

港湾事業における航空機測深技術 ALB活用に関する検討

琴浦 毅¹・Sivaranjani JAYAPRASAD²・今野 洋幸³・宮作 尚宏⁴・
堺 浩一⁵・間野 耕司⁵

¹ 正会員 五洋建設(株) 技術研究所(〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町 1534-1)
E-mail: tsuyoshi.kotoura@mail.penta-ocean.co.jp

² 正会員 五洋建設(株) 技術研究所(〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町 1534-1)
E-mail: sivaranjani.jayaprasad@mail.penta-ocean.co.jp

³ 正会員(株) パスコ 事業統括本部生産改革推進部
(〒153-0043 東京都目黒区東山 2-8-10 目黒ビル別館 2F)
E-mail: hoinrn4764@pasco.co.jp

⁴ (株) パスコ 事業統括本部生産改革推進部(〒153-0043 東京都目黒区東山 2-8-10 目黒ビル別館 2F)
E-mail: nuakoa2400@pasco.co.jp

⁵ 正会員(株) パスコ 事業統括本部新空間情報部(〒153-0043 東京都目黒区東山 2-8-10 目黒ビル別館 2F)

水中を透過するグリーンレーザを活用した航空機測深技術 Airborne Laser Bathymetry (ALB) は、気中水中データをシームレスに取得できる技術として河川、海岸管理での活用が検討され始めているが、港湾事業における適用性について検証された事例は少ない。そこで、本研究では透明度が 3m~15m の条件の異なる 3 港湾の観測を通じて ALB の港湾事業への適用性について検討した。

その結果、ケーソン壁面部や高濁度下のデータ取得について課題はあるものの、透明度によっては水深 20m までも気中水中データが連続して取得できるなど港湾事業においても活用が期待できる技術であることが確認された。

Key Words : Airborne Laser Bathymetry, ALB, ICT, i-Construction, survey

1. はじめに

国土交通省が推進する i-Construction は開始から 3 年が経過し、ICT 技術を活用することで各工種の生産性向上が期待されている。港湾工事においてもナローマルチビーム (NMB) によって取得した海底地形の 3 次元モデルを数量算出や出来形管理に活用する ICT 浚渫工、リアルタイム水中ソナーや UAV を活用した ICT ブロック工の実装が進み、対象物を 3 次元的に捉え、活用する動きが高まっている。しかし、消波ブロックに代表されるように気中水中部が連続する港湾構造物の状態把握では、気中測量、水中測量をそれぞれ別々に実施した後にデータを合成する必要がある。さらにデータ合成の際に必要な重複部分を確保するために、気中測量は低潮位時、水中測量は高潮位時で測量する必要があるため測量時間が半日程度の時間を要する点に加えて、UAV 測量の事前準備として対空標識の複数設置や NMB の艀装などに時間がかかる点が課題として挙げられる。

その点において、水中を透過するグリーンレーザを活

用した航空機測深技術 Airborne Laser Bathymetry (ALB) は、測量に要する事前準備が少なく気中水中データをシームレスに取得できる技術であり、これらの課題解決に寄与することが期待できる。

ALB は河川、海岸管理への適用が検討され、業務への展開も始まっているが^{1) 2) 3)}、グリーンレーザの水中での透過については、濁度依存性が存在し、高濁度下の条件では測定可能水深が限られることが知られている。また、港湾事業へ ALB を適用した事例は少ないことをふまえて、本研究では透明度、波高、飛行速度条件の異なる 3 港湾の観測を通じて ALB の港湾事業への適用性について検討した。

2. ALB について

ALB は航空機に搭載される GNSS/IMU (衛星測位/慣性計測) 装置、近赤外波長域と緑色波長域のレーザ装置を用いて陸部と水部の地形を計測するシステムである。

図-1 に計測概念を示す。近赤外のレーザ光は、水に吸収されやすく水底の反射波を得られないため、陸部と水面を対象として反射波のデータを記録する。一方、グリーンレーザは水による吸収の影響が小さく水底からの反射波を得やすいため、水部を主な対象として反射波を記録する。これら二つのレーザの特性を利用して陸部と水部を分離することで水面を抽出し、図-2 に示すグリーンレーザの水面と水底の反射波の時間差から水深を得る。なお衛星測位を自己位置の基準として利用するため陸部と水部の観測データをシームレスに生成することができる。また水中の屈折率を考慮するために航空機から円を描くように斜め下方向に対してレーザを照射していることから、ケーソンのような直立壁に対してもある程度のデータ取得が期待できる。

