

高精度湖底地形調査について High precision topographic survey of lakes

応用地理部 畠山真介
Geocartographic Department Shinsuke HATAKEYAMA

要 旨

平成 23 年の東日本大震災により、甚大な被害を受けた沿岸湖沼のうち、「松川浦」（福島県）及び「万石浦」（宮城県）（図-1）において、瓦礫の撤去や漁場再生などの復旧・復興事業等の基礎資料となる、高精度の水深データを作成するため、マルチビーム音響測深機を使用した高精度湖底地形調査を実施した。

また、平成 24 年度には山梨県富士五湖のうち、「西湖」の調査を実施した。「西湖」は昭和 39 年の調査から 48 年が経過し、湖とその周辺的环境が大きく変化していることから、再度調査を行うこととした。

これらの調査について概要を報告する。

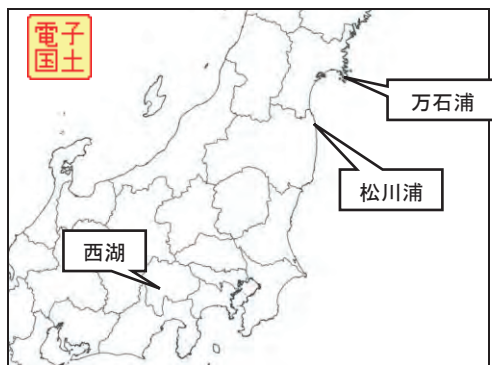


図-1 調査湖沼位置図

1. マルチビーム音響測深機について

マルチビーム音響測深機は、進行方向の左右方向に湖底に向かって扇状に音波を発信し、発信した音波の湖底からの反射時間を計測することで、幅広い範囲で高密度の水深データを得ることが出来る（図-2）。

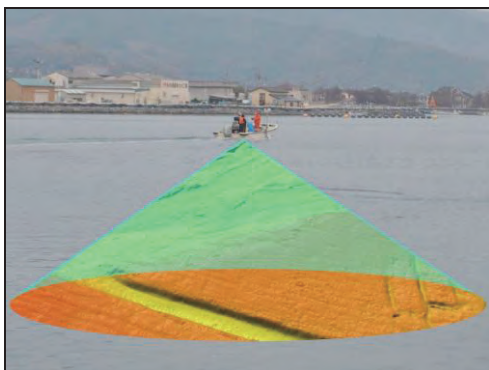


図-2 マルチビーム音響測深機による測深イメージ

1.1 使用機器概要

調査にはマルチビーム音響測深機「SONIC2022（R2SONIC 社製）」を使用した（写真-1）。諸元は表-1 のとおり。

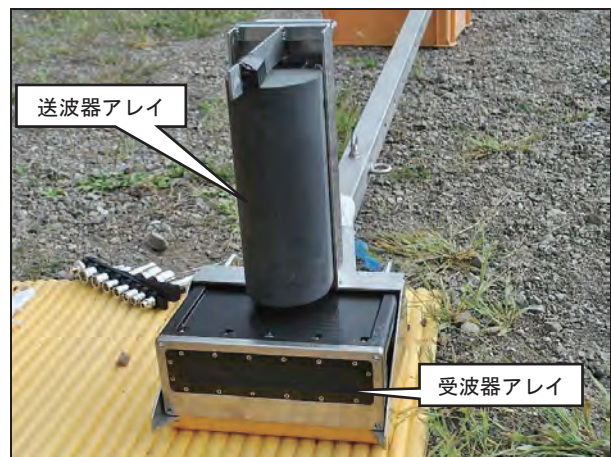


写真-1 SONIC2022

表-1 SONIC2022 諸元

周波数	200～400kHz（10kHz 単位可変）
ビーム数	256
ビーム分解能	1°×1°（周波数 400kHz 時）
ビーム幅	10°～160°（可変）
測深範囲	500m（海水中、周波数 200kHz 時）

1.2 マルチビーム音響測深機動作原理

SONIC2022 はクロスファンビーム方式による測深を行うものである（図-3）。

動作として、送波器アレイより湖底に向かい、進行方向に対し横方向の扇状の指向角の狭い音波を送出する。送波器に対し、受波器アレイを 90 度回転させ T 字型となるように設置し、進行方向と同じ向きのビームを形成し、反射してきた音波を待ち受ける。

横方向のビームと縦方向のビームが直交した面をクロスファンビームと呼び、この部分の水深値を取得している。SONIC2022 では最大 160° のビーム幅で 256 点の水深値を一度に得ることができる。

このことにより、従来のシングルビーム音響測深機と比較して、面的に湖底を捉えることが可能となり、より多くの測深値を得られるようになったことで、精度の高い測量が可能となった。

