γ線を用了水中のヘドロ境界面検出器の開発

亀谷 均^{*1}

Development of underwater sludge boundary detector using gamma ray

Hitoshi KAMETANI^{*1}^{*1}Department of Control Engineering of Matsue College of Technology
14-4 Nishiikumachou, Matsue-shi, Shimane 690-8518, Japan

Received: 31 October 2016; Revised: 26 December 2016; Accepted: 6 March 2017

Abstract

In recent years, water quality deterioration at the bottom layer of the lakes and dam lakes becomes a problem. Water quality deterioration is caused by the decrease in concentration of dissolved oxygen at the bottom of a lake. In order to prevent water quality deterioration of the lake, we have developed a dissolved oxygen improvement system. To develop the system, we first realized the necessity to develop a new detector that can detect water and sludge boundary. Since, the backscatter γ -rays can be measured even if the gas is generated from the sludge deposited at the bottom of lake. In addition, it is possible to measure even if the turbidity of water in proximity to the bottom of lake is large. Therefore, we have developed a detector that can detect the sludge surface by measuring the backscatter γ -rays. The sludge surface detector, while dropping in to the lake, continuously monitors the sludge surface in a contactless manner and stores the data to a central database system. The developed sludge surface detector is tested in the river where sludge is deposited and the sludge surface is detected from 70mm before the surface. Thereafter, the developed sludge surface detector has been evaluated at the dam lake using the system of improving the concentration of dissolved oxygen, and the sludge surface detector was succeeded to detect the sludge surface with an accuracy 1 cm.

Key words : Sludge surface detector, Backward scattering, Non-contact, Non-invasive, Dissolved oxygen

1. 緒 言

近年、ダム湖や湖沼の底層付近の水質悪化が問題となっている。水質悪化は湖底低層付近の溶存酸素濃度の低下によって引き起こされていることが明らかにされている。溶存酸素濃度が低下することで水中の栄養分が腐り湖底に堆積すると、次第に湖底に堆積する土からマンガン、鉄などの金属類が水中に溶融する。さらにはメタンガス、硫化水素ガスなどのガスの発生が引き起こされる（今井他，2006）。気温の低い地方のダムを除いて上述した問題が起こっていることから、湖底層の貧酸素化による水質悪化を防止するために湖底に酸素を供給する技術開発が進められている（河原他，2006）。

我々も湖底層の溶存酸素改善システムの開発に着手した。水質の改善を行うにはまず湖底付近から水面までの水質の調査が必要となるが、湖底面の位置が容易に測定できないことが技術開発する上での1つの問題点になった。水面を基準とする調査方法の場合、ダム湖への水の流入量と放水量が日々変化することで、ダム湖の水深自体が変動してしまう。そのため、特定の水位での水質の連続的な変化が分かりづらくなる。一方、ヘドロ面を基準とする調査方法でも底に接触する方法では泥が舞い上がるため水質計の測定に影響を与えてしまう。以上の理由で、湖底のヘドロと水の境界面（以下ヘドロ面と呼ぶ）を非接触で検出できる検出器が必要となった。

非接触によるヘドロ面の検出には、超音波センサ（土子，佐々木，1998）や光センサなどが考えられる。しかし、超音波センサの場合、堆積するヘドロからガスが発生した場合に境界面の検出が困難になる。また光センサの場合、湖底に浮遊する葉などのゴミなどの影響を受け易いという問題がある。一方で石炭層の探査あるいは石炭の品質評価の為に¹³⁷Cs γ 線源を土壌に放射し、後方散乱する γ 線の解析を利用した密度計が試作されている

(Borsaru et al.,1997) (山本, 1985). しかし, 湖底と水との境界面を非接触で測定する検出器は存在しない.

そこで本研究では γ 線の後方散乱を利用し, 水と湖底のヘドロとの境界面, ヘドロ面を非接触で測定できる検出器を開発し, 溶存酸素改善システムの観測船に組み込むことを目的として行った. なお, 観測船は水質計を1日に数回湖底近くまで下降させ, 上昇する過程で各水位毎の溶存酸素濃度などの水質を測定する役割を担っている. この水質計を湖底のヘドロに衝突させると自動計測する水質計が汚れ使用不能になる. このことから, 開発する検出器は確実にヘドロ面を検知できるように水質計と一体となって下降する際にヘドロ面を探す方式を前提とした. 仮に水面から精度よく水深が測定できても, 水深計がダムの湖底 50m まで下降した時点では, 水質計は水流によって流され位置を変えてしまう可能性が高いからである.

