

土砂動態の高頻度モニタリングのための着色砂分析システムの開発

Development of Colored sand Analysis System for High Frequency Monitoring of Sediment Movement

齋藤晴久¹・坂本 繁²・鈴木 誠³・尼崎貴大⁴・加藤 茂⁵
青木伸一⁶・上山 聡⁷・佐藤慎司⁸

Haruhisa SAITOH, Shigeru SAKAMOTO, Makoto SUZUKI, Takahiro AMASAKI, Shigeru KATO
Shin-ichi AOKI, Satoshi UYAMA and Shinji SATO

The prototype of colored sand analysis system, which uses high-speed and high-precision colored sand measurement and is based on a high-speed image analysis, was developed for sediment dynamics monitoring. Its reliability and usefulness were verified by introducing to the developed system, a new method of density measurement of colored sand by color discrimination method. By using this system, it has become possible to observe sediment dynamics on a high-frequency, short-term basis. As the investigation of coastal erosion and other phenomena progresses rapidly, it has been confirmed that the system provides practical techniques for sediment flux management.

1. はじめに

流砂系における総合的な土砂管理の実現には、陸域を含めた広域での土砂動態を高頻度にモニタリングし、土砂の移動方向や移動経路、土砂起源を解明する必要がある。そのための現地での土砂移動計測には、着色砂や蛍光砂を用いた土砂粒子の追跡手法が用いられることが多い。しかしこの方法では、現地で採取した土砂サンプルの粒子判別の分析に膨大な労力（手作業、肉眼判定）とコストを要するため、土砂移動追跡を広範囲かつ高頻度で実施することは極めて困難である。また、サンプリングの数/量が制限されるため、着色砂濃度としての定量的な議論がしにくい点が問題点として挙げられる。そこで本研究では、広範囲かつ高頻度での土砂サンプルの粒子判別分析を可能とし、土砂追跡（土砂動態）計測による効果的な動的土砂管理を実現することを目的として、高速画像解析の技術を利用した着色砂分析システムの開発を行った。

2. システムの構成

着色砂分析システムは用途に合わせて二つのタイプを開発した。大量の土砂サンプル（1L～3L）を対象にする1型と、中少量の土砂サンプル（50ml～200ml）を対象にする2型がある。1型は大量の土砂を扱うためにベルトコンベア方式を、2型は中少量の土砂を扱うためにターンテーブル方式を採用した。図-1に、2型のブロック図を示す。本システムの構成は本体部、撮像部、計測部から成る。

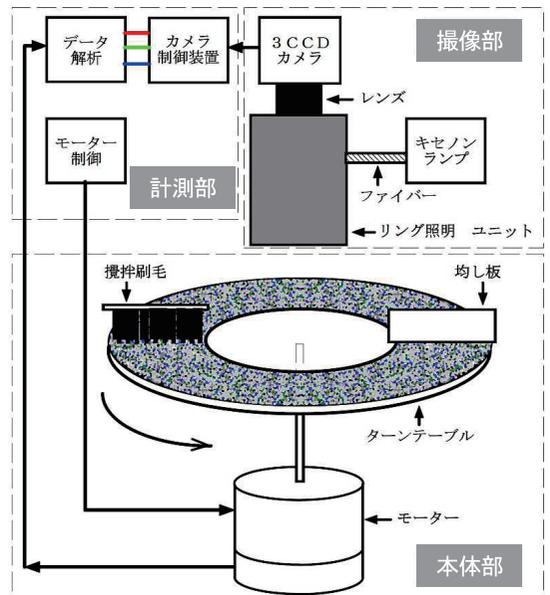


図-1 着色砂分析システム（2型）のブロック図

- | | |
|-----------|----------------------------|
| 1 | 浜松ホトニクス(株)システム事業部 |
| 2 | 浜松ホトニクス(株)システム事業部 |
| 3 | 浜松ホトニクス(株)電子管事業部 |
| 4 | 豊橋技術科学大学大学院工学研究科建設工学専攻 |
| 5 正会員 工博 | 豊橋技術科学大学准教授 工学部建築・都市システム学系 |
| 6 正会員 工博 | 豊橋技術科学大学教授 工学部建築・都市システム学系 |
| 7 学生会員 | 東京大学大学院工学系研究科社会基盤学専攻 |
| 8 フェロー 工博 | 東京大学教授 大学院工学系研究科社会基盤学専攻 |

