

# 光ファイバを用いた地盤高計測および濁度推定手法の白川河口干潟への適用性検討

山野 貴司<sup>1</sup>・黒田 直人<sup>2</sup>・辻本 剛三<sup>3</sup>・外村 隆臣<sup>4</sup>・酒井 大樹<sup>5</sup>

<sup>1</sup>正会員 東洋建設株式会社 鳴尾研究所 (〒663-8142 兵庫県西宮市鳴尾浜1-25-1)

E-mail:yamano-takashi@toyo-const.co.jp

<sup>2</sup>非会員 独立行政法人 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 (〒812-8622 福岡市博多区祇園町2-1)

<sup>3</sup>フェロー会員 熊本大学大学院教授 先端科学部 (〒860-8555 熊本県熊本市中央区黒髪2-39-1)

<sup>4</sup>正会員 熊本大学 工学部技術部 (〒860-8555 熊本県熊本市中央区黒髪2-39-1)

<sup>5</sup>正会員 東洋建設株式会社 鳴尾研究所 (〒663-8142 兵庫県西宮市鳴尾浜1-25-1)

現地における海底地盤の地形変化は、台風時の高波浪など外力の影響を大きく受けるが、そのような状況下での地盤高計測は困難であり、従来は高波浪が治まった後に計測を実施することが多い。しかしながら、高波浪時にこそ地形変化は発生している。一方、干潟を対象とした地盤高計測は、高精度な測量機器やUAVを使用した計測は多数行われているが、これらも同様に悪天候時には計測ができない。そこで、光ファイバを用いてリアルタイムに地盤高を計測する手法を開発した。本研究では、熊本県白川河口干潟を対象として現地適用性を検証し、波浪や河川出水など外力が大きくなる期間の地盤高を捉えることができた。また、光ファイバを用いた海水色の計測により、濁度推定手法の可能性が示唆された。

**Key Words :** optical fiber, ground elevation, turbidity, RGB,  $L^*a^*b^*$ , Shirakawa river mouth tideland

## 1. はじめに

現地における海底地盤の地形変化は、台風時の高波浪など外力の影響を大きく受ける。特に防波堤などの海岸・港湾構造物周辺では、局所洗堀が発生し、構造物の安定性に重大な影響をおよぼす。洗堀などの地形変化は、海底地盤の底質条件と底面流速が大きく影響することは周知の事実であり、高波浪発生中にもっとも地形変化が起こりうることは容易に想像できる。しかしながら、そのような状況下での地盤高計測は困難であり、従来は高波浪が治まった後に深淺測量などにより計測を実施することが多い。しかし、高波浪が治まるまでに埋め戻しや堆積が発生すると、高波浪発生中の地形変化を把握することができない。実海域における海岸構造物周辺で発生する局所洗堀に対する砂地盤を対象とした現地計測では、超音波式砂面計を用いることにより、高波浪発生中の地形変化計測を行った<sup>1)</sup>。この計測では、比較的サイズの大きい計測器を構造物に取り付ける必要があり、汎用的な計測手法ではなかった。そこで著者らは、光ファイバを用いてリアルタイムに地盤高を計測する手法を開発した<sup>2,3)</sup>。この手法を用いて、これまでは、主に室内の水利模型実験において、地盤の底質は砂を対象に計測手法の適用性を検討してきた<sup>4)</sup>。これまでは砂地盤を対象と

してきた一方で、底質粒径が砂に対して非常に細かい地形である干潟に対する地盤高計測については、既往研究では、レベルやトータルステーションなどの測量機器を用いた測量(写真-1)が数多く行われており(例えば<sup>5),6)</sup>、近年では高精度な測量技術であるRTK-GPSを用いた測量<sup>7)</sup>、UAVによる空撮画像解析による計測(例えば<sup>8),9)</sup>などがなされている。これらの計測手法は、いずれも天候に大きく左右される手法であり、前述したように、高波浪が発生する台風時などの悪天候条件では計測ができないといった欠点がある。対して、本研究で対象とする光ファイバを用いた計測手法では、計測点においてセンサを存置して



