

画像を用いた海洋工事の 濁度モニタリング手法に関する実験的検討

高山 百合子^{*1}・大野 剛^{*1}・織田 幸伸^{*1}

Keywords : muddy water, aerial photographs, drone, color difference, illuminance
濁水, 空撮画像, ドローン, 色差, 照度

1. はじめに

埋立てや浚渫等により濁りが発生する海洋工事においては、その濁りを監視し生態系や海洋環境に与える影響を把握する必要がある。一般的に濁りの監視は、限られた監視点における濁度計測や採水とSS分析を実施し、基準を超過した場合には原因調査や対策を講じるなどの措置が取られる。一方で実際の濁りは複数の点源からの重なりや過去の残留分によって面的に広がっていることから、濁りを面的にモニタリングすることができれば、濁りの局所的な流出や想定以上の拡がりを見逃すことなく把握することができる。また、面的な濁りのモニタリングは、より効果的な環境保全対策に活用できる可能性がある。

これまでに、濁り等の海域の水質を面的に評価する手法については多くの研究がなされている。衛星リモートセンシングにおいては、その反射率と水中の浮遊物質濃度に高い相関性が得られることから、この性質を利用して濁度やクロロフィルa、青潮等との関係を定式化し推定する手法について提案されている^{1), 2), 3)}。また、ドローンなどによる可視光カメラで撮影したデータの活用が広がっており、光学カメラを用いて濁度等を推定する研究事例が見られる。Asakuma et al⁴⁾は懸濁物質が多い河口域を対象にドローン画像と標準白板から得られる反射率から、濁度を推定する回帰式を提案している。菅ら⁵⁾は、デジタル画像のデジタルナンバーから、河川のクロロフィル量を推定する手法を提案しており、いずれも利用しやすい光学系カメラ画像による推定であることから実用可能性が高い。一方で、

水深が大きい海洋においては、天候や底質の影響も加わり海面の見え方が時空間的に複雑に変化する。そのため、海域画像を対象とした汎用性のある濁度推定の検討事例については現状では少ない。

そこで本研究では、画像から濁りの平面分布をモニタリングする方法の開発を目的とする。海洋工事における濁り監視ではSSや濁度などの定量値が求められることから、濁度分布を定量評価することを目標とする。ここでは始めに、海洋工事により発生する濁り分布を対象に空中写真を撮影し、実工事において発生した濁水画像の色情報と濁度との関係に基づいて、濁度評価手法を構築した⁶⁾。次に、条件が異なる海域による検証や汎用性に関する検討を行うため、評価手法の基礎検討として、画像の色情報と濁度の関係について、濁水画像の色に影響を与える項目やその影響の違いに関する実験を実施し、本手法の汎用性や適用条件について考察を行った⁷⁾。

2. 空撮画像を用いた濁度平面分布の評価

2.1 空中写真撮影

大阪湾奥における桟橋杭撤去工事を対象とした空撮画像を用いて、画像から濁度を評価する手法の試行を行った。撮影対象は、大阪湾奥に位置する桟橋杭の撤去工事エリアであり、工事ではウォータージェット併用バイプロハンマーの打ち込みと引き抜きのタイミングで濁水が外挿管から流出し汚濁防止膜内で拡散する。濁水は、海面から数10cm~1m程度上に出た外挿管から溢れ出るように流出していた。

* 1 技術センター 社会基盤技術研究部 水理研究室

濁水の流出に合わせてドローン (MATRICE 210 RTK, DJI 製) を飛行させ、海面の撮影を合計 16 回 (2 日間) 行った。1 日目は、工事が始まる前の濁水が流出していないタイミング (濁水無し、非濁水の状態)、および、その日の濁水流出が終了してから約 1 時間経過したタイミング (低濃度の状態) での撮影も行った。撮影は、対象エリアの高度 149 m から直下に向けて、1 回の飛行につき濁水の流出し始めから 30 秒おきに 10 回の撮影を行った (1 回の撮影時間は合計 5 分)。5 分の撮影の間に、濁水流出が一旦止み、再度始まるケースもある。図-1 に撮影した画像を示す。図-1 には、濁水が流出する地点 (外挿管の位置) を示している。図-1 より、濁水は流出点から複雑な形状で汚濁防止膜内に拡がっていることが確認できる。ドローン撮影では 2000 万画素のデジタルカメラ (ZENMUSE X5S, DJI 製) を用いており、画素サイズは実際の寸法の数 cm にあたる。

2.2 現地計測

撮影時刻に合わせて合計 16 回の濁度計測を行った。1 回の飛行中 (5 分間) に、台船上から濁水流出地点に極力近い位置の表層にバケツを投げ入れて 5 L 程度採水し、その後、採水を十分攪拌した状態で濁度を計測した。計測にはポータブル濁度計 (TN100IR, 比濁法 (NTU)) を用いた。濁度データの確認として採水試料の SS 分析を行い、濁度との有意な相関を確認している。表-1 に採水試料の濁度と SS を示す。表-1 より、濁度は最小で約 1.5 NTU、最大で約 500 NTU であった。なお、工事エリアの底質採取は行っていないが、採水試料の濁水源は微細なシルト質が主であったことから、大阪湾奥の特徴的な底質であると考えられる。

