

港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE
OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No.1346 June 2018

砕波帯内における航空レーザー測深の精度検証

中村 聡志
伴野 雅之
小裕 大地
柳嶋 慎一
安田 秀人

国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所

National Institute of Maritime,
Port and Aviation Technology, Japan

目 次

要 旨	3
1. はじめに	4
2. 航空レーザー測深精度および計測限界の検証方法	4
2.1 航空レーザー測深の内容	4
2.2 波崎海洋研究施設での現地観測内容	5
3. 航空レーザー測深の海底面測得状況と測深精度	6
3.1 波崎海洋研究施設観測栈橋に沿った航空レーザー測深の測得状況	6
3.2 航空レーザー測深の測深精度	7
3.3 航空レーザー測深の測深最大水深と透明度	8
4. まとめ	9
5. おわりに	9
参考文献	9
付録 光量子束密度，濁度の観測結果	10
透明度の長期観測結果，2017年7月～12月の有義波高の観測結果	14

Accuracy verification of Airborne Laser Bathymetry in the surf zone

Satoshi NAKAMURA*
Masayuki BANNO**
Taichi KOSAKO***
Shin-ichi YANAGISHIMA****
Hideto YASUDA*****

Synopsis

The Airborne Laser Bathymetry (ALB) and the topographic survey along the observation pier of the Hazaki Oceanographical Research Station (HORS) were done. At the same time, the transparency and depth distribution of the photon and the turbidity were observed. State of ALB, verification of measurement accuracy and limit depth of the sea-bottom according to the water quality were examined. It is not possible to measure the sea-bottom in the area where a lot of white bubbles are caused by the wave breaking. The shape of the scour around the steel pile is measured accurately. The accuracy of ALB is 0.13m in average along the HORS pier. If misidentification of the sea-bottom caused by transparency and turbidity in the sea is appropriately removed, the depth can be measured up to about twice of the transparency.

Key Words: Airborne Laser Bathymetry (ALB), Accuracy verification, Hazaki Oceanographical Research Station (HORS)

* Head of Group, Coastal and Estuarine Sediment Dynamics Group
** Senior Researcher, Coastal and Estuarine Sediment Dynamics Group
*** Researcher, Coastal and Estuarine Sediment Dynamics Group
**** Ex-researcher, Coastal and Estuarine Sediment Dynamics Group
***** Staff, Coastal and Estuarine Sediment Dynamics Group
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan
Phone : +81-46-844-5045 Fax : +81-46-844-1274 e-mail:nakamura_s@pari.go.jp

砕波帯内における航空レーザー測深の精度検証

中村 聡志*・伴野 雅之**・小碓 大地***・柳嶋 慎一****・安田 秀人*****

要 旨

波崎海洋研究施設周辺で航空レーザー測深、および、観測栈橋に沿った断面地形測量、透明度観測、光量子・濁度の鉛直分布観測を行い、グリーンレーザー測深による砕波帯内の海底地盤高の測得状況、および、測量精度の検証、水質による測深限界の検討を行った。砕波による白泡が多く生じている範囲では欠測があるものの、観測栈橋に沿った海底地盤高、栈橋を支える鋼管杭周りの洗掘状況についても正確に計測が行われている。レーザー測深による海底地盤高の計測値の精度は観測栈橋に沿った範囲で、平均 0.13m であった。また、海中の透明度や濁りによると考えられる海底面の誤認識を適切にノイズとして除去できれば、透明度の2倍程度の深さまで測深が可能である。

キーワード：航空レーザー測深， Airborne Laser Bathymetry(ALB)， 測深精度， 波崎海洋研究施設

* 沿岸土砂管理研究グループ長
** 沿岸土砂管理研究グループ主任研究官
*** 沿岸土砂管理研究グループ研究官
**** 元沿岸土砂管理研究グループ専門研究員
***** 沿岸土砂管理研究グループ契約職員
〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所
電話：046-844-5045 Fax：046-844-1274 e-mail:nakamura_s@pari.go.jp

1. はじめに

海岸域、特に、砕波帯内においては、波の砕波や強い流れによって、測量船や人が容易に立ち入ることはできず、海底地形を正確に測量することは難しい。こうした砕波帯内において、航空機からグリーンレーザー光を用いて、広範囲で高密度に測深が行えるようになってきている。しかしながら、砕波による海中への気泡の混入や底質の巻き上げによる濁りなどが生じている砕波帯内における航空レーザー測深の精度についての知見は少ない。そこで、波崎海洋研究施設周辺で航空レーザー測深を行い、観測棧橋に沿った当日の断面測量結果、および、年2回の深浅測量結果を用いて、航空レーザー測深の砕波帯内における測量精度の検証を行った。また、観測棧橋に沿って透明度や濁度と光量子の鉛直分布などの水質観測を同時に行い、航空レーザー測深の限界水深についての確認を行った。

グリーンレーザー光を用いた航空レーザー測深は、1980年代には、アメリカ、カナダ、オーストラリアで実用化され、測量船で測深を行うことが困難な岩礁域やサンゴ礁域の海岸線付近で測量が行われている。日本では2003年に海上保安庁に航空レーザー測深機が導入され、伊予灘において測量機器の性能検証が行われた（戸澤ら、2004）。近年では小型化された測深機を用いて、河川測量への適用検討が行われ、河川横断測量の精度検証が行われている（中村ら、2017）。しかしながら、砕波帯内においては、真値となる測量結果が少ないことにより測深精度の検証が十分に行われていない。

測量法における航空レーザー測深の位置づけは、測量法34条の規定に基づく作業規程の準則の中で、17条2マニュアルの無い新しい測量技術として特例的に扱われ、「公共測量を行う場合には、作業マニュアルや精度検証報告書の作成、測量実施の際には既存の測量技術と比較して精度の確保することや精度管理に問題がある場合には別の方法で測量を行うこと、測深精度が水質に依存するので現地で点検測量を行うこと」が求められている。また、水路業務法における航空レーザー測深の位置づけは、水路測量業務準則の64条から67条の航空レーザー測量の中で、「測深および沿岸域の測量において測定値の精度、使用機器の精度、各種補正精度の確認を行うこと」が定められ、水路測量業務準則施行細目の12節では、「浅部の確認のため可能な限り測量船により得られたデータとの比較検討やノイズ除去の判断が付かない場合には測量船等による確認すること」が求められている。どちらの測量においても、測深精度の検証を十分に行い、透明度や濁

