産・学・官の連携で都市と地域の未来をひらく

新都市社会技術融合創造研究会

道路防災モニタリングネットワークシステムの構築に関する研究

新規プロジェクト

プロジェクトリーダー

西山 哲

京都大学大学院
工学研究科助教授

参加メンバー

産 ㈱ 地層科学研究所、三菱電機㈱、
㈱ JP ビジネスサービス、㈱ ECR

学 京都大学大学院工学研究科

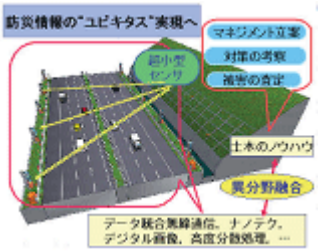
官 国土交通省 近畿地方整備局
(道路部、兵庫国道事務所、紀南河川国道事務所、 近畿技術事務所)

研究の目的

“土木”分野が培ってきたノウハウ(ソフト)と、“電子・機械”分野における我が国の先進技術(ハード)による異分野融合技術によって、国民の生活を支える重要な社会資本である“道路”に対する新しい防災技術の戦略を構築する。

研究の概要

ナノテクノロジーによるメンテナンス不要の超小型センサを道路斜面に無限個設置し、そのデータを電波によってリアルタイムで収集するネットワーク(ハード技術)を実現し、さらに計測データを管理基準値として照査するツール(ソフト技術)によって、「何が、どのように」なっているのかを「いつでも、どこでも、瞬時に」判断できる“ユビキタス”防災モニタリングシステムを実現させる。



研究期間 平成 19 年 1 月～平成 20 年 3 月

道路防災ﾓﾆﾀﾘﾝｸﾞ ﾈｯﾄﾜｰｸｼｽﾃﾑの構築に関する研究

研究計画書（案）

1. 研究テーマ

道路防災ﾓﾆﾀﾘﾝｸﾞ ﾈｯﾄﾜｰｸｼｽﾃﾑの構築に関する研究

2. 研究の背景

我が国はこれまで台風や地震といった天災に数多く見舞われてきたが，逆にそれによって耐震技術など世界に誇る土木技術が開発されてきた．また電子，精密機器また IT 関連技術などの分野においても，同じく世界に誇る工業力を有しており，新たにナノテクノロジーといった新技術を産出する技術立国の地位はいまだ確固たるものがある．これら土木分野の蓄積したノウハウと，電子・機械といった土木から見て異分野の技術を融合させることにより，新しい“防災”技術を確立させるのが本研究テーマの目的である．本プロジェクトは特に“道路防災”を対象に考

える．これは，道路は生活を支える重要な社会資本であり，ひとたびその機能が失われると多大な経済的損失が発生するにもかかわらず，日本列島においては地質的および地形的に危険な斜面に隣接した道路が多く，台風や地震といった天災時だけでなく，日常的に道路の利用者の安全を確保することに多大な労力を要しているのが実情であるため，管理者側にとっては便利で信頼できる，住民にとっては安心で安全な管理方法の実現への要求が今後ますます高まると考えられるためである．今後土木を取り巻く予算状況がますます厳しくなる一方で，構造物の維持管理マネジメントに関する新たな住民意識との調和を保ちながら，災害に対して安心・安全な国造りを目指す必要があり，「道路防災」を対象にどのような新しい異分野融合技術が提供できるのか期待していただきたい．

3．研究開発の目標

IT，ナノセンシング，高速通信およびデジタル画像などのキーワードで表わされる電子・マイクロメカニクスのハード技術と，土木技術が培ってきたソフト技術を産官学で提供しあうことより，それらを融合する新しい経済的な防災（・減災・避災）システムを構築することが目標となるが，あらためてその核となる技術を列挙すると次のようになる．

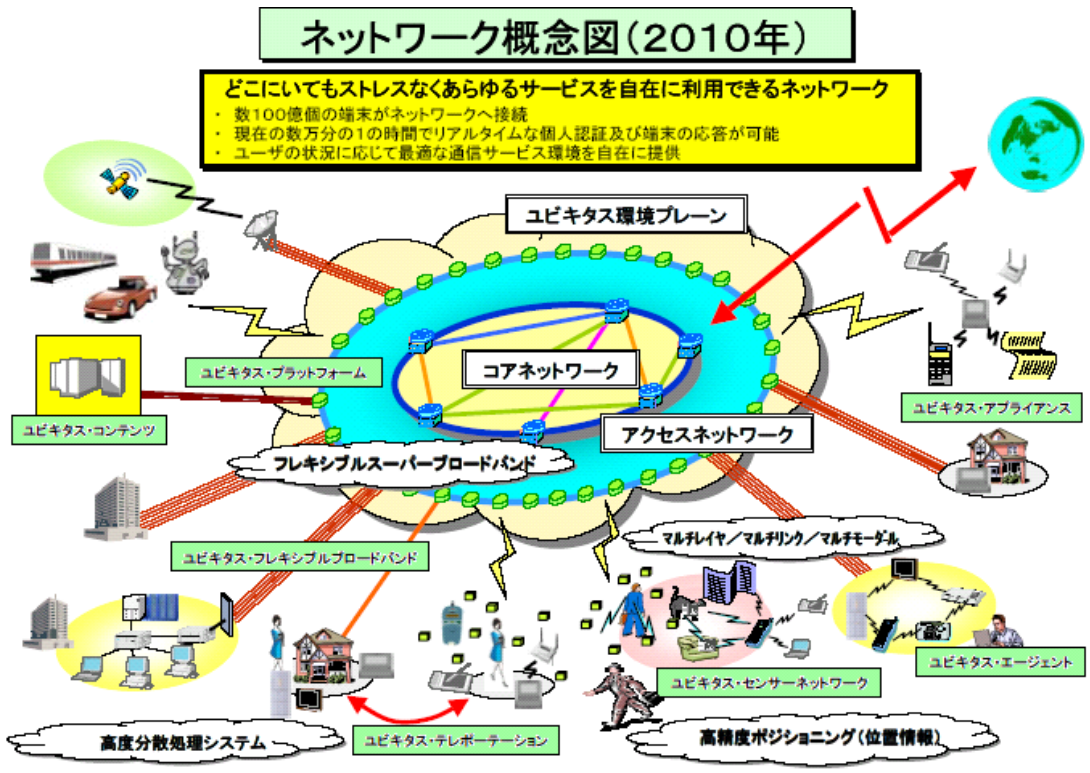
・「いつ，どこで，何が，どのように」という“ユビキタス”の概念を実現する計測センサネットワークシステムの構築．

：すなわち，無数に設置できる極小センサ，どこからでも当センサからデータを取得できる通信手段，どこにでもそのセンサ群を配置できるメンテナンスフリーなシステムによって，いつの段階でどのような状態になっているのかを判断できる経済的なセンサネットワークを実現する．

・計測データを活用するための“管理基準値”を考察するツールの開発

：気象・地形データなども加味した変形計測データの分析技術や計測データから斜面の状態を推定する３次元逆解析技術および計測データに基づく高速シミュレーション技術を開発し，防災のための判断に根拠を与える管理基準値を考察するツールを開発し前記センサネットワークシステムへ組み込む．

道路防災　－　“ユビキタス”の概念へ



総務省：ホームページより

防災ユビキタスを目指す変位計測システムについて

三菱電機株式会社　　西川　啓一
三菱電機株式会社　　鈴木　信弘
京都大学大学院　　大西　有三
京都大学大学院　　西山　哲

１．はじめに

従来より我が国では膨大な数の斜面不安定地点が指摘されている．平成8年度に実施された道路防災点検によれば,早期に対策を図る必要のある箇所が56700ヶ所，日常点検や定期点検により管理する必要のある監視強化箇所が145500ヶ所という数に上っているのは周知のとおりである[1)]．それにも関わらず危険と思われる箇所で，事前に対象となる斜面の崩落メカニズムを予測して対処したという報告は例が無く，岩盤崩壊現象に対する調査・計測事例が少ないのが実情であり，そのため崩壊メカニズムに関する調査研究はまだ進展が見られていない．危険な斜面の安定性を評価し，崩壊を未然に防ぐ措置を講じたり，あるいは被害を最小限にくい止めるためには，崩壊に至る前兆現象での変状をすばやく捉え的確な対策を検討するために有用な情報を与える計測技術は欠かせないものである[2)]．

