

マルチビーム測深機によるダム貯水池堆砂測量について

安里 司¹・金城 基樹²

¹沖縄総合事務局 北部ダム統合管理事務所 福地ダム管理支所長（〒905-1203 沖縄県国頭郡東村川田中上原1105-108）

²沖縄総合事務局 北部ダム統合管理事務所 福地ダム管理支所 管理第一係長（〒905-1203 沖縄県国頭郡東村川田中上原1105-108）。

近年の測量技術の進歩に伴い、ダムの堆砂量の確認方法について、より精度の高い新たな技術を取り入れることにより、従来の方法と比べ、より正確な堆砂量の把握を行うことが可能となる、マルチビーム音響測深機等による新たな測量手法を用いることとした。

ここでは、新たな測量方法へ転換するにあたり策定した「沖縄のダムにおける貯水池堆砂測量実施要領（案）」について紹介するものである。

キーワード 堆砂、マルチビーム、コンタースライス法、RTK-GNSS、3D

1. はじめに

ダムの管理項目のひとつに、上流からダム貯水池内に流れ込み溜まっていく土砂、いわゆる『堆砂』量の経年変化を確認する堆砂測量がある。

これまで、沖縄のダムにおける堆砂量の算出は、ダム毎に定められた所定の貯水池横断測線において、シングルビーム音響測深機による深浅測量を行い、その断面をもとに、断面積の変化量×測定区間距離の累計で算出する『平均断面法』が長く用いられてきたが、この方法では、測定断面間の地形変化は反映されない。

そこで、現在の最新測量技術であるマルチビーム深浅測量・レーザー計測等を用いて、貯水池内の地形を3Dデータで再現し、測線以外の地形変化も把握できる『コンタースライス法』による堆砂量算出を採用した。

平成22年度には、マルチビーム測深による堆砂測量を安波ダムで試行し、平成23年度からは直轄管理8ダム全てにおいて試行しており、現在、その過渡期にある。

北部ダム統合管理事務所では、沖縄の直轄管理ダムにおける貯水池の堆砂量を把握するための各種測量について、統一的な考えのもとで精度の高い測量を行い、適正な堆砂量を算出することを目的に、測量時期、方法、計算・図化、堆砂量の算定等を定めた「沖縄のダムにおける貯水池堆砂測量実施要領（案）」を策定した。

2. 平均断面法による堆砂量の算出（従来）

(1) シングルビーム音響測深機による横断測量

従来の貯水池横断測量は、ダム毎に定めた所定の貯水池横断測線に沿って、調査船をワイヤーロープ、TS等、GPS測深機のいずれかで誘導し、測深位置や船位を確認しながら、シングルビーム音響測深機で水深を測定する。沖縄の直轄管理ダムでは、図-1のように主にワイヤーロープによる測線誘導・船位確認方法が用いられてきた。

