

ALBの河川縦横断測量への適用性の研究

APPLICABILITY STUDY OF AIRBORNE LASER BATHYMETRY (ALB) METHOD FOR RIVER SURVEYING.

岡部 貴之¹・坂下 裕明²・小澤 淳真²・下村 博之³・蒲 恒太郎⁴・
宮作 尚宏⁵・川村 裕⁵・浅沼 市男⁶

Takayuki OKABE, Hiroaki SAKASHITA, Hiroyuki SHIMOMURA, Koutarou KABA, Atsumasa
OZAWA, Naohiro MIYASAKU, Yutaka KAWAMURA and Ichio ASANUMA

¹正会員 株式会社パスコ 防災技術部 (〒153-0043 東京都目黒区東山1丁目1番2号)

²正会員 株式会社パスコ 研究開発本部 (同上)

³正会員 株式会社パスコ 中央事業部 (同上)

⁴正会員 株式会社パスコ 環境文化事業部 (同上)

⁵正会員 株式会社パスコ センシング技術部 (同上)

⁶非会員 工博 東京情報大学教授 環境情報学科 (〒265-8501 千葉県市若葉区御成台4-1)

The river surveying, so far has few issues such like "the data between survey line cannot be acquired" or "difficulty in high frequency".

On the other hand, Airborne Laser Bathymetry (ALB) surveying is performed in seashore. ALB surveying is a technology to measure the water bottom in 3D with an aircraft mounted with an Oscillator which sends a green laser that permeates water.

This article mentions the study of applicability in river surveying to increase the efficiency and sophistication of river surveying. The study was implemented by surveying the target river with ALB to evaluate the ALB surveying as an alternative from river surveying, by making accuracy assessment and correlation analysis of the water clearness from the survey results.

Key Words : Airborne Laser Bathymetry, river surveying, suspended solids, colored dissolved organic matters, diffused attenuation coefficients,

1. はじめに

従来の河川縦横断測量は、大河川においては主に200m間隔の測線上で、水準測量等の実測が行われてきた。水深が深い区間については、音響測深機を装備した船舶で測線上を計測する深淺測量が行われている。当然ながら、いずれの手法も測線間は情報が得られない。

また、河川定期縦横断測量は、5年以内に1回程度の頻度で実施される場合が多く、一連の区間の測量に掛かるコストも高額であることから、河床変動等の把握を目的とした測量を出水直後に実施できない場合がある。中小河川においては、河川改修時の測量成果があるのみで、改修以降に測量成果が更新されない場合も見受けられる。

従来の河川縦横断測量は、以上のような「測線間の地形情報が得られない」、「測量コストが高額であり高い

頻度で実施できない」といった問題が存在している。

一方で、近年、水底部の計測技術として、水中を透過する緑レーザを用いた航空機レーザ測深機 (Airborne Laser Bathymetry以下、ALBとする) が開発され、国内外で浅海域等の水底部の測量に活用されている¹⁾²⁾。

国内では、海上保安庁が唯一ALB機器を所有し、2004年に本格運用を開始して以来、浅海部や航路などを計測して海図作成などに活用している³⁾⁴⁾。

本研究は、河川縦横断測量の高度化・効率化が望まれる中、海域の分野で発展したALB計測技術に着目し、河川縦横断測量への適用性を検討、評価したものである。

2. ALBの特徴

ALBは、水中を透過する波長帯532nmの緑レーザを照

射し、水底部からの反射波を受信して水底部の地形を計測する技術である。加えて、水面及び水底部からの反射波を受信する時間差から水深を計測することが可能である。緑レーザの水底部からの反射波が得られない場合は、欠測となる。緑レーザの水面からの反射波が得られない場合は、同時照射される波長帯1064nmの近赤外レーザにより代替され、水深を計測する。