2.3 濁度評価手法の構築

2.3.1 画像の数値化方法

濁り分布画像の色情報の特徴を確認するために、2.1 節で取得した画像を用いて RGB 値を確認した。図-2 は、濁水の発生地点付近から離れる方向への側点の位置を画像に示した図 (上図) と、側点における RGB 値 (下図) である。RGB 値は、各側点において画像の上下方向の 10 画素分を読み取り RGB ごとに平均した。

図-2 より、工事前の濁り未発生 (非濁水) の画像 (図-2(a)) では RGB 値の空間変化は少ないが、図-2(b) や図-2(d) に見られるように、濁りが顕著に発生しているエリアでは RGB 値が高くなることが分かる。図-2(c) の画像では、側点 4, 5 付近に高濃度ではないが濁りが分布している様子が分かり、下図の RGB 値においても側点 4, 5 で若干高くなっている。また、濁り発生中では、低濃度から高濃度にかけて RGB 値の相対関係が大

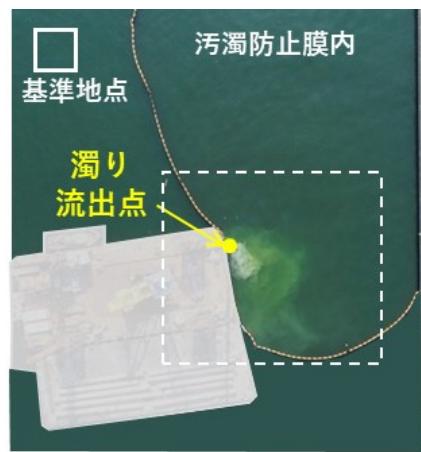


図-1 空撮画像
Fig.1 Aerial photograph

表-1 採水試料の濁度と SS

Table 1 Turbidity and SS of sampled water

No.	月日	時刻	工事タイミング	濁度 (採水) [NTU]	SS [mg/L]
1	2022/11/8	11:00	打設中	1.49	4
2		11:40	打設中	1.67	3
3		13:05	打設前	1.61	3
4		13:17	打設中	1.9	3
5		13:48	打設中	1.64	3
6		14:24	打設中	9.17	15
7		15:15	打設後	5.53	7
8		15:46	打設後	4.97	6
9	2022/11/9	8:05	打設前	1.98	2
10		10:02	打設中	493	670
11		10:25	打設中	70.2	90
12		11:15	打設中	2.08	5
13		13:05	打設中	34.2	42
14		13:32	打設中	5.13	8
15		14:25	打設中	244	280
16		14:50	打設中	11	17