(1) 本体部

本体部では、砂を載せたターンテーブルがモーターによって回転する。その速度は3CCDカメラの視野中心位置で16cm/sとした。ターンテーブルの上方には攪拌刷毛と均し板を配置し、これらにより土砂に埋もれている着色砂が表面に現われるようにする攪拌と、撮影面を平坦にするための均しが連続的に行われる。土砂の標準的な厚みは2mmである。

(2) 撮像部

撮像部では、3CCDカメラの視野を4cm（回転方向）×3cmとし、回転方向で視野が重複しないように、4画像/秒（16cm/s）の時間間隔で連続撮影を行う。光源は白色の高出力キセノンランプでありバンドルファイバーを介してリング照明ユニットで照明することにより、均一無影照明とした。

(3) 計測部

計測部はパーソナルコンピュータから成り、撮像部の3CCDカメラの制御と、撮像された画像の録画、および着色砂計測ソフトウェアを用いて着色砂の濃度の演算を行う。

3. 計測原理

(1) 着色砂の検出手法の検討

土砂追跡計測に使われている着色砂の拡散反射スペクトルを計測した。使用した着色砂は株式会社山一サンド工業所製のものである。その結果を図-2に示す。このスペクトルグラフは、横軸が波長（nm）、縦軸は観測対象の中田島砂丘（静岡県浜松市）の砂の拡散反射スペクトルを基準にした相対強度値である。

各着色砂のスペクトルは図-2に示すとおり異なる。この結果から、ある波長を境にした二値化弁別法は、単一の着色砂の検出においては有効であるが、例えば青着色砂と緑着色砂が混在する場合などではスペクトルの波長帯域が重複するため弁別が困難となることが分かった。さらに、単一の着色砂の場合であっても、色合いの似た天然砂が多い地域にあっては、目的の着色砂だけを高精度に弁別する事は困難であることが分かった。

人間が天然砂の中から、一粒の着色砂を識別できるの

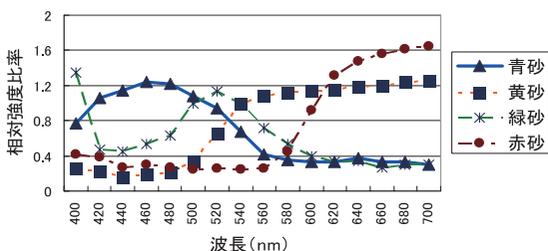


図-2 各着色砂のスペクトル

は、目によって、その色合い（色相や彩度）、つや、形状（質感）などを総合的に判別しているからである。機械化により着色砂を識別するには種々の方法が考えられるが、本研究では、色合いに着目し、スペクトル弁別をさらに高度化することにより着色砂を判別する手法を採用した。この手法は、色をxy座標で表す色度図を利用した色度弁別法である。

(2) 色度弁別の原理

図-3に色度弁別の概念を示す。図-3の右図はすべての色を表現した色度図である。色度図は、外周が純色（単一スペクトル）に相当し彩度が最も高く、また中央が白色に相当し彩度は最も低い。また図中、白線で囲った三角形の範囲内が、一般的なカラーカメラで表現できる色度範囲となる。カメラは色度図の全範囲を網羅できないが、着色砂の色度領域はカバーするので問題とならない。またカメラによる計測は、常に一定条件のもとで計測を行うことにより着色砂の定量的な計測が可能であり、さらに長時間の連続計測も可能である。本分析システムで使用する3CCDカメラには、色の三原色（赤、緑、青）を忠実に再現する三板式のカラーCCDカメラを採用した。解像度は62.5μm/pixelである。

