農研機構
NARO 国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構

農業水利施設における濁度の遠隔監視と浮遊物質，全リン，放射性Csの濃度推定

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構 農村工学研究所 公開日: 2026-07-24 キーワード: 作成者: 久保田, 富次郎, 濵田, 康治, 人見, 忠良, 申, 文浩 メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.24514/0002001735

(c) 国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構
National Agriculture and Food Research Organization, Japan

〔農工研技報　218
77 ～ 88，2016〕

農業水利施設における濁度の遠隔監視と浮遊物質，全リン，放射性Csの濃度推定

久保田富次郎＊　濵田康治＊　人見忠良＊　申文浩＊＊

＊水利工学研究領域水環境担当
＊＊東北農業研究センター農業放射線研究センター

要　旨

近年の情報通信技術の発達に伴い，農業用水の遠隔監視や制御はより低コストで導入ができるようになっているが，水質保全のような環境配慮を含めた水管理が求められる中で，農業用水の水質遠隔監視はほとんど普及していない。本研究では，水質モニタリングのための低コスト遠隔監視システムの紹介を行うとともに濁度センサーを用いた浮遊物質，全リン，放射性Csの濃度推定について検討を行った。遠隔監視システムの特徴は，1）アナログ8ch，デジタル2chのセンサー入力，2）PCやスマートフォンによる任意時間の採水，3）携帯通信回線の利用，4）デフォルトで10分間隔の観測，などの特徴を持つ。また，水質濃度の推定では，濁度観測によって浮遊物質濃度が精度よく観測できることが確認されるとともに，全リンや放射性Csの簡易推定が可能なことがわかった。その他，現地における長期の濁度観測における問題点についてまとめた。

キーワード：濁度，浮遊物質，全リン，放射性セシウム，遠隔監視

Ⅰ　緒　言

河川や農業用排水中の懸濁物質は，農業水利施設等への堆積・堆砂の問題を引き起こすとともに，重金属や栄養塩，放射性物質など様々な汚染物質のキャリアとなるため，その動態を把握することは重要である。しかし，懸濁物質は，イオン態などの溶存性物質と比較すると，沈降や巻き上げといった現象により，局所的なシンクやソースの存在や，降雨増水時の集中的な物質移動の影響などのため，物質フローの動態把握には労力を要する重点的な調査を必要とする。

その際に分析が必要となる懸濁物質もしくは浮遊物質（Suspended Solids = SS）は，水分析の視点からは，「2 mmのふるいを通過し，孔径 1 μmの濾過材上に残留する物質」として定義されており（国土交通省，2009），一般には現地で採水を行い，実験室に持ち帰って処理したのちに値が判明する。一方，濁度は，カオリンやホルマジン標準液を基準として環境水の濁りの程度を数値化するものであり，センサーを用いて現地で速やかに値を知ることができ，また，センサーを現地に据え付けることで，無人で連続的に観測を行うことができる。一般に濁度が増加すればSS濃度も増加する傾向にあるため，以前より濁度計を用いたSS濃度や土砂流出量の推定（長沢ら，1987；山口ら，2000；横山ら，2008）が行われているとともに，懸濁態栄養塩負荷量の推定（山本ら：2003）が試みられている。しかし，濁度とSSや懸濁態栄養塩との関係は，経験的なものであり，一般に濁度計の種類や地域，水域によって異なると考えられるため，観測地点毎に検討を行う必要がある。また，濁度センサーは，微細ゴミの付着や堆積物，センサー窓の汚れなどの影響を受けるため，長期モニタリングを行う際にはこれらの問題についてあらかじめ検討を行うことが望ましい。

本研究では，これらの課題について，タイプの異なる農村地域の水域を対象として，濁度観測によるSS濃度や栄養塩類の一つである全リン（T-P）濃度，そして，東日本大震災以降，福島県の一部地域を中心に課題となっている放射性Cs濃度の推定への活用について検討を行う。また，併せて，近年の情報通信技術（ICT）の進展により導入が容易になってきた遠隔観測を含めて，濁度センサーや遠隔観測機器の運用上の問題についても述べる。これにより，農業農村分野における濁度の遠隔／自記観測を活用した水質モニタリング技術の向上に資する。

Ⅱ　浮遊物質の動態把握手法

2.1　開水路における土砂と浮遊物質の流れ

我が国では，土砂災害・洪水災害等の問題を抱えていることから総合的な土砂管理の推進が課題の一つとなっており，近年，流域を対象とした土砂動態の実態把握が進められている（末次ら，2005）。流水で移動する土砂

いわゆる流砂は，粒径や運動形態から一般にウォッシュロード（wash load），浮遊砂，掃流砂に分類される。掃流砂は流速が限界掃流力を超えた際に，河床近くを滑動，転動，小跳躍などにより移動する大粒径の土砂で構成され，浮遊砂は，掃流力が増大したときに水面付近まで運動範囲を広げた土砂をいう。これらは総称してベッドロードマテリアルと呼ばれ，河床の土砂移動に主体的な役割を果たす。一方，ウォッシュロードは，河川を流下する中で沈降・堆積を生じにくい細粒分でおよそ0.1 mm以下の微細な土粒子で構成され，通常河床にはほとんど存在しない（黒木，2006）。浮遊砂量や掃流砂量は，掃流力の大きさによって，空間的には急流部で掃流砂が，緩流部では浮遊砂やウォッシュロードが卓越し，沖積河川では概ね7～8割がウォッシュロードや浮遊砂である（末次ら，2005）。山口ら（2000）は，石狩川流域の流量観測地点において土砂輸送量の観測と濁度の連続観測から，総浮遊砂量が掃流砂の500～1000倍程度となることを示した。また，末次ら（2005）は，茨城県涸沼川において年間土砂移動量の約9割がウォッシュロードと浮遊砂であることを明らかにした。このように，土砂輸送においてウォッシュロードと浮遊砂が卓越することから総流出量を知る上ではこれらの把握が重要である。