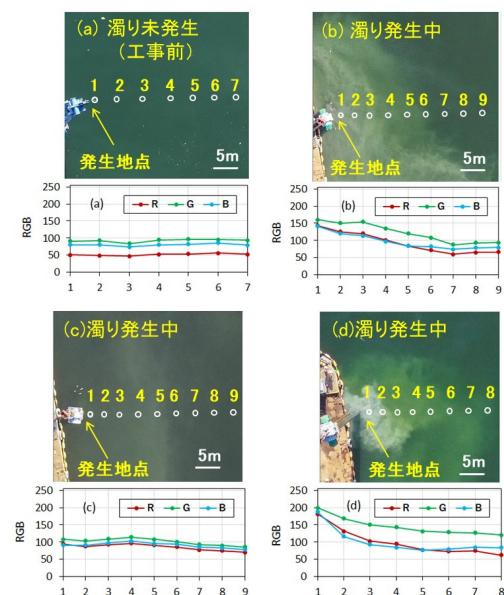


図-2 濁りの平面分布画像と RGB の変化
Fig.2 Turbidity distribution image and RGB variation

きく入れ替わることはなかった。以上より、濁りの平面分布については、RGB 値を用いて表現できることが

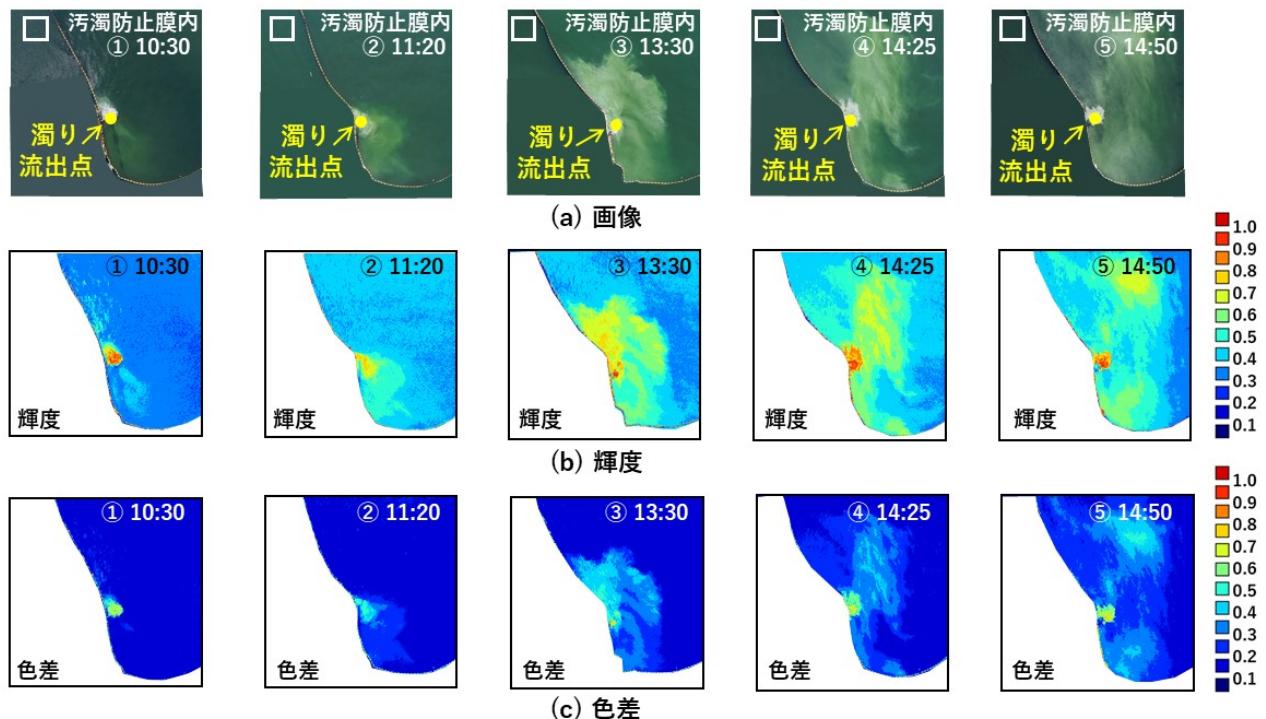


図-3 濁りの平面分布画像、輝度、色差
Fig.3 Turbidity, luminance and color difference distribution images

分かった。

次に、画像の色情報を数値化する方法を検討するために各画素を輝度に換算した。輝度は、人が認識している明るさをRGB値を用いて数値化しており、画像の見た目に近い。輝度Yは以下の式(1)で表される。

$$Y = 0.3 \times R + 0.6 \times G + 0.1 \times B \quad (1)$$

ここで、R, G, Bは各画素のRGB値である。

図-3(a), (b)は、濁水流出しにおける約1時間ごとの撮影画像と輝度である。なお輝度は、撮影範囲内の最大値で除して正規化した。

図-3(a)より、画像では、濁り流出地点からの濁水が時間とともに拡がる状況が分かる。この時間帯では濁水が間欠的に流出していたため、濁りの平面分布には部分的に高濃度の濁度エリアが確認できる。図-3(b)を図-3(a)と比較すると、輝度は、画像の見え方に類似して、濁水流出し地点の近くや高濃度エリアで高く、また流出地点から離れるに従い低い値を示している。次に、流出地点から離れたエリアに着目すると、例えば、図-3(a)の②では、濁りは流出点より画像上側には拡散していない状況と考えられる。しかし、図-3(b)の輝度②では0.3~0.4程度の輝度が不均一に広く示されており、低濃度の濁りが広く分布しているように見える。画像の色味は太陽光等の影響を受けて変化する。そのた

め、同じ非濁水エリアや濃度エリアであっても画像によって輝度が異なるので、輝度では非濁水エリアと低濃度エリアの区別が付きにくくなる課題が明らかとなつた。そこで、色差により数値化する方法を考える。

色差とは、2色の差を色空間における距離で示す指標であり、以下の式(2)で表される。濁水の影響を受けていない非濁水エリアの色を基準($R0, G0, B0$)として、各画素の色(R, G, B)との差を示すことで、非濁水エリアを色差 $C = 0$ とすることでき、非濁水エリアと濁水エリアをより明確に区別して把握できると考えた。

$$C = ((R - R0)^2 + (G - G0)^2 + (B - B0)^2)^{1/2} \quad (2)$$

図-3(c)に色差を示す。図-3(a)に示した非濁水エリア(□)のRGB値を基準値($R0, G0, B0$)として、汚濁防止膜内の各画素を色差に変換した図である。輝度と同様に、色差は撮影範囲内の最大値で除して正規化した。

流出地点から離れた非濁水~低濃度エリアに着目すると、図-3(b)の輝度②では0.3~0.4程度の値が不均一に広く示されていたが、図-3(c)の②では0.2以下の範囲となり①と同程度の値で示された。色差を用いることより、色味や明るさが異なる画像であっても非濁水~低濃度エリアを同程度の値で示すことが出来る可能性が示された。

