

底泥表色系による海域底泥表層の硫化物濃度の推定に関する研究

矢北 孝一¹・滝川 清²・秋元 和實³・増田 龍哉⁴
森本 剣太郎⁵・森 敬介⁶・島崎 英行⁷

¹正会員 熊本大学 工学部技術部 (〒860-8555 熊本市中央区黒髪2丁目39番1号)
E-mail:yakita@tech.eng.kumamoto-u.ac.jp

²フェロー 熊本大学教授 沿岸域環境科学教育研究センター (同上)
E-mail:taki2328@kumamoto-u.ac.jp

³熊本大学准教授 沿岸域環境科学教育研究センター (同上)
E-mail:akimoto@sci.kumamoto-u.ac.jp

⁴正会員 熊本大学特任助教 大学院先導機構 (同上)
E-mail:masuda@gpo.kumamoto-u.ac.jp

⁵正会員 熊本大学特定事業研究員 沿岸域環境科学教育研究センター (同上)
E-mail:moriken@kumamoto-u.ac.jp

⁶国立水俣病総合研究センター (〒867-0008 水俣市浜4058番18号)
E-mail: morik@nimd.go.jp

⁷熊本大学 合津マリンステーション (〒861-6102 熊本県上天草市松島町合津 6061)
E-mail:seiya@kumamoto-u.ac.jp

八代海域で採集した試料を対象に、海域底泥表層の硫化物濃度を簡便・効率的に推定する手法について、土色計およびデジタルカメラ画像のマンセル、 $L^*a^*b^*$ 、 HSV 等の表色系の色彩データを用いて基礎的検討を行った。その結果、土色計で得られたマンセル色相、 L^* 、 a^* 、 b^* 色彩データを説明変数とする重回帰分析と a^* 、 b^* 色彩データを説明変数とした最良回帰式で有意性が認められ、硫化物濃度推定の可能性が示された。底泥表面に非接触で校正板を必要としない手法の検討では、デジタルカメラ画像の各色彩データを主成分分析し、説明変数として B 、 L^* 、 a^* 、 b^* 、 H を選定した。これらを説明変数とした最良回帰式より、推定式の有意性は認められ、デジタル画像からの推定式の可能性も示された。また、色相 a^* が硫化物濃度の推定式に与える影響が大きいことが分かり、土色計の説明変数と共通する結果となった。

Key Words : waters bottom mud surface , color system, sulfide concentration

1. はじめに

近年、各地の沿岸域において貧酸素水塊の発生、底生生物数の激減等の環境悪化が顕在化している。この要因の一つとして、海水中の溶存酸素濃度の低下による底泥中での硫化物の生成が影響を与えるとの指摘がある¹⁾。そのため、沿岸域の底質が酸化状態あるいは還元状態にあるかを調査することは重要となり、底質中の有機物量を把握するため、硫化物濃度が調査指標の一つとして用いられている。この定量分析は、蒸留、高温処理、試薬の添加等が必要であるため現地で採取した試料を実験室に持ち帰り、室内で定量分析を実施する手順が一般的である。しかし、このような調査・分析方法では、多大な労力と時間を要するため調査域の縮小及びサンプリング

間隔の拡大が必要となり、海域底質の詳細な時・空間変動を捉えることは困難であると考えられる。

沿岸域の環境を評価し、環境悪化の進行を抑制するためには、沿岸域の環境実態と様々な負荷要因の継続的なモニタリングの実施と伴に、取得されたデータの簡便・効率的な分析手法が求められている。

これまで、岩石の風化区分に関する研究²⁾、ボーリングコアの色彩と層相との関係^{3,4)}、陸域での土色と有機物量との関係^{5,6)}が報告されている。しかし海域で硫化物量との関連性を検討した事例は少ないのが現状である。

そこで本研究では、底泥表層の硫化物濃度の推定手法の開発を目的として、その試料を採集し土色計およびデジタルカメラ画像の表色系と硫化物濃度の関係について検討した。

2. 研究方法

(1) 試料採集地点と土色測定

底泥の採集海域は、図-1に示す八代海とした。八代海は、九州西部に位置し天草諸島と九州本土に囲まれ、北部域に広大な干潟を有する面積約1200km²の閉鎖性海域である。観測期間は2011年10月31日～11月3日、観測地点は、図-1(a),(b)に示すように水深60～5m、硫化物濃度0.31～0.02mg/gdryを示す22地点とした。

