

画像による河川の油膜検知に関する基礎的研究

- 最適な油膜検知方法についての検討 -

日大生産工(院) 仲谷 英
日大生産工 内田 暁・大谷 義彦
岩崎電気(株) 山田 哲司

1. はじめに

最近、有害物質が河川に流出する事故が多発している。特に、油の流出事故は河川の水質事故の大多数を占め、事故によって浄水場の取水停止や河川に生息する生態系に重大な影響を及ぼす。したがって、高感度であり 24 時間連続監視が可能なシステムの開発が強く望まれている。

そこで、本研究では河川に流出した油を画像により広範囲にわたって連続検知が可能なシステムの構築を目的としている。

先に著者らは、油膜の光学的特性に着目し、画像より得られた色の分布から油膜を検知する方法¹⁾および画像のフーリエ変換を用いて油膜を検知する方法²⁾を考案した。その結果、干渉縞を形成する場合における油膜の検知が可能であること、また膜厚によって油膜に虹色の干渉縞を形成しない場合における油膜の検知が可能であることを明らかとした。

本報告では、上記の画像処理方法に加え、既存の物体検知方法である背景差分処理³⁾、今回新たに考案した画像の輝度補正を用いた画像処理を行い、各画像処理方法における油膜の検知精度について比較、検討を行ったので報告する。

2. 油膜検知の方法

2.1 油膜の光学的特性

図 1 は、水面上の油膜が干渉縞を形成する原理図を示したものである。

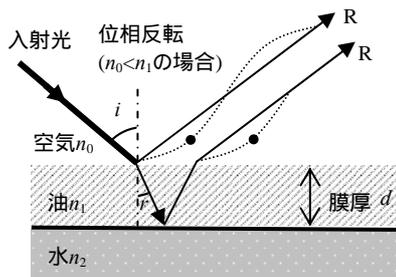


図 1 油膜と干渉

水の屈折率は 1.33 であり、油の屈折率は 1.4 ~ 1.5 である。この油が水面で薄い油膜となった場合、図 1 に示すように、水面上の油膜に入射した光は油膜面で正反射する反射光 R と、屈折し油膜内に入り水面と油膜との境界面で反射する反射光 R' とに分かれる。

このとき、入射する光の波長を λ とすると、反射光 R と R' の光路差 l は、式(1)となる。

$$l = 2n_1 d \cos(r) + \frac{\lambda}{2} \quad (1)$$

この光路差 l が入射する光の波長 λ の整数倍のとき、波長 λ の光が強めあふ。また光路差 l は油膜の屈折率と膜厚によって変化する。よって水面上の油膜に多くの波長成分を持つ入射光が入射した場合、入射光に対して正反射方向で水面を観測すると、水面上に虹色の干渉縞が観測される。

また、水の反射率は油の反射率より低いことから、油膜の存在する河川に光を照射した場合、油膜での反射輝度は、油膜の存在しない水面に比較して高くなる。

2.2 $L^*a^*b^*$ 表色系^{4),5)}

図 2 は $L^*a^*b^*$ 表色系立体図を示したものである。 $L^*a^*b^*$ 表色系では明度 L^* 、色相 h 、彩度 C を示す色度を a^* 、 b^* で表わされる。

$L^*a^*b^*$ 表色系は、優れた等色差性を持つという特長がある。よって、 $L^*a^*b^*$ 表色系は油膜の存在する領域と水面の領域を色の違い、ならびに輝度の差から検出するには非常に適した表色系であると考えられる。

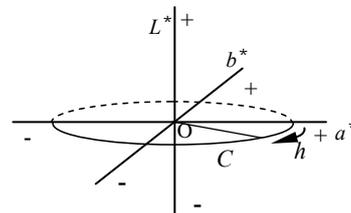


図 2 $L^*a^*b^*$ 表色系

2.3 画像のフーリエ変換⁴⁾

濃淡画像では、濃淡の激しい部分(エッジ部分すなわち高周波成分)と緩やかな部分(低周波成分)とに分けることができる。そこで、画像の濃淡を関数で表すことのできるフーリエ変換を用いることとした。

扱う画像は濃淡データの集まりであるので、画像の濃淡も水平方向、垂直方向の 2 つが存在する。したがって、画像のフーリエ変換では 2 次元フーリエ変換を行う。画像のフーリエ変換を施し、画像の高周波成分を抽出することにより、油膜の検知が可能であると考えられる。