2.3.2 色差と濁度の関係式の構築

ここでは、画像の色情報である色差と濁度の関係を定式化する。まず、2.2節に示した採水試料および純水を準備し、背面に白色のテープを貼った透明な容器に満たした。次に、全ての容器を含めて1枚の画像に撮影し、画像から、容器越しに見た白色のテープ位置のRGBを読み取った。最後に、純水のRGBを基準($R0, G0, B0$)として各試料との色差 C を式(2)より算出した。写真-1は、RGB値の読み取りに用いた採水試料の画像、表-2は、読み取ったRGB値、色差、濁度計測値である。図-4は色差と濁度の比較、およびその近似曲線(点線)であり図-4に示す近似式が得られた。

2.4 濁度平面分布の評価結果と検証

2.4.1 濁度の平面分布

図-4に示した関係式を用いて濁度分布図を作成した。また、2.2節に記載した採水試料の濁度を用いて本濁度評価手法の検証を試みた。

撮影画像の色差は、画像ごとに濁りの影響を受けていないエリアを選定し(例えば図-1、図-3(a)の白枠)、このエリアを基準地点とした色($R0, G0, B0$)と各画素の色(R, G, B)との差を式(2)より算出した。すなわち、濁水の色を非濁水の色(基準地点の色)に対する相対的な値として画像ごとに評価している。次に、図-4の式により各画素の色差を濁度に換算した。

図-5に換算した濁度の平面分布図を3例((a)～(c))示す。比較のために最大値を100に正規化した輝度を示す。図-5より、輝度表示において課題となっていた非濁水および低濃度のエリアに着目すると、濁度は、いずれにおいても0～10mg/Lの範囲となり、それ以上の濁度エリアとの境界を示すことが出来ている。また、輝度表示に対して濃淡が顕著になり、濁度の高低が分かりやすく表示された。以上より、色差を用いて濁度平面分布を表示することにより、非濁水～低濃度エリアの値を均一に表示でき、これにより低濃度エリアとの区別がつけられる可能性を示された。

2.4.2 濁度評価方法の検証

今回実施した濁度評価方法の検証として、図-4に示した関係式を用いた濁度換算値と採水試料の計測値の比較を試みた。ここでは、採水時刻に近い画像の濁度分布図から、採水位置を選定して濁度を読み取った。実際の採水地点と濁度分布図の読み取り位置、および、採水と撮影のタイミングには誤差が生じている。例えば、採水地点については、採水容器を投げ入れたために正確な位置は不明であるが、画像および容器に取り付けた紐の長さから、台船から1m程度離れた範囲内で

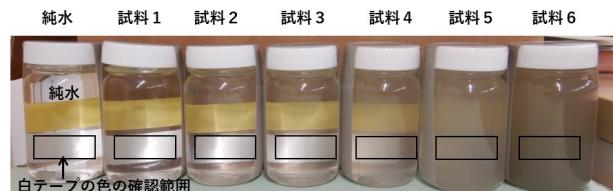


写真-1 採水試料の画像
Photo.1 Image of sampled water

表-2 採水試料画像のRGBと色差、濁度
Table 2 RGB and color difference of images of sampled water and its turbidity

	純水	試料1	試料2	試料3	試料4	試料5	試料6
R	246	225	200	180	167	132	100
G	241	221	195	174	156	120	91
B	247	222	194	173	146	108	74
色差	—	32	70	99	128	179	226
濁度[NTU]	0.0	1.5	11.0	34.2	70.2	244.0	493.0

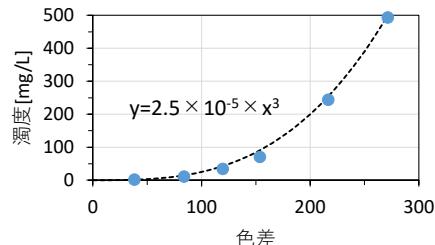


図-4 採水試料画像の色差と濁度の関係
Fig.4 Relationship between color difference and turbidity of images of sampled water

の誤差が考えられる。採水時刻においては、撮影画像のインターバルが30秒であることから誤差は最大30秒と考えられる。これらの誤差範囲を踏まえ、濁度分布図における採水地点付近の色差の読み取りは次のように行った。採水時刻については、採水直後の画像色を取得するために、採水中の画像を1枚選定し、その後の2枚の画像を含めた3枚の画像を用いることとした。採水地点は、画像から当たりを付けた採水地点付近の 20×20 画素(40cm四方)の値を平均した。この範囲は、考えられる採水位置の誤差範囲(1m程度)より狭いが、濁度が大きく変化する範囲を含まないようにこの範囲とした。図-6は、読み取った濁度(濁度換算値)を縦軸に、横軸には、採水した試料の濁度計測値を示した。その結果、正の相関が確認でき、値についても概ね整合する結果となった。なお、実際の濁り分布は鉛直方向にも分布を考慮した検討が必要であるため、濁度と推定値比較については引き続き検討中である。なお今回、図-1に示した濁水とは異なる色の濁水(黒色)が生じるケースがあり、これについては本方法による評価は出来なかったが、底質材料に合わせた式により評

