

航空レーザー測深データの解析手法

富澤慎二郎*, 小野智三*

Analysis with airborne LIDAR data

Shinjiro TOMIZAWA* and Tomozou ONO*

Abstract

Japan Coast Guard has been working about how to incorporate airborne LIDAR (light detection and ranging) data to nautical charts while operating the airborne LIDAR system SHOALS 1000. In order to use airborne LIDAR data to nautical charts, not only knowledge and experience of the hydrographic survey but also understanding the characteristics of the airborne LIDAR data are necessary. We describe the analysis methods for airborne LIDAR data in the Japan Coast Guard.

1 はじめに

海上保安庁では、航空レーザー測深機 SHOALS 1000 を運用する中で、測深データを実際に海図に取り込むための解析手法を模索してきた。得られたデータを解析し、海図に反映させるためには、水路測量に対する知識や経験に加え、航空レーザー測深機で計測したデータの特性を理解する必要がある。本稿では、これらの特性を説明しながら、当庁が培った航空レーザー測深データの解析手法について述べる。

2 解析の工程

航空レーザー測深データ解析では、航空機から発射したレーザー光の海面及び海底からの反射波の往復時間および波形と、航空機の位置と姿勢データ等を結合し、計測した地点の位置と水深を求める。測深データの解析は、大別して次の3つの工程で行う。専用解析ソフトウェア (SHOALS Ground Control System (GCS)) で解析し、点群

(多数の点の3次元座標の水深あるいは標高) データを作成する。この点群データを、水深編集ソフトウェアを用いて、ノイズの除去や水深選択等の編集を行い、水深原稿図のために最適化する。その後、この最適化された水深データを、GISソフトウェアを用いて水深原稿図を作成する。

SHOALS GCS の解析法には、海面高と海底高の差から水深を求める DGPS (Differential Global Positioning System) 法と、航空機の高さを基準として海底の高さを計測する KGPS (Kinematic Global Positioning System) 法の2種類がある。詳細は後述する。

DGPS 法による解析

- ①データダウンロード
- ②潮位ファイルと Z₀ 区分ファイルの作成
- ③SHOALS GCS による自動解析処理 (Auto Process)
- ④三次元可視化ソフトウェア Fledermaus によ

* 海洋調査課 Hydrographic Survey Division

るデータ編集

KGPS 法による解析

- ①DL の楕円体高区分ファイルの作成
- ②GPS/IMU (Inertial Measurement Unit) 解析
- ③SHOALS GCS による Auto Process
- ④Fledermaus によるデータ編集

通常は DGPS 法と比較して測位精度が高い KGPS 法を用いて解析するが、必要に応じて DGPS 法を用いる場合もある。以下は両方の解析に共通の後工程となる。なお上記の Fledermaus によるデータ編集については、実際に計測したデータを例に第 7 章の中で詳細を示す。

水深編集ソフトウェアによる編集

- ①Mapper 1 m 処理
- ②SOUNDG_5 m の作成
- ③点検用等深線の作成
- ④SOUNDG_5 m の点検
- ⑤水深編集ソフトウェアによる成果作成

水深原稿図の作成

- ①海岸線の作成
- ②低潮線の作成
- ③手動での水深選択
- ④水深原稿図レイアウトファイルの作成

上記の作業工程に沿って、具体的な解析手法を以下に示す。

3 DGPS 法による解析

航空機の位置を、海上保安庁が運用する DGPS 局または静止衛星による有償の DGPS サービスである OmniStar サービスを利用して決定する。

近赤外レーザー（以下、「Infrared」という）で計測する海面高と緑レーザー（以下、「Green」という）で計測する海底高の差から水深を求め、海面高は Infrared で計測した過去 10 秒間の海面の高さを平均して“計測時点での海面高”を

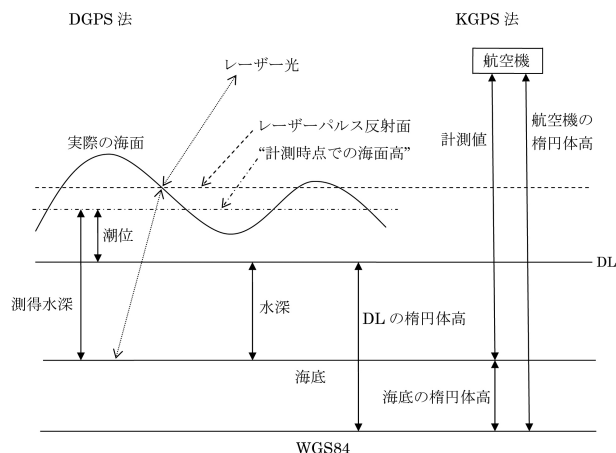


Fig.1 Conceptual diagram of depth analyses for DGPS and KGPS method in SHOALS 1000 system.

決定している (Fig. 1)。陸上等で過去 10 秒間の海面高が計測されない場合、水深を求めることができない。

測得水深の潮高改正を行うには験潮データが必要となる。また、最低水面から平均水面までの高さを Z_0 といい、複数の Z_0 が存在する調査区域を計測する場合は Z_0 区分が必要になる。

DGPS 法による具体的な解析手順を次に示す。

3.1 データダウンロード

計測データを SHOALS GCS でダウンロードする。これによりレーザーの生データ、位置と姿勢の生データ、計測時の写真データ等が作成される。

3.2 潮位ファイルと Z_0 区分ファイルの作成

潮高改正のための準備として、験潮から得た 5 分または 10 分毎の潮位データと、調査区域の Z_0 区分を用意する。潮位データは、計測直後にデータの点検に用いる場合は推算値を利用する。潮位データから、SHOALS GCS に適合する潮位ファイル (*.tid) を作成する。

次に、調査区域に Z_0 区分帯がある場合はそれを使用し、ない場合は過去の測量成果等から検討して調査区域の Z_0 区分を決め、SHOALS GCS に適合する Z_0 区分ファイルを作成する。

3.3 SHOALS GCSによる Auto Process

前項で作成した潮位ファイル (*.tid) と Z_0 区分ファイルを SHOALS GCS に入力し、Auto Process を実行する。これにより水深データが計算される。

3.4 Fledermaus によるデータ編集

Auto Process によって解析した水深データにはノイズが含まれる。これらのノイズは Fledermaus を用いて除去する。ノイズの発生要因や編集方法の詳細については第7章で述べる。

4 KGPS 法による解析

航空機の位置と高さは、計測時に取得した GPS/IMU データと地上の GNSS (Global Navigation Satellite System) 基準局観測データを、後処理キネマティック処理を行うことにより決定する。計測には GNSS 基準局が必要であり、航空レーザー測深作業と同時に基準局で観測を行う。当庁は国土地理院の電子基準点を使用している。

KGPS 法による解析では、航空機から海底までの高さが計測値となる (Fig.1)。航空機の高度は GPS で計測するため楕円体高が基準となる。この航空機の高度から海底までの計測値を差し引くことにより、海底を楕円体高で求める。さらに水深の基準面である最低水面 (Datum Level, 以下「DL」という) の楕円体高から海底の楕円体高を差し引いた値が水深となる。

DL の楕円体高は場所によって異なるため、計測によって得られた海底の楕円体高を水深に補正するために、調査区域全体の DL の楕円体高区分を作成して適用させる。DL の楕円体高区分を作成するには、DL と関連付けられた基本水準標 (Bench Mark, 以下「BM」という) の楕円体高と Z_0 区分、調査区域の DL の楕円体高モデルとして海域ジオイドモデル (笹原・他, 2006) 等を利用する。楕円体に対するジオイドと DL, BM の関係を Fig.2 に示す。

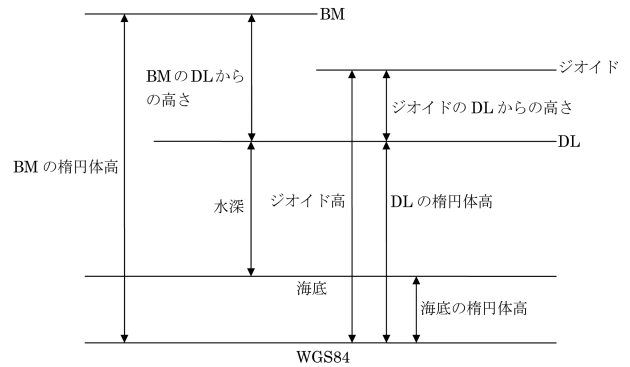


Fig. 2 Positions of Geoid, DL and BM, referred to the geodetic ellipsoid.