2.2　農村地域における浮遊物質を巡る問題と今後の課題

傾斜地や中山間地が多い我が国では，降雨時や融雪時を中心として森林，農地，市街地等から土砂流出と併せて浮遊物質の流出が生じる。農地の土壌浸食や農林地からの土砂流出に関する研究は，塩野ら（2004），大澤ら（2008），池田ら（2012）など多くの研究者によって実施されている。流域を対象とした研究では，長澤ら（2000）は，降雨時の浮流土砂の実態を濁度観測から検討を行い，流域の農地面積率や土地利用が重要な影響因子であることを指摘した。

一方，傾斜地に立地する造成畑地から流出する浮遊土砂は，農地保全や下流域の環境保全の観点から極力低減する必要があるため，中ら（1992，2008）は掃流砂を排除するための渦動排砂管や微細土砂の制御のための浸透性沈砂池の技術を開発した。その他，圃場の土壌侵食防止技術として多くの技術が開発されている（山本ら，1995；Shiono et al., 2007）。例えば，長年，河川や海域への赤土流出が課題となっている沖縄県の国頭マージ地帯においては，土壌流出量の実測とその推定方法の改良（酒井ら，2000）が進められるとともに，土砂に含まれる栄養塩流出とその制御が，サンゴなどの海域の生態系保全上重要であることから観測が行われている（久保田ら，2011）。また，浮遊物質は重金属の輸送担体としても重要である。松尾ら（2008）は，都市河川における亜鉛の流出特性や存在形態を検討する中で河川水中の懸濁態亜鉛濃度がSS濃度に比例することを示している。

近年，東日本大震災に伴う東京電力福島第一原子力発電所の放射性物質放出事故の影響で，放射性物質，とりわけ放射性Csの流出，再移動，堆積などの動態把握が大きな課題となっている。これまで実施された放射性物質の移行メカニズム調査において，放射性核種の流出は，土壌浸食に準えて整理されており（Evrard et al., 2015），この問題でも水系における浮遊物質の把握が課題となる。

2.3　濁度観測とその測定原理

前述のように濁度計を用いたSSや土砂の観測は，その容易さから幅広く行われている。国内の河川では，濁度の自動監視観測所が2009年時点で127ヶ所設置されており，濁度モニタリングが実施されている。濁度計を用いた河川のSS流出量の推定等で問題となるのは，センサーを流水断面内のある場所に固定しなければならず，断面内の濃度分布に対応が難しく，ある程度の誤差を含むことである（長沢ら，1986）。また，濁度計には粒径依存特性があることが知られており，粒径が大きくなるほど濁度計の出力は小さくなる（横山，2002）。筑後川流域では，源流に近いほど同じSS濃度に対して濁度の応答が低い現象が観察されており，これは粒径の光学特性への影響（横山ら，2008）と考えられている。

濁度の測定原理には様々な方法があり，それぞれに得失がある。濁度センサーに用いられる主な測定原理（平野，2013）は，センサーと水との位置関係やセンサーの構造などから（1）透過光方式，（2）散乱光方式，（3）積分球方式，（4）レーザ方式などに分類される。透過光および散乱光方式は光源や受光部と接する窓の汚れや気泡の影響を受けるという短所があるものの透過光方式では高濃度試料の測定が可能である。また，透過光散乱光方式では，窓の汚れや気泡の影響を受けるものの，試料色の影響が少なく極低濃度の測定が可能であるという特徴を持つ。散乱光方式の一つである表面散乱光方式は，受光窓が試料水に接触しないため，窓の汚れの影響が少ないという長所があり，比較的高濁度の水に用いられる。濁度計の精度維持管理上は，汚れの影響を減ずることが大きな課題である。河川や用排水路に設置する現地設置型の濁度センサーには，観測窓にワイパーを設け，汚れの影響の低減を図るものが多い。

このほか，湖沼や感潮河川を対象として超音波多層式流速計（ADCP）を用いた濁度の時空間分布の推定法（川西ら，1998）など，間接的な濁度測定法も検討されている。

Ⅲ　水質水文遠隔監視システム

3.1　システム

近年，携帯通信やセンサー技術を含むICTの発展に伴って遠隔観測技術は大きく発展しており，比較的低

コストで遠隔監視システムの構築が可能である。本研究では，センサーによる遠隔監視と自動採水器の制御を可能とした水質水文遠隔監視システム（久保田ら，2015a）を用いた。

システム構成を**Fig. 1**に示す。本システムは，携帯データ通信を用いて，ネットワークデータロガーを核として，8 chのアナログセンサー入力と1 chのパルス入力，印可電圧の制御，ならびに自動採水器の制御を可能とする遠隔監視システムである。アナログセンサー入力は，電圧0-5 Vの入力を基本として，変換器等を通じて電流入力や白金測温器など各種のセンサー入力に対応する。

本研究で使用した濁度センサーは，4～20 mA電流出力であるが，変換器を通じて電圧に変換して接続される。パルス入力には，雨量計の他，水道メータなどの流量計を接続できる。また，バッテリーの電圧は，電圧を変換することで監視が可能である。

現地で取得されたデータは，基本的に10分毎に携帯通信を通じてデータサーバに蓄積され，利用者は，PCやスマートフォンからデータにアクセスができる。**Fig. 2**に，Webブラウザを用いてデータサーバにアクセスした際に表示されるPCの画面を示す。画面中央の表には，接続されたセンサーの種類と観測値が示されるとともに，警報メールや自動採水器を用いた条件採水のためのセンサーの閾値が示される。

画面左下の「ダウンロード」ボタンを押下すると，最長2ヶ月分のデータがCSV形式でダウンロードされる。

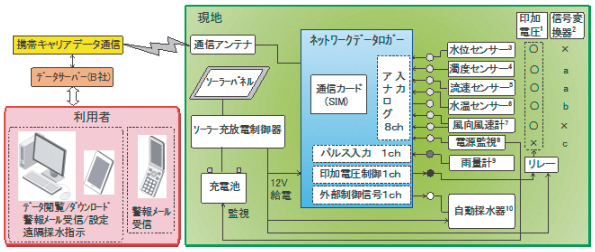


Fig. 1　水質水文遠隔監視システムの構成
Composition of Water Quality Remote Monitoring System (WQRMS)