しかしながら従来から使用されている計測機器の多くは局所的な観測であり，広範囲にわたる面的な観測を連続的に評価する計測手法の開発が急務となっている．一般に，岩盤の挙動をモニタリングする計測手法には次の特性を有することが要求される[3)]．

- 崩壊の前兆現象が突発的に生じるため，リアルタイムで挙動を捉えることができること．
- 広範囲の面的な挙動を捉えることが必要であるが，その場合でも低コストであること．
- 正確な挙動を把握するための3次元計測が可能なこと．
- 遠隔でモニターできるシステムを構築できること．

本論文は，これらの要求項目を満たす計測手法として電波を利用した計測法についての研究成果を述べるものである．電波を利用した計測の代表的なものの一つにGPS(Global Positioning System)がある．これは人工衛星から発信された電波を受信する地上のセンサの位置を知ることによって，当該受信局の3次元位置を検知するものである．本計測手法もGPSと同じ原理を利用し，電波発信器と受信器の組み合わせで当該機器の3次元位置をリアルタイムに検出するものであるが,GPSと異なり岩盤斜面上に設置した発信局の電波を受信局で検知し，当該発信局の3次元位置を計測するものである．GPSは約20000km離れた送受信器間で数cmの精度で受信器の位置を求めるが，対流圏や電離層などでの電波の擾乱を受けて数cmの計測精度を有する手法であり，逆に考えると送受信器の距離が数kmの場合で，電波の擾乱の要因が無ければ，mm以下の高精度の計測も可能となる．本手法はこの考えに基づく計測法であり，その他電波の特性を利用してリアルタイム，遠隔および3次元計測などの特性を兼ね備えている．本論文では，その計測原理と計測実験例を紹介し，岩盤モニタリングへ適用した場合の有用性を考察していく．同方式を用いて工場屋上にて長期試験を行った結果，1～3mmの計測精度が得られた．

本論文では原理と実験結果について報告する．

２．電波位相差変位計

電波位相差変位計とは，複数の受信アンテナで受信された信号の位相差から計測点位置を推定する電波を利用した測位方式である．位相差による測位の根本原理は，ＧＰＳ(Global Positioning System)を利用した相対測位法[4)5)]と共通である．本方式では受信アンテナが単純な構成で済むため比較的低コストであり，電波発信機とセンサの間隔が十分離れていない場合にも高い精度を確保できるという利点がある．また，一般のＧＰＳ測位法[4)5)]のように時間差を用いる場合と比べ，広い帯域幅の電波を用いなくとも高い精度を追求することができる．これは多数用いる電波発信機の低コスト化および小型化に有利である．図１に電波の位相差を利用した変位計測計の基本構成を示す．変位を予知したい複数の計測点に小型の発信機を取付け，これらの電波を，異なる位置に設置された少なくとも４個の受信アンテナで受信する．各受信アンテナでの受信電波を計測装置にて解析する．解析されたデータインターネット等の回線を利用して,発信機の微小変動をPC等を用いて離れた場所から監視できるというものである.以下,原理・計測精度について記述する．

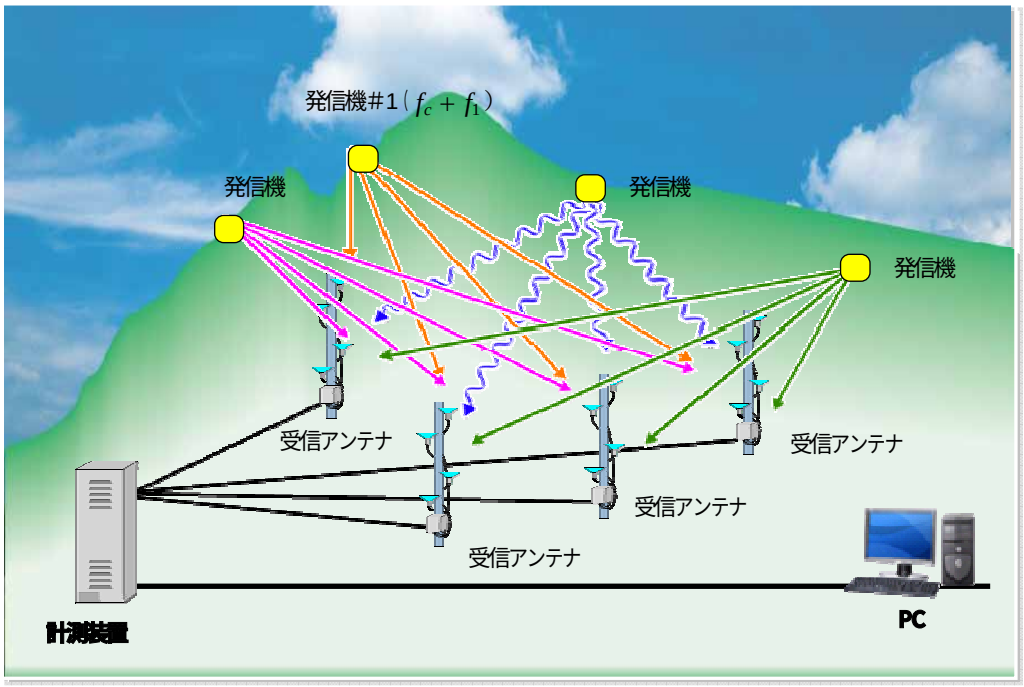


図1．電波位相差変位計基本構成

2.1　計測原理[6)~8)]

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$(f_1+f_c),\cdots,(f_2+f_c),\cdots(f_N+f_c)$の周波数の電波を送信する．ここで $f_1,\cdots,f_2,\cdots,f_N$ は fc に比べ十分に小さな値とする．これらの電波を，異なる位置に設置された少なくとも４個のセンサ（受信アンテナ）で受信する．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 $f_1,\cdots,f_2,\cdots,f_N$ の周波数の信号に変換される．これらの受信信号はA/D変換器でディジタル信号に変換された後，帯域通過フィルタを通過することにより，発信機毎の信号に弁別される．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．これは，複数の発信機すなわち，複数の計測点からの電波を独立，同時に処理できることを意味する．

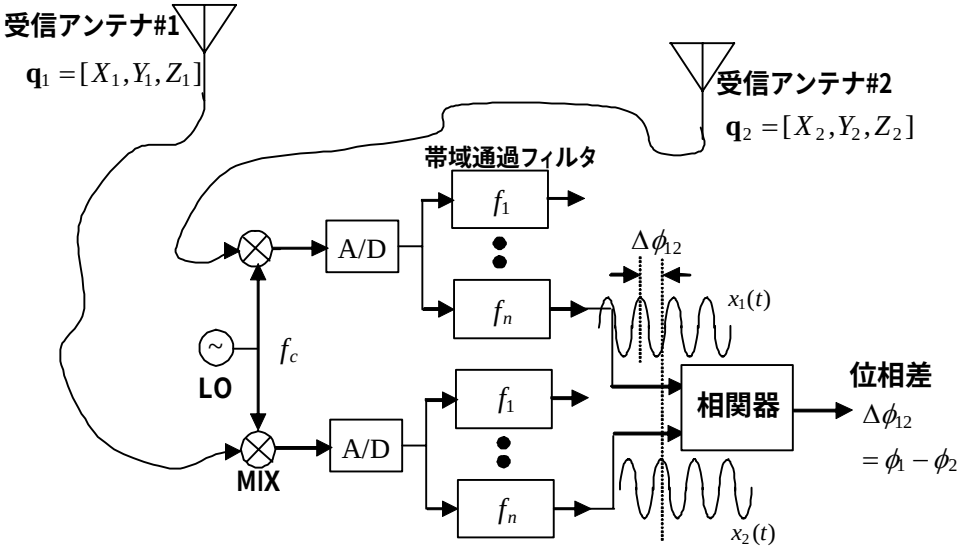


図2　計測装置ブロック図

2.2　計測精度[6)~8)]

電波位相差変位計による計測精度（ε_{rms}）は機器精度（ε_m）および設置位置による精度劣化（ε_p）と空界雑音誤差による精度劣化（ε_e）から見積ることができる．本節では発信機と受信アンテナの幾何学的配置による計測精度について記述する．

GPSと同様，電波位相差変位計についても，計測点の位置の変化が電波位相変化として敏感に検出できる配置とそうでない配置がある．

この配置による精度劣化を位置精度劣化係数：DOP（Dilution Of Precision）と呼ぶ.