2. γ 線源の選定

ここでは使用する γ 線源のエネルギーについて検討する. これまでにダム湖の湖底あるいは川底から採取したヘドロの密度は 1.2 から 1.3 g/cm³ で水との密度差が小さい. γ 線が後方散乱する割合は, 密度に依存するため密度差の小さいヘドロ面の検出には, 使用する放射線のエネルギーを十分に見極める必要がある. ここでは半減期が 433 年でエネルギーが 60 keV と小さいアメリシウム 241 (²⁴¹Am) と, 半減期が 5.26 年で主な放出エネルギーが 1.33 MeV 及び 1.17 MeV のコバルト 60 (⁶⁰Co) の2つの γ 線源を使いヘドロ面の検出が可能か否か評価した. なお, 線源強度はいずれも 3.7MBq の放射線管理区域以外で使用可能な線源を使用した.

図 1(a)に実験配置を示す. アクリル製水槽 (奥行 250 mm, 幅 920 mm, 高さ 360 mm) の中に湖の湖底で採取した密度の 1.2g/cm³ のヘドロを 150 mm と水 200 mm を水槽に満たし, 厚さ 1 mm のアクリル樹脂製容器を水中に沈め実験を行った. 容器の中には γ 線源, シンチレーション検出器 (HPI 社 5000 型, 直径 1 インチ×高さ 1 インチの NaI(Tl)シンチレータ付き) および γ 線源から直接シンチレーション検出器へ入射する γ 線の遮蔽のために厚さ 5 mm の鉛板を配置した. 検出器とヘドロ面までの距離 h を変え, 後方散乱する γ 線の強度を測定した. 結果を図 1(b)に示す. γ 線源が ²⁴¹Am の場合, ヘドロ面から $h=50$ mm から 20 mm の範囲で計数率がほぼ 410 cps で一定に推移し, $h=15$ mm から 5 mm にかけて計数率が徐々に下がっている. これは物質によるエネルギー反射率が異なり, 密度の小さいほどエネルギー反射率が大きくなることに起因している. つまり, 水がヘドロよりエネルギー反射率が大きいことを示している. 一方エネルギーの高い ⁶⁰Co を使った場合は, 測定した範囲で緩やかに計数値が増加している. γ 線のエネルギーが MeV 領域まで高くなると密度差の少ないヘドロ面領域に於いて後方散乱する γ 線の計数変化が検出できないことが明らかにされた.

上述の結果と半減期が 433 年と長いと云うことを踏まえ ²⁴¹Am 線源を使用したヘドロ面の検出を試みる. なお, ²⁴¹Am の水に対する半価層は約 37 mm 程度でありヘドロ面検出器が水中にある時, 被爆の心配もない.

Fig.1 Experimental setup of measurement of the backscatter γ -rays. The backscatter γ -rays are measured by changing the distance h between the detector and sludge. For ²⁴¹Am, count rate gradually decreases near the sludge.

3. 簡易型 γ 線検出器での原理確認

ここでは、実機となるヘドロ面検出器の開発に先立ち、簡易型の γ 線検出器を組み上げ、ダム底の特殊な状況下で γ 線の後方散乱を利用したヘドロ面の検出が可能か否かの検証を行う。

3・1 実験装置

実験で使用する簡易型の γ 線検出器の構造を図2(a)に示す。2章で使用したアクリル容器の周囲に2章で使用したシンチレーション検出器が3本並べられ、容器の中心部に厚さ5mmの鉛で覆われた ^{241}Am γ 線源が配置されている。3本のシンチレーション検出器からの信号パルスは加算回路で加算される。計数の誤差を減らすために3本の検出器が使用されている。実験は図1(a)のアクリル製水槽の中に図2(a)に示す簡易型 γ 線検出器を浮かべ水面から徐々に検出器を下降させて計数率を測定した(図2(b))。なお、ヘドロの厚さは150mmとした。

Fig.2 Experimental setup of γ -ray detector. γ -ray detector is composed of three scintillation detectors. The source of γ -rays is shielded with Pb as γ -rays not directly incident on the scintillation detectors. Backscatter γ -rays generated in the water and sludge are measured by the γ -ray detector.