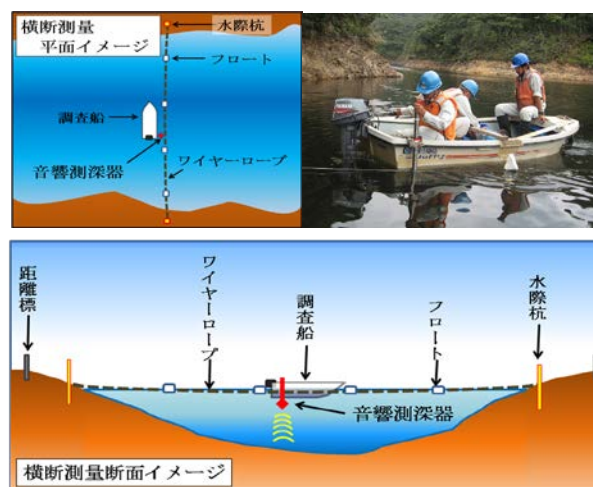


図-1 ワイヤーロープを用いた測定作業

(2) 浅所及び陸上部の測量

水際など水深の浅い箇所については、写-1のようにロッド（測深棒）やレッド（測深錘）を直接湖底に着底させて測定する。

また、水際杭より左右の測量端部である距離標までの陸上部は、地形の変化点を、距離標からの距離及び標高を測定する定期横断測量を行う。



写-1 ロットを用いた浅所部の測定作業

(3) 平均断面法による堆砂量の算出

上記により得られた断面をもとに、上流側の測線断面と下流側の測線断面の平均断面積に測線間距離を乗じて累計によって全体の貯水容量を算出する。

当該年度の総貯水量容量から、その前年度の総貯水容量を差し引いた値を当該年度の堆砂量として算出してきた。

平均断面法の場合、測線間の地形変化は反映されず、図-2のイメージ図のように断面間を平均として算出することになり、実際の地形とは異なるため、大まかな堆砂量の把握となる。

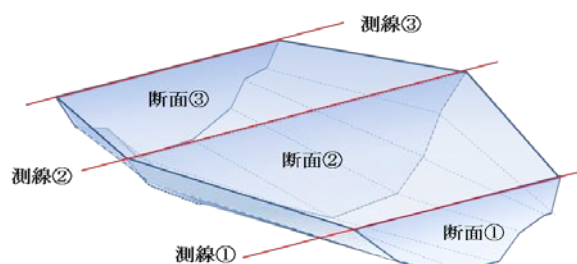


図-2 平均断面法のイメージ

3. 沖縄のダムにおける貯水池堆砂測量実施要領(案)による堆砂量の算出

(1) 実施要領(案)の構成

今回策定された実施要領は、総則、マルチビーム深淺測量、浅所・陸域等測量、計算・図化、堆砂量算定、分析・解析、報告書作成の7章と、参考として用語の定義から構成されている。

貯水池の堆砂量を把握するために実施する測量は、一般水面部については、非接触測量であるマルチビーム深淺測量を行い、要領(案)に定められた精度を確保するものとし、それ以外の浅所や陸域、樹木繁茂箇所等については、現地状況に応じて可能な限り精度の高い測量方法を採用することにより実施するものとした。作業手順の概要を図-3に示す。

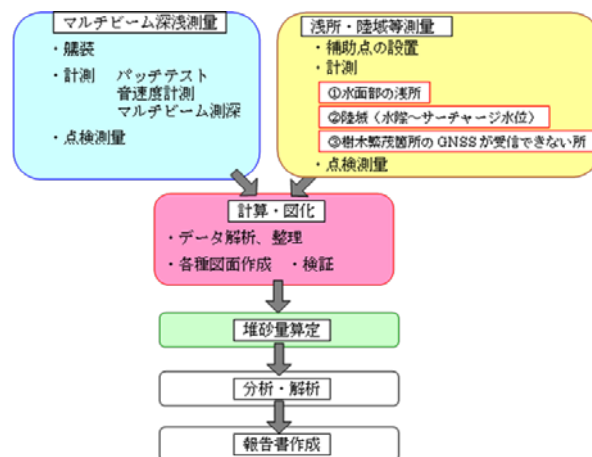


図-3 作業手順の概要

(2) マルチビーム深淺測量

a) シングルビームとの違い

シングルビーム音響測深機で発せられる超音波のビームが直下への1方向のみのものに対し、マルチビームの場合、図-4のように、航行と直角方向に扇状にビームを発射することで、短時間に広範囲の測深が可能となる。

マルチビームによる調査時の、測深位置や船位は調査船に設置したRTK-GNSS（リアルタイムキネマティックGNSS：Global Navigation Satellite System / 全世界的衛星測位システム）によりリアルタイムで測定するとともに、動揺センサーで船の揺れ補正を行い精度を高めている。