近年のALB機器性能は、メーカーによって異なるが、水深50m程度まで水底を計測可能とされている⁹⁾。海域では透明度の2から4倍程度まで測深可能とされており、海上保安庁が2011年6月に宮古湾で実施したALB計測では、透明度4m程度の海域で水深約15mまで計測されている⁹⁾。

ただし、機器の測深能力が水深以上であっても水質条件により緑レーザの反射波が受信できず、水底部が部分的に欠測になる場合があることに注意が必要である。

また、ALB計測は、緑レーザの特性から既往の近赤外レーザによる航空測量よりも低い対地高度（400m～1000m程度）で飛行する必要がある。低高度の場合、地形の影響を受けやすく、安全性を確保するために飛行コースが制限されやすい。

3. 研究方針

ALBで欠測になる範囲を事前に推定できなければ、河川縦横断測量業務として積算・発注手続きを進めることは難しく、ALB計測の河川縦横断測量への適用は困難である。しかし、河川におけるALB計測可能範囲の推定について、具体的に検討した事例はほとんどない。

また、ALB計測を河川縦横断測量成果として活用するためには、その計測精度を明らかにすることが必須であるが、河川におけるALB計測成果の精度検証を行った事例もほとんどない。

このことから、本研究において、河川におけるALB計測成果の精度検証を行うとともに、事前にALB計測可能範囲を推定する手法の研究を行い、ALBの河川縦横断測量への適用性を評価した。

4. 河川におけるALB計測成果の精度検証

(1) 検討手順

河川におけるALB計測成果の精度検証は、測量法（昭和24年法律第188号）第34条の「作業規程の準則（平成25年3月29日 国土交通省告示 第286号）」を参考に、次のa)からe)までの手順で実施した。

作業規程の準則を満たすことで、ALB計測成果が近赤外線波長を用いた既往の航空レーザ測量と同程度の精度を有するものといえる。

なお、水部については、平坦な地形が皆無であり、基

準点測量による精度検証が困難である。そのため、従来手法に基づく音響測深による深淺測量成果を真値とし、精度検証を行った。

- ALBによる河川の計測
- 同範囲での深淺測量（水部のみ）の実施
- 飛行コース間点検による精度検証
- 基準点測量成果との比較による陸部の精度検証
- 深淺測量成果との比較による水部の精度検証

(2) ALBによる河川の計測と深淺測量の実施

ALB計測および深淺測量は、カナダ・オンタリオ州のセントローレンス川（コンウォール地区）で実施した。この場所は、川幅が500m前後でセグメント2-2、3の様相を示し、透視度100cm以上の水質が良好な河川である。ALB計測を実施した結果、最深部の水深が14m程度であったが、欠測は生じず、面的に河床地形を計測できた。計測成果とALB飛行コースや深淺測量位置、各種点検位置を図-1に示した。

飛行コースは9コース設定し、全コース長は31.0kmである。深淺測量は、小規模ボートを使用し、見通し線に基づき操船したこと等により、蛇行した測線になっている。

計測に使用したALB機器の主な性能は、表-1とおりである。IHO Order1は、国際水路基準により平面精度±2.5m、標高精度±0.25mを満たすレベルとされている。

表-1 使用したALB機器の主な性能。

レーザクラス	Class4
飛行対地高度	300～400m
最大測点密度	2m×2mに1点
スキャン幅	0.75×飛行高度
測深精度	IHO Order1

(3) コース間点検による精度検証

ALBの飛行コース間標高値の点検は、作業規程の準則、第286条「コース間標高値の点検」に準じて実施した。

結果は表-2のとおりであり、標高値の較差の平均が±30cm以内に収まることから、ALB計測成果は作業規程の準則、第286条を満たす精度を有するものといえる。

また、深淺測量成果についても、ALB計測成果と同様にコース間点検を実施し、ALB計測成果の精度検証に使用できる精度を有することを確認した。（標高較差平均0.24m、標準偏差0.21m）