図-3の左図に黒布の上に青、黄、緑と赤の各着色砂を置いた画像の例を示す。着色砂の色度図上での座標値は、3CCDカメラのRGB出力シグナルの成分比率より計算される。その結果を色度図にプロットした。なお石英などの正反射に起因する白色雑音の領域（中央付近の領域）は、予め除外することにより着色砂検出の効率化を図っている。

この色度図によれば、各着色砂の存在領域は互いに独立して交わるところが少ない。したがって色度図上に判別のための領域を指定しておけば、この領域に含まれるか否かにより目的の着色砂であるかどうか判別できる。これが色度図法の検出原理である。

なおこの領域の指定は、実際に使う着色砂自体を用いてこれを3CCDカメラで撮影し、着色砂の分布領域を自動認識させる手法を採用し、計測の利便性・正確性の向上を図っている。

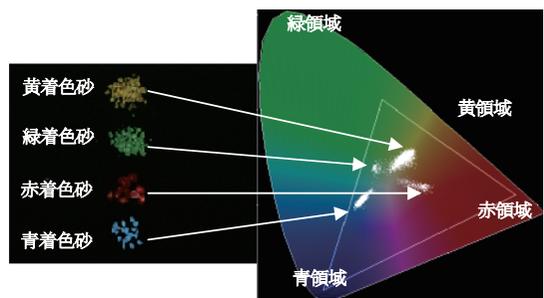


図-3 色度弁別の概念

(3) 検出密度の定義

色度弁別法により検出した着色砂の画像は、二値化処理、縮退・伸長などの画像処理を経て、一画面毎に検出した着色砂の数を計数する。この処理を、攪拌と均しを行いながら高速で繰り返し行う。安定した平均検出密度を得るためには、1型は1~3Lのたくさんの土砂量を攪拌するので1,000回程度、2型では200mLと少量なので100回程度の画面を積算してゆく。この土砂サンプルの表面画像 (frame) あたりの平均検出個数を求め、その平均検出個数を検出密度と定義した。単位はcpf (counts per frame) である。

このcpf値は、着色砂の1画面あたりの出現確率であり、従来用いられてきた“個”または“ppm”などとは異なる新しい尺度である。したがって、後述するように、このcpf値を着色砂の濃度と関連づけておく必要があるが、一旦濃度との対応関係が得られれば、多くのサンプルを自動で解析できる本システムのメリットを生かし、高精度の濃度評価が可能となる。これにより、単に砂移動の経路追跡法だけではなく、漂砂の量的な評価法として着色砂調査に用いることができる。

4. システムの計測手順

試作した着色砂分析システム(1型, 2型)を図-4に示す。

(1) 計測手順

天然砂の中に青着色砂が混入している場合を例として計測手順を述べる (2型の場合)。採取したサンプルはあらかじめ乾燥させておく。着色砂が含まれる200mlの土砂サンプルを漏斗口からターンテーブル上に投入し、テーブルを回転させる。攪拌と均しを繰り返しながら、表面を3CCDカメラで撮影する。撮影画像はパーソナルコンピュータに取り込まれ、着色砂計測ソフトウェアにより色度図上に表示される。青着色砂の検出例を図-5に示す。この色度図上にあらかじめ設定しておいた判別領域 (ROI) により青着色砂であるか否かが判定される。

(2) 録画画像による再計測

撮影画像は録画機能により bmp 形式で保存することが出来る。この機能は土砂サンプルを廃棄した場合でも、画像としてサンプルを再現できる。すなわち分析自体が



図-4 着色砂分析システム (1型, 2型)

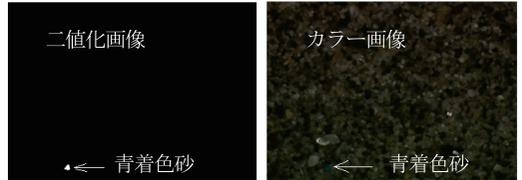
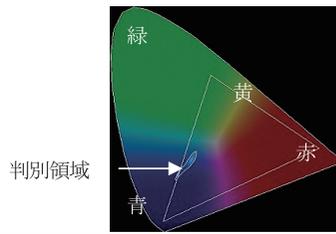