計測点＃１（発信機＃１）の真値を $p=[x,y,z]$，微小な誤差を含む推定値を $\hat{p}=[\hat{x},\hat{y},\hat{z}]$ としたとき,

$$\begin{aligned} x &= \hat{x}+\delta x \\ y &= \hat{y}+\delta y \\ z &= \hat{z}+\delta z \end{aligned} \qquad \cdots（1）$$

と記述できる．このときの受信アンテナiの位置をそれぞれ，$[X_i,Y_i,Z_i]$ とした場合，DOPは次式となる.

$$DOP=\sqrt{trace\left(A^T A\right)^{-1}} \qquad \cdots（2）$$

ここで,

$$A=\begin{bmatrix} \frac{\partial f_{12}(\hat{x},\hat{y},\hat{z})}{\partial x} & \frac{\partial f_{12}(\hat{x},\hat{y},\hat{z})}{\partial y} & \frac{\partial f_{12}(\hat{x},\hat{y},\hat{z})}{\partial z} \\ \frac{\partial f_{13}(\hat{x},\hat{y},\hat{z})}{\partial x} & \frac{\partial f_{13}(\hat{x},\hat{y},\hat{z})}{\partial y} & \frac{\partial f_{13}(\hat{x},\hat{y},\hat{z})}{\partial z} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial f_{1N}(\hat{x},\hat{y},\hat{z})}{\partial x} & \frac{\partial f_{1N}(\hat{x},\hat{y},\hat{z})}{\partial y} & \frac{\partial f_{1N}(\hat{x},\hat{y},\hat{z})}{\partial z} \end{bmatrix} \qquad \cdots（3）$$

ただし,

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_{ij}(\hat{x},\hat{y},\hat{z})}{\partial x} &= \frac{(\hat{x}-X_i)}{\sqrt{(\hat{x}-X_i)^2+(\hat{y}-Y_i)^2+(\hat{z}-Z_i)^2}} \\ &\quad -\frac{(\hat{x}-X_j)}{\sqrt{(\hat{x}-X_j)^2+(\hat{y}-Y_j)^2+(\hat{z}-Z_j)^2}} \end{aligned} \qquad \cdots（4）$$

各項は計測点における，受信アンテナの方向成分を示している．このとき，電波位相差変位計の計測精度（ε_p）は次式により与えられる．ここでλは使用する電波の波長，kは精度乗数である.

$$\varepsilon_p = k(\lambda/2\pi)\sqrt{trace(A^T A)^{-1}} \qquad \cdots\cdots（5）$$

３．工場屋上による精度検証

電波位相差変位計の精度のうち，空界雑音による精度劣化を評価するために，三菱電機の尼崎の工場屋上を用いて精度検証を行った.

発信機と受信アンテナ設置後の写真を図３に示す．また，それらの配置を図４に示す．受信アンテナは直線状に上下２段に分けて各16機ずつ，計16個設置した．発信機は，横方向と縦方向（図４中X 方向とY 方向）の２軸にそれぞれ0～1㎝ の範囲で移動可能である．基準#1，#2は固定であり，受信系遅延移相量の時間変化を観測するための参照点としている.

この配置によるDOPを表１に示す．X方向（床面に平行・受信アンテナ列と平行方向），Y方向（床面に平行・受信アンテナ列と垂直方向），Z方向（床面に垂直方向）の順にDOP値は悪くなっている.

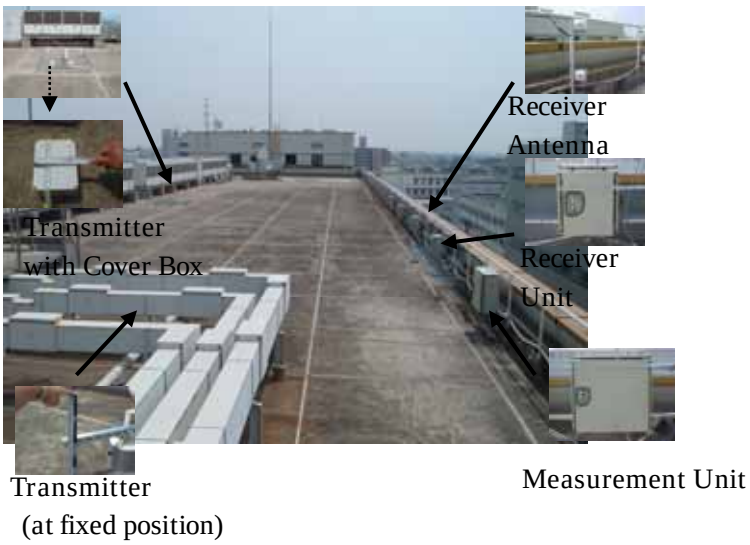


図3　実験風景（尼崎工場）

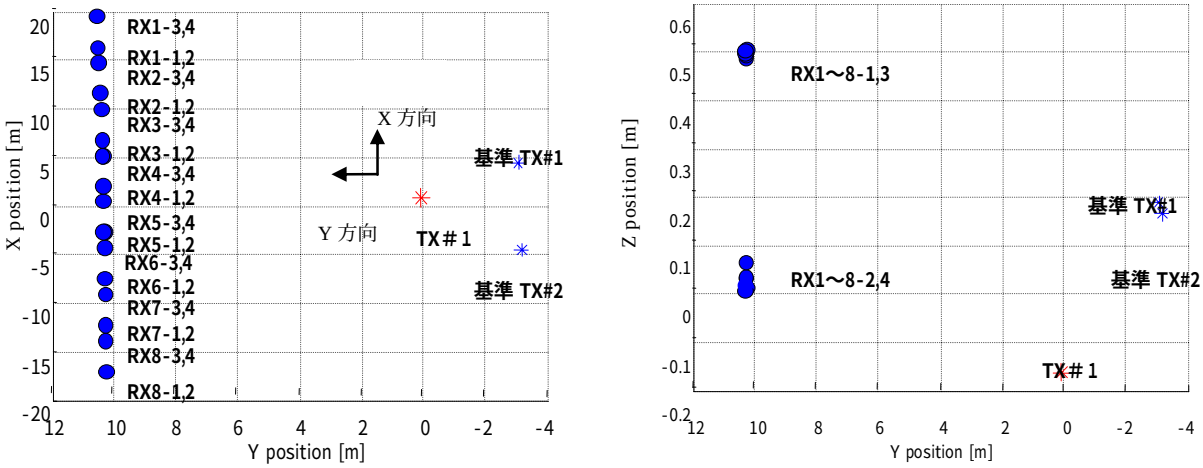


図4(a)　発信機，受信アンテナ配置平面図（直線配置）　　(b)発信機，受信アンテナ配置立面図

表1　直線配置 DOP

X_DOP	Y_DOP	Z_DOP	Total_DOP
0.226	0.849	6.513	6.572

3.1 微小移動計測

計測対象の発信機 Tx#1 を X 方向，Y 方向それぞれ 1㎜ 毎に 4㎜ 移動させた．このときの計測結果を図５および表２に示す．この実験は，計測精度の内，機器精度による精度劣化の評価である．各移動ポイントに対する計測値の平均との誤差は 0.07㎜～0.60㎜ と非常に高精度に計測されている．このとき，移動量と誤差の間に相関は見られない．また，標準偏差（ε_{rms}）は X 方向 0.284，Y 方向 0.741 と mm 精度が出ている．X 方向と Y 方向では X 方向がより高精度である．これは X 方向の DOP が良いためと考えられる．