ここで、後方散乱する γ 線強度 I の計数率の減少量の変化率 R を式(1)で定義し、以下計数変化率 R と呼ぶ。 I_h は界面からの高さが h mmに於ける後方散乱する γ 線の計数率を表し、 I_0 はヘドロ面から離れた場所に於いて計数率が一定値になる時の計数率を表す。以下、 I_0 を基準計数率と呼ぶ。

$$R = \frac{I_0 - I_h}{I_0} \times 100 \quad (\%) \quad (1)$$

3・2 ヘドロ面付近に浮遊するごみの影響評価

ヘドロ面付近に浮遊する木葉(図3(a))を想定して、ヘドロ面にこの葉を置いて γ 線の後方散乱の計数変化率

Fig.3 Backscatter γ -rays are measured by placing the leaves on the sludge surface. The change ratio R hardly affected by the leaves.

R を測定した。結果を図 3(b)に示す。左の目盛が計数率を右目盛が計数変動率を示す。 I_0 には h が50mmにおける値を用いた。木葉の有無で計数変動率に変化はなく、木葉がヘドロ面の検出に障害にならないことが分かる。

3・3 濁度の影響評価

水の濁度の違いが後方散乱に与える影響を評価した。実験では濁度 32.1 mg/l(図 4(a))と 2510 mg/l(図 4(b))の水を使用した。図 4(c)に示すように濁度の大きい場合の計数変動率が大きいことが分った。濁りの元となる泥粒子による後方散乱の影響と考えられる。図から濁度が高い方がヘドロ面の測定に有利であることが分かる。

Fig. 4 Impact of degrees of turbidity on the change ratio R . The change rate R increases with the increase of degrees of turbidity. However, the differences in turbidity has no significant influence on the detection of sludge surface.

3・4 泡の影響評価

ヘドロから発生するガスを想定し、水中にメタンガスを 2 l/min の割合で供給し計数変動率を求めた(図 5(b)). 泡がある場合の計数変動率がやや小さくなっている。これは、泡があることで実質的な水の密度が小さくなることに起因していると考ええる。しかし、泡の有無の違いで計数変動率にほとんど違いがないことから、大量の泡の発生時でもヘドロ面の検出に問題はないことが確認された。

Fig. 5 Impact of gas generated on the change ratio R . Methane gas generates from the sludge surface. Since the increase in the change rate R due to the methane gas generated is very negligible, it has no influence on the detection of sludge surface.

3・5 ヘドロ面付近の石の影響

ダムの湖底に石がある場合を想定して実験を行った。実験結果を図 6 に示す。ヘドロ面に近づいた場合の計数変動率が石のある場合の方が大きい。これはヘドロより密度の大きな石による γ 線の吸収がより大きいことに起因する。この様に石がある場合でもヘドロ面の検出の障害にならない。

γ 線の後方散乱を使ったヘドロ面の検出を提案し、ヘドロ面の検出に問題となりそうな状況下での後方散乱実

験を行った。その結果、簡易 γ 線検出器に於いて、ヘドロ面付近で1割から2割程の後方散乱の減少が見られた。このことから、 γ 線検出器を下降させながら、逐次 γ 線の後方散乱による計数変化率を測定することでヘドロ面の検出が可能であることが示された。

(a) Stone placed on the sludge surface.

(b) The change ratio R by placing stones on the sludge surface

Fig.6 Impact of stones placing on the sludge surface to the change ratio R . Although the change ratio R is increased in case of placing stones, it becomes easy to detect the backscattered-rays.