表-2 ALB飛行コース間標高値の点検結果。

陸部	較差の平均(m)	0.07
	標準偏差(m)	0.07
水部	較差の平均(m)	0.12
	標準偏差(m)	0.10

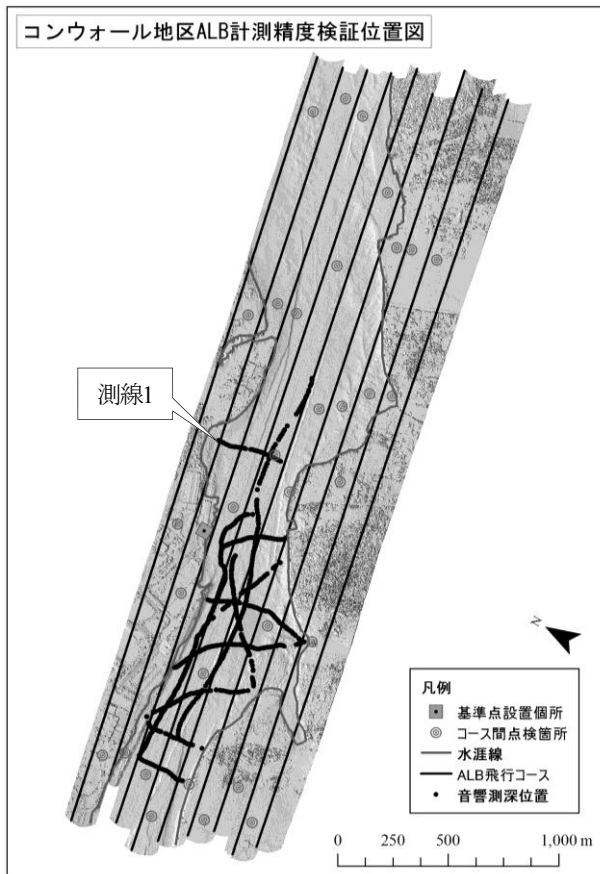


図-1 ALB計測精度検証位置図。

(4) 陸部におけるALB計測成果の精度検証

陸部におけるALB計測成果の精度検証は、作業規程の準則、第282条に準じて基準点を設置し、RTK-GPS方式で得られた標高値との較差の平均、標準偏差を算出して実施した。

結果は表-3のとおりであり、較差の平均、標準偏差がともに±0.25m以内に収まることから、ALB計測成果は、作業規程の準則、第285条を満たす精度を有するものといえる。

表-3 基準点測量成果との比較結果。

較差の平均(m)	0.02
標準偏差(m)	0.02

(5) 水部におけるALB計測成果の精度検証

水部におけるALB計測成果の精度検証は、深淺測量成果を真値とし、その全測線上での標高値とALB点群からTIN補間した3次元データとの標高値の較差の平均、標準偏差を算出して実施した。深淺測量成果の測線1と測線上のALB計測成果の重ね合わせ図例を図-2に示す。全体的に深淺測量成果とALB計測成果が合致していることが分かる。