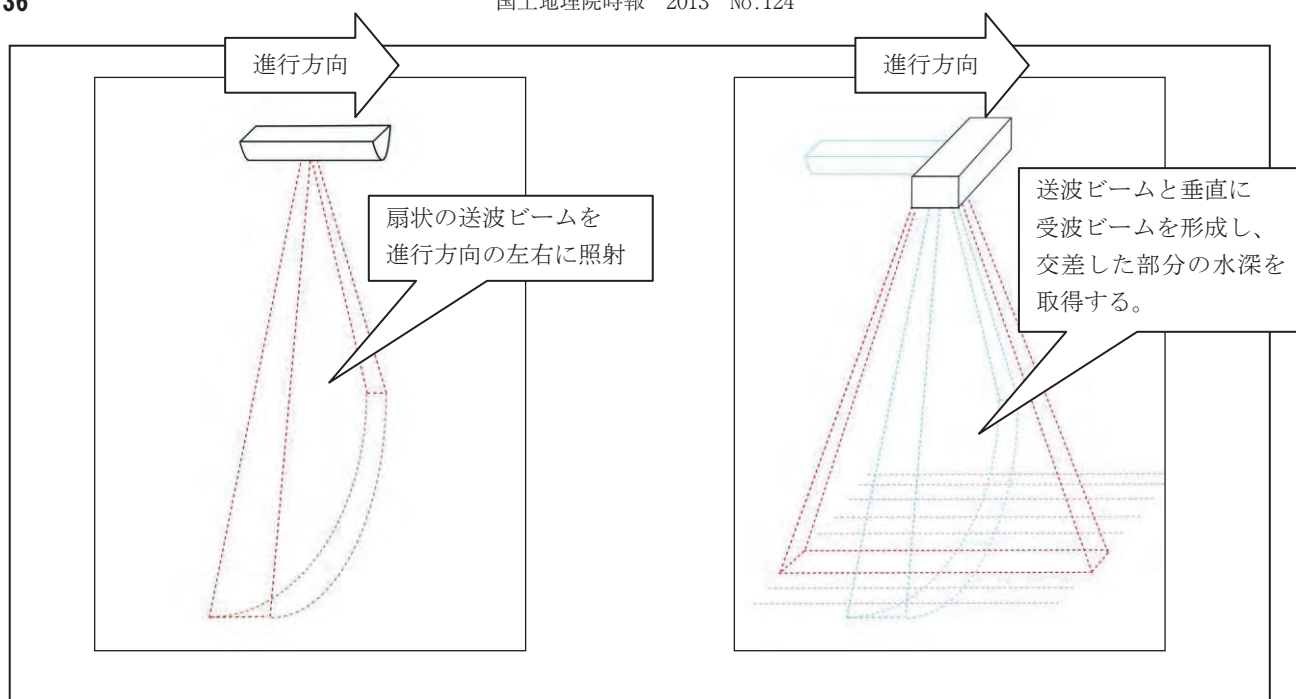


図-3 マルチビーム音響測深機（クロスファンビーム方式）動作概念

2. 湖底地形調査「松川浦」

「松川浦」(図-4)において平成23年10月17日から11月4日にかけて測深調査を行った。

「松川浦」では海苔及びアサリの養殖業が行われていたが、津波により漁場は壊滅した。漁場の再生のため、決壊した潮流口周辺や航路の湖底地形の把握が急務であり、福島県及び漁業関係者から湖底地形調査に対する強い要望があった。津波によって松川浦内には震災瓦礫や海岸線沿いの松等の倒木が大量に流入していた(写真-2)。

松川浦は大部分が極浅水域のため、航路を除き、船が進入できないことから瓦礫撤去に時間が掛かっており、調査時点において瓦礫はほとんどが未撤去だったため、全域調査は不可能であった。そのため、調査可能区域が限られる中で、要望があった潮流口(図-4①)、航路(図-4②)を中心に調査を実施した。



写真-2 松川浦内の状況(平成23年10月20日撮影)

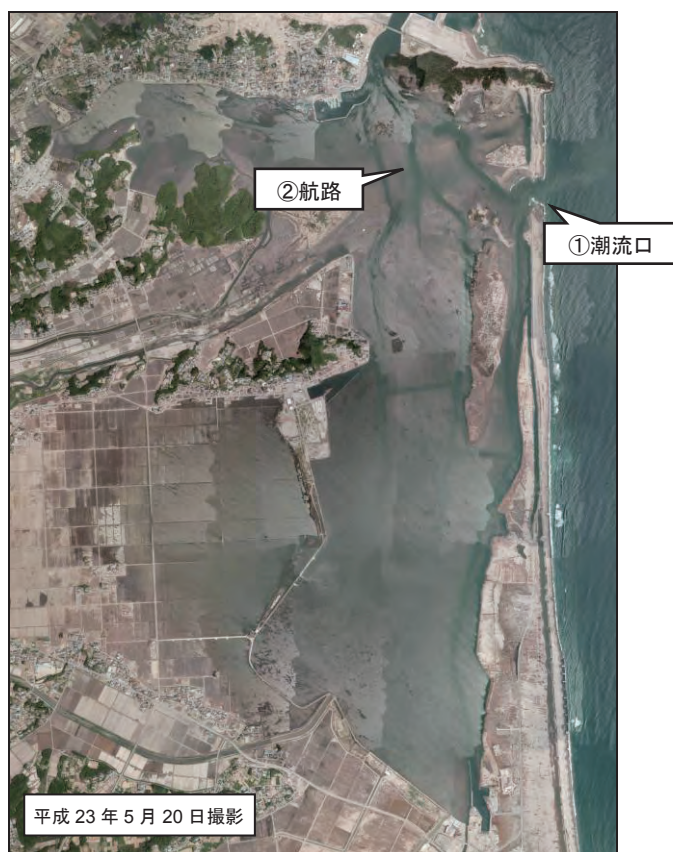


図-4 松川浦(5.9km²)(オルソ画像)

2.1 「松川浦」地区水位観測所の設置

湖沼調査では測深基準水面の標高値及び測深データの補正値を求めるため、水位観測を行う。水位観測所は相馬双葉漁業協同組合との協議の上、松川浦

漁港松川浦地区（図-5）に設置した。

水位観測所の設置には高さの基準となる水準点を設置する必要がある。「松川浦」地区では相馬駿潮場の附属水準点「附 27」（T.P.3.5208m ※測地成果 2011（震災後に再測量された成果））を使用し、片道約 3km の直接水準測量（写真-3）を行い、設置した水準点の標高 0.1235m の成果を得た。



図-5 「松川浦」地区水準路線図



写真-3 「松川浦」地区水準測量実施状況

水準測量後、簡易水位観測所を設置した。水位観測には水圧式水位計（横河電子機器社製フィールドμ）（写真-4）を使用し、5分間隔で水位観測を行った。

松川浦周辺は震災前と比較し地盤沈下（-0.3m ※水準点「附27」上下変動量）しているため、水位観測所設置箇所周辺は満潮時に水没する（写真-5）。



写真-4 水圧式水位計

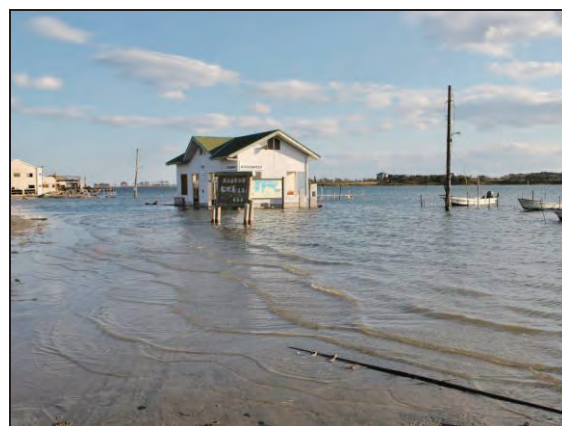


写真-5 満潮時水位観測所周辺（松川浦）

そのため、水位計を漁協の協力により潮干狩り休憩所内に設置した（写真-6）。水際のセンサーから離れた建物内に本体を設置したため、センサーケーブルが陸部に露出する。干潮時に車両が通行することもあることから、ケーブルを土中に埋め込んで設置した（写真-7）。