写真-1 測量機器を用いた干潟の地盤高計測

計測することが可能なため（詳細な計測原理、手法は後述する）、天候に影響しない。そこで本研究では、天候に左右されずリアルタイムに地盤高の計測が可能である光ファイバを用いた計測手法の、実際の現地における適用性を検証することを目的として、熊本県白川河口干潟を対象として長期間の連続計測を行った。さらに、地盤高だけでなく、光ファイバを用いて海水の色を計測することによって濁度を推定する手法の可能性を検証した。

## 2. 光ファイバを用いた計測手法

### (1) 計測手法の原理

光ファイバを用いた計測手法の原理を図-1に示す。一方の光ファイバの先端より発光する光を他方の光ファイバの先端より受光し、その光の強さ（光強度）の時刻歴を計測するというものである。この光ファイバを鉛直方向に複数配置することで、鉛直方向のプロファイルが可能となる。複数配置する際の配置数や配置間隔を計測条件に合わせて変更することで、任意の計測解像度、計測距離を設定できるため、汎用性が高い。計測するための光源は、本研究では悪天候時にも安定して計測するためLEDを使用した。計測条件や計測対象によっては太陽光など電力を必要としない計測も可能である。

#### a) 地盤高計測の場合

この計測手法を地盤高計測に適用する場合においては、図に示すとおり、鉛直方向に複数配置した光ファイバのうち、地盤中に埋没したものは発光部と受光部の間が底質で完全に遮られるため、光が受光部に到達せず、光強度が計測されない。そのため、その光ファイバの設置高さは地盤中にあると判断できる。一方、光強度が計測された光ファイバは受光部より光が入っているため、この設置高さにおいては地盤がない、すなわち水中あるいは

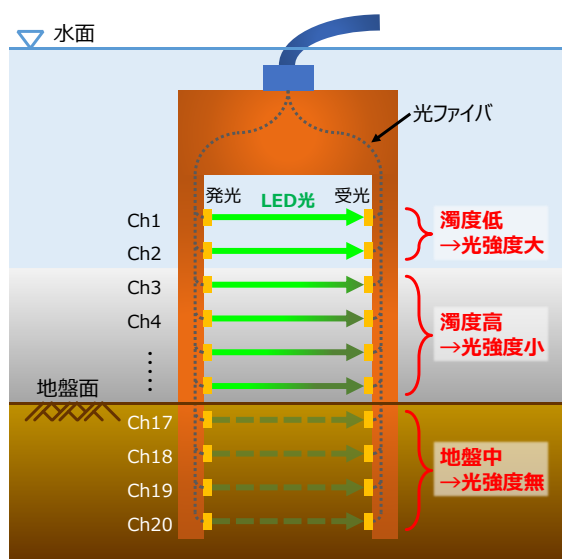


図-1 光ファイバを用いた計測手法の原理

大気中と判断できる。したがって、各光ファイバの時刻歴を計測し、時刻ごとの光強度の変動を判定することで、地盤高の経時変化を捉えることが可能となる。地盤高計測においては、受光部からの光の有無のみを計測すればよい。そのため、光強度の大きさは関係しない。

#### b) 濁度計測の場合

地盤上で水中の濁度を計測する場合においては、水が透明であれば発光部から出た光が減衰することなく受光部に到達するが、水の濁りの程度によって受光部に到達する光が減衰し、計測される光強度が低下するため、原理的にはこの光強度の大きさから濁度を推定することが可能である。また本研究では、光強度だけでなく、光の色を計測することで、濁度の変化をより詳細に捉えることが可能と考え、試行的に実施した。水が透明であれば計測される光の色は光源と同色となる。濁りが発生していれば、その濁りの原因となる物質の色に合わせて水の色が変化し、それに伴い変化する光の色成分を計測する。

### (2) センサ部の防汚性能の検討

光ファイバを用いた計測手法の現地適用において、防汚性能は重要な課題である。光ファイバの発光部および受光部付近に生物などが付着し塞がれると、本来の計測ができなくなる。そこで、計測地点に存置するセンサ部の材質について検討した。

