土木情報利用技術論文集　Vol.15,11-16,2006

Ⅰ－２　ダム管理向け３次元地形測量と表示手法の研究

Study on three-dimensional topographic survey and display system for management of dams

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 km という広範囲において，高さ 10cm 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．

Abstract: In order to recognize the volume and situation of hazard areas soon when natural disasters occur, we have been developing precise digital mapping system for management of the hazards. The management system consist of the three-dimensional precise topographic survey and modeling system. The precise survey system using airplane photogrammetry and GPS has the advantages of precision of 10cm in the vast area of square of 150 km. The coordinates, distances and sectional profiles at arbitrary points can be measured accurately on the three-dimensional display by using the three-dimensional modeling technology. This paper reports the study of application of the system we have developed to management of dams and demonstrates that the system is useful for getting various data for management of dams.

キーワード：３次元地形モデル，GPS 測量，航空写真測量，防災・維持管理システム
Keywords　：GPS,　FKP,　TIN MODEL,　3D Graphics

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 14km の流域と大野市街を含む約 150 平方 km の地域において，要求精度 10cm 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

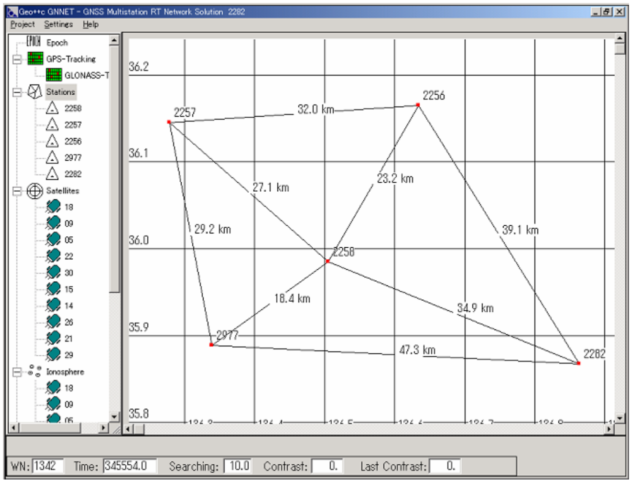
FKP 測量とは，FKP（FlaechenKorrekturParameter:面補正パラメータ）方式による高精度 GPS を利用した測量である．測量エリアを囲むように配した電子基準点のデータを解析することによって，GPS 衛星の電波に与える，対流圏・電離層・衛星軌道等による電波伝搬遅延誤差を明示的に計算し補正データを生成する．測量点においてこの補正データを用い，GPS 衛星との擬似距離を正確に求めることにより高精度に座標取得を行うものである[1)-4)]．

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．

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



図－1　基準点ネットワーク（FKP 網）

- 緯度・経度方向に 1 cm 程度，高さ方向に 3cm 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．

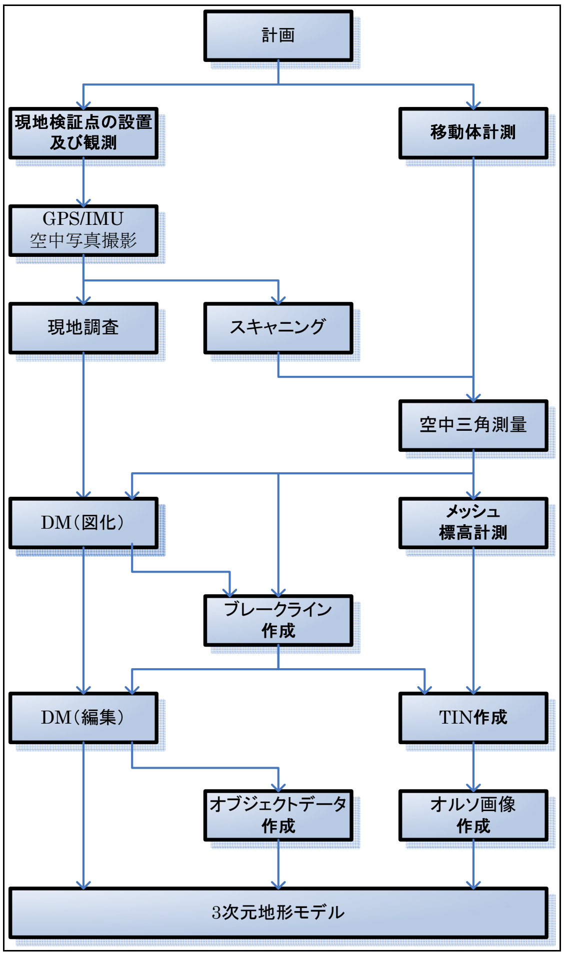
３．精密 3 次元地形モデル取得フロー

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 10cm 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．

