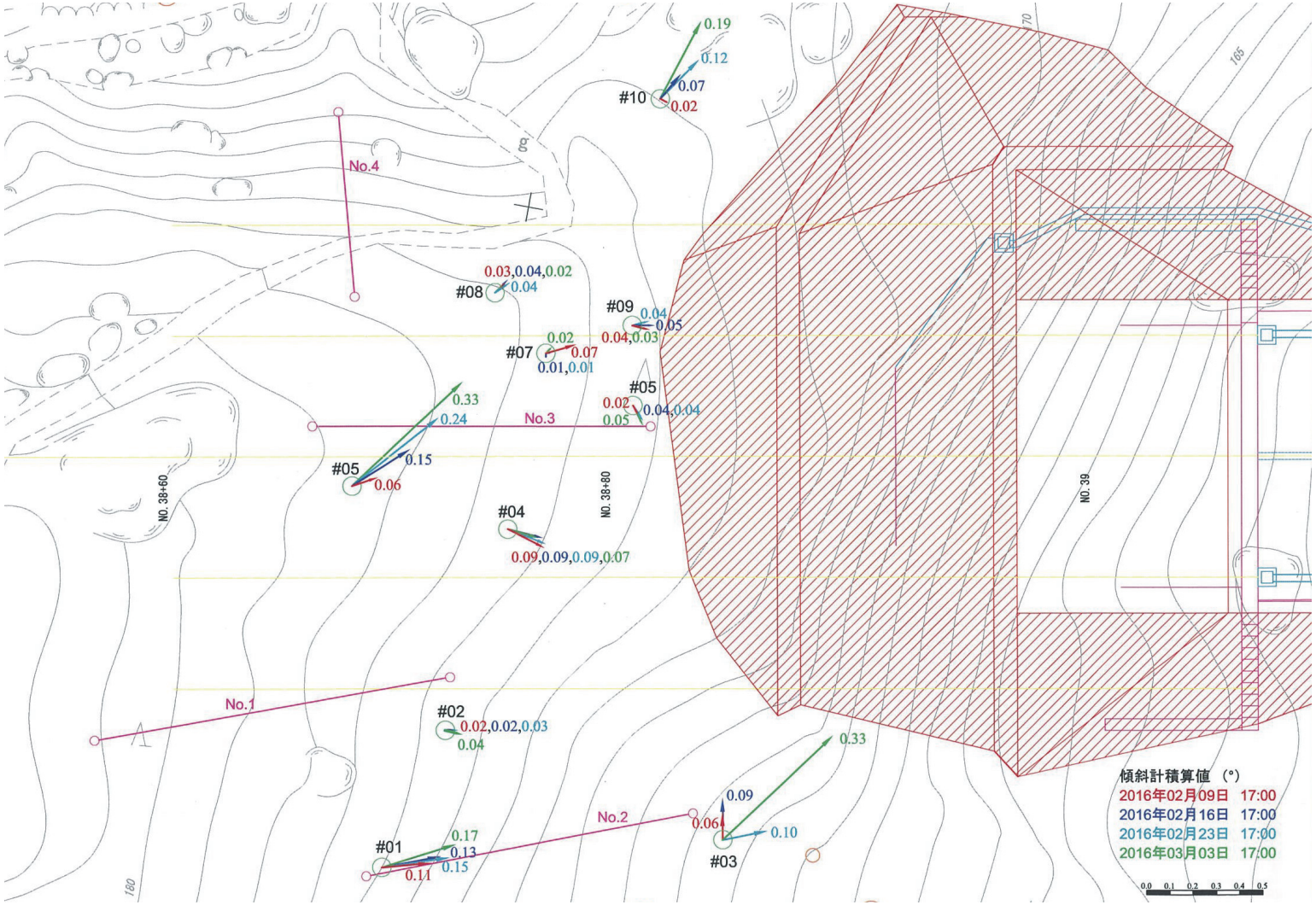


図-4.3 降雨に影響された斜面傾斜の発生分布

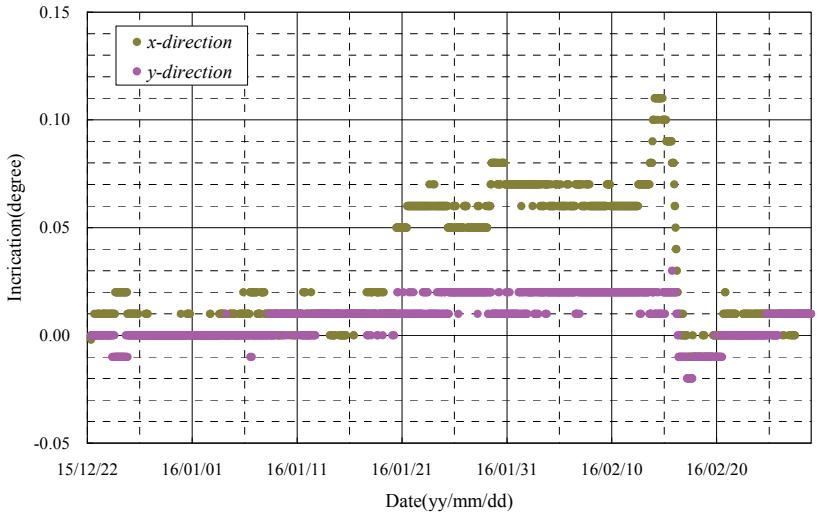


図-4.4 #07-傾斜計の *x,y*-方向傾斜成分経時変化

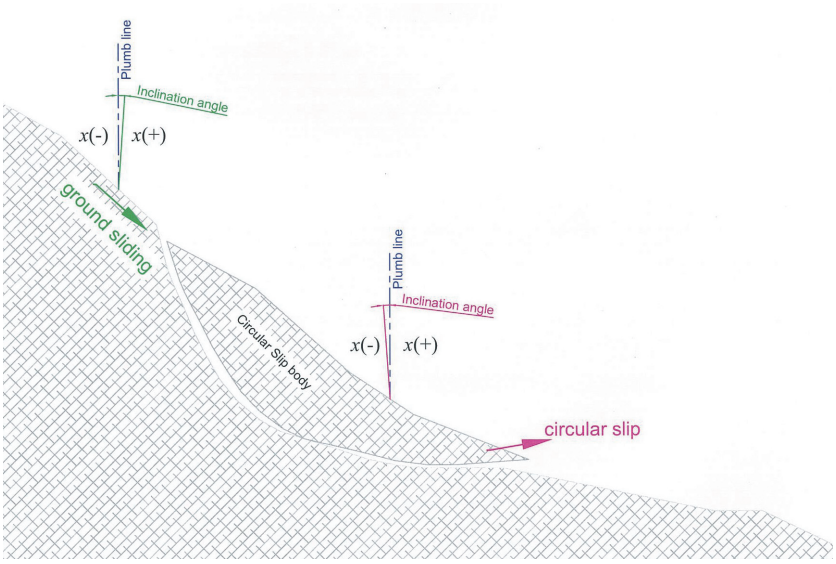


図-4.5 斜面すべり形態と地盤傾斜方位の模式図

#07-傾斜計のように、地面傾斜と逆方向への傾斜は**図-4.5** に模式的に示すように、円弧すべり土塊内に傾斜計が設置された可能性が高い。現状、近接する地盤伸縮計が有意な変形を示さないこと、および目視観察などでも斜面に変状・不具合が見られないことから、至って微小な円弧すべり挙動と判断される。このように、微小な変形挙動の段階で円弧すべりの徴候を把握し、これが今後の降雨により不安定化してゆくかを予測する手法を検討することが本節の主たる目的である。

最大の傾斜増大を呈する#05-傾斜計のデータを見ると、2016 年 2 月 14 日 7:00 にθ= 0.061°であった傾斜量が、2 月 26 日まで増大を続けたが、意向はθ= 0.311°程度で収束をみた。この間の傾斜方位は、**図-4.3** に示されるようにほぼ同一傾向であるが、徐々に北西方向に偏移し

ている。これは、*x*-方向成分だけでなく、*y*-方向傾斜成分も徐々に増大していることを示すものであり、傾斜方位が地形勾配に近づきつつあることが分かる。

このとき、#05,#07-傾斜計の近傍の傾斜計挙動を見ると、#06,#08,#09-傾斜計には 2 月 13 日以降も特異な挙動は見られないが、#04-傾斜計は、**図-4.2(d)**のように、2 月 13 日 15:00 から 2 月 14 日 05:00 にかけて傾斜方位がφ = 14.01°(北東方向)からφ = -34.99°に大きく偏移した後、2 月 16 日 02:00 にかけてφ = -7.15°まで復帰している。これは、**図-4.6** に示すように、降雨開始とともにx-方向成分θ_xが正方向に、若干、増大した後、復帰し、y-方向成分θ_yが負方向に大きく増大し、復帰したためである。この傾斜方向は**図-4.3** から分かるように、いずれも地形勾配に従う範囲内に収まっている。したがって、従って当該傾斜計の傾斜量が増大した後、復帰したのは、より大きな土塊が遅れて運動したために、観測地点の傾斜が相対的に減少したように推定される。

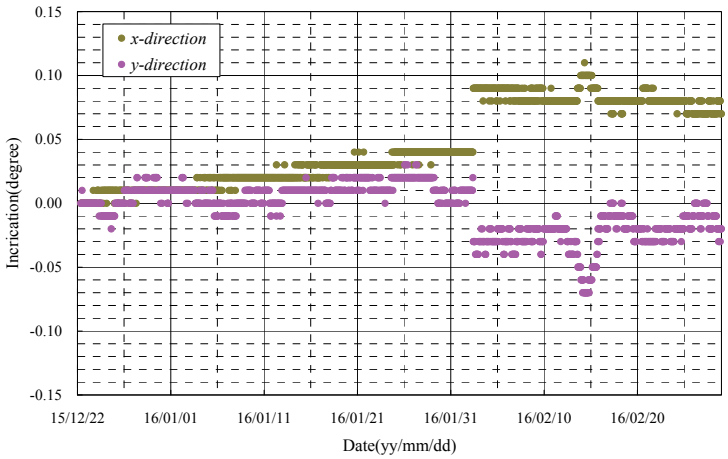


図-4.6 #04-傾斜計の *x,y*-方向傾斜成分経時変化

(3)傾斜量の降雨応答に関する考察

図-4.7 に、2016 年 1 月 1 日からの気象庁観測日雨量 Q_{day}[2]の変化を示す。図より明らかなように 2 月 14 日にはこの期間で最大の日雨量 Q_{day} = 82.0 *mm* を記録しているが、この他にも 1 月 18 日 Q_{day} = 61.5 *mm*、1 月 29 日 Q_{day} = 73.0 *mm*、および 2 月 14 日 Q_{day} = 60.5 *mm* と比較的多量の降雨が観測されている。しかしながら、**図-4.2** より明らかなように、いずれの傾斜計もこれらの降雨に対して明確な応答を示していない。

このため、1 月 17～1 月 19 日間、1 月 29～1 月 31 日間、および 2 月 13～2 月 15 日間の時間雨量を整理して**図-4.8** に示す[3]。図に示されるように、1 月 17～1 月 19 日間の最大時間雨量

[2]日雨量、24 時間雨量:ある時刻から 24 時間に降った雨の量を 24 時間雨量と呼ぶ。現在の気象庁の定義では 24 時間雨量のうち，ある日の 0 時から 24 時までの 24 時間雨量を日雨量としているが、気象庁以外ではある日の 9 時(午前 9 時)から翌日の 9 時までの 24 時間雨量を日雨量という場合が多い。

[3]時間雨量:ある時刻から 1 時間の間に降った雨の量を時間雨量と呼ぶ。1 時間雨量とも呼ばれる。時間雨量のうち、1:00-2:00、2:00-3:00，3:00-4:00 等のように、毎時 00 分を起点にした雨量を正時時間雨量または正時 1 時間雨量と呼ぶ。

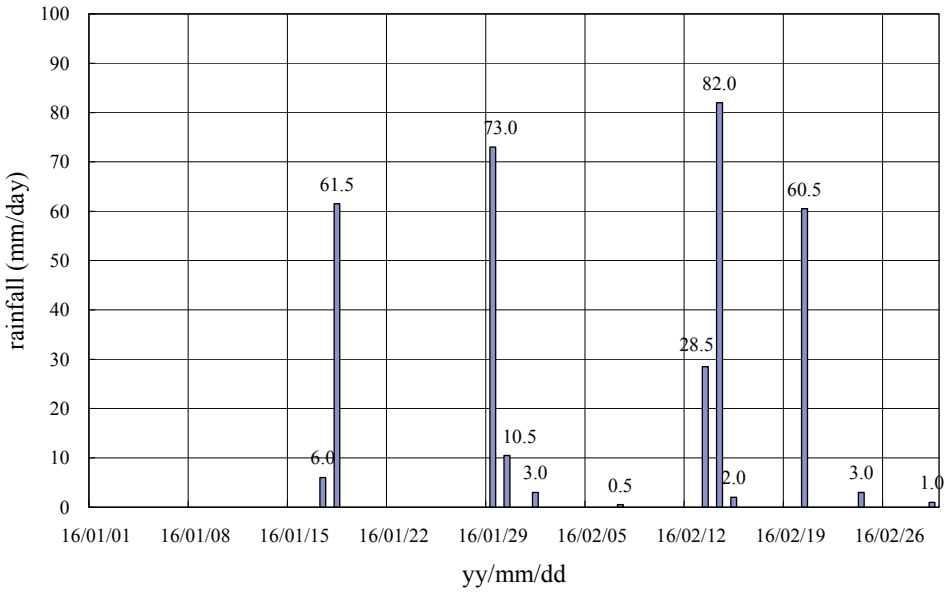
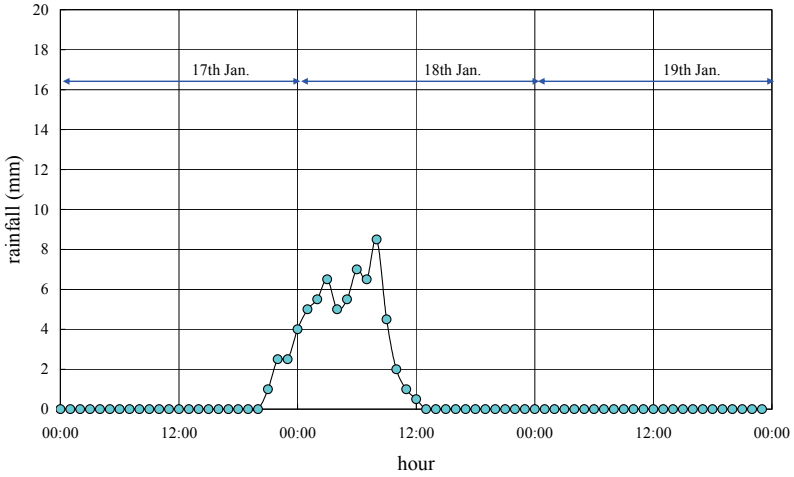


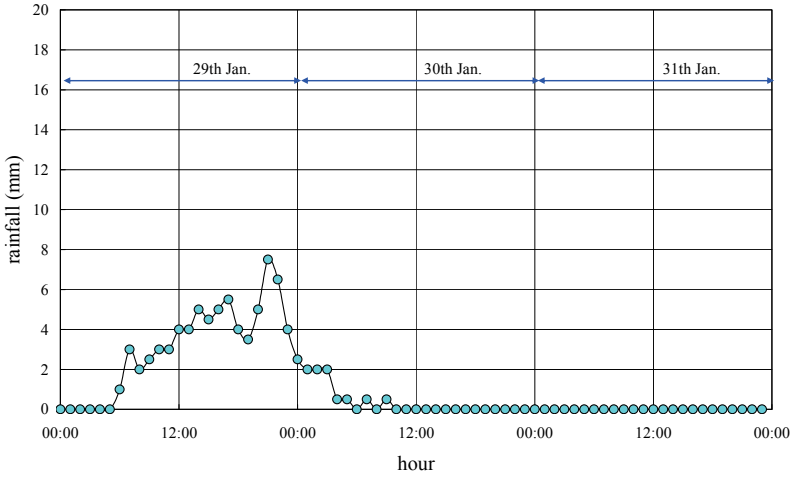
図-4.7 2016 年 1 月 1 日～2 月 29 日間の日降雨量

は Q_{hour} = 8.5 *mm*（1 月 18 日 08:00-09:00）、1 月 29～1 月 31 日間では Q_{hour} = 7.5 *mm*（1 月 29 日 21:00 -22:00）でしかないが、2 月 13～2 月 15 日間では 2 月 14 日 2:00-3:00 間に Q_{hour} = 14.5 *mm*、3:00-4:00 間に Q_{hour} = 13.5 *mm*、4:00-5:00 間に Q_{hour} = 14.5 *mm* と約 3 時間にわたって強い降雨があったことが確認される。