No.	観測項目	日時	データ種別	電圧	測定値	単位	閾値①	閾値②	接点出力閾値	接点出力論理
1	濁度(3000度)	2015/11/06 08:10	アナログ	1.002	1.5	度	500	10000	10000	non
2	水位	2015/11/06 08:10	アナログ	1.066	8.3	cm	10000	10000	1000	non
3	水温	2015/11/06 08:10	アナログ	2.183	9.6	℃	10000	10000	10000	non
4	電源	2015/11/06 08:10	アナログ	2.675	12.6	V	10000	10000	10000	non
5	-	2015/11/06 08:10	アナログ	0.020	0.0	V	10000	10000	10000	non
6	気温	2015/11/06 08:10	アナログ	0.269	6.9	℃	10000	10000	10000	non
7	湿度	2015/11/06 08:10	アナログ	0.998	99.8	%	10000	10000	10000	non
8	-	2015/11/06 08:10	アナログ	0.083	0.0	V	10000	10000	10000	non
P1	雨量	2015/11/06 08:10	パルス	0	0.0	mm	0.5	2	10000	non

Fig. 2　遠隔監視システムのPC画面
PC screen of WQRMS

また，画面右下の「接点出力手動ＯＮ」ボタンを押下すると，任意の時間で自動採水器による採水が可能である。

なお，Webブラウザからの閲覧では，閲覧時のデータの値表示に限られ，最近のデータのグラフ化などはできない。そこで，PCに専用ソフトウェアをインストールし，使用することで，観測値の推移をグラフで直感的に把握することが可能である（**Fig. 3**）。

Fig. 4にシステムの主要部の写真を示す。

3.2　システムの設置と活用の事例

Fig. 5に遠隔監視システムの農業用水路や用水の取水口への設置事例を示す。

Fig. 6に遠隔監視システムで取得されたデータの例を示す。これは，福島県相馬郡内のため池における観測データであり，2014年10月の台風19号通過前後のため池流出水の水位(青実線)と濁度(茶実線)，および遠隔操作により採取した水試料に含まれるCs-137の濃度（赤丸）を示している。従来，自動採水器による水試料の採取は，定時採水か，水位や雨量もしくは濁度センサー等の出力との連動により行っていたが，本システムを利用すると，任意のタイミングで採水器を作動させ，試料を

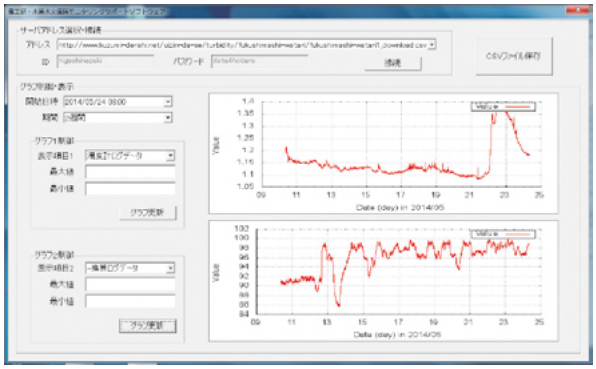


Fig. 3　グラフ化プログラムの画面（PC）
Support software for monitoring and graphing

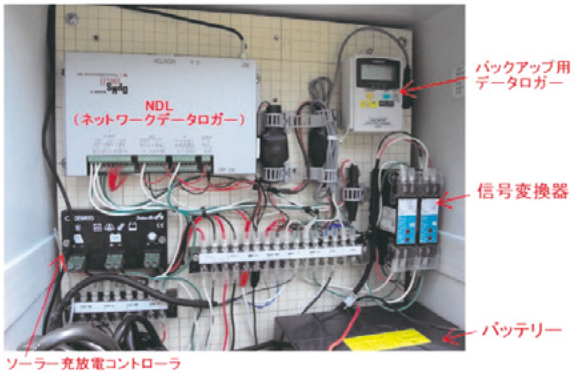
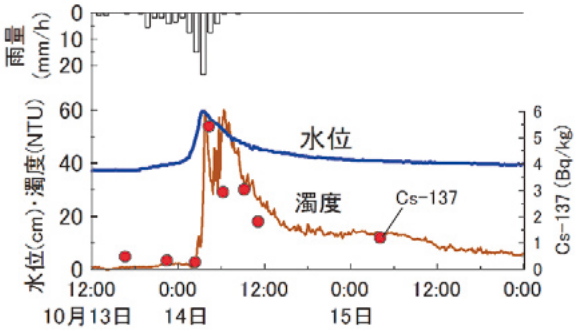


Fig. 4　遠隔監視システムの主要部
Internal photo of observation box of WQRMS

(a)　農業用水路

(b)　農業用水取水口

Fig. 5　遠隔監視システムの設置事例
Installation cases of WQRMS



（福島県飯舘村ため池流出水，2014年10月13日～15日）

Fig. 6　遠隔監視システムにより取得されたデータの例
An example of acquired data by WQRMS

採取することが可能である。また，環境水に含まれる比較的低濃度の放射性Csの分析には，関連する水質分析を含めサンプルの量として3 L程度を要するが，この場合，自動採水器（ISCO3700型）を用いると採水回数は最大で8回に限られることになる。定時採水やセンサーとの単純な連動では，採水回数が限定されている場合，意図したサンプルの取得は困難であることが多い。加えて，本ため池は，立ち入り制限区域にあり，実際に現地で行う採水調査において時間的制約が厳しい中で，本例では，一降雨イベントに対応するため池流出水の濁度変動に追従し，水質試料をタイミングよく採取することに成功している。