2.4 画像の輝度補正

油膜領域と水面領域の識別を正確に行うためには、水面領域における輝度階調のムラを抑える必要がある。そこで、画像の輝度補正を行う。

画像の輝度補正手順については 2.5.2 に示す。

2.5 画像処理手順

図3に、実際に油膜を撮影した画像の一例を示す。本研究では、画像から、色度、輝度の分布状態を用いて油膜の検知を行う。

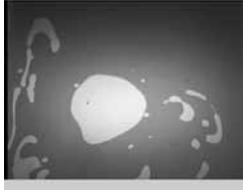


図3 撮影画像の一例

2.5.1 $L^*a^*b^*$ 表色系を用いた画像処理手順¹⁾

以下の手順により、色、明度および輝度の分布状態を定量化し、油膜領域と水面領域の分割を行う。撮影した画像から各画素におけるR(赤)、G(緑)、B(青)の輝度階調値 K_R 、 K_G 、 K_B を求め、XYZ 色度座標を算出する。

得られた XYZ 値を用いて $L^*a^*b^*$ 色度座標を算出する。

撮影画像を微小領域に分割し、干渉縞を評価するための係数 K を微小領域ごとに算出する。

K の値が高い領域は、色度分布が広範囲に存在し、値が低い領域は、色度分布が少ないことを示す。

K を求めた場合と同様、輝度値 L を微小領域ごとに算出する。

係数 K 、および輝度値 L の和を算出する。

で算出された $K+L$ を正規化し、正規化された値の中で最も値の低い領域に存在する色を水面の色とする。

により求められた $L^*a^*b^*$ 色度座標により、水面の色データを削除し画像を生成する。

2.5.2 画像の輝度補正、画像のフーリエ変換を用いた画像処理手順

油膜が存在しない場合の画像(撮影画像)を用いて、画像内の輝度分布を算出する。

輝度分布の正規化を行う。

撮影画像における各画素の輝度階調を、により正規化された値で除す。

で得られた値を、輝度階調の補正データとして記録する。

油膜が存在する場合の画像に、得られた輝度補正データを加え、画像の輝度補正を行い、画像を生成する。

得られた画像に、画像のフーリエ変換を施す。

3. 実験装置

図4は、考案した油膜検知方法を行うための実験装置の概略である。

試作した実験装置は、河川を模擬した水槽、水槽に光を照射するための光源、画像を撮影するための CCD カメラ、画像を記録するビデオレコーダ、画像を 640×512 画素で取り込むための画像処理ボード、画像から油膜検知の画像処理を行うためのパーソナルコンピュータから構成されている。

また、直交座標系 xyz の xy 平面を水槽内の水面、水槽内の水面の中心を原点 O とした。

水槽は、幅 36cm、奥行き 26cm、高さ 15cm である。光源は、 z 軸とのなす角 θ_s 、原点 O からの距離 80cm の位置から光を照射している。

CCD カメラは z 軸とのなす角 θ_c 、原点 O から距離 80cm の位置に設置し、画像を撮影する。また、CCD カメラは、焦点距離 55mm レンズと偏光フィルタをマウントし、縦 512 画素、横 640 画素、R(赤)、G(緑)、B(青)それぞれ 256 階調 16777216 色のカラー画像を記録する。

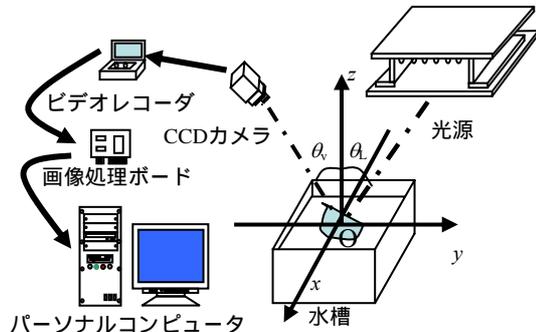
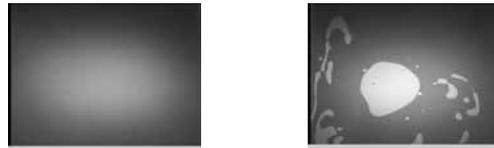