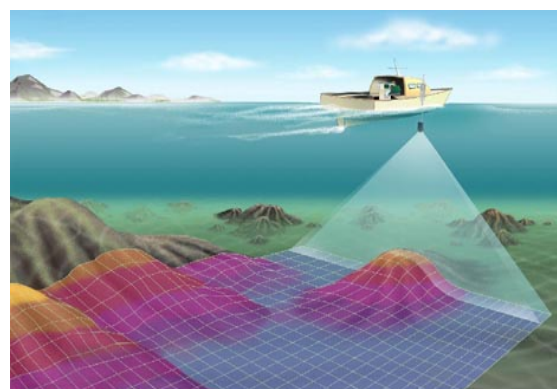


図-4 マルチビーム音響測深器による測深イメージ

b) マルチビーム測深システムの機器の仕様

マルチビーム測深システムの機器の性能は、ダムの最深部において1 m間隔以内の測量データを取得することが必要であるため、表-1に掲げるものと同等以上のものを使用することとした。

c) 測深の実施時期

水面部での測量時期は、効率的に最大限にデータ取得を行うため、可能な限り貯水位が高い時期に行う。

d) 機装

機装とは、目的に照らし必要な機器や設備を船舶等に設置することをいう。マルチビーム深浅測量に使用する調査船の機装は、調査船に各機器をジャッキベルト等で確実に固定させ、GNSS受信アンテナ、動揺センサー、マルチビームソナーのオフセット値を正確に計測する。

オフセット値とは、調査開始時にダムの任意の位置において、測深に使用するマルチビームソナー、動揺センサーなどの機器の位置について、GNSS受信アンテナからの距離を計測した値である。オフセット値は測量データの良否に大きく影響を及ぼすため、計測結果を計測簿等に記録し、監督職員による立会のうえ点検確認を行う。オフセット値の計測時は、調査船の総重量や傾きなどが測深時と同等の条件下のもとで行うよう留意する。また、各機器の設置は、精度向上のため、写-2のようになるべく集約して設置する。

e) 計測

計測前には、パッチテスト、音速度計測を行い、各種補正情報を正確に取得する必要がある。

測量区域に未測が生じないよう10%以上の重複計測が可能な計画側線を設定し計測を行う。また、測量精度を考慮し、地形状況及び水深に応じて図-5のようにスワッス幅を適宜調整する。また、湖底の計測データができるだけ等間隔となるように、等間隔測深機能を有するマルチビームを使用することが望ましい。

(3) マルチビーム測深が困難な箇所の測量

マルチビーム測深は測深区域に未測が生じないよう、水際部では可能な範囲でソナーを傾けて低速で航行しながら計測を実施するものであるが、それでも測深不可能な浅所や樹木繁茂箇所等でGNSSが受信できない箇所での測量は、リアルタイムに機器の位置を自動追尾して計測するATS（オートトラッキングシステム）方式によるシングルビーム測深機、無人リモコンボート、ADP（超音波ドップラープロファイラー）等を使用する。

その範囲は、マルチビームによる測量範囲と整合確認を行うため、重複させられる範囲を設定する。

実施時期については、マルチビームと同様、貯水位の高い時期に行う。

(4) 陸域部の測量

陸域部での測量は、既存基準点及びTS点を基準に、

表-1 マルチビーム測深機の標準仕様

項目	仕様	備考
マルチビームソナー	ビーム数：240ビーム以上	
	指向角： $0.5^{\circ} \times 1.0^{\circ}$	直交方向×進行方向
	分解能：1.25cm以内	
動揺センサー	ロール・ピッチ： 0.03° 以内	許容誤差
	ヒープ：5cmもしくは5%以内	許容誤差
音速度センサー	$\pm 0.025\text{m/s}$	許容誤差
GNSS測量機	最小解析値：1mm	RTK-GNSS方式