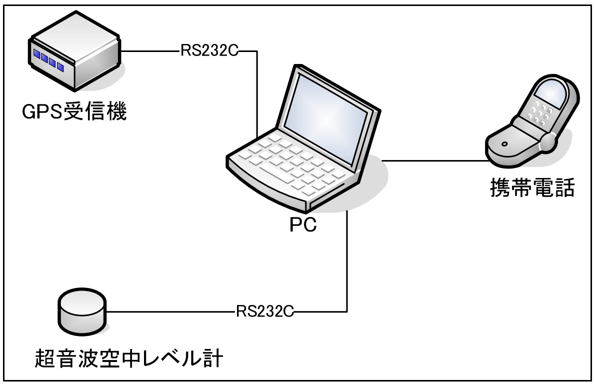
標定点の上に GPS 受信機を設置し，携帯電話または衛星携帯電話により FKP 補正データを取得，リアルタイムに測量した．

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 20mm，垂直 20mm 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．



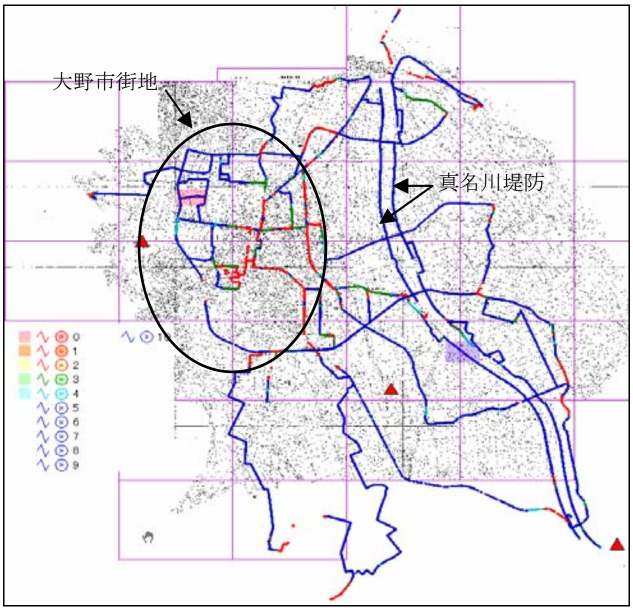
図－3(a)　移動体測量機器構成

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

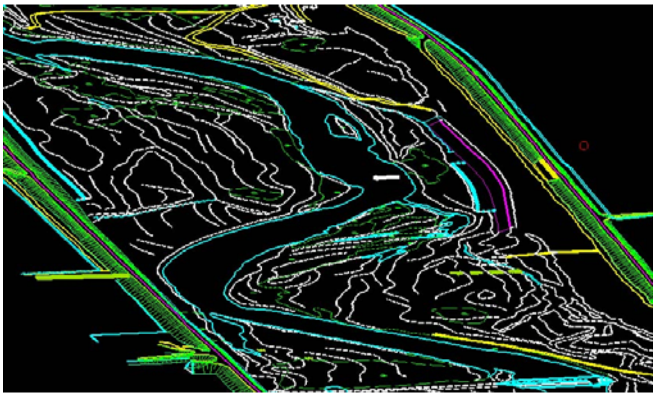
3 次元地形モデルをより精密にするために，橋梁，建物等を地物オブジェクトとして地形から分離し，個別にオブジェクトデータ取得を行った．また，実際の地形を忠実に再現させるため，地形の不連続箇所や急な変化部をブレークラインとした．さらに移動体計測で取得した築堤高，道路面高を補正データとして 3D 図化データを取得した．

a) ブレークライン

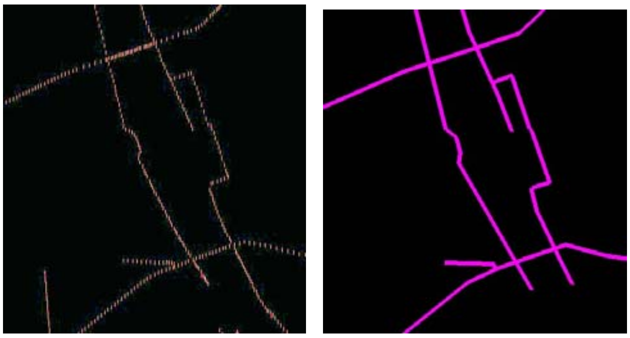
道路,河川,築堤の境をブレークラインとした他に，傾斜地の上端下端部，尾根線，一定勾配から急勾配に変わる地形変化部など実際の地形を忠実に再現できるようにブレークラインとした．**図－5** はブレークラインの例で河道内におけるブレークラインを線で示したものである．