3.3　システムのコスト

この遠隔監視システムに要するコストは，濁度観測のみの最小セットを考えると，濁度センサー（約25万円）を含めて合計51万円であった。これに使用する機能により，水温計で1万円，水位計で3～11万円，自動採水器で50万円程度の追加費用を要する。また，通信費とデータサーバ利用費で合わせて月額0.6万円程度がかかる。システムの設置や管理を外部に委託する場合，それらの費用も考慮する必要がある。

Ⅳ　研究方法

本研究では，はじめに，携帯型濁度計により得られた濁度とSSの関係を検討し，次に，遠隔または自記観測により得られた濁度とSSおよびT-P，放射性Csの関係について検討を行うとともに，遠隔または自記記録で濁度観測を実施する際で生じた問題点や課題等について検討を行った。

4.1　携帯型濁度計による濁度とSSの関係の検討

携帯型濁度計による濁度とSSの関係を，福島県内の河川1地点（阿武隈川水系広瀬川・大関，A地点），幹線農業用水路2地点（阿武隈川水系の用水路における上流B地点および中流C地点），支線用水路1地点（福島市内D地点，小河川から引水）および，ため池流出水1地点（福島県相馬郡内ため池E地点（久保田ら，2015b），斜樋流出水）において行った（**Table 1**）。調査期間は，2013年4月より10月とし，採水は，地点A，B，Cでは，流心において表層よりバケツ採水を行い，地点D，Eでは流心で直接採水した。

濁度の現地測定には，携帯型濁度計（東亜DKK製TB-25A）を用いた。TB-25Aは，90度散乱光測定方式であり測定範囲は，0～800 NTU，分解能は1 NTUである。携帯型濁度計を用いた測定では，センサーを河川や用水路に浸けるのではなく，採水したバケツ内の試料水にセンサーを浸漬させて，十分撹拌を行いながら安定した濁度を記録した。ここで，基本的に濁度測定を行ったバケツ内の試料の一部をSS分析に供した。なお，前述のようにSSの分析には，孔径1 μmの濾過材を用いることとなっているが，本研究では，孔径0.4 μmのガラス繊維濾紙（アドバンテック東洋製GB140）を用いた。多数のサンプルで孔径の違いによる影響が小さいことを確認した上で，ここで得られた値をSS値として扱った。

Table 1　調査地点　Study site

地点	属性	調査期間	濁度・SSの現地観測		連続観測		備考
			採水位置／方法	観測回数	濁度	自動採水	
A	河川	2013/4～10	流心・表層／バケツ	72			伊達市梁川町大関
B	農業用水（幹線・上流）	2013/4～ 9	流心・表層／バケツ	15	○	○	阿武隈川水系農業用水
C	農業用水（幹線・中流）	2013/4～ 9	流心・表層／バケツ	12	○	○	阿武隈川水系農業用水
D	農業用水（末端・圃場）	2013/5～ 9	流心／バケツ	7			小河川を起源とする農業用水
E	ため池流出（斜樋）	2013/6～10	流心／バケツ	9	○	○	相馬郡飯館村長泥地区

＊連続観測の濁度の欄は，濁度センサーを用いた連続観測を行った地点（○印）を示し，自動採水の欄は自動採水を行った地点（○印）を示している。

4.2　遠隔／自記観測による濁度と水質項目の関係の検討

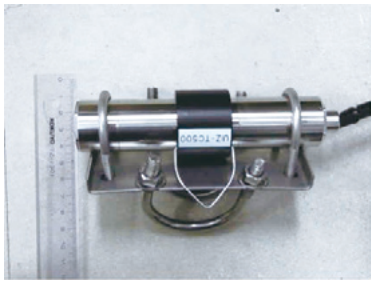
遠隔・自記観測装置により得られた濁度と水質項目の関係を検討した。調査箇所は，千葉県成田市内の印旛沼集水域内の円筒分水工（地点①），および福島県相馬郡内のため池（久保田ら，2015b）の2本の流入渓流（地点②および地点③）である。このうち，地点①と③では，自動採水器を用いて，定時または，増水時の採水を行い，地点②では，遠隔採水を行った。また，定期的に人手による現地採水も実施した。

観測地点では濁度を10～20分毎に連続観測を行った。濁度の連続観測には，濁度センサー（ウイジン製 UIZ-TC）を用いた。この濁度センサーには，透過光方式の濁度センサー（**Fig. 7**）で観測前に光源・受光面窓の拭き取りを行うワイパーによる洗浄装置が付いている。本濁度センサーは，12Vの印可電圧を必要とし，測定範囲は事前に次の3つから選択する。3つの測定範囲は，0～100度，0～500度，0～3000度であり，各レンジにおいて4-20 mAの電流値を出力する。本研究で，この濁度センサーを選択した理由は，対象とする濁度のレンジが選択できるとともに，洗浄装置が付いていること，価格が安価であること，による。

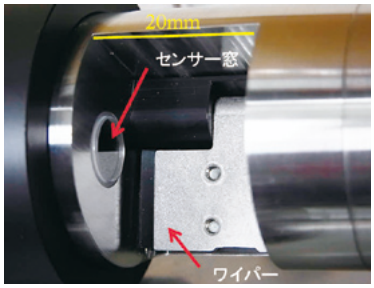
濁度の連続観測に合わせて自動採水器を設置し，定時採水や遠隔制御により採水を行い，持ち帰った試料のSS濃度およびT-P濃度の測定を行った。また，地点③の試料では，Cs-137の測定を行った。

水質分析では，SS濃度は前節と同様に行い，T-P濃度は，ペルオキソ二硫酸カリウムを用いたオートクレーブ分解後に，モリブデン青吸光光度法で定量した。また，放射性Csの分析では，ゲルマニウム半導体検出器を用いて，2 Lまたは0.7 Lマリネリ容器を用いてCs-134とCs-137の定量を行った。その際，検出限界は，試料水の濁りの状態から経験的に0.1～1 Bq/Lの範囲で設定した。結果と考察では，低濃度のため定量下限を下回ることがあるCs-134を除いたCs-137を検討対象とした。