写-2 マルチビーム調査船の機装状況例

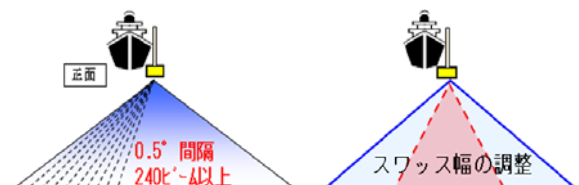


図-5 スワッス幅の調整

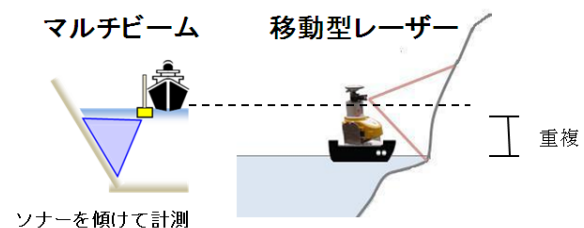


図-6 水際部のマルチビーム音響測深機と移動型レーザーによる測深イメージ

地上レーザー、移動型レーザー測量機、TS等を使用して測量を行うこととし、実施時期は、水面部の調査時とは逆に、できるだけ貯水位が低い時期に実施し、図-6の

ようにマルチビーム測深結果と重複させることで整合確認を行えるようにする。

測量範囲は洪水時最高水位（サーチャージ水位）以下の斜面崩落等、前回調査時からの地形変化が顕著な箇所とする。

(5) 点検測量

マルチビームソナー及びビームに異常がないか確認するため、計測前に調査船から、目盛りをつけたロープに反射板を吊るして水面下で上下させ、マルチビームソナーの反応を調査船に搭載したパソコン画面上でリアルタイムに確認する、バーチェックによる水深値点検を行い、計測簿等に記録する。また、測量完了時には測量区域全面積の2%について採用値と点検値の比較図と比較データの標準偏差を整理する。

(6) 計算・図化

a) オリジナルデータの作成

マルチビーム測深データに、図-7のように各種補正情報を統合してオリジナルデータを作成する。なお、使用する高さは、貯水位データ（EL）を基準とする。

b) フィルタリング

オリジナルデータから図-8のような水中の気泡や浮遊物などのノイズを除去するためのフィルタリング処理を行う。フィルタリングは、解析ソフトを使用して、自動で処理、または手動で処理を行う方法があるが、自動処理の場合は、有効なデータを誤って除去しないように、地形データの状況に応じて適切な設定を行うよう注意する。

c) メッシュデータの作成

フィルタリング処理したデータを基に、1m間隔のメッシュデータを作成する。

マルチビーム深浅測量以外の測量方法で取得した地形データは、マルチビーム測深で得られたデータとの整合確認を行ったうえでメッシュデータを作成する。

レーザー計測、シングルビーム測深等の非接触測量で得たデータは、樹木や流木等のノイズデータを含んでいることから、マルチビーム測深データと同様に、フィルタリング処理したデータを作成したうえで図-9のようなメッシュデータを作成する。

TS等で計測したデータは、地形状況を忠実に再現させるため、必要に応じて結線処理を行い「地形モデル」を作成して抽出法によりメッシュデータを作成する。

d) 3次元地形データの作成

マルチビーム深浅測量と浅所・陸域等測量での地形データ及び航空レーザーや過年度測量データを合成し、洪水時最高水位以下の3次元地形データを作成する。3次元地形データは、過年度データと本作業により得た測量データを合成して、最新のデータに更新する。このとき、既存データとの整合部で、図-10のように地形の差異が