写真-6 水位計本体設置状況



写真-7 センサーケーブル埋設状況



写真-9 松川浦内瓦礫状況

2.2 「松川浦」内試走

測深作業に入る前に調査湖沼内部の現況確認も兼ね、測量船の試走を行った。今回の作業では、震災瓦礫や倒木等が松川浦内部に大量に残されていることから、通常より時間を掛け、松川浦内を半日程度、調査した（写真-8）。

試走により、松川浦内は防潮林を形成していた松などの倒木が大量に残っていることを確認した（写真-9）。航路を除き大部分が1m以下の極浅水域のため、瓦礫撤去に時間が掛かっており、測量船が侵入できないことから全域調査は不可能であった。

また、松川浦内には、海苔養殖の種網の設置されている箇所（写真-10）があり、その周辺も調査が不可能なことが分かった。そのため、地元関係機関の要望の高い航路周辺部を中心に調査することとした。



写真-10 松川浦内海苔網設置状況



写真-8 松川浦内試走状況

2.3 「松川浦」測深調査概要

2.3.1 津波による洗掘状況調査

東日本大震災時の津波により、北海道から千葉県までの太平洋沿岸の広い範囲が被害を受けた。松川浦でも津波により大きく地形が改変された。

松川浦と外洋を隔てる砂州は津波越流時に洗掘されて、防波堤背面が大きくえぐられ、南北に細長い水路が形成された（写真-11）。洗掘された水路は松川浦と接続し、測量船の進入が可能になったことから測深調査を行った。測深の結果、水路は場所によっては4m以上の深さがあることが分かった（図-6）。



写真-11 海岸沿いに形成された水路

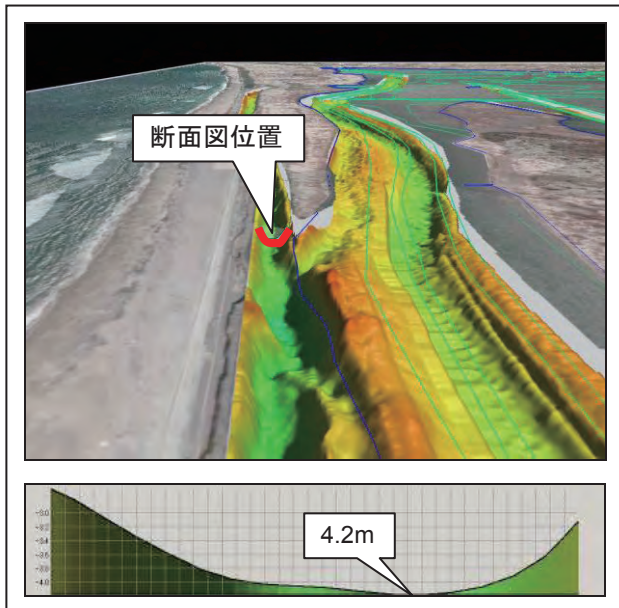


図-6 洗掘された水路の状況

2.3.2 潮流口（砂州の破壊箇所）調査

砂州は震災直後、津波による洗掘だけではなく堤防が一部決壊し、松川浦と外洋が接続する潮流口が形成された（図-7）。その後、砂州形成の要因となる非常に強い潮流により、大量の砂が流入し、新しく砂州が浦内に形成された（図-8）。



図-7 潮流口（平成 23 年 3 月 12 日撮影）



図-8 潮流口（平成 23 年 5 月 20 日撮影）

松川浦の潮流口は福島県により8月仮締切堤防が設置され、砂の流入は収まったが、それまでに相当量の砂が流入しており、空中写真を撮影した5月よりも本調査を実施した10月では砂州はさらに大きく発達していた。

調査の結果、流入した大量の砂が航路に埋積していたことが分かった（図-9）

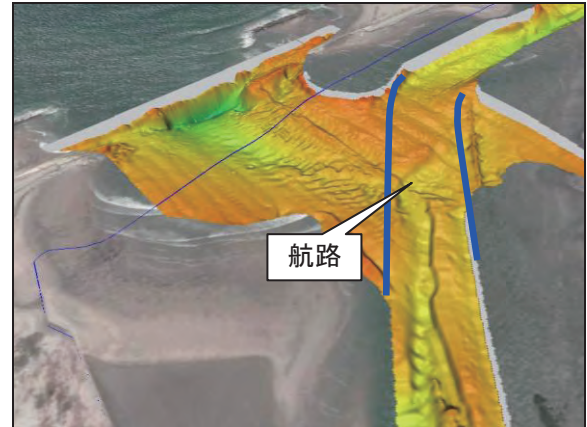


図-9 航路の埋積状況

2.3.3 松川浦最深部

松川浦の最深部は松川浦漁港（松川浦地区）付近の外洋へと繋がる滞筋にあり、水深 8.8m であった（図-10）。震災前には 8.5m（平成 22 年国土地理院測量）であり、近傍水準点「附 27」の沈下量-0.3m と一致した。

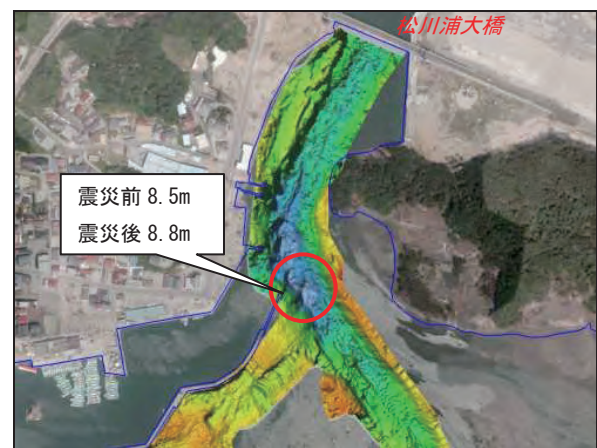


図-10 松川浦最深部

2.4 「松川浦」測量成果と関係機関への提供

松川浦の測深結果とオルソ画像（国土地理院技術資料 C1-No.409）及び震災前の松川浦の湖沼図（国土地理院技術資料 D1-No.574）と重ね、試作図「正射写真湖沼図（簡易版）松川浦」（図-11）を作成し、福島県、相馬双葉漁協、福島県警察相馬警察署等の関係機関へ提供を行った。

