

河川及び取水口監視のための偏光解析型油膜センサ

讃岐 育孝*、平岡 陸久*、大戸 時喜雄*
中村 祐介**、金井 秀夫**、多田 弘***

* (株)富士電機総合研究所 環境技術研究所 神奈川県横須賀市長坂 2-2-1
** 富士電機インスツルメンツ(株) センサ機器技術部 東京都日野市富士町1番地
*** 富士電機(株) 環境システム事業部 東京都日野市富士町1番地

概要

油流出事故は、水道原水である河川の水質事故の80%近くを占め、浄水場の取水停止や下流の生態系の破壊という重大な被害を引起す。油は拡散し易く、被害が急速に広がるため、拡散した初期の微量な油を早期に発見可能な、高感度の自動計測器が求められている。

そこで、筆者等は偏光解析法という独自の原理により、目視限界を上回る感度(0.05 μm の膜厚感度)を、波や風の影響なく、非接触で簡便に検知できる油膜センサを開発した。

本報では、偏光解析法による油膜センサの測定原理・構成と、測定感度及び波・風の影響の実験結果を報告する。また、適用限界の波の曲率についても考察した。

キーワード

油膜、センサ、偏光解析

1 はじめに

油流出事故による河川水質事故は、水道原水の水質事故の80%近くを占め、浄水場の取水停止や下流の生態系の破壊という重大な被害を引起す。油事故の原因は、工場・事業所等の人的ミスがもっとも多く、次に交通事故、不法投棄と続く。いずれも予測が難しく、また夜間・休日の事故は、発見するまでに時間がかかるため、油事故の監視を24時間連続して行ないたいという要望がある。さらに、油は拡散し易く、被害が急速に広がるため、拡散した初期の微量な油を早期に発見可能な、高感度の自動計測器が求められている。従来の油センサは、非接触光学式の場合、波の影響を受けて安定した測定が難しく、サンプリング式の場合、メンテナンス作業が面倒という問題があった。

そこで、筆者等は、偏光解析法という独自の原理により、目視限界を上回る感度(0.05 μm の膜厚感度)を、波・風の影響なく、非接触で簡便に検知できる油膜センサを開発した。

本報では、偏光解析法による油膜センサの測定原理・構成と、測定感度及び波・風の影響の実験結果を報告する。また、適用限界の波の曲率についても考察した。

2 油膜センサの測定原理と構成

2.1 測定原理

図1に偏光解析型油膜センサの測定原理図を示す。

レーザー光源を油膜の浮遊する波立った水面に斜めから照射する。レーザー光は、P偏光成分(縦振動成分)とS偏光成分(横振動成分)の2つの偏った光(偏光)に分解でき、各々の偏光成分は、水面で独立に反射されると考えることができる。受光部は、干渉フィルタを備えレーザー以外の光の侵入を防ぎ、コリメータにより一定角度の光だけを通す。コリメータを通過した反射光のP偏光成分とS偏光成分を偏光ビームスプリッタで分離し、フォトダイオードで各々受光し、信号処理部でそれらの光量比(偏光比)を計測する。偏光比は、図2に示すように角度依存性があるため、入射角は水と油で偏光比の差が比較的大きい47°付近としている(入射角60~70°付近も採用可能が、光学系を水面の飛沫から遠ざけるため、入射角47°付近を選択した)。反射光の偏光比は、入射レーザー光の偏光比率によって調整でき、水の偏光比を0.6付近に設定した場合、油の偏光比は0.2~0.4と小さくなる。

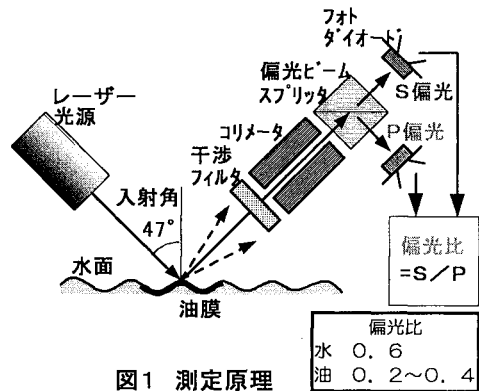


図1 測定原理

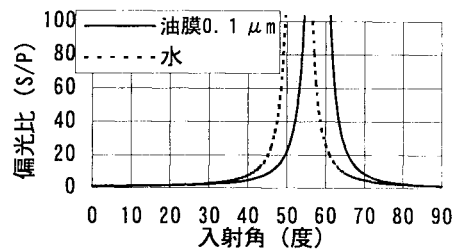


図2 入射角と偏光比の関係

偏光解析法の利点の一つは、原理的に水面の波立ちの影響を受けにくいことである。従来の反射光の光量を測定する方法では、水面が波立っていると、反射強度が変化するため感度が低下した。それに対し、S偏光とP偏光の強度に対する波の影響は、同じ割合であるため、その偏光比は受光光量が変化しても一定となる。よって、波の影響を受け難く高感度な測定が可能となる。