図-5 青着色砂一粒の検出状態
上：色度図上の青着色砂の判別領域の設定
(図中の曲線で囲まれた部分が判別領域である)
左：二値化画像 右：カラー画像

再現できるほか、変数を変えての再分析も可能であり、さらに粒子が検出された画像のみをピックアップする機能を付加したので、検出した粒子が真に検出対象の着色砂であるのか否かの追跡確認も出来る。

5. システムの性能

(1) 重量濃度と検出密度の関係

観測対象領域を中田島砂丘汀線付近とし、現地の天然砂および着色砂においてその重量濃度と検出密度の関係を検証した。

中田島砂丘汀線部から採取した土砂から異物を取り除き、この採取サンプルの90%以上を占める粒子径0.3mmから0.5mmに分級した。高比重は1.5である。この天然砂モデルに4種 (青, 黄, 赤, 緑) の着色砂を混合し、色毎にそれぞれ重量比100ppm, 500ppm, 1,000ppm, 5,000ppmと10,000ppmのリファレンスサンプルを作製した。色毎のそれぞれのリファレンスサンプルは、4. (1) の計測手順に従い、各着色砂の色度座標の範囲 (ROI) を自動設定し、その検出密度を計測した。

図-6に重量濃度と検出密度特性の関係を示す。青, 黄,

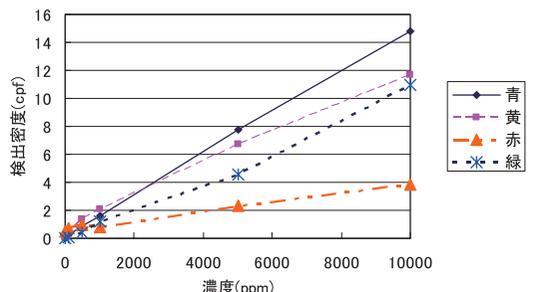


図-6 重量濃度と検出密度特性

緑は平均粒子径が0.5mm, 赤着色砂は1.0mmであるため, 特性の傾きは異なるが, 検出密度特性は線形であることが確かめられた。

(2) 目視計数値 (従来法) と検出密度の相関

次に従来法の目視計数と, 本システムによる検出密度との相関を測った。重量比70ppm, 500ppm, 1,000ppm, 5,000ppmと10,000ppmのリファレンスサンプルを作製し, 検出密度を計測した。一方, 同一サンプルの青着色砂100mlを, 外部機関に依頼して従来法の手作業と肉眼判定による個数計数を行った。図-7に, 個数と検出密度との相関特性を示す。相関値は0.947と高く, これにより検出密度の妥当性が検証された。

(3) 検出限界について

本方式は, 着色砂の個数を数えるのではなく, 一定の面積の表面上に着色砂が現れる確率を画面撮影により計測する方式であるため, 適用できる限界がある。

a) 検出下限

中田島砂丘をはじめとする遠州灘の砂は, 基本的に無彩色 (黒, 白) の砂粒子が主体であるが, 多くの地層帯を通過する天竜川水系の流砂を元に構成されるため, 様々な有彩色 (赤, 黄など) 粒子も含まれている。この有彩色粒子や, ゴミや貝殻片などの異物がノイズ源となる。

ノイズの大きさは, 検出すべき着色砂の色度分布範囲と天然砂の色合いによって異なる。ノイズ値の計測は, 各着色砂に対し自動でROIを設定したのち, 着色砂未混入の天然砂を計測することにより行った。表-1に中田島砂丘のノイズ値を示す。

表-1に示すとおり, 中田島砂丘の砂は, 天然砂の検出ノイズが, 黄着色砂と赤着色砂で0でない事が分かった。検出下限は, このノイズにより決定される。シグナル対ノイズ比率では, 一般的にノイズの3倍から5倍のシグナル値が検出下限とされる。仮にノイズの3倍を検出下限と考えるならば, 黄着色砂では0.24cpfが検出下限と考えられる。図-8の濃度相関図から, 重量比濃度換算で5ppmが検出下限値となる。よって, 中田島砂丘における