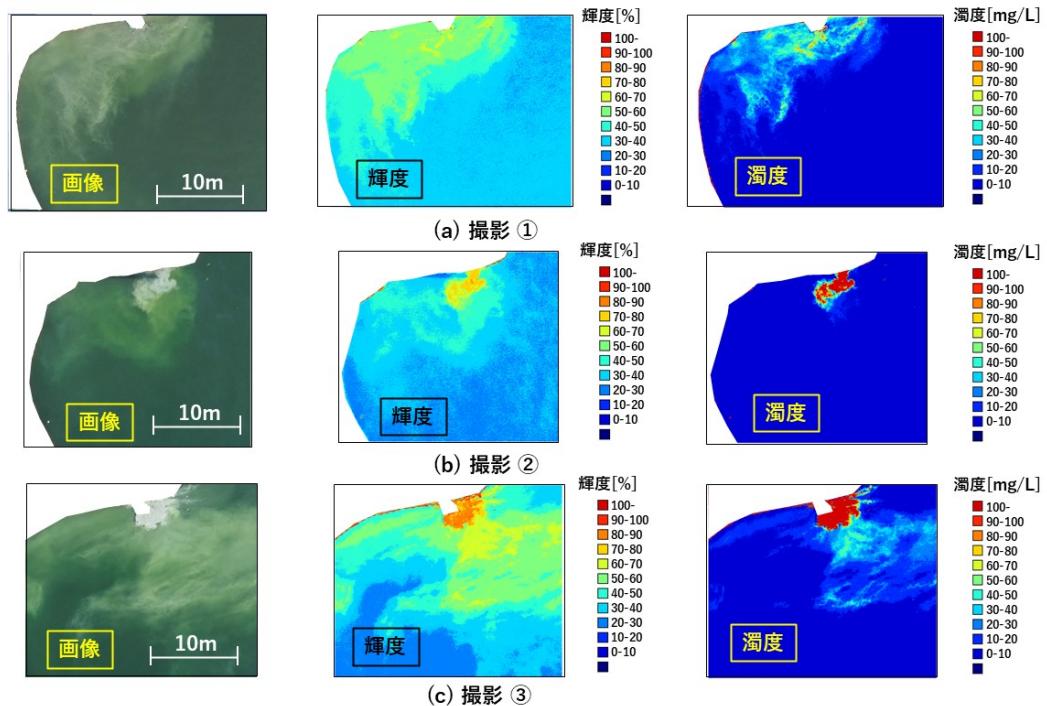


図-5 濁りの平面分布の画像、輝度、濁度換算値

Fig.5 Turbidity and luminance distribution images, and evaluated turbidity distribution

価は可能と考える。

以上より、色差を用いた濁度評価方法については、RGB や輝度に対して、画像に寄らず統一的な基準で表示できる可能性があり、海洋工事における濁りのモニタリングで必要となる濁度の基準値境界が把握できる手法であることが示唆された。

3. 濁度評価手法の汎用化の検討実験

3.1 実験概要

本濁度評価手法の汎用化に向けた基礎検討として、画像の色情報と濁度の関係について、濁水画像の色に影響を与える項目やその影響の違いに関する実験を実施した。ここでは、海洋工事により発生する濁水画像を想定し、画像色と濁度の関係において画像色に影響を与える項目やその影響の違いを調べるために小型容器を用いた実験を行った。まず、濁水画像の色に影響を与える項目を抽出し、これを実験パラメータとして条件を変えて容器に入れた濁水の画像を取得した。次に、取得画像の色情報を数値化し、その数値と濁度の関係を整理した。

3.2 実験パラメータの抽出

濁水の平面分布画像の色に影響を与える項目について整理し、実験パラメータとして抽出した。

上空から海面を見た場合の濁水の色を決定する要素として、その海域の、濁水がない元の色（以下、海色

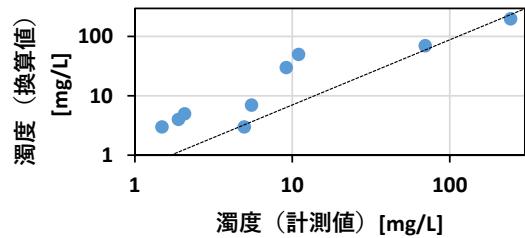


図-6 濁りの計測値と換算値の比較

Fig.6 Comparison of measured and evaluated turbidity

と記す）と濁水の色が挙げられる。海色は、浮遊物質やその濃度、透明度、海底の色、水深等、多くの要素が相互に関連した結果と考えられ、例えば、水深が浅く透明度が高い場合は海底に堆積した底質の色が強く反映された色となり、また濁水色は工事によって投入または撒き上がる材料とその量によって概ね決まると考えられる。そこで実験では、海色と濁水色をパラメータに用いることを考えた。濁水色は色が異なる土質材料を濁水源に用いることとした。海色については、多くの要因があるものの結果として見える色をパラメータとすることを考え、色水を用いることが実現象に近いと考えられるが、本実験では、代わりに簡易に設置や取り換えることができるよう容器に色付の板を敷いた。板は不透明色（緑、青、白）の塗装樹脂板を用いた。実際に形成される濁水状況とは異なるが、本実験では容器の底色の違いが画像色に与える影響を確認した。