試料は、スミス・マッキンタイヤ型グラブ(33×33cm)を使用し、1地点当り2個の不攪乱の底泥表層試料を採集した。採集直後に底泥表面をCASIO製EX-G1デジタルカメラの接写モードで撮影し、表面の3～5ヶ所でMINOLTA製SPAD-503土色計で計測した。

これまで土色計での測定は、封入ビニール越し、あるいは金属ヘラで平滑後に行われている。しかし、底質中の硫化物、特に遊離型ものは不安定で好気的条件下に晒されると容易に揮発、酸化分解を受けることが知られている。本研究では、不攪乱状態の底泥表面に土色計の保護ガラス面を接触させる方法を用いた。なお、硫化物濃度測定用の試料は、表層より5cmまでを採取し、亜鉛アンミン溶液で固定後、冷暗保存にて持ち帰り、同仁グローバル株式会社に分析依頼した。

(2) 表色系⁹⁾

土色計には、マンセル・L*a*b*表色系モードがある。マンセル表色系は、JISZ8721で規格化され色彩を色の三属性(色相、明度、彩度)によって表現している。

L*a*b*表色系は、JISZ8729で規格化されL*：明度、a*：色相、b*が彩度を表し、+a*は赤方向、-a*方向は緑方向、+b*は黄方向、そして-b*は青方向を示している。また、(a*²+b*²)の平方根は彩度、b*/a*は色相、(L*²+a*²+b*²)の平方根は色差を表す。

本器マニュアルには、白色校正板使用時には、マンセル値で±1、色差0.1以内と示されている。著者らが無作為に選んだ同一試料を対象に、同一条件下で5回計測した結果、平均及び標準偏差は、マンセル色相で、8.75±1.25となり、L*=61.64±0.15、a*=2.80±0.08、b*=16.12±0.05であった。

デジタル画像の表色系は、RGB・XYZ・L*a*b*・HSV表色系を用いた。HSV表色系は、0～360まで変化する色相(Hue)、0～1の範囲で変化する彩度(Saturation)と明度(Value)の成分からなる環状の色空間を示している。XYZ表色系は、Y：明度、Z：青色の度合い、X：それら以外の要素を表す。

(3) デジタルデータ処理

本研究で用いたデジタルカメラの画像は、JPGファイ

ル形式で保存されているため、画像のデータ構造が示されているBMP(Bitmap)ファイルに変換した。底泥表面のデジタル画像は、図-2に示す撮影画像(約18×13cm)から日射の影響、表面の乱れ等を除去した画角(約10×10cm：1194×1096pixel)をトリミングした。

BMPファイルはRed, Green, Blue画素が256階調で表現されている。画像より全ピクセルのRGB値を求め、画角当りのRGB平均値から表色系変換式(1)～式(5)を用い、X,Y,Z, L*,a*,b*, H,S,V等の色彩データを算出した。なお、式(2)では、X_n=98.072, Y_n=100, Z_n=118.225とおいた^{7),8)}。