実海域の海中に、材質と表面処理の異なる材料を設置し、各材料の生物付着など表面の状態を目視により比較した。対象材料は、長期に渡り現地に存置することを想定し、強度の観点から金属材に限定した。使用する金属材は、鉄（表面に錆止め塗料塗布したものと防汚塗料塗布したものの2種類）、ステンレス（表面処理なし）、銅（表面処理なし）の4種類とした。海中への設置期間は2015年5月11日～8月3日の約3ヶ月間とした。

防汚性能の比較結果を表-1に示す。なお、本比較は、計測に影響する可能性のある生物の付着状態を目視により比較するものであり、付着物質の分析は行わないこととする。4種類の金属材の中で、3か月後の状態でもっとも付着が少ないのは防汚塗料を塗布した鉄となり、続いて銅、錆止め塗料を塗布した鉄およびステンレスは同等の付着状態となった。1か月後および2か月後の段階においては、防汚塗料は汚れが発生する程度、銅については酸化による変色はあるものの、防汚塗料と同程度で、計測に影響するような大きな貝類の付着は見られなかった。防汚塗料については、一部塗料の剥がれが発生し、そこから生物の付着が見られた。これらの結果から、今回の現地計測では、メンテナンスの観点から、写真-2に示す銅製の治具を製作し、1ヶ月に1回程度、センサ部表面の清掃を行うこととした。

表-1 金属材の防汚性能比較

材質	2015/5/11	2015/6/15	2015/7/13	2015/8/3
鉄（錆止め塗料）				
鉄（防汚塗料）				
ステンレス（表面処理なし）				
銅（表面処理なし）				

### (3) 現地計測概要

現地計測は、図-2に示すとおり、熊本県熊本市の白川左岸の河口干潟を対象とした。左岸の防潮堤上に計測器を収納したボックスを設置しそこから約25m沖の計測地点まで光ファイバケーブルを敷設した。計測地点には、写真-3に示すように各種計測器を設置した。使用した計測器および計測項目は表-2に示すとおりである。計測期間は、2019年10月11日から2020年3月23日の約5ヶ月間とし、20分間隔で計測した。計測器を現地に存置したまま長期計測するために、光ファイバ計測器の電源をタイマー制御し、計測しない時間帯は電源を落とすことで省電力化を図り、約1~2ヶ月の連続計測を可能とした。なお、本計測で使用した光ファイバ計測器は、光源となるLEDの波長のみを検出する機構であり、太陽光など其他光源を誤検出することなく、昼夜間問わず安定計測が可能な機器を採用した。

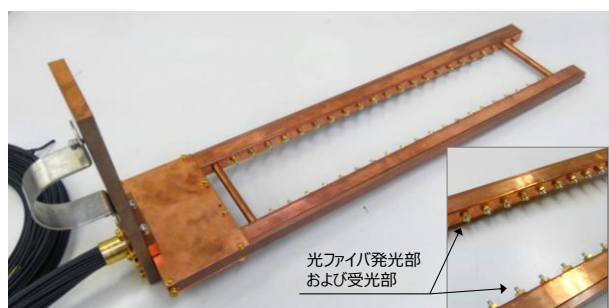


写真-2 光ファイバセンサ部治具（銅製）

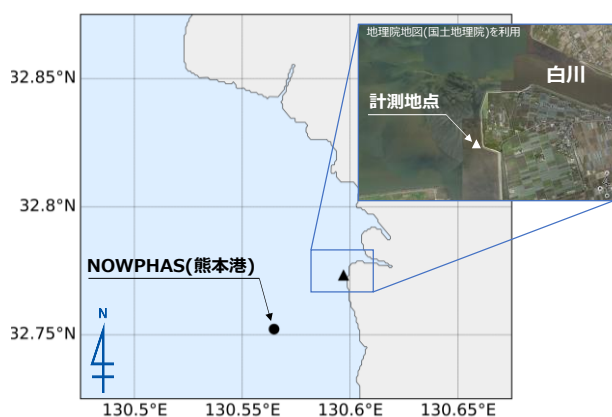


図-2 計測地点（熊本県熊本市）

### 3. 地盤高計測結果

図-3に、全計測期間における光ファイバで計測された光強度（鉛直上からCh1：全20ch）、NOWPHAS（熊本港）で観測された有義波高 $H_{1/3}$ 、白川の河川水位（代継橋：国土交通省水文水質データベース<sup>10</sup>の暫定値）の時系列を示す。光強度は、紙面の都合上代表的な8点のみを示す。光強度は、水の濁りがない状態を1として正規化している。また、干潮時に計測器が水面上に露出する期間の値は取り除いている。いずれの光強度においても、値が0~1の間で変動を繰り返していることがわかる。設置高さが高いCh1やCh5では比較的光強度が高い値を示す期間が多いのに対し、Ch11~Ch13においては値が小さくなる頻度が多い。すなわち、光強度が頻繁に変動している期間は海水の濁度が頻繁に変化していると推定さ

