

濁水監視システムの開発

東京電力㈱ 坂間 茂 中村 修

アジア航測㈱ 齊藤和也 水谷信之 ○沼田洋一

1. はじめに

土木工事の排水及び港湾工事等によって発生する濁水は、漁業関係者をはじめとした地域住民に影響を及ぼさないように環境基準が設定され、これを順守することになっている。

そのような濁水をはじめとした水質変動を監視するための方法として、従来より現地での水質測定器による直接測定や採水による室内測定が広く普及している。一方、人工衛星や航空機を使用したりリモートセンシング（遠隔探査）による水質測定は、赤潮、油汚染の調査等広域の調査に利用されている。

しかしながら、これらの従来からの方法には以下の問題点がある。まず、直接測定や室内測定による測定方法では連続観測が可能となるが測定位置における点情報しか得ることができず、水質変動の水平分布を把握しようとする場合には多くの測定点を同時に測定するための労力が必要となる。また、リモートセンシングによる間接測定は、広域の水質変動の水平分布を同時に測定できる反面、気象、運用条件等により撮影日、撮影時間が制限され連続した監視ができず、また解析システムの設置場所も限られる場合が多いため、現地でリアルタイムに処理を行うことができない。

本報告は、これらの従来からの方法の欠点を補い平面的に、迅速かつ連続的な監視を可能とする可視域カラービデオカメラを用いた濁水監視システムを構築し、発電所専用港湾において濁りの監視に試験適用した内容について述べたものである。

なお、本システムは、試験適用箇所の環境基準（50ppm以下）に基づき、工事实施上の自主管理範囲として10～40ppm程度の濁りを判定できることを目的としており、この範囲において±5ppmの精度を確保することを目指している。

2. システムの概要

本システムの実用化に必要な基本的な処理機能は、

①ビデオカメラからのアナログ信号を入力し、A/D変換を行う（データ入力部）。

②A/D変換後の画像データ中の濁水を定量化するための画像処理を行う。

その結果の画像データをD/A変換し、モニタ上に表示する（画像解析処理部）。

以上の2系統が必要になり、図-1に示すような構成となっている。

なお、本システムを構成するハードウェアは市販のものを利用した。

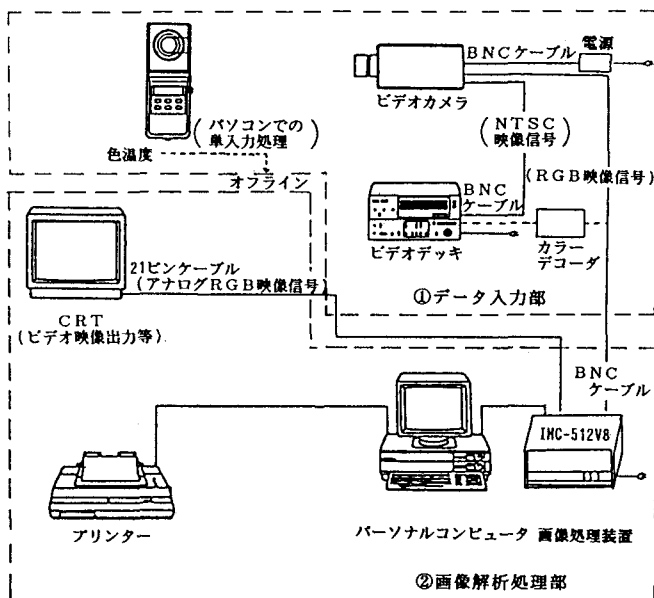


図-1 システムの構成図

3. 解析アルゴリズムの検討

野外で撮影されたビデオ画像データから濁りを定量的に把握するためには、画像データに影響を及ぼすと考えられる種々の外的要因を除去する必要があるため、以下に示す解析アルゴリズムの検討を行った。