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

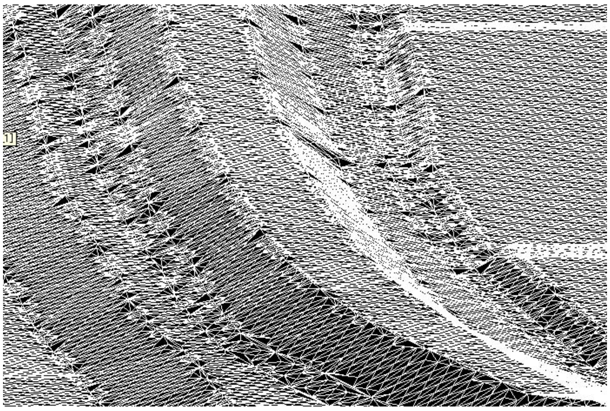


図－6 (a)道路点データ　　(b)道路ブレークライン

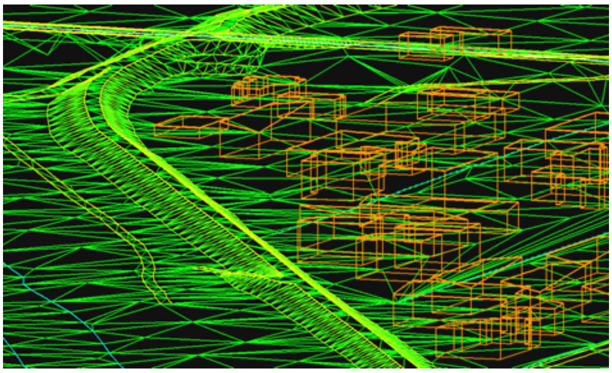
（８） TIN（不整三角形網）化

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＝3.3cm と目標の 10cm を達成した．誤差 10cm 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 11cm 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10cm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．

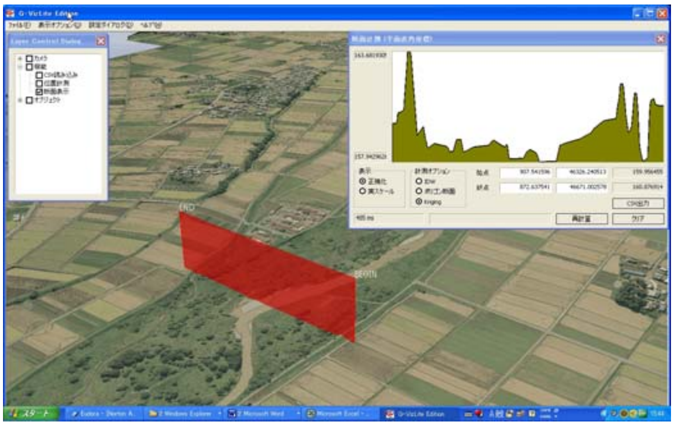
- 地名・施設名等の表示
- シミュレーション・分析データの重畳機能
- 浸水想定図
- 地すべり・急傾斜地崩壊等の危険地域
- ハザードマップ（避難経路・避難場所を含む情報）

（２） 表示例

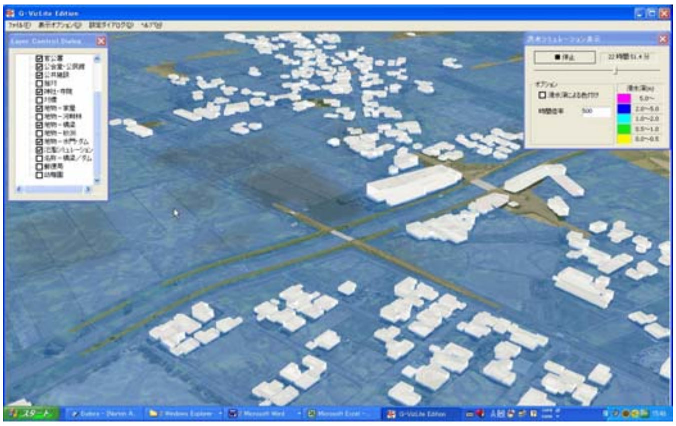
この表示ブラウザを利用して表示した例を**図－９～図－12** に示す．

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－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，これに各種機能を加え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）

(2006.5.19受付)