図4 実験装置の概略

4. 結果および検討

4.1 画像処理結果について

図5は、本実験装置の水槽の水面を撮影した画像の一例である。なお、(a)は油膜が存在しない場合、(b)は油膜が存在する(廃油を滴下した)場合である。なお、水槽内の水は河川を模擬するため着色した。



(a) 油膜が存在しない場合 (b) 油膜が存在する場合

図5 撮影画像の比較

(b)より、滴下した油が広がることで油膜が存在しているが、膜厚があり虹色の干渉縞が生じていないことがわかる。また、油膜の輝度は水面の輝度と比較して高いことがわかる。

図6は、図5(a),(b)の画像における $L^*a^*b^*$ 色度座標を算出し、色度座標分布を比較したものである。

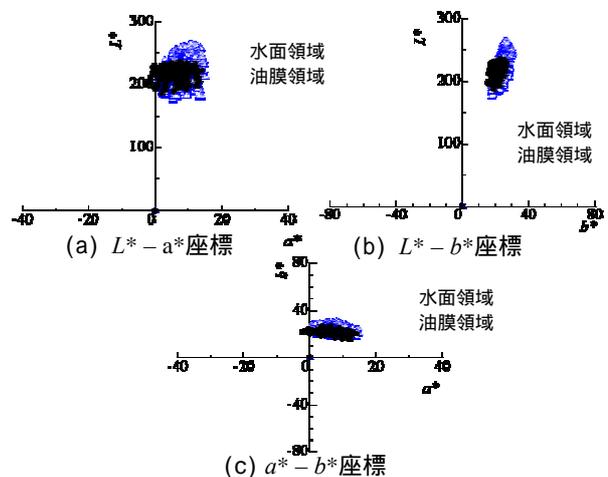


図6 $L^*a^*b^*$ 色度座標分布

なお、(a)は L^*-a^* 座標、(b)は L^*-b^* 座標、(c)は a^*-b^* 座標についてそれぞれ示している。また、図中の は油膜が存在しない場合、 は油膜が存在し、干渉縞が生じている場合について示している。

図から、水面の領域と比較して油膜の領域では、明度 L^* が高くなっていることがわかる。また、(b)より油膜が存在する場合においても油膜の膜厚が厚いため、干渉縞が形成されず色度座標上の狭い範囲に色の分布が集中していることがわかる。

図7は、撮影した画像から $L^*a^*b^*$ 色度座標分布を用いて画像を生成し、適切な閾値により2値化処理を施した結果である。なお、(a)は図5(a)の画像から、(b)は図5(b)の画像からそれぞれ算出した結果である。



(a) 油膜が存在しない場合 (b) 油膜が存在する場合
図7 2値画像の比較

図から、油膜の存在する場合のみ、2値化処理により油膜の存在する領域が抽出されていることがわかる。しかしながら、画像中央付近の水面領域までも抽出されている。

このことから、油膜に膜厚があり、虹色の干渉縞を形成しない場合においては $L^*a^*b^*$ 表色系を用いた方法では油膜の検知が困難であることがわかる。

図8は、図5(b)の撮影された画像に、各画像処理を施した結果である。なお、(a)は図5に画像のフーリエ変換(以下、フーリエ変換)を施した結果、(b)は画像の輝度補正を施し、画像のフーリエ変換(以下、輝度補正フーリエ変換)を行った結果、(c)は背景差分処理を行った結果である。

図から、油膜が存在する領域が抽出されていることがわかる。



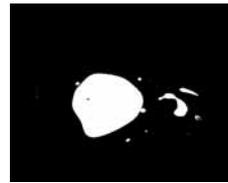
(a) フーリエ変換画像 (b) 輝度補正フーリエ変換画像



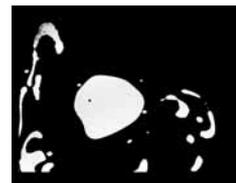
(c) 背景差分処理画像

図8 処理画像の比較

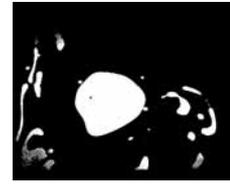
図9は、図8の画像に適切な閾値により2値化処理を行った結果である。なお、(a)は図8(a)の画像から、(b)は図8(b)の画像から、(c)は図8(c)の画像から、それぞれ算出した結果である。