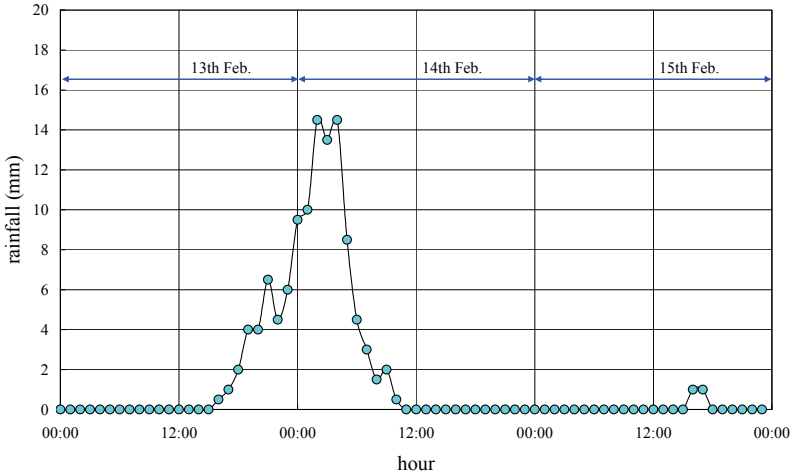
したがって、降雨が斜面挙動に影響を与えるには、降雨量だけでなく、降雨の強さも必要であると考えられる。降雨の強さを表す指標としては、降雨強度等も挙げられるが、降雨強度は瞬間的な雨の強さを 1 時間あたりに換算した雨量であり、斜面挙動との応答を見出すことは難しい。



(a) 2016 年 1 月 17～1 月 19 日間の時間降雨量経時変化



(b) 2016 年 1 月 29～1 月 31 日間の時間降雨量経時変化



(c) 2016 年 2 月 13～2 月 15 日間の時間降雨量経時変化

図-4.8 高日雨量前後の時間降雨経時変化

4.3 観測データのビッグデータ解析への適用に関する考察

字義の通り解釈すれば、ビッグデータの意味は、従来の情報化資源では管理、分析が困難なほどの大容量データを意味する。しかしながら、今日では累積データの絶対量的側面よりも、今日では、日々、膨大に生成・記録される時系列性、リアルタイム性を有するデータ群をビッグデータと呼ぶことが一般的である。

さらに、今まで膨大過ぎて処理できず、そのまま管理しきれないため見過ごされてきたそのようなデータ群を、リアルタイムで分析・処理することで、ビジネスや社会に有用な知見をフィードバックしたり、新たな仕組みやシステムを産み出す過程をも含めた概念としてビッグデータと呼ばれているようである。

Viktor Mayer-Schoenberger and Kenneth[3)]によれば、Big data 解析は'Not causality, but correlation'の一語で表され、事象の因果関係（メカニズム）ではなく、事象データ相互間の相関関係に着目した分析手法である。さらに、彼らはデータの質と量に関する考察も行い、データの信頼性が高い少数のデータ群よりも、たとえ個々のデータの信頼性が低く、データ採取上の誤りや測定上のバイアスが含まれるとしても、データ量が膨大であるほど、その相関関係は明瞭となると主張している。

以上より、**第２章**において設営した試験観測網が生成するデータ量は、その観測点数が 10 点にしか過ぎず、また測定頻度も 1 時間に 1 回であることから、そのデータ量は、従来の、Big data 解析に供するには余りにも不十分に思われる。そこで、Big data 手法の適用には不十分なデータ量であっても、観測より得られたデータに工学的な知見を基に分析を加えることで、観測データを実務にフィードバックし得る数理科学的手法を模索した。

(1) Deep learning とその展開

近年、Big data の分野で注目を集める Deep Learning は、機械学習の一種である Neural network を用いた、人工知能技術の総称であり、主として多層パーセプトロンの最新手法全般を指す用語とされる。今日、広く知られるように、Neural network は脳の神経伝達過程を模倣したモデルで、**図-4.9** のように、入力層、隠れ層、出力層の 3 種類の層から成り、入力に対して単純な変換を何回も繰り返えすことで予測結果等を出力する構造を形成している。**図-4.9** において隠れ層が深い構造、すなわち何層も重なる構造が学習精度を向上させることが明らかとされており、特に 4 層以上の隠れ構造は Deep learning と呼ばれている。

1986 年に隠れ層を持つ Neural network を高速に学習する「誤差逆伝播法（back propagation）」と呼ばれる学習方法がアメリカの心理学者 David E. Rumelhart らによって発見されると、Neural network は多くの研究者の注目を集めた。しかしながら、当時の情報環境では深い隠れ層を学習し、実務的な精度を得ることはできなかった。理論上は十分な予測精度が期待されたが、深い隠れ層を学習するに足るデータが得られず、得られたとしてもこれを実務に供し得る速度で処理し得る計算資源も整備されていなかった。しかし、2000 年代後半になると、ネット社会の進展に伴い、各種分野で各種構造のデータが爆発的に増大し、Moore の法

則に従う演算資源の級数的な発達も伴い、有意な深い隠れ層の学習が可能となり、Deep learning という用語も現れ始めた。

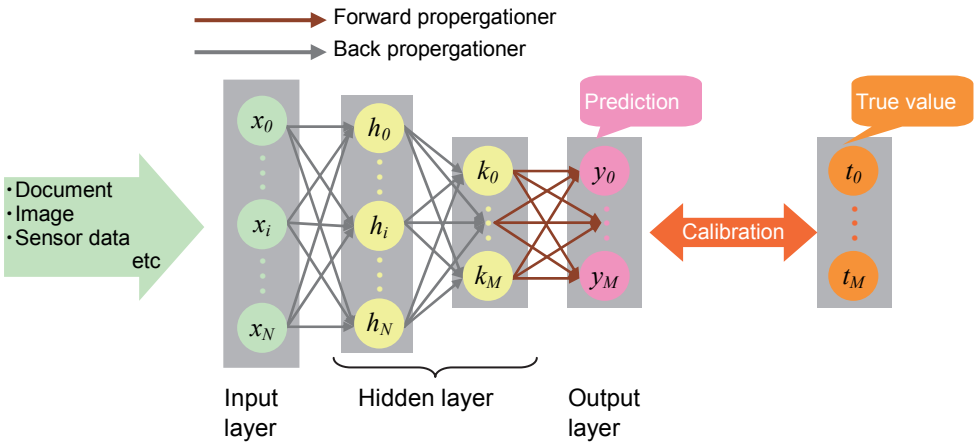


図-4.9　典型的なニューラルネットワークである多層パーセプトロン構造

Deep learning という言葉が使われ始めたのもこの頃からであり[4)]、2012 年にはその圧倒的な精度を示す出来事が起こった[5)]。すなわち、画像認識コンテスト「ILSVRC（ImageNet Large Scale Visual Recognition Challenge）[6)]」で、Hinton 教授らのグループが Neural network を用いた supervision という手法で、1 年前の優勝記録の誤り率 25.7%から 15.3%へと 4 割も削減し圧勝した。2014 年 8 月から約半年の間に、Google、Microsoft、Baidu 等は、同じ Neural network を用いた手法で次々に精度を構造させ、2015 年に Google の報告した 4.9%にまで達し、人間の認識精度を甘く評価した誤り率 5.1%を既に超えたともされる[5)]。

ここでは、その精度の高さにではなく、それを達成した方法に着目しよう。通常、機械学習で何らかの課題を学習しようとするとき、入力データにアルゴリズムを適用する以前に、「特徴抽出」と呼ばれる操作が必要となる。特徴抽出とは動画像や文章などの膨大で非定型な入力データから予測に大きな影響を与えると考えられる特徴を取り出す作業であり、学習精度を向上させるには、入力データの性質や課題の内容を反映した特徴抽出の方法が重要となる。このため、問題ごとに特徴抽出方法を人間が選択するのが常識であり、入力データや課題に応じた特徴抽出の手法やノウハウが蓄積される。

ところが、Deep learning では特徴抽出がアルゴリズムに組み込まれ、抽出すべき特徴の選択自体も機械に学習させる。例えばヒントン教授らの supervision では入力画像には最低限の前処理のみを行い、各ピクセルの画素値をそのまま Neural network に与えていた[5)]。このように特徴抽出までを含む学習過程が可能となるのは、4 層を大きく超える隠れ階層と、これを有意な精度で学習し得る膨大なデータの存在と、その演算処理資源が整備されるからである。

翻って、地盤工学の実務の場における発生データ量を考えると、われわれが**第 2 章**で設営した数千倍の観測網が設営されたとしても、特徴抽出を含む学習過程を所要の精度で完遂

しえるデータ量が累積されるとは考えられない。また、これを処理し得る演算資源の整備を地盤工学実務の場で期待することも難しいであろう。

現在、Deep learning が実用されている分野は、音声認識能等の学習に供し得るデータ量が無限に近い分野に限定されており、十分な発生データ量を期待できない工学分野では、データ有効活用のための手法を、その分野における工学的知見を援用して、独自に開発することが望まれると考える。

(2)工学的知見や観察を基にした教師パターンの設定と Neural network への展開

板倉らは、ロータリー削岩機のトルク分布から、削孔対象の地質構造を Neural network により推定する手法を提案した[7),8),9)]。すなわち、ロータリー削岩機のトルク分布パターンと岩盤強度分布（空隙を含む）との間に**図-4.10** のような関係を予め設定し、ロックボルト孔削孔時に得られるトルク分布パターンが、そのいずれに属するかを Neural network の手法により同定することで、削孔対象岩盤の強度分布や割れ目の分布を推定しようとするものである。

図-4.10 において、(1)は強度の異なる岩盤境界でのトルク分布パターンを、(2)は空隙を挟んで強度が異なるパターンを、また(3)は同じ強度の岩盤中に空隙が存在するパターンをそれぞれ示し、さらに(4),(5),(6)はそれらが一定の勾配を持って変化するパターンを示す。**図-4.11** は、この商法から推定された坑道天盤の地質構造の例を示す。図中の平面は強度の違いから推定された層境界を、また球は推定される空隙位置をそれぞれ示す。球半径は推定される空隙寸法を示すものである。なお、空隙の連続性までは、本手法では同定できない。

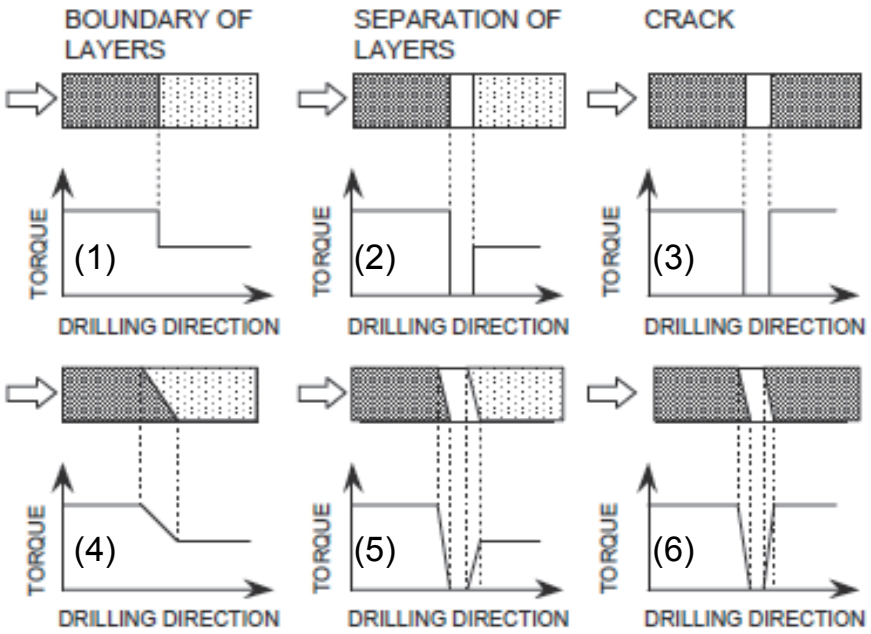


図-4.10 Neural network の教師パターンに与えたトルク分布パターン[7),8),9)]

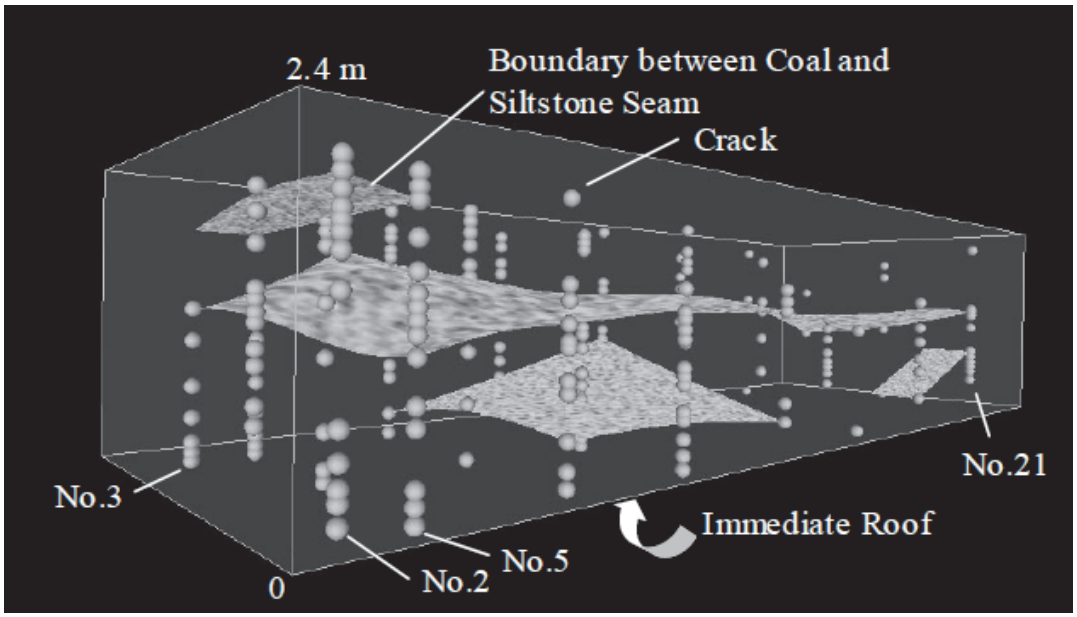
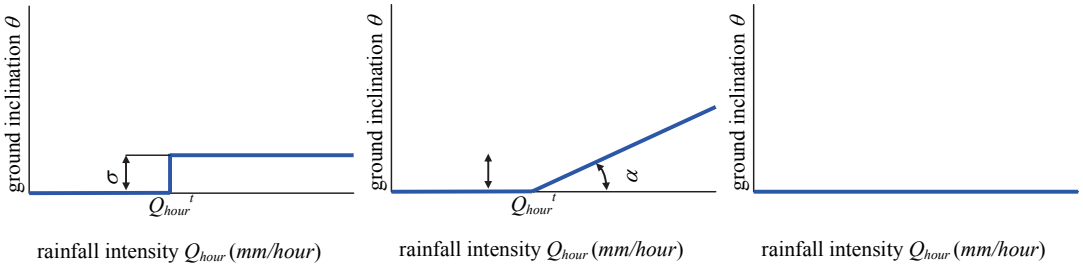


図-4.11 予め規定された教師パターンで Neural network による推定された地質構造[8),9)]

このように、工学的な知見から蓋然性の高いデータ・パターンを予め規定することは「特徴抽出」の一手法に属すると考えるが、本来であれば学習過程で特徴抽出により同定されるデータ・パターンを予め与えることにより、学習過程が大幅に軽減されることが予想され、比較的小さなデータ採取量で実務へのフィードバックが可能となることが予想される。



(a) pattern I　　(b) pattern II　　(c) pattern III

図-4.12 観測データより定義される降雨強度 Q_{hour} と地盤傾斜 θ の相関パターン

今、気象観測データから斜面傾斜を上記 Neural network 手法を用いて予想する問題を考える。このとき、**図-4.2**、4.8 から得られた地盤傾斜量 θ と降雨強度 Q_{hour} の相関を基に、**図-4.12** に示す 3 つの相関パターンを試験的に考えた。**図-4.12(a)**は一定の降雨強度 $Q_{hour}{}^{t}$ に達すると地盤が $\theta = \sigma$ だけ傾斜するパターンであり、#01,#03,#07-測点がこれに当たる。#07-測点は、**図-4.2** に示されるように、降雨強度 Q_{hour} が一定値に達すると、傾斜量が減少しているが、σ が

負の値となるだけで別個の相関パターンを設定する必要はない。また、図-4.12(b)は一定の降雨強度 $Q_{hour}{}^{t}$ に達すると地盤が$\theta = \sigma$だけ傾斜するパターンであり、#05,#10-測点のように後続の降雨に傾斜が影響されるデータがこれに当たると考える。さらに、図-4.12(b)は、降雨強度に影響されない観測点をモデル化したものである。