2.2 全体構成

装置は、光学系・信号処理部を収納した筐体を、水位変動を吸収するためフロートで浮かべ、河川及び取水口に直接設置できる構造をとっている(図3)。

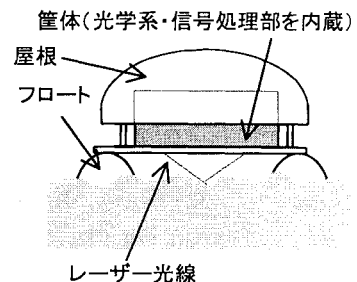


図3 油膜センサ全体構成

3 実験方法

3.1 原水に浮かべた各種油に対する感度測定実験

相模川下流域より採取した原水500mLをステンレス容器(表面積0.0143m²)に入れ、A重油、灯油、軽油等をマイクロピペットで滴下して、水面全体に広がるようにゆっくりかき混ぜ、膜厚0.05~0.2μmの油膜を形成させた。なお、油の滴下量は、容器表面積と測定膜厚の積により算出した。次に、容器をセンサ下部に設置し、各種油の偏光比を測定した。なお、原水は水温12℃、濁度2.6mg/L(セントラル科学製積分球式濁度計TB-50による測定)であり、レーザーは、出力1mW、波長650nmのものを使用した。

検出限界膜厚は、油の膜厚を変えていき、水道水で設定した偏光比0.6に対し、偏光比が0.4以下になる膜厚の最小値を限界膜厚とした。

3.2 波・風の影響に対する油膜検知実験

3.2.1 実験水槽の説明

波・風を発生させるため、図4に示す河川を模擬した大型実験水槽（表面積 18m²、水深約 1m）を製作した。この水槽は、楔型の駆動部が水面の位置で上下動して波を発生させる波発生機構と、横風を水面に当て細かな波を発生させるブローと、水流を発生させるスクリューを備えている。以下に、本実験の波発生機構によって生じるような大波を「重力波」と呼び、水面に平行に吹く風によって生じる細かい波を「風波（微小振幅波）」と呼ぶ。

また、油膜センサは、実験水槽に浮かべ、ロープで係留させた。なお、水槽内の水は、水温 26℃、濁度 26.7mg/L であった。

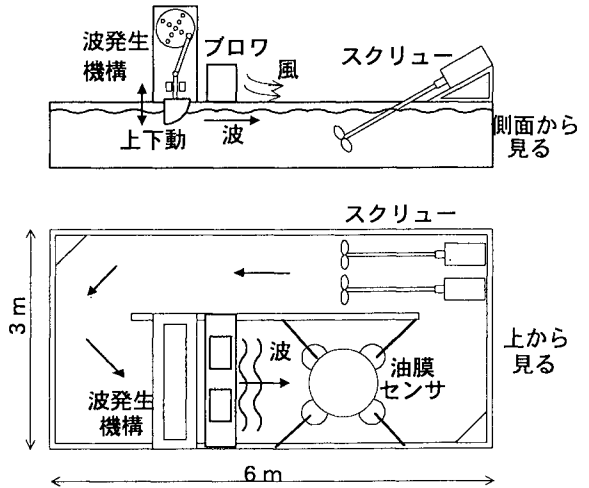


図4 河川模擬水槽

3.2.2 波・風の影響に対する油膜検知実験

重力波や風波の油膜検知への影響を調べるため、スクリューで約 0.2m/s の水流を発生させながら、A 重油をマイクロピペットで滴下し、水槽に均一に拡散させた（滴下量は、測定膜厚と水槽の表面積との積より算出）。次に、波発生機構やブローを用いて、以下の実験を行なった。

- ①重力波の影響に対する油検知実験（波：波高 0~10cm）
- ②風波の影響に対する油検知実験（風：風速 0~10m/s）
- ③重力波と風波の発生時における反射光の光量測定（センサフォトダイオード出力をモニタリング）