4. ヘドロ面検出器の開発

これまでの基礎実験で γ 線の後方散乱を利用することで非接触に水とヘドロの境界面の検出が可能であることを示した。ここでは、実際にダム湖に浮かぶ観測船に搭載するために開発したヘドロ面検出器について述べる。

4・1 観測船とヘドロ面検出器の機能概要

観測船は船内にヘドロ面検出判定ユニット (H8 マイコン)、取得データの転送などの機能を担う通信ユニット (M16 マイコン) 及び巻き上げ機を備える (図7)。観測船はダム湖に浮かび、内部の巻き上げ機により一体化された水質計とヘドロ面検出ユニットの昇降機能および取得した水質データの陸上への通信機能を有する。なお、ヘドロ面検出器は観測船内にあるヘドロ面判定ユニットとダム湖に沈むヘドロ面検出ユニットで構成される。

観測船の CPU からの下降開始指令を受け取るとヘドロ面検出ユニットが下降するようにウインチが回転する。ヘドロ面検出ユニットは後方散乱する γ 線の数进行数し、逐次ヘドロ面判定ユニットにデータを送信する。ヘドロ面検出ユニットがヘドロ面付近に達すると、ヘドロ面判定ユニットがヘドロ面と判定してヘドロ面検出ユニッ

Fig.7 Installation of the sludge surface detector in the lake. The sludge surface judging unit, data communication unit and the winch are installed on the observation ship. Water quality data is acquired by the water quality meter and the detector detects the sludge surface. The sludge surface detector is composed of a judging unit and detecting unit.

トの下降を停止させる為の下降停止信号が観測船の CPU に送信され、ヘドロ面検出ユニットが下降停止する。ヘドロ面検出ユニットが静止した水深位置がダムの底を示し、水質データの取得時の水深の基準値となる。なお、水深計は水質計の中に取付けられている。水中ケーブルには抗張力性に優れた 15 芯複合ケーブル（同軸ケーブル）が使用され、信号ケーブル自体でヘドロ面検出部と水質計を引き上げることが可能である。なお、水質データは 10 cm 間隔で測定されることから、ヘドロ面検出器の目標検出精度を数 cm とする。

4・2 ヘドロ面検出ユニットの構造と原理

開発したヘドロ面検出ユニットの構造図を図 8(a)に、写真を図 8(b)に示す。ヘドロ面検出ユニットは γ 線源 ^{241}Am （線源強度 3.65 Mbq）、直径 5 インチ厚さ 1 インチの NaI (TL) シンチレータ（応用光研：12B4）、5 インチ光電子増倍管（浜松ホトニクス：R6091）および回路部で構成されている。これらがアルマイト処理され耐食性に優れたアルミニウムの圧力容器に納められている。圧力容器は下部の直径が 120 mm、高さが 508 mm で防水対策として O リングを使用した。 γ 線の入射窓には厚さが 4 mm の γ 線の吸収量の少ない塩化ビニールを使用した。NaI シンチレータは直径 76.2 mm、厚さ 25.4 mm の結晶を用いた。なお、 ^{241}Am から放出される γ 線が直接 NaI シンチレータに入射しない様に、線源の後面に厚さ 5 mm の鉛を配置し γ 線を遮蔽した。ヘドロ面検出ユニットは図 8(b)に示す様に水質計と上部で固定され、両者は一体化して上昇下降する。

(a) Configuration of the sludge surface detection unit

(b) Photograph of the sludge surface detection unit

Fig.8 The sludge surface detection unit. The main components of detection unit are a NaI (TL) scintillator, a photomultiplier tube, an electronic circuit and ^{241}Am -ray source. These components are contained in an aluminum pressure vessel. The detection unit is fixed to the water quality meter and both units move together.

次に回路構成について説明する。 ^{241}Am から放出された γ 線が水あるいは湖底に堆積するヘドロで後方散乱し、NaI (TL) シンチレータに入射すると、NaI (TL) シンチレータで微弱な蛍光が発生する。この微弱な蛍光は光電子増倍管で増幅され、電流パルス信号として出力される。回路部で増幅波形整形された後、波高弁別され

Fig.9 The circuit diagram for counting backscatter γ -rays. The pulse from the PMT is amplified first, and after the amplification, the signal waveform is shaped. The pulse of constant signal strength is screened and selected at the discriminator. The pulse is counted in every 0.1 seconds.