3. 観測条件

観測対象とした3港湾における観測条件一覧を表-1 に示す。計測は水質条件が良いと考えられる冬期を対象に実施した。しかし徳島小松島港に関しては、透明度が2m~3m程度となった、過去に近傍の吉野川河口でALBによる6mの測深実績を確認していたため、想定を下回る結果となった。和歌山下津港、利島港は固定翼機による観測であったのに対し、徳島小松島港は低速度で飛行できる回転翼機を用いたため、点密度が増加する飛行計画を設定した。いずれの地区も飛行高度500m、コース幅360m、コース重複率50%と設定した。波高はおおよそ0.5m~2.0mの条件であった。

4. 観測結果

(1) 和歌山下津港

和歌山下津港は西側に海域が開けている静穏な海域にあり、ALBの比較対象としてUAV写真測量・NMBを実施した。計測対象は防波堤であり、一部は消波ブロックで被覆されている(図-3)。計測時期はALBが3月、UAV写真測量・NMBが6月と3ヶ月の相違があるため、上部工の進捗状態が異なっている。UAV写真測量は防波堤壁面の取得を目的とした斜め撮影や、飛行高度を低くして写真内への海面の映り込みを低減するなどの工夫をして取得した写真を用いてSfMを実施して気中部の3次

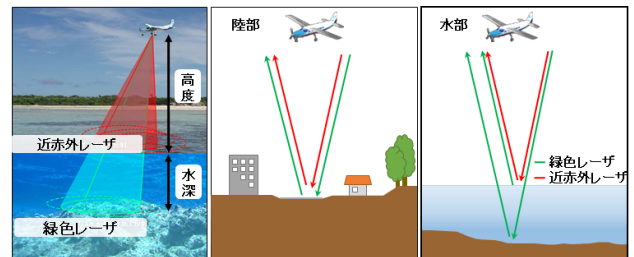


図-1 ALB計測概念図

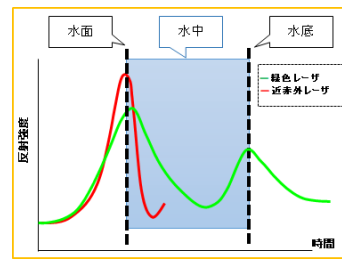


図-2 レーザ反射波形概念図

表-1 対象港湾における観測条件一覧

観測対象	和歌山下津港	利島港	徳島小松島港
計測日時	2017/3/12	2018/12/20,21	2018/1/29
使用機体	Cessna 208B	Cessna 208B	ユーロコプターAS350B
飛行速度	222km/h	222km/h	93km/h
コース数	2	4	4
計測点密度	陸上部: 6点/m ² 水部: 1点/m ²	陸上部: 5点/m ² 水部: 1点/m ²	陸上部: 20点/m ² 水部: 4点/m ²
海象条件	波高0.5m以下	12/20: 波高2.0m以下 12/21: 波高0.5m以下	港外側波高1.0m以下
透明度調査	未実施	14m以上	2~3m
ルート (黒線)			

元モデルを作成した。NMBはセンサーを15度斜めに取り付けて計測することで、水面付近までデータが取得可能なように工夫した。その結果、それぞれの観測データを統合することで水際の多少の不連続があるものの、全体に3次元モデルの取得ができています(図-4)。しかし、UAVは干潮時、NMBは満潮に実施する計測機会の考慮や、後からデータを合成する点が課題である。

ALBはUAV測量とは時期が異なるため直接的な比較はできないが、消波ブロック周辺については気中水中がシームレスに取得できている。しかし、防波堤壁部の気中直線部では点密度がある程度確保されているのに対し、ハネ部においては点密度が少なく、水中部の取得ができていない。これは防波堤などに対する航空機の飛行ルートがデータ取得へ影響することを示唆している。