福島県では航路の浚渫を行うための資料として、相馬双葉漁協では海苔の種場の選定資料として使用するとのことである。また相馬警察署では、行方不

明者の捜索活動を行うため、応援に来た警察関係者への説明資料として使用したとのことである。

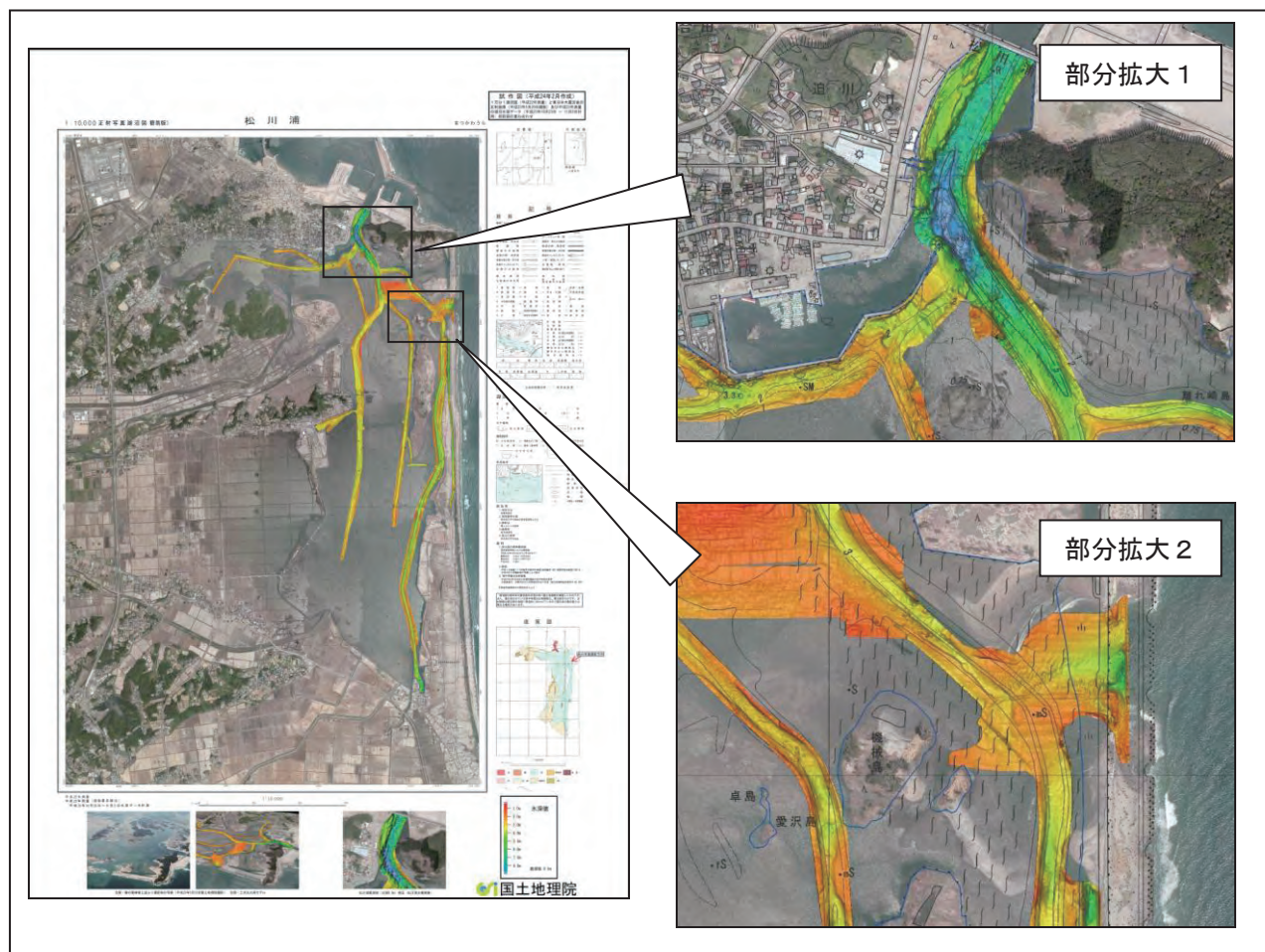


図-11 試作図「正射写真湖沼図（簡易版）松川浦」

3. 湖底地形調査「万石浦」

平成 23 年 11 月 4 日から 11 月 28 日にかけて、「万石浦」の測深調査を行った。

「万石浦」(図-12)ではカキ養殖のための稚貝養殖が全域で行われており、その出荷先は全国に及び、日本国内におけるカキ養殖業の要となっている。しかし、東日本大震災の津波により養殖カキの 9 割が失われ、地盤沈下及び津波による地形改変が著しく、漁場再生のため地形情報の把握が急務であった。万石浦では船が進入できる十分な水深があることから、瓦礫もほとんどが撤去されており、全域での調査を行った。



図-12 万石浦 (7.2km²) (オルソ画像)

3.1 「万石浦」地区水位観測所の設置

「万石浦」地区での水位観測のため、水準点の取付けには一等水準点「5631」(T.P.2.8233m ※測地成果2011(震災後に再測量された成果))を使用し、

片道約340mの直接水準測量を万石橋近傍の岸壁まで行った(図-13、写真-12)。水準測量により、設置水準点の標高0.2357mの成果を得た。



図-13 「万石浦」地区水準路線



写真-13 満潮時水位計状況（万石浦）

万石浦は牡鹿半島の付け根にあり、震源地に近く「松川浦」地区の沈下量を上回る -0.7m （※水準点「5631」変化量）の沈下が起きた（図-14）。そのため、「松川浦」地区と同様、水位観測機器が冠水しない場所に設置する必要があるため、倒壊した石碑の上に設置した（写真-13）。