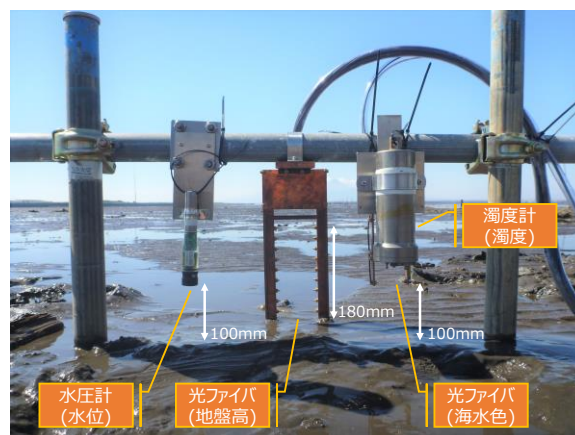


写真-3 計測器設置状況

表-2 計測項目

計測項目	使用計測器	計測精度, 計測位置
地盤高	光ファイバ FS-N40 (㈱キーエンス製)	計測点数：20ch 鉛直方向解像度：20mm 計測延長：380mm 初期地盤高位置： Ch10(T.P.-0.138m)
濁度	濁度計 COMPACT-CLW (JFEアドバンテック製)	初期地盤高より100mm上 (T.P.-0.038m)
海水色	光ファイバ LR-WF10C (㈱キーエンス製)	初期地盤高より100mm上 (T.P.-0.038m)
水位	水圧計 DEFI2-D5HG (JFEアドバンテック製)	初期地盤高より100mm上 (T.P.-0.038m)