(1) A/D変換

ビデオカメラは、レンズを通して色（R，G，Bの三原色）の情報を捕らえているが、出力する信号はアナログデータである。このままではコンピューターによる画像処理ができないため、ビデオ画像データをA/D変換装置により各色ごとに0～255の段階のデジタル値（ここではCCT値と言う）へ変換した。

(2) シェーディング補正

一般に、レンズを使用して撮影を行う場合、レンズの特性により画面の周辺部が中心部より暗くなるという現象が生じる。また、ビデオカメラの持つ信号処理系の出力ムラなどにより出力信号が不均一になる現象がある。これらの現象をシェーディング（周辺減光）現象と呼ぶ。

シェーディング現象があると同じ色（濃度）を撮影しても、画面の位置によって出力信号の出力値（CCT値）が異なってしまう、濁りの定量化を正しく行えない。そこで、使用するレンズと信号処理系の持つ固有のシェーディング現象の影響を除くため補正を行う必要がある。

本システムでは、周辺減光の影響の少ない画像中心付近のCCT（st）値を基準値とし、各画素ごとにCCT（i）値との比

$$\text{CCT (st)} / \text{CCT (i)}$$

を補正係数として算出した。

(3) 表面反射除去補正

本システムでは、港湾工事現場を陸地から監視することを目的としているため、原則としてビデオ撮影を垂直方向からでなく、斜め方向から行う。そのために、ビデオカメラに入射する対象面からの光の角度に依存した表面反射光の影響を受けてしまい、均一な濁度の水面を撮影しても様な画像が得られない。そこで、様々な波、天空光の条件の下で入射光に占める表面反射光の割合を実験的に求め、各画素ごとに表面反射光を除去する補正方法を開発した。

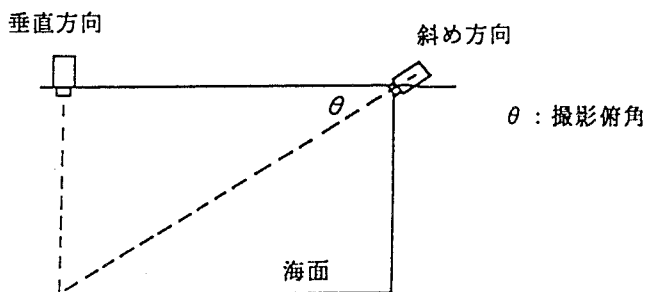


図-2 斜め方向と垂直方向のビデオカメラによる同期撮影

その方法は、実験により俯角（ θ ）別の斜め方向のビデオデータとそれと同期した垂直方向からのビデオデータとの出力値の比を補正係数として算出するものである（図-2参照）。

なお、補正係数は、雲量、太陽高度、方位、海表面の状態等により異なるが、実用上、係数を使い分けるのは煩雑である。そこで全データをまとめて回帰分析を行い、雲や海表面の状態に無関係に使用できる平均的な補正係数を求めた。その結果を図-3に示す。また、算出したRGBそれぞれの回帰式は下式の通りである。

$$R : K = 1.01 - \exp(-0.046 \times \theta - 0.60)$$

$$G : K = 1.01 - \exp(-0.045 \times \theta - 0.50)$$

$$B : K = 1.00 - \exp(-0.070 \times \theta - 0.05)$$

(θ : 度)