表-1 中田島砂丘の砂の各色検出ノイズ

着色砂	青	黄	赤	緑
検出密度 (cpf)	0	0.08	0.03	0

投入実験では, ノイズが少ない青, あるいは緑着色砂を使う事が望ましい。

b) 検出上限

検出上限は, 着色砂同士が十分に分離せず, 重なった複数の着色砂が連結されて1個と誤計数してしまうことにより発生する。中田島砂丘の砂に青着色砂を20,000ppmまでの異なる濃度に混合したリファレンスサンプルを用いて計測実験を行った。その結果を図-9に示す。この結果から, 15,000ppm付近から線形性が失われてくるのが分かった。したがってこの例では, 15,000ppmが上限と考えられる。

(4) 色度弁別法の照明環境変化に対する安定性

色度弁別法は照明光の変化による影響を受けにくい特徴がある。そこで本システムの照明光量変動時の検出密度の安定性について検討した。天然砂の上に10粒の青着色砂を置き, キセノンランプの光量を変化させ検出密度の変化を計測した。図-10に青着色砂の場合の例を示す。この結果から光量が40% (60%減) まで変化しても正しい計測が行われることが確認された。また光沢の影響で検出が比較的難しい赤着色砂 (株式会社山一サンド工業

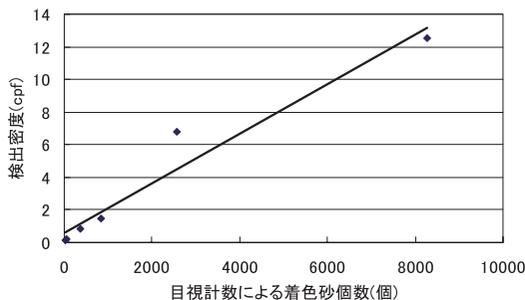


図-7 目視計数と検出密度の相関特性

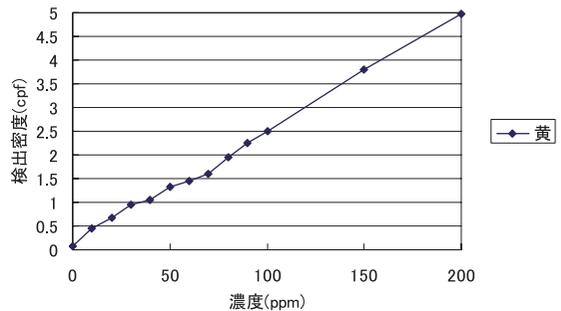


図-8 中田島砂丘の砂を用いた黄着色砂の濃度相関

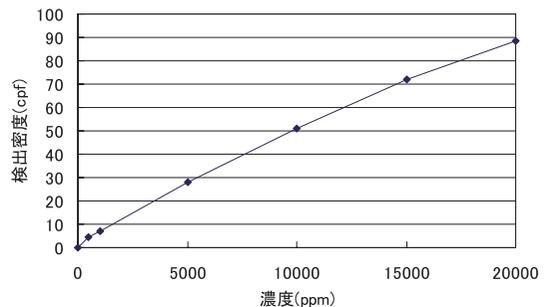


図-9 高濃度相関実験特性

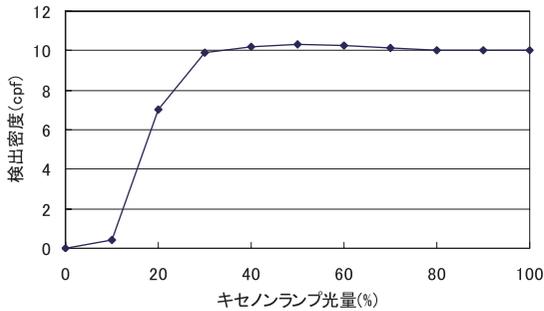


図-10 照明光量変動時の検出密度の安定性

所製)の場合でも、20%の光量変化に対して安定に検出できることが分かった。これにより本システムは、照明環境の変化による影響を受けにくいことが確認された。

6. システムの仕様

表-2にシステムの仕様と従来手法との比較を示す。本システムが特長とする点は、総計測時間、記録性と再現性および省力化であり、採取サンプルの着色砂濃度を短時間(約2日)に計測でき、かつ画像ファイルとして履歴が残せる点である。