図-5はALBによる等深線平面図であり、防波堤付け根部の自然地形の+13m、防波堤上部工の+7mから、水底の-8mまでの範囲で連続的にデータが取得されている。しかし、-8m以深についてはデータ取得がされておらず、和歌山下津港における計測限界は-8m程度という結果が得られた。この範囲内で水深1mごとに区分した6箇所において3m×3mの正四角形内に位置するALBとNMBの点群の平均高さを算出し、比較結果を表-2に整理した。なおALBの各水深における3m×3m内の点数もあわせて示しているが、目標とした1点/m²を満たしている。ALBとNMBとの計測期間は3ヶ月ほどずれているものの、各水深で較差は4cm~16cm、平均較差5.9cm、標準偏差5.2cmとなっており、標準偏差で±25cmと言われる航空レーザーの精度⁴⁾においては良好な結果となった。



図-3 対象構造物の全体写真

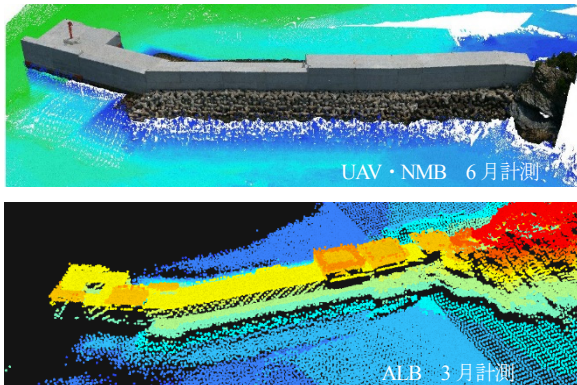


図-4 UAV・NMBとALBの取得データ比較

(2) 利島港

利島港は利島の北側に位置する外海に面した海域において南北に伸びる防波堤を有しており、本州周辺と比較すると透明度が比較的高い。透明度は透明度板と呼ばれる直径30cmの白い円盤を紐に取り付けて、水中へゆっくり沈めていき円盤が肉眼で視認できる深さを確認する簡便な方法で調査した(図-6)。防波堤から透明度調査を実施したところ、14m程度の位置で海底に着底したため、それ以深の調査はできなかったが3地区の中で透明度が最も高い結果が得られた。なお、これまでの河川などにおけるALB適用の知見⁴⁾から、透明度で得られた水深の1.5倍がALBの最大測深と推定されることが分かっており、当該地区においては1.5×14m=21m程度までが計測可能であると推定された。

ALBの計測は12月20日、21日の連続した2日で実施した。20日は北西からの2m程度の波浪が来襲しており、西防波堤遮蔽域においても西岸壁からの反射波の影響が存在している。翌日の21日は波高0.5m程度の静穏な海象条件に改善された(図-7)。図-8は2日間の各日に計測された気水中の標高段彩図である。陸上については各日の取得状況に差はないが、21日と比較して20日の海上の深い水深部分や西防波堤・西岸壁の西側で欠測が確認できる。図-9上は4m格子内における20日の水面測定点の最大、最小値の差分を波高と見なした波高分布である。図-9下は14m以深の等深線域を白色、21日の観測結果と比較して欠測している領域を黒色、波高を50cm間隔で区分した空間部分より黒色欠測域と概ねなることを確認した、1.5m以上の波高域を赤色で示して

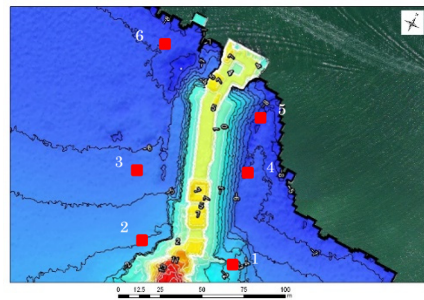


図-5 等深線平面図

表-2 ALBとNMBとの測深比較(D.L. -m)

番号	ALB	NMB	ALB-NMB	ALB 点数
1	-1.241	-1.403	0.162	11
2	-2.699	-2.748	0.049	12
3	-4.372	-4.448	0.076	26
4	-5.572	-5.642	0.07	20
5	-6.491	-6.450	-0.041	12
6	-6.503	-6.539	0.036	15
平均較差		0.059	標準偏差	0.052