なお、①、②の実験でのセンサの出力信号は、水の信号を基準（ゼロ）にするために、式1に示す信号変換を行なった値である。

$$\text{信号強度} = \text{オフセット値 (0.6 に設定)} - \text{偏光比 (マイナス値はゼロとする)} \quad (\text{式1})$$

よって、油膜の無い水面はゼロ、油膜があると 0.1~0.3 と表示される。

油を検知したかどうかを決める判定基準は、1 分間 6 回の測定において、信号強度が 0.1 を 30%以上（2 回以上）超えた場合に油を検知できたとした。

4 実験結果・考察

4.1 原水に浮かべた各種油に対する感度測定実験

表1に原水に浮かべた各種油に対する検出限界膜厚を示す。

表1. 各種油の検出限界膜厚

油	検出限界膜厚	油	検出限界膜厚
A 重油	0.05 μ m	劣化絶縁油	0.05 μ m
軽油	0.05 μ m	エンジンオイル	0.05 μ m
灯油 ※	0.2 μ m	劣化サラダ油	0.2 μ m

※ 灯油は揮発性が高く、上記膜厚以下の測定が不可能であった。

表 1 より、センサの検出限界膜厚は、ほとんどの油で $0.05 \mu\text{m}$ であった。目視による判断の場合、静水面では $0.1 \mu\text{m}$ 程度の油膜は観察できるが、波立った場合では $0.2 \mu\text{m}$ の観察も難しい。これにより、偏光解析法は、原水に浮く油において目視以上の感度を持つことが分かった。

4.2 重力波の影響に対する油膜検知実験

図 5 に、波高を 0、10cm (波高は東京計測製波高計 HAT2-10 で測定) と変化させた場合の出力信号を示す (上段: 油の無い場合、下段: A 重油 $0.05 \mu\text{m}$ の場合)。グラフより、波高 10cm までは、波の影響を受けずに限界感度の膜厚 $0.05 \mu\text{m}$ を検知できることがわかった。実験水槽では、これ以上の波をつくるのが困難なため、10cm までの測定としたが、まだ僅かに余裕が有ると思われる。

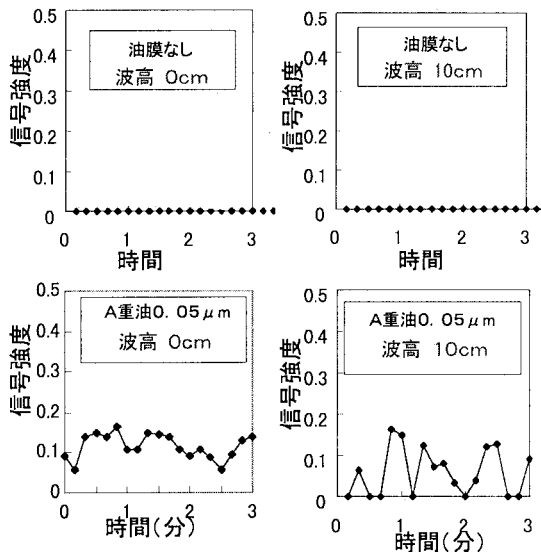


図 5 波の影響

4.3 風波の影響に対する油膜検知実験

図 6 に、風速を 0、4、8、10m/s (CUSTOM 製 CW-20 の風速計で測定) と変化させた場合の A 重油 $0.05 \mu\text{m}$ の出力信号を示す。この測定により、風速 8m/s までは風の影響を受けずに限界感度の膜厚 $0.05 \mu\text{m}$ まで検知できることがわかった。

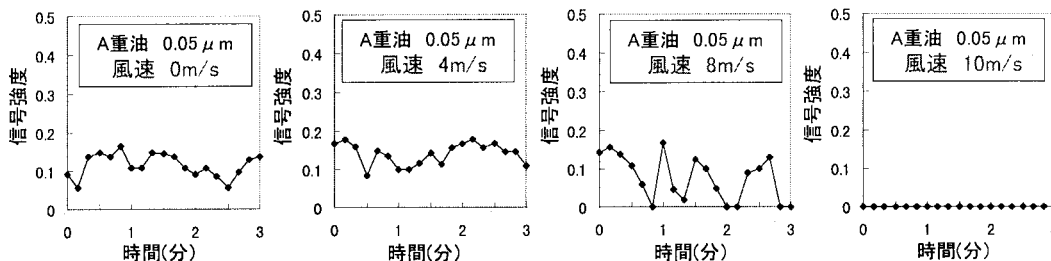
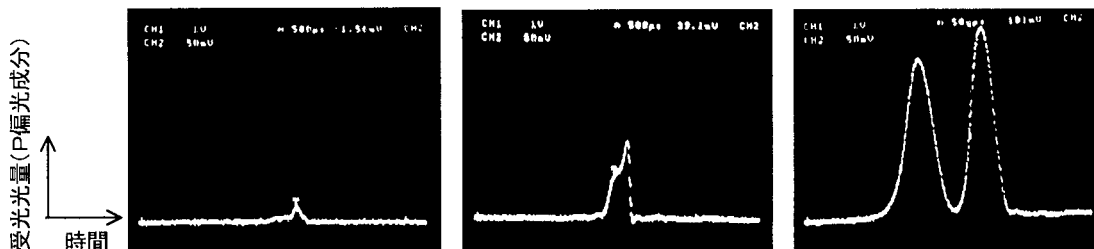