4.1 DL の楕円体高区分ファイルの作成

① メッシュの作成

験潮した場所を中心にして、調査区域全体におおよそ 1.8 km 間隔のメッシュを作成する。

② DL の楕円体高区分の作成

①で作成した各メッシュに対して、ジオイドモデルからその位置のジオイド高をそれぞれ当てはめる。その後、験潮した場所の DL の楕円体高を基準にして 0.1 m 間隔でジオイドの等高線を作成する。これを高さごとにポリゴンを作成し、それぞれの場所での DL の楕円体高区分ができあがる。

③ DL の楕円体高区分ファイルの作成

DL の楕円体高区分を SHOALS GCS に適合する形式に変換し、DL の楕円体高区分ファイルを作成する。これは調査区域の DL の楕円体高を 0.1 m 間隔の高さごとに区分したものである。楕円体高区分ファイルの例を Fig.3 に示す。黒い実線は電子海図データ、白い破線は DL の楕円体高の高さごとの区分を示す。このようにして作成した楕円体高区分ファイルを SHOALS GCS 上で適用することにより、水深が求まる。

4.2 GPS/IMU 解析

KGPS 法で解析を行うために、計測時に取得した GPS/IMU データと地上の GNSS 観測データを用いて、最終的な最も確からしい航空機の位置と姿勢データである SBET (Smoothed Best Estimated Trajectory) ファイルを作成する。この処

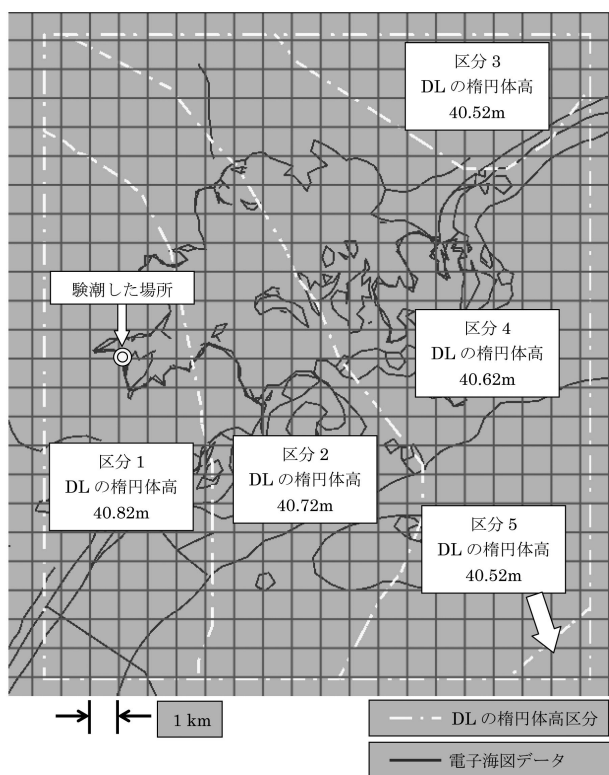


Fig. 3 An example of ellipsoidal DL height zone file. Black lines indicate the ENC data. The white dashed lines show the ellipsoidal DL height zone.

理には Applanix 社製 POSPac MMS (Mobile Mapping Suite) を使用する。POSPac MMS は後処理で SBET ファイルを作成する解析ソフトウェアである。

計測時に取得した GPS/IMU データと電子基準点データを用意し、GPS/IMU データをインポートする。インポート時に GPS データと IMU データが観測中に途切れてないか観測ログで点検する。次に電子基準点データをインポートし、解析処理を実行する。これによって計測時に取得した GPS データと IMU データ、地上の電子基準点データが結合され、SBET ファイルが出力される。

SBET ファイルには計測時の航空機の位置と姿勢が記録されている。出力した SBET ファイルの飛行航跡と処理結果が画面上に表示されるため、計測している場所で SBET ファイルが出力されているか、異常がないか点検する。

4.3 SHOALS GCS による Auto Process

第 4 章 1 節で作成した DL の楕円体高区分ファイルと前節で作成した SBET ファイルを SHOALS GCS に入力し、Auto Process を実行する。これにより水深データが計算される。

既に DGPS 法で解析し、データ編集作業を行っている場合、Auto Process を行うことによりデータ編集作業の内容が初期化されるため注意する。

4.4 Fledermaus によるデータ編集

Auto Process を行った直後のデータにはノイズが含まれているため、Fledermaus を使用してこれを除去する。ノイズが除去できたところで、水深を緯度 (Latitude)、経度 (Longitude)、深さ (Depth) のカンマ区切りで記した経緯度水深ファイル (以下、「LMD ファイル」という) を飛行作業毎にエクスポートする。

5 水深編集ソフトウェアによる編集

水深編集ソフトウェアによる編集作業は、Hypack, Caris 等の水深編集ソフトウェアを使用し、前章でエクスポートした LMD ファイルから海図で必要な浅い水深を抽出するために Mapper 処理や Sort 処理を行う。これらの処理によってデータサイズを小さくする。その後、点検用の等深線を作成し、これを使用して水深編集ソフトウェア上で再度データの点検を行い、水深原稿図に表示する水深ファイルを作成する。これらの詳細な手順を次に示す。

5.1 Mapper 1 m 処理

航空レーザー測深では広範囲に渡って計測することが多く、データサイズが大きくなり取り扱いが困難となる場合がある。そのため、重複して存在する水深は、次のように Hypack の Mapper 機能を利用して浅い水深を抽出し、データサイズを小さくする。

Mapper 処理は一定のサイズのメッシュを作り、同じメッシュ内に複数の水深がある場合にそ

の中で一番浅い水深を採用する処理である。メッシュサイズが大きいと、抽出される水深が位置的に不均等になる場合がある。この影響を小さくするために、通常5m×5mに1点の密度で計測している航空レーザー測深データでは、1m×1mのメッシュサイズでMapper処理を行う。メッシュで採用した水深の位置は平均化させずに計測した位置とする。

5.2 SOUNDG_5 m の作成

次に、Mapper 1 m 処理を行ったデータを5mでSort処理を行う。Sort処理は設定した範囲内で最も浅い水深だけを抽出していく処理である。5mでSort処理して作成したファイルをSOUNDG_5 m という。

5.3 点検用等深線の作成

SOUNDG_5 m にノイズが残っていないか点検を行うために、SOUNDG_5 m を使用して点検用の等深線を作成する。なお、この時点のSOUNDG_5 m にはまだノイズが含まれている可能性があるため、ここで作成した点検用等深線はあくまで点検のための参考資料として利用する。

5.4 SOUNDG_5 m の点検

SOUNDG_5 m を点検用等深線、現行海図や測量原図、陸図、計測時に撮影された写真や過去に撮影された航空写真、オルソモザイク等と相互比較しながら、ノイズが残っていないか次のように点検を行う。

5.4.1 点検用等深線との比較

SOUNDG_5 m と SOUNDG_5 m から作成した点検用等深線を重ね合わせ、ノイズが残っていないか点検を行う。ノイズが残っている場所は、海底地形や陸上地形の等深線と連続性のない渦巻状の等深線で表現される。ノイズの例を Fig. 4 に示す。赤い円で囲んだ場所にノイズが残っている。浅瀬や岸付近は、海側に生茂った木の根元付近を計測した点や、SWA (Shallow Water Algorism)

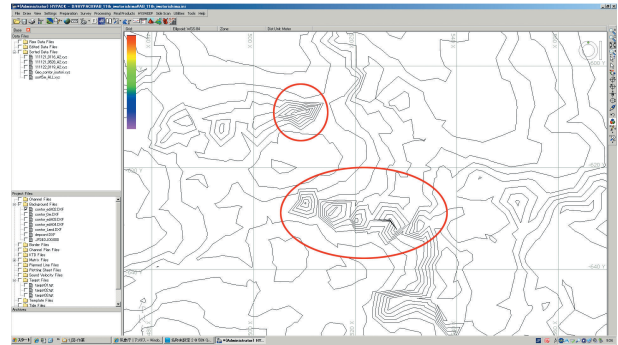


Fig. 4 An example of noise data found in contour map. The noise data remain in two red circles.