遠隔／自記観測と自動採水器を用いた観測においては，4.1の試験とは異なり，濁度観測の対象水塊と採水され分析に供された水は一致しない。その要因は，センサー観測と採水のタイミングに最大5分程度の時間的なズレと，設置環境の制約から生じるセンサーと採水器の位置の空間的なズレである。このようなセンサー観測と採水の時間的空間的なズレは，平水時の小水路や渓流等においてはほとんど影響しない。しかし，増水時の河川や人為的なポンプ操作などの影響を受ける水域等では，センサー観測の対象水塊と採水された水の水質は，一部で大きく異なる可能性がある。そのため，得られたセンサー値と分析値のデータセットにおいて，その関係式から±2σ以上外れるものについては外れ値として扱った。本研究では，数多くの観測値のセットを得て，関係式を求めることでズレによる影響は平均化され，その影響は



(a) 濁度センサーの外観と取付金具
Externals and installation fittings



(b) センサー部（拡大）

Fig. 7　透過光式濁度計
Transmitted type turbidity sensor

相対的に小さくなるものと考えた。

Ⅴ　結果と考察

5.1　携帯型濁度計による濁度とSSの関係

携帯型濁度計による濁度とSSの関係を**Fig. 8～9**に示す。それぞれ地点のデータ数は，**Table 1**に示した観測回数と一致する。

A地点では，平水時に加えていくつかの増水イベントに対応するデータが含まれているため，比較的広範囲の濁度とSSとの関係が得られた（**Fig. 8**）。回帰曲線は直線型（原点通過）において十分に高い重相関係数が得られたものの，低濃度の範囲では，プロットが近似直線からやや外れているため，累乗型回帰曲線を別途算定したところ，低濃度での適合性に改善が見られた。なお，累乗型では，低濃度領域における適合性を高めるため，重み付き（1/Yi）最小自乗法によりパラメータを求めた。

BからEの各地点においてもおおむね濁度とSSに比例関係が確認され，E地点を除くと0.9程度以上の高い寄与率であった。得られた回帰曲線の傾きと寄与率はそれぞれ，B地点で1.52と0.87，C地点で1.94と0.94，D地点で1.27と0.97，E地点で1.09と0.20であった。

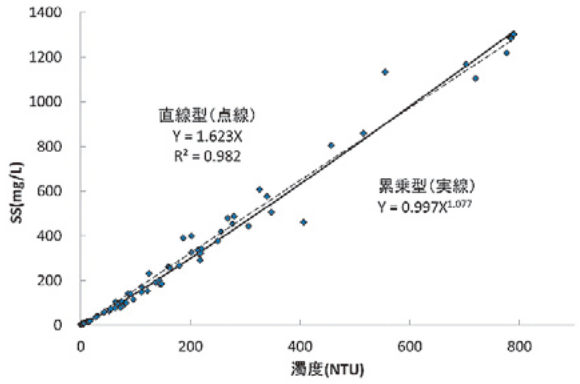


Fig. 8　携帯型濁度計による濁度とSSの関係（A地点）
Relation between turbidity with porTable meter and SS (site A)

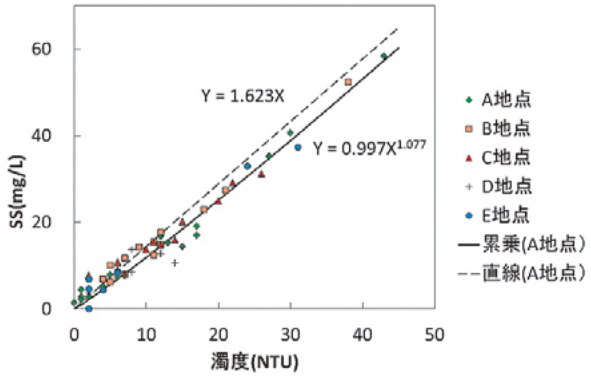


Fig. 9　濁度とSSの関係（A～E地点，低濃度）
Relation between turbidity and SS (site A-E, low concentration)

以上のように，福島県内の河川および農業用水路等の5地点における濁度とSSの関係を表す回帰曲線の傾きは，おおむね1.1～1.9程度の範囲であった。その中で濁度が数10NTU以下の低い濃度範囲しか得られていないC，D，Eの3地点では，近似直線の傾きは1.1～1.9とややバラツキが大きかったが，100 NTUを超えるデータが得られたAおよびB地点では，傾きは1.5～1.6である。これは，**Fig. 8**で見たように回帰曲線が厳密にはやや下に凸の緩やかな累乗関数型を示すことが影響していると考えられる。このように考えると，C，D，Eの3地点においてもし高濃度までデータが得られれば近似直線の傾きがより大きくなる可能性がある。

Fig. 9にこれら5地点の濁度とSSの関係を1枚の図に重ねた。**Fig. 9**からは，データが十分にない高濁度の領域を除き，少なくとも40 NTU程度までは，A地点の累乗型回帰曲線（$Y = 0.997X^{1.077}$）を用いて濁度からSS濃度を推定することができる。A地点の2種類の回帰曲線に対する地点B～Eのデータの適合性をみるため，平均二乗誤差の平方根（RMSE）を用いて評価した。RMSEは0に近いほど適合度がよいことを示しているが，A，B地点は，両近似式で大差がなく，A地点では，全データと濁度が低いものを比較すると，上でみたように濁度が低い領域では累乗型の適合がよかった。また，C～E地点では，累乗型の方がやや優れていることがわかった。

これまで，河川水を対象とした濁度とSSの関係またはそれを利用して土砂流出量の推定等を行った研究事例は少なくない。山口ら（2000）は，石狩川の3地点を対象として積分球式光電光度法による濁度計の観測値からSSに換算を行い流砂量の推定を行っている。この研究では濁度として500～1000度を超える観測値が得られており，そのときに得られた濁度とSSの比例定数は1.19～1.74であり，本研究で得られた値の範囲とほぼ一致する。また，横山ら（2008）は，筑後川流域の17地点において後方散乱光型濁度センサーによる濁度連続観測からSSの流出特性を推定した。その結果，濁度とSSの関係では，300～400 ppm程度までの低濁度では，河川に