0.1 秒当たりのパルス数が計数される（ナノグレイ製）。そして、取得された計数率は長距離伝送への対応が可能な通信規格 RS-232C を使用し、受信側の H8 マイコンへ送信される。

4・3 ヘドロ面判定ユニットのデータ処理の流れ

図 10 にヘドロ面を検出する為のフローチャートを示す。また、図 11 にヘドロ面判定ユニットとヘドロ面検出ユニット及び観測船 CPU との信号の送受信の関係を示す。H8 マイコンが観測船から下降開始信号を受信すると、ヘドロ面検出ユニットから送信される計数率の取得が開始される。計数率データはデータの取得毎にエラーチェックが行なわれ、データに異常が無い事の確認後に水深 3m の地点で、200 回（20 秒間）の計数率の測定が行われる。そして計数率の平均値が算出され、この平均値が後方散乱の基準計数率 I_0 となる。次にこの基準計数率とその後のデータの移動平均で後方散乱の計数変化率が算出され、この計数変化率が、例えば 5%以上になった場合にヘドロ面が検出されたと判定される。ヘドロ面が検出されると、下降停止信号が観測船の H8 マイコンに送信されると共に観測船の M16 マイコンにも送信され下降が停止する。

Fig.10 Flowchart of the program executed in the sludge surface judging unit. When the microcomputer receives a signal of start lowering from the observation ship, the detecting unit starts acquisition of the data. The sludge surface is determined with the change ratio R of equal to or greater than 5%.

Fig.11 The sludge surface judging unit. The detector unit first approaches to sludge surface, detects the signals and send them to the M16 microcomputer after judging at the H8 microcomputer and then stops.

5. ヘドロ面検出器の特性評価試験

ここでは開発したヘドロ面検出器のダムでの利用を前提とした評価実験について述べる。

5・1 密度の小さなヘドロでのヘドロ面検出器の特性評価実験

開発したヘドロ面検出器の特性を 3.1 節 (図 2(a)) と同じ条件で評価した. ヘドロ面検出器を徐々にヘドロ面に降下させ, 後方散乱の強度を測定した. 結果を図 12 に示す. ヘドロ面検出器がヘドロ面から約 80mm の位置から徐々に計数変化率 R が増加している. 計数変化率 5% に於ける距離 h は約 55mm であり, ヘドロ表面での計数変化率は 52% に達している. なお基準計数変化率は式 (1) の I_0 に対応する高さ h を 140mm として計算した.

3 章の簡易型 γ 線検出器でのヘドロ表面に於ける計数変化率は約 10% であった. 一方開発したヘドロ面検出器では同じヘドロで評価した場合に, ヘドロ表面の計数変化率が 52% と大きくなっている. このことは開発したヘドロ面検出器がヘドロ面を検知しやすいことを意味している. 簡易型 γ 線検出器 (図 2(a)) とヘドロ面検出器のヘドロ面での計数変化率の違いは主にシンチレータを大きくしたこと起因している.

なお, ヘドロ面検出器が水流で鉛直から傾いてヘドロ面に接近しても, 計数変化率 5% に於けるヘドロ面までの距離の誤差は数 mm にとどまり, ヘドロ面の検出に影響を与えない.

Fig.12 Experimental setup of the sludge surface detection unit and measurement result. The count rate is measured for 13 sec. At a distance of 55 mm the change ratio R is of 5%, while it becomes 52% at the sludge surface.

5・2 川におけるヘドロ面検出器の特性評価試験

ダムの湖底に堆積するヘドロを想定し, ヘドロが堆積する川でヘドロ面検出器の評価試験を行った. 実験配置を図 13 に示す. ヘドロ面検出ユニットと川底との距離の測定は Web カメラで行った (図 13(a)). ヘドロ面検出ユニットからの計数は陸上に置かれたヘドロ面判定ユニットで処理され, PC にデータが保存される (図 13(b)).

Fig.13 Experiment in the river. The performance evaluation of sludge surface detector is carried out in the river. The distance between the detecting unit and sludge surface is measured by the webcamera.

図 14 に検出器ユニットが手動で徐々に降下する過程の写真を示す. (b) 図には葉が浮遊しているが, 測定に影響はなかった. (c) 図はヘドロ面から 35 mm の位置での写真である. (d) 図は川底で採取されたヘドロで, 密度は 1.23g/cm^3 であった.