写真-12 「万石浦」地区水準測量実施状況

3.2 「万石浦」内試走

万石浦では船が進入できる十分な水深があることから、瓦礫はほとんどが撤去されており、全域調査が可能であった。

内部にはカキ養殖用施設がほぼ全面に設置されているため、カキ養殖用施設の隙間を縫うように測深作業を実施した（写真-14）。



写真-14 「万石浦」測深実施状況

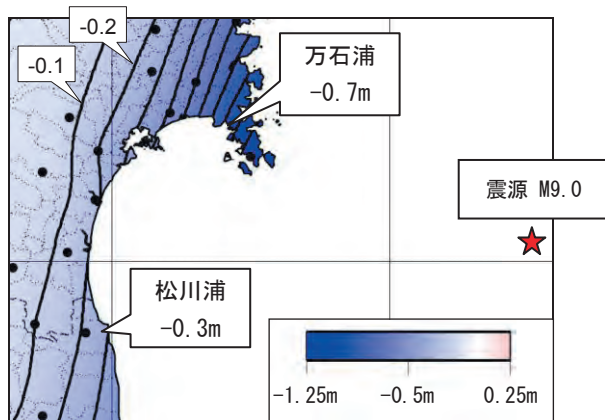


図-14 調査湖沼周辺地殻変動（上下）

（電子基準点による）

※国土地理院ホームページより引用

3.3 「万石浦」最深部

測深した結果、万石浦の最深部は万石橋北側近傍にあり、 17.5m であった（図-15）。

宮城県漁協によると、この周辺は震災前に漁協から宮城県に対し、付近にある漁船係留場所への波浪の影響を弱めるため、浚渫要望を出すほど浅かったとのことである（図-16）。万石浦の漁業者の間では震災後、湖底の岩盤が露出したと語られており、津波により湖底の堆積物がさらわれ、深くなったと考えられる。

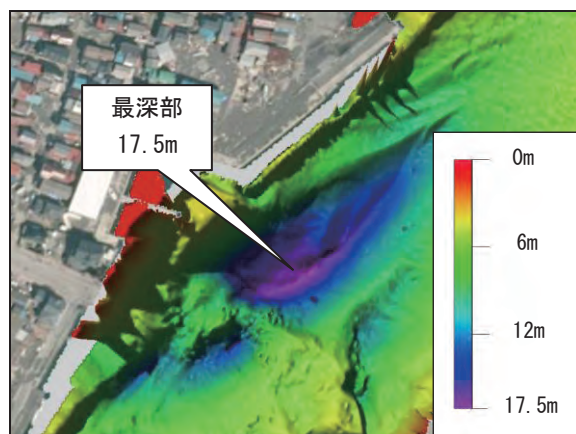


図-15 「万石浦」最深部

3.4 関係機関への測量成果提供

万石浦では水深の深い場所にあることから発見されず、引き上げられていない瓦礫のうち、沈船、水没車等の緊急性の高いものが調査により複数発見された。そのため、海上保安庁等の関係機関に位置情報及び水深のデータ提供を行った(図-17)。発見された瓦礫は、宮城県により全て撤去されている。

また、万石浦の測深結果とオルソ画像(国土地理院技術資料 C1-No.409)を重ね、試作図「高精度水深データ陰影段彩図「万石浦」」(図-18)を作成し、宮城県、宮城県漁協等関係機関へ成果提供を行った。

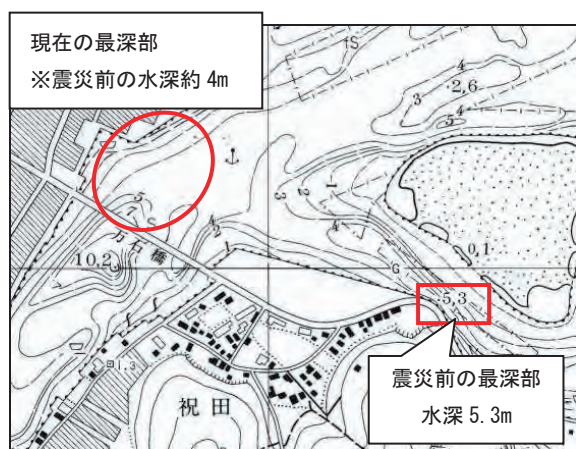


図-16 湖沼図「万石浦」(昭和55年測量)

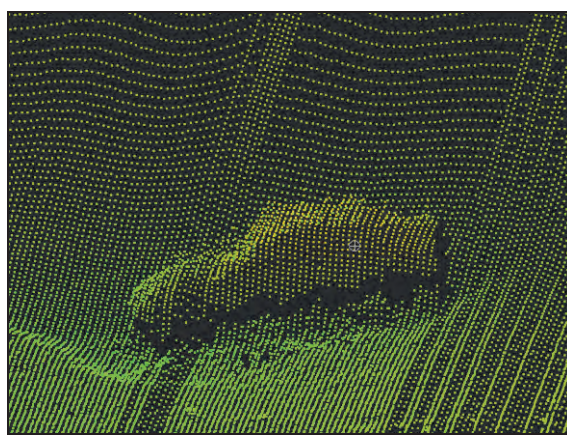


図-17 測深調査により発見した水没車(水深5.0m)