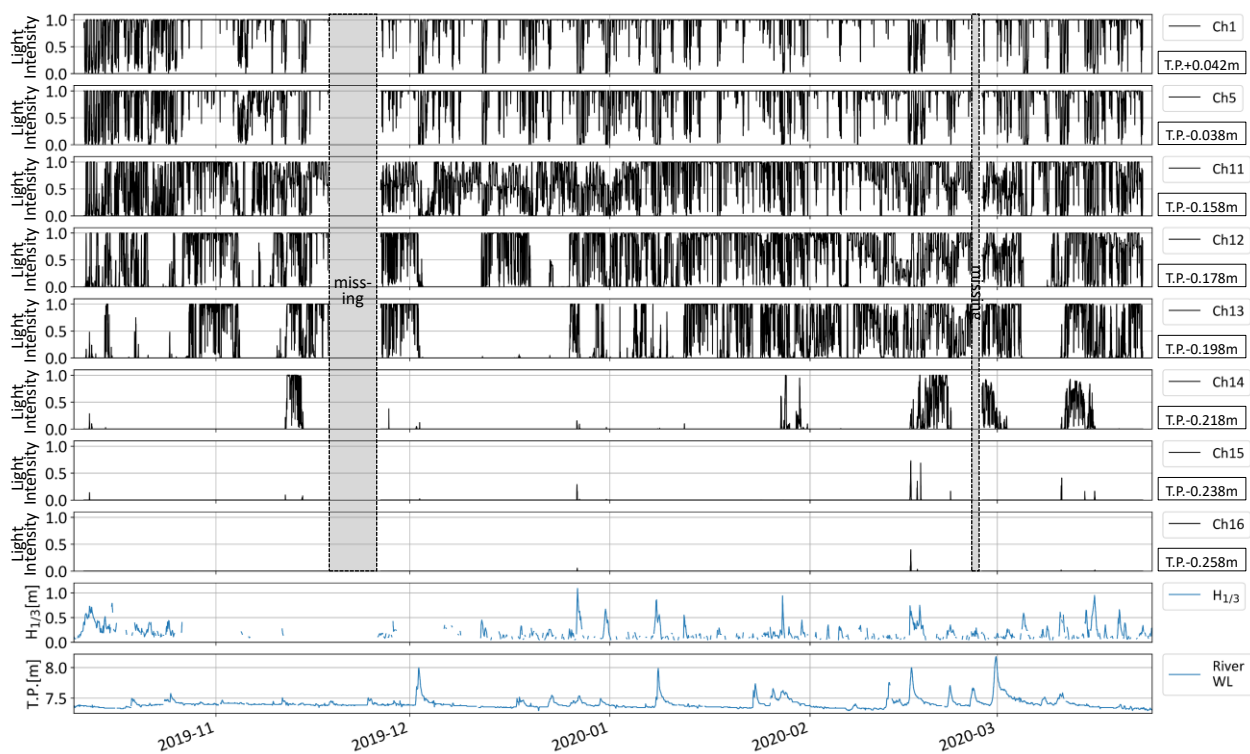


図-3 光強度計測結果

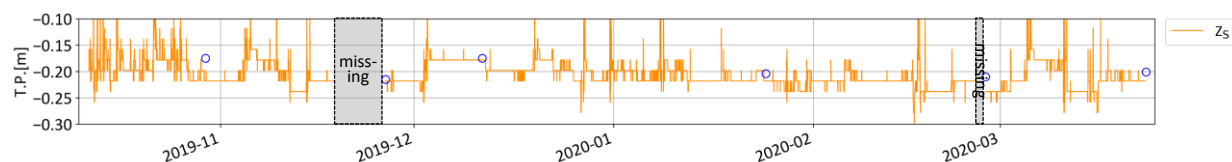


図-4 地盤高の経時変化

れ、特に地盤面に近いCh11付近では高い濁度が発生していると思われる。これらの光強度の値と濁度の相関をキャリブレーションすることで、濁度が推定できる可能性が示唆される。一方、Ch12の一部期間からそれ以降にかけては光強度の値がない期間が見られ、Ch16では全期間においてほぼ値がない。これらの期間の各Chの高さは地盤中であると判断される。このときの各Chの高さをプロットした地盤高 $Z_s$ の時系列変化を図-4に示す。図中には、計測地点の地盤高を別途計測機器を用いて計測した結果を○で示した。別途計測した地盤高の結果と、同時刻における $Z_s$ の結果は概ね良好に一致し、光ファイバによる地盤高計測の妥当性を確認した。 $Z_s$ の変動が大きい期間と、 $H_{1/3}$ や河川水位が高い期間が一致する機会が多いことから、計測地点の地盤高は、波浪や河川からの出水などの外力の影響を受けることが確認された。また、たとえば河川水位がT.P.+8.0m近くに達した2019年12月2日や、 $H_{1/3}$ が1.09mを記録した2019年12月26-27日は雨天や夜間であった。光ファイバを用いた計測手法ではこれら時間帯の地盤高変動を明確に捉えており、天候や時刻に左右されない本計測手法の現地での適用性が確認された。地盤高変動と各外力との関係についての詳細な分析は今後の課題である。

#### 4. 海水色による濁度推定手法

光ファイバを用いた地盤高計測結果から、海水の濁度変化と思われる光強度の変化を捉えた。ここでは、海水色を計測し、濁度変化を詳細に推定する手法を試みた。

海水色の計測には、光ファイバ受光部より入る光の色（RGB値）を計測できる機器を用いた。海水の濁りがなく、透明な場合には、光源である白色が計測され、海水に濁りが発生すると、その海水を光が通過する際に、濁りの元となる成分と同色となることが予想される。

##### (1) RGB色空間による検討

光ファイバを用いて計測した海水色のRGB値(sRGB)およびそこから算出される色の経時変化を、海水色を計測した高さと同じ高さである地盤高計測のCh5（T.P.-0.038m）の光強度、および濁度計で計測された結果とあわせて図-5に示す。光強度が大きく下がる時間帯、濁度が高くなる時間帯、および各RGB値が変動する時間帯が一致していることがわかる。これらの時間帯のRGB値から算出される色は黒色に近づく。一方、光強度が高く、濁度が低い時間帯はRGB値の変化は小さく、そのときは白色から灰色あるいは茶色系に近づき、濁度と海水色の変化の相関が高いことがわかる。