Table 2　**Fig. 9**の各地点および各近似式に対するRMSE
RMSE to the sites and each approximate expressions

地点	データ数	RMSE		備考
		直線式	累乗式	
A	72	47.8	47.7	全データ
A	43	23.1	14.3	濁度が160NTU以下のもの
B	15	25.3	24.7	
C	12	5.4	2.6	
D	7	5.8	2.7	
E	9	5.1	2.8	

よる違いは大きくないが，濁度が500 ppmを超えると違いは拡大し，流域特性により関係性がグループ分けできることを示した。ここでは，濁度とSSの関係は累乗関数で整理されている。本研究では，地点によって得られた濁度の範囲が異なるため現時点では十分な検討はできない。

5.2　遠隔／自記観測による濁度からのSS，T-P濃度の推定

遠隔／自記観測による濁度観測とSS，T-P濃度の関係を**Fig. 10**～**Fig. 12**に示す。回帰曲線は直線型で示した。

濁度とSSの関係（**Fig. 10**）は，地点①と地点②において，寄与率がそれぞれ，良好であった。決定係数と標準誤差は，地点①においてそれぞれ0.82と0.70，地点②において，それぞれ0.72と0.86であった。濁度値を用いたSSの推定は概ね妥当であると考えられた。

次に，SSとT-Pの関係を見ると，濁度とSSの関係ほど良好ではないが，決定係数は地点①で0.72，地点②で0.75と一定の関係が得られており，SSの値からT-P濃度の簡易推定が可能であると考えられる。

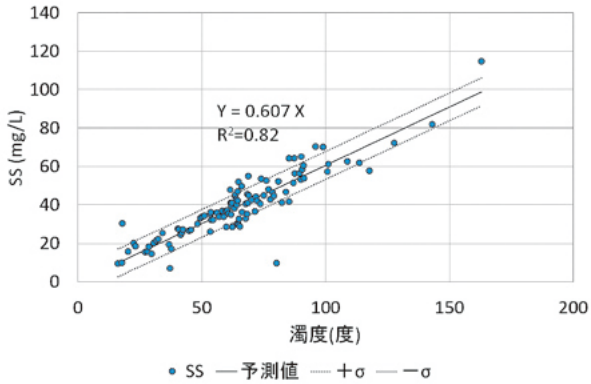
以上のように，2ヶ所の検討例を見てきたが，濁度センサー受光部への汚れの固着が問題にならないところであれば，濁度からSSの連続的な推定は容易であることがわかった。特に地点②では，濁度とSSの傾きが1.4と，5.1で検討を行ったものと同程度であり，濁度センサーの種類は異なるものの，この程度の傾きをもつ回帰直線でSSの簡易推定が可能である。さらに，濁度からSSの連続的な推定が可能な地点であれば，濁度センサーの出力から，T-P濃度の推定が可能ということになる。

ただし，これらの関係は，多分に経験的なものであり，SSまたは濁度からT-Pを推定するためには，本研究のようにそれぞれの測定地点において両者の関係を実測によって求める必要がある。また，都市排水などT-Pの人為的な排水が卓越する河川など，SSとT-Pの相関が低い場合などには適用は難しい可能性も考えられる。従って，この方法の適用性が高い水域は，T-Pについて人為の影響が小さい自然流域であることが推察される。