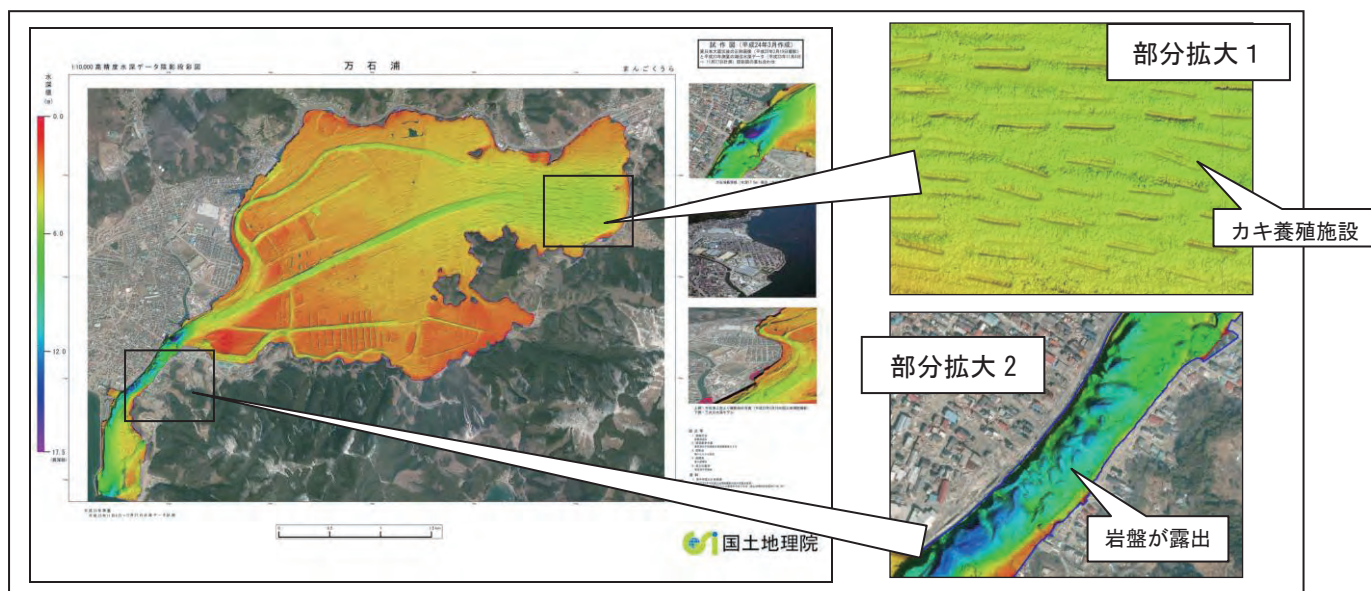


図-18 試作図「高精度水深データ陰影段彩図「万石浦」

3.5 「万石浦」底質調査

平成24年5月21日から5月31日にかけて、「万石浦」の底質調査を行った(写真-15)。

底質調査は採泥器を使用し、149点の湖底の表層構成物質(底質)サンプルを採取、振動ふるい機に

よる粒度分析を行い、ウェントワースの粒径区分により分類した。

その結果、万石浦の底質は、石巻湾から奥に行くに従い、砂から、泥質砂、砂質泥、泥と粒径が小さくなる傾向がみられた(図-19)。また最深部付近な

ど、津波の影響が大きい箇所では岩が露出していた。

これらの結果は測深調査と合わせ、湖沼図として取りまとめ、平成 25 年 4 月に刊行する予定である。地元漁協には、震災の復興等に活用してもらうため成果を提供している。この成果が漁業等への利用など、復興のための基礎資料として活用されることが期待される。



写真-15 「万石浦」底質採取状況

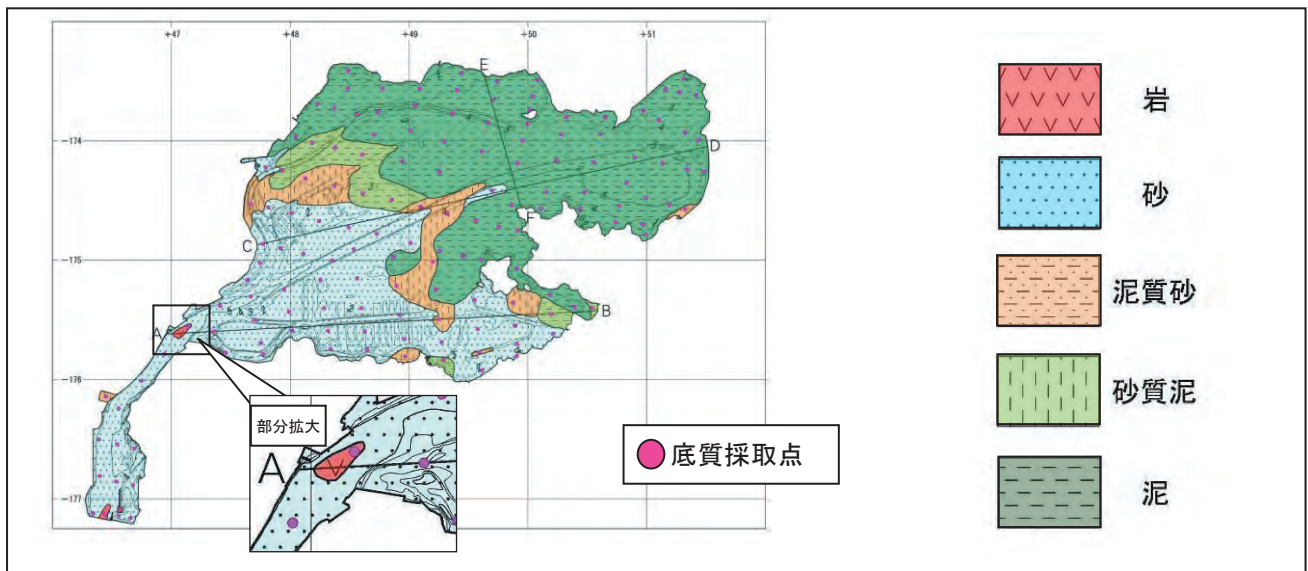


図-19 「万石浦」底質図

4. 湖底地形調査「西湖」

山梨県「西湖」は昭和 39 年の調査から 48 年が経過し、湖とその周辺の環境が大きく変化していることから、湖底地形調査を行うことにした。現地において平成 24 年 9 月 20 日から 28 日にかけて測深調査を行った。西湖(図-20)においては、かつて秋田県田沢湖に生息し、環境省のレッドリストの「絶滅種」に指定されていた淡水魚「クニマス」(平成 25 年 2 月 1 日公表の第 4 次レッドリスト(汽水・淡水魚類)では「野生絶滅」に変更)が平成 22 年に京都大学の調査により発見されている。

国土地理院の湖沼調査では通常、測深調査のほか湖底の底質調査を行うが、今回の調査では「クニマス」への影響を考慮し、底質調査は行わなかった。

また、調査期間中の水位変動の補正に使用する水位データは、山梨県より西湖水位観測所の観測データを提供いただいたため、国土地理院による水位観

測所は設置しなかった。



図-20 西湖(2.2km²) (オルソ画像)

4.1 「西湖」測深調査概要

4.1.1 「クニマス」禁漁区での測深調査

クニマスの保護のため、生息の可能性が高いとされる西湖北側の一部水域において、西湖漁業協同組合により禁漁区が設定されている。

禁漁区は立ち入りが制限されており、調査のため漁協職員の立ち会いのもと、調査を行った(写真-16)。



写真-16 禁漁区測深調査状況

4.1.2 測位方式による高精度化

マルチビーム音響測深機による測量の精度は位置精度に強く影響を受ける。

傾斜が大きい場合、水平位置のずれが計測する深度に対し、大きく影響を受ける。例えば 45°の斜面を計測した場合、直下水深のずれは 1m 発生する。傾斜が大きくなると、誤差はさらに拡大する。