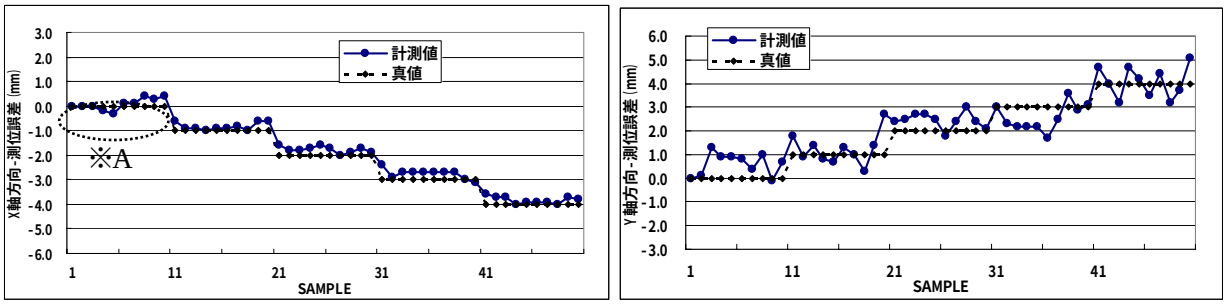


図５　微小移動時の計測結果

表２　XY 方向微小移動の計測結果[㎜]

変位量	0.00	1.00	2.00	3.00	4.00	DOP	ε_{rms}
$\overline{X}$	0.08	-0.82	-1.77	-2.76	-3.82	0.226	0.284
$\Delta_{\overline{X}}$	-0.08	0.18	0.23	0.24	0.18		
$\overline{Y}$	0.60	1.23	2.45	2.57	4.07	0.849	0.741
$\Delta_{\overline{Y}}$	-0.60	-0.23	-0.45	0.43	-0.07		

3.2　静止計測

次に，発信機を静止させたままで長時間の計測を行った．この実験は機器精度および設置位置による精度劣化とさらに空界雑音による精度劣化を評価できる．つまり図５中，※A で示した変動分についての評価である．

５日間（2006/7/22 0:00 ～ 7/31/ 00:00 ）にわたり，１時間に１回計測を行った．表３に計測したデータ（瞬時データ）の変動幅を示す．ところどころ，瞬間的な「飛び」が見られるが，変動幅は 3mm，rms で 0.48mm と長時間の測定においても非常に高精度であることが確認された．

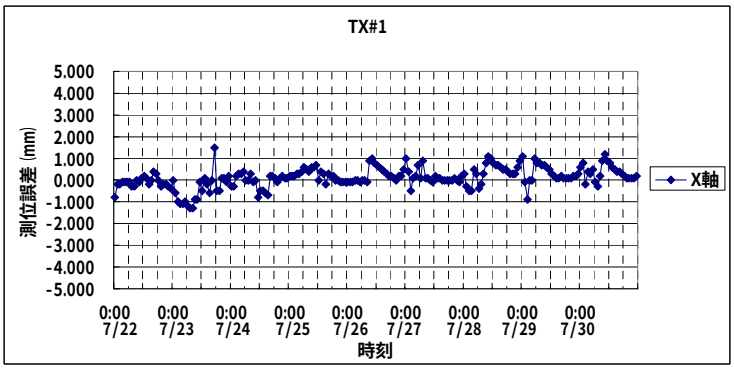


図6　長時間計測による計測誤差の変化

3.3　配置による計測誤差

電波位相差による変位計測方法は 2.2 にて示したように，計測精度発信機と受信アンテナの配置に依存する．同じ数の受信アンテナを配置を変えて微小変位の計測精度を検証した．

(1)　受信センサ直線配置（XDOP：0.78　YDOP：1.10）（図 7(1)を参照）
(2)　受信センサコノ字配置（XDOP：0.25　YDOP：0.60）（図 7(2)を参照）
(3)　受信センサ円配置（XDOP：0.24　YDOP：0.34）（図 7(3)を参照）

※

受信センサを発信機に対してそれぞれの位置に配置した条件にて，発信機を X 軸方向　0~4mm を 1mm ステップで変位させた場合において，測位値を求め真値との測位誤差を計測した．