いる。この図において、同深度を示す等深線においても波高が高い赤色のエリアでは、欠測を示す黒色が広く分布していることから、水中へのレーザ貫入時のエネルギー減衰量が波高に応じて大きくなり、欠測したと推定される。西防波堤の遮蔽により波の影響が小さい測線①における断面図を図-10に示すが、最大水深はいずれの日においても19mと大きく変化は無い。一方、西側防波堤の遮蔽を受けず、さらに西岸壁の反射波の影響を受ける測線②では20日の観測の最大水深は17m程度と静穏な21日と比較すると1m程度浅い測深となったことに加え、13m以深は点密度が低くなっている。これらのことから波高1.5m以上の環境はALBの測深を阻害する要因になることが確認された。図-11は西防波堤の鳥瞰図であり、気中部である上部工や水底に設置されている根固めブロックは明確に確認できるが、水中壁部は測定点が存在しない。しかし気中部は測定点が存在するため、水中壁部においてはレーザ到達後の反射波が得られていないと推察した。同時期の中水調査より壁部に黒色の海生生物の付着が確認されたため、グリーンレーザが吸収されたものと考えられる。利島のように透明度が高く、最大測深が大きい海域においても、計測対象の表面状況による影響については注意が必要である。

最大測深は19m程度であったが、透明度から推定される最大測深は21m程度である。そこで、最大測深を増加

させる取り組みを試行した。ALBでは図-2に示すように、水底からの反射波のパルスが検知された時間から水深を算定するが、仮に水深が深い場合、水底から返ってくるパルスの検知時間が長くなり、ALB機材の既定設定値のデータ記録時間内ではパルスを検知できない可能性がある。そこで、最大測深増加の取組として、既定値よりデータ記録時間を延長した試行設定とともにレーザ光の水中貫入時のエネルギーを高めるために飛行高度を下げた観測条件にて、静穏であった21日に観測を実施した。表-3に観測条件を示す。

図-12に試行での観測と既定設定の観測で得られた標高段彩図を示す。飛行高度を400mにするとレーザーエネルギーが増加することでピンク色から白色にかけた深部における点密度の増加は確認できるが、最大測深の増加は確認できない。しかし、試行設定を用いると通常の設定と比較してより深い測深が広範囲に確認される結果となった。つまり、利島のような透明度が高い条件ではデータ記録時間を延長することで、透明度から推定された水深21m程度までのデータ取得が可能であることが確認された。

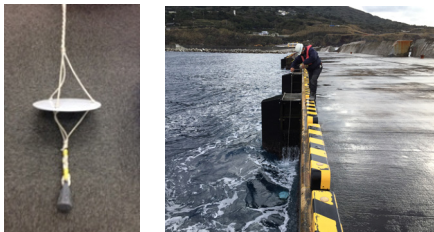


図-6 透明度調査状況

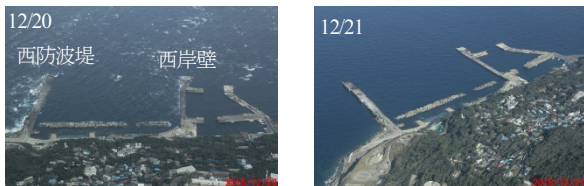


図-7 観測時状況写真 (12/20, 21)