このような単純な相関パターンを、降雨以外にも斜面傾斜挙動を支配すると考えうる諸要因、例えば地震強度やトンネル屈伸などについても整理し、各要因毎に Neural network を利用して、その応答予測を行えば、それぞれの要因が与える傾斜量の一次結合により斜面傾斜予測が可能になると考える。

以上を整理すると、音声認識のように無限のサンプルデータが得られることを前提とした Deep learning のような Big data 手法の適用は、地盤観測データへの適用は困難である。一方において、Deep learning は基本的にパターン認識手法であり、これに膨大なデータ量が要求されるのは、データ群が内包する相関パターンを同定し、教師パターンを設定する必要からである。したがって、工学的な知見を援用して教師パターンを、予め設定することが可能であれば、各種数異論に必要なデータ量は著しく小さなものでよい。今回の、試験観測網から得られたデータを検証すると、少なくとも量で地盤傾斜と降雨強度に関しては単純な教師パターンの設定が可能であると判断できた。

わが国が、不安定な地すべり地形を多く抱える以上、今後も斜面観測網の整備は進んで行くものと思われる。観測網の整備には、多大な費用と労力が必要であるが、その運用にも多大な負荷が生じる。すなわち、技術者が、常時、観測データを分析・評価しなければ、いたずらに観測データが累積するだけで、社会へのフィードバックが行われないまま、地盤災害が召致される。しかしながら、全国に設置された地盤観測網を 24 時間監視することは、非現実的であり、これを実施しえる予算も技術者も確保することはできないであろう。このような、理由から AI 等による地盤観測データの自動評価の実現が望まれている。今回の試験観測により、その小さな可能性を見出せたものと考える。

参考文献

1) 厚生労働省：重症急性呼吸器症候群（SARS）関連情報、http://www.mhlw.go.jp/bunya/kenkou/kekkaku-kansenshou05/03.html、2004.
2) World Health Organization (WHO): Laboratory confirmation of a SARS case in southern China - update 2, http://www.who.int/csr/don/2004_01_05/en/, 2004.
3) Mayer-Schoenberger, V. and C.Kenneth: Big Data -A Revolution That Will Transform How We Live, Work and Think.-, Cukier, John Murray, 2013.
4) Hinton, J.E., S.Oshindero, Y.W.Ther: A first learning algorithm for deep belief nets, Neural Computation, Vol.18, pp.1527-1554. 2006.
5) 大野健太：統計・分析を極める、【連載第 1 回】ニューラルネットの歩んだ道、ディープラーニングの登場で全てが変わった-ディープラーニングのビジネス活用を探る（1）-、

http://business.nikkeibp.co.jp/article/bigdata/20150419/280107/?P=2、2015.

6) Krizhevsky, A., I.Sutskever and G.E.Hinton: Imagenet classification with deep convolutional neural networks, In F. Pereira, C.J.C. Burges, L. Bottou and K.Q. Weinberger editors, Advance in Neural Information Processing System, Vol.25, pp.1097-1105, Curran Associates, Inc., 2012.

7) 板倉賢一、岡野成敏、山地宏志：情報化によるトンネル施工法及び支保工の最適化に関する研究報告書、平成 12 年度財団法人先端建設技術センター研究開発助成報告書、助成番号 1204、2001.

8) Itakura, K., T.Goto, Y.Yoshida, S.Tomita, S.Iguchi, Y.Ichihara and P.Mastalir: Portable Intelligent Drilling Machine for Visualizing Roof-rock Geostructure, Rockbolting in Mining & Injection Technology and Road Support Systems, Proc. of Aachen International Mining Symposia, pp.597-609, 2008.

9) Itakura, K., K.Stato, G.Deguchi, T.Goto, Y.Ichihara and H.Yoshida: Visualization of Geostructure by Mechanical Data Logging of Rockbolt Drilling and its Accuracy, Proc. of 20th International Conference on Ground Control in Mining, pp. 184-190, 2001.

5. Kriging による広域分布推定

5.1 Kriging と観測データ分布推定のための定式化 [1),2),3),4)]

(1)地域化変数理論とバリオグラム

一般に、工学データは時空間データ（spatio-temporal data）として定義される。すなわち、対象空間の時間の推移とともに様々な地点において実験や観測によって採取されるデータ（spatio-temporal data）である。これらのデータの空間分布は、一般に、その空間的変動が余りに不規則で、局所的な集中も認められるため、滑らかな数学モデルでは、これを適切に評価することが難しく、確率論的アプローチが適切である場合が多い。そこで、現象を単純な確定的関数で記述するのではなく、確率論的枠組みの中で取り扱う“地域化変数の理論（theory of regionalized variables）”が成立した [1),2)]。

多くの科学分野で採取されるデータのほとんどは時空間データ（spatio-temporal data）である。すなわち、時間の推移とともに様々な地点において観測されるデータである。いま、領域 D 内にある観測地点 i の空間座標は（x_i,y_i,z_i）で示されるから観測地点はこれらのベクトル $\mathbf{x}_i$ により表現できる。したがって、観測地点 xi における観測値 z は、以下のように関数表記される。

$$z(x_i) \qquad i = 1,2,\cdots,n \tag{5.1}$$

ここで、領域 D 内の観測地点を無限に設けることを考える。すなわち、式(1)において、$i\to\infty$ とすると、次式のように地域化変数が定義される [3),4)]。

$$z(\mathbf{x}) \qquad x \in D \tag{5.2}$$

このデータ集合$\{z(\mathbf{x}_i),\ i=1,2,\text{---},n\}$は観測地点の観測値の集合であり、領域 D が確率場であるとすれば、標本値 $z(\mathbf{x}_i)$は、確率変数 $Z(\mathbf{x}_i)$から導かれたことになる。

いま、確率場 $\{Z(\mathbf{x}) : \mathbf{x} \in D\}$ が、任意の $\mathbf{h}$ に対して以下の 2 条件を満たすとき、

$$\begin{aligned} &E\left[Z(\mathbf{x}+\mathbf{h}) - Z(\mathbf{x})\right] = 0 \\ &E\left[\left\{Z(\mathbf{x}+\mathbf{h}) - Z(\mathbf{x})\right\}^2\right] = 2\gamma(\mathbf{h}) \end{aligned} \tag{5.3}$$

$\{Z(\mathbf{x})\}$を固有定常確率場（intrinsic stationary random field）と呼び、$2\gamma(\mathbf{h})$をバリオグラム（variogram）と呼ぶ。地域化変数の理論では、変数の空間的変動が、3 つの成分の和で表現できると仮定される。すなわち、

$$Z(x) = m(\mathbf{x}) + \varepsilon'(\mathbf{x}) + \varepsilon''(\mathbf{x}) \tag{5.4}$$

ここで、$m(\mathbf{x})$は $\mathbf{x}$ における構造成分を記述する関数であり、領域 D 内において等しい定数

値を取る。また、$\varepsilon'(\mathbf{x})$は空間的に相関している確率成分を、$\varepsilon''(\mathbf{x})$はノイズ（残留誤差）項をそれぞれ示す。なお、ノイズ項$\varepsilon''(\mathbf{x})$は、領域 D 内において等しい期待値と分散値を持つ。

いま、距離ベクトル **h** だけ離れた 2 地点 **x** と **x**＋**h** 間の差の平均は、式(5.3)の関係から以下のようになる。

$$E\left[Z(\mathbf{x}+\mathbf{h})-Z(\mathbf{x})\right]=0 \tag{5.5}$$

さらに、差の 2 乗の平均（すなわち分散）は次のように地点間の距離|**h**|にのみ依存すると仮定する

$$E\left[\left\{Z(\mathbf{x}+\mathbf{h})-Z(\mathbf{x})\right\}^2\right]=E\left[\left\{\varepsilon'(\mathbf{x}+\mathbf{h})-\varepsilon'(\mathbf{x})\right\}\right]=2\gamma(|\mathbf{h}|) \tag{5.6}$$

したがって、地域化変数から定義される確率変数 $Z(\mathbf{x}_i)$は、固有定常確率場である。一方、定常確率場（weakly stationary random field）[1]は固有定常確率場であるから、次の等式が成り立つ。

$$E\left[\left\{Z(\mathbf{x}+\mathbf{h})-Z(\mathbf{x})\right\}^2\right]=Var\left[Z(\mathbf{x}+\mathbf{h})\right]+Var\left[Z(\mathbf{x})\right]-2Cov\left[Z(\mathbf{x}+\mathbf{h}),Z(\mathbf{x})\right]=2\left\{C(\mathbf{0})-C(\mathbf{h})\right\} \tag{5.7}$$

式(5.7)において、Var[ ]は分散を、Cov[ ]は共分散（covariance）、さらに C[ ]は自己共分散（autocovariance）を示し、それぞれ次のように定義される。

$$\begin{aligned}
&Var[Z]=E\left[\{Z-E[Z]\}^2\right]\\
&Cov[Z_1,Z_2]=E\left[\{Z_1-\mu_{Z1}\}\{Z_2-\mu_{Z2}\}\right]\\
&C[\mathbf{h}]=Cov\left[Z(\mathbf{x}+\mathbf{h}),Z(\mathbf{x})\right]=Cov\left[Z(\mathbf{h}),Z(\mathbf{0})\right]
\end{aligned} \tag{5.8}$$

式(5.3)、(5.7)より、バリオグラムは、次式のように示すことができる。

$$\gamma(|\mathbf{h}|)=C(0)-C(|\mathbf{h}|) \tag{5.9}$$

式(5.9)において、|**h**|→∞で、C(|**h**|)→0 であるとき、

---

[1] 確率場 $\{Y(s):s\in K^d\}$ が、次の 2 条件を満たすとき（弱）定常確率場という。
(1)期待値は s に依存せず一定の値を取る。
(2)共分散はベクトル差 t-s のみに依存し、$C(t\text{-}s)=\mathrm{E}[Y(t)Y(s)]$, $t,s\in K^d$ となる。

$$\lim_{|\mathbf{h}|\to\infty} \gamma(|\mathbf{h}|) = C(0) \tag{5.10}$$

となる。これは、距離ベクトル h が十分離れた 2 地点 **x** と **x**＋**h** 間のバリオグラムは自己共分散 C(0)に収束することを示すものである。一方、式(5.9)において|**h**|→0 のとき、C(|**h**|)→0 ならば、

$$\lim_{|\mathbf{h}|\to 0} \gamma(|\mathbf{h}|) = 0 \tag{5.11}$$

の関係が得られるが、実際のデータから推定したバリオグラムは、$\gamma(h)\to c_0(>0)$となることが報告されており、この現象をナゲット効果（nugget effect）と呼ぶことから、定数 c_0 はナゲット効果と命名された。

この効果には、二つの解釈が与えられている。一つは、実際のデータ解析では|**h**|が、ある閾値より小さいときバリオグラムは測定できないが、その閾値よりミクロなスケールの確率場が存在するという解釈であり、他方は測定誤差によって生じる影響という解釈である [5)]。

いずれの解釈が正しいにせよ、このような不連続性は式(5.4)のε'(**x**)項を分散が c_0 であるホワイトノイズとする統計モデルにより表現できる。いま、観測値集合{Z*(**x**)}のセミバリオグラムおよび共分散関数をγ*(|**h**|),C*(|**h**|)とすると、式(5.4)、(5.8)、(5.9)より、

$$\gamma^*(|\mathbf{h}|) = \begin{cases} 0 & |\mathbf{h}| = 0 \\ \gamma(|\mathbf{h}|) + c_0 & |\mathbf{h}| \neq 0 \end{cases} \tag{5.12}$$

$$C^*(|\mathbf{h}|) = \begin{cases} 0 & |\mathbf{h}| = 0 \\ C(0) + c_0 & |\mathbf{h}| \neq 0 \end{cases} \tag{5.13}$$

となる。

式(5.12)、(5.13)において、$\gamma(|\mathbf{h}|)\to c_0$（|**h**|→0）であるから、|**h**| = 0 において不連続となることに注意が必要である。なお、γ(|**h**|)はセミバリオグラムと呼ばれ、バリオグラムは 2γ(|**h**|)と表記されなければならない。バリオグラムとセミ張りグラムは一般に混同されることが多いが、本稿では可能な限り、バリオグラムとセミバリオグラムの呼称と表記を峻別する。

横軸に距離|**h**|を、縦軸にセミバリオグラムγ*（|**h**|）を取ったグラフ上に、観測値から得られたこれらの値をプロットすると、**図-5.1** のようなバリオグラム雲（variogram cloud）が得られる。**図-5.1** から分かるように、バリオグラム雲の分布は、距離|**h**|が増大するに伴い観測値の相違度を示すセミバリオグラムγ*（|**h**|）も大きくなる。すなわち、分散も大きくなる。しかしながら、ある値以上の距離になると、セミバリオグラムγ*（|**h**|）は変化せず水平となる。これは、シル（sill）として知られ、式(11)で与えられるように全体の自己共分散 C(0)と同一である。

一般的に、セミバリオグラム$\gamma^*(|\mathbf{h}|)$は**図-5.1** 中の緑の曲線のように近似でされ、セミバリオグラム$\gamma^*(|\mathbf{h}|)$が定常状態（シル）になる距離、すなわち自己相関がなくなる距離をレンジRと呼ぶ。なお、シルSは、レンジRに対するセミバリオグラム値である。また、切片は前述のナゲット効果で与えられる。したがって、セミバリオグラム$\gamma^*(|\mathbf{h}|)$は、次式で表すことができる。

$$\gamma^*(|\mathbf{h}|) = b_0 + b_1 g(|\mathbf{h}|) \tag{5.14}$$

式(5.14)において、b_0 はナゲット分散を示し、b_0+b_1 はシルに等しくなる。また、$g(|\mathbf{h}|)$は共分散関数である。

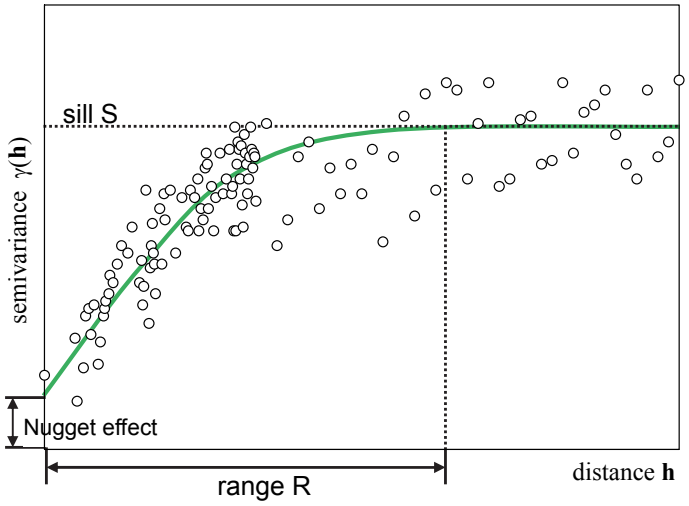


図-5.1 バリオグラム雲

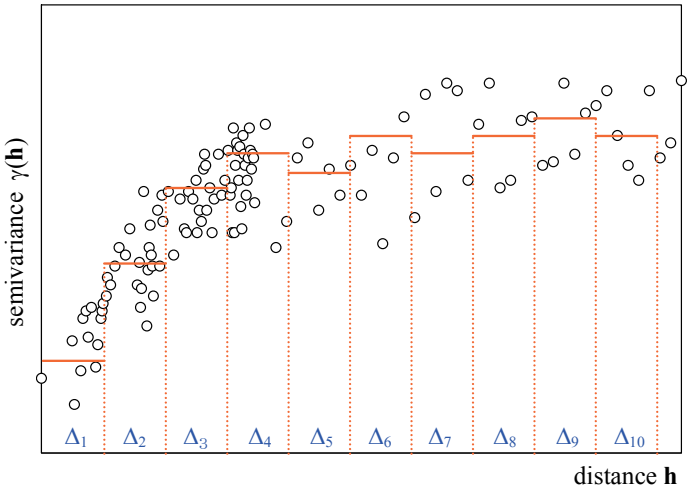


図-5.2 実験的バリオグラムの分割例

このセミバリオグラムを同定する方法として、経験的バリオグラム法と理論バリオグラムの二つの方法が知られている。経験的バリオグラムは、**図-5.2** のようにベクトル距離|h|を、いくつかの区間（class）に分割し、各区間の共分散の平均からバリオグラムを求める手法である。

一方、式(5.14)中の共分散関数 $g(|\mathbf{h}|)$を、さまざまな理論的な分布モデルを当てはめる手法を理論的バリオグラムと呼び、以下のような、ナゲット効果モデル、球形（spherica1）モデル、指数モデル、ガウスモデル等の共分散関数モデルが Kriging にはよく用いられる。