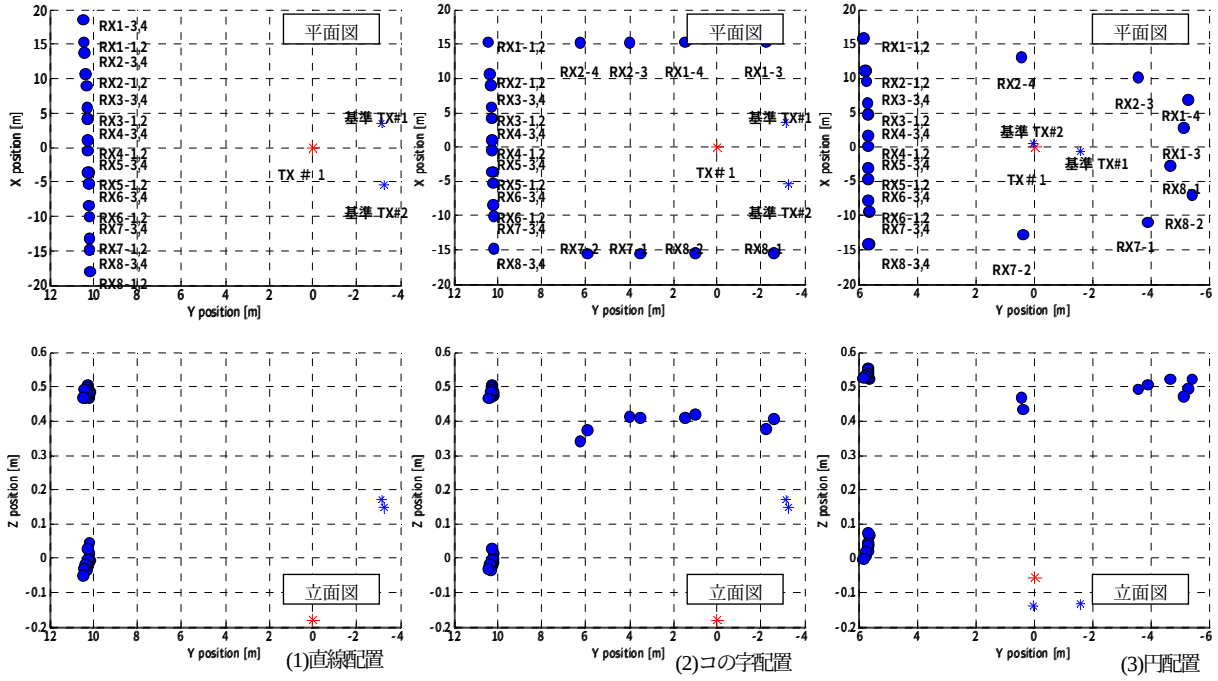


図7　受信アンテナ配置

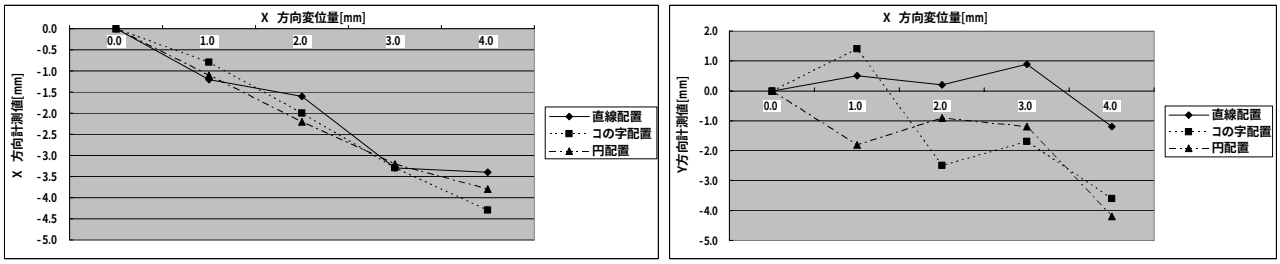


図8　受信アンテナ配置による計測結果の変化

表3　受信アンテナ配置と DOP，誤差の変化

	直線配置	コの字配置	円配置
X DOP	0.78	0.25	0.24
Y DOP	1.10	0.60	0.34
X rms	0.36	0.21	0.16
Y rms	0.71	2.19	2.15

コの字配置，円配置の Y 方向については正確に計測できていないが，X 方向については，DOP が良くなれば誤差が少なくなり，1mm を切る精度が達成できる目処が立った．コの字配置，円配置の Y 方向計測の不具合については検討中である．

4．結言

以上のように，電波位相差変位計は，幾何学的配置さえできれば，ノイズ成分が少なく高精度に微小な変位を計測できることが実証された．この計測方法は，被測定斜面に多くの発信機を設置することにより，リアルタイムに面的な動きを離れた場所より高精度に計測できるため，この電波位相差変位計による変位計測と斜面解析手法との連携により，今後岩盤崩落や土砂崩れの予知に道を開くことが可能と考える．

今後は環境温度による誤差，マルチパス等の電波環境変化等を追究しより高精度の計測を求めるとともに，実フィールドでの実証実験を行う予定である．

＜参考文献＞
1)大西有三, 西山哲：岩盤崩壊と落石問題に関する現状と課題　地すべり　Vol.39, No.1, pp1-13,2002.
2)大西有三, 西山哲：岩盤崩壊メカニズムについて, 地質と調査, 第 3 号, pp.9-15,2002.
3)大西有三, 西山哲:岩盤斜面崩壊対策としてのリアルタイムモニタリング技術, 地質と調査, 第 2 号, pp.22-27,2000.
4)御子柴 正, 藤田 聡, 新津 靖, 古屋 治, 相川 慎一郎, 藤村 俊, ”変位計測手法の高度化に関する既往の事例と今後の動向, ”　土木学会第 1 回構造物の破壊過程解明に基づく地震防災性向上に関するシンポジウム論文集, 2000-3.
5)土屋淳, 辻宏道：やさしいＧＰＳ測量, 日本測量協会, 1991.
6) 岡村　敦, 御子柴　正, 関口高志, 菊地　宏, “多点震動変位の位相差による計測法, ”信学技報 SANE2000-145, Jan. 2001.
7)A. Okamura, T. Mikoshiba, W. Yoshizaki, H. Nagai, A. Mogi, T. Sekiguchi, and H. Kikuchi, “A Multi-point Radio Displacement Measurement Method for Testing Quake-proof Structure,”Proc. of ASME PVPC, PVP-Vol. 445-1, pp.83-90, Aug. 2002.
8) N. Suzuki, T. Mikoshiba, and A. Mogi, “A Multi-path TolerANT Displacement Measurement System Using Radio Wave Phase Differences,” Proc. of ASME PVPC, PVP-Vol. 486-1, pp.181-187, Jul. 2004.

防災ネットワークシステム用３次元地形測量と表示手法の研究

西川啓一[1]・中村甚一[2]・井上達裕[3]・大西有三[4]・西山哲[5]
Nishikawa Keiichi, Nakamura Jinichi, Inoue Tatsuhiro, Ohnishi Yuzo, Nishiyama Satoshi

抄録：自然災害が発生したとき，国や自治体，管理者が事態を正確に把握し，よりスピーディな対応を取るために，詳細な電子地図を中心とする地域環境の管理システムへの必要性が高まっている．そのために３次元地形を正確に測量，モデル化，表示する必要がある．今回，航空写真測量と高精度GPS測量を組み合わせる方法を検討し，これにより150平方㎞という広範囲において，高さ10㎝精度を達成した．また，高精度，高解像度，広範囲の膨大なデータを正確にかつ高速に表示するエンジンに，任意の点で自由に座標・距離・断面等の計測機能を付加させることによりダムに適応した防災・維持・管理向け３次元地形管理システムを研究した．

１．目的

３次元GISをダム管理用システムとして利用する場合に求められる機能は，３次元測量結果から得られる精密な現在の河川状態の把握と，それによるダム下流放流制限流量および警報局地点での流達時間等の検討に資するための河道形状等の情報を得ることである．

また，システム導入の最大の目的は業務効率を向上させることにあり，日常的，継続的に利用されるシステムでなければならない．

そのために，高精度かつ効率的な３次元地形測量方法と同測量に基づく大容量データの３次元地形管理システムを検討した．

本研究では，九頭竜川支流真名川ダムから九頭竜川合流点下荒井堰までの 14㎞ の流域と大野市街を含む約150平方㎞の地域において，要求精度10㎝を満たすための実証を行った．

２．FKP方式高精度GPS測量（FKP測量）

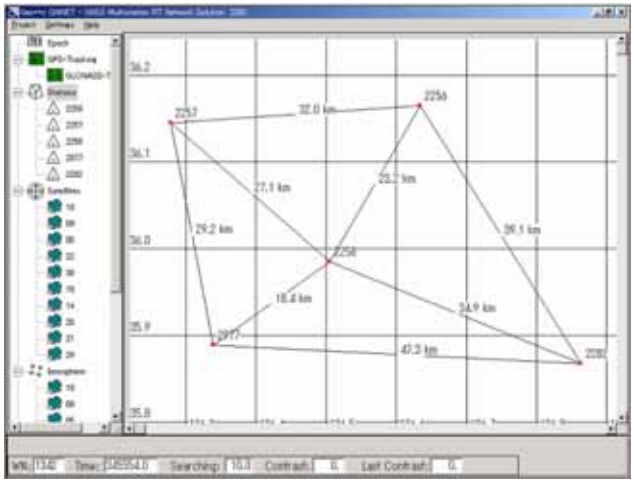
（１）　FKP測量

FKP 測量とは，FlaechenKorrekturParameter:面補正パラメータ方式による高精度 GPS を利用した測量である．測量エリアを囲むように配した電子基準点のデータを解析することによって，GPS衛星の電波に与える，対流圏・電離層・衛星軌道等による電波伝搬遅延誤差を明示的に計算し補正データを生成する．測量点においてこの補正データを用い，GPS衛星との擬似距離を正確に求めることにより高精度に座標取得を行うものである[1)-4)]．

国内においても，複数の自治体において，基準点成果の改測や道路台帳更新に利用するためFKP方式による直接座標取得による公共測量が実施されている．

下記にFKP方式の特長を列記する．

- SAPOS(ドイツ全国測量衛星測位サービス機構)のリアルタイムGPS測位の標準方式である．



図―1　基準点ネットワーク（FKP網）

- 緯度・経度方向に１㎝程度，高さ方向に3㎝程度の精度で測量が可能．
- 移動体測位可能[5)-6)]．
- 補正データ有効エリアが広い．

（２）　FKP網

FKP測量を行うため，測量対象地区を囲うように電子基準点のネットワークを構築する．今回は福井県大野市近郊の九頭竜川水系真名川を実験フィールドとした．このフィールドを囲むように国土地理院設置の電子基準点５局（大野，丸岡，白峰，福井池田，白鳥）を利用しFKP網を構築した．