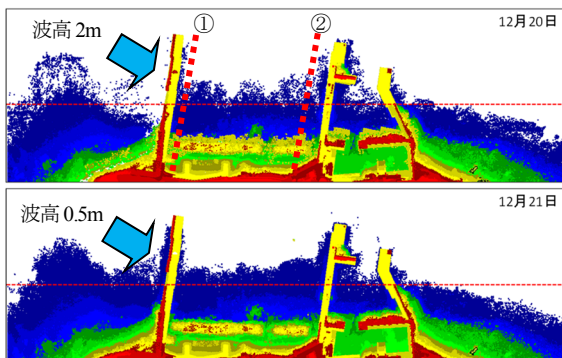


図-8 航空写真とALB測定結果

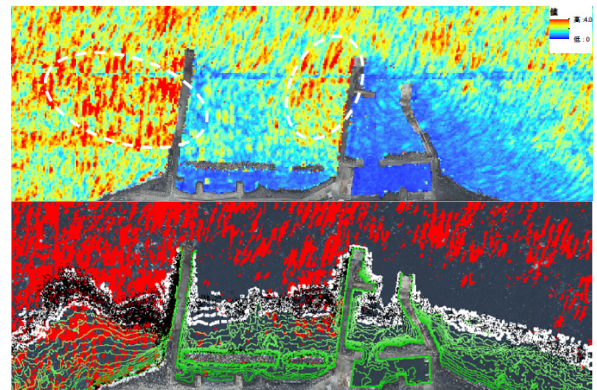


図-9 12/20の波高分布と等深線・欠測域

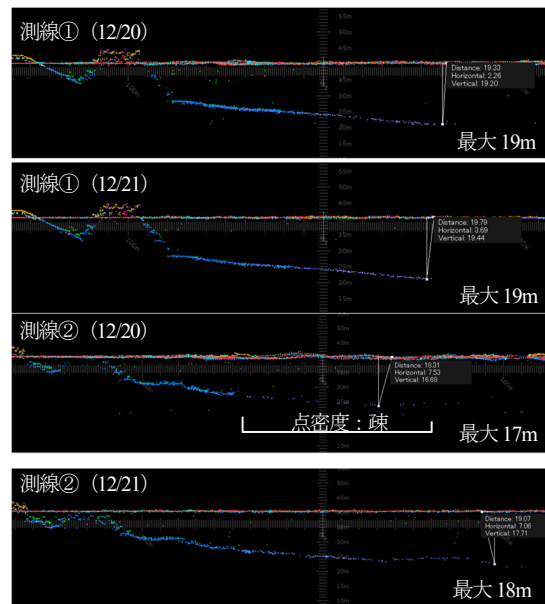


図-10 測線①②の断面図

(3) 徳島小松島港

徳島小松島港は静穏な海域にあり、ALBの比較対象としてNMBを実施した。水質調査は透明度板、直読式濁度計 (RINKO-AAQ)、光量子計を用いた。透明度は2~3m程度であり、最大測深は3~4.5mと推定された。光量子計はグリーンレーザと同一波長帯の光量子を測定するために光学フィルタ (533nm) を装着して、直読式濁度計とあわせてロープに取り付けて水中へ投入し、水底まで移動させながら測定した。測定結果から図-13の算定式によって拡散消散係数 (K値) を算出し、式 (1) を用いてALBの最大測深Dmaxを推定した。

$$D_{max} = D / K \quad (1)$$

ここで、D：機材固有係数であり、今回は2.2である。

この測定から推定されたALBの最大深度と水質調査機器より得られた水深を図-14に示す。港外側の方が推定測深は大きいものの、全体的にALBの推定測深が当該地点の水深を下回っており、海底地形を捉えることができないと予測された。図-15のNMBの観測結果では、防波堤の港内外に水深7m~9m程度の海底地形が分布している。ALBは港外側の消波ブロックの位置における水深4mまでと、港外側的水深7m程度の範囲についての海底地形がおぼろげに確認できるが、港内側の海底地形は捉えられていない。港内外の同程度の水深に対してALBの測深結果が異なる理由は、港内外の濁度の差であると推定される。そこで、直読式濁度計で得られた港内、港外の濁度とALBの測深結果を照らし合せた。なおSt1,St2は一部水深の濁度未観測などのため除外した。図-16は直読式濁度計で得られた港内のSt6,7,8,9と港外のSt.3,4,5の海底までの50cm毎の濁度を累計した結果である。港内の累計濁度は35~45FTUとなり、ALBで測深できた港外の累計濁

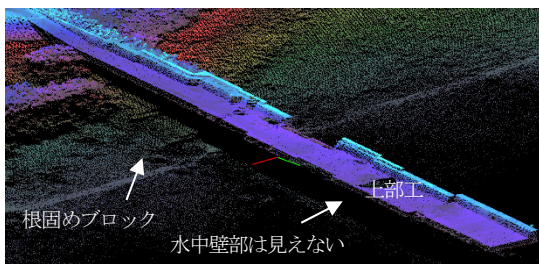


図-11 西防波堤鳥瞰図

表-3 最大測深増加の取組条件

飛行高度	400m
コース幅	360m
SL率	40%
コース数	4
設定変更	有/無 2パターン
計測点密度	陸上部: 6点/m ² 水部: 1.5点/m ²
海象条件	波高0.5m以下