7. 運用の一例

著者らは2008年9月から3ヶ月にわたり、馬込川河口部(静岡県浜松市)で着色砂投入調査を行い、採取した着色砂の分析に本着色砂分析システムを使用した。同調査では、トレーサーとして青色と黄色の2色の着色砂を

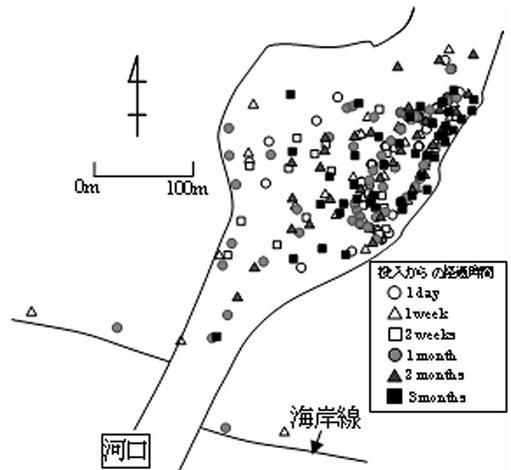


図-11 馬込川河口での着色砂サンプリング箇所

用い、定期的なサンプリング追跡を行った。なお、調査の詳細については上山ら(2009)を参考にされたい。

図-11は、この実験でサンプリングを行った約300箇所を示している。採取したサンプルは、本着色砂分析システムの使用により、延べ3日程度の分析作業で結果を得ることができた。また、サンプリングと並行して分析を行うことで、分析結果を次回のサンプリング計画に生かせる点も、利点の一つであると考えられる。このように、広範囲かつ長期間にわたる着色砂追跡実験を行う場合、本研究の着色砂分析システムは大変有効であることが確認された。

8. おわりに

着色砂分析システムの開発によってダイナミックな土砂管理の実現のため、計測の高速化およびサイクルタイムの短縮化が可能となった。これにより気象イベントなどに即座に対応、また時々刻々の変化を追跡できる手段の一つになった。この着色砂分析システムが、河川や海岸侵食メカニズムを解明するにあたり、従来の手作業と肉眼判定法に代わる検出法として活用される事を期待したい。

なお、本研究は、文部科学省の科学技術振興調整費の重点課題解決型研究等の推進「先端技術を用いた動的土砂管理と沿岸防災」(通称、遠州灘プロジェクト)の中の、「光技術を用いた計測技術の開発」の成果である。

参考文献

上山 聡・牛 小静・和田麻美・劉 海江・高川智博・田島芳満・佐藤慎司(2009): 波浪の進入が卓越する河口エスチャリーにおける波・流れ場と土砂移動, 海岸工学論文集, 第56巻, pp.456-460.

表-2 着色砂分析システム 仕様と従来法との比較

	着色砂分析システム	従来法(目視による計数)
トレーサー砂	着色砂, 蛍光砂	着色砂, 蛍光砂
計測砂量	1~3L(1型) 200ml(2型)	200ml程度 (採取砂量のうち)
計測時間 (1サンプル)	約20分(1型) 約12分(2型)	20分~40分 (上記計測砂量に対して)
総計測時間 (100サンプル)	約2日	約1ヶ月
装置寸法(m)	W3xH2.2xD1.5(1型) W0.6xH1.6xD0.5(2型)	—
撮影カメラ	汎用市販カラーカメラ	—
検出方法	高速高精度画像計測法	目視計数
検出値	検出密度	個数 (重量比濃度ppm換算)
検出可能な濃度範囲	検出密度0.25cpf~ 重量比5ppm~(黄色)	目視のため不確定
記録性	画像として記録	不可(砂を直接保存)
再現性	再計測可能 (記録画像を再生)	不可 (保存砂を目視再計測)