りなどの水質による測定ノイズの発生とその除去や測深限界の検討が重要である。砕波帯内の測深においては、砕波による気泡混入や底質の巻き上げによる濁りによって測深精度の低下や測深不可域が生じるので、測定方法と解析技術の改良を行い、海岸域の測量に広く用いられる手法とするための技術開発を行う必要がある。

2. 航空レーザー測深精度および計測限界の検証方法

航空レーザー測深は、2017年11月6日10:00-12:00の間に波崎海洋研究施設周辺を飛行して計測を行った。同時刻に、波崎海洋研究施設観測棧橋上から海底地形の断面測量、および、砕波位置、透明度の観測、光量子束密度と濁度の鉛直分布観測等を行った。航空レーザー測深の精度については、観測棧橋上からの海底断面測量結果を真値として、グリーンレーザー光による測深結果を比較して検証した。また、測量時期が離れており、砕波帯内の地形変化が生じているため、測深精度の検証には用いないが、7月と12月に行った波崎海洋研究施設周辺での深浅測量結果を用いて、航空レーザー測深の計測限界水深と水質との関係についての確認を行った。

2.1 航空レーザー測深の内容

航空レーザー計測には、写真-2.1の回転翼機（アエロスパシアル社製350B）に搭載したレーザー測深機（LeicaGeosystems社製ChiropteraII）およびGNSS/IMU装置（Novatel社製SPAN with LCI-100 IMU）を用いた。使用したレーザー測深機は、測深用のグリーンレーザーキャナと地形用の近赤外線レーザーキャナ、および、RGBカメラと近赤外線カメラで構成されている。製品仕様上の測深最大深さ D_{max} は、

$$D_{max} = 2.2/K \quad (\sim 1.5 \text{ セッキー水深}) \quad (2.1)$$

で表され、海水の光の消散係数 K の値によるが、セッキー板を用いた透明度の1.5倍の水深まで測深可能である。

航空レーザー計測は、図-2.1に示す波崎海洋研究施設周辺の沿岸方向にC-1～C-7の7本の飛行コースを設定し、飛行高度500m、飛行速度55kt（約100km/h）、レーザーキャナのオーバーラップ率50%で行った。当日の気象・海象・水質の条件は、晴れ、風速1.3m/s、波高1m未満、観測棧橋先端での透明度は4.5mであった。

1992年4月から1993年11月に行った透明度観測（付図.21）によると、透明度が4m以上となるのは年間22%、5m以上となるのは年間10%（付表.1）であり、レーザー測深は、気象・海象・水質の条件が良い日に実施された。



写真-2.1 航空レーザー測深の機材



図-2.1 航空レーザー測深の範囲と飛行コース

陸上の航空レーザー測量と同様に、調整用基準点を鹿島港南護岸、観測栈橋中央デッキ、研究棟屋上、海岸道路上の4点に設置し、グリーンレーザー光と近赤外線レーザー光による測定誤差を評価した。どちらの測定誤差も標準偏差0.02~0.03mと小さく、レーザー測量の位置と高さの誤差補正の必要はなかった。

図-2.1中の太枠で示す範囲で、レーザー反射強度の時間変化データから、構造物や海面、地盤面等の反射位置の座標値データ（オリジナルデータ）が作成された。さらに、構造物や海面、海中部からの反射を取り除いた陸上から海底までの地盤面の座標値データ（グランドデータ）が作成された。グランドデータをもとに、波崎海洋研究施設周辺での深浅測量の測線に合わせて、10m~20m間隔に補間された地盤高データが作成された。

2.2 波崎海洋研究施設での現地観測内容

海底断面地形の測量は、波崎海洋研究施設観測栈橋上（写真-2.2）から、5m間隔（栈橋座標上の0m~385mの間）

でメジャー付きの3kgの重錘を海底面に降ろすレッド測深によって行った。陸上部地形の計測は、5m間隔（栈橋座標上の-115m~0m）でレベル・スタッフを用いて行った。また、観測栈橋上の50m、65m、95m、115m、145m、190m、240m、285m、330m、380mの10地点から、直径30cmの白色板（セッキー板、写真-2.3）を海中に沈降させ、セッキー板が波によって見え隠れする水深を計測し、透明度とした。さらに、同じ10地点で、光量子計・濁度計・水中カメラを海中に吊り降ろし、光量子束密度と濁度の鉛直分布の計測および水中の濁りと泡の状況を撮影した。図-2.2に計測した海底断面形状（実線）と透明度の岸沖分布（破線）を示す。岸沖位置の280mから沖側の海底地形には、栈橋を支える鋼管杭周辺の洗掘が計測されており、等間隔に深所がある。また、岸沖位置170mと200m付近の海底は複数杭の影響で広い洗掘穴が生じている。透明度について、栈橋先端部の380m地点以外は、セッキー板が海底面に着底しても円盤の形状が確認されており、実際の透明度は、図中の値より、大きな値である。図中の⇔は、目視によって観測した波が砕波している範囲を示している。付図.1~付図.20に光量子束密度と濁度の鉛直分布観測結果を示す。

当日の観測栈橋に沿った断面測量の他、7月と12月に波崎海洋研究施設周辺で、観測栈橋を中心に沿岸方向600m、岸沖方向1kmの範囲で音響測深による深浅測量を行った。



写真-2.2 航空レーザー測深実施日の海象状況

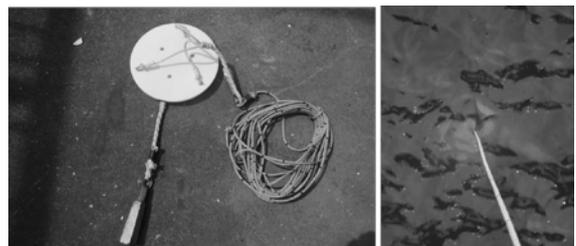


写真-2.3 セッキー板を用いた透明度の観測

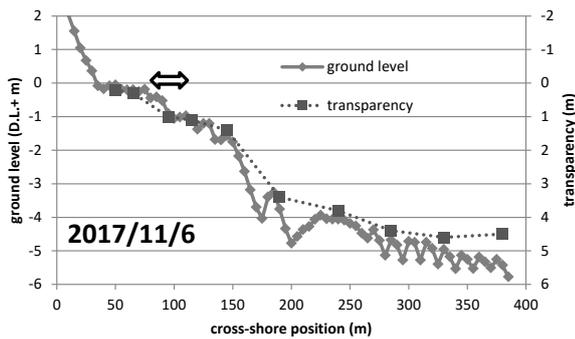


図-2.2 海底断面地形と透明度の岸沖分布
 実線：地盤高（左縦軸），破線：透明度(右縦軸)
 横軸：岸沖位置，⇔：砕波位置

3. 航空レーザー測深の海底面測得状況と測深精度

海底面の測得状況および地盤高さ精度の検証には、航空レーザー測深のオリジナルデータ（ノイズ除去前）を用い、観測栈橋に沿った地盤高さを真値として比較を行った。また、濁りによる航空レーザー測深の限界水深の検討には、グランドデータ（ノイズ除去後）から深浅測量の測線に合わせて地盤高を抽出したデータを用いた。