標準偏差の算出結果は表-4のとおりであり、作業規程の準則、第285条を参考にすると、ALB計測成果は、水

部においても良好な標高精度を有することが確認できた。

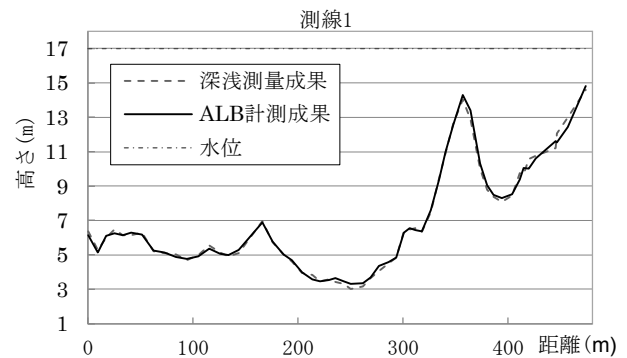


図-2 ALB計測成果と深淺測量成果の重ね合わせ図例。

表-4 深淺測量成果との比較結果。

較差の平均(m)	0.19
標準偏差(m)	0.23

ALB計測日：2011年10月31日

深淺測量日：2011年11月25日

5. ALB計測可能範囲の推定手法の構築

(1) 検討手順

ALB計測可否範囲の推定手法の構築は、次のa)からc)までの手順で実施した。

- 拡散消散係数 K の推定手法の構築
- 河川の拡散消散係数 K とALB最大測深深度の分析
- 水質観測データを用いたALB計測可能範囲の推定手法の構築

K は、水中における光の拡散・消散度合を示す係数であり、Lambert-Beerの法則からALBで計測できる最大の測深深度 $D_{\max}$ と相関関係にあることが分かっている。

K を求めることで $D_{\max}$ を推定できることから、「 K の推定手法」、「 K と $D_{\max}$ の相関式」を定量的に求めた。

(2) 拡散消散係数 K の推定手法の構築

K は、式(1)に示す有色溶存物質 A と $1\mu\text{m}$ 以上の懸濁物質 S 、 $1\mu\text{m}$ 未満の懸濁物質 SS_a と相関関係にあることが分かっている⁶⁾。

$$K = \alpha \cdot A + \beta \cdot (S + SS_a) + \gamma \quad (1)$$

ここで、 A ：有色溶存物質CDOM (m^{-1}) から求めた吸収係数、 S ： $SS(\text{mg/l})$ から求めた散乱係数、 SS_a ： $1\mu\text{m}$ 未満の懸濁物質 $SS_a(\text{mg/l})$ から求めた散乱係数、 α 、 β 、 γ ：係数である。

また、 K は、照度計を用いた現地観測から式(2)によって算出することが可能である⁶⁾。

$$K = \frac{1}{Z_2 - Z_1} \ln \left(\frac{E(Z_1)}{E(Z_2)} \right) \quad (2)$$

ここで、 Z_0, Z_1 ：水深、 $E(Z_0)$ ：水深ごとの照度である。
ただし、式(1)は海域での計測事例から構築された相関式であり、国内河川における係数を決定する必要がある。

そこで、本研究では、国内河川を対象に照度、水質の現地観測を実施し、回帰分析により式(1)の係数を決定することとした。式(1)の係数を決定することにより、照度の実測を行わずに水質観測記録から K を推定できることとなる。

a) 対象河川

現地観測を行う対象河川は、水質や地域的なばらつきを考慮し、夕張川（春は釧路川でも2地点実施）、最上川、利根川、揖保川、吉野川、筑後川で実施した。

b) 現地観測項目および手法

現地観測項目および手法は、次の表-5とおりであり、1河川あたり下流から上流までの間の5地点で四季別に観測した。

表-5 現地観測項目と実施概要。

照度	照度計による水中の緑色光照度の観測（緑色フィルタを装着）
有色溶存物質	緑色の補色となる茶色を示すフミン酸質を水質分析により観測
懸濁物質	採水・水質分析により観測 フィルタを用いて1 μ m未満と1 μ m以上の懸濁物質を分けて観測
透視度	水質の概要を把握するため、透視度計により観測

c) 水質と拡散消散係数 K の回帰分析

現地観測により得られた122サンプルを用いて K と水質の回帰分析を実施した。

回帰分析を行った結果、式(3)の結果となり、相関が低い結果となった。

$$K = 0.5488A + 0.0157(S + SS_a) + 0.6821 \quad (3)$$

相関係数：0.59

式(3)を基に水質から求めた K の推定値と照度から求めた K の観測値を比較したところ、図-3に示すとおり懸濁物質($S+SS_a$)が40mg/l以上で誤差が大きいことが分かる。