実際の解析では、実験により求めた補正係数と撮影俯角との関係式に、撮影時の各画素毎の撮影俯角をあてはめ補正係数を算出して補正を行った。

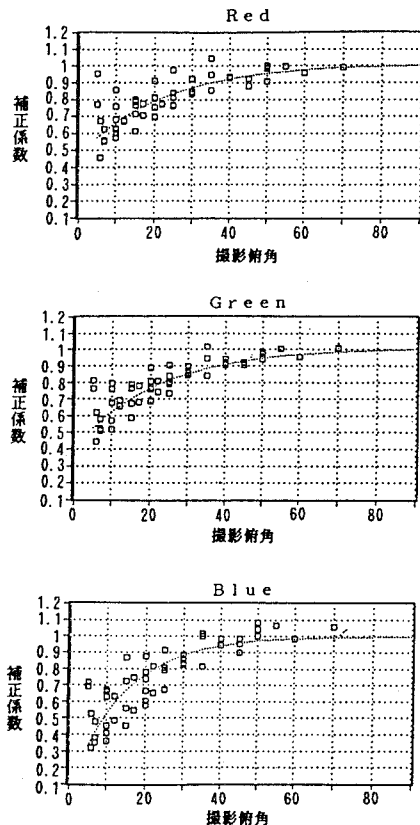


図-3 表面反射除去補正係数

(4) RGB バランス補正

本システムの入力部であるビデオカメラは色の情報をR（赤）、G（緑）、B（青）の三原色の成分の出力によって表現している。ビデオカメラがあらゆる色温度（光源の色のバランスを表わす指標）下で正しく色を表現するには、白い紙を白い映像として撮影できるようにホワイトバランスと呼ばれるRGBの出力のバランスを調整する機能が必要となる。

現在のビデオカメラはこの補正を白い紙を映さずに自動で行うために、撮影時の画面の中から一番輝度の高いものを白と仮定し、人間の目の波長帯に最も近いGを基準として、RBの出力のゲインを調整しR-G、B-Gの出力差が等価になるように調整を行っているものが多い。この方法だと色温度の異なる条件下でもモニタ上では被写体の色があたかも同じような色として再現することができる。しかし、この方法では野外で濁りを撮影した場合、撮影する度にホワイトバランスの白の基準が変動してしまい、濁りの色を常に一定基準によって測定することができず、定量化に支障をきたしてしまう。

逆に、RBの出力のゲインを一定にして野外で撮影を行うと、今度は色温度が変化するたびにRGBの関係のバランスがくずれてしまい正しい色の計測を行うことはできなくなる。

そこでビデオカメラ側のホワイトバランスの影響を排除するためカメラのホワイトバランス、色温度とG信号、RB信号の出力比の関係を実験的に求め、その関係式を用いて補正する方法を考案した。これにより撮影時の色温度を関係式に入力することで、入力画像をホワイトバランス固定時の色温度下の画像と等価にすることを可能とした。

(5) バンド間演算と定量化モデル

本システムは、濁りを定量的に把握することを目的としている。このため、ビデオ画像と濁度との関係を示す定量化モデルをシステムに組み入れる必要がある。そこで、今回は、一般にリモートセンシングの手法として用いられている相関分析による方法で定量化モデルを構築した。そこで、具体的なデータを得るために、任意に濁りを発生させビデオ撮影を行うと共に濁度計による測定を行った（濁度抽出実験）。その結果をもとに相関分析を行った。

方法としては、前処理（シェーディング補正、表面反射除去補正、RGBバランス補正）済のビデオ画像と濁度データを用いて、相関が高くかつ濁りの分布パターンを的確に表現できるバンド間演算との組み合わせの選定を行い、定量化モデル式を作成することとした。

なお、定量化モデルは工事現場で利用する土の色（成分）や海水の色によって異なるので、工事現場毎に濃度抽出実験を行い、求める必要がある。

4. プログラム構成

本システムの動作環境は、MS-DOS Ver 3.1以上のOSを必要とし、作成言語としてはLattice C Ver 3.2およびマクロアセンブラを利用した。

また、本システムのプログラムは開発したアルゴリズムに基づき、大きく分けて以下の2種類から構成される。

① 設定プログラム

設定プログラムでは、前項で述べた各補正に必要な設定値を入力する。その入力した設定値をもとにシェーディング補正係数と表面反射除去補正係数を掛け合わせた仮補正係数画面を作成する。

② 画像処理プログラム

画像処理プログラムでは、先の仮補正係数画面にその都度測定された色温度を入力し算出されたRGBバランス補正係数を掛け合わせて全補正を行う。次にバンド間演算および定量化モデル式による濁度変換を行う。