## (2) L\*a\*b\*色空間による検討

RGB色空間での検証により、海水色を視覚的に評価を行った。しかしながら、RGB色空間は人の目や表示するデバイスによって異なるという欠点がある。また、『明るさ(明度)』も影響するため、濁度が高い場合には光強度が低下する(暗くなる)ため、色としては黒色となる。そこで、明度に影響されずに色情報を絶対値として評価するため、CIE1976 L\*a\*b\*色空間による整理を行う。CIE1976 L\*a\*b\*色空間は、日本においてはJIS Z 8781-4<sup>11)</sup>に規定されている。RGB色空間からの変換は、CIE1931 XYZ色空間へ変換後、CIE1976 L\*a\*b\*色空間へ変換する。(R,G,B)から(X,Y,Z)への変換式は次式(1)となる。

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (1)$$

ここに、変換行列Mは次式(2)である。

$$M = \begin{bmatrix} 0.4898 & 0.3101 & 0.2001 \\ 0.1769 & 0.8124 & 0.0107 \\ 0.0000 & 0.0100 & 0.9903 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Mの値はJIS Z8701<sup>12)</sup>に定められた色度座標から補間計算されたものである。上式より算出された(X,Y,Z)を、次式(3)-(5)によってCIE1976 L\*a\*b\*色空間に変換する。

$$L^* = 116 \left( \frac{Y}{Y_n} \right)^{1/3} - 16 \quad (3)$$

$$a^* = 500 \left[ \left( \frac{X}{X_n} \right)^{1/3} - \left( \frac{Y}{Y_n} \right)^{1/3} \right] \quad (4)$$

$$b^* = 200 \left[ \left( \frac{Y}{Y_n} \right)^{1/3} - \left( \frac{Z}{Z_n} \right)^{1/3} \right] \quad (5)$$

ただし、

$$\frac{X}{X_n} > 0.008856, \frac{Y}{Y_n} > 0.008856, \frac{Z}{Z_n} > 0.008856 \quad (6)$$

ここに、L\* : 明度指数, a\*, b\* : クロマティックネス指数, X<sub>n</sub>, Y<sub>n</sub>, Z<sub>n</sub> : 標準白色に対する(X,Y,Z) である。

RGB値から算出したL\*a\*b\*値の経時変化を図-6に示す。明度を表すL\*は、濁度が高くなる時間帯と一致して低くなり、光強度よりも明瞭に変動することが確認された。図-7に、全計測期間におけるL\*と濁度(SS)の関係を示す。L\*と濁度の相関は高く、L\*の増加に伴い濁度が減少する傾向がわかる。図-6のa\*およびb\*は色座標を表し、a\*=(+: 赤方向, -: 緑方向), b\*=(+: 黄方向, -: 青方向)の色合いを示す。L\*が低くなるとa\*が-方向, b\*は+方向の色合いが強くなる。すなわち、濁度が高いときに海水色は緑~黄色系であることがわかる。且つ、L\*が低い、すなわち暗い場合は深緑~茶色系であることがわかり、底質の色を表すことが確認された。明度と色成分を分析することで、光強度のみに比べてより詳細な濁度推定の可能性が示唆された。