の動作不良ノイズ等に注意する。SWAの動作不良ノイズの詳細は第7章で述べる。ノイズにまぎれて干出岩を正しく計測している場合もあるので注意する。

5.4.2 海図や陸図との比較

SOUNDG_5 m と現行海図を重ね合わせ、計測したデータの水深値と干出の高さ、その位置、海岸線や低潮線の地形等に差異がないか点検を行う。必要に応じて測量原図とも比較を行う。差異がある場合はそれがノイズなのか、これまで計測されていなかった地形なのか、地形の経年変化なのか判断を行う。調査区域に小縮尺の海図しかない場合や、海図に記載された内容に明らかな位置ずれがある場合は、地形を知るために国土地理院の数値地図25000(地図画像)や基盤地図情報等が参考になる。

5.4.3 航空写真との比較

航空写真からは地図では把握できない詳細な地形等の状況がわかる。そのため、海図や陸図で状況判断が難しい複雑な海岸線や低潮線などの状態を容易に把握することができる。これら航空写真をSOUNDG_5 m と重畳させて比較検討を行う。

使用する航空写真は、経緯度情報付のオルソ画像を用いると比較検討が容易である。また、撮影年次は、可能な限り新しい写真を使用するようにする。大きな港湾では一般的に港湾工事が多く、海岸線付近の地形などが変化していることがあ

る。このような場所では写真が撮影された時期を確認し、計測状況と異なった場所を考慮しながら比較検討をおこなう。また、オルソモザイクの特徴として、地形変化が大きい崖、橋梁などでは局所的に画像が歪む場合がある。このような場所では、歪んだ写真に影響されないように留意しつつ、陸図等の諸資料を突き合わせて複合的に検討する。

また、使用する写真の選定をする場合、地形の経年変化が少ない自然岸線では古い資料でも参考になる場合があるため、撮影年次の古い写真も確認しておくことが必要である。

5.5 水深編集ソフトウェアによる成果作成

点検を終えた SOUNDG_5 m から、航空レーザー測深の各種成果を作成する。ここで作成する成果は、水深選択間隔の異なる水深ファイルと等深線である。また、成果の海岸線と低潮線を作成するための前準備として、参考用の海岸線と低潮線を作成する。作業の詳細は水路測量業務準則及び同施行細則（以下、「準細則」という）に従う。

5.5.1 水深ファイルの作成

航空写真等の諸資料との比較検討・点検が終わった SOUNDG_5 m から水深原稿図に使用する SOUNDG_1 及び SOUNDG_2 を作成する。

これら水深ファイルは水深密度が異なっている。SOUNDG_1 では水深密度を図上間隔約 10 mm とし、SOUNDG_2 では水深密度をその 9 倍密度とする。通常、航空レーザー測定の資料整理では、縮尺を 10000 分の 1 で行っていることから、水深間隔は SOUNDG_1 では 30 m、SOUNDG_2 では 15 m で作成している。

作成する順序は、まず SOUNDG_5 m に対して 15 m ソートを行い SOUNDG_2 を作成する。次に作成した SOUNDG_2 に対して 30 m ソートを行い SOUNDG_1 を作成する。

5.5.2 等深線と参考用の海岸線及び低潮線の作成

SOUNDG_2 から、Auto Contour 機能を使用して準細則に規定された水深の等深線を作成する。次に、SOUNDG_2 から Auto Contour 機能を使用して参考用の低潮線と海岸線を作成する。低潮線は本来 0 m だが、海図上に表示される水深に対する表示位置の整合性をとるため 0.09 m の値で作成する。また、海岸線は Z_0 の 2 倍の値で作成する。

参考用の海岸線と低潮線は、GIS ソフトウェアを使用して成果の海岸線と低潮線を作成する際に参考とする。詳細は次章で述べる。ファイル形式は GIS ソフトウェア上で扱うために DXF ファイルもしくは Shape ファイルとする。

6 水深原稿図の作成

前章で作成した水深ファイルと参考用の海岸線、及び低潮線を GIS ソフトウェアに取り込み、航空写真などの諸資料を参照しながら航空レーザー測深の成果である海岸線と低潮線を作成する。その後、水深原稿図に表示する水深を手動で選択する。このようにして作成した海岸線と低潮線、水深選択間隔が異なる 3 つの水深ファイルと、前章で作成した等深線を重ね合わせ、水深原稿図を作成する。作業の詳細を以下に示す。

6.1 海岸線の作成

参考用の海岸線、水深ファイル、航空写真等を参照し、GIS ソフトウェア上で海岸線（自然岸線と人工岸線）を作成する。

Auto Contour で作成した参考用の海岸線は、遮蔽物のない砂浜や岸壁など水深や標高を密に計測できている場所は参考になる。しかし、樹木や崖等の陰になり海岸線付近の地形の計測密度が低い場所は参考にできないことがある。また、航空写真が不鮮明で海岸線の位置を判読できない場合がある。

そのような場合は、現行海図や陸図等を参照するほか、付近に点在している計測点の高さと周囲

の地形の連続性を参考にしながら、最高水面の高さに対応する位置を内挿して作成する。

航空レーザー測深では、海岸線付近の砂浜に置いてある船や小屋などの人工構造物も同時に計測している。そのため、海岸線を作成する際は誤ってこれらの計測点の高さを採用しないように注意する。

6.2 低潮線の作成

参考用の低潮線、水深ファイル、前節で作成した海岸線等を参照し、GIS ソフトウェア上で低潮線（自然岸線と人工岸線）を作成する。

計測時の測得水深が0~2 m 程度の極浅海部は測深性能に限界があるため、計測密度が低い場合がある。そのような場所は参考用の低潮線が活用できないため、現行海図、陸図等を参考にす。計測できている点が少なく低潮線が判読できない場合は、付近に点在している計測点の高さと周囲の地形の状況を参考にしながら0 m の高さに対応する位置を内挿して作成する。

沖合の小さな孤立岩礁や沖防波堤、埋め立て地などを見落としやすいので特に注意する。同様に、沖合に単独で存在する浅所も注意が必要である。

一つの資料で判断せず、複数の資料を活用し、海岸線と低潮線の形状、及び性状の変化がないか判断しながら作業を行う。

6.3 手動での水深選択

水深原稿図に SOUNDG_2 を図の縮尺で表示した時、低潮線や海岸線上に重なって表示される水深は除去する。除去した水深の周辺は、水深密度が低くなる。そこで低潮線などと重複しないように、かつ浅い水深を SOUNDG_5 m から新たに選択しなおす。このような処理を行った後には、必ずこの結果を SOUNDG_1 にも反映させることが必要である。また、狭い湾内などの地形では、湾中央部の水深が選択されていない場合がある。このような場所についても同様な処理を行う。

6.4 水深原稿図レイアウトファイルの作成

水深原稿図のレイアウトは、SOUNDG_1、低潮線、海岸線、等深線、現行海図で作成する。レイアウトで使用する現行海図は、調査区域にある最も大縮尺の海図とする。また、現行海図の縮尺が水深原稿図の縮尺と大きく異なる場合は、現行海図は使用しない。表題、縮尺等の体裁は、電子測量原図及び準細則の測量原図例を参考にす。低潮線、海岸線等の属性は付与するが、ArcGIS で作成するときのみに限り、線種は描画しない。航空レーザー測深データの解析作業は以上となる。