プログラムのフローチャートを図-4に示す。

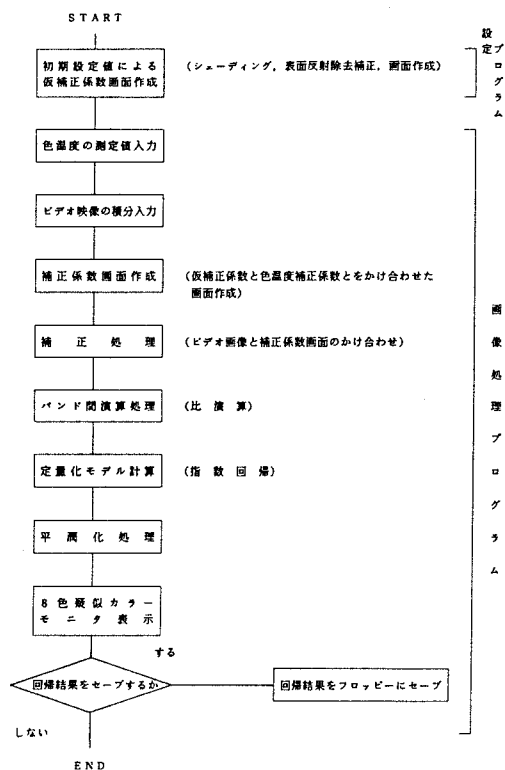


図-4 フローチャート

4. 1 設定プログラムの実行

初期設定プログラムが起動されると図-5に示す初期設定メニューが表示されるので、必要事項をキーボードにより入力する。設定終了後、ファイルに設定値を保存する。

次に、RGB各バンドのシェーディング補正用の画像の各画素毎に表面反射除去補正を掛け合わせ仮補正係数画面を作成する。

以下のシステム初期設定項目を入力して下さい。

レンズの種類は何ですか？ 標準 望遠 (スペースキーで選択)

焦点距離はいくつですか？ (mm)

カメラの設置高度はいくつですか？ (m)

カメラの設置俯角はいくらですか？ (度)

積分入力回数は何回ですか？ (整数値の入力)

バンド間演算の分子とするチャンネルは何ですか？ R・G・B
(スペースキーで選択)

回帰式の係数aはいくらですか？

回帰式の係数bはいくらですか？

初期設定の入力はこれでよろしいですか？ (Y:はい N:いいえ)

図-5 初期設定メニュー

4. 2 画像処理プログラムの実行

画像処理プログラムを起動し、メニューに従って色温度を入力するとビデオ映像が積分入力され解析が開始される。解析は先に作成した仮補正係数画面にRGBバランス補正を掛け合わせ全補正係数画面を作成し、ビデオ映像と掛け合わせる。その結果に対し、バンド間演算・定量化モデル式による画像の定量化を行う。

これらの全ての処理が終了すると濁度変換画像がパソコンのモニタ上に表示される。図-6にその一例を示す。

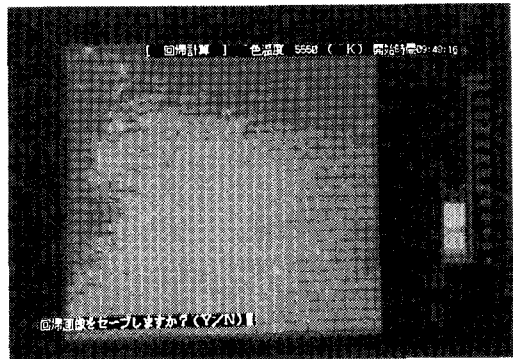


図-6 画像処理出力結果

5. システムの評価

作成した濁水監視システムの評価を行うために、発電所構内の貯水池および専用港湾内で適応実験を行った。まず、専用港湾、貯水池においてビデオ画像と濁度の関係を求めるために濁度抽出実験を行い、それぞれに対して定量化モデルを作成した。ここでは、作成したモデル式の精度と変換画像の濁度分布について評価・検討を行った。以下にその内容を示す。