度は15~20FTU以下だった。このことから、累計濁度15~20FTU以下となる水深が、ALBの最大測深と推定できる可能性が示唆された。

また、高濁度下における最大測深を増加させる取り組みとして、計測データの反射パルス抽出方法の変更を試みた。図-17上は通常処理で得られた断面で水深約4m以深のデータが存在していない。図-17下は反射パルスを網羅的に抽出した断面で、通常処理より深い水深8m付近において点密度の高い層が存在している。この断面が位置する箇所のNMBの結果から8m付近に海底があることが分かっているため、抽出されたこの層が海底データに相当すると思われる。この点密度が高い範囲を効率的に抽出する技術開発が進めば、高濁度下での測深値が増加し、港湾事業へのALB適用条件が広がることも期待できる。

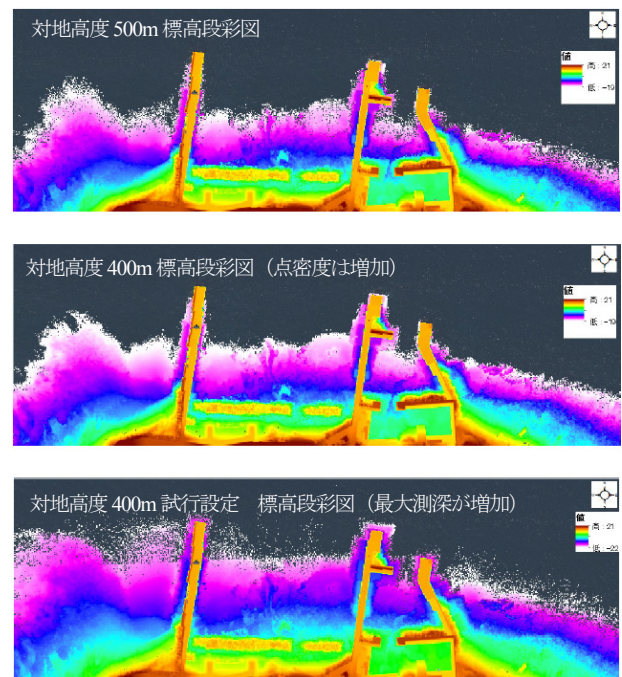


図-12 最大測深増加の取組

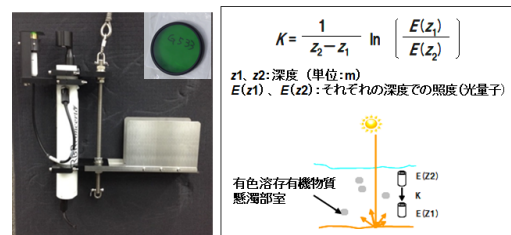


図-13 光量子計とK値算定式

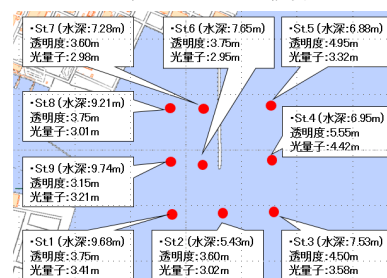


図-14 水質測定値における最大予測測深分布

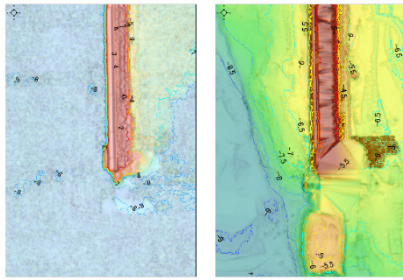


図-15 防波堤先端の測深比較

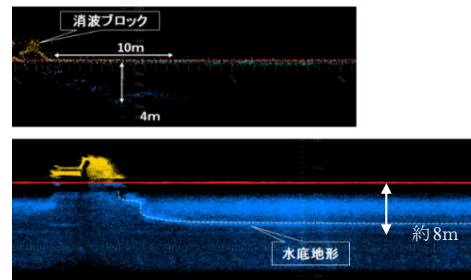


図-17 解析手法による断面図の相違

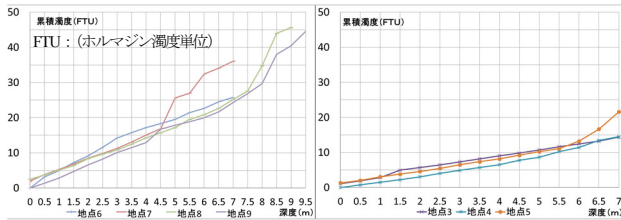


図-16 累計濁度と測深の比較 (左: 港内, 右: 港外)

5. まとめ

港湾区域にALBを適用し、その有効性を確認した。その結果、気中水中の形状を連続的に取得でき、港湾構造物、海底地形の状態を面的に把握できることが確認できた。海底地形におけるNMBとの比較では、平均較差で6cm以下の誤差であることを確認し、透明度が高い条件ではデータ記録時間を延長することで最大測深距離が増加し、利島では20m以上の測深が可能となった。また、濁度と最大測深との関係を示すことで、濁度調査結果のある海域について最大測深を推定できる可能性が示唆されるとともに、ノイズが多く含まれる中から、海底付近の高点密度範囲を抽出する技術開発が進むことで、高濁度下における測深性能の向上が期待できる。

一方で、データ取得においては、垂直面を有する構造物に対する飛行コース方位の検討とともに、波高、対象物表面色、濁度の課題も確認されたため適用条件の整理

が必要であることがわかった。また、精度比較の箇所が少ないため、今後は比較結果の蓄積と構造物における精度、点密度と再現性の関係を検討する必要がある。

以上より観測対象地区の適用条件に留意する必要があるものの、今後、ALBは港湾事業への活用が期待できる技術であることが明らかになった。

参考文献

- 1) 岡部 貴之, 坂下 裕明, 小澤 淳真, 下村 博之, 蒲 恒太郎, 宮作 尚宏, 川村 裕, 浅沼 市男:ALB の河川縦横断面測量への適用性の研究, 河川技術論文集, 第 20 巻, pp55-60, 2014.