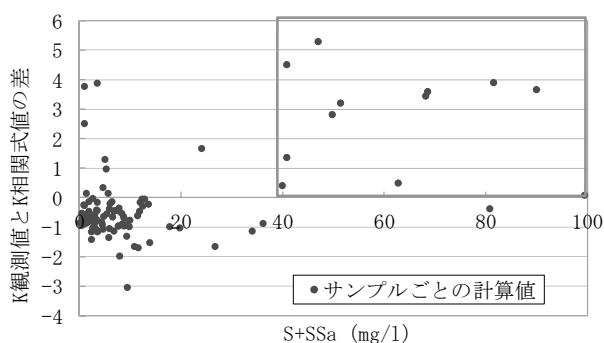


図-3 K のばらつきと懸濁物質の関係。

そのため、懸濁物質($S+SS_a$)が40mg/l以上のサンプルを

除外し、再度回帰分析を行った。その結果、より相関係数の高い式(4)が得られた。この式を用いることで、河川の水質から K を精度よく推定できると考える。

$$K = 0.4680A + 0.051(S + SS_a) + 0.3318 \quad (4)$$

相関係数：0.83

懸濁物質($S+SS_a$)が40mg/l以上のサンプルで同様に回帰分析を行った結果、相関係数が0.2となり、相関が認められなかった。図-4に示すとおり、懸濁物質($S+SS_a$)が40mg/l以上のサンプルは、概ね透視度20cm未満である。透視度20cm未満程度の水質では、緑レーザが水中を透過しにくく水質と K の相関が得られにくいことが示唆された。

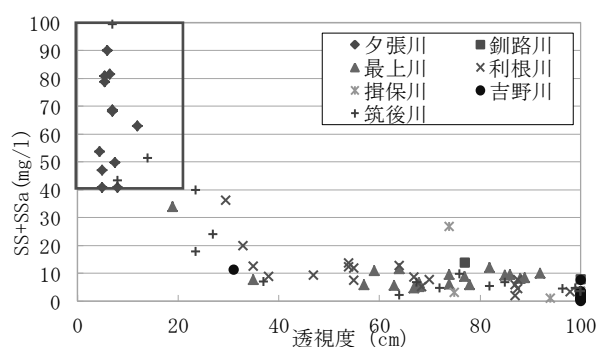


図-4 懸濁物質($S+SS_a$)と透視度の関係。

d) 簡易的な拡散消散係数 K の推定

一般の河川においては、 $CDOM$ や SS_a といった項目の水質分析を行っていない。そこで、 $CDOM$ や SS_a を定数化し、一般的な水質項目である SS と K の回帰分析を行い、水文水質データベース等を用いて簡易的に K を推定する手法の構築を試みた。

c)と同様に122サンプルで回帰分析を行った結果、得られた相関係数は0.35となり相関が認められなかった。そのため、透視度20cm以下のサンプルを除いた75サンプルで回帰分析を行い、式(5)を得た。相関係数は0.66となり、 K の簡易的な推定式として位置づけられるものと考えられる。

$$K = 0.0641SS + 0.5458 \quad (5)$$

相関係数：0.66

また、参考として K と簡易的に現地観測できる透視度 T との相関を分析した。透視度は100cm以上を観測できないことから、透視度100cm以上および20cm未満のサンプルを除外した42サンプルで回帰分析を行った。その結果、式(6)が得られたが、相関係数は0.48と低い値が示された。

$$K = -0.0136T + 2.0593 \quad (6)$$

相関係数：0.48

比較的簡易に観測できる透視度から K の推定を試みたが、高い相関を得られなかった。

(3) 河川の拡散消散係数 K とALB最大測深深度の分析

前述のとおりALB最大測深深度 D_{max} と K は相関がある

ことが分かっており、式 (7) で示される。

$$D_{\max} = n/K \quad (7)$$

ここで、 n ：係数であり、海域では $n=3\sim4$ 程度とされている²⁾。

本研究では、国内河川におけるALB計測成果を分析し、式(7)の係数 n を分析した。

まず、ALB計測範囲で照度観測による K の算出と水深の実測を行い、その観測位置でのALB計測成果から得られる測深深度との散布図を作成した。散布図には、ALBで河床が計測できた観測地点と欠測になった観測地点を分けてプロットし、その境界を最大測深深度の係数 n として判断した。