ナゲット効果モデル

$$g(|\mathbf{h}|) = \begin{cases} 0 & |\mathbf{h}| = 0 \\ 1 & |\mathbf{h}| \neq 0 \end{cases} \tag{5.15}$$

球形モデル（$R = a$）

$$g(|\mathbf{h}|) = Sph\left(\frac{|\mathbf{h}|}{a}\right) = \begin{cases} 1.5\left(\frac{|\mathbf{h}|}{a}\right) - 0.5\left(\frac{|\mathbf{h}|}{a}\right)^3 & |\mathbf{h}| \leq a \\ 1 & |\mathbf{h}| > a \end{cases} \tag{5.16}$$

指数モデル（$R = a$）

$$g(|\mathbf{h}|) = 1 - \exp\left(\frac{-|\mathbf{h}|}{a}\right) \tag{5.17}$$

ガウスモデル（$R = a$）

$$g(|\mathbf{h}|) = 1 - \exp\left(\frac{-|\mathbf{h}|^2}{a^2}\right) \tag{5.18}$$

図-5.3 は、球形モデル、指数モデル、およびガウスモデルの変化の状況を示した図であり、セミバリオグラムが直線的に増大し、定常に至る問題には球形モデルが、また滑らかなセミバリオグラムの増大には指数関数が適していることが理解できる。なお、当然のことながら、ナゲット効果モデルは、$|\mathbf{h}| = 0$ において$\gamma(|\mathbf{h}|) = 0$ となる以外は、距離に係らず$\gamma(|\mathbf{h}|) = 1$ となるモデルとして描画される。

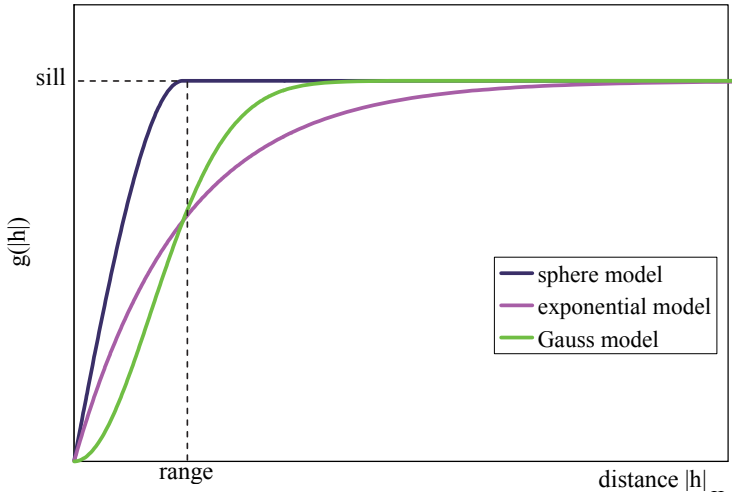


図-5.3 共分散関数モデル（球形モデル、指数モデル、ガウスモデル）

(2)Kriging による空間データ推定

Kriging とは、様々な地点で観測された値を用いて、他の地点の値を予測する手法である。南アフリカの鉱山技師 Krige（1951）が実際のデータ解析に応用したことに因んで命名された[4)]。Kriging では、**図-5.4** に模式的に示すように、ある領域 D 内にある n 個の地点 $\mathbf{x}_i(i=1,2,\cdots n)$において、観測値 $z(\mathbf{x}_i)$が得られているとき、観測値のない任意の地点 $\mathbf{x}_o$ における変数 Z の推定値 $z^*(\mathbf{x}_0)$が、既知の観測値の線形和として推定できると仮定する。すなわち、

$$Z^*(\mathbf{x}_0) = \sum \omega_i Z(\mathbf{x}_i) \qquad (5.19)$$

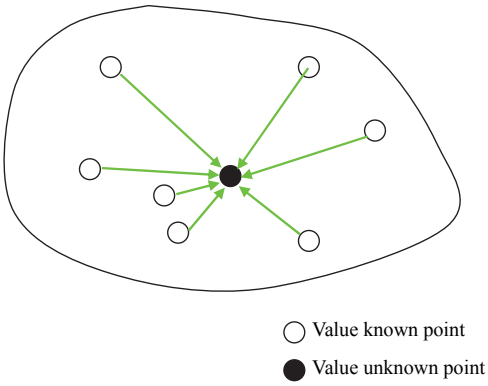


図-5.4 領域 D におけるデータ観測点とテータ推測点

ただし、ω_i は重みで、その合計は 1 になる。Kriging が通常の重み付き移動平均法と異なる点は、重みに観測値から得られたバリオグラムを利用する点にある。

すなわち、観測点に置けるデータ相互間の共分散行列[C]と、内挿により値を推定したい地点と観測点間の共分散ベクトル{c}が与えられたもとで、最良線形不偏推定量（Best linear Unbiased Predictor :BLUP）を与える手法が Kriging である[6)]。ここでは、Kriging の中で、最も広く利用されている普通 Kriging（ordinary Kriging）に従う定式化を行う。いま、推定誤差 e を次式のように $\mathbf{x}_o$ における推定値と真の値との差として定義する。

$$e = Z^*(\mathbf{x}_0) - Z(\mathbf{x}_0) \qquad (5.20)$$

この推定誤差 e の平均は、

$$
\begin{aligned}
E(e) &= E\left[Z^*(\mathbf{x}_0) - Z(\mathbf{x}_0)\right] \\
&= E\left[\sum \omega_i Z(\mathbf{x}_i) - Z(\mathbf{x}_0)\sum \omega_i\right] \\
&= \sum \omega_i E\left[Z(\mathbf{x}_i) - Z(\mathbf{x}_0)\right] \\
&= 0
\end{aligned}
\tag{5.21}
$$

となり、推定誤差は不偏（unbiased）であることがわかる。この不偏性は重みの総和$\Sigma\omega_0$=1 に基づくものである。一方、推定誤差の分散σ_e^2は、以下のように表記される。

$$
\sigma_e^2 = E\left[\left\{Z^*(\mathbf{x}_0) - Z(\mathbf{x}_0)\right\}^2\right] \tag{5.22}
$$

Kriging では重みに関する制約があることから、バリオグラムを利用することが認められているから、バリオグラムによって推定誤差の分散σ_e^2を表現すると、

$$
\sigma_e^2 = -\gamma(\mathbf{x}_0 - \mathbf{x}_0) - \sum\sum \omega_i \omega_j (\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j) + 2\sum \omega_i \gamma(\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_0) \tag{5.23}
$$

となる。ここで、最良の重みを求めるため、推定誤差の分散をできる可能な限り小さくするため、ラグランジェの未定乗数法を用いると、目的関数は以下のようになる。

$$
\phi(\omega_i, \mu) = \sigma_e^2 - 2\mu(\sum \omega_i - 1) \tag{5.24}
$$

ただし、μはラグランジェの未定乗数である。目的関数ϕを最小化するため、これらの変動関数をゼロとおく。すなわち、

$$
\begin{aligned}
\frac{\partial}{\partial \omega_i}\phi(\omega_i, \mu) = 0 \\
\frac{\partial}{\partial \mu}\phi(\omega_i, \mu) = 0
\end{aligned}
\tag{5.25}
$$

式(5.25)は、(n+1)個の線型方程式を与え、これをマトリックス表示すると、以下のようになる。

$$
\begin{bmatrix}
\gamma(\mathbf{x}_1-\mathbf{x}_1) & \cdots & \gamma(\mathbf{x}_1-\mathbf{x}_n) & 1 \\
\vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\
\gamma(\mathbf{x}_n-\mathbf{x}_1) & \cdots & \gamma(\mathbf{x}_n-\mathbf{x}_n) & 1 \\
1 & \cdots & 1 & 0
\end{bmatrix}
\begin{Bmatrix}
\omega_1 \\ \vdots \\ \omega_n \\ 1
\end{Bmatrix}
=
\begin{Bmatrix}
\gamma(\mathbf{x}_1-\mathbf{x}_0) \\ \vdots \\ \gamma(\mathbf{x}_n-\mathbf{x}_0) \\ 1
\end{Bmatrix}
\tag{5.26}
$$

式(5.26)は、Kriging に対する方程式体系と呼ばれ、左辺はデータ地点間のバリオグラム（相違度）を示し、右辺は内挿により値を推定したい地点と観測点間のバリオグラムを示す。各バリオグラムの値は、前項で示されたバリオグラムに当てはめられた数理モデルから得られる。この方程式体系に対する解は、重みのベクトル$\{\omega_i\}$である。

なお、$\mathbf{x}_0$ がデータ地点の 1 つであるならば、方程式体系の右辺は、左辺の行列の 1 つの列に等しくなる。その結果、その列に対する重みは 1 になり、残りのすべての重みは 0 となる。このように Kriging は、データ地点では観測値に等しい値を利用する。

5.2 Kriging を用いた観測データ分布推定の手順

今、**図-5.5** のように二箇所の崩落部が確認される斜面の地盤災害監視網を構築する問題を考える。**図-5.5** から分かるように、当該崩落は岩盤ブロック A の下部で生じており、ブロック A は非常に不安定な状態にあることが分かる。また、岩盤ブロック A が崩落した場合、隣接する岩盤ブロック B も不安定化し、後続して崩落する危険性もある。したがって、岩盤ブロック A の挙動を、継続して監視することが望まれる。

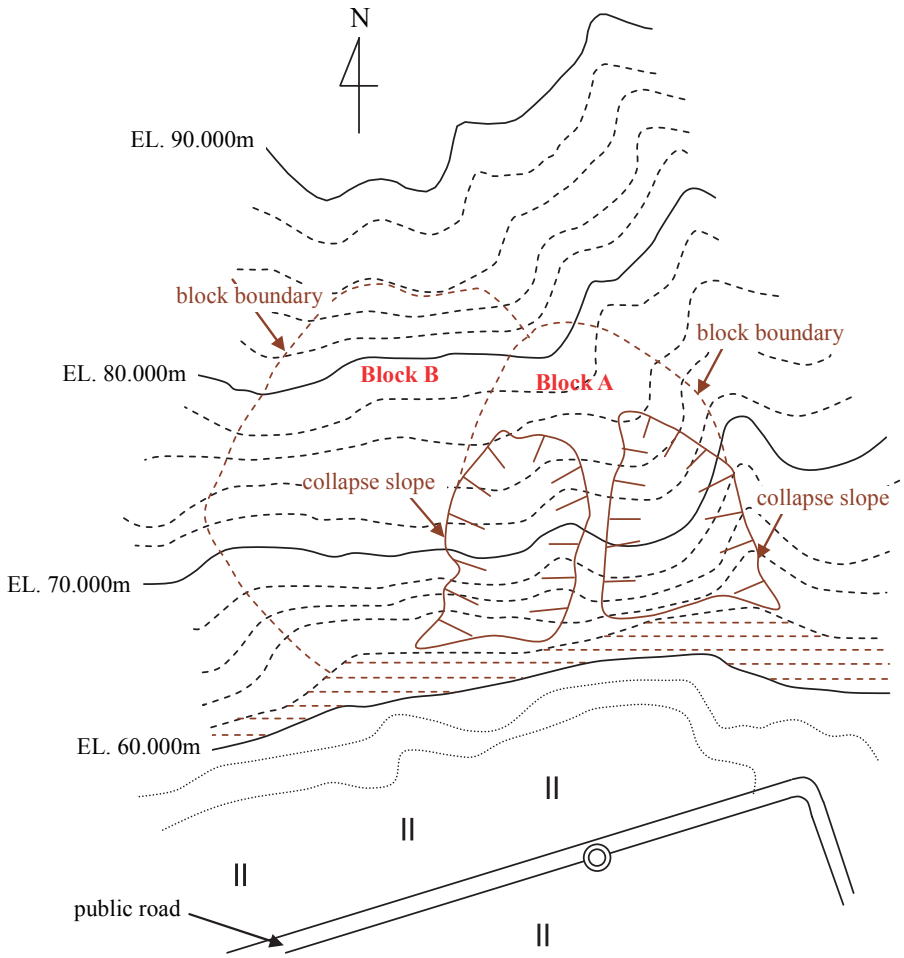


図-5.5 二つの崩落部が確認される斜面の平面図

蓋然性の高い岩盤ブロック A の崩落モードは、崩落部の崩壊が進行し、ブロック脚部が取り払われ、残置部がその自重で崩壊するモードであると判断した。このため、**第 2 章**で示した通信式傾斜計による観測網を**図-5.6** のように N=13 の観測点からなる観測網を設営するものとする。**図-5.6** において、#1,2、および#12,13 の観測点は岩盤ブロック A の範囲外に設けられているが、これは参照点として設けたものであり、他の観測点に比較して、発生する斜面傾斜が著しく小さいであろうことを期待したものである。また、当該傾斜計は X,Y の 2 軸の傾斜を測定できるが、後に述べる理由により、Y 軸の正の方向を北向きに、X 軸の正の方向を東向きとして

傾斜計を設置するものとする。

このように多数の観測点を設定したとしても、観測から得られる情報は各観測点の傾斜方位と傾斜角度にしか過ぎず、観測データ間の関係や、観測領域の巨視的な挙動を把握することは著しく難しい。このため、本研究では第 5.1(2)節に示した Kriging 法を用いて、監視領域全体の傾斜挙動を把握することを考えた。

このとき、注意しなければならない点は、Kriging 法には地形・地質的要因、あるいは力学的要因は一切考慮されておらず、ただ観測データから得られる共分散にのみ基づいて未計測点の傾斜方位、ならびにその傾斜角の推定が行われる点である。したがって、共分散関数のシル、レンジ、およびナゲット効果を観測データから同定するだけでなく、推定に供する共分散関数そのものも同定しなければならない。

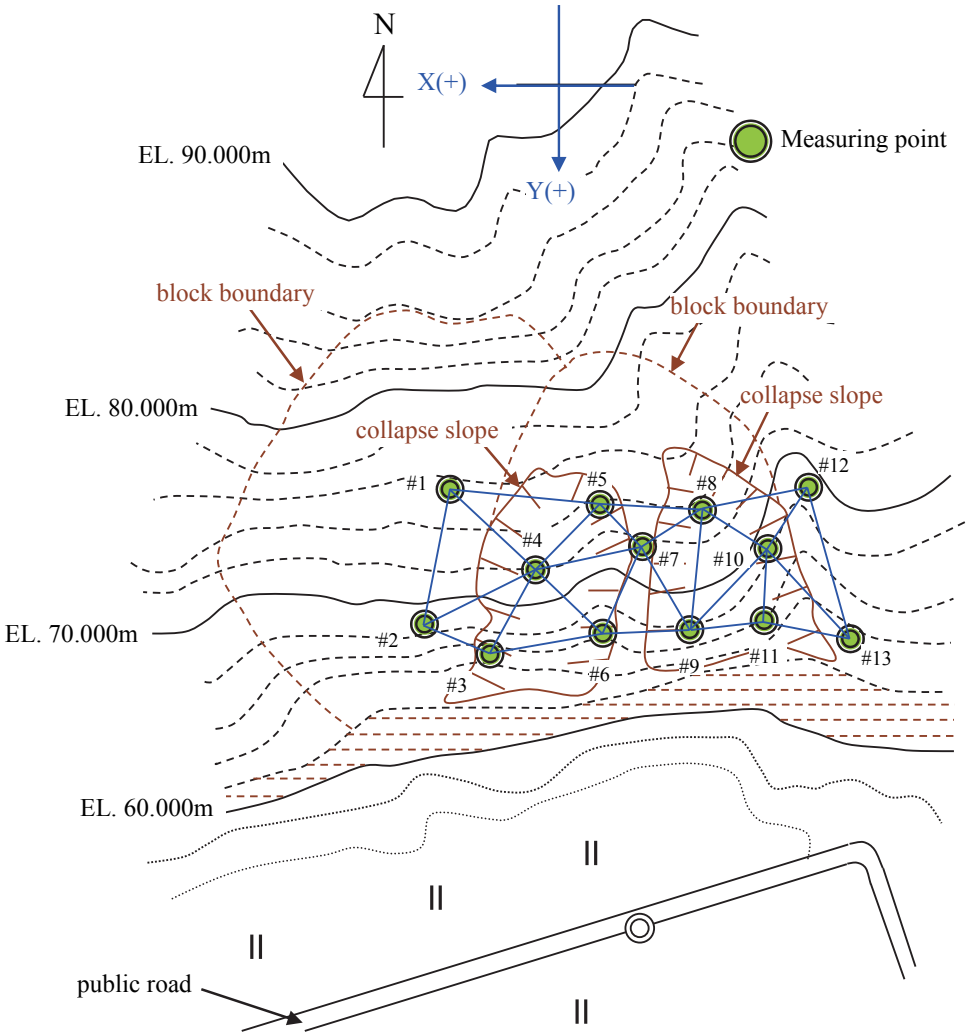


図-5.6　仮想の通信式傾斜計による観測網平面図

図-5.6 に示した例では、観測領域に N=13 の観測点が設けられているから、各時刻の観測値から N_h=78 組の距離|**h**|とバリオグラム $2\gamma(|\mathbf{h}|)$の関係が得られる。各組のこれを**図-5.1** に示したよう距離とセミバリオグラム$\gamma(|\mathbf{h}|)$の関係でプロットし、バリオグラム雲を作成する。なお、このとき観測点 x_i と x_j 間のセミバリオグラムγ^*_{ij} は、式(6)より、以下のように求められる。

$$\gamma_{ij} = \frac{\{z(x_i) - z(x_j)\}^2}{2} \tag{5.27}$$

このようにして作成したバリオグラム雲から経験バリオグラムを求め、さらにその経験バリオグラムに理論バリオグラムを適用し、最小自乗法により各パラメータを推定することで、Kriging 推定に供するバリオグラム関数を決定する作業が必要となる。式(27)を h（以下では、距離ベクトルの絶対値|**h**|をスカラーh で表記する）について整理すると、次式を得る。

$$\gamma(h) = \frac{1}{2|N(h)|}\sum_{N(h)}\{z(x_i) - z(x_j)\}^2 \tag{5.28}$$

式(5.28)において、$N(h)=\{(i,j);|x_i-x_j|=h\}$を意味し、また|N($h$)|はそのような組の総数を示す。すなわち、**図-5.5** の問題においては、$|N(h)|=N_h$=78 である。式(27)は、固定した h に対する推定量であるが、実際の同定作業では h を 1 つの値に固定すると、対応するデータの組 N(h)が極めて限定された組数となるため、同定解が不安定となる。このため、理論バリオグラムを経験的バリオグラムの手法を援用して同定することが、一般に行われる。すなわち、以下に再定義する|N(h)|個のデータを用いて経験的バリオグラムを求め、非線形同定手法により経験的バリオグラムに式(5.15)～(5.18)に示した共分散関数モデルを当てはめ、モデルパラメータを同定する方法である。