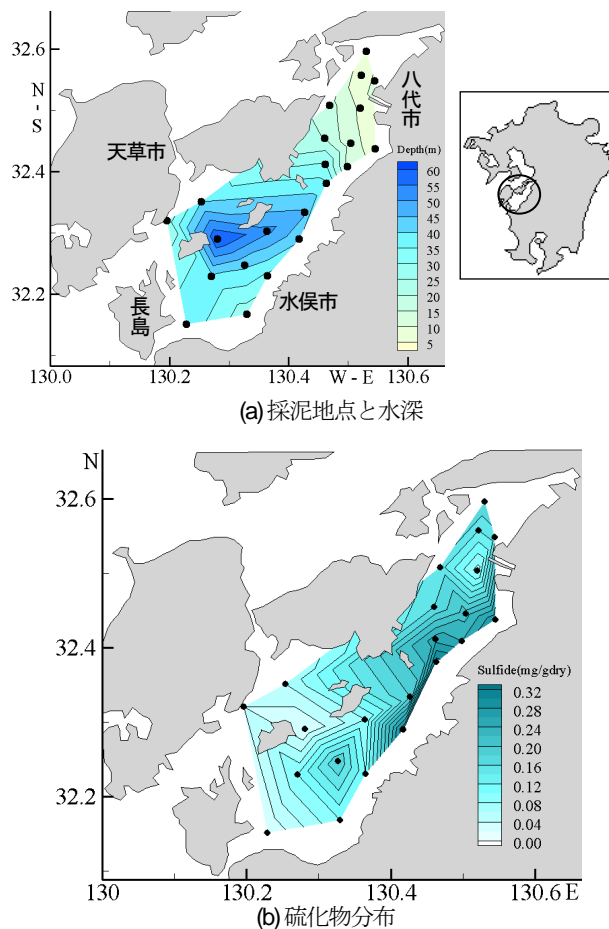


図-1 採泥地点と硫化物濃度分布



図-2 撮影画像の一例

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.4124 & 0.3576 & 0.1805 \\ 0.2126 & 0.7152 & 0.0722 \\ 0.0193 & 0.1192 & 0.9505 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} L^* &= 116 f(Y/Y_n) - 16 \\ a^* &= 500 [f(X/X_n) - f(Y/Y_n)] \\ b^* &= 200 [f(Y/Y_n) - f(Z/Z_n)] \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

ただし

$$f(x) = \begin{cases} x^{1/3}, & x > 0.008856 \\ 7.78x + (16/116), & x \leq 0.008856 \end{cases} \quad (3)$$

$$H = \begin{cases} 60[(G-B)/(MAX-MIN)] + 0.0, & \text{if } MAX = R \\ 60[(B-R)/(MAX-MIN)] + 120, & \text{if } MAX = G \\ 60[(R-G)/(MAX-MIN)] + 240, & \text{if } MAX = B \end{cases} \quad (4)$$

ただし、 H は、360の剰余

$$S = (MAX - MIN) / MAX, \quad V = MAX \quad (5)$$

(4) 硫化物濃度の推定式⁹⁾

土色計とデジタル画像の色彩データを説明変数とした硫化物濃度の推定式は、どの変数が有効か不明のため単体データとの関係、重回帰分析、最良回帰式の順に検討した。この最良回帰式は、説明変数の集合から残差平方和を基準とした段階的手法を用いた。

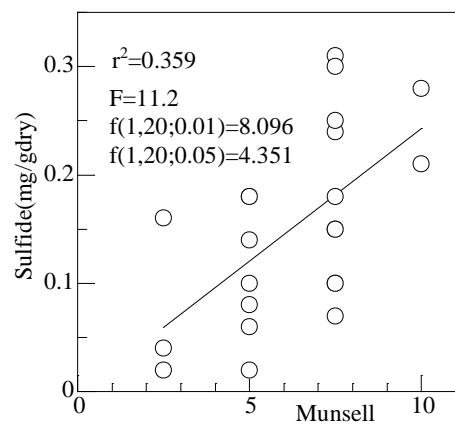
段階的手法は、変量増減法とも呼ばれ変量の寄与率²、分散比F値を基準とし逐次、変量の追加、除去を行う方法である。この分析より得られた推定式の有意性はf-検定、偏回帰係数の有意性はt-検定で評価した。また、デジタル画像より算出した色彩データから硫化物濃度の推定式を求める場合、色彩データが多数あるため主成分分析を行い説明変数を決定した。