位置の計測には GNSS 測量機を使用している。ディファレンシャル補正では測位精度は約 1m に対し、VRS-RTK 方式では測位精度 5cm を得られるため、深度が大きい西湖では VRS-RTK 方式を採用した。(写真-17)。

副次的な効果として、位置計測精度が高いため、ヘディングも安定することから、測量船の進路保持も容易となり、作業性の向上も図られた。



写真-17 位置計測装置

4.1.3 青木ヶ原溶岩の形状

西湖は 864 年から 866 年にかけて発生した富士山の大规模な噴火活動(貞観大噴火)の際の溶岩流(青木ヶ原溶岩)により、誕生した(図-21)。

西湖の南西側に流れ込んだ溶岩流は湖底まで続いており、従来から湖底における詳細な形状の把握が防災上、重要であるとされてきた。今回のマルチビーム音響測深機を使用した調査により、水深 50m から 60m までの形状など、その詳細が明らかとなった(図-22)。

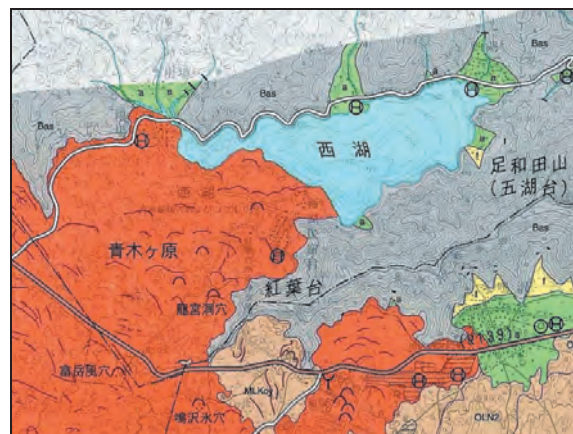


図-21 5万分1火山土地条件図「富士山」

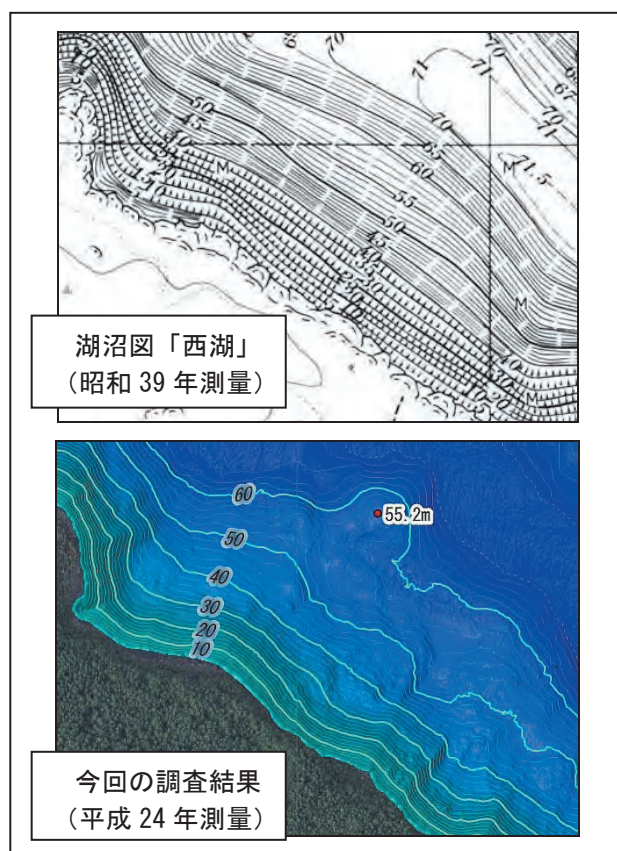


図-22 溶岩流(西湖南岸)

4.1.4 「西湖」西部の土砂の堆積

西湖西岸において、昭和 39 年の調査結果と今回の調査結果を比較したところ、水深 47.4m の地点が 44.5m になるなど、水深が全体的に浅くなっていた(図-23)。

前回の湖沼調査の 2 年後の昭和 41 年 9 月 25 日、西湖の周囲の集落を土石流が襲う「足和田土石流災害」が発生しており、根場地区を襲った土石流は西湖まで到達していることから、この変化は湖底への土砂の堆積によるものであることが推測される。

4.1.5 「西湖」最深部と測量成果の公開

西湖の湖盆形状は深部が 70m ほどの平坦な湖底となっており、その中での最深部は 71.5m であった。

これらの測量成果は「1/10,000 高精度水深データ陰影段彩図「西湖（暫定版）」として平成 24 年 11 月 28 日から国土地理院の湖沼湿原調査 WEB サイトにおいて公開している

(http://www1.gsi.go.jp/geowww/lake/saiko_index.html) (図-24)。また、電子国土 Web での公開や電子国土基本図への反映も行われる予定である。