(1)経験的セミバリオグラムの作成

図-5.7 にセミバリオグラム関数 $g(k)$の同定作業のフローを示し、以下に経験的セミバリオグラム作成の手順を示す。

（a） 推定に用いる最大距離 h_{max} を定め、これよりも距離が大きいデータは同定に供しない。ここで、h_{max}をカットオフ（cutoff）と呼ぶ。

（b） 距離の閾値 $0<R_1<\cdots<R_K(=h_{\max})$を定め、$K$ 個の区間 $I_1=(0,R_1]$, $I_2=(R_1,R_2]$, ...,$I_K=(R_{K-1},R_K]$を定義する。

（c） $d_{ij} = \|x_i - x_j\| \in I_k$ となる(i, j) のペアの集合を N_k, その元の個数を$|N_k|$ とする。

（d） N_k に属するペア(i, j)に対する d_{ij} の平均を h_k とする。

(e)　N_k に属するペア(i,j)に対する$\gamma_{ij}=\{z(x_i)-z(x_j)\}^2/2$ の平均を g_k とする。

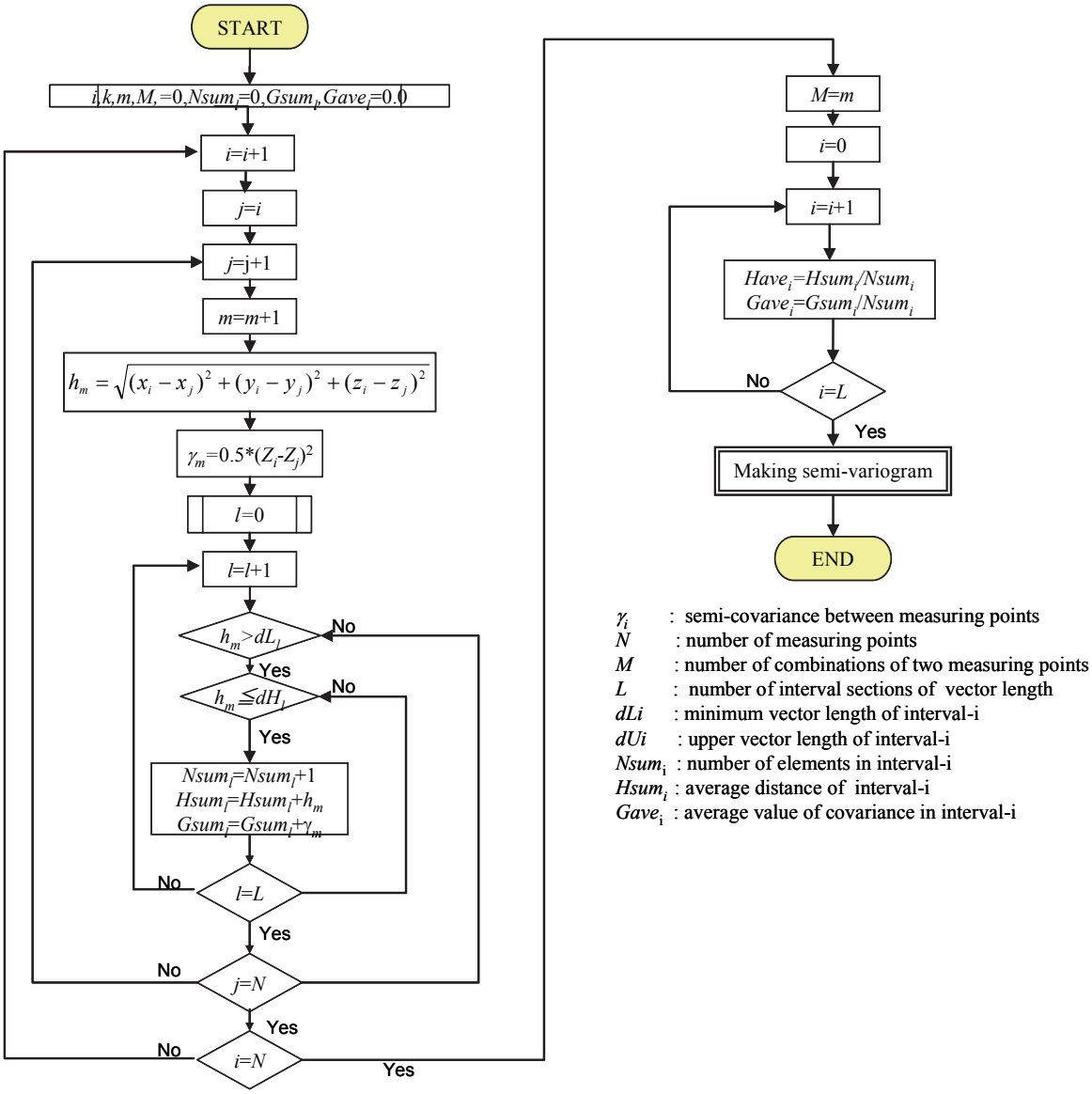


図-5.7　セミバリオグラム関数 g(|h|)の同定に関するフロー

これらすべての k についての、h_k に対するγ_k を経験（セミ）バリオグラムと呼ぶ。上記(b)の区間設定では、$(0,h_{max}]$ を距離で均等に分割する方法が実用的であり、その幅を width と呼ぶ。また、すべて組で最大距離を d_{max} とすると、$h_{max}=d_{max}$ の場合、距離の大きいクラスではそのクラスに属するペア数が極端に少なくなり、対象領域端部のデータの影響が大きくなるため、パラメータ推定の際に不安定になることがあるため、注意が必要となる [7)]。なお、上記(a)、(b)は入力データ作成作業であるため、**図-5.7** のフローには表されていない。

(2)未計測点の推定

第 5.2.(1)節で作成した経験的バリオグラムに、式(5.15)～(5.18)に示した共分散関数モデルを当てはめ、式(5.26)を解いて重みのベクトル$\{\omega_i\}$を同定し、さらに式(5.19)の関係から任意の未計測点の傾斜量が推定できる。ここでは、図-5.8 に赤いメッシュで示す等間隔の格子点を傾斜量推定の未形測点と考えた。等間隔で推定値をもとめることで、推定値のコンタ作成や分かり易いデータ展開図作成が容易となるものと考えたためである。

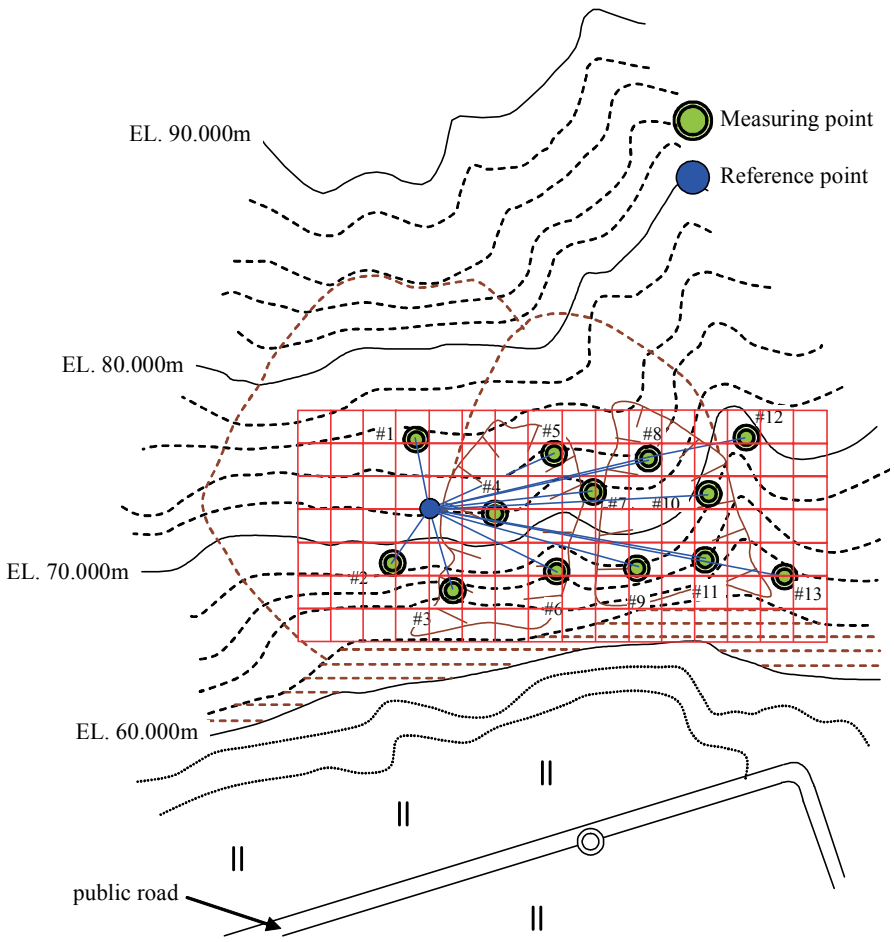


図-5.8 未計測点推定のための推定グリッドと観測網の関係

図-5.9 に、共分散関数モデルパラメータの同定と未計測点の傾斜量推定フローを示す。なお、本研究ではナゲットモデルを除く式(5.16)～(5.18)で示される球形モデル、指数モデル、ガウスモデルのそれぞれについて、そのモデルパラメータを求め与えられた各近似曲線を図-5.1 のバリオグラム雲上にプロットし、目視で最も適切と判断された共分散関数を用いて未計測点の傾斜量推定に供することとした。

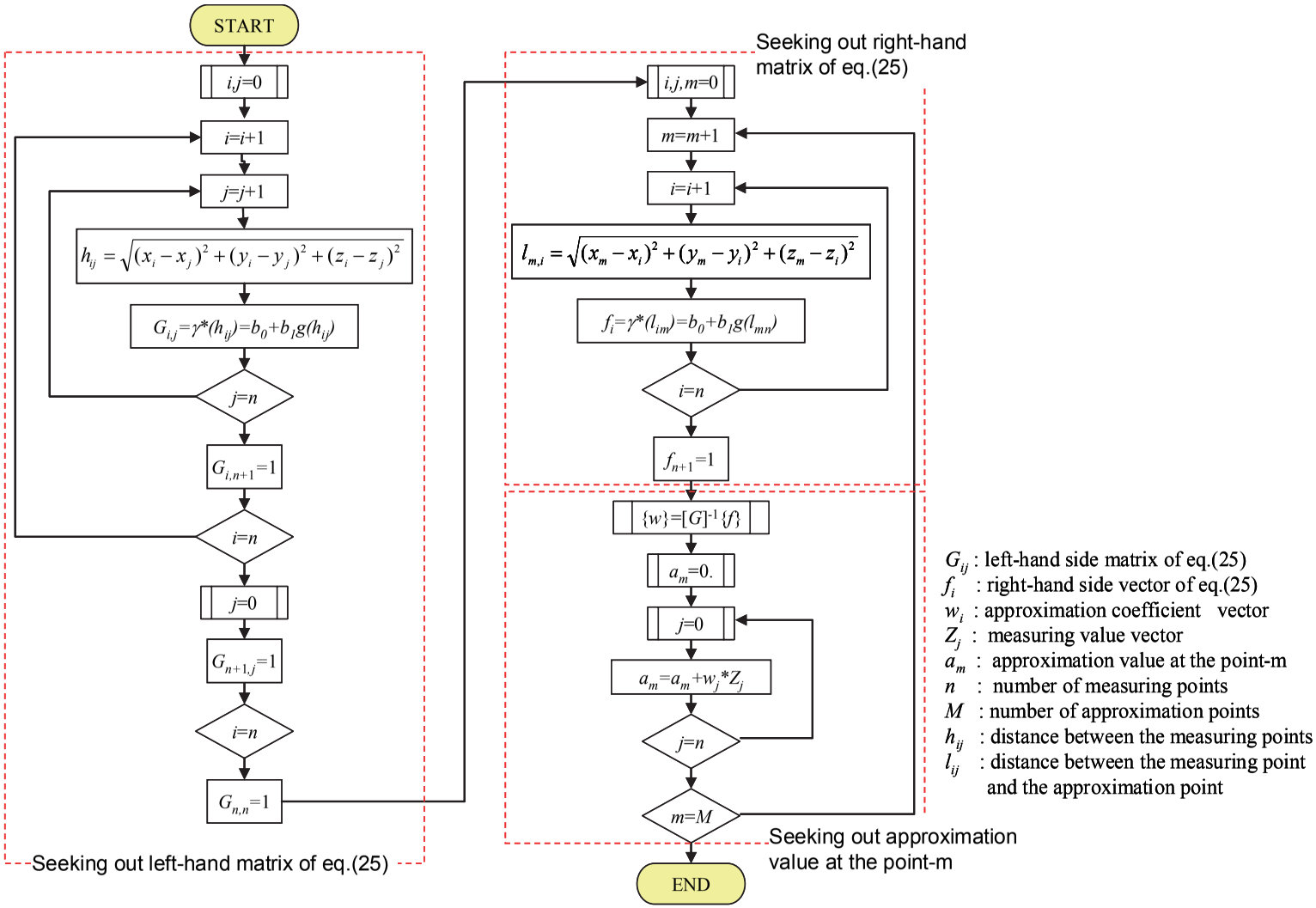


図-5.9 共分散関数モデルパラメータの同定と未計測点の傾斜量推定フロー

5.3 Kriging による観測データ分布推定の実際

第 5.1 節、第 5.2 節で述べた Kriging の定式化とデータ処理手順に従い、これをプログラム化した。第 3 章で述べたように、そのプログラムは GENESIS/GHQ のサブシステムとして実装したが、以下では実際の分布推定例を示し、推定精度やその特長について考察を加える。

図-5.10 に、推定に供した測定傾斜量θの平面分布を示す。この傾斜量は 2016 年 03 月 14 日 12:00 から 2016 年 04 月 05 日 12:00 までの差分傾斜量を示すものであり、第 4 章で述べたように、主としてトンネル掘削の影響を受けて発生した傾斜量と評価される傾斜量増分である。