(a) フーリエ変換



(b) 輝度補正フーリエ変換



(c) 背景差分処理

図9 2値画像の比較

図から、各画像において、油膜の領域が抽出されていることがわかる。しかしながら、(a)の画像のフーリエ変換を用いた場合では、画像左部分における油膜領域が検知されていないことがわかる。また、(b)の輝度補正フーリエ変換と(c)の背景差分処理を用いた方法を比較すると、(b)では画像左部の油膜領域が抽出されているのに対して、(c)では抽出されていない箇所が存在することがわかる。このことから画像に輝度補正を施し、画像のフーリエ変換を行う方法が最も検知精度が高いと考えられる。

4.2 油膜検知精度について

各画像処理方法について油膜検知精度を検討するため、4.1によって得られた画像を基に、4種類の特徴量(面積誤差率、画素一致率、真値との誤差率、誤検知率)を算出した。

4.2.1 面積誤差率

面積誤差率は、各画像処理結果によって得られた油膜と判定された領域(A_1)と実際の油膜領域(真値: A_2)を用いて、式(2)によって算出する。

$$r_1 = \frac{|A_1 - A_2|}{A_1} \cdot 100 \quad (2)$$

図10は、輝度に対する面積誤差率の関係を示したものである。

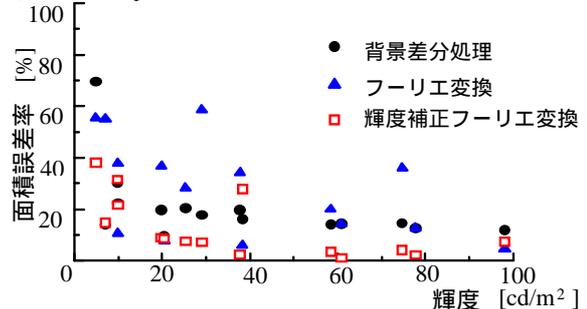


図10 輝度値に対する面積誤差率

なお、図中の は背景差分処理を用いた場合、 はフーリエ変換を施した場合、 は輝度補正フーリエ変換を行った場合についてそれぞれ示している。図から、若干の変動はあるものの、輝度補正フーリエ変換を行った場合が最も良い値を得ていることがわかる。また、輝度が $20[\text{cd}/\text{m}^2]$ 以上の測定環境下では10%以下となり、誤差が減少していることがわ

かる。このことから、油膜検知の条件として20[cd/m²]以上の輝度値を持つ環境下での検知が必要であると考えられる。

4.2.2 画素一致率

画素一致率 r_2 は、各画像処理方法によって算出された領域における実際の油膜領域と一致する領域 (A_3) と真値 (A_2) を用いて、式(3)により算出する。

$$r_2 = \frac{A_3}{A_2} \cdot 100 \quad (3)$$

図 11 は、輝度に対する画素一致率を示したものである。

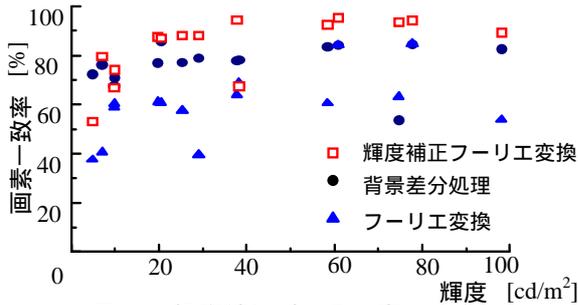


図 11 輝度値に対する画素一致率

なお、図中の、は図 10 と同様である。図から、20[cd/m²]以上の測定環境下では輝度補正フーリエ変換を用いた場合が 80% 以上と、最も画素一致率が高くなっていることがわかる。