7 航空レーザー測深データのノイズ

SHOALS で計測したデータ点群は Auto Process を実行する際に自動で陸上と水深、ノイズの識別が行われる。ノイズと識別されたものは自動的に除去されるが、除去されないノイズや誤った識別がなされている計測点があるため、これらは Fledermaus を使用して対話的にデータ編集を行う。

7.1 データ編集の手順

レーザー光は計測時の海象や気象、対象の状態に影響を受け、それがノイズの要因となる。例えば同じ場所であっても、無風で海面が鏡のような海面状況で計測した場合と、風が強く白波が磯に打ち寄せる海面状況で計測した場合は互いに発生するノイズのタイプが異なる。

データ編集作業は周辺地形との連続性を三次元表示で確認しながら、計測時に撮影した写真、現行海図や陸図、航空写真との比較、周辺の点も含めた反射波形の確認等、複数の資料を使用し、総合的にノイズなのか地形なのか判断する。一般的には、比較的ノイズの判断が容易な沖合や海面にあるノイズを先に除去し、判断に時間のかかる浅瀬や岸壁付近は後から行うと効率がよい。手順の例を以下に記す。

① 面的に計測されていない点の除去

計測された点がまばらに存在し、面的に計測されていない場所は周囲の地形と比較が困難なため

解析に使用できないので、これらを除去する。ただし他の飛行作業で計測したデータと合わせて密に計測されている場所もあるので注意する。

② 沖合データのノイズの除去

沖合にある魚網や養殖筏，船舶，台船など海上に浮かんでいる物体や，海中に沈んだ魚網，魚群等の海中浮遊物のノイズを除去する。

③ 浅瀬や岸壁付近のノイズ除去

浅瀬や岸に近い場所について，詳細にノイズと地形の判断を行う。

7.2 ノイズの特徴と対処方法

SHOALSでは，海面や海底，陸上からの反射パルスを次の4つのチャンネルで受信し，反射パルスの往復時間と反射波形を用いて計測した点の位置と高さを算定している。(高田，2008) Deep Green (532 nm) は水深12 m～13 mから50 mまでの海底，Shallow Green (532 nm) は水深0 mから12 m～14 mまでの海底，Infrared (1064 nm) は海面及び陸上地形，Raman (645 nm) は海面位置を特定する。受信した反射パルスはシステム上でFig.5のように表わされる。横軸は時間(nsec)，縦軸は対数スケールで表わされた反射強度である。Deep Greenはレーザーが海面に入る手前から，海中に入っておおよそ230 nsecまでの反射強度が示されている。また，Shallow Greenはレーザーが海中に入っておおよそ78 nsecまでの反射強度が示されている。

横軸の波形の下に表示されているティックは，システムがチャンネルごとに自動的に反射強度のピークから識別した海面や陸上，海底の位置をそれぞれ示している。SHOALSでは反射強度がピーク値の2分の1に達した時点が海面や海底の位置としている。黄色いティックはShallow GreenとRaman上では海面，Infrared上では海面もしくは陸上の位置を示す。水色のティック(Primary Depth)は海底の位置，赤色のティック(Secondary Depth)は海底の第二候補の位置である。水深は海面と海底(Primary Depth)反射の時間差によって決定される。

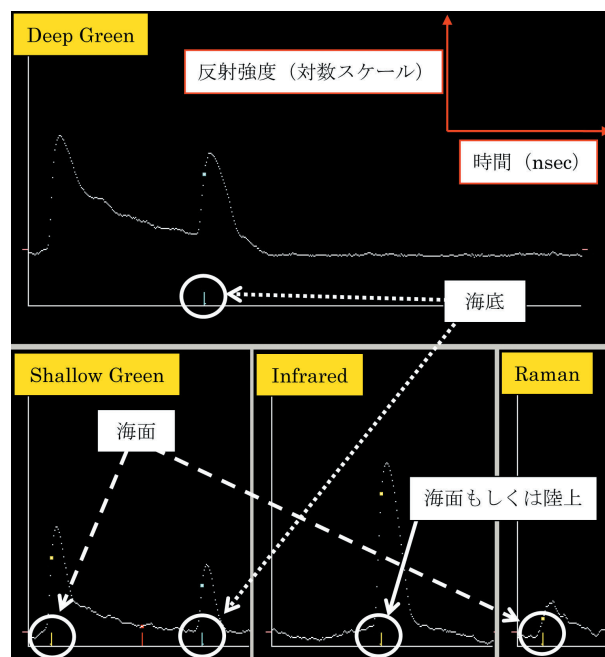


Fig.5 An example of observed waveforms by SHOALS system. Blue tick marks indicate arrival times of reflection at seafloor. Red tick marks show the secondary candidate of seafloor. Yellow tick marks in the displays of Shallow Green and Raman denote sea surface reflections and those in the Infrared display are reflections from sea surface or ground. See text for detail.

なお，Fig.5の例ではPrimary Depthで識別している海底反射以外に明瞭な海底反射がないため，Shallow Greenで識別されたSecondary Depthは正しくない。

以下に代表的な個々のノイズの特徴と対処法について述べる。

7.2.1 誤って海面を陸上と識別しているノイズ(特徴)

Infraredの反射波形がサチレーション(飽和)している。計測時に撮影した写真において，計測点が白波や航走波の表面上にある。

(説明と対処)

Fig.6の左に示したのは計測時に撮影した写真であり，写真上の赤い枠の中央で計測した点の反射波形が右に表示されている。この例では白波の

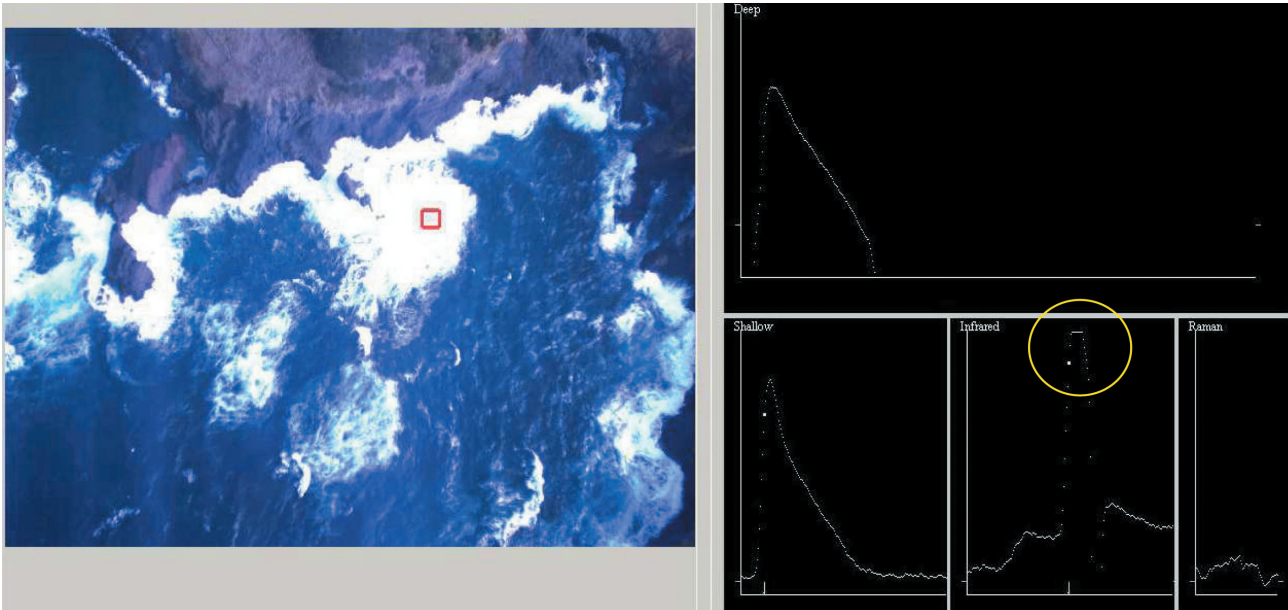


Fig. 6 (Right) An example of observed waveforms in which sea surface was incorrectly determined as land. These waveforms were measured at the center of the red frame in the left photo. Whitecap was identified in the photo. The Infrared waveform in a yellow circle is saturated. (Left) Photo of the sea surface, taken at the same time of the LIDAR survey.