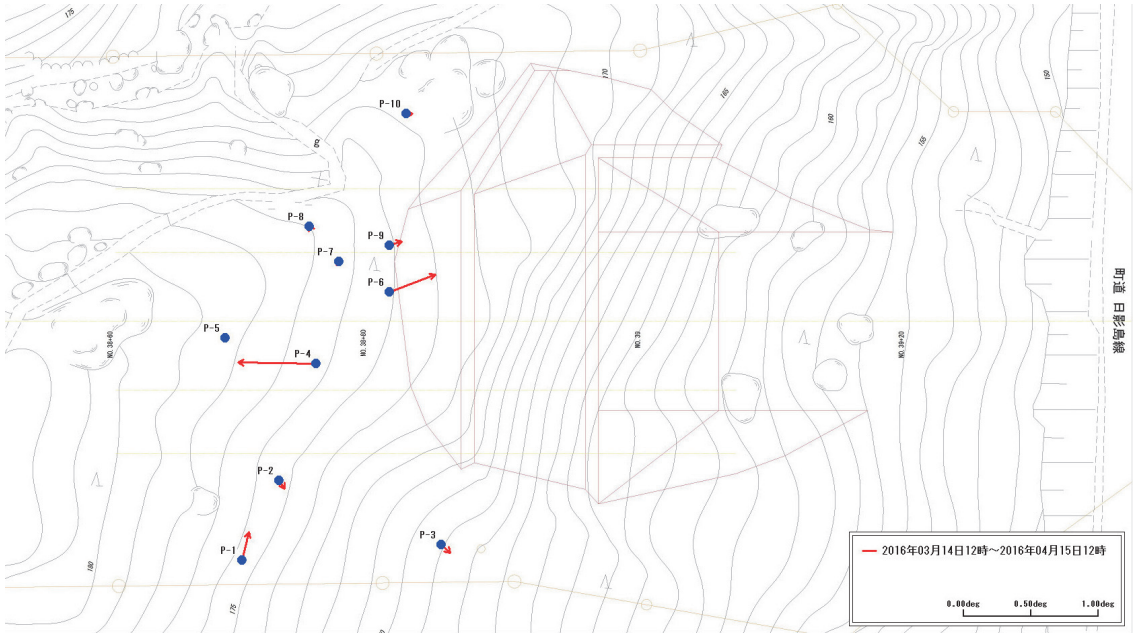
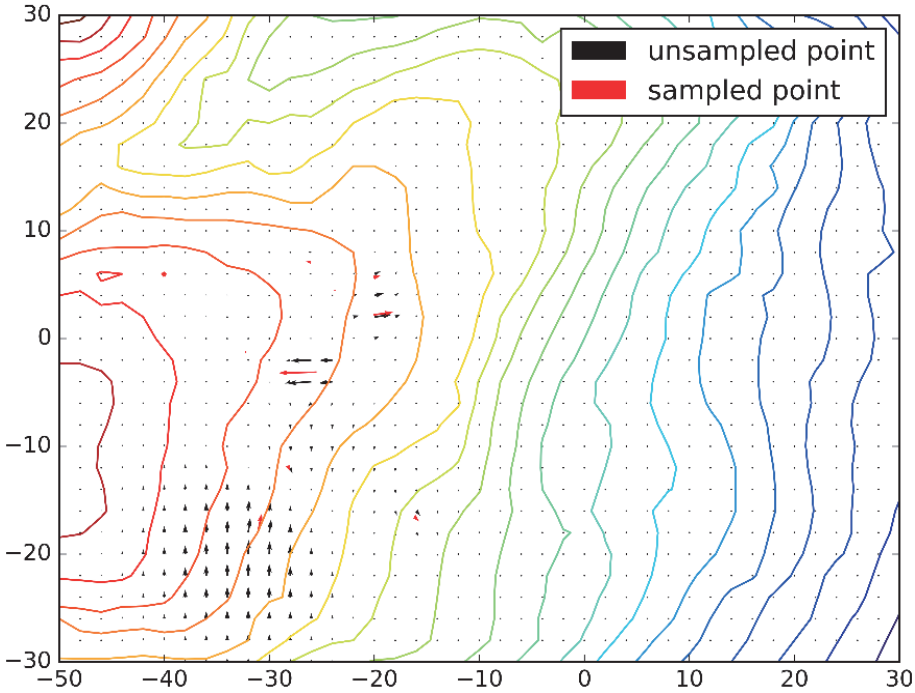


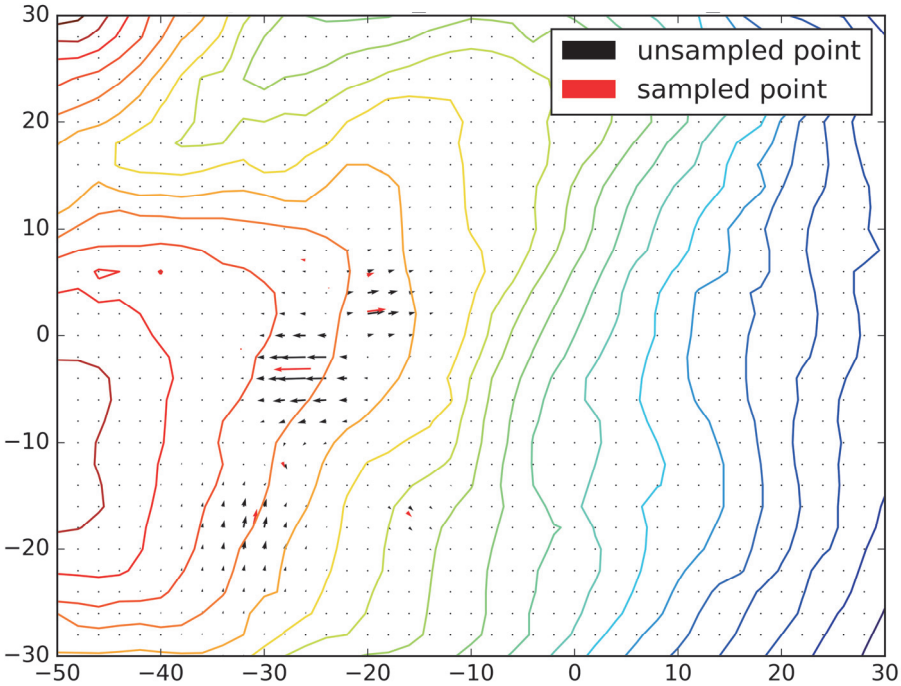
図-5.10　推定に供した測定傾斜量θの平面分布

これを基に実施した、傾斜量データの平面分布推定の結果を図-5.11 に示す。図-5.11 は、同一の観測データに対して、共分散関数モデルとして球形（spherical）モデル、指数モデル、およびガウスモデルを採用した場合の分布推定状況を比較して示したものである。図において、赤い矢印は測定された傾斜データを示し、黒い矢印は推定された傾斜をそれぞれ示す。また、図中の等高線は地形等高線である。

図-5.11 をみると、いずれの分布推定も局所的なデータの特徴を保存して推定が行われていることがわかる。例えば、図-5.10 中の P-2 点は非常に小さな傾斜しか発生していないが、隣接する P-4 点は極端に大きな傾斜が、P-1 点にも比較的大きな傾斜が発生している。このような測定データ分布を、移動平均法などの空間データ処理手法で推定すると、大きな値から小さな値に向けてなだらかなデータ勾配が形成される。すなわち、データ分布が平滑化される。

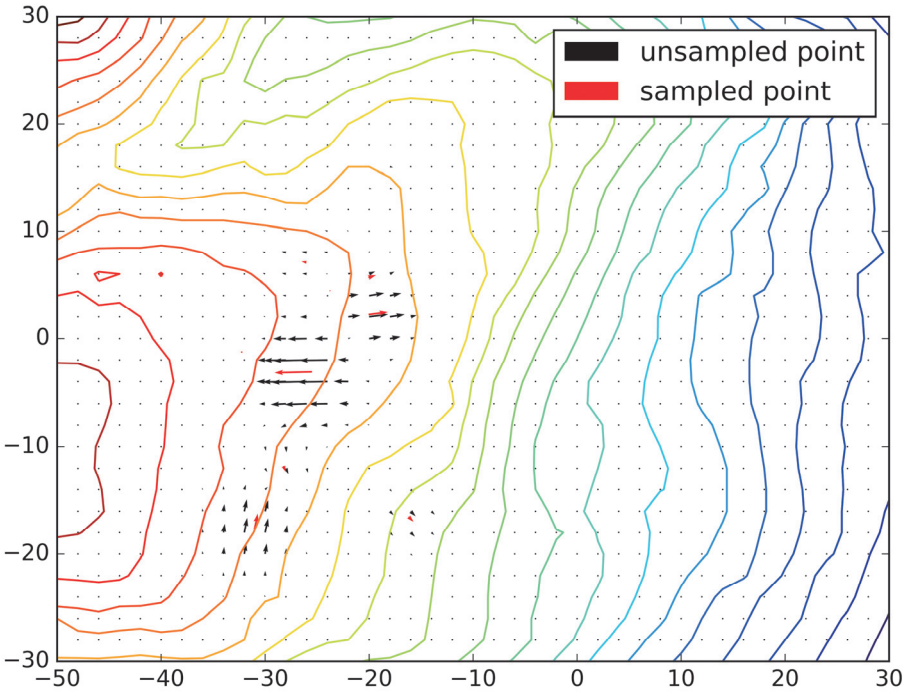


(a) 球形モデルによる分布推定結果



(b) 指数モデルによる分布推定結果

図-5.11 傾斜量データの平面分布推定結果（その 1）



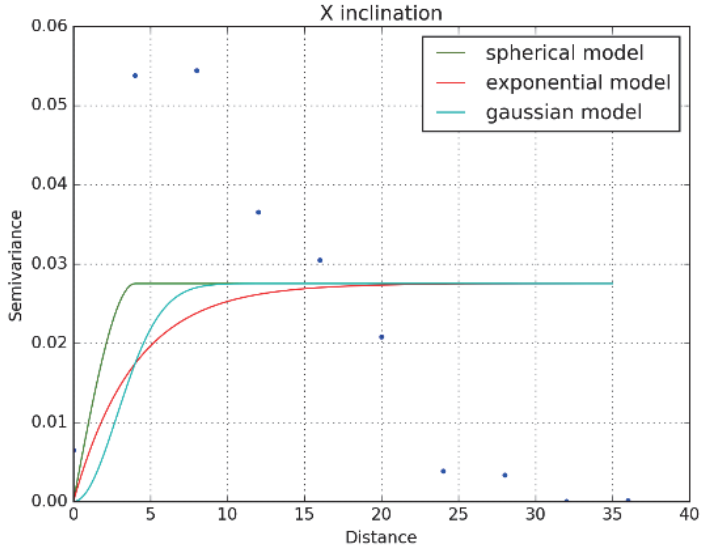
(c) ガウスモデルによる分布推定結果

図-5.11 傾斜量データの平面分布推定結果（その 2）

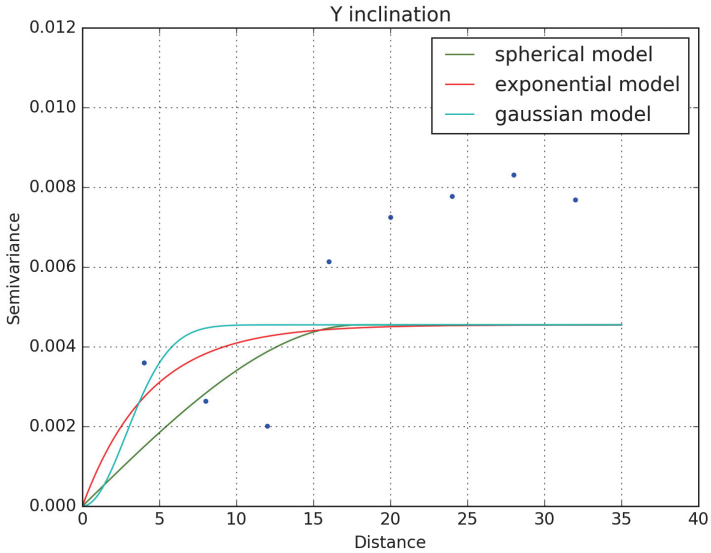
これに対し、Kriging 推定では、**図-5.11** から分かるように、P-4 点の周辺ではその極端に大きな観測傾斜に影響された傾斜分布が推定されるものの、少し離れると P-4 点の観測データの影響は見られない。また、P-2 点周辺の傾斜推定に P-4 点や P-1 点の観測データの影響は確認できない。

このように、Kriging では局所的な傾斜発生の特徴を保存した推定が可能になる。これは、移動平均などの推定法が測定データ間の距離にのみ依存してデータ勾配を形成するのに対して、Kriging では距離間の共分散に依存してデータ勾配が形成されるためであり、測定データ間距離が近くとも、測定データ間の相関が低く、共分散が大きければ、その測定値が相互に与える影響は小さいものとなる。

図-5.11 の傾斜分布は、x-方向傾斜θ_xとy-方向傾斜θ_yを別々に Kriging 推定し、これを合成した傾斜である。したがって、その傾斜方位は各点で推定されたθ_x, θ_yの大きさによって定まる。このため、傾斜方位も各データの特徴が保存されることになる。例えば、**図-5.10** で見ると P-6 点と P-4 点は隣接し、いずれも比較的大きな傾斜が発生しているが、その傾斜方位はほぼ逆方向を示し、P-6 点は斜面傾斜方向に、P-4 点は斜面傾斜と逆方向にそれぞれ傾斜している。このような測定データ分布を、移動平均法等で推定すると、P-6 と P-4 間の領域で推定される傾斜方位分布は、P-6 から P-4 に掛けて反時計回りに渦を巻くような傾斜方位分布を採るものと予想される。しかしながら、Kriging 推定では、傾斜方位についても共分散により推定値が支配されるため、局所的な特徴が保存されていることが**図-5.11** より明らかである。



(a) x-方向傾斜θ_x



(b) y-方向傾斜θ_y

図-5.12 測定データのバリオグラム雲と各種共分散関数モデルによるそのモデル化

図-5.12 に、x-方向傾斜θ_xと y-方向傾斜θ_yのバリオグラム雲と各種共分散関数モデルによるそのモデル化状況を、比較して、示す。**図-5.12** のバリオグラム雲はデータ範囲 $L = 40\ m$ 区間を、$\Delta L = 4\ m$ に分割し、各分割区間に含まれる測定データの平均値をその区間の代表値として作成したおり、その値が青色の点で示されている。また、各曲線はそのモデル化状況を示

す線であり、緑が球形モデル、赤色が指数モデル、そして水色がガウスモデルをそれぞれに示す。

いずれのバリオグラム雲も特徴的な分布形状を呈するが、θ_x は L = 24 m 以上の区間でバリオグラムが $\gamma(\mathbf{h})$ = 0.003 以下である。これは、L = 24 m 以上はなれると観測データ間に高い相関があることを示すものである。これは、当該期間において離れた点の x-方向傾斜 θ_x が、偶然、近しい値を観測したものであり、測定点数が増大するに伴って、大数の法則により全体の共分散へと収束するものと考えられる。言い換えれば、ある程度以上離れた観測点との共分散が小さくとも、これは全くの偶然で統計的にも、地盤工学的にも全く意味を有さない。

いま、図-5.12(a)を見るといずれのモデル化曲線も L = 24 m 以上のバリオグラム雲の影響を受けていないことは明らかである。もし、何らかのモデルで L = 24 m 以上のバリオグラム雲までも、近似し得たとしても、統計的にも地盤工学的にも全く意味を成さないデータに支配された推定結果が与えられることになる。この意味で、図-5.1 の range R は統計的に有意なバリオグラム雲の範囲を規定するパラメータと評価することができよう。

もちろん、バリオグラム雲とそのモデル化が良好な対応を示すことが望ましいことは言うまでもない。このためには、モデル化に供するバリオグラム雲のデータ数を増大させねばならない。幸いにしてバリオグラム雲のデータ数は、観測点数ではなく、観測点間の距離と共分散の組合せ（set）数で与えられるから、観測点を 1 点増やすだけで飛躍的に増大する。例えば、現在 10 箇所の観測点に対する組合せ数は 45 組であるが、11 箇所になると 55 組、12 箇所では 66 組、さらに 15 箇所では 105 組となる。すなわち、比較的少ない投資でバリオグラム雲の妥当性を担保し得ることが期待される。

次いで、当該の観測より得られたバリオグラム雲の特徴とそのモデル化状況について考察を行う。図-5.12(a)に示す x−方向傾斜 θx のバリオグラム雲は観測点間距離が最も短い L = 4 m、8 m の区間のバリオグラムが $\gamma(\mathbf{h})$ = 0.053～.0.054 とかなり大きな値を取る点に特徴がある。これは、近接する観測点間の相関が著しく低いことを示すものであり、図-5.10 に示す推定に供した測定傾斜量 θ の平面分布から妥当なバリオグラム雲分布と判断できる。このような、分布に対しては nugget effect が大きく、range R の小さいモデル化が望ましい。図-5.12(a)の各種モデルによるモデル化状況を見ると緑で示される球形モデルがこれを最も適切に評価していると判断できる。

一方、図-5.12(b)に示す y−方向傾斜 θy のバリオグラム雲は観測点間距離が L = 16 m を超えると、バリオグラムが、若干、急増傾向を示すが、全体として観測間距離の増大に伴うなだらかな増大傾向を示す点に特徴がある。この傾向を最も良くモデル化するのは、やはり緑の球形モデルであると判断する。このように、少なくとも今回の試験観測より得られた傾斜データに関しては、球形モデルが最もその特徴を適確に反映したモデル化がなされるものと考える。

参考文献

1） 高阪宏行:クリギングとその地理的応用、日本大学文理学部自然科学研究所研究紀要、No. 34、pp. 27-35、1999.