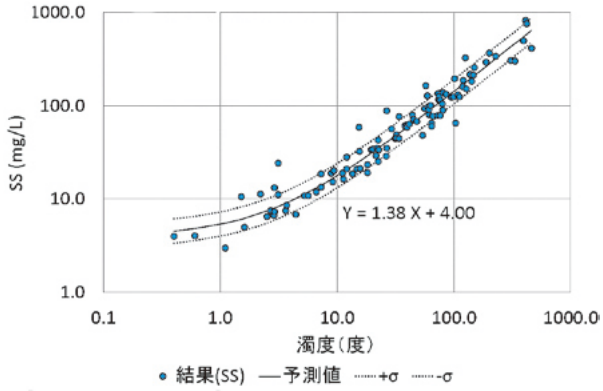
5.3　濁度観測によるCs-137の推定

濁度観測を用いて懸濁態を中心とする放射性Cs濃度の推定を行うことはこれまでいくつかの研究機関，大学等で試みられている（例えば，申ら（2015））。

地点③において濁度とSSおよびCs-137の関係を検討した結果を**Fig. 13**に示す。

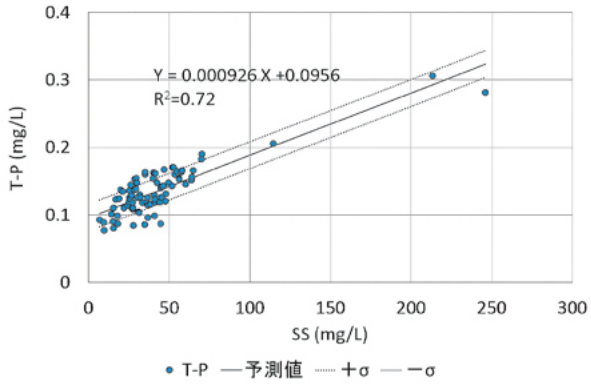


（a）地点①

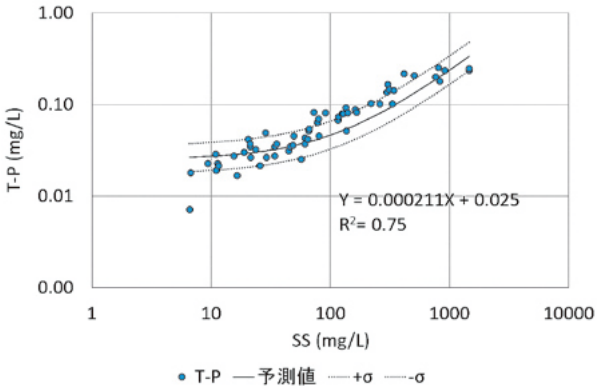


（b）地点②

Fig. 10　濁度とSSの関係
Relationship between turbidity and SS



（a）地点①



（b）地点②

Fig. 11　SSとT-Pの関係
Relationship between SS and T-P

Fig. 13（**a**）は，**Fig. 10**（**c**）と同じ地点のものであるが，観測期間が一部異なるため，近似直線の傾きも多少異なっている。

濁度とCs-137濃度の関係は，T-Pの場合と同様にややバラツキは大きいものの直線関係で示される（**Fig. 13**（**b**））。このことは，濁度当たりのCs-137濃度，すなわち懸濁物質に含まれるCs-137濃度が，大まかに見ると，一定と仮定できることを示している。また，回帰曲線のy切片は，濁度0のときのCs-137濃度であり，それは，観測期間における平均の溶存態Cs-137濃度を示すことになる。

5.4　濁度センサーを用いた水質の遠隔監視上の問題

濁度センサーを用いた水質の遠隔監視上の問題点と課題をいくつか挙げる。

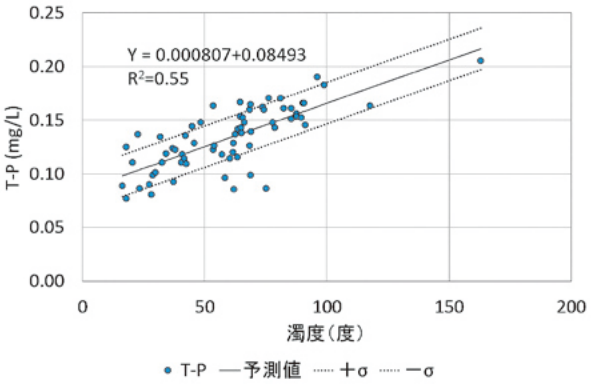
はじめに，携帯回線を用いた遠隔監視システムについて述べる。本システムでは，当然ながら携帯回線の通信状況の影響を受ける。電波条件がやや悪い箇所へ設置したケースでは，大雨時などに携帯通信に障害が発生し欠測が生じた。現行のシステムでは，システム本体にはデータ保存を行っていないため，通信障害によってデータサーバにデータが届かないと，復元不可能な欠測となる。

今回使用している携帯通信で使用される周波数帯は，必ずしも電波の降雨減衰を受けやすいものではない。しかし，通信条件が良好でない場所に設置する場合，豪雨時の降雨減衰が影響する可能性がある。その場合，対策としては，データロガー内の不揮発性メモリ（メモリーカード等）にもデータを保持するなど，データの二重化を図る必要がある。また，これまで3年間の運用で直接の被害はなく，また，現状では対策を行っていないが，避雷対策も重要であろう。

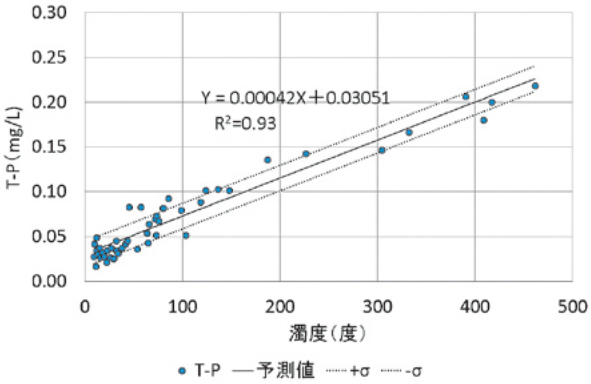
関連して，現在，無線機器を接続し，中継することで，電波が弱い，または届かない箇所での遠隔監視ができないか試行中である。さらに，この無線機器により1本の携帯回線で複数箇所のセンサーの監視や自動採水器の制御について試みを行っている。

また，遠隔監視システムでは，精密機器であるデータロガーや通信システムが，高低温や高湿度など過酷な気象条件下に晒されることから，機器の設置や維持管理において細心の配慮が必要である。具体的には，使用条件を超えた温度での運用や多湿による電子回路の腐食や短絡，部品劣化，昆虫・小動物などの影響排除である。

筆者らの例では，寒冷地に設置したシステムで，冬期

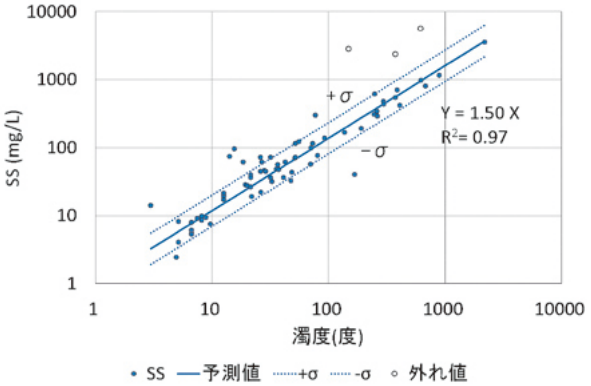


（a）地点①

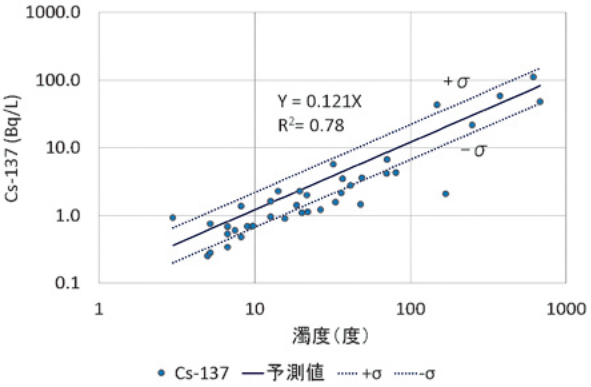


（b）地点②

Fig. 12　濁度とT-Pの関係
Relationship between turbidity and T-P



（a）濁度とSSの関係



（b）濁度とCs-137の関係

Fig. 13　地点③における濁度とSS，Cs-137の関係
Relationship between turbidity and SS or Cs-137 at site 3