## 5. おわりに

本研究における主要な結論を以下に示す。

- 天候に左右されず長期連続計測が可能な光ファイバを用いた計測手法について、現地への適用性を確認した。
- 白川河口干潟において、光ファイバを用いて地盤中お

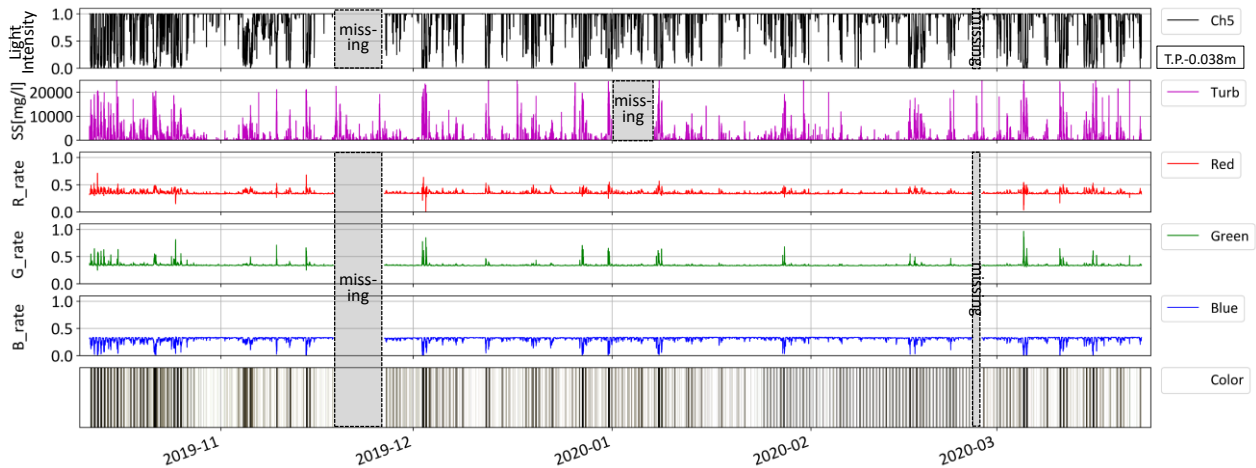


図-5 海水色 (RGB 値) 計測結果

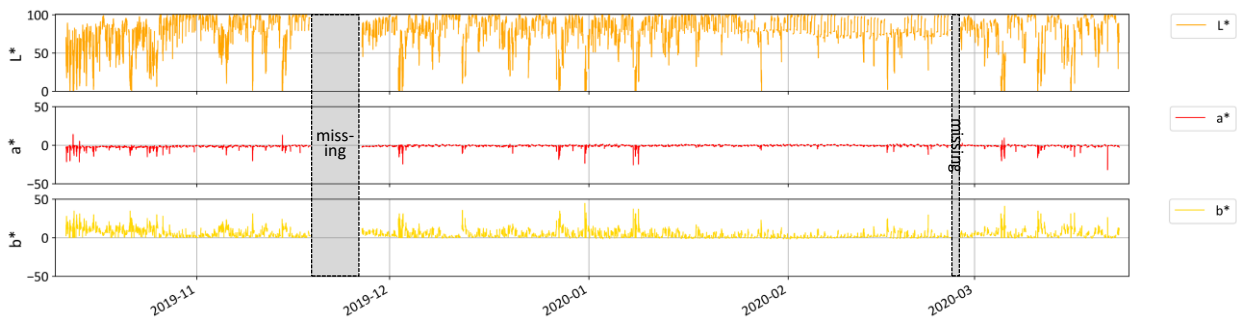


図-6 海水色 (L\*a\*b\*値) 計測結果

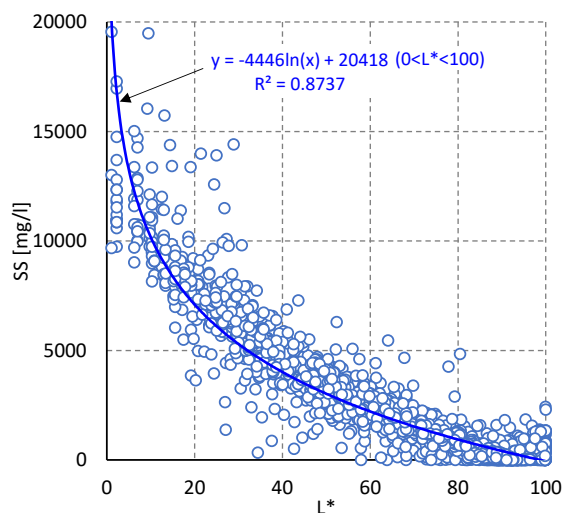


図-7 L\*と濁度の関係

よび水中の光強度の鉛直方向分布を計測することで、長期間の地盤高の経時変化を明らかにした。

- 光強度の変化と、外力となる波浪や河川出水は高い相関を示す。
- 海水色と濁度の相関は高く、 $L^* \cdot a^* \cdot b^*$ 色空間による海水色の評価により、濁度推定手法の可能性が示唆された。今後も継続して現地計測を行うことでデータを蓄積し、光強度や海水色の分析により濁度を定量評価し、干潟の特性を検証することが今後の課題である。

**謝辞：**本研究での計測器の設置、および現地計測の実施にあたり、熊本市、沖新漁業協同組合にご協力いただきました。ここに記して謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 山野貴司, 藤原隆一, 野村浩二, 白木孝一: 杭周辺の局所洗掘に関する現地観測およびその再現実験, 土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol.69, No.2, pp.L\_874-L\_879, 2013.