3.1 波崎海洋研究施設観測栈橋に沿った航空レーザー測深の測得状況

観測栈橋上には、0m～385mの5m間隔の測点に、写真-3.1に示すような目盛が付けてあり、各測点の平面位置と高さの座標はGNSSで測量されている。今回の航空レーザー測深の測得状況の解析では、栈橋上の各測点から平面距離1m以内でレーザーが反射した点をオリジナルデータから抽出して検討に用いた。図-3.1に栈橋上の120m測点での解析例を示す。この測点の半径1m以内でのレーザー反射は92点あり、その反射点を地盤高さで表すと、栈橋デッキ上（高さ6m程度）に75点、海面上（高さ0m付近）に6点、海底面上（高さ-1m以下）に11点、の3種類に分類される。海底面に分類された反射点の平均高さは-2.24m、その標準偏差は0.16mである。分類した反射点を平面座標系にプロットしたものを図-3.2に示す。図中左上半分が栈橋デッキ上で反射したものである。レーザー光は上空から斜めに発射されているため、デッキ下の海底上で反射する場所もある。各測点の地盤高さ、および、水面高さ、栈橋上構造物等の高さは観測により既知であるので、同様にして、レーザー反射点の高さの値を用いて、反射点を海底面、陸面あるいは水面、構造物の3種に分類して、それぞれのレーザー測得密度を調べた。観測栈橋の無い砂丘部については、岸沖方向に5m間隔で解析点を定め、

観測栈橋の沖合については、岸沖方向に10mから20m間隔で解析点を定め、レーザー反射点を分類し、測得密度を調べた。

図-3.3に観測栈橋に沿った岸沖測線上のグリーンレーザーの測得密度を示す。縦軸は1平方メートル当たり換算したレーザー反射点の数を表す。横軸は、栈橋に沿った岸沖測線上の砂丘上(-120m地点)から沖合(740m地点)までの岸沖位置を表す。凡例の黒塗が海底面、点塗が陸面あるいは水面、グレー塗が構造物を表す。岸沖位置60mと70m～95mの範囲で海底面が測得されていない。岸沖位置65m地点は1点だけ海底面が計測されている。岸沖位置60m～95mの範囲は目視観測による波の砕波による白泡が生じている範囲と一致する。また、岸沖位置205m地点については、栈橋中間部の広いデッキおよび杭が密に設置されているため、海底面が測得されていない。

構造物や陸上砂浜での測得密度に比べて、海底面の測得密度は低く、1平方メートル当たり平均6.4点である。

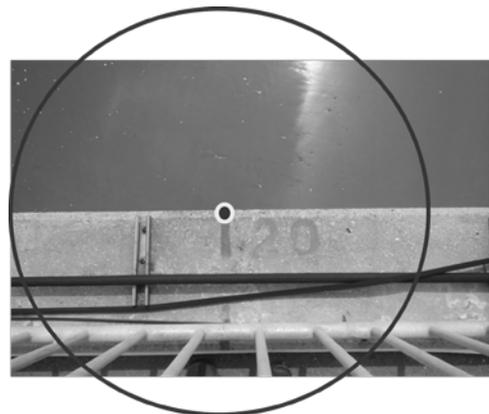


写真-3.1 断面計測位置と砂浜面あるいは海面の状況

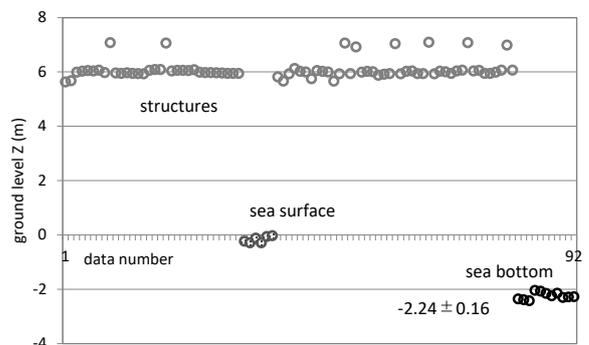


図-3.1 栈橋上の120m測点でのデータ解析例
 横軸：データ数，縦軸：地盤高

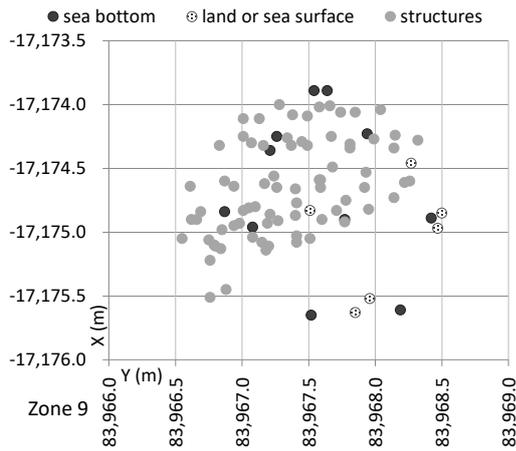


図-3.2 グリーンレーザーのフットプリント
横軸：東西位置，縦軸：南北位置

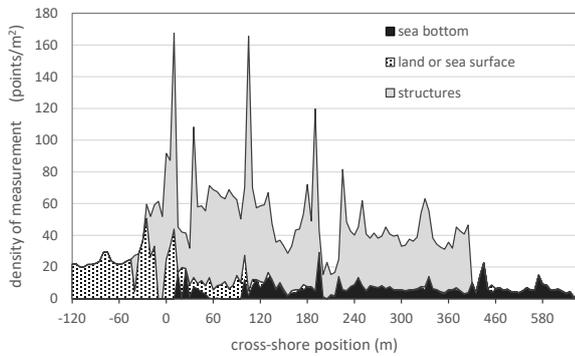


図-3.3 グリーンレーザーの測得状況
横軸：岸沖位置，縦軸：測得密度

3.2 航空レーザー測深の測深精度

レーザー反射点を3種に分離した後、種類別の平均高さを求めた。図-3.4に航空レーザー測深によって得られた断面地形（○印）とレッド測量によって得られた断面地形（実線）との比較を示す。図-3.4中のレーザー測深値と断面測量値は、陸上と海底ともによく一致している。270m地点から385m地点までを拡大して、ALB測量結果（○印）と断面測量結果（実線）の海底地盤を比較すると（図-3.5），観測栈橋を支える杭周りに生じている洗掘状況についても正確に計測されていることがわかる。図-3.6にALB測量と断面測量との海底地盤高の相関を示す。図-3.7に観測栈橋に沿った岸沖断面でのレーザー測深値とレッド測量値との差 ΔZ （破線， ΔZ が正の時，レーザー測深が浅く計測されていることを表す）と，その二乗平均平方根誤差（実線，RMSE，計測精度）を示す。測深値の差 ΔZ については，正負の値が混在しており，一方的に浅く測深したり，深く測深したりする傾向は見られな