上に計測点が落ちている。Infraredの反射強度が強くと、黄色い円で囲んだように反射波形がサチレーションしている計測点は、Deep GreenもしくはShallow Greenの反射パルスの有無にかかわらず、自動的に陸上と識別される。反対に、Infraredの反射強度が弱ければその計測点は海面と識別される。

白波は水の表面が荒くなり、かつ白色はレーザーの反射率が高くなるためInfraredの反射強度が強くなりやすい。船舶の航走波も陸上と識別される場合がある。海が荒れている時は波打ち際に白波が多く立ち、海面が陸上と識別される場合がある。このような計測点は除去する。

7.2.2 海面がフラットな状況下で生じるノイズ (特徴)

Infraredが反射パルスを検知できていない。計測時に撮影した写真を見て海面が鏡面のようにフラットな状態になっている (Fig. 7).

(説明と対処)

波が全くない鏡のような水面ではInfraredが単

一の方向に平行反射してしまい、Fig. 7に黄色い楕円で示したように海面を識別できない場合がある。その場合Ramanによって海面を識別するが、それでも識別できない場合に誤った水深を求める場合がある。これらの計測点はノイズとして除去する。

7.2.3 海中浮遊物 (魚網, 魚群) などのノイズ (特徴)

Deep GreenもしくはShallow Greenの反射波形に海面からの反射を除く二つ以上のピークがある。別なフライトでオーバーラップして計測したデータと比較し、同じ場所で対象が計測されていない。対象が面的に計測されておらず、周囲の計測点との連続性がみられない (Fig. 8).

(説明と対処)

Greenの反射波形に海面からの反射を除く二つ以上のピークがあるということは、レーザーが海面から海底へ進む際に、海底面以外に魚群や魚網などの海中浮遊物、海底の植生など、複数の対象に多重反射していることを示す。Fig. 8はDeep

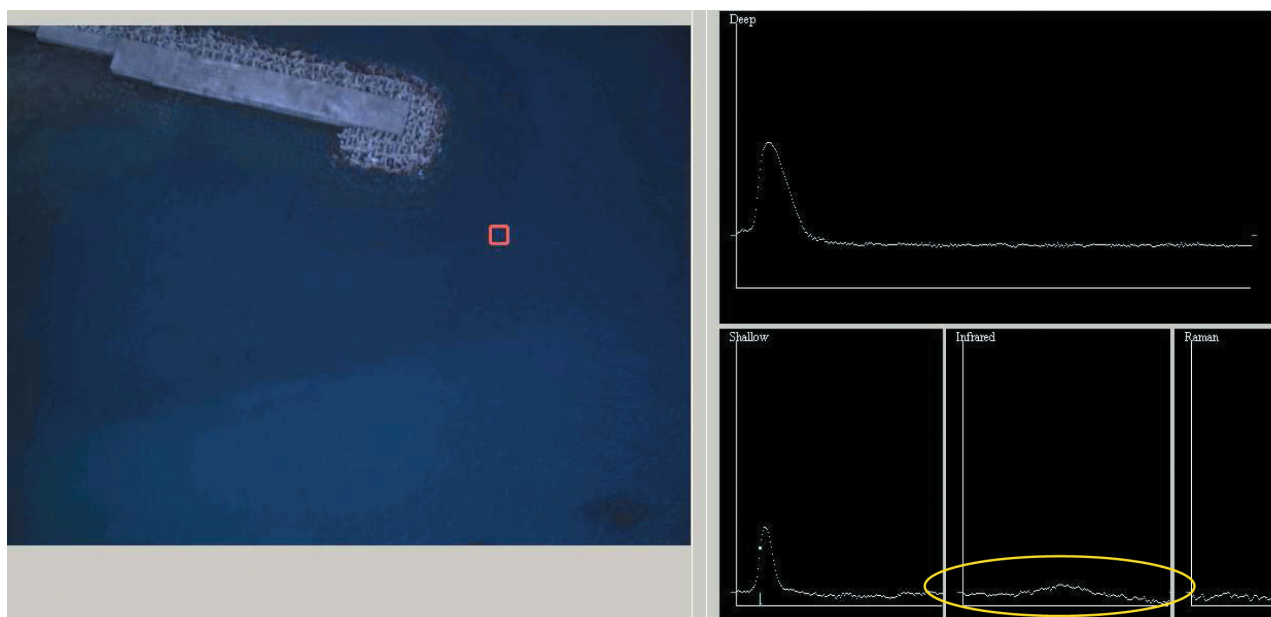


Fig. 7 (Right) An example of observed waveforms with smooth sea surface such as calm water. Reflection signals in the Infrared waveform are not detected in the yellow circle.

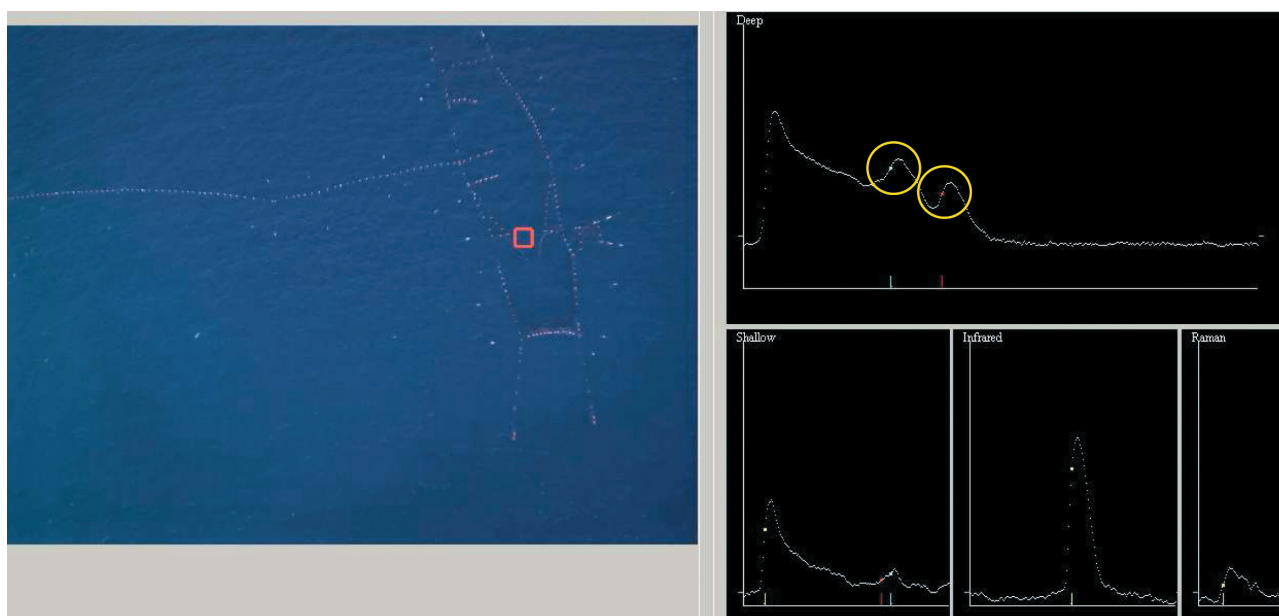


Fig. 8 An example of observed waveforms produced by suspended solids in the sea. The reflection in the left and right yellow circle corresponds to a fishnet and seafloor, respectively.