2） 久保田貴文、垂水共之:GoogleMaps を用いた地理統計データの可視化、統計数理、Vol.55、No.1、pp.101‐112、2002.

3） Hans Wackernagel: Multivariate geo-statistics – An introduction with applications -, Splinger, 1995.

4） Hans Wackernagel、青木謙治監訳:地球統計学、森北出版株式会社、2003.

5） 矢島美寛:時空間統計解析の理論と応用（21 世紀の統計科学、第Ⅱ巻、日本統計学会HP 版、第Ⅲ部、時空間統計解析の理論と応用、第 8 章）、pp.192-226、2011.

6） 堤盛人、清水英範、井出裕史:誤差要素モデルに基づく Kriging を用いた空間内挿、応用力学論文集 Vol.3、pp.125-132、2000.

7） Martheron,G.: Principle of geostatistics, Economic Geology, Vol.58, pp.1246-1266, 1963

6. まとめ

局所的集中豪雨の増加や、地震災害の頻発化などにより、斜面監視の重要性が、より高まりつつあるとともに、面的な監視・評価手法の確立が望まれている。地すべりや斜面崩壊等のカタストロフィックな斜面挙動は、突発的に発生するのではなく、局所的な小崩落やすべり等が跛行的に進行し、大きな地すべりや斜面崩壊へと至る、あるいは安定化するものと考える。これは、地すべり危険地帯などにおいて**写真**-6.1 のような段差地形や小段丘、あるいは根曲り木等が散見されることからも伺えよう。

したがって、小規模で局所的な斜面変形挙動を面的に把握することで、斜面の安定性を把握するとともに、その斜面が崩壊へと至るのか、あるいは安定化の方向へ向かうのかを予測・評価することが可能になると考える。これまでの斜面計測で主として用いられた地盤伸縮計は費用的な面や、設置工の困難さにより設置点数は限定されたものとなっていた。このため、その設置箇所は、想定される地すべりの中心となる線上に設置されることが多く、必ずしもその測定データが、現況の斜面挙動を適確に把握できない場合もある。

写真-6.1　段差地形・根曲り木の例

このような、斜面観測の現況に鑑み、本研究では、**第 2 章**に示したように比較的安価で、かつ設置が容易な加速度センサーを用いた地盤傾斜計によりネットワーク化された斜面の面的観測網を試験的に中部縦貫自動車道塩沢トンネル坑口斜面に構築した。また、その観測データを、ネットワーク上で一元的に管理するシステム GENESIS/GHQ（Ground monitoring HeadQuarters）を**第 3 章**において設計し、実装した。**第 3 章**に示したように、GENESIS/GHQ はネットワーク上で斜面管理に係るステークホルダーが観測データを共有し、処理できるよう XML により観測データをデータベース化した点に特徴がある。また、その観測データの図化に当たっては、従来の各観測点の経時変化にのみ着目した図化に加えて、観測データの空間的分布に着目した図化アップリケーションを整備した。

第 3 章において、試験観測網から得られた測定データを検証したところ、隣接して設置された地盤伸縮計に比較して、地盤挙動に非常に敏感であること、ならびに精度の高い観測が安

定して行えていることが明らかになった。これは、センサーが半導体加速度センサーを利用して製作されているため、設置による遊びがなく、観測開始後直ちに地盤挙動に反応すること、センサーが土中に埋設されているため気温等のノイズを受けないこと、ならびに半導体加工精度がそのまま測定精度に反映されていることなどが理由として考えられる。

このように敏感で高精度な観測が安定して行いうることから、**第 4 章**では傾斜観測データの降雨応答、ならびにトンネル掘削応答に関する検証を行った。その結果、いずれの擾乱に対しても一定の相関特性を有することが明らかになった。これは、Big Data 手法によるデータ予測を可能とするものであると評価された。

最後に、**第 5 章**では Kriging による傾斜データの面的分布推定の定式化とそのプログラミングを実施し、試験観測網より得られた観測データによるその検証を実施した。その結果、Kriging による傾斜分布推定は、移動平均法などのように単に観測データ間を平滑化する推定ではなく、観測データに現れた局所的な特徴を保存した推定を行い得ることが明らかとなった。これは、斜面に現れる局所的な小規模滑動や円弧すべり挙動を評価し、その範囲を推定し得るものであり、本研究が目的とする局所的な斜面挙動を把握し、斜面全体の安定性予測を可能とするものと判断した。

以上のように、本研究は初期の目的を達し得たものと評価するが、塩沢トンネル作業所等における討議の場において、以下のような要望がなされた。すなわち、今日の斜面安定性評価は、地盤変位量、あるいは地盤変位速度を基に評価されている。このため、斜面挙動の把握や予測は行えても、現状の安定性を斜面傾斜から、直接、評価することが難しい。したがって、トンネル坑口法面の施工管理の面からは地盤変位も考慮した観測システムが必要と考える。

この様な要望に対して、本研究の共同研究者のひとりが、開発を進め、国際指針を主導して制定した、地盤変位を 3 次元で高精度に計測できる安価な GNSS センサー観測への展開を、今後、図る方針である。

謝辞：本研究の実施に当たり、国土交通省 関東地方整備局 甲府河川国道事務所 宮下邦彦様には、斜面観測に係る種々の技術的知見や実務的見解をご教授賜り、ご指導いただきました。また、三井住友建設株式会社 東京土木支店 岡田隆一様、大原永次様、ならびに田中亮平様には、試験観測網設置・運営に関し、多大なご協力を賜りました。ご指導・ご協力賜りました皆様に、心よりの感謝の意を表し、本報告書の結びとさせていただきます。

Appendix A ： XML の基礎的事項について

A.1 XML 概論

XML は“eXtensible Markup Language”の略であり、“SGML[1](Standard Generalized Markup Language)という文書フォーマットのオープンスタンダードの流れを汲んだ言語である。複雑すぎるとされた SGML から機能を抜き出して整理するとともに、HTML[2](Hyper Text Markup Language)のように Web の機能を利用することを可能としたため、”拡張可能なマークアップ言語[3]”と翻訳されることもある。

XML と HTML の最大の違いは、タグの自由度にある。HTML では、あらかじめ使えるタグの名前や機能が定義されているが、XML は利用者がタグを自由に定義できる。すなわち、ユーザーが、タグを用いて、データに書式や意味づけを自由に行うことができる。

XML 仕様に従って作成されたデータは“XML 文書(XML Document)と呼ばれる。XML 文書はテキストファイルとして作成されるため、エディタで開けばどんなデータが含まれているのか確認でき、タグによってデータにどんな属性が付けられているのかも理解が容易である。さらに、データ変換も容易なため、アプリケーション間でデータ交換を行う場合のフォーマットとして非常に優れた構造を備えている点に特徴がある。

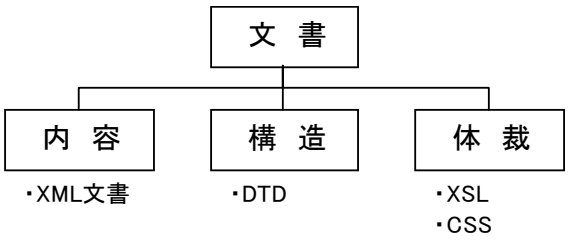


図-A.1 XML 文書の構成

A.2 XML の記述法

XML 文書を構成する「内容」,「構造」,「体裁」という 3 つの要素は、従来の紙媒体ではひとつとなって決定されている。HTML における情報表現においても、HTML によってタグ付けされた構造のままに、閲覧者に提供されるものであり、これら 3 つの要素が強固に一体化されて

---

1 文書の論理構造、意味構造を記述する言語。タイトル、引用部分、著者など文書の中で特別な意味をもつ部分にマーク付けをすることができる。

2 Web ページを記述するためのマークアップ言語。W3C が作成している規格で、文書の論理構造や見栄えなどを記述するために使用される。また、文書の中に画像や音声、動画、他の文書へのハイパーリンクなどを埋め込むこともできる。

3 文書の一部を「タグ」と呼ばれる特別な文字列で囲うことにより、文章の構造(見出しやハイパーリンクなど)や、修飾情報(文字の大きさや組版の状態など)を、文章中に記述していく記述言語。マークアップ言語を使用して書かれた文書はテキストファイルになるため、テキストエディタを使って人間が普通に読むことが可能で、もちろん編集もできる。代表的なマークアップ言語としては、SGML、HTML、TeX などがある。XML(eXtensible Markup Language)はタグを使用した囲み方は規定しているが、タグの意味は規定していない、メタ言語と呼ばれるものである。メタ言語はタグの意味を規定するスキーマ言語と組み合わせてマークアップ言語になる。

いる。

図-A.1 に示すように、XML ではこれら 3 つの要素を分離して扱う。“内容”は XML 文書内でマークアップされるが、その XML 文書の“構造”は DTD(Document Type Definition)と呼ばれる構造定義体によって定義する。また、XML 文書に与える体裁はスタイルシートにより記述する。XML に適用できるスタイルシートには CSS[4](Cascading Style Sheet)と XSL[5](eXtensible Style sheet Language)の 2 種類がある。

A.2.1 XML 宣言と XML インスタンス

XML ファイルは、まず先頭に XML 仕様のバージョン番号と、XML 文書作成に使用する文字コードを宣言する XML 宣言(XML declaration)が記述される。

```
<?xml version = "1.0" encoding = "Shift_JIS"?>
```

“encoding=”に続く部分では XML 文書作成時に使用される文字コード(Shift_JIS、UTF-8 等)を指定するが、文字コードが Unicode(UTF-8、UTF-16)の場合は“encoding =”の部分を省略してもよい。この部分を省略する場合には、XML 宣言そのものを省略することもできる。

この XML 宣言に引き続き、XML インスタンスの記述が始まる。XML インスタンスとは、実際の内容にタグが付けられている部分、つまり XML 文書の本体のことである。この部分の文法を理解するには、“要素(element)”と”属性(attribute)“について理解しなければならない。

(1) 要素の記述

XML インスタンスに現れる要素の 1 つ 1 つは図-A.2 のように記述される。図-A.1 において、開始タグと終了タグで囲まれる部分を要素(element)と呼び、XML では、開始タグと終了タグは記述しなければならない(HTML では、タグの省略が許される場合がある)。

要素(element)		
<mizunami>	UltraDeepShaft	</mizunami>
開始タグ	内容	終了タグ

図-A.2 内容の構成

要素の内容には、文字列だけではなく、他の要素と文字列を混在させることも可能である。

---

4 Web ページのレイアウトを定義する規格。これまで、Web ページのレイアウトは HTML を用いて記述され、HTML にはレイアウトに関する仕様が大量に取り込まれたが、これは、文書の論理構造を記述するという本来の HTML の目的に反するため、文書の視覚的構造を規定する枠組みとして CSS が新たに策定された。CSS を使うと、フォントや文字の大きさ、文字飾り、行間などの見栄えに関する情報を文書本体(および文書の論理構造を記述した HTML)から切り離すことができ、ユーザが複数のレイアウトから適当なものを選択することができるようになる。WWW に関する標準化団体 W3C で標準化されている。

5 Microsoft 社、Inso 社、ArborText 社の 3 社を中心に提案された、XML 文書の見栄え(スタイルシート)を記述する言語

例えば、図-A.3 の例では“LOD”という要素の中に“Tile”という要素が含められている。このとき、“LOD”を親要素、“Tile”を子要素と呼ぶ。

```
<LOD value="0" Tiles="16" width="6000" height="680">
  <Tile ID="0">RGB_6000_0_0.bmp</Tile>
  <Tile ID="1">RGB_6000_0_1.bmp</Tile>
  <Tile ID="2">RGB_6000_0_2.bmp</Tile>
  <Tile ID="3">RGB_6000_0_3.bmp</Tile>
  <Tile ID="4">RGB_6000_1_0.bmp</Tile>
  <Tile ID="5">RGB_6000_1_1.bmp</Tile>
  <Tile ID="6">RGB_6000_1_2.bmp</Tile>
  <Tile ID="7">RGB_6000_1_3.bmp</Tile>
  <Tile ID="8">RGB_6000_2_0.bmp</Tile>
  <Tile ID="9">RGB_6000_2_1.bmp</Tile>
  <Tile ID="10">RGB_6000_2_2.bmp</Tile>
  <Tile ID="11">RGB_6000_2_3.bmp</Tile>
  <Tile ID="12">RGB_6000_3_0.bmp</Tile>
  <Tile ID="13">RGB_6000_3_1.bmp</Tile>
  <Tile ID="14">RGB_6000_3_2.bmp</Tile>
  <Tile ID="15">RGB_6000_3_3.bmp</Tile>
</LOD>
```

図-A.3　要素の親要素と子要素(図-5.3 より抜粋)

このように、XML 文書は、親要素から子要素、そのまた子要素というように要素を階層的に作り上げることで成り立っている。ある要素の開始タグと終了タグの対の中に、子要素として別の要素の開始タグと終了タグを入れ子にして書くことによって階層関係を作るのである。例えば、要素 A の下位に要素 B と要素 C を入れ子にしてタグ付けするには、次のような書き方をする。

```
<要素 A>
        <要素 B>  ---------- </要素 B>
        <要素 C>  ---------- </要素 C>
</要素 A>
```

階層化された要素のタグ付けに際しては、上位下位の関係がわかるように開始タグと終了タグの対応をきちんと取る必要がある。なお、要素には、その内容に子要素も文字列も持たない「空要素」と呼ばれる要素がある。記述法は次のとおりである。

<要素名 />

上記のタグは内容が空の要素、すなわち< 要素名 ></ 要素名 >とみなされ、例外的に単独で用いることができる。

(2) 属性の記述

図-A.4 の XML 文書のサンプルで、<Tile ID= "1">という開始タグがある。この中の ID = "1" の部分は、属性(attribute)と呼ばれるもので、要素に付加的な情報を与えるために存在する。属性は開始タグの中で次のように記述する。

<要素名　属性名="属性値".....>

属性は開始タグに複数指定することも可能であり、また空要素にも設けることができる。例えば、次のような書き方をして、ファイルへのパスを属性 file の属性値として示したグラフィックデータを表す空要素が考えられる。

<graphic file = " http://www.utj.co.jp/graphics/sample1.gif "/>

A.2.1 DTD(Document Type Definition)の記述方法

DTD は文書型定義と訳される。図-A.4 にその一例を示す。

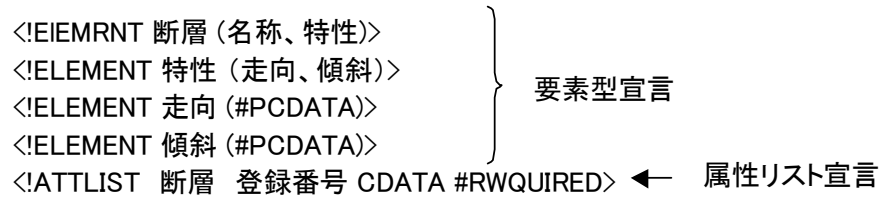


図-A.4 DTD の例

DTD の中で、XML 文書中で使用するタグ名や属性名、またその入れ構造を定義する。DTD に記述する宣言は、次の 4 つである。

1) 要素型宣言
2) 属性リスト宣言
3) エンティティ宣言
4) 記法宣言

以下に、要素型宣言と属性リスト宣言についてのみ説明を加える。

(1) 要素型宣言

要素型宣言は、XML 文書中で使用できる文書要素を定義するもので、要素名、要素の親子関係、要素の内容モデルを次のように記述して指定する。

<!ELEMENT 要素名 内容モデル>

例えばテキストを内容として持つ“名称”という要素は次のように宣言する。

<!ELEMENT 名称 (#PCDATA)>

ここで、#PCDATA はテキストを表すキーワードである。1 つの要素型宣言は、複数のレベルにわたる階層構造の 1 つのレベルを定める局所的なものである。これらを順に積み重ねることによって、文書(データ)全体の階層構造を作る。階層構造は何世代にもわたる親子関係で成り立っているので、最上位の要素からはじめて、子供と孫の関係、孫と曾孫の関係・・・というように要素型宣言を重ねていく。内容モデルには、子供の要素としてどのようなものの出現を許すかという指定を書く。このとき、子供として出現する要素に関する情報は、出現順序と出現回数の 2 つである。

図-A.4 の例では、“断層”という内容は“名称”と“特性”という二つの子要素を持ち、さらに“特性”は“走向”、“傾斜”の 2 つの子要素を持つ。そして、子要素はテキストとして与えられるという内容が記述されている。