い。また，計測精度については，部分的に0.2mを越える場所もあるけれど，0.1m程度に集中しており，欠測点を除く観測栈橋上の測量範囲で，計測精度の平均値は，0.13mである。

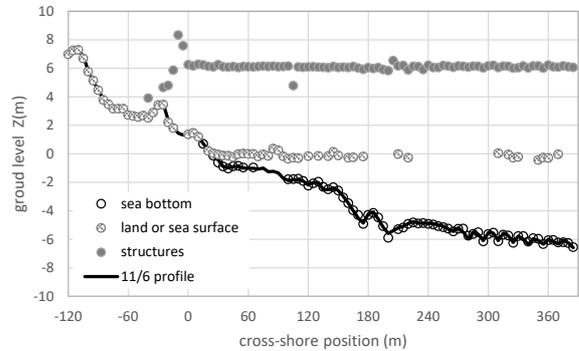


図-3.4 ALB測量と断面測量の比較
横軸：岸沖位置，縦軸：地盤高

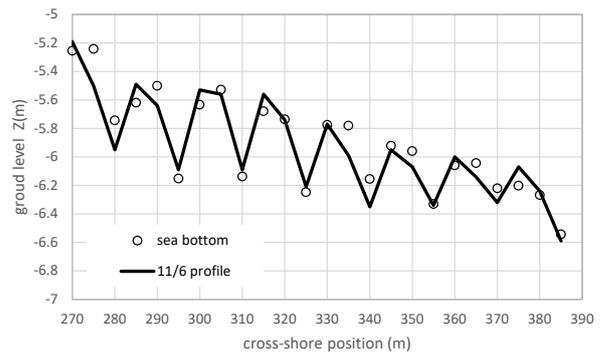


図-3.5 ALB測量と断面測量の比較（杭洗掘部）
横軸：岸沖位置，縦軸：地盤高

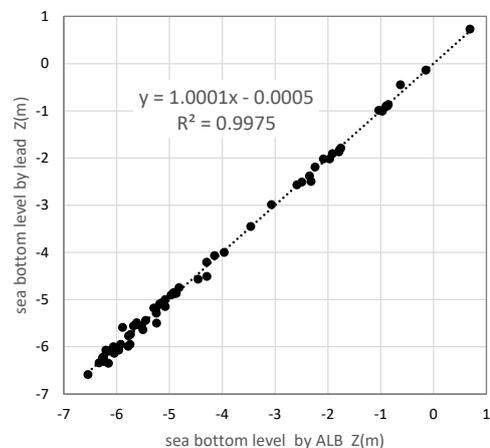


図-3.6 ALB測量と断面測量の海底地盤高比較
横軸：ALB地盤高，縦軸：断面測量地盤高

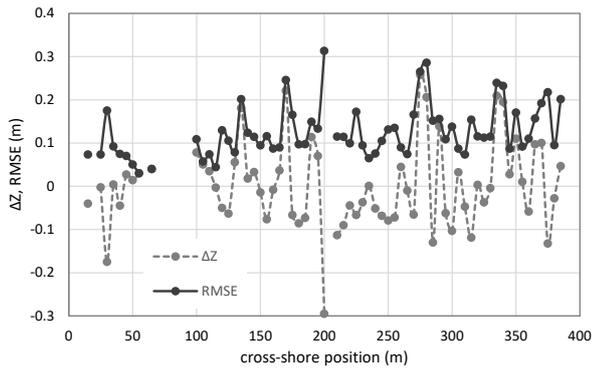


図-3.7 ALBの測量精度の岸沖分布

横軸：岸沖位置， ΔZ ：ALB測量とレッド測量の差
RMSE：差の二乗平均平方根誤差（計測精度）

3.3 航空レーザー測深の測深最大水深と透明度

今回の航空レーザー測深では、波は穏やかで透明度も高く、砕波の白泡による欠測点はあるものの、観測栈橋の範囲内で、水中の濁りによる海底面の誤認は見られなかった。そこで、2017年7月と12月に行った観測栈橋周辺の深浅測量結果とレーザー測深結果を深浅測量測線に合わせて、10m～20m間隔に抽出した地盤高データを用いて、沖合での海底面の誤認と透明度や濁りの関係を調べた。参考として、付図.22に7月～12月の間の観測栈橋先端で計測された1時間毎の有義波高と測量実施日との関係を示す。7月の深浅測量の後、航空レーザー測深実施までには、時化が何度もあり、地形は大きく変化したと考えられる。また、航空レーザー測深後から、12月の深浅測量実施までは、期間も短く、高い波も少ないことから、水深の深い場所での地形変化は小さいと考えられる。図-3.8に深浅測量の測定位置グリットと断面地形比較を行った岸沖測線の番号を示す。

図-3.9に深浅測量の測線No.7（波崎観測栈橋から鹿島方向に300m離れた岸沖方向測線）での、7月（破線）と12月（実線）の深浅測量とレーザー測深（○印）との比較を示す。岸沖位置0m～400mは激しく地形変化が生じる場所であるので、7月の深浅測量結果とは大きく乖離しているが、12月の深浅測量結果とは岸沖位置120m以浅の形状が異なる以外はほぼ一致している。岸沖位置785mと865m地点のレーザー測深結果には、海底面の誤認が生じ、浅く測深されている。

図-3.10に深浅測量の測線No.15（波崎観測栈橋に沿った岸沖方向測線）での、7月と12月の深浅測量とレーザー測深との比較を示す。No.7測線と同様に、7月の深浅測量結果とは大きく乖離しているが、12月の深浅測量結果とは岸沖位置120m～220mの形状が異なる以外はほぼ一致