5. 1 定量化モデル式の評価

港内の海底の土と工事の土を使用して定量化モデルを作成した。定量化モデル式には、撮影時の照度変化を正規化するために比演算を使用し、さらに一般的に濁度との関係を現わすのに利用されている指数関数を用いた。先に述べたように濁りを発生させる懸濁物質の色によって定量化モデルに最適なバンド間演算式が異なるため、本実験における黒褐色の海底土と黄褐色の工事土ではモデル式は異なっている。それぞれのバンド間演算値と濁度の指数回帰結果を図-7に示した。

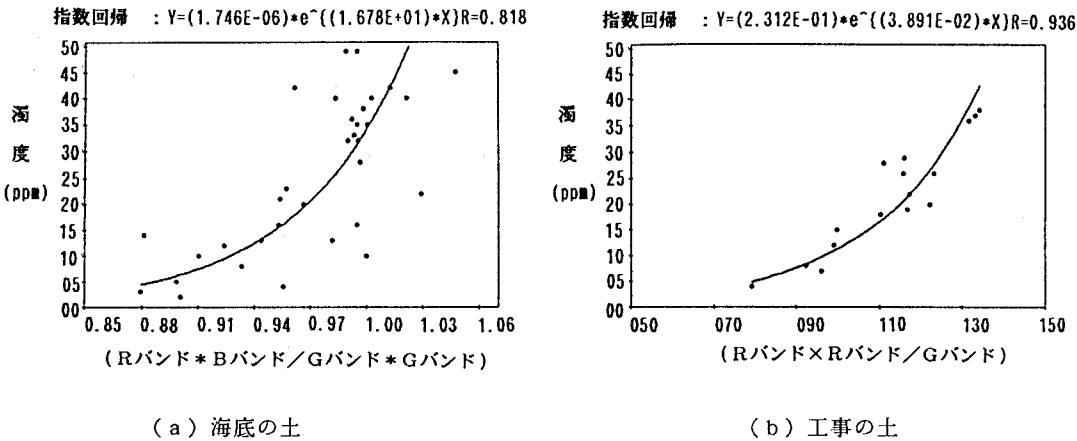


図-7 バンド間演算値と濁度の指数回帰結果

また、図-8に99%信頼区間を示した。モデル式の精度は10~30ppmの濁りに対し±約5ppmであり、所要の精度をほぼ満足しているが、30ppm以上の濁りに対しては、やや精度が落ちる傾向を示している。

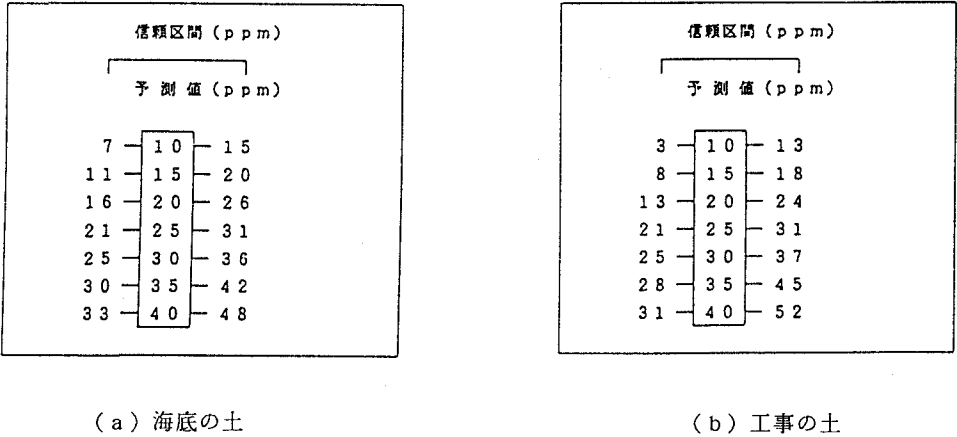


図-8 濁度の計算値の99%信頼区間

5. 2 変換画像の評価

発電所内の煙突にビデオカメラを設置し、港内に発生した濁りの様子を撮影して濁度変換を行った。なお、定量化モデル式には工事土モデルを使用した。写真-1 にビデオ画像と濁度変換画像を示した。