Fig.14 Photographs of gradual lowering of the detector. The leaf shown in the photograph (b) has no significant effect on the measurement. The density of sludge shown in photograph (d) is 1.23 g/cm^3 .

図15は各水位でヘドロ面検出ユニットを停止させ13秒間の計数率を積算し、その平均値をプロットした図である。浅い水深で計数率が 625 ± 3 個、ヘドロ面で 280 ± 1 個と揺らぎが非常に小さくなっている。この図から計数変化率 R が5%の時点で、ヘドロ面から約70 mm離れていることが読み取れる。また、ヘドロ面での計数変化率が58%に及ぶことが確認された。

5.1節に示す湖で採取されたヘドロでの実験ではヘドロ面での計数変化率が52%であったが、本節での実験では計数変化率が58%と大きい。この違いは川で採取したヘドロの密度が湖で採取したヘドロの密度が大きいことに起因している。

Fig.15 Distribution of backscattered γ -rays while the detector fixes at a constant water level. The count rate is measured for 13 sec. At a distance of 70 mm the change ratio R is of 5%, while it becomes 58% at the sludge surface.

5・3 ヘドロ面検知の判定法

ヘドロ面検出ユニットを水中に入れヘドロ面から 150 mm の位置から手で徐々に降下させ、33 mm 手前までの計数を連続測定した。結果を図 16 に示す。図 16 は 0.1 秒毎の計数を 49.5 秒間繰り返し測定した結果である。図 16 は 0.1 秒間の計数が少ないことから計数率のゆらぎが大きい。例えば計数値が 630 カウントである場合計数値の揺らぎが 25 カウント、相対誤差で 4.0% となり、決して小さくはない。このことが計数および計数変化率ともに図中の変動となって現れている。

0.1 秒間の計数率からヘドロ面を判定するには変動が大きく難しいことから計数率の移動平均から下降停止信号のタイミングを決定する方法を検討した。図中に 0.3 秒, 1 秒, 2 秒および 3 秒の計数変動率の移動平均の結果を示す。計数の積算回数が増えるにつれて計数変動率の揺らぎが小さくなり、単調増加に近い曲線が得られている。この移動平均からはヘドロ面を捉えることが可能である。例えば 5% の計数変動率でヘドロ面検出ユニットを下降停止させようとする、本節のヘドロの場合、図 15 から判断するとヘドロ面からの距離が約 70 mm に対応する。また、計数変動率を 10% でヘドロ面検出ユニットを停止させようすると約 53 mm 手前で停止が可能と考えられる。

Fig.16 Distribution of backscattered γ -rays while the detecting unit gradually lowers to the sludge surface. The figure shows the change ratio R and count rates per 0.1 seconds. Since the fluctuation in the raw data is large, it's difficult to determine the sludge surface. Therefore, the moving average method is used to decide the sludge surface.

6. ダム湖における実証実験

5 章の実験では検出器ユニットを手動で下降させていたが、ここでは、観測船の巻き上げ機にヘドロ面検出ユニットの信号ケーブルを取り付け、観測船の自動昇降機能を使って実証実験を行う。

6・1 自動昇降実験におけるヘドロ面検出器の挙動

図 17 に実証実験で用いた観測機器の写真を示す。図 17 の (a)、(b) 及び (c) はそれぞれ観測船、観測船内のヘドロ面検出ユニット及び制御盤内のヘドロ面判定ユニットを示す。観測船内のヘドロ面検出ユニットは観測船の中央の穴から降下する。ユニットの昇降は黄色の信号ケーブルが巻かれた巻き上げ機で行われる (図 17 (b))。

ヘドロ面検出器の昇降を観測船側の自動運転プログラムで行い完全に自動モードでヘドロ面検出器が正しく機能するか否かの確認を行った。自動運転のパラメータ設定は次の通りである。ヘドロ面検出ユニットの下降時間を毎分 0.64 m (毎秒 10.7 mm) とし、ヘドロ面検出後 10 秒間その水深に留まり、その後、水深 5.38 m まで上昇するように観測船の制御プログラムを設定し、確実に期すために 3 秒の移動平均を選択して総合実験を行った。

Fig.17 Photographs of the demonstration experiment. Although the observation boat is moored, it moves a bit with the wind flow. The detecting unit is lowered through the hole at the center of observation ship (Fig.17 (b)).