図 6 風の影響

4.4 重力波と風波の発生時における反射光の光量測定

図 7 ①は、風速 8m/s 時の風波の生じた水面に、レーザーを照射したときの反射光の光量 (P 偏光成分) を表したグラフで、②は波高 10cm の重力波の場合、③は静水面の状態の場合のグラフを示す。



①風波(風速 8 m/s)

②重力波(波高 10 cm時)

③静水面の状態

図 7 波の種類とセンサ受光光量の関係

グラフより、波立つと反射光量が低下するが、風波（風速 8m/s）は、重力波（波高 10cm）のときに比べさらに光量が少なくなることがわかった。

考 察

偏光解析法は、原理的には水面の波立ちに強く、波高 10cm の重力波、または風速 8m/s 時の風波までは測定できるが、測定に限界があることがわかった。また、重力波の場合、波高 10cm まで測定可能だったのに対し、風波の場合、波高 6mm が限界であった。

これは、風速 8m/s 時の風波は、波高 6mm、波長 50mm であり、波高 10cm、波長 1m の重力波に比べ、極大点の水面の曲率が大きくなっているためと考えられる（波長は、測定した周期と流速の積により算出）。以下、論拠を詳細に説明する。水面の曲率が大きくなるにつれ、水面上に当たるレーザー径の領域内で、水面の傾きは大きな分布を持ち、反射光が拡散する（図 8）。それにより、コリメータ部を通過する光量が少なくなり、さらに受光光量が受光許容レベル以下になると測定できなくなると考えられる。ゆえに、前実験の風波と重力波とを比較して風波のときの方が反射光の光量が低下したのは、水面の曲率がより大きいためと考えられる。

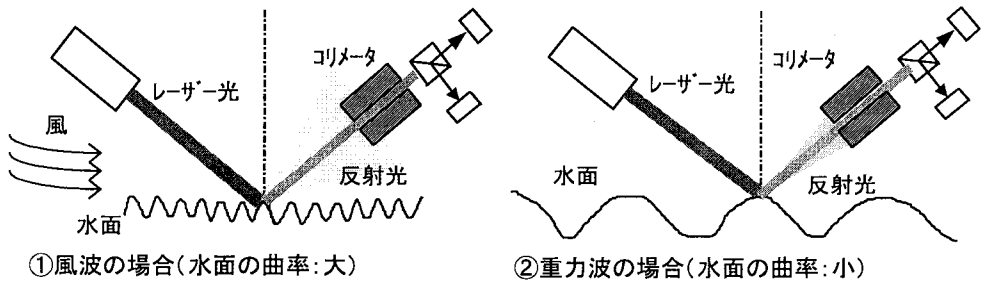


図8 曲率と反射光の広がり関係

そこで、波長、波高で定義される曲率を数式化し、本測定原理の波に対する許容限界の定量化を試みた。

水面の波を 2 次元 sin 波モデルで考える。図 9 において、波の進行方向を x 軸、振幅方向を y 軸とし、レーザー光が点 P、Q の間で水面の波に当たり、反射する様子を示す。また、水面の波を式 2 の関数で表す。

$$y = A \cos(2\pi x / \lambda) \quad (式 2)$$

ただし、λ：水面の波の波長

A：水面の波の振幅 (=H/2、H：波高)