している。岸沖位置785m～825m地点のレーザー測深結果にも、海底面の誤認が生じている。

同様に、図-3.11に深浅測量の測線No.23（波崎観測栈橋から銚子方向に300m離れた岸沖方向測線）での、7月と12月の深浅測量とレーザー測深との比較を示す。12月の深浅測量結果とはほぼ一致している。岸沖位置785m～865m地点のレーザー測深結果にも、海底面の誤認が生じている。

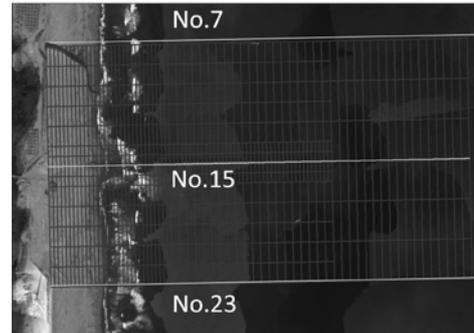


図-3.8 深浅測量の測線位置と比較測線

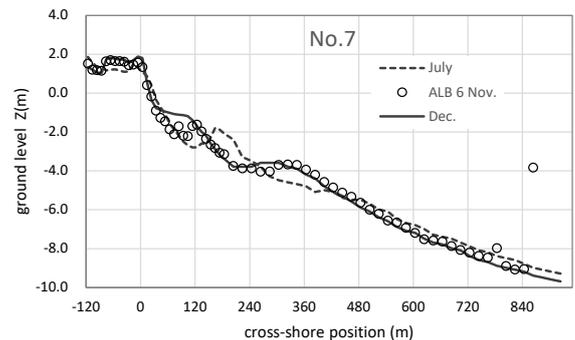


図-3.9 測線No.7鹿島側の海底断面比較
横軸：岸沖位置，縦軸：地盤高

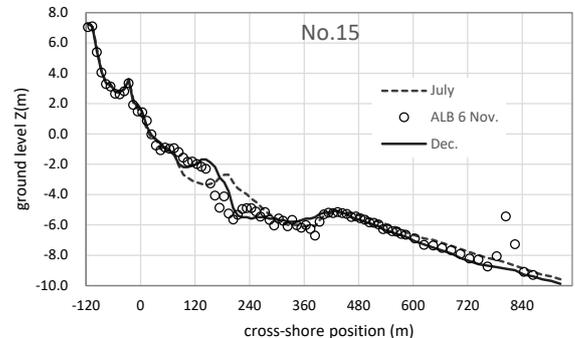


図-3.10 測線No.15栈橋に沿った海底断面比較
横軸：岸沖位置，縦軸：地盤高

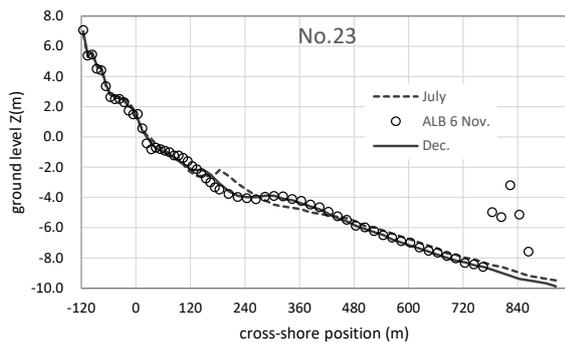


図-3.11 測線No.23銚子側の海底断面比較
横軸：岸沖位置，縦軸：地盤高

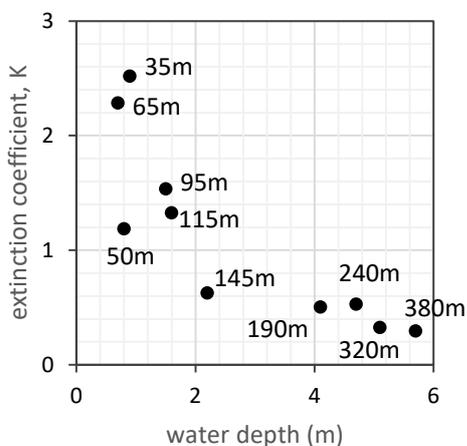


図-3.12 光子鉛直測定地点の光の消散係数 K
横軸：水深，縦軸：消散係数（付図.1～付図.10より）

海底面の誤認は水深8mを越えるあたりから3測線（図-3.9～図-3.11）ともに生じている。観測栈橋先端での透明度や海中の光の消散係数 K が沖合800m付近まで一定と仮定すると、式2.1で表されるレーザー測深に用いた機器の製品仕様上の測深最大深さ D_{max} は、透明度を用いた式では、6.7mとなる。また、光子計の観測結果から、海中の光の消散係数 K を求めると（図-3.12）、観測栈橋先端付近では、約0.3であるので、海中の光の消散係数 K を用いた式では、測深最大深さ D_{max} は、7.3mとなる。深浅測量の各測線上の水深9mを越える場所での海底面が測深されていることから、適切なノイズ除去を行えば、透明度の2倍程度まで測深が可能であることがわかる。

4. まとめ

波崎海洋研究施設周辺で航空レーザー測深、および、観測栈橋に沿った断面地形測量、透明度観測、光子・

濁度の鉛直分布観測を行い、グリーンレーザー測深による砕波帯内の海底地盤高の測得状況、および、測量精度の検証、水質による測深限界の検討を行った。海底面のレーザー測得密度は、陸上面、構造物面のレーザー測得密度に比べて小さく、平均6.4点/m²であった。砕波による白泡が多く生じている範囲では、欠測があるものの、栈橋を支える鋼管杭周りの洗掘状況についても正確に計測が行われている。観測栈橋の範囲内のレーザー測深による海底地盤高の計測精度は、平均して0.13mであった。また、海底面の誤認識を適切にノイズ除去できれば、測深限界深さは、透明度の2倍程度である。

5. おわりに

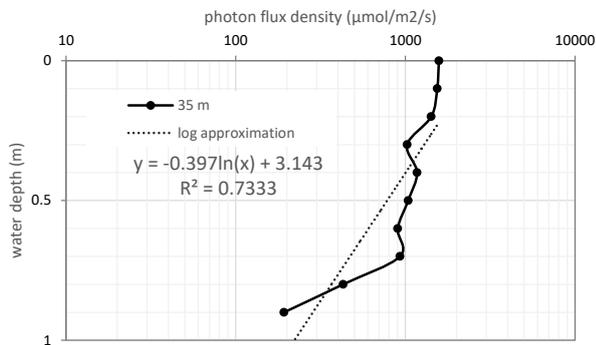
今回の精度検証結果から、航空レーザー測深は高い精度で海底地盤高さを広範囲、高密度に測深できるけれども、砕波による白泡の直下では欠測が生じ、水深の深い場所では海水の濁り等による海底地盤の誤計測が生じていることがわかる。白泡による欠測については、波の砕波位置での計測を複数回行うことや、潮位の異なる時間帯に計測を行うことによって、砕波によって生じる白泡の影響を少なくして測深を行うなどの計測方法の改良が考えられる。また、濁り等による海底地盤の誤計測については、レーザー反射強度の時間変化データを用いて、海中のノイズ除去を行うなどの解析方法の改良が考えられる。海底地盤測深精度の検証、および、欠測域の低減、測深限界の増深を行うことにより、航空レーザー測深の測定の信頼性を確保することが、今後の航空レーザー測深を公共測量や水路測量に活用するための鍵になると考えられる。