なお、観測データが22個であるが、ここでの重回帰式による残差は、全て正規分布に従うと仮定している。

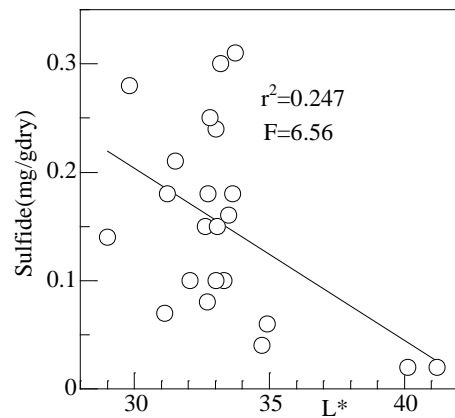
3. 結果と考察

(1) 土色計表色系と硫化物濃度との関係

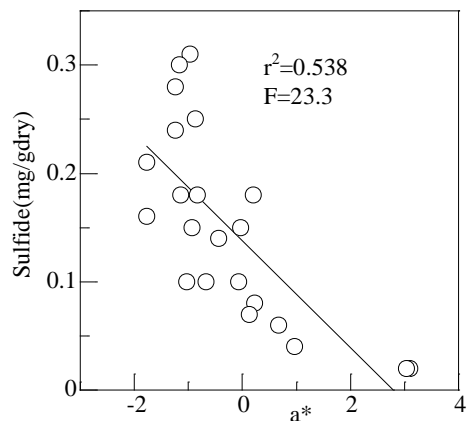
図-3(a)~(d)に、土色計のマンセル色相・ $L^*a^*b^*$ 表色系の色彩データと硫化物濃度との関係を示す。図より、マンセル色相以外は、硫化物濃度と負の関係があることが分かり、22個のデータ範囲内で色相 a^* 、彩度 b^* との寄与率が0.5以上となる。また、底泥の表色系と硫化物濃度には、有意水準1%=8.096、5%=4.351に対応するF値との比較より、回帰式は、危険率1%および5%で、帰無仮説を棄却できることが分かる。ただし、寄与率は最大0.538であり、硫化物濃度は、単独の色彩データで決定されないことが考えられる。そこで、上記の色彩データ



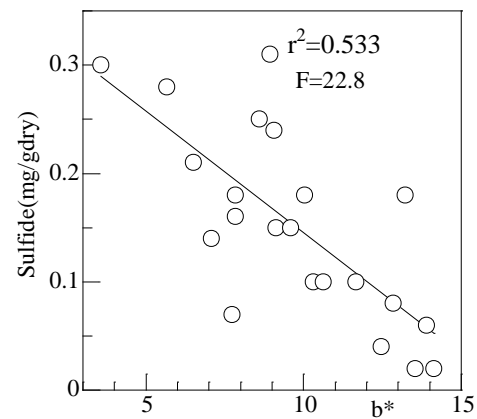
(a) マンセル色相



(b) 明度 L^*



(c) 色相 a^*



(d) 彩度 b^*

図-3 土色計の表色系と硫化物との関係

全てを説明変数とした重回帰分析の結果を図-4に示す。図より、寄与率 $r^2=0.695$ は、回帰による変動が硫化物濃度の全変動に対する割合が約70%である事を示している。この場合のF値は9.68となり、危険率1%、5%で有意であることが分かる。

つぎに、図-5に示すように、上記の変量の中から最適となる説明変数を選定し、F値の増加を試みるため最良回帰式を求めた。その結果、選定された変量は、色相 a^* 、彩度 b^* となった。寄与率が0.62と若干低下するが、F値が15.5となり重回帰分析と比較し、約1.6倍の値を示すことが分かり、最良回帰式の有効性が確認できた。

さらに、偏回帰係数の有意性を検討した。表-1に偏回帰係数と値を示し、表-2に危険率 α でのt検定値を示す。表-1、2より色相 a^* 、彩度 b^* のt値は、危険率1%、5%での有意性が認められず、危険率10%で帰無仮説を棄却できることが分かる。この偏回帰係数の区間推定を行うと $a^* : -0.0289 \pm 0.024$, $b^* : -0.0129 \pm 0.011$ となった。

以上より、土色計の色彩データと硫化物濃度には、重回帰分析と最良回帰式より有意な関係が認められた。

しかし、土色計の計測では、マンセル・ $L^*a^*b^*$ 表色系モード毎に白色校正板の使用が必須となる。また、今回の測定では、底泥表面に密着させる手法のため、測定毎に保護ガラス面を洗浄し拭き上げる必要があった。

そこで次節では、底泥表面に非接触で校正板を必要としないデジタルカメラ画像の色彩データと硫化物濃度との関係を検討した。

(2) デジタル画像と硫化物濃度との関係

デジタル画像データから算出された、色彩データは12種類であり、この全てを用いて推定式を求めることは効果的ではない。そこで主成分分析を行い、図-6に示すように第2主成分までの累積寄与率約96%での因子負荷量の分布を求めた。なお、色彩データのオーダーが違いため変量を平均0、分散1に標準化した相関行列を求め分析を行った。

図-6に示した因子負荷量は、各主成分と変量との相関係数を表しており、主成分と強く関係しあう変量のグループを見つけだすことが出来る。この因子負荷量と先に示した土色計の変量を参考に、デジタル画像の説明変数として B , L^* , a^* , b^* , H を選定した。ここでは画像2枚の色彩データの平均値を使用した。