実験結果を図 18 に示す。なお、図中の上側のデータは左の目盛で計数率を、また、下側データ右の目盛で計数率変化を示す。13 時 5 分に水深 2.35 m の位置から降下を開始し 13 時 40 分 00 秒に計数が大きく減少し、それに伴い計数変化率が大きく上昇した。この急激な変化はヘドロ面を検出したことを示し、この時点で下降停止信号がヘドロ面判定ユニットから発せられヘドロ面検出ユニットが降下を停止した。その後、ヘドロ面検出ユニットは上昇し、水深 5.38 m の位置に留まった。その水深から 14 時 22 分に再び降下を開始し、14 時 35 分に自動運転を終えた。この様にヘドロ面検出ユニットとヘドロ面判定ユニットともに正常に機能した。

図 18 にみられる計数のゆるやかな低下とそれに伴う計数変化率の上昇は、いくつかの要因があると考えられる。まず、水深が深くなるにつれ水の密度が大きくなること。更に水深が深くなると水温が低下し、水の密度が大きくなる。具体的には水深の浅い場所で水温が 20 °C で水の密度が 998.23 kg/m³、水深深い場所で水温が 7°C で密度が 999.938 で密度差は 0.17% 程度である。また、ダム底の濁度が大きい事などの影響が考えられる。あるいは測定回路計の温度特性なども考えられるが、計数の緩やかな低下原因は特定できていない。しかし、いずれしてもヘドロ面に接近すると、緩やかな変動以上の非常に大きな計数の減少が観測されるので、ヘドロ面検出への影響はない。

Fig.18 The results of data acquisition in the automatic operation mode. The detecting unit is lowered automatically at 13:05 h, count rate backscatter γ -rays measures in every 0.1 sec. The detector detects the sludge surface at 13:40 h and immediately stops lowering. After 10 sec the detecting unit begins to rise again and repeats the process.

次に、計数率が急激に低下した部分を拡大した図を図 19 に示す。なお、図中の上側のデータは左の目盛で計数率を、また、下側データ右の目盛で計数率変化を示す。13 時 40 分 00 秒に計数変化率が 5.6% に達し、下降停止信号が発生した。その後 10 秒間その場に留まり、再び上昇をはじめ、水深 5.38 m まで上昇してそこで留まり、14 時 22 分に再び降下開始した。

次に下降停止信号が発令された時点のデータを詳しく観る (図 19)。プログラムは計数変化率の 30 回の移動平均が 5.5% を超えた時点で、下降停止するように書かれていた。実際に下降停止信号が出力された時点の計数変化率を観測船の H8 マイコンの表示器で確認したところ 5.6% であった。このことからプログラム通り正しく下降停止したことが確認された。

ヘドロ面に衝突していない理由としては水質計に濁度の増加がなかったこと、さらに計数変化率の大きな上昇がないまま 13 時 40 分から 10 秒間一定値で推移していることが理由になる。以上のようにヘドロ面検出器は湖底に衝突する手前で停止したことが確認された。

なお、本ダムのヘドロが 2 章、3・1 節、5・1 節で使用した非常に密度の小さなヘドロであったとしても、計数

変化率が 5.6%になる時点のヘドロ面までの距離は、図 12 から約 50mm に対応し、余裕をもってヘドロ面の手前で停止することが出来ると言える。

Fig.19 The detail of the sludge surface detecting time. The detector stops lowering when the change ratio R of the moving average exceeds of 5.5%.