（2018年4月23日受付）

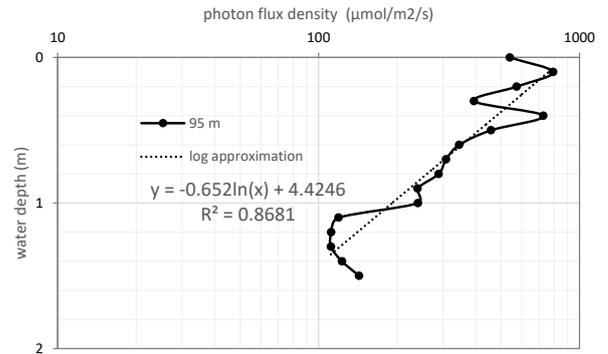
参考文献

- 戸澤実, 松本良浩, 岩本暢之, 小野智三, 矢島広樹 (2004) : 航空レーザー測深機のテスト飛行について, 海洋情報部技報, 第22号, pp.1-6.
- 中村圭吾, 福岡浩史, 小川善史, 山本一浩 (2017) : グリーンレーザー (ALB) による河川測量とその活用, RIVERFRONT, 第84号, pp.16-19.

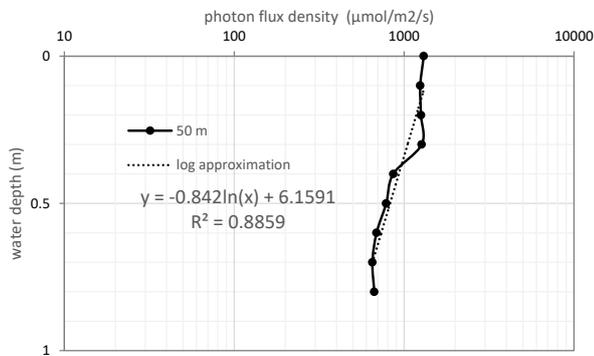
付録 光量子束密度、濁度の観測結果



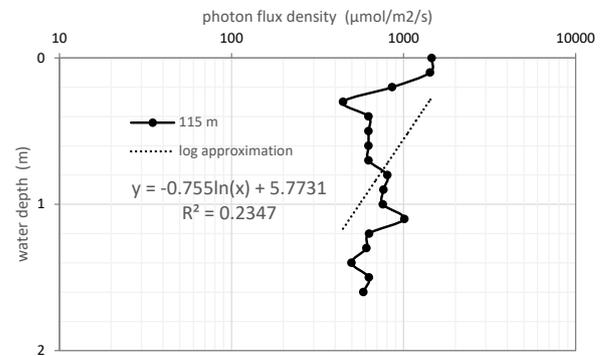
付図. 1 光量子束密度の鉛直分布 (35m地点)
横軸：光量子束密度(log軸)，縦軸：水深



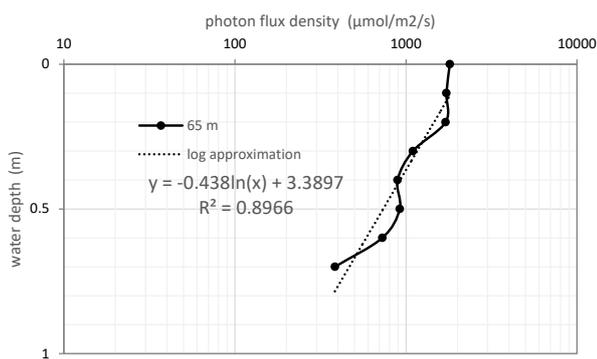
付図. 4 光量子束密度の鉛直分布 (95m地点)
横軸：光量子束密度(log軸)，縦軸：水深



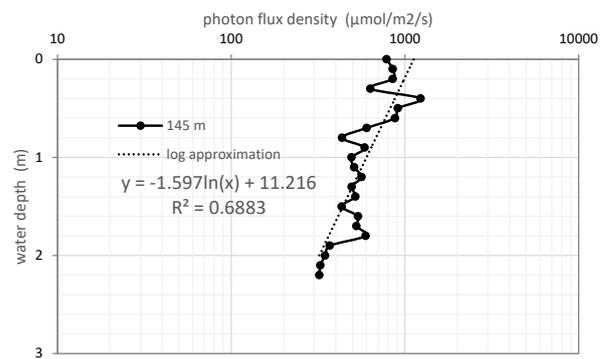
付図. 2 光量子束密度の鉛直分布 (50m地点)
横軸：光量子束密度(log軸)，縦軸：水深



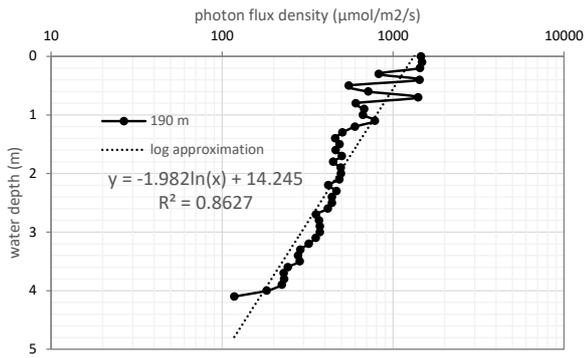
付図. 5 光量子束密度の鉛直分布 (115m地点)
横軸：光量子束密度(log軸)，縦軸：水深



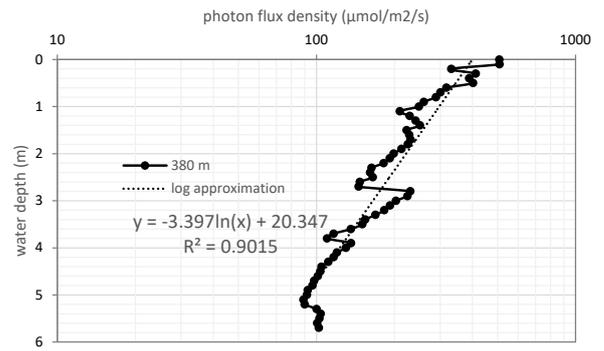
付図. 3 光量子束密度の鉛直分布 (65m地点)
横軸：光量子束密度(log軸)，縦軸：水深