各基準点の位置関係を**図―1**に示す．

１：正会員　三菱電機株式会社　IT宇宙ソリューション事業部　／京都大学大学院工学研究科
(〒100-8310　東京都千代田区丸の内2-7-3，Tel :03-3218-9028, E-mail : nishi-k1@mars.dti.ne.jp)
２：正会員　国土交通省近畿地方整備局　九頭竜川ダム統合管理事務所
３：非会員　国土交通省　近畿地方整備局　河川部　河川計画課
4,5：正会員　工博　京都大学大学院工学研究科　都市環境工学専攻　ジオフロント環境工学講座

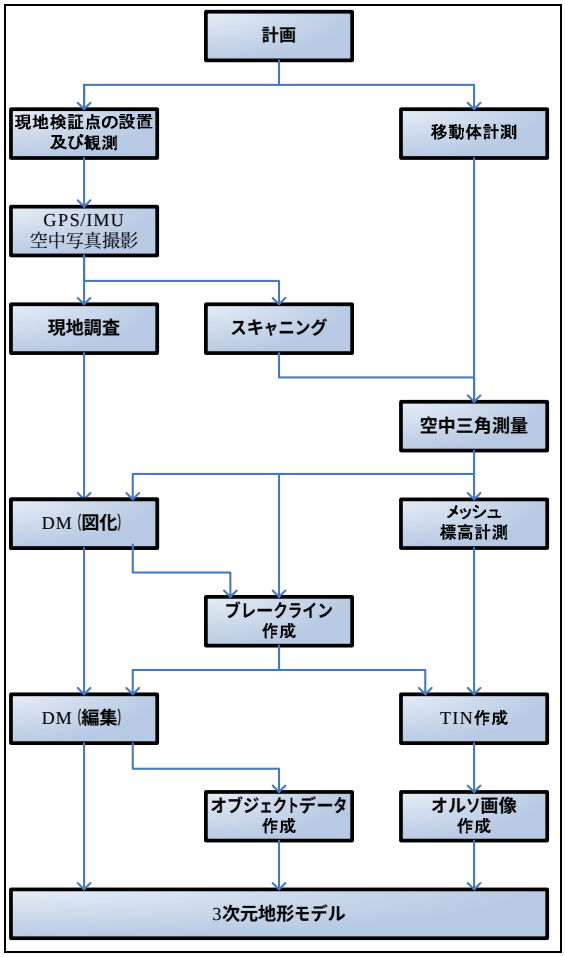
３．精密３次元地形モデル取得フロー

図―2 に３次元地形モデルの取得フローを示す．フローに沿って説明する．

（1） 計画

作業の方法，使用する主要な機器の選択，要員，日程等を考慮し作業計画を立案した．特に堤外地において高さ方向及び位置精度 10㎝ の精度を要求することから，航空写真の撮影縮尺は堤外地領域を 1/5,000（撮影高度 1,064m～1,364m），堤内地領域を 1/10,000（撮影高度 1,978m～2,428m）で立案した．

撮影縮尺については国土交通省公共測量作業規程において，「空中写真の撮影縮尺は，地図等の縮尺に応じて定める．（第 111 条）」と記載されている．また，地図縮尺の誤差を「第 162 条（例 1/500 縮尺では誤差 0.2m 以内）」で定めている事から，３次元地形モデルの精度領域を満たすように撮影縮尺を決定した．さらに，「 第111条 撮影縮尺を標準の80%を限度して小さくすることができる．」を適用し，堤外地領域を 1/5,000，堤内地領域を 1/10,000 とした．



図―2 ３次元地形モデル作成フロー

（2） 現地検証点の設置および観測

撮影計画立案後，現地検証点（対空標識）を国土交通省公共測量作業規程第 105 条に従って設置し，各々において FKP 測量を行った．

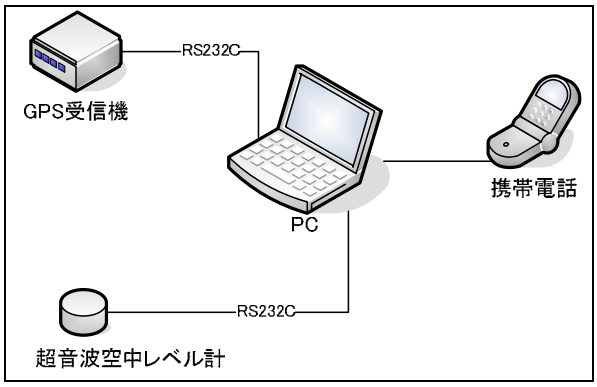
標定点の上に GPS 受信機を設置し，携帯電話または衛星携帯電話により FKP 補正データを取得，リアルタイムに測量した．

FKP 方式公共測量マニュアルの手順にそって，GPS 受信機を初期化し，測量を３回繰り返し，３回の測量結果の平均を取ったものを成果とした．

さらに，もう一度 GPS 受信機を初期化，再測量し，その結果と先の成果の差が水平 20㎜，垂直 20㎜ 以内であることを確認し点検としている．

（3） 移動体測量

FKP 方式による高精度 GPS を用いて移動体による簡易水準測量を行った．測定システムは**図―3(a)**に示すように，２周波 GPS 受信機（トプコン GR2100）と超音波空中レベル計（本多電子株式会社 HD700-B）とパソコンおよび携帯電話から構成される．GPS 受信機，超音波空中レベル計は**図―3(b)**のように車両の後部に取付けた．



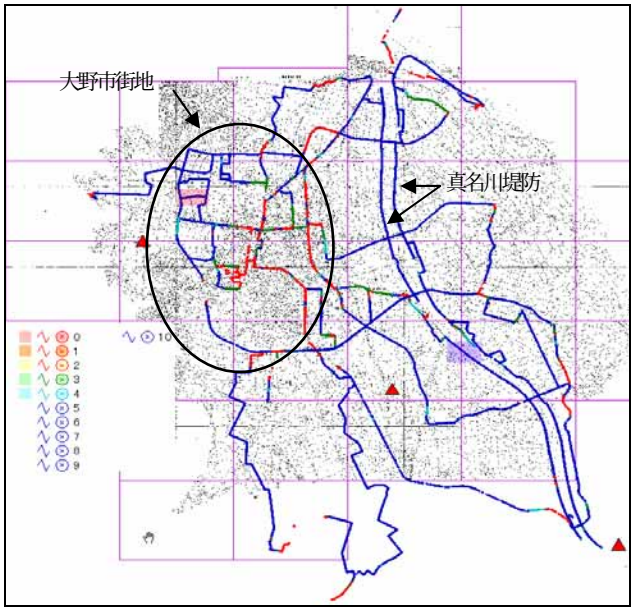
図―3(a) 移動体測量機器構成

図―3(b) 移動体測量機器取付状況

超音波空中レベル計は 0.5m～5m の計測範囲で分解能は1mm，3 回／秒の計測が可能である．超音波空中レベル計から RS232C を経由してパソコンでデータを取込み，合わせて GPS 受信機からの時間情報を計測値に付与することにより時刻同期をとる．FKP 方式により取得した座標から，GPS 受信機と超音波空中レベル計との距離，および超音波空中レベル計による地面との距離を引き算する事により地面の高さを求めた．

測量は２日間，真名川堤防，大野盆地の道路を縦横断するように140.6km を走行した．測量コースを**図―4** に示す．全走行距離は140.6km．その内，GPS が FIX し測位できた距離は107.6km，測位率は76.5%である．この間の走行速度は10～40km/h 程度で，1 秒毎に測量を行ったため，測量ポイント数は22051 点，点間距離は2m～11 m となる．