(2) 属性リスト宣言

属性リスト宣言は次のように書く。

<!ATTLIST 要素名 属性名 属性値の候補 "デフォルト値">

前述の DTD の例では、次のような属性リスト宣言が書かれていた。

<!ATTLIST 断層 登録番号 CDATA #REQUIRED>

これは、<断層> 要素には、登録番号という属性があり、その値は任意の文字列(CDATA)である。この属性は省略してはならない(#REQUIRED)ということを表している。

A.3 検証済み XML 文書と整形式 XML 文書

XML 文書は、処理上の観点から 2 種類に分けられる。“整形式(well-formed)XML 文書”と“検証済み(valid)XML 文書”である。

整形式 XML 文書とは、開始タグと終了タグの対応が取れており、かつ親要素と子要素がきちんと入れ子になっているなど、形式的に形が整った(well-formed)XML 文書を指して言う。つまり、DTD で規定されたタグ名や、構造に従っているかどうかは関係なく、形式的に整って

いるかどうかという観点からチェックを受けた XML 文書のことである。XML 文書は、必ず整形式 XML 文書でなくてはならない。整形式 XML 文書と検証済み XML 文書の関係を図示すると図-A.5 のようになる。

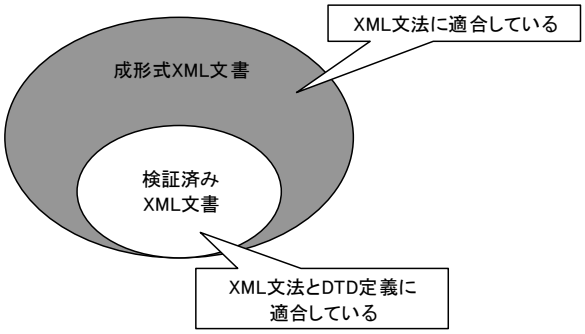


図-A.5 整形式 XML 文書と検証済み XML 文書の関係

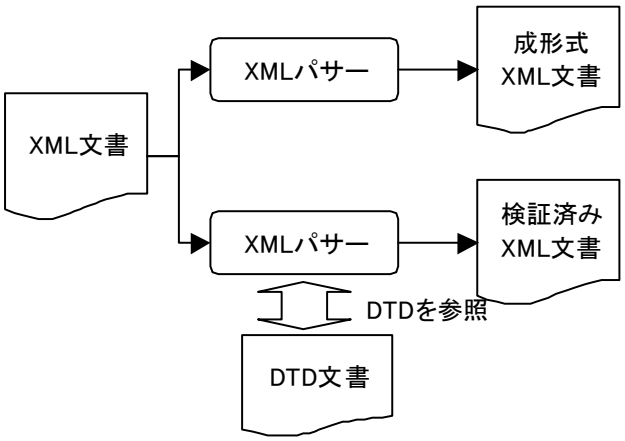


図-A.6 XML 文書と XML パサーの関係

検証済み XML 文書とは、XML 文書を作成後チェックする際に、整形式かどうかという観点からだけではなく、DTD で定義されているタグ名や構造などに従っているかどうかという点まで含めてチェックした XML 文書を指して言う。XML 文書を検証済み XML 文書にしたい場合は、DTD を参照しながらチェックを行う必要がある。

作成された XML 文書のチェックを行うのは、実際には XML パサー(Parser)[6]と呼ばれるソフトウェアである。ある XML 文書を、整形式 XML 文書とするか、検証済み XML 文書とするか

[6] XML 文書を、アプリケーションソフトが利用しやすい形に変換するソフトウェア。変換時に、XML 文書が文法に照らして正確に記述されているかどうかを同時に検証する。XML 文書はテキストファイルの形で存在するため、そのままソフトで利用することができない。個々のソフトの中に XML 文書を解釈するプログラムを持たせる方法もあるが、XML は一定の形式が定められているため、汎用的な解釈プログラムである XML パサーによって変換したデータをソフトが使うようにした方が効率がよい。アプリケーションソフトで XML 文書を扱う場合には、直接 XML 文書を読むのではなく、XML パサーを介するのが一般的になっている。

は、XML パサーの使い方に依存する。XML 文書と XML パサーの関係を図示すると図-A.6 のように示すことができる。

Appendix B ： MySQL の基本操作

MySQL は、最も広く利用されているオープンソースの RDBMS であり、高速で使い易い点が特徴とする。非商用利用なら無償で入手して使うことが可能で、商用利用に関してもデュアルライセンス化が認められているため、レンタルサーバーの RDBMS としても広く採用されている。数千万件から数億件のレコードを扱っている Yahoo、Google 等の大規模なサイトにも採用されているとされる。

以下、RDBMS の基本操作（ テーブルの作成、テーブルの変更、およびテーブルの削除）、制約条件、およびデータ操作等に関する MySQL の基本的な構文を以下に示す。

B.1 RDBMS の基本操作

B.1.1 テーブルの作成 <CREATE TABLE>

テーブルの作成には CREATE TABLE 文を用いる。CREATE TABLE 文の構文は、以下のとおりである。

CREATE TABLE テーブル名 (列名 データ型 , ...);

CREATE TABLE の後にテーブル名を、その後ろの部分にカッコで囲みフィールド名称（列名）とデータ型を設定する。

CREATE TABLE 文は行のない空のテーブルを作成する構文であり、値は INSERT INTO 文を用いて入力する。CREATE TABLE 文は基本的に指定された順番に並んだ名前の付いた列の集合を説明するものとして、テーブル名を定義する。また、同時に列のデータ型とサイズも定義し、テーブルは列を 1 つ以上持たなければならない。

B.1.2 テーブルの変更<ALTER TABLE>

テーブルの変更は ALTER TABLE 文で行う。ALTER TABLE は以下の機能を備えている。すなわち、

- テーブルに列を追加する
- テーブルから列を削除する
- テーブルにテーブル制約を追加する
- テーブルからテーブル制約を削除する
- 列にデフォルト値を追加する
- 列からデフォルト値を削除する

テーブル制約 (CONSTRAINT) とは、テーブルの列に入力できる値を制限するテーブル定義の一部を意味する。また、デフォルト値とは、テーブルへの INSERT INTO 文に列の値が指定されなかった場合に、そのテーブルの列に自動的に挿入される値を意味する。ALTER TABLE 文の構文は次のとおりである。

1）列の追加
ALTER TABLE テーブル名 ADD [COLUMN] 列名 データ型 ;

2）列を削除
ALTER TABLE テーブル名 DROP [COLUMN] 列名 [RESTRICT | CASCADE] ;

3）テーブル制約の追加
ALTER TABLE テーブル名 ADD テーブル制約の定義 ;

4）テーブル制約の削除
ALTER TABLE テーブル名 DROP CONSTRAINT テーブル制約定義[RESTRICT | CASCADE] ;

5）デフォルト値の追加
ALTER TABLE テーブル名 ALTER [COLUMN] 列名 SET DEFAULT デフォルト値 ;

6）デフォルト値の削除
ALTER TABLE テーブル名 ALTER [COLUMN] 列名 DROP DEFAULT ;

なお、上の構文の中に示した[COLUMN]は省略可能である。また、[RESTRICT CASCADE]は、RESTRIC 句と CASCADE 句のいずれかを記述するという意味であり、RESTRICT 句が指定された場合は、指定した表がビューや整合制約により参照されたものである場合は変更は行われない。CASCADE 句が指定された場合は、列を参照するビューは変更されず、それらは破棄される。

B.1.3 テーブルの削除 <DROP TABLE>

テーブルの削除は、実際には 2 段階のプロセスからなる。まず DELETE 文によりテーブルのデータを空にし、次に DROP TABLE 文を用いてテーブルの定義を破棄する。すなわち、DROP TABLE は空のテーブルを削除するものであり、データを破棄するものではない。DROP TABLE 文の構文は以下のとおりである。

DROP TABLE テーブル名 [RESTRICT | CASCADE] ;

RESTRICT 句が指定された場合は、指定した表がビューや整合制約により参照されたものである場合、削除は行われない。CASCADE 句が指定された場合は、ビューや整合制約も削除される。

B.2 データ値の制約

SQL の表定義ではデータ値に制約を持たせることで、登録されるデータが常に正しい状態を保つことができる。制約には「列制約」と「テーブル制約」という 2 つの基本制約がある。両者の違いは、列制約が列のみに適用されるのに対し、テーブル制約が列のグループに適用される点にある。

CREATE TABLE 文では、列定義のデータ型の後ろに列制約を追加し、最後にカンマを付ける。なお、テーブル制約は、テーブル定義の最後の列定義を後ろに配置し、最後に閉じカッコをつける。制約を追加して拡張した CREATE TABLE 文の構文は以下のとおりである。

CREATE TABLE テーブル名 (列名 データ型 列制約...., ..., ..., テーブル制約) ;

テーブル制約は A.2 節で説明した ALTER TABLE 文を使用することで、作成済のテーブルに追加することもできる。

B.2.1 主キーの指定 <PRIMARY KEY>

主キーとは、ベーステーブルの各行を一意に識別するための 1 つ以上の列のグループを意味する。主キーは NULL を持たず、一意であることを保障するために制約が適用される。なお、ベーステーブルとは他のテーブルから抽出されたデータが含まれないテーブルのことである。

B.2.2 FOREIGN KEY 制約

SQL は、FOREIGN KEY 制約による参照整合性をサポートする。この制約は、外部キーと親キーに参照整合性の原則を守らせるために、ユーザがデータベースに入力できる値を制限するものである。FOREIGN KEY 制約の適用には、親キーにまだ存在しない値を除外するよう、外部キー列を制限するという効果がある。

なお、FOREIGN KEY は他の制約と同じように CREATE TABLE 文（または、ALTER TABLE 文）に使用され、制約には参照する親キーを指定する。テーブル制約または列制約となり、テーブルの場合は複数の列を 1 つの外部キーとして使用することが可能である。FOREIGN KEY 制約の構文は次のとおりである。

・テーブル制約

FOREIGN KEY 列リスト REFERENCES 親テーブル(列リスト) ;

・列制約

REFERENCES 親テーブル(列リスト) ;

構文から分かるように、列制約には FOREIGN KEY が含まれていないため、REFERENCES 制約とも呼ばれる。

B.3 データ操作

B.3.1 データの入力 <INSERT INTO>

既に表が定義されていて、その表へデータを入力する場合の基本的な構文は以下のようなものである。

INSERT INTO テーブル名 (列名 , 列名 ,.....) VALUES(データ , データ ,.....);

上記の構文において、INSERT INTO 直後のカッコ中には、データを入力する列名を入力する順番に記述する。ここで指定されない列に対しては、デフォルト値が設定されている場合はデフォルト値が、デフォルト値が設定されていない場合は NULL 値が登録される。デフォルト値が指定されず、NOT NULL が指定されている場合、INSERT INTO 文は失敗する。なお、あらかじめ列制約やテーブル制約により、入力できる値に制限があるような場合は、その制約に従う値を入力しなければならない。また、すべての列にデータを入力する場合、カッコは省略される。

VALUES の後ろのカッコには、実際に入力するデータを記述する。このとき、INSERT INTO の後ろのカッコ内で指定した列の順番に対応するようデータを記述する必要があり、またそれぞれの列のデータ型に従わなければならない。

B.3.2 データの変更 <UPDATE>

SQL では、登録データに複数の条件を与えて一括で変更することも、1 つの行や列を指定して、その部分のみを変更することも可能である。データの変更には UPDATE 文を使用し、その基本的な構文は以下のとおりである。

UPDATE テーブル名 SET 列名 = データ, 列名 = データ ,.... ;

変更するデータは、列のデータ型に従うものでなければならない。また、また列制約やテーブル制約により入力できるデータが制限されている場合、それ以外のデータに変更はできない。他のテーブルから参照されている値を含むものも変更できない。

B.3.3 データの削除 <DELETE>

SQL では DELETE 文を用いることでデータの削除を行う。WHERE 句で条件を指定して、削除すべきデータを特定することも可能である。基本的な構文は以下のとおりである。

DELETE FROM テーブル名 ;

上記の構文では指定したテーブルのデータをすべて消去するが、他のテーブルから外部参照されている値を含むデータは削除できない。DELETE 文でテーブル内のデータを消去した後に DROP TABLE 文を実行すれば、表を削除することができる。

様式－３－３

DATABASE CONSTRUCTION AND FEEDBACK METHODS FOR OBSERVATIONAL DATA ACCUMULATED BY DISASTER PREVENTION AND SAFETY MONITORING NETWORKS

Uenishi, K.[1] Shimizu, N.[2] Ohtsu, S.[3] Yamachi, H.[3]
[1]The University of Tokyo [2]Yamaguchi University [3]Sumitomo Mitsui Construction Co., Ltd.

In recent years, ground disasters such as landslides, slope collapse, and debris flows have frequently occurred in wider areas. In this study, a ground monitoring network is constructed by utilizing communications and information technology, and collected data are quickly analyzed to contribute to prevention and mitigation of ground disasters. To be more specific, the observation data obtained by the safety monitoring network that has been constructed using the self-standing disaster prevention monitoring system are associated with the spatiotemporal information and sequentially accumulated in our database. Based on the accumulated large amounts of observation data, together with the terrain model, a method to evaluate the risk of e.g. slope collapse is examined.

***KEYWORDS*:** *safety monitoring network, mathematical sciences for geotechnology, compiling databases for ground observation data.*

様式－３－２

研　究　成　果　の　要　約

助成番号	助　成　研　究　名	研 究 者・所 属
第2015－02号	防災監視網による観測データのデータベース化とフィードバック手法の研究	上西　幸司・東京大学大学院工学系研究科

1. 研究目的

近年、地すべり、斜面崩壊、土石流等の地盤災害が頻発化し、発生箇所が広域化するだけでなく、その災害規模も増大する傾向にある。このような、地盤災害から人的資源や財産を守り、社会生活、生産活動を維持する取り組みに参画することは地盤技術者の使命である。そこで、本研究では、通信情報技術を援用した地盤監視網を構築し、採取されたデータを速やかに分析・フィードバックを図ることで、防災・減災に資するシステムを構築することを目的としている。

2. 研究手順

本研究は、政府の国土強靭化計画で示された二つの方策にしたがって、システムの開発を進める。具体的には、以下のようなシステムの構築を図るものである。

a. 地盤観測データの総合的な土砂災害対策へのフィードバック手法の設計と実装
b. 地盤観測データのデータベース化、ならびにオープンデータ・ベース化

具体的には、自立型防災監視システム等を用いて構築した防災監視網からの観測(計測)データを、位置情報や時間情報といった時空間情報と関連付けしつつ逐次蓄積したデータベースを構築した。また蓄積された大量の観測データを用い、地形モデルなどとともに崩落などの危険度を把握する手法を検討した。

3. 研究成果及び今回研究の新規性

本研究で定義した防災監視網は、以下の二つの要求性能を満たす監視網である。

a. 各地盤監視センサーが当該地点の観測網を管理運営する基地局と双方向の通信網で結ばれていること。
b. 当該地点にある地盤センサー群が、幾何学的なネットワークを構成することで、対象地点の巨視的な地盤挙動を監視しうる観測網を構成すること。

今日、地盤観測に採用されている地表地盤伸縮変位等の計測器は、局所的な測点あるいは測線を観測するため、対象地域の巨視的な地盤挙動を観測するためにはこれらの計器を効率的に配置する必要があるが、各計器自体の価格が相対的に高いだけでなく、その設置と電源供給・通信網確保に多大な費用を要するため、観測網を構築するに足る測点数を確保することが難しい。本研究では、比較的安価で消費電力が小さい加速度センサーを用いた傾斜計を複数設置し、対象地域全体の挙動の把握を可能とする観測網を、少なくとも地盤傾斜については構築できることを示した。

現在、喫緊に求められる地盤観測データ評価手法は、客観的な地盤の安定性評価手法と、未計測箇所における地盤挙動の評価手法であると考えられるが、このような問題は、従来、地盤工学的なアプローチにより研究されることが多かった。本研究は、数理科学的なアプローチによる研究を指向し、鉱物資源の埋蔵量推定等に用いられるKriging分析手法を地盤傾斜データを対象に設計･実装し、未観測地点のデータを観測点のデータから推定した。また、得られたデータから地盤全体の巨視的挙動を把握し、かつ観測網内で地盤災害の発生箇所を特定することの可能性に関して、検証した。

4. 研究成果の活用

得られた観測データならびに推定結果は、電子地図上にプロットされ視覚的な情報として管理者等に提供可能である。これにより監視対象となる土木構造物などのより広範囲な面的監視を実現し、従来の地点ごとの監視では把握が困難である複雑な事象についても把握できる。また管理者等は、提供される情報をリアルタイムで確認でき、災害時の避難計画等に活用することも可能である。