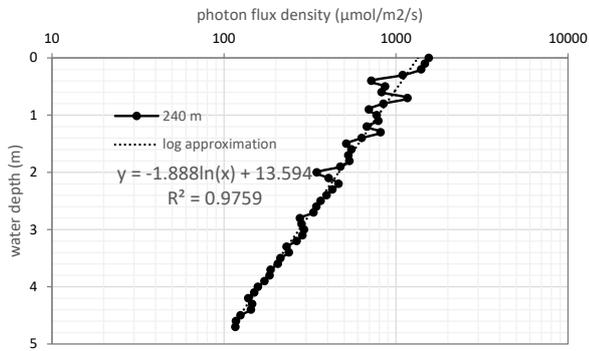
付図. 6 光量子束密度の鉛直分布 (145m地点)
横軸：光量子束密度(log軸)，縦軸：水深



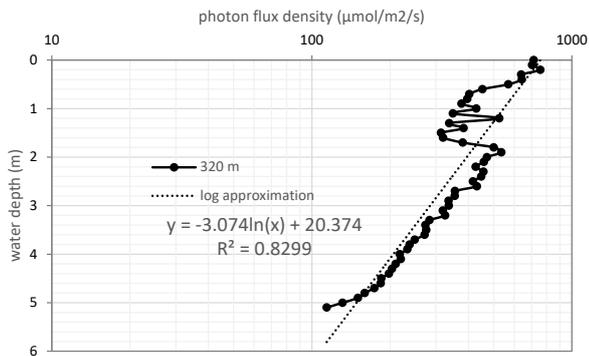
付図. 7 光量子束密度の鉛直分布 (190m地点)
横軸：光量子束密度(log軸)，縦軸：水深



付図. 10 光量子束密度の鉛直分布 (380m地点)
横軸：光量子束密度(log軸)，縦軸：水深

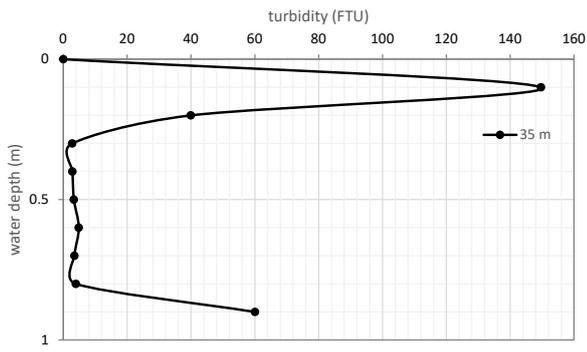


付図. 8 光量子束密度の鉛直分布 (240m地点)
横軸：光量子束密度(log軸)，縦軸：水深

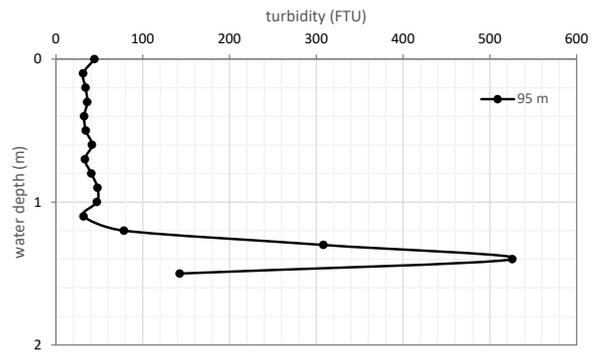


付図. 9 光量子束密度の鉛直分布 (320m地点)
横軸：光量子束密度(log軸)，縦軸：水深

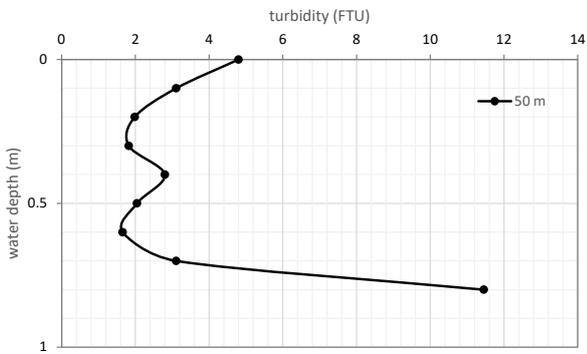
注) 付図. 1~付図. 10中の近似式の傾きの逆数の絶対値が光の消散係数 K となる。