- 2) 吉田圭介, 前野詩朗, 間野耕司, 山口華穂, 赤穂良輔:ALB を用いた河道地形計測の精度検証と流況解析の改善効果の検討, 土木学会論文集 B1 (水工学) Vol.73, No.4, p.I_565-I_570, 2017.
- 3) 山口 華穂, 吉田 圭介, 前野 詩朗, 間野 耕司, 赤穂良輔, 西山 哲 ALB による河道地形の再現性向上に伴う河床変動解析の改善効果の検討 土木学会論文集 A2 (応用力学) 2018 年 74 巻 2 号 I_465-I_474.
- 4) Kutalmis Saylam, John R. Hupp, Aaron R. Averett, William F. Gutelius & Brent W. Gelhar (2018) Airborne lidar bathymetry: assessing quality assurance and quality control methods with Leica Chiroptera examples, International Journal of Remote Sensing, 39:8,2518-2542.
- 5) 国土交通省 CIM 導入推進委員会: CIM 導入ガイドライン (案) 第 1 編 共通編, 平成 30 年 3 月 (2019.2.7 受付) (2019.4.24 受理)

INVESTIGATION ON UTILIZING ALB IN PORT AND HARBOR PROJECTS

Tsuyoshi KOTOURA, Sivaranjani JAYAPRASAD, Hiroyuki KONNO,
Nahiro MIYASAKU, Kouichi SAKAI and Kouji MANO

Airborne Laser Bathymetry (ALB) is an aircraft sounding technique that transmits green laser through water. As a technology that seamlessly obtains airborne underwater data, its application and utilization in river and shore management are many, whereas its applicability in port projects is few. Therefore, in our current research, the applicability of ALB is examined at three ports that have different transparency conditions of 3m to 15m.

As a result, there are some troubles found in data acquisition under caisson wall area and in high turbid environment. However, this technique can be expected to be used in port and harbor projects, from the confirmation of continuous data acquisition even up to 20m depth.