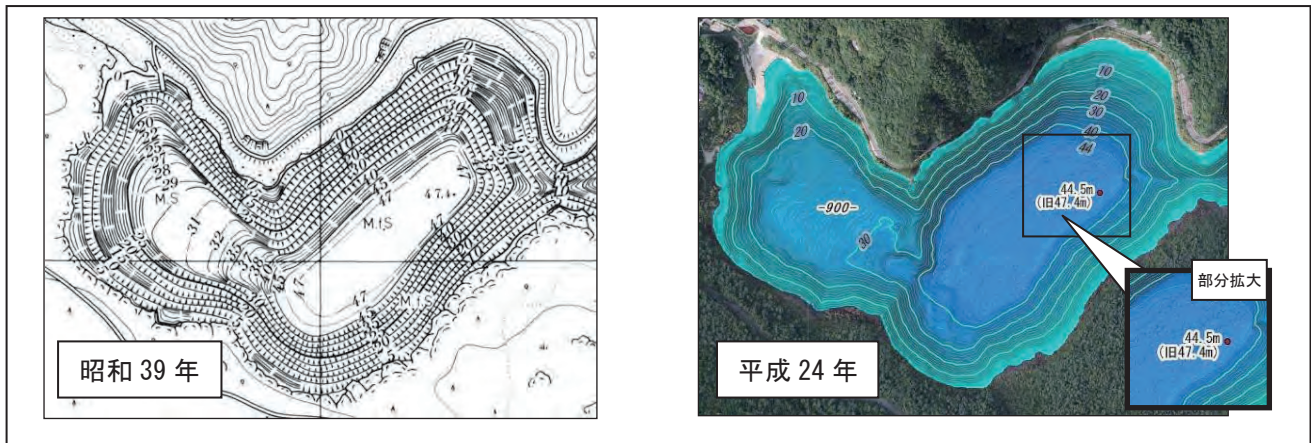


図-23 土砂の堆積（西湖西部）

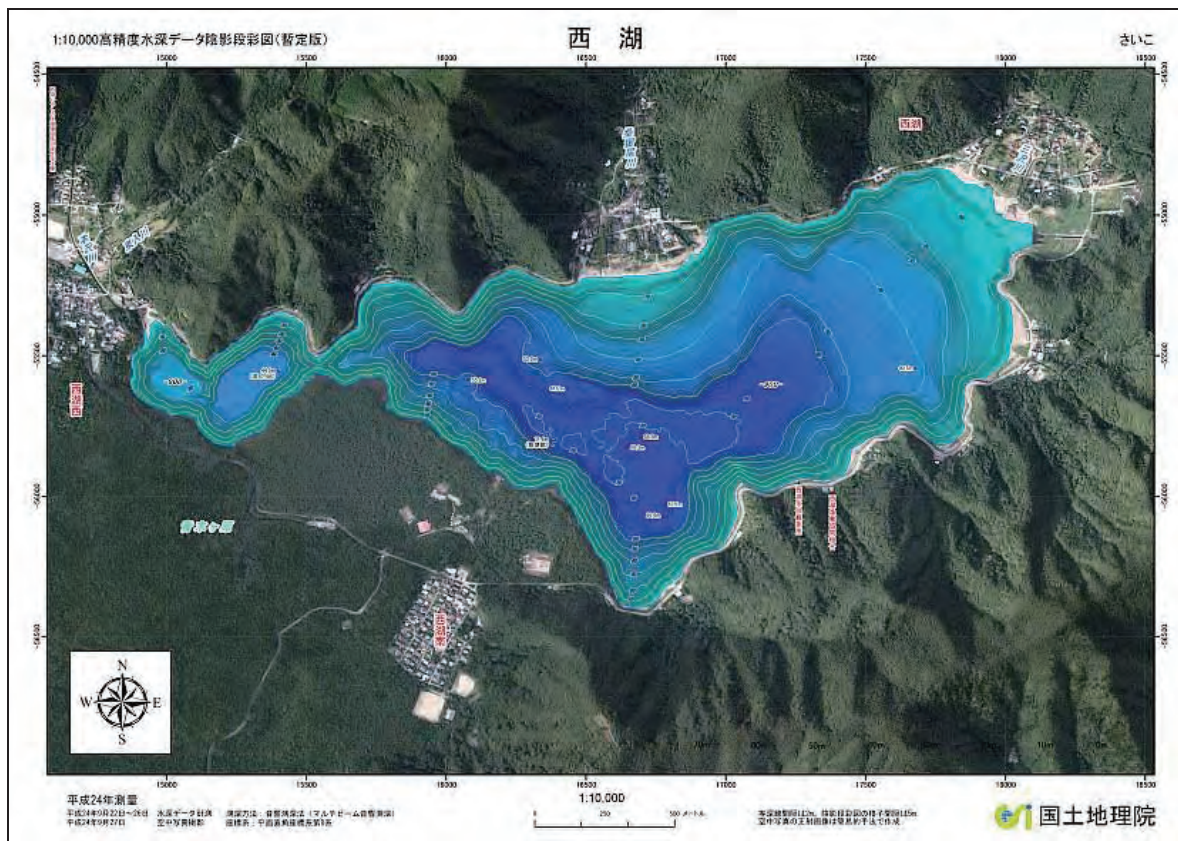


図-24 1/10,000 高精度水深データ陰影段彩図「西湖（暫定版）」

5. まとめ

「松川浦」及び「万石浦」の湖底地形を調査し、関係機関に測量成果を提供することにより、被災地沿岸湖沼の復旧・復興支援を行うことができた。

ただし、「松川浦」は全域の調査を行うことは不可能であったため、瓦礫の撤去状況及び閉塞している航路の掘削など復興状況を見ながら、未調査区域の調査を検討する。

「西湖」では平成22年に淡水魚「クニマス」の生息が確認され、その生態の解明や保護にも今回の測量成果が活用されることが期待される。

6. 謝辞

本調査にあたり、松川浦については福島県農林水産部、福島県相馬港湾建設事務所、福島県相双建設事務所及び相馬双葉漁業協同組合、万石浦については第二管区海上保安本部海洋情報部、宮城県東部振興事務所及び宮城県漁業協同組合、西湖については山梨県県土整備部、富士・東部建設事務所吉田支所、山梨県水産技術センター、西湖漁業協同組合などの関係機関に御協力を頂きました。ここに厚く御礼申し上げます。

(公開日：平成25年3月26日)

参考文献

- 田淵郁男 (2001)：ナローマルチビーム測量の現況と課題，港湾空港技術研究所資料 No.1014.
- 浅田昭，穀田昇一，松本良浩，政岡久志 (1998)：SEABATを使ったデジタル水深測量におけるバイアス調整法，水路部技報第16号，103-107.
- 国土地理院 (2011)：東日本大震災における正射写真（災害オルソ），国土地理院技術資料C1-No.407.
- 国土地理院 (2011)：GPS連続観測から得られた電子基準点の地殻変動，
<http://www.gsi.go.jp/chibankansi/chikakukansi40005.html> (accessed 25 January.2013).
- 国土地理院 (2011)：災害復興計画基図作成に伴う正射写真（災害オルソ），国土地理院技術資料C1-No.409.
- 国土地理院 (2011)：1/10,000正射写真湖沼図（簡易版）「松川浦」，国土地理院技術資料D1-No.575.
- 国土交通省中部地方整備局富士砂防工事事務所 (2005)：広報誌ふじあざみ第55号