ALB計測と照度観測の事例として、図-5に吉野川中流域における事例を示した。当該ALB計測事例では、淵の様相を呈する範囲において欠測が生じ、その位置で照度を観測している。よって、この事例は、図-6に示す散布図において「ALBデータ取得否」としてプロットされる。

なお、今回の吉野川のALB計測では、水深約6m以深の範囲で最大測深深度を超えて欠測が発生したが、河川水位が低い、もしくは水質がより良好な時期にALB計測を実施することで、欠測範囲が減少すると考えられる。

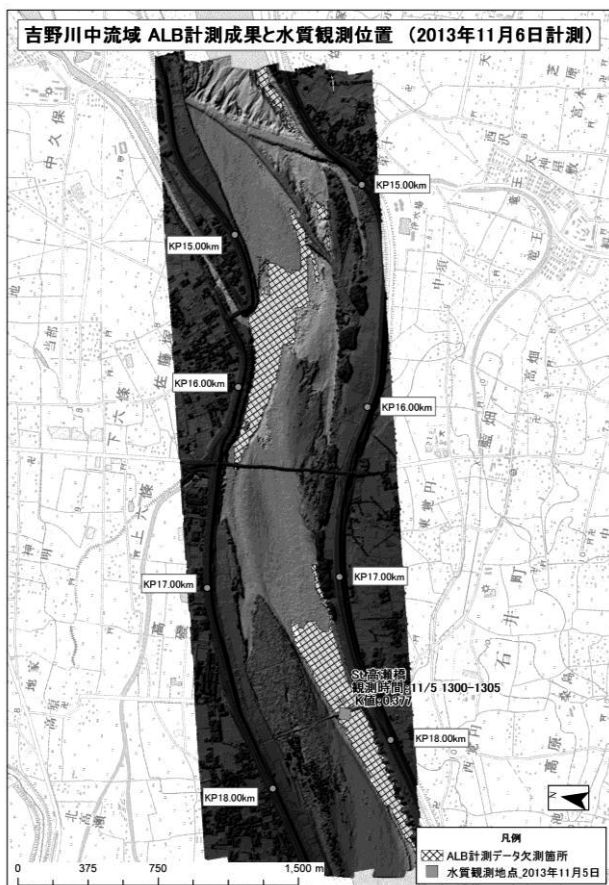


図-5 吉野川におけるALB計測成果と照度観測地点例

散布図を整理した結果、図-6に示すとおり、 $KD_{\max}=3$ の曲線を境に欠測が生じているため、国内河川において $D_{\max} = 3/K$ として $D_{\max}$ を推定できることが示唆された。