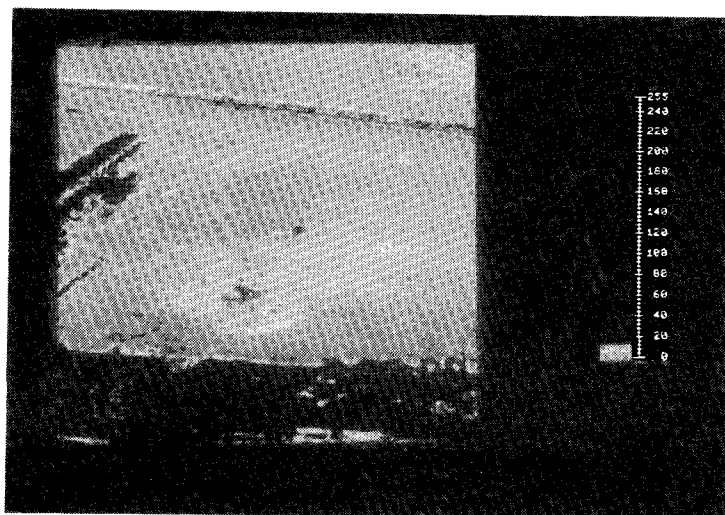
このシーンは撮影俯角が 18° と浅いため、海面に太陽光の鏡面反射像ができているものの、船上で直接測定した値3ppmに対して解析画像から得られた値は4~5ppmであり、比較的妥当な値が求められた。

なお、貯水池での海底土による変換画像は、水と濁水（懸濁物質）の色が共に黒褐色を呈しており、その分布をはっきりとは捉えることはできなかった。

また、濁りの原因となる土が異なる場合、仮にその色が非常に似かよっていても定量化モデル式の互換性はあまり高いことがわかった。



(a) ビデオ画像



(b) 濁度変換画像

写真-1 港内のビデオ画像と濁度変換画像

5. 3 本システムの課題

現地での適応試験の結果から、本システムでは海水と懸濁物質に色の差がないものは抽出するのが困難であるものの、25ppm 前後の濁度に対しては目標には近い精度が得られた。なお、懸濁物質が垂直方向に分布し、表面付近よりも深いところの濁度が高い場合などは、定量化には注意が必要である。

なお、本システムの表面反射除去補正では、海面に写っている地物や太陽光などの鏡面反射の除去までは行えない。また、ビデオ画像中に写っている船や泡、波などは、濁度変換によって極端に高めの値を示す場合があり、それらを本来の濁りと識別する方法を検討する必要がある。

今後本システムの実用化を目指すためには、上記の課題を検討し、さらに濁度変換画像から自動的に異常を検知し”警報”を発するための判定方法を開発する必要がある。

6. おわりに

カラービデオカメラおよびパソコンを用いた低コストの簡易濁度監視システムを開発した。運用条件の制約はあるものの、定量化モデルを作成すれば斜め撮影したビデオ画像から3分程度で濁度変換画像を作成することができた。その精度は当初の開発目標をほぼ満足し、さらに改良改善を加えることにより現地への適用の可能性を示すことができた。

(参考文献)

- | | |
|--------------------|---------------------------|
| 1) 持木一明監修, グループU 著 | : ビデオ技術ハンドブック |
| 2) 日本リモートセンシング研究会 | : 画像の処理と解析 |
| 3) 財団法人AVCC | : ビデオコム 10月号/1988 P24~P47 |
| 4) 杉森康宏・坂本亘 編 | : 海洋環境光学 P80~P106 |
| 5) 本橋昭二 | : CCTUシステム設計の手引 |