Green で魚網を計測した例である。左の黄色い円で示したのが魚網，右の黄色い円で示したのが海底面である。

航空レーザー測深作業は測線間隔を 50% サイドラップさせて測線計画を行う。1 回の飛行作業でこれを 1 本おきに計測し，計 2 回の飛行作業で 1 つの区域の計測を実施する。したがって一方の

測線でしか計測されていない計測点は海中に浮遊する魚網や魚群として判断できる。このような計測点は除去する。

7.2.4 透明度不良によって生じる水深の誤認 (特徴)

Deep Green もしくは Shallow Green の反射波

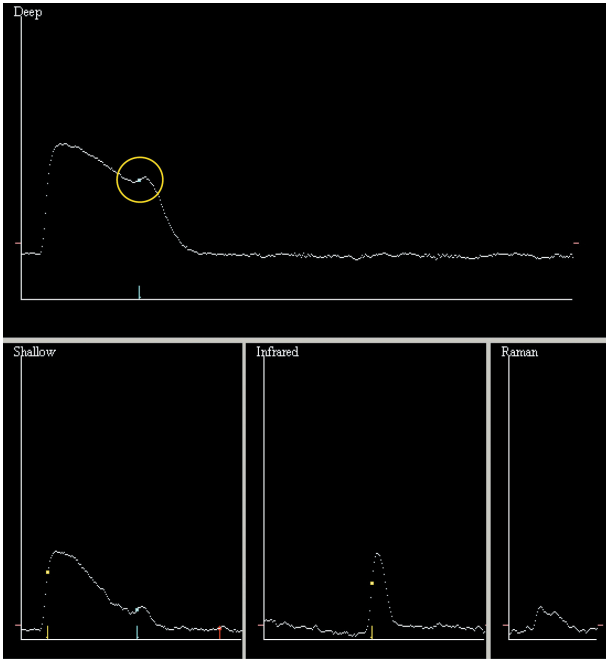


Fig. 9 An example of observed waveforms with cloudy water. The reflection peak in the yellow circle was smooth.

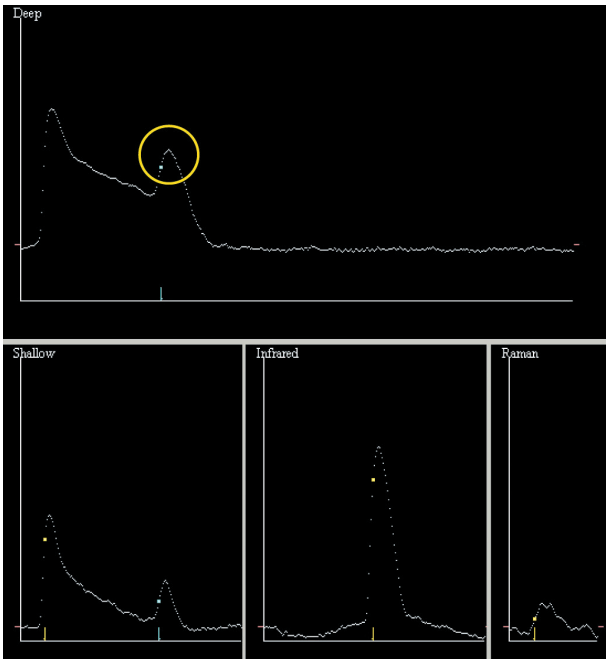


Fig. 10 An example of observed waveforms with clear water. The reflection peak in the yellow circle was sharp.

形が海面反射の後から上方へ膨らんでおり、反射波形のピークが識別しづらい。計測時に撮影した写真上で、周辺海域の水が濁っている。

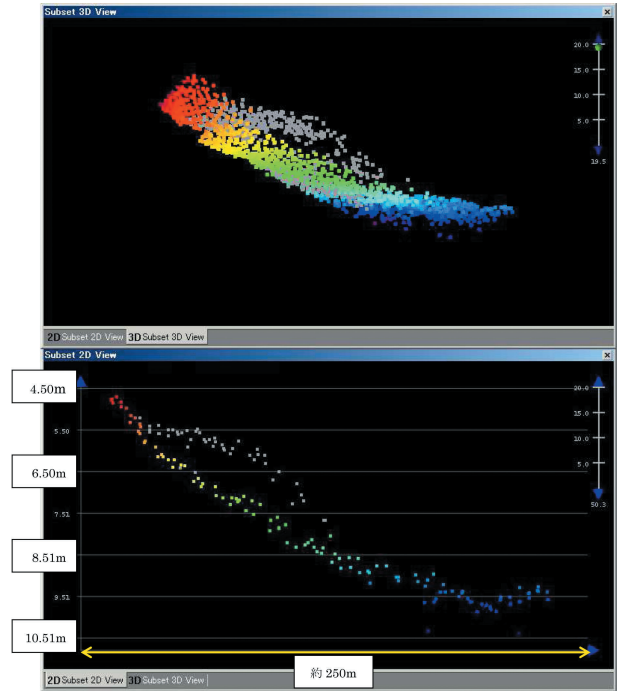


Fig. 11 A harmful effect of specially cloudy and muddy water on determination of seafloor. (Top) 3 D image of specially cloudy and muddy water. Gray-colored dots indicate wrong seafloor caused by muddy water. (Bottom) 2 D image of specially cloudy and muddy water.

(説明と対処)

透明度の悪い海域で計測した点の反射波形の例を Fig. 9 に、透明度の良い海域で計測した点の反射波形の例を Fig. 10 に示す。透明度の悪い水では後方散乱が大きく生じてレーザーのエネルギーが散乱し、Fig. 9 の黄色い円で示すように海底反射のピークが不明瞭となる。そのため、誤った水深を計算する場合がある。その例として、河川から流入する泥水など、極度に濁った汚濁水の水塊を面的に海底として誤認してしまう場合がある。Fig. 11 は同じ場所を三次元表示と横からの断面表示で表しており、グレーで表示された計測点が濁った水塊である。大きな川の河口付近等の濁った海域の計測データは解析時に特に注意し、計測時に撮影した写真や周囲のデータとの連続性を確認し、ノイズを除去する。

7.2.5 多重反射による水深の誤認

(特徴)

Deep Green もしくは Shallow Green の反射波形に海面からの反射をのぞく二つ以上のピークがある。隣り合う周囲の水深と比較して連続性がみられない (Fig. 12).

(説明と対処)

珊瑚礁のような急に高さが変わるような複雑な海底地形では、Green が複数の高さで多重反射し、Fig. 12 の黄色い円で示すように海面以外で二つ以上の水深 (反射パルス) を検知する場合がある。SHOALS GCS では、海底の位置を決めるにあたって採用した水深を Primary Depth (青色のティック)、採用しなかった第二候補の水深を Secondary Depth (赤色のティック) として扱う。この時、本来の海底ではない水深を Primary Depth として採用してしまう場合がある。

このように誤った水深を採用している計測点は Second depth swap tool で再計算を行う。Second depth swap tool は Primary Depth と Secondary

Depth を入れ変えて水深の再計算を行う。再計算によっても正しいと判断される水深値に再計算できない計測点はノイズとして除去する。

7.2.6 ハレーションによる影響

(特徴)

Shallow Green 及び Deep Green が検出できていない。計測時に撮影した写真上で、水面や構造物等から太陽光のハレーションが映っている。

(説明と対処)

地表面で太陽光がハレーションを起こして Green と混合することにより、海底からの反射を検知することができなくなる場合がある。このような計測点はノイズとして除去する。

7.2.7 極浅海部のノイズ

(特徴)