- 2) 山野貴司, 藤原隆一, 田邊彩佳: 光ファイバを用いた杭構造物周辺の局所洗掘に対する経時変化計測, 土木学会年次学術講演会講演概要集, 第71回 共通セッション, pp.CS7-011, 2016.
- 3) 山野貴司, 酒井大樹, 重松孝昌, 藤原隆一: 光ファイバを用いた有脚式離岸堤脚部の局所洗掘計測手法, 土木学会年次学術講演会講演概要集, 第72回 共通セッション, pp.CS14-033, 2017.
- 4) 山野貴司, 酒井大樹, 重松孝昌, 藤原隆一: スリット諸元が有脚式離岸堤の局所洗掘特性に及ぼす影響に関する研究, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.74, No.2, pp.L\_835-L\_840, 2018.
- 5) 山田文彦, 小林信久, 柿木哲哉: 地形パラメータを用いた干潟断面の季節変動の要因分析, 海岸工学論文集, 第50巻, pp.551-555, 2003.
- 6) 辻本剛三, 外村隆臣, 田畑健吾, 太田 光, 中條壮大, 高野保英: 熊本地震後の白川河口干潟の変動と土砂量に関する基礎的研究, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.73, No.2, pp.L\_601-L\_606, 2017.
- 7) 鶴崎賢一, 大熊汐里, 倉持 顕, 田井 明, 池畑義人: 山国川と中津干潟の広域土砂動態と侵食・堆積機構の解明, 土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol.74, No.2, pp.L\_707-L\_712, 2018.
- 8) 前山浩毅, 辻本剛三, 外村隆臣, 柿木哲哉: UAVの白川河口干潟観測への適用に関する基礎的研究, 土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol.73, No.2, pp.L\_1024-L\_1029, 2017.
- 9) 田畑貴大, 加藤 茂, 中村亮太, 小田敏弘, 西園大貴, 岡辺拓巳: UAVによる干潟地形計測精度の検証と継続的なモニタリングへの適用性の検討, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.74, No.2, pp.L\_961-L\_966, 2018.
- 10) 国土交通省 水文水質データベース, <http://www1.river.go.jp/>, 参照 2020-03-31.
- 11) JIS Z8781-4, 測色—第4部: CIE 1976  $L^* \cdot a^* \cdot b^*$ 色空間, 2013.
- 12) JIS Z8701, 色の表示方法—XYZ表色系及び  $X_{10}Y_{10}Z_{10}$ 表色系, 1999.

(Received March 16, 2020)

(Accepted July 27, 2020)

## APPLICATION OF OPTICAL FIBER-BASED GROUND ELEVATION MEASUREMENT AND TURBIDITY ESTIMATION METHODS TO THE SHIRAKAWA RIVER MOUTH TIDELAND

Takashi YAMANO, Naoto KURODA Gozo TSUJIMOTO  
Takaomi HOKAMURA and Daiki SAKAI

The topographic change of the seafloor is greatly affected by external forces, such as high waves during typhoons, and it is difficult to measure the ground elevation under such conditions. However, the topographic changes occur only during high waves. On the other hand, many high-precision surveying instruments and UAV have been used to measure the ground elevation of tidal flats, but they are not able to measure in bad weather. Therefore, we developed a method to measure ground elevation in real time using an optical fiber. In this study, the field applicability of the study to the Shirakawa river mouth tideland in Kumamoto Prefecture was verified, and the ground elevation during the period when external forces, such as waves and water outflow, become large were measured. In addition, the measurement of seawater color using an optical fiber suggested the possibility of a turbidity estimation method.