測量に費やした時間は11 時間10 分であった．



図―4　移動体測量実施コース

この FKP 測量による成果と水準器による直接水準成果を比較した結果を**表―1** に示す．

FKP 方式による静止測量と直接水準測量の標高差はほぼ1cm と非常に高精度である．また移動体測量との差は RMS で 33mm と目標の 10cm を十分達成している．なお比較は，直接水準測量と静止測量においては舗装道路における同一位置を，移動体測量においては同点からの測量座標（水平座標）に近くなる点で行った．

静止測量に掛かる時間は1 点10 分程度，移動体測量では1 点1 秒である．

（4）　撮影およびスキャニング

撮影は，航空機に設置されている GPS 受信機（位置座標計測装置）と IMU（慣性姿勢計測装置）同期空中写真撮影方式を採用した．これによって，（1）GCP（地上対空標識等）点数の大幅な削減，（2）空中三角測量の効率化を図ることができる．

スキャニングは14μm の解像度でおこなった．地上分解能は1/5,000 で7cm，1/10,000 は14cm となる．

表―1　測量方式による成果比較

静止測量[m]				直接水準[m]		移動体測量[m]	
点名	X	Y	H	標高	⊿標高差	標高	⊿標高差
A	46,115.380	1,732.415	155.717	155.727	0.010	155.771	0.054
B	44,953.641	190.827	164.604	164.595	-0.009	164.648	0.044
C	47,572.006	-2,146.030	186.412	186.400	-0.012	186.446	0.034
D	47,269.618	-2,089.365	185.450	185.452	0.002	185.477	0.027
E	48,849.117	-2,562.981	217.644			217.666	0.022
F	49,020.627	-2,948.696	221.504			221.519	0.015
G	49,441.109	-3,910.867	217.102			217.085	-0.017
H	48,629.337	-4,259.391	203.832			203.867	0.035

RMS= 0.03347

（5）　空中三角測量

航空写真と現地検証点，および移動体測量の成果より空中三角測量を行った．その上で，現地検証点と空中三角測量にて観測した検証点を高さについて比較した．

その結果，1/5,000 では47 検証点の RMS＝7.6cm，1/10,000 では58 検証点で RMS＝5.5cm と高精度な結果が得られた．

（6）　デジタルマッピング

デジタル写真測量システムに画像データをセットし，空中三角測量で得た位置情報及び高さ情報を観測（標定）しステレオモデルを作成，3 次元図化を行う．

（7）　ブレークライン

3 次元地形モデルをより精密にするために，橋梁，建物等を地物オブジェクトとして地形から分離し，個別にオブジェクトデータ取得を行った．また，実際の地形を忠実に再現させるため，地形の不連続箇所や急な変化部をブレークラインとした．さらに移動体計測で取得した築堤高，道路面高を補正データとして 3D 図化データを取得した．

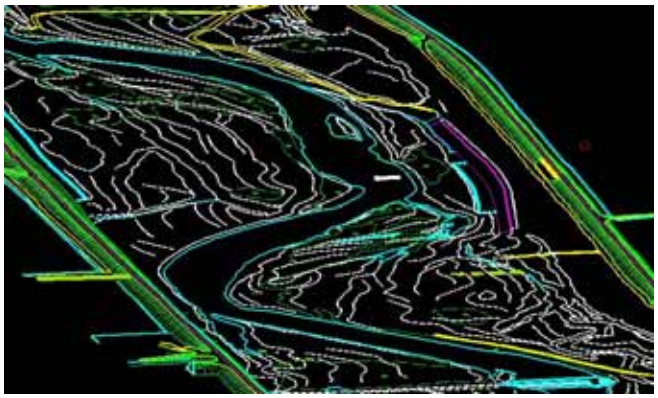
a)ブレークライン

道路，河川，築堤の境をブレークラインとした他に，傾斜地の上端下端部，尾根線，一定勾配から急勾配に変わる地形変化部など実際の地形を忠実に再現できるようにブレークラインとした．**図―5** はブレークラインの例で河道内におけるブレークラインを線で示したものである．

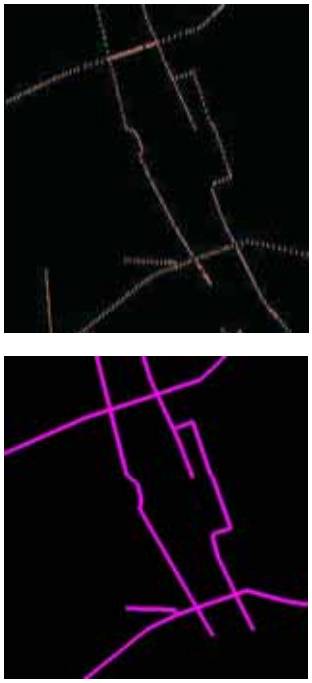
b)移動体計測による補正

移動体測量により取得された築堤高，道路面高の点データを，線データへ変換し，この線データに現地調査で測定された幅を加えて，これをブレークライン（道路，築堤）とした（**図―6**）．さらに移動体測量により取得された高さデータを加えて，これらのデータより

3 次元図化データの補正を行った.



図―5 ブレークラインの例

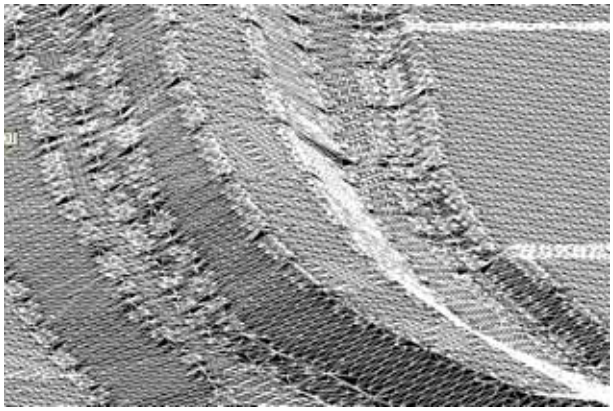


図―6 (a)道路点データ　　**(b)**道路ブレークライン

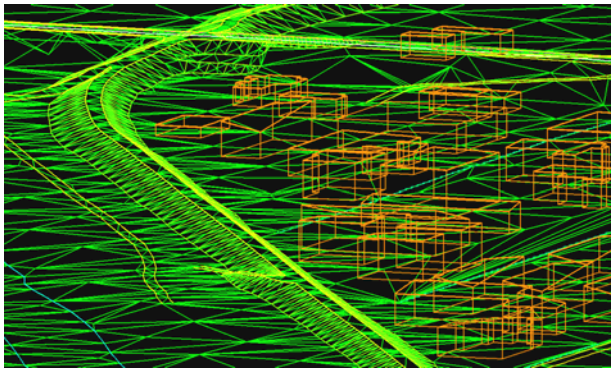
（8） TIN（不整三角形網）化

広範囲を高精度，高精細でモデル化する際，メッシュ方式ではデータ量が膨大となってしまい，通常のパソコンでは取り扱いできない恐れがある．データの増大を防ぎながら，忠実に地形をモデル化するために，今回は TIN(Triangulated Irregular Network :不整三角形網)ポリゴンで表現することとした．(**図―7**).

3 次元地形モデルは，築堤等急な地形変化を含む地形部分をブレークライン付 TIN にて表示, その上に橋梁・建物等地物オブジェクトを重畳表示することにより忠実にモデル化することが可能である（**図―8**).



図―7　TIN 化地形データ



図―8　ブレークライン付 TIN＋地物オブジェクト

（9） モデル化後精度検証

3 次元地形モデルをブレークライン付 TIN＋地物オブジェクトとして表した後の現地検証点において座標誤差を計算した.