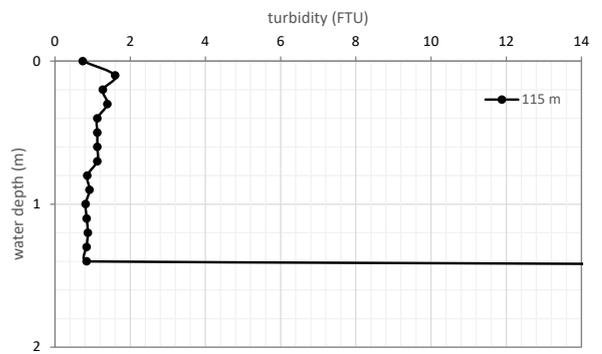
付図. 11 濁度の鉛直分布 (35m地点)
横軸：濁度，縦軸：水深



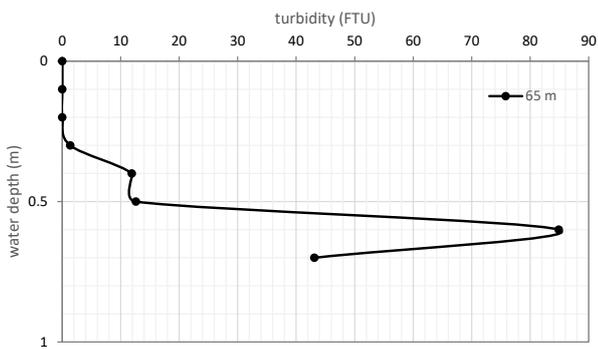
付図. 14 濁度の鉛直分布 (95m地点)
横軸：濁度，縦軸：水深



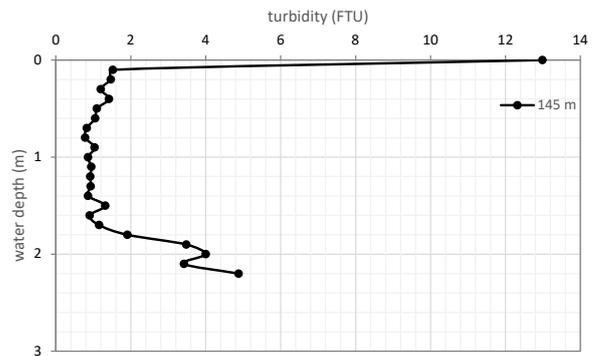
付図. 12 濁度の鉛直分布 (50m地点)
横軸：濁度，縦軸：水深



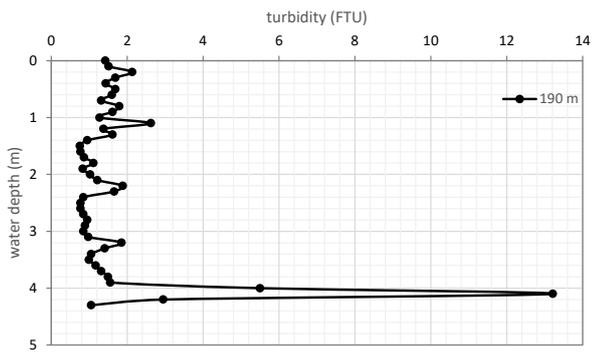
付図. 15 濁度の鉛直分布 (115m地点)
横軸：濁度，縦軸：水深



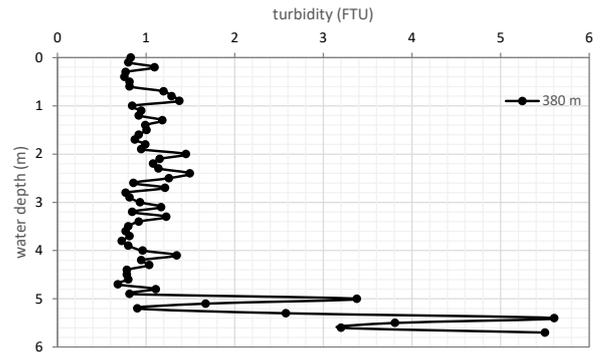
付図. 13 濁度の鉛直分布 (65m地点)
横軸：濁度，縦軸：水深



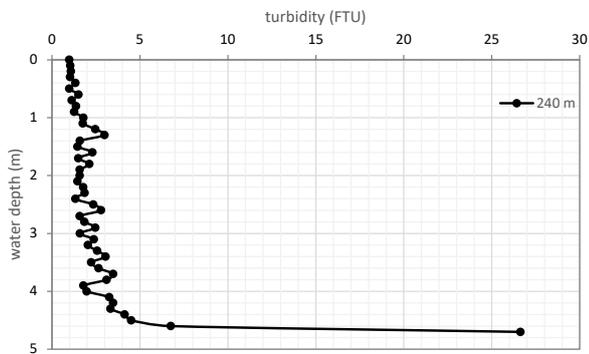
付図. 16 濁度の鉛直分布 (145m地点)
横軸：濁度，縦軸：水深



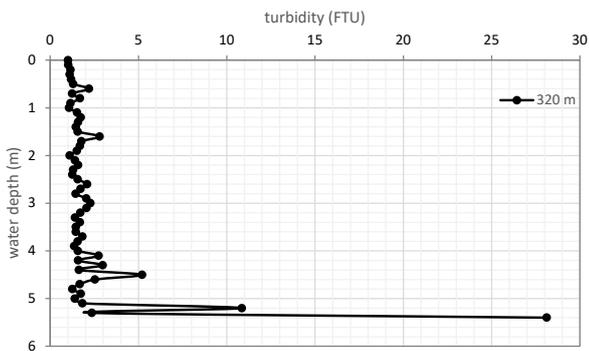
付図. 17 濁度の鉛直分布 (190m地点)
横軸：濁度，縦軸：水深



付図. 20 濁度の鉛直分布 (380m地点)
横軸：濁度，縦軸：水深



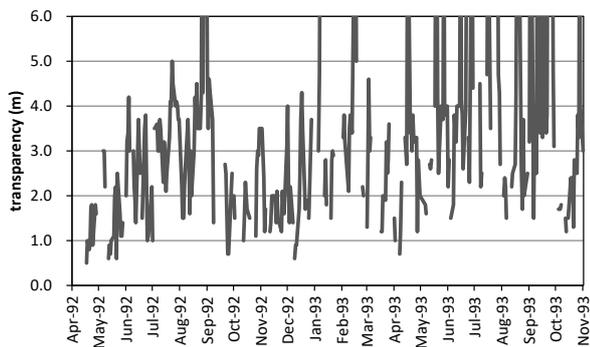
付図. 18 濁度の鉛直分布 (240m地点)
横軸：濁度，縦軸：水深



付図. 19 濁度の鉛直分布 (320m地点)
横軸：濁度，縦軸：水深

注) 付図. 11～付図. 20中の濁度の観測値には底質の巻き上げによる濁りだけでなく、海水中の白泡混入の影響が含まれている。

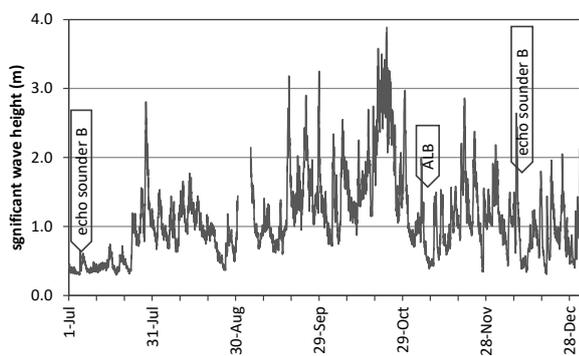
付録 透明度の長期観測結果，2017年7月～12月の有義波高の観測結果



付図. 21 観測栈橋先端での透明度の観測（380m地点）
横軸：観測日，縦軸：透明度

付表. 1 観測栈橋先での高い透明度の出現頻度

1992/4/11-1993/11/1の透明度の観測	
観測日数＝	305 day
透明度3m以上＝	141 (46%)
透明度4m以上＝	67 (22%)
透明度5m以上＝	31 (10%)



付図. 22 2017年7月～12月の有義波高と測量実施日

港湾空港技術研究所資料 No.1346

2018.6

編集兼発行人 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所

発行所 港湾空港技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号
TEL. 046(844)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

印刷所 株式会社シーケン

Copyright © (2018) by MPAT

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of MPAT

この資料は、海上・港湾・航空技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は海上・港湾・航空技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。