上記の色彩データと硫化物濃度との関係を最良回帰式より検討した結果を図-7に示す。図よりF値3.58、寄与率0.274であり、土色計の最良回帰式と比較すると小さい値となり、推定式として有意性が認められないと考えられる。この原因の一つとして、解析画像の画角約 10×10 cmと設定したため測定面積約 100cm^2 の影響が考えられる。この面積は、浦野らが行ったデジタルカメラを

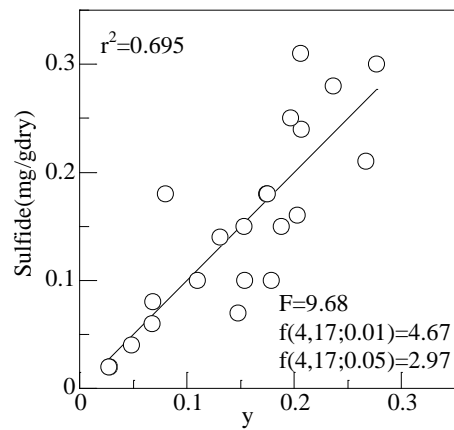


図-4 土色計の重回帰分析結果

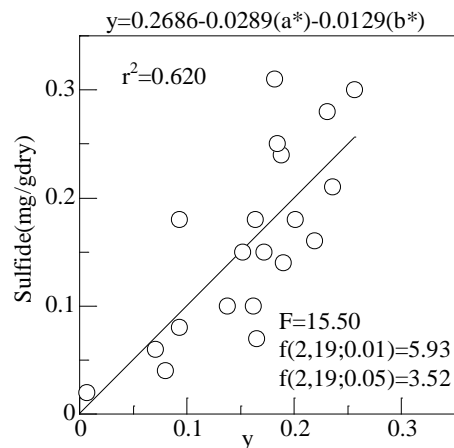


図-5 土色計の最良回帰式

表-1 偏回帰係数と t 値

変量	偏回帰係数	t 値
a^*	-0.0289	2.0868
b^*	-0.0129	2.0294

表-2 危険率 α と t 検定値

α (%)	1	5	10
t 検定	2.8609	2.0930	1.7291

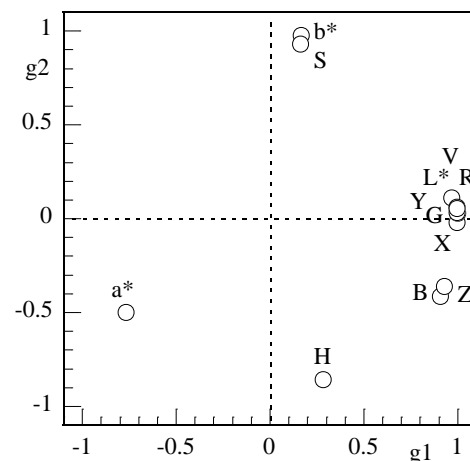


図-6 色彩データの因子負荷量

用いた色彩測定方法¹⁰の測定面積、約15.4cm²と比較すると約6.5倍の値である。そこで、測定面積を変更するため解析画像を4分割597×548pixelにトリミングし、測定面積を約25cm²と設定した。

ここでは、先に示した土色計表色系の検討より、最良回帰式の有効性が認められたため、その手法により、色彩データと硫化物濃度との関係を検討した。この場合、選定された説明変数は、*B*, *L**, *a**, *H*であった。

図-8に、8画像の中で最大の寄与率0.425, F値3.14と求められた結果を示す。これよりf-検定より推定式の有効性が確認できるが、寄与率も伴に低い値を示すことから実用化に向けて更なる検討が必要と考えられる。

上記より、測定面積の大小関係が硫化物濃度の回帰式に影響を与えていることが示唆される。そこで、解析画像を8分割し、測定面積を約12.5cm²と設定した。ただし本研究では、硫化物濃度を測定し、その値が既知であり、また撮影画像が2枚あるため、16画像の中でF値が最小、最大となったものを図-9(a), (b)に示した。

図-9(a)は、f-検定よりF値が低い値を示し、推定式としての有意性が認められない。このことは、測定面積の大小関係以外に、推定式に影響を与える要因が示唆される。この撮影画像を検討すると、底泥表面の乱れ、水分の影響、画面のピントの甘さ等が確認できた。

一方、図-9(b)は、寄与率0.636, F値が16.631であり、図-5に示した土色計の値とほぼ等しく、f-検定より危険率1%, 5%で推定式の有効性が認められる。この時の説明変数は、*L**, *a**が選定された。