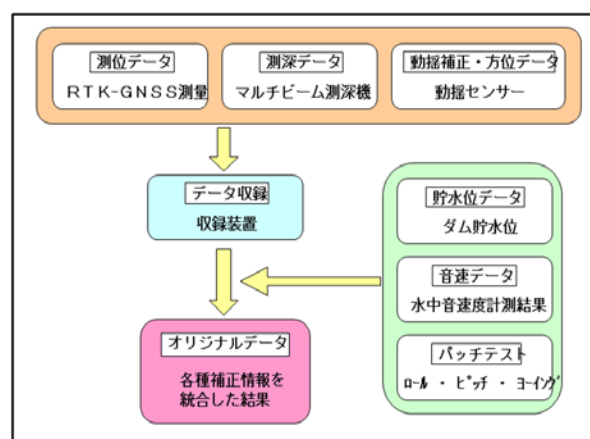


図-7 オリジナルデータ作成フロー

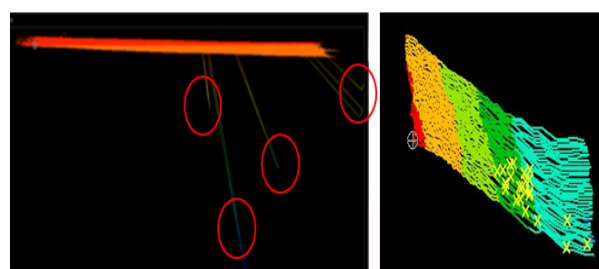


図-8 フィルタリング前のノイズ

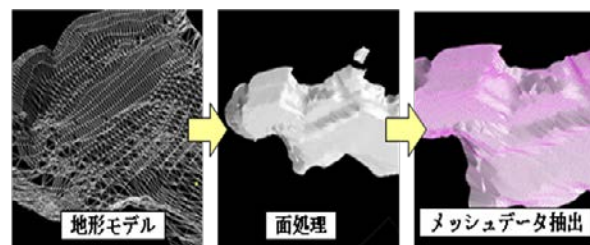


図-9 地形モデルを作成し抽出法によりメッシュデータを作成



図-10 データ整合部の差異

生じていないか確認を行い必要に応じて修正を加える。

e) 等高線データの作成

洪水時最高水位以下の3次元地形データ（1mメッシュデータ）から、等深線データを作成する。等深線データは3次元地形データに面処理（TIN：不整三角網）を行い、1m間隔の標高データを抽出する。

f) 断面データの作成

3次元地形データから、図-11のように各測線の断面データを抽出する。上流域で別途横断測量を実施した場合には、その測線の測量データを使用する。

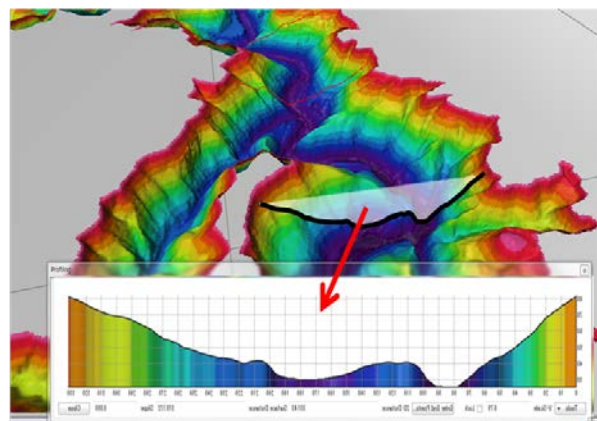


図-11 断面データの抽出

(7) 各種図面作成

3次元地形データ、等深線データおよび断面データを使用して、各種図面を作成する。作成する図面は、「河川縦断面図」「代表断面図」「等深線図」に加え、深度ごとに色表示した「標高段彩図」、貯水池のイメージが確認できる「鳥瞰図」及び堆砂状況が視覚的に確認できる「堆砂分布図」を作成する。各種図面の作成例を図-12に示す。

(8) 堆砂高の検証

作成した各種図面より、前回の堆砂測量結果から1m以上の堆砂高さの差が確認された場合は、該当箇所には浮力の影響を受けない程度の錘を垂らし、実水深を計測することで測深結果の検証を行い、仮に異常が確認された場合は再測を行う。

(9) 堆砂高の算定

堆砂量の算定は、コンタースライス法による貯水容量計算を行う。コンタースライス法は図-13のように標高ごとの貯水容量を算出するものであるが、国管理8ダムのH23年度調査結果の3次元データにより、標高間隔1m毎と0.1m毎で算出される値の差を検証した結果、 $-0.23\% \sim 0.55\%$ 、堆砂量では $-19,851 \text{ m}^3 \sim 72,459 \text{ m}^3$ の差が生じたことから、今回策定した要領（案）では精度の高い算出を行うため、その間隔を0.1m間隔で行うこととした。また、貯水位と貯水容量の関係を表す「H-V表」を作成する。