レーザー光は、水面の法線に対し、入射角=反射角の関係で反射する。水面の曲率が大きいと、レーザービーム照射領域内での水面の傾きは大きな分布をもち、反射光が広がることになる。ここで、点 P、Q は、水面でのレーザービームの外径が交わる座標で、y 軸に対して対称にあるとする。また、曲線 PQ を円弧と考えた場合の円の中心を点 O とすると、O は y 軸上にあり、線分 OP を曲率半径と考えることができる。直線 OP は波の点 P における法線であり、P 点 (r, A cos(2πr/λ)) における接線の傾きが、

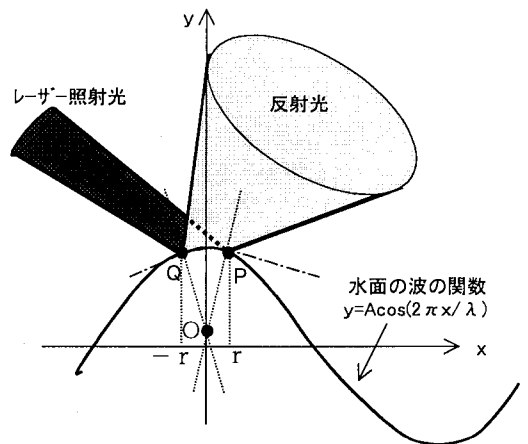


図9 水面の波のモデル化

$$\alpha = -\frac{2\pi A}{\lambda} \sin(2\pi r / \lambda) \quad (\text{式 3})$$

より、法線の傾きは、 $-1/\alpha$ となる。ここで、 r は点Pのx座標であり、 $r \approx 0.1\text{mm}$ である。

よって、点Oの座標は $(0, A \cos(2\pi r / \lambda) + r/\alpha)$ と表され、線分OPの長さが ρ より、求める曲率は式4のように表すことができる。

$$\frac{1}{\rho} = \frac{1}{\sqrt{r^2 + \left(-\frac{r}{\alpha}\right)^2}} = \frac{1}{r \sqrt{1 + \frac{1}{\alpha^2}}} \quad (\text{式 4})$$

式4に、静水面、重力波、風波における各波長と波高を代入し、それぞれの曲率を求める。

- ・静水面の場合 : 理想的には $1/\rho = 0$
- ・重力波 (波高 10cm、波長 1m) の場合 : $1/\rho = 3.95 \times 10^{-3} [1/\text{mm}]$
- ・風波 (波高 6mm、波長 50mm) の場合 : $1/\rho = 9.47 \times 10^{-2} [1/\text{mm}]$

よって、風波の場合は、重力波、静水面の場合よりも曲率が1桁以上大きくなり、反射光がより拡散すると言える。

以上より、風波のような波高が低くても、波長の短い波ほど曲率は大きくなり、その影響でレーザーの反射光が拡散され、コリメータを通過する光量が低下することがわかった。本装置は、偏光解析法による原理のため、光量に依存しないが、信号処理ができるレベル以下になると測定できなくなり、重力波 (波高 10cm、波長 1m) または風速 8m/s 時の風波 (波高 6mm、波長 50mm) までが測定可能であると考えられる。また、これらの波に対する適用限界を水面の曲率で与えると、ほぼ $1/\rho = 9.47 \times 10^{-2}$ 以下であることが計算できた。

5 結論

- ・偏光解析型油膜センサを用いて、河川より採取した原水に油を浮かべ感度を測定した結果、A 重油の検出限界膜厚 0.05μ で目視以上の感度を得た。また、軽油、灯油等のその他の油に対しても同様に高感度な検知を行なえた。
- ・実フィールドで設置する際に予測される波・風の影響に対し、重力波 (波高 10cm 以下、波長 1m) または風速 8m/s 時の風波 (波高 6mm、波長 50mm) より曲率の小さい波の環境下で、油膜の検知感度を維持できた。さらに、これらの波に対する適用限界を水面の曲率で与えると、ほぼ $1/\rho = 9.47 \times 10^{-2}$ 以下の波に対して、適用可能と考えられる。

今後の課題としては、現在実フィールドで連続運転中の装置が、防水用の光学窓の汚れ・浮力変動等の影響なく5ヶ月間安定して計測できているので、さらにデータを蓄積し、長期安定性と耐環境性を確認する。また、波の適用限界の定量性を高めるため、曲率の計算方法の精度向上を図る。

【参考文献】

- 1) 平岡陸久ほか、「油膜検知方法の基礎的研究」、第49回全国水道研究発表会講演集、pp.485~459 (98)
- 2) 平岡陸久ほか、「偏光解析法による油膜センサの開発」、第50回全国水道研究発表会講演集、pp.528~529(99)