つぎに、図-9(b)に示す推定式の偏回帰係数の有意性を検討した。表-3より色相*a**は、t値が約4.8となり表-2に示した危険率1%, 5%での有意性が認められ帰無仮説を棄却できることが分かる。しかし、明度*L**のt値は、約1.1であり危険率10%でも有意性が認められない結果となった。このように、*L**の有意性は認められないが、*a**の区間推定を行うと、*a**: -0.0333±0.0145となる。

以上の考察より、デジタル画像の色彩データと硫化物濃度の推定式には、有意性が認められた。また、デジタルカメラ画像より算出した表色系の中で、色相*a**が硫化物濃度の推定式に与える影響が大きいことが分かり、これは、土色計の説明変数と共通する結果となった。

表-3 デジタル画像の偏回帰係数とt値

変数	偏回帰係数	t値
<i>a*</i>	-0.0333	4.7975
<i>L*</i>	0.0014	1.1334

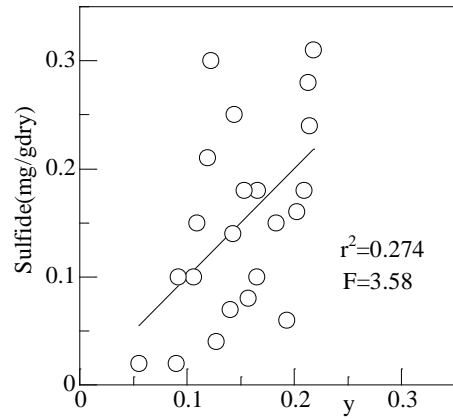


図-7 平均値の最良回帰式

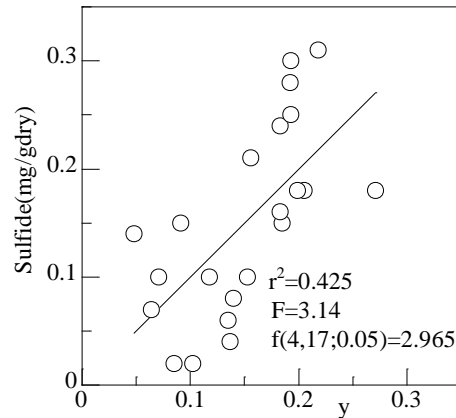
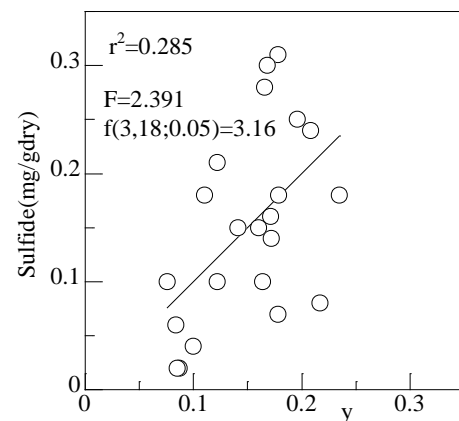
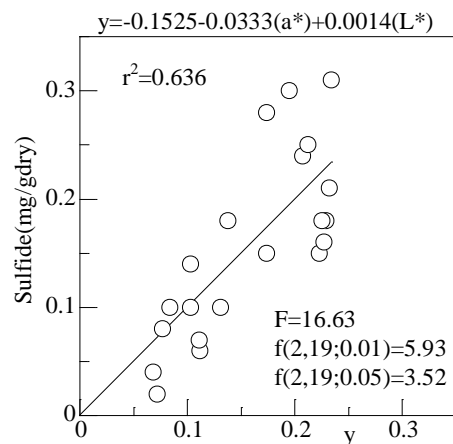


図-8 測定面積 25cm²の最良回帰式



(a) F値最小値



(b) F値最大値

図-9 測定面積 12.5cm²の最良回帰式

4. おわりに

本研究では、底泥表層の硫化物濃度の推定手法の開発を目的として、土色計およびデジタルカメラ画像の表色系と硫化物濃度の関係について検討した。下記に得られた主たる結論を示す。