計測時の水深が 0~2 m の極浅海部で計測されている。Shallow Green の反射波形に記録された海面の反射波形と海底の反射波形が合成して両者

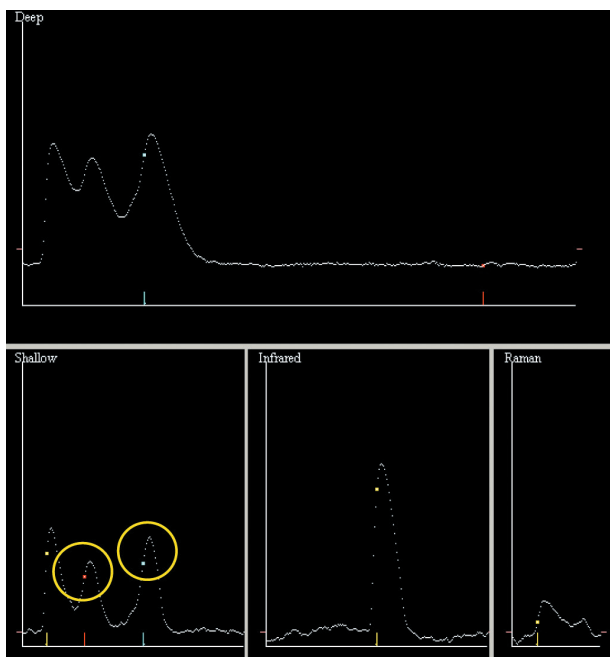


Fig. 12 An example of observed waveforms with several peaks produced by multiple reflection at seafloor. The reflection in the right yellow circle indicates primary depth. The reflection in the left yellow circle was secondary depth.

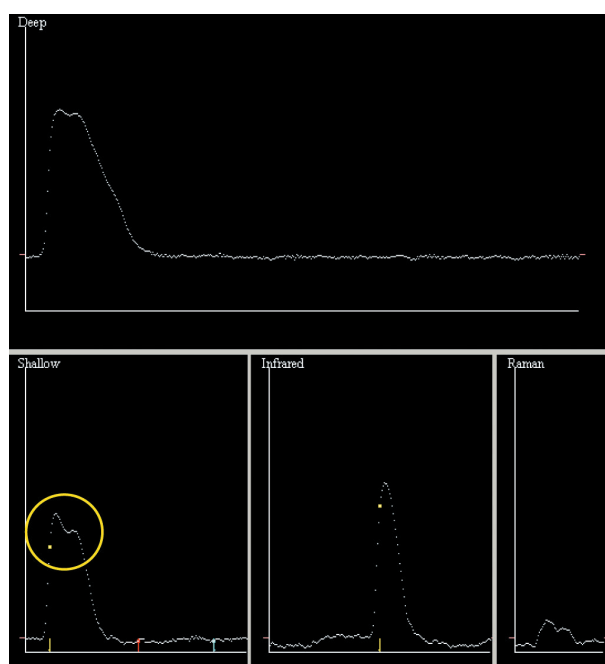


Fig. 13 An example of observed waveforms with overlapped peaks in very shallow water. The left and right peaks in the yellow circle correspond to reflections from sea surface and seafloor, respectively.

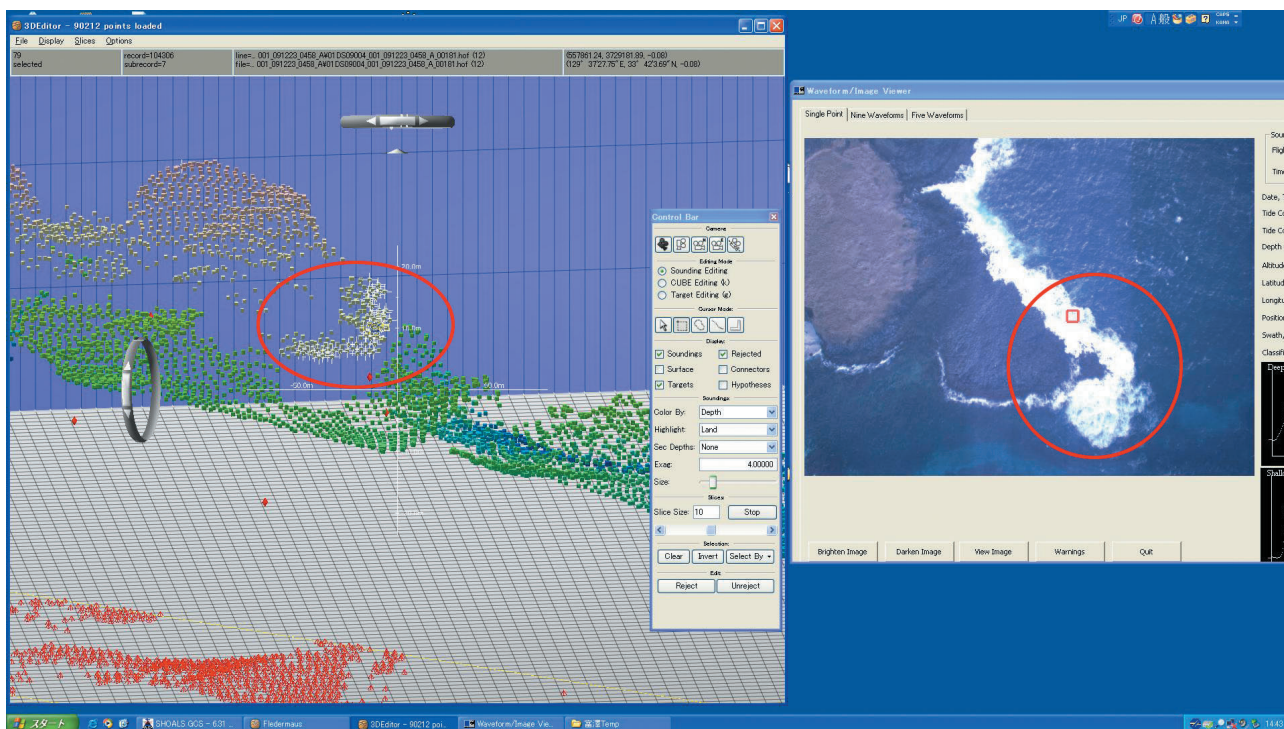


Fig. 14 (Right) Picture taken at the same time of the LIDAR survey. Whitecaps and several characteristic land topography are shown in red circle. (Left) 3 D image of bathymetric data. Point cloud in the red circle is measured due to harmful effects detected in the right picture.

のピークが捉えられていない (Fig. 13)。
(説明と対処)

極浅海部は Shallow Green を検知する Detector の性能限界により、海面の反射波形と海底の反射波形が合成し、Fig. 13 の黄色い円で示すようにそれぞれの反射のピークを分離して認識できないことにより、測深することができない (小野・柴田, 2012)。また、岩礁帯や干出帯、岬の先端の周囲等の海図上重要となる浅瀬の周辺は必然的に白波が立ちやすく、海面を陸上と誤認する可能性がある。つまり極浅海部は、海面を陸上と誤認している計測点、干出岩や消波ブロック、防波堤等の陸上地形や構造物を計測している点、海底地形を計測している点、その他のノイズ、の 4 種類が混在することが多い場所である。例を Fig. 14 に示す。右の写真の赤い円で囲んだ、白波と干出する岩が混在する波打ち際で計測した点群は、三次元では左の図の赤い楕円で囲んだ部分のように表され、ノイズと地形の判断が難しい。

このような場所では、計測した点群の断面を等

深線に対して直角にスライスし、計測時に撮影した写真を参照しながら、周囲の計測点の反射波形と地形の連続性を観察し、ノイズと海底地形及び陸上地形の判断を行う。正しく計測できている干出や海底地形を誤って除去しないよう注意する。なお、陸上で反射している計測点は Infrared の反射波形が強くサチレーションするのに対し、白波などの海面を陸上と誤認している計測点では Infrared の反射強度が比較的小さくなりやすい。

7.2.8 SWA (Shallow Water Algorithm) の動作不良ノイズ

(特徴)

SWA で計算された水深において、周囲の水深と比べて連続性がみられない。

(説明と対処)