(10) 過年度データとの比較分析

堆砂量の算定結果及び堆砂分布図、現況写真等から、過年度の測量結果と比較して、地形の顕著な変化、過年度からの堆砂量の状況、堆砂傾向を確認考察する。

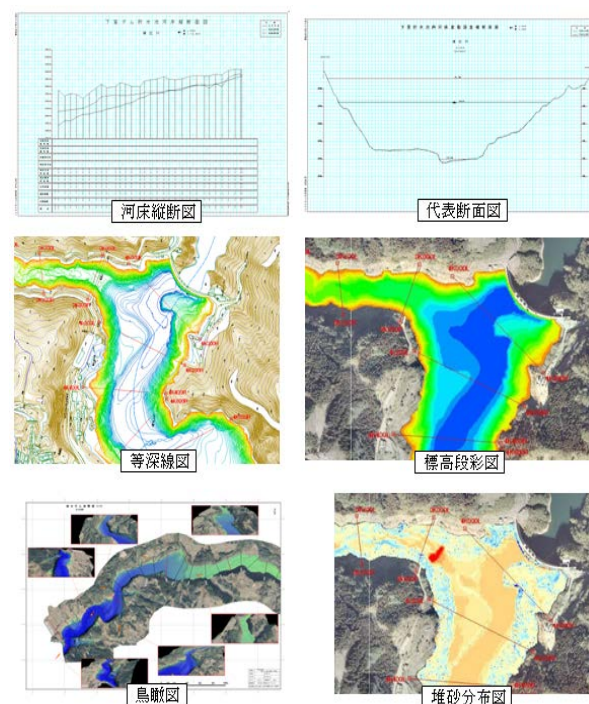


図-12 各種図面作成例

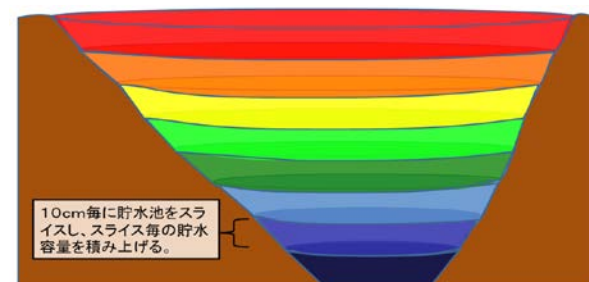


図-13 コンタースライスした貯水池のイメージ

4. 結果

今回、本要領（案）を策定したことにより、直轄管理全ダムにおいて、貯水池内及び浅所・陸上部の調査方法、マルチビーム測深機器の標準仕様、艀装時のオフセット

などの準備段階や計測時及び図化などのデータ処理時や堆砂量算出時における注意点などに関して、統一的な考えのもとで精度の高い測量を行うことにより、継続的に適正な堆砂量を算出することが可能となった。

5. 今後の課題

(1) 測定の誤差

マルチビーム測深を取り入れることにより、測定の精度は高くなったが、それでも人的、機械的な測定誤差は生じ得る。艀装時のオフセット確認の際に起こり得る人的誤差の要因としては、①オフセット計測の読み間違い、②記帳者の記帳ミス、③パソコンへの入力ミスなどが挙げられる。また、オフセット確認時と調査時の人員数の変化による重量の増減や、機器設置位置が、重心からずれている場合などに生じる機器の傾きにより喫水高さが変化し誤差が生じる恐れがある。仮に湛水面積 1 km^2 の貯水池において、喫水 1 cm の設定の違いで生じる誤差は $10,000 \text{ m}^3$ にもなることからオフセット確認の立会者は本要領（案）の最重要項目といえる。今後は、要領への立会時の留意点の追加や、オフセット確認の立会者が変わった場合でも、波浪の影響による読み値の誤差を最小限に抑えるよう、詳細な確認方法の統一を図る必要がある。図-13 オフセット計測値の記録例を示す。