1. 土色計のマンセル色相, L^* , a^* , b^* 色彩データを説明変数とする重回帰分析でのf検定の結果, 危険率1%, 5%で有意性が認められた。
2. 最重回帰式より土色計の色彩データから最適となる説明変数 a^* , b^* を選定し, F値が重回帰分析と比較し約1.6倍の値を示し, その有効性が確認できた。
3. 非接触データのデジタル画像から主成分分析より B , L^* , a^* , b^* , H を説明変数と選定し, 最重回帰式の分析より色相 a^* が硫化物濃度の推定式に影響を与えていることが分かり, 重回帰分析と共通する結果となった。

以上のように本研究では、土色計とデジタル画像の色彩データより硫化物濃度の推定の可能性を示すことができた。しかし、分散分析によりf検定を行い、有意性が見出されたとしてもF値が相当量大きくなければ実際に用いるには有効でない事が知られている。また、デジタルカメラの撮影条件、解析画像ピクセル数、定数等に関する物理的意味が不明のため、データを蓄積し色彩データと硫化物濃度に関しての検討が必要になると考えられる。今後は、底泥表層の表色系について、年間を通した調査研究を実施する予定である。

謝辞：本研究に対して、生物多様性のある八代海沿岸海域環境の俯瞰型再生研究プロジェクト（代表：滝川清）、奨励研究（代表：矢北孝一、課題番号23920012）の援助を受けた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 山根靖弘, 川畑利明：底質中の硫化物の定量法, 衛生化学 22 (5), pp.312-315, 1976.
- 2) 満下淳二, 吉沢一吉, 遠藤司, 武内俊昭：岩石の色彩測定と風化区分および物性値評価への応用, 応用地質年報 No.16, pp.27-51, 1994.
- 3) 井上直人, 北田奈緒子, 楠本成寿, 北村恵二, 三村衛：ボーリングコア試料における土色・層相・粒度の関係の検討, 第 41 回地盤工学研究発表会, pp.83-84, 2006.
- 4) 井上直人, 楠本成寿, 北田奈緒子, 北村恵二, 三村衛：MSCL 画像によるボーリングコアの色彩と層相との関係, 地盤研究財団論文報告集第 19 集, pp.5-8, 2007.
- 5) 関口道, 瀧典明：宮城県農耕地土壌における土色と土壌腐植含有量の関係, 東北農業研究 56, pp.53-54, 2003.
- 6) 佐々木俊法, 須貝俊彦, 大上隆史, 柳田誠, 安江健一：色相計測による閉塞盆地埋積物中の有機炭素含有率推定の試み, 地学雑誌 119 (3), pp.562-567, 2010.
- 7) 高木幹雄, 下田陽久監修：新編画像解析ハンドブック, pp.526-579, 東京大学出版会, 2004.
- 8) 小林光夫：日本色彩学会誌 VOL26.No.2, pp.73-83, 2002.
- 9) 河口至商：多変量解析入門 I, pp.3-51, 森下出版, 1994.
- 10) 浦野祐嗣, 小峰秀雄, 安原一哉, 村上哲：建築材料用石材におけるデジタルカメラを用いた色彩測定法と色彩色差計による測定方法との評価精度比較, 第 40 回地盤工学研究発表会, pp.553-554, 2005.

RESEARCH ON PRESUMPTION OF THE SULFIDE CONCENTRATION OF THE WATERS BOTTOM MUD SURFACE BY A BOTTOM MUD COLOR SYSTEM

Kouichi YAKITA, Kiyoshi TAKIKAWA, Kazumi AKIMOTO, Tatsuya MASUDA
Kentaro MORIMOTO, Keisuke MORI and Hideyuki SHIMASAKI

For the sample collected in the Yashiro bay, the color data of color systems, such as Mansel of soil color reader and a digital camera picture, $L^*a^*b^*$, and HSV, was used for the sulfide concentration on the bottom mud surface of submarine about the presumed technique simple and efficiently, and fundamental examination was performed. As a result, significance was accepted by the multiple linear regression analysis and the best regression which make an explaining variable the color data obtained by soil color reader. By the technique of not needing proofreading by non-contact, principal component analysis of the color data of a digital camera picture was conducted, and B , L^* , a^* , b^* , and H were selected as an explaining variable. From the best regression which made these the explaining variable, the significance of the estimate equation was accepted and also showed the possibility of the estimate equation from a digital image. Moreover, it turned out that the influence which a^* has on the estimate equation of sulfide concentration is great, and resulted in it being common in the explaining variable of soil color reader. However, if F value is not large even if analysis of variance performs f official approval and significance is found out, it is not effective in actually using.