6・2 ヘドロ面位置の変動

10月11日から12月13日までの間、観測船を自動運転させ、ヘドロ面の水深を繰り返し測定した。測定された140回のヘドロ面の水深と基準水深の比較結果を図20に示す。基準水深とは、観測船から200m離れた場所の湖底に固定された水深計の示す値である。

図20から基準水深の変化とヘドロ面水深の値が同じように緩やかに減少していることが分かる。これはダム湖に流入する量より、放水される水の量が多くダム湖自体の水深が徐々に減少したことを示している。一方でヘドロ面水深には時々変動が観られる。この変動に関しては、観測船がダム湖の流れあるいは風に流されヘドロ面検出ユニットの降下する場所が変化したことによると考えられる。何故なら、140回のヘドロ面の検出の試行の際にヘドロ面検出器がヘドロ面に衝突がなかったからである。しかし、湖底を基準とした各水深での水質の経時変化を測定するという目的からすると、この位置変動による水深変化は問題にならない。

両者の水深の差の平均値は約 0.62 ± 0.01 m と計算された。0.62 m は観測船のある場所の水深と基準とする水深計の置かれた場所の水深との差である。誤差は1 cm で目標とした数 cm より良い値となった。以上の結果からダム湖のヘドロ面を非接触に検出可能なヘドロ面検出器の開発が達成されたと言える。

Fig.20 The results of depths of water measured by the sludge surface detector. The depth of water gradually becomes smaller, because of the change in the depth of dam lake. The abrupt depth changes are considered to be due to the change in location of the observation ship.

7. 結 言

本研究では水と湖底に堆積するヘドロ面を非接触に検出可能な検出器を開発し、開発中のダム湖水質改善システムに組み込み、自動でヘドロ面の検出を可能にすることを目的として行った。以下に研究の成果をまとめる。

- ① ヘドロ面の検出が後方散乱する γ 線の計数率の変化率から推定できることを示した (2章, 3章)。
- ② その成果からヘドロ面検出器の構造を確定し、ダム湖水質改善システムへ組込む為のヘドロ面検出器を開発した (4章, 5章)。
- ③ 開発したヘドロ面検出器で水とヘドロ面の非接触による検出を実現し、密度の小さなヘドロの境界面を約 50 mm 程度手前から検出できることを示し (6章)、更にダム湖の水質改善システムにヘドロ面検出器を組み込み、安定した動作を実現した (7章)。

水と湖底のヘドロの境界面を非接触で測定する検出器は存在しないことから、本研究で開発したヘドロ面検出器は新規性に富む検出器であると考ええる。なお、本検出器は、密度の小さなヘドロだけでなく石あるいはコンクリートなどの密度の大きな境界面も検出可能である。

文 献

- Borsaru, M., Ceravolo, C., Carson, G. and Tchen, T., Low radioactivity portable coal face ash analyser *Applied Radiation and Isotopes*, Vol.48, No.6 (1997), pp.715-720.
- 今井剛, 村上泰行, 浮田正夫, 関根雅彦, 樋口隆哉, 閉鎖性水域における底層部への高濃度酸素水導入による水質改善効果に関する研究, *水環境学会誌*, Vol.29, No11 (2006), pp.737-744.
- 河原能久, 竹内豊, 野々村敦子, 松尾克美, マイクロバブルによる富栄養貯水池の深層水の水質改善に関する現地試験, *水工学論文集*, Vol.50, No.226 (2006), pp.351-356.
- 土子良治, 佐々木弘, 超音波式砂面計, 特開平 10-096661 (1998).
- 山本毅史, 土木分野での利用, *Radioisotopes*, Vol.34, No.1 (1985), pp.54-58.

References

- Borsaru, M., Ceravolo, C., Carson, G. and Tchen, T., Low radioactivity portable coal face ash analyser *Applied Radiation and Isotopes*, Vol.48, No.6 (1997), pp.715-720.
- Imai, T., Murakami, T., Ukita, M., Sekine, M. and Higuchi, T., Improvement in water quality of closed water body by introduction of high-dissolved-oxygen water into bottom layer, Vol.29, No11 (2006), pp.737-744 (in Japanese).
- Kawahara, Y., Takeuchi, Y., Nonomura, A. and Matsuo, K., Field experiment on hypolimnetic aeration using micro oxygen bubbles in a eutrophic reservoir, Vol.50, No.226 (2006), pp.351-356 (in Japanese).
- Tuchiko, R. and Sasaki, H., Ultrasonic type sand surface detector, Japanese patent disclosure H10-096661 (1998) (in Japanese).
- Yamamoto, T., Use in the field of civil engineering, *Radioisotopes*, Vol.34, No. 1 (1985), pp.54-58(in Japanese).