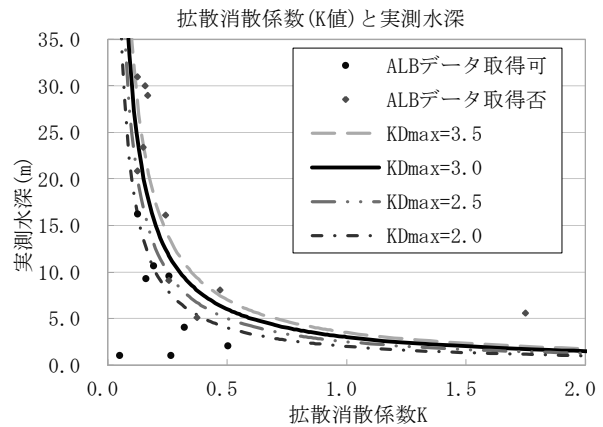


図-6 ALB測深深度と K 観測値の散布図

(4) ALB計測可能範囲の推定手法の構築

ALB計測可能範囲の推定手法として、次のa)からd)までのフローを構築した。

a) 机上調査等による判定

ALB計測の実施にあたっては、机上調査により対象河川の水質等を把握する。懸濁物質が多く、透視度が著しく低い場合は、ALB計測不可と判定する。

判定フローを図-7に示す。

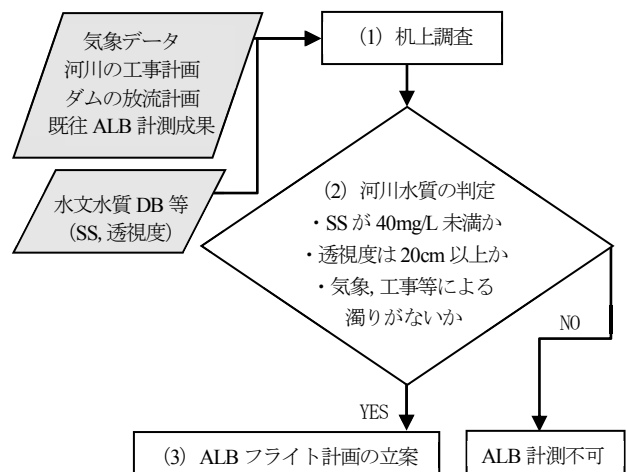


図-7 机上調査による判定

b) 飛行条件による判定

机上調査による判定の後、フライト計画を立案する。ALB計測は対地高度が低いことから、地形等の制約条件に合わせた飛行機材の選定やフライト計画が必要である。

c) 水質条件による判定

机上調査、飛行条件からALB計測可能と判定された場合、現地での水質観測等を実施し、 K およびALB最大測深深度を算出する。 K の算出は、照度計による現地観測が最も精度の高い手法といえる。照度計による現地観測ができない場合、式(4)や(5)を用いて K を推定する。

河川水深は、既往の河川縦横断面測量成果や水位観測記録から簡易的に推定可能であるが、不等流計算水位と最深河床高を用いて測線ごとに算出することが望ましい。

ここで「ALB最大測深深度>河川水深」となればALB計測可能と判定し、測線ごとにALB計測可能範囲を推定する。ただし、有色溶存物質CDOMが多量に存在する河川では、水色が緑色の補色である茶色である場合があり、透視度が高いにも関わらず緑レーザが吸収され、河床が計測できない場合がある点に注意が必要である。

判定フローを図-8に示す。

a)からc)までのフローにより、事前にALB計測可能範囲を推定でき、ALB計測に掛かるコスト、欠測範囲の補完に掛かるコストを積算可能である。これにより、河川縦横断測量業務としての発注手続きをスムーズに行うことができると推察される。