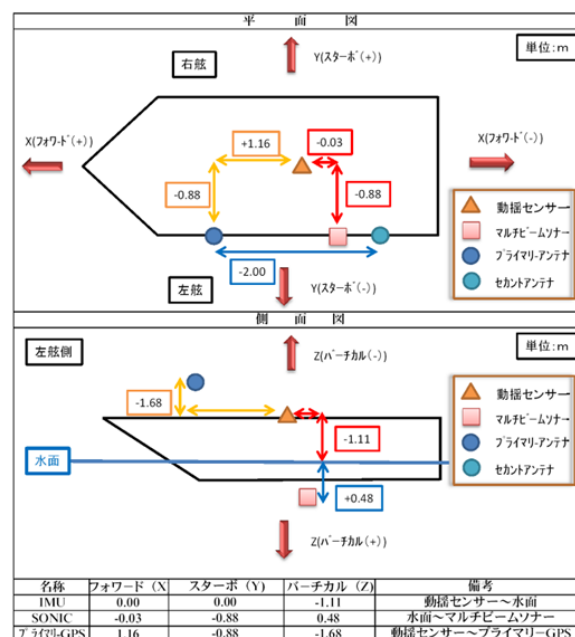


図-13 オフセット計測値記録例

(2) 上流部の測量精度の向上

平成24年度の現地調査結果では、上流部で既存航空測量データと比べ、大きな土砂崩れ及び地形の変化はみられなかったが、今後、そのような変化等がみられた場合には、現地測量対象箇所となり得るため、現地測量を実施する際の基準点を設置する必要がある。また、上流部では、写-3のように流木及び倒木によって調査船の航行できる範囲が限られたことから、調査前の流木等の撤去が必要である。



写-3 上流部の倒木・流木状況

(3) 音速度計の計測

音速度計の計測について、要領（案）で通常1回/日としているが、流入地点等では、水温の変化及び水質の変化により水中音速度が変わる。音速度は水深の補正にかかる重要な項目であるため、流入地点等では音速度計測を実施した方が良いと思われる。

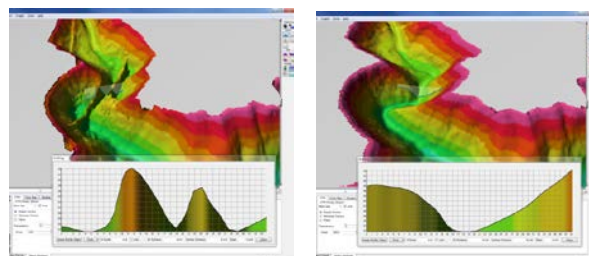


図-14 データ処理前後の違い

(4) データ処理の徹底

マルチビーム測深で計測されたデータのノイズ処理を行う際、処理の精度が低いと図-14のように現地地形と異なった地形モデルが構築される。適正なデータ処理がなされたかを最終的に確認するのは人の目で判断していくことになるため、調査年度や調査会社、監督員によってバラつきが出ないよう、今後統一したノイズ処理の確認方法を検討し定める必要がある。

貯水位データ及び音速度データの入力ミスについても同様に確認方法を検討する必要がある。

6. まとめ

現在、沖縄におけるダム貯水池堆砂測量は、計測・算出方式の移行における過渡期であり、今回策定した要領も、浅所や陸上部での測量方法の詳細や、3次元地形データの修正を要する箇所の確認方法や、修正方法に関する詳細、測量誤差を減らすための注意事項など、まだ追加記述の余地が残るものである。また、今後の更なる技術の進歩によって得られる新たな知見や、ダムの現場状況の変化によって生じる可能性のある問題なども踏まえ、今後も課題として抽出された項目を反映しながら、新技術を取り入れた検討を重ね随時改訂していく。