また、濁水画像の色に影響を与える項目として、撮影時の明るさが挙げられる。明るさの要因は主に太陽

高度と天候であるが、本実験では撮影時の照度を用いたこととした。

以上より、実験パラメータは濁水色、海色、撮影時の照度の3項目とした。

3.3 実験材料と濁水の作成

濁水色を変えるために表-3に示す色味の異なる土質材料4種を用いて濁水を作成した。材料AとBはそれぞれ瀬戸内海と沖縄海域に堆積した底質を採取し、篩をかけて粒径74μm未満の成分を用いた。その他に既製品であるトチクレーとフライアッシュを使用した。表-1に示した色はこれら材料の撮影画像の一部であり、色味が異なる状況が分かる。図-7は、2mm以下の材料AとBにおける粒度分布（レーザー回折式、SALAD-3000、島津製）である。また図-7にはトチクレーとフライアッシュについて、関連情報や資料⁸⁾を参考に粒度分布をプロットしている。図-7から分かるように、材料AとBの50%粒径はトチクレーとフライアッシュに対して大きく、そのため本実験で用いる小型容器において維持できる濃度には差異が生じた。

濁水の濃度は100mg/L～1,000mg/L程度まで7段階作成した。実験終了時に容器内を十分攪拌して採水し、濁度計（TN-100、Eutech製）により濁度（NTU）を計測した。

3.4 撮影方法と実験ケース

実験では0.3m×0.3m×0.15mの透明容器を用いた。7個の容器を同じ材料による濃度の異なる濁水でそれぞれ満たし、1つには濃度0として水道水を入れ、直上からデジタルカメラで8個同時に撮影し画像を取得した。撮影状況と撮影した画像の例を写真-2に示す。撮影時には容器近傍の水面高さにて照度計（照度UVコード、TR-74Ui、T&D製）を用いて照度を計測し、撮影時刻を変えることにより照度の異なる画像を取得した。容器内の濁水は時間の経過とともに沈降するため、撮影する直前に容器内を攪拌した。実験ケースは、材料と容器の底色を変えた12ケースに対して、それぞれ照度が異なる画像を取得した。ケース一覧を表-4に示す。

3.5 画像の数値化手順

画像の色と濁度の関係を整理するため、取得した画像の色情報を数値に変換する手順について説明する。取得した1枚の画像には、濁度0および7段階の濃度の濁水画像を含む。まず、濁度0および各濃度の濁水画像部分をそれぞれ切り出し、切り出した部分のRGB平均値を求める。この時、建物や樹木、容器などの影や太陽光の反射部分は削除する。次に、求めた8個のRGB平均値を用いてケース毎に式(2)により色差を算出

表-3 実験材料

Table 3 Experimental material

底質材	採取地または材料名	画像	R	G	B
A	瀬戸内海		95	92	81
B	沖縄		134	120	89
C	トチクレー		105	80	52
D	フライアッシュ		136	134	123

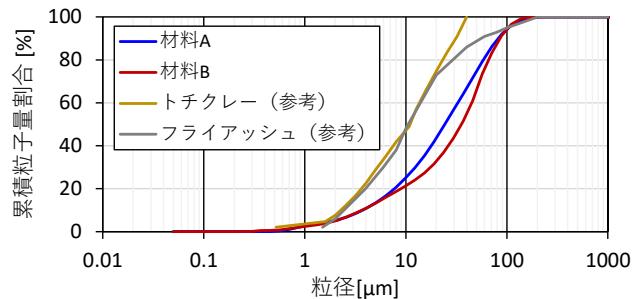
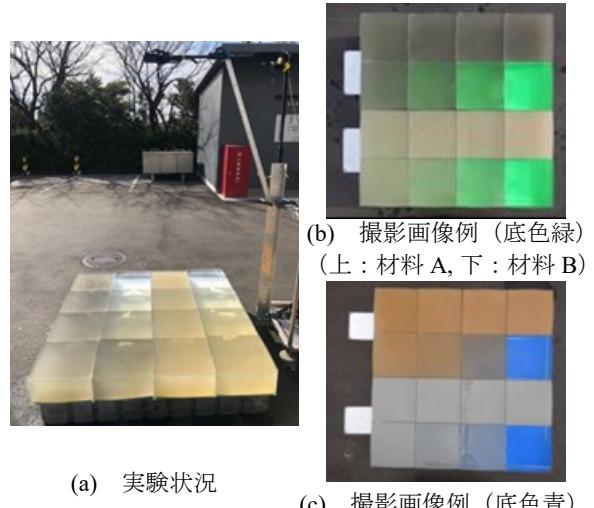