SHOALS GCS では、Shallow Green の海面波形と海底波形の線形が合成して測深できない極浅海部の点に対し、SWA という独自のアルゴリズムにより水深を求める。しかし、当庁のシステムは

Shallow Green を検知する Detector の時間分解能に限界がある。しがってこのアルゴリズムで計算された計測点において、誤った水深値となるケースがある。

このような計測点は、極浅海部でのノイズ判断方法と同じく、計測した点群の断面を等深線に対して直角にスライスし、周囲の計測点の反射波形と地形の連続性を観察しながらノイズと地形の判断を行う。SWA の動作不良ノイズは周囲の計測点より高めに出る傾向がある。SWA のアルゴリズムではなく Shallow Green で正しく測深している点が近傍にある場合は、互いに反射波形と水深を比較してノイズと海底地形の判断の参考にする。

7.2.9 明らかな異常点 (特徴)

周囲の計測点と比較して連続性がなく、計測点が極端に沈み込んでいる。もしくは異常に高い。
(説明と対処)

周囲より沈み込んでいる計測点は三次元表示で裏返してみるとわかりやすい。これはマルチパス等に起因すると考えられる。このようなノイズは付近に正しく計測している点が存在する場合は Sort 処理により自動的に除去されるが、計測点の密度が低い場合は Sort 処理する距離が短いと残ってしまう場合がある。また、送電線等の高い計測点付近では、Sort 処理により周囲の正しく計測している点を取り除かれてしまう。これらのノイズは除去する。

7.3 特徴的な波形パターン

透明度が高い海域では Deep Green が深い水深まで伝わり、その過程でレーザーエネルギーが減衰し反射パルスが検知されなくなる。Fig. 15 にこの例を示す。黄色い楕円で示すように、Deep Green で海底面の反射パルスを検知しておらず、測深できていない。当庁のシステムは 50 m 以上の水深は計測を行っていない。また、レーザー光は白色のものに対して反射率が高いため、透明度

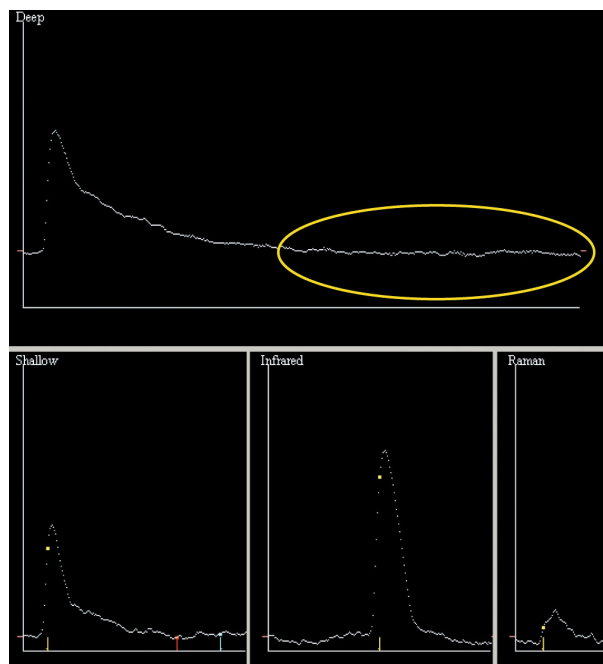


Fig. 15 An example of observed waveforms without seafloor reflection because of too-clean water. There is no reflection in the yellow circle.

の高い海域において底質が白い砂である場合は、海底の反射強度が海面の反射強度より大きくなる場合がある。

7.4 その他の特性と計測時の諸条件

ノイズと地形を判断するためには、反射波形の特徴が参考になるが、それ以外の航空レーザー測深データの特性と計測時の諸条件として、次のものがある。

7.4.1 レーザーの発射角度

SHOALS では海面へのレーザーの入射角を一定にするために前方に 20° 傾けて円弧状にレーザーを発射している。飛行方向に対して対面するオーバーハングした崖や急峻な地形では、鉛直方向からの発射では地形や木によって計測できない内側の部分が計測される場合がある。反対に、同じ場所を反対方向から計測するとそれらの点は崖の影になって計測されない (Fig. 16)。データ編集作業はこの特性を理解した上で行う。特に海岸線付近の干出や崖地形では、計測する方向によ

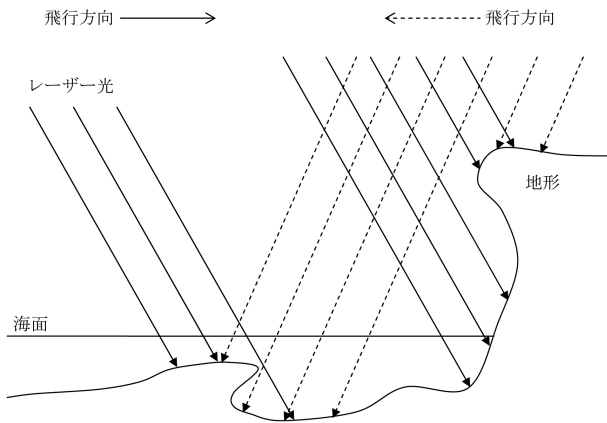


Fig. 16 Conceptual diagram of flight direction in the LIDAR survey with irregular topography.

て影になる面が発生し、写真に写っているものが計測できていない場合があるため注意する。

7.4.2 計測時に撮影した写真

カメラはレーザーに合わせて前方に 20° 傾けて取り付けられているため、撮影した写真は歪んでいる。Fledermaus 上では計測時に撮影した写真を参照しながらデータ編集を行うことができる。写真の歪みを意識しながら周囲の計測点の連続性や反射波形を手掛かりにノイズ識別をする。なお、現有のシステムに搭載されているカメラは飛行中に露出を変更することができない。そのため、適正露出で撮影することが難しく、計測する時間帯や天候状況によっては、撮影された写真が暗すぎる場合や明るすぎる場合がある。そのため、計測時の周辺の状態を写真から判読しにくいケースがある。

7.4.3 計測時の潮位

波打ち際のような水深の浅い場所では、第7章2節7項で述べたようにノイズと地形の判断が難しくなる。潮位の時間変化に応じて波打ち際的位置も変わるため、計測した点群の断面をスライスしてデータ編集を行う際は、計測時の波打ち際的位置を意識して作業を行う。

また、高潮時の計測は、海図上で浅い水深の場所でもノイズが少なく良好に測深できる場合があ

る。反対に、潮位が低い時の計測は干出岩を Infrared で明瞭にとらえることができる場合がある。

このようなことに留意し、データ編集を行う。

8 おわりに

航空レーザー測深機で計測したデータの特性とその解析手法について述べた。ノイズと海底地形及び陸上地形の判断は反射波形を確認するだけでなく、複数の資料と比較することが大切である。しかし、極端に濁った汚濁水などの水塊を地形と誤認してしまう現象や Detector の時間分解能の限界によって生じる SWA の動作不良ノイズは、判断に労力を要している。また、現有のシステムに搭載されているカメラは露出性能に劣り、計測時の周辺の状態を写真から判読しにくい場合がある。

今後のハードウェア性能の向上とアルゴリズムの改善に期待する。

参考文献

- 小野智三・柴田遥 (2012), 航空レーザー測深機による計測作業, *海洋情報部研究報告*, 48, 91-100.
- 高田和典 (2008), 航空レーザー測深技術, *図解航空レーザー計測 基礎から応用まで*, 齊藤和也・他編, 172-181, 財団法人日本測量調査技術協会, 東京.
- 笹原昇・矢沼隆・矢吹哲一郎 (2006), 日本周辺における海域ジオイドモデルの決定, *海洋情報部研究報告*, 42, 39-47.

要 旨

海上保安庁では、航空レーザー測深機 SHOALS 1000 を運用する中で、測深データを実際に海図に取り込むための解析手法を模索してきた。本稿では、航空レーザー測深データの特性と、これまで当庁が培った解析手法について詳細を述べる。