4.2.3 真値との誤差率

真値との誤差率 r_3 は、真値 (A_2) に対して、画像処理結果において抽出された真値領域 (A_4) とを用いて式(4)によって算出する。

$$r_3 = \frac{|A_2 - A_4|}{A_4} \cdot 100 \quad (4)$$

図 12 は、輝度に対する真値との誤差率を示したものである。

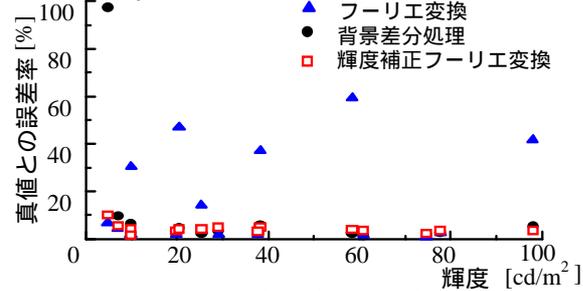


図 12 輝度値に対する面積誤差率

なお、図中の、は図 10、図 11 と同様である。図から、輝度補正フーリエ変換を行った場合は真値との誤差率が 10% 以下となり、最も精度の良い結果となっていることがわかる。

4.2.4 誤検知率

誤検知率は、画像処理結果において、抽出されているが実際には油膜ではない領域 (A_5) と真値 (A_2) を用いて、式(5)によって算出する。

$$r_4 = \frac{A_5}{A_2} \cdot 100 \quad (5)$$

図 13 は、輝度に対する誤検知率について示したものである。

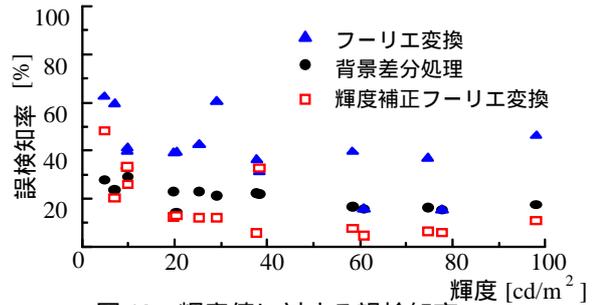


図 13 輝度値に対する誤検知率

なお、図中の、は図 10、図 11、図 12 と同様である。図から、輝度補正フーリエ変換を用いた場合では、20[cd/m²]以上の測定環境下では誤検知率は 15% 以下となり最も優れていることがわかる。

表 1 は、各画像処理方法における油膜検知精度の平均値を示したものである。

表 1 各画像処理に対する油膜検知精度

	背景差分処理	フーリエ変換	輝度補正フーリエ変換
面積誤差率	20.46	27.85	12.42
画素一致率	76.64	59.70	83.34
真値との誤差率	10.19	16.94	4.31
誤検知率	21.36	40.30	16.73

単位：%

表より、各画像処理結果より得られた油膜検知精度を比較すると、面積誤差率、画素一致率、真値との誤差率、誤検知率ともに輝度補正フーリエ変換を用いた場合が最も精度が高いことがわかる。このことから、油膜に膜厚があり、干渉縞が生じない場合においては、輝度補正フーリエ変換を用いることにより、高精度での油膜の検知が可能であると考えられる。

5. おわりに

撮影した画像から油膜を検知する方法として、 $L^*a^*b^*$ 表色系を用いた方法に画像の輝度補正、画像のフーリエ変換を組み合わせることを考案した。また、既存の物体検知方法との比較検討を行った。

その結果、輝度補正フーリエ変換を用いた場合において、最も精度良く油膜の検知が可能であるということがわかった。

今後は、各種検知精度の改善を目標とし、さらには浮遊物等による水面、および油膜ではない領域が存在する場合においても油膜領域の検知が可能であるかについて検討を重ねていく予定である。

参考文献

- (1) 仲谷 他:画像による河川の油膜検知に関する基礎的研究 - $L^*a^*b^*$ 表色系を用いた油膜の干渉縞の検知について -, 第 39 回日本大学生産工学部学術講演会 電気電子部会講演概要, pp.105 ~ 108 (2006)
- (2) 仲谷 他:画像による河川の油膜検知に関する基礎的研究について, 第 25 回電気設備学会全国大会 講演論文集, pp.401 ~ 402(2007)
- (3) 安居院、長尾:画像の処理と認識, 昭晃堂, pp.158 ~ 164 (1994)
- (4) 日本色彩学会編:新編 色彩科学ハンドブック, 東京大学出版会, pp.275 ~ 276(1998)
- (5) 高橋、下田:新編 画像解析ハンドブック, 東京大学出版会, pp.87 ~ 92 , pp.549 ~ 555 (2004)