図-7 実験材料の粒度分布

Fig.7 Particle size distribution of experimental materials



(a) 実験状況

(c) 撮影画像例 (底色青)
(上: 材料 C, 下: 材料 D)

写真-2 撮影状況と取得画像の例

Photo.2 Experimental set-up and obtained images

表-4 実験ケース

Table 4 Experimental cases

材料	底色		
	青	緑	白
材料A	A青	A緑	A白
材料B	B青	B緑	B白
材料C	C青	C緑	C白
材料D	D青	D緑	D白

する。ここで、 $R0, G0, B0$ は濁度0の画像色、 R, G, B は7段階濃度の各画像色であり、1ケースにつき7個の色差（数値）が得られる。

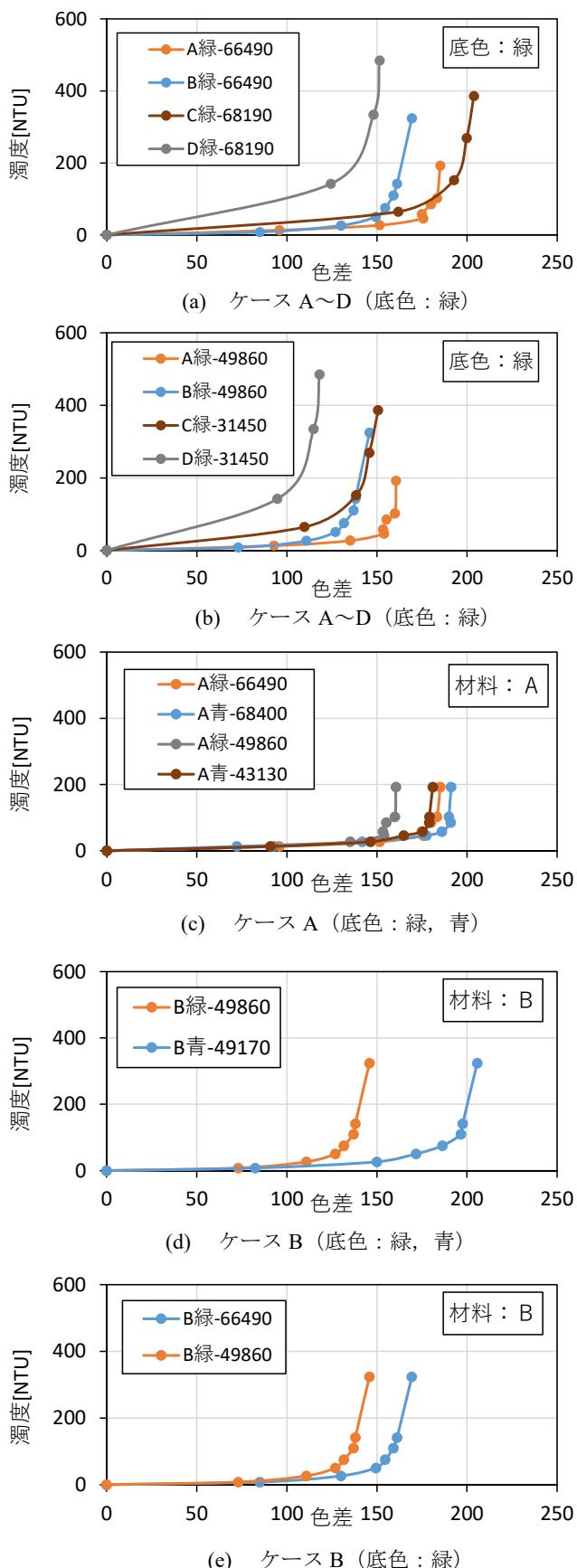


図-8 色差と濁度の関係 (実験結果)
Fig.8 Relationship between color difference and turbidity (experimental results)

3.6 実験結果

図-8 に実験結果について濁度と色差の関係を示す。凡例には、実験ケース名 (材料名と底色、表-4 参照) の後にその画像撮影時の照度 (lx) を記載した。

図-8(a)に、材料による濁度と色差の関係を示す。照度は冬季昼近くの値、底色は緑である。図-8(a)より、いずれの材料においても濁度と色差には同様の関係が見られ、濁度に対する色差の変化割合が濁度が大きいほど小さくなる、べき乗近似曲線の関係を示した。なお本実験では、図-8 に示す濁度より高濃度の濁水も用いたが、高濃度の範囲では色差の違いを得ることが出来なかつたために値を載せていない。この理由は、高濃度水では材料の沈降が多くなり濁水色の差が現れにくくなつたためであり、本実験で扱える濃度の上限を超えたものと判断した。