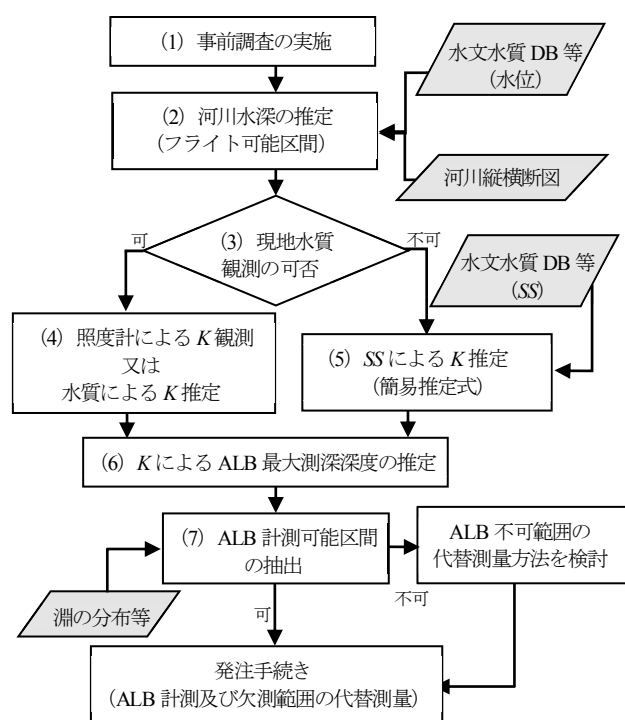


図-8 水質条件による判定

d) 現地観測によるALB計測実行の判断

水質は日々変化するものであり、水質観測を実施してからALB計測を実行するまでの間に降雨等が発生した場合、水質の変化が懸念されるが、水質観測を再度実施することは非効率的である。そこで、現地で容易に観測記録が得られる透視度を指標にした式(6)を基にフライト実行の判断を行うことが有効と考える。

6. おわりに

本研究では、河川において次のa)からd)までの成果が得られた。

- 河川におけるALB計測成果及びその標高精度の確認
- 水質から拡散消散係数を推定する相関式の構築
- 拡散消散係数とALB最大測深深度の相関式の確認
- ALB計測可能範囲の推定手法の構築

これらは、海域におけるALB計測精度³⁾が河川においても同様に発揮されることを示している。また、河川においても近赤外レーザや深淺測量成果とほぼ同程度の標高精度を有することが確認できた。現地観測や既往の観測記録からALB計測可能範囲を推定する手法を構築したことで、効率的なALB計測計画の立案や業務発注のスムーズな手続きに寄与できると推察される。

このことから、ALB計測技術は、河川縦横断測量の代替技術として活用可能であり、高度化・効率化に寄与するものとする。

ただし、本研究で得られた水質観測のサンプル数は122と少ないため、今後、サンプルの蓄積を行い、水系単位や河川単位で各種相関式を分析することが望ましい。

また、ALB計測成果の標高精度は、実測による水準測量の精度よりは劣るものである。計測対象・目的に応じて手法を適切に選択・組み合わせることが重要である。

今後は、ALB計測と他の計測手法を組み合わせ、陸域を含めた最適な河川縦横断測量の方法を検討するとともに、モデル河川を設定し、河川縦横断測量の業務ベースでALB計測を行えるよう検討を続ける予定である。

謝辞：本研究は、平成23年度から25年度までの3か年をかけて、国土交通省の河川砂防技術研究開発制度を利用して実施されました。本研究の実施にあたり、国土交通省国土技術政策総合研究所、水管理・国土保全局、海上保安庁、東京情報大学の関係各位に多大なるご指導・配慮を賜りました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Millar, D.: Airborne Remote Sensing Techniques in Mapping Nearshore Coastal Environments, THE JALBTCX press, 2004.
- 2) Viktor, IF, Park, J.Y, Wozencraft, J, Aitken, J, Macon, C, Mathur, A, Payment, A and Ramnath, V.: CZMIL(Coastal Zone Mapping and Imaging Lidar) from First Flights to First Mission through System Validation, Ocean Sensing and Monitoring V, Vol.8724, DOI:10.1117/12.2017935, 2013.
- 3) 戸澤実, 岩本暢之: 航空レーザ測深機による水路測量, 水路, Vol.33No.1, pp.5-10, 2004.
- 4) 小野智三, 柴田遥: 航空レーザ測深機による計測作業, 海上保安庁海洋情報部研究報告, 第48号, pp.91-100, 2012.
- 5) 小野智三, 柴田遥: 被災地における航空レーザ測量, 海上保安庁海洋情報部研究報告, 第49号, pp.118-129, 2012.
- 6) Yasuhiro Wakui, Ichio Asanuma and Zhang, X.: A new algorithm for classification of water types based on the relationship between in-situ downwelling irradiance and in-situ CDOM, SS in complex waters of the Tokyo Bay, Ocean Sciences Meeting 東京情報大学発表資料, 2012.

(2014. 4. 3受付)