堤防天端での 1102 箇所の検証点で RMS＝3.3㎝ と目標の 10㎝ を達成した．誤差 10㎝ に収まらない点はその内 30 箇所であった.

これとは別に堤内地代表点 65 箇所の検証点でも 11㎝ と非常に高精度を達成している.

4．3 次元地形モデル表示システム

以上の測量方式により3次元地形モデルは10㎝精度を達成した．TIN 化を行っても測量データは 3 次元地形モデルとオルソ画像を含めて 6GB 以上になってしまう．これをインタラクティブに操作できるようにするために，高速の 3 次元表示エンジン[7] を用い，その上に図上計測機能等を付加した.

用いた 3 次元表示エンジンは，表示に必要なデータをバックグラウンドで自動的にロード・アンロードするデータ管理機能を備えており，大規模データの高速な可視化を実現している．従って，ユーザが見たい位置にリアルタイムに移動でき，意図する任意の視点からの 3 次元表示を可能としている.

さらに，取り扱えるデータの最大容量はパソコンのハードディスクに記憶できる容量である．

以下に管理システムの特長を示す．

（1） 特長

描画は，150 平方 km という広範囲を精度 10cm を保持しながら，15 フレーム／秒以上の高速表示を可能とした．また，この表示システムは特殊なハードウェアを必要とせず，ノートパソコンでも動作可能である．

この描画エンジンは 3 億点を越える点群データ（航空レーザ測量データ)でも同様に 15 フレーム／秒以上を達成し，ストレスのない操作性を実現している．

a)空間データ

空間データとしては基本的には下記に示すデータを表示する．

- オルソ画像データ
- 数値地形モデルデータ（ブレークライン付 TIN データ）
- 地物オブジェクトデータ

b)視覚分析機能

視点の移動はマウスにて行う．左右のボタンと移動，ホイールによる片手による操作を実現した．

- 注目点に対する接近と遠離　（ズーム）
- 地面と並行に移動　（画面の上方，下方，右方，左方，それらの間の方向）
- 注目点を中心に回転（水平線回りのティルト，鉛直軸回りの回転）

ここで，注目点とは，画面の中心にある地形上の点を示す．

c)図上計測機能

表示している各ピクセルはすべて正確な座標を持っている．このため，図上で計測ができる．任意点の座標取得の他，下記に挙げる計測機能を持つ．

- 距離計測機能（任意の２点間）
- 断面図計測機能（任意の断面）
- 面積計測機能（任意の指定範囲）

さらに，経年変化や災害による地形の変化に対応し，時間軸における地形の変化も対応する．

d)その他表示

図上の計測のみではなく，GIS 的な機能として下記の機能を搭載している．これらの情報を重畳表示することにより避難誘導や災害対策等において的確な指示を行うことができる．

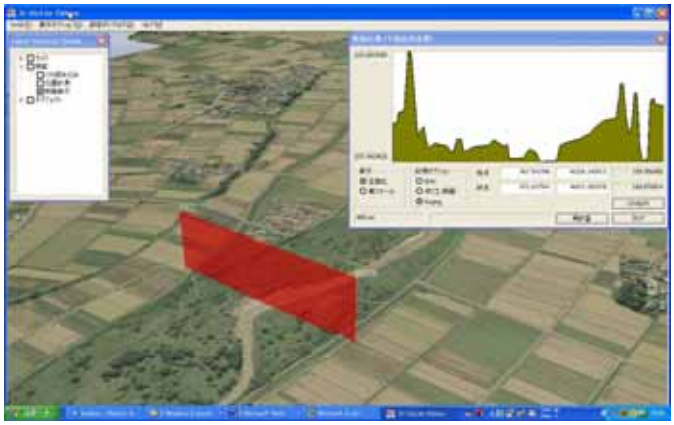
- 地名・施設名等の表示
- シミュレーション・分析データの重畳機能
- 浸水想定図
- 地すべり・急傾斜地崩壊等の危険地域
- ハザードマップ（避難経路・避難場所を含む情報）

（2） 表示例

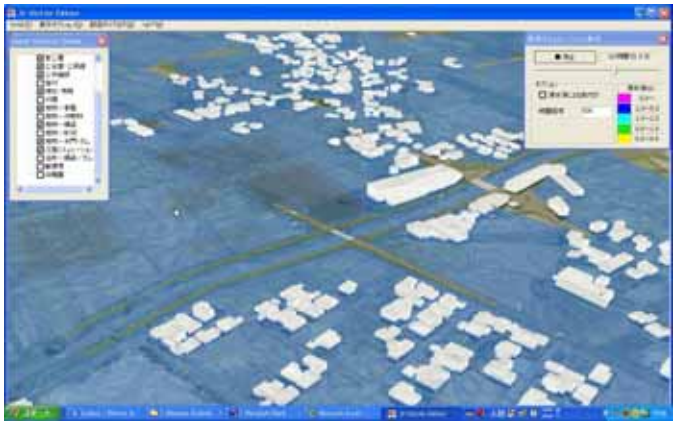
この表示ブラウザを利用して表示した例を**図－9**～**図－12** に示す．

図－9　3 次元表示の例（真名川ダム）

図－10　距離計測の例



図－11　断面計測の例



図ー12　洪水シミュレーション重畳表示の例

5．まとめ

以上，3 次元精密地形モデルの取得方法として，航空写真測量と FKP 方式による静止測量・移動体測量により広範囲で 10cm の高精度測量が効率的に可能であることを示した．地形モデル表現方法としてブレークライン付 TIN と地物オブジェクトを重畳することで，パソコンレベルで使用できるデータ量でありながら忠実に地形を表示できることを示した．このデータを利用する管理システムについては，高速の 3 次元表示エンジンを用い，これに各種機能を追加することで効率的な業務に利用できる．これらにより 3 次元測量結果から得られる精密な現在の河川状態の把握と，ダム下流放流制限流量および警報局地点での流達時間等の検討に資するための河道形状等の把握が可能となる．

また，管理データ・測量データの更新・蓄積により経年変化や災害時における被害査定，日常の維持管理にも利用できる可能性を示した．

謝辞：今回の実証にあたり，現地にて FKP 測量，移動体測量および航空写真撮影，デジタルマッピング等にご協力頂いたシン技術コンサル殿，GIS 関西殿に感謝いたします．

参考文献

1)齋藤雅行，柴原芳信，金井嘉伸，“VRS/FKP 方式によるリアルタイム GPS 測位の評価”，日本航海学会 GPS 研究会主催 GPS シンポジウム 2001 テキスト pp.115-124(2001)

2)浪江宏宗，萩原述史，新田信治，柴原芳信，齋藤雅行，金井嘉伸，金学進，安田明生，“仮想基準局（VRS)方式による RTK-GPS の評価”，電子情報通信学会論文誌　B，Vol.J84-B NO.12，pp.2160-2168(2001)

3)齋藤雅行，柴原芳信，金井嘉伸，“FKP 方式によるリアルタイム測位”，RTK-GPS 測位に関する研究発表会資料，pp.83～96(2001)

4)Gerhard Wuebbena,Andreas Bagge,Martin Schmitz, "Network-Based Techniques for RTK Applications",日本航海学会 GPS 研究会主催 GPS シンポジウム 2001 テキスト pp.53～65(2001)

5)笹野，”テレビ音声多重データ放送の開発経緯”映像情報メディア学会誌，Vol.57, No.5，pp603～608（2003）

6)浪江宏宗，田中　隆，西川啓一，長谷川博幸，笹野耕治，樊，春明，久保信明，“テレビ放送波を面補正パラメータ（FKP）伝送に利用したネットワーク型 RTK-GPS 測位システムの開発および実験的研究”，The Journal of Survey　測量　Vol.54, No.8 pp.14-17（ 2004 年 8 月）

7)” 3 次元地理空間情報システム” 三菱電機技報，Vol.80, No.1 pp.39（2006 年 1 月）