次に、図-8(a)に対して照度が低いケースを図-8(b)に示す。図-8(a)と(b)を見ると、いずれの材料についても照度が低くなると色差の範囲が狭くなる傾向が見られた。この理由のひとつとして、照度が高いと特に低濃度の画像色がより明るくなり、高濃度の暗い濁水色との差が広がることが考えられる。

次に、底色の違いについて確認するために、材料 A と B について底色が青と緑のケースを、図-8(c), (d)に示す。両者を比較すると、底色青のケースが緑に対して色差の範囲が広くなつた。この傾向は特に照度が低い場合にその差異が顕著であった。底色は、海色の違いを模擬していることから、海域により濁度と色差の関係が異なる可能性を示唆している。本実験では、色差の基準色として彩度が高い緑色や青色の板を用いたが、例えば内湾では明度が低い緑色など様々であるため、海域ごとに濁度と色差の関係を確認する必要がある。

図-8(e)は、材料 B、底色緑における照度が異なるケースであり、材料 A (図-8(a)と(b)) と同様に、照度が低くなると色差の範囲が狭くなる傾向が確認できる。

以上より、濁度と色差の関係について、材料、底色、照度が異なると、濁度に対する色差の変化割合は異なるものの、いずれも類似関係にあり、べき乗近似等の曲線を示すことが分かった。このことは、海洋工事区域などの限られた領域、すなわち、海色が均一な範囲であれば、底質や海域によらず濁水画像から濁度を評価できる可能性を示している。

4. まとめ

本研究では、海洋工事において発生する濁りを対象

に、空撮画像から濁度分布をモニタリングする手法の開発を目的として、海洋工事の画像を用いた濁度評価手法の試行、および、画像による濁度評価手法の基礎検討実験を実施した。

海洋工事の画像を用いた濁度評価手法の試行では、濁り平面分布画像について、現地の底質材料による色差と濁度との関係を用いて濁度の平面分布評価が可能であることが示された。この手法では、特に非濁水域や基準値の濁水到達域を示すことに主眼を置いており、キャリブレーション精度を上げていくことにより海洋工事の濁り監視に活用できる可能性が確認された。

画像による濁度評価手法の基礎検討実験では、濁度と色差の関係は、材料、底色、照度が異なる条件においても類似関係にあり、濁度に対する色差の変化割合は、濁度が大きいほど小さくなる、べき乗近似等の曲線を示すことが確認された。したがって、海洋工事区域などの限られた領域、すなわち、海色が均一な範囲であれば、底質や海域によらず濁水画像から得られた色差を用いて濁度を評価する指標が構築できる可能性がある。同時に、濁度と色差の関係は濁水材料や底色、照度によって異なることも確認できたことから、対象海域における海色画像と底質材料による高濃度濁水の画像を取得し、これらにより関係式を構築する必要がある。一方で、複数の海域における画像色情報を蓄積することにより、事前検討などの準備工程を削減することも可能と考えられる。また、濁水画像色に対する

照度の影響として、照度が低くなると色差の範囲が狭くなる傾向が材料や底色によらず確認された。

参考文献

- 1) 作野裕司, 山本正智, 吉田武史, 松永恒雄, 古津年章, 下舞豊志, 高安克己: 多時期 ASTER データを用いた宍道湖・中海の濁度・クロロフィル a 濃度推定, LAGUNA, 11, pp. 147-153, 2004.
- 2) 比嘉紘士, 中村由行, 田中陽二, 管原庄吾, 虎谷充浩, 伊藤比加留, 鈴木崇之: 濁度推定手法に基づく静止海色衛星 COMS/GOCI を用いた青潮分布の把握, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.72, No.2, I_1759-I_1764, 2016.
- 3) 山本周一郎, 古津年章, 下舞豊志, 野々原伸吾, 作野裕司: MODIS による宍道湖・中海の濁度分布推定, LAGUNA (汽水域研究) 14, pp.57-69, 2007.
- 4) Asakuma K., Omiya C., Kida N. and Kitamura M.: Development of Turbidity Monitoring Methods Over the Coastal Zone Using Aerial Drone : Case Study in the Estuary of Tokoro, Hokkaido, Japan, After Low Pressure Events, J.Agric. Sci., Tokyo Univ. Agric., 64(4), pp116-126, 2020.
- 5) 菅和利, 向井伸幸, 開進一, 前田修一: 橋上から撮影したデジタル画像を用いた礫付着藻類クロロフィル量の連続モニタリング手法の開発, 河川技術論文集, 第 18 卷, 2012.
- 6) 高山百合子, 大野剛, 織田幸伸: 空中写真を用いた濁りの平面分布モニタリングに向けた濁度評価方法の検討, 土木学会論文集, Vol.79, No.18, 23-18171, 2023.
- 7) 高山百合子, 大野剛, 織田幸伸: 海洋工事の濁りモニタリングを目的とした画像による濁度評価手法の実験的検討, 土木学会論文集, Vol.80, No.18, 印刷中, 2024.
- 8) https://www.mlit.go.jp/kowan/kowan_fr15_000054.html, (参照 2024-02-20)