間にネットワークデータロガーの基盤にクモが入り込んで巣を作り，回路を短絡させる故障があった（**Fig. 14**）。このような機器は，野外での長期運用になることから，当然ながら防湿，対候，防塵性を含め耐久性のある構造とすることが欠かせない。

また，電源はソーラーパネルとバッテリーの組合せで長期観測への対応ができるようになっているが，日照に制限がある場合への対策は課題である。

次に，濁度センサーの設置および維持管理上の問題について述べる。濁度センサーによる観測の問題は，主に，①設置場所と方法，②ゴミや堆積物による光路阻害，③受光部への物質の付着，に起因する。

濁度センサーの設置では，光路部を流水が通過するように固定することが基本であるが，そのような場所は一般にゴミ等が引っかかりやすい。また，特に低水時に水位が河床近くまで低下する場所では，流路の河床にセンサーを取り付ける必要があるが，その際，増水時には浮遊砂ではなく掃流砂を捉えてしまう可能性がある（**Fig. 15**）。このほか，センサーを河床近くに設置している場合では，出水時に堆砂に埋没してしまうケースがあった。

また，センサーは，濁質の堆積や滞留を避けるため，開孔率が低い保護管は使用すべきでなく，目の粗い頑丈な格子状の保護管を使うか，センサーを剥き出しに設置することが望ましい。

一方，センサーを剥き出しで設置すると流下物の接触により破損する危険性がある。比較的よく管理された水路においても，一部でゴミや水草の引っかかりによる光路阻害によりスパイク状に発生する一時的な異常値もしくは長期間の欠測などが生じた。

また，ため池斜樋からの流出水の観測では，観測値のベースラインが上昇するという現象が見られた。本センサーは定期的なワイパーの動作により，通常の付着物や堆積物であれば影響を受けることは少ないが，透過窓表面への汚れの固着による影響は避けられない。このケースでは，堤体内で生じた湧水に含まれる鉄イオンが受光窓に鉄酸化物として沈着した影響と考えられた。

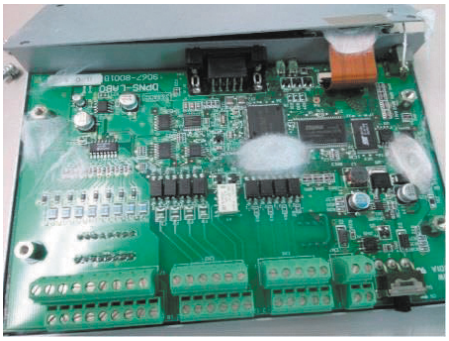
5.5　濁度計を用いた遠隔監視技術の活用と課題

濁度による遠隔監視の導入が容易になっていることは前述の通りである。従来，栄養塩の動態把握は，定期的な水質調査によるところが大きかったが，低平地の農地流域では，用排水機場の稼働や降雨時など自然流域と比べて非定常的な水の動きが多く，SSやT-Pなどの動態もより複雑で把握は困難であった。しかし，比較的低コストの濁度センサーで，SSに加えて栄養塩の把握も可能となれば，営農においても環境保全が求められ，閉鎖性水域の集水域などでは，さらなる負荷削減対策が求められる中で，本技術の活用による現況の把握や，水管理への活用が期待される。

2010年度に，千葉県印旛沼二期地区では全国初の水質保全型国営かんがい排水事業が着手された。この事業では従来施設の更新に併せて循環灌漑施設を整備し，農業用水の安定供給だけでなく，流域の水質保全にも寄与することを目的としている。

循環灌漑の強化では，従来，用水として利用していた印旛沼の水に加えて，地区内の農業排水が集まる低地排水路の水を積極的に再利用することで，印旛沼に流出する負荷の削減を目指している。窒素やリンなどの栄養塩の直接的なモニタリングはコストが嵩むが，ここで検討したように，濁度センサーを用いた簡易的な栄養塩負荷推定法を用いれば比較的低コストで栄養塩の監視が可能となる。今後，実際に対象流域で適用可能か，検討を行う必要がある。

また，印旛沼流域では，現在のところ，揚水機場の水管理において，循環灌漑で使用する水は，低地排水路と印旛沼の水を混合して使用することを予定している。ここで，例えば，2つの水源の水量と水質をリアルタイムで遠隔監視を行い，循環灌漑施設において，両者の水位や水質に応じて，環境保全上有利となるよう取水水源の切り替えを行えば，負荷流出をより低減する水管理が実



観測箱に侵入したクモが基板上に巣をつくったため，回路がショートし，修理不能となったネットワークデータロガー

Fig. 14　電子機器のトラブルの事例
A trouble of network data logger by invasion of spiders

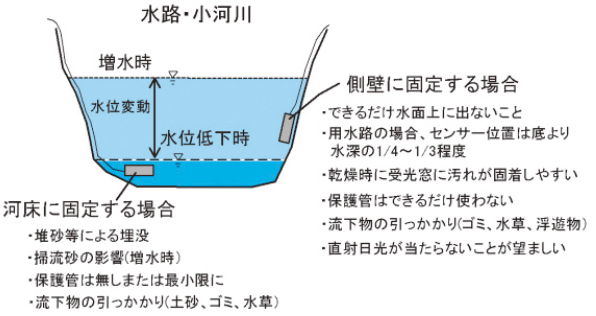


Fig. 15　濁度センサー設置時の考慮事項
Consideration matter for installation of turbidity sensor

現する可能性がある（**Fig. 16**）。そのためには，効果を定量的に評価するとともに，技術とコスト，耐久性などの観点から導入可能な遠隔監視，制御システムの開発が求められる。

今回使用した観測システムは，比較的低価格で導入可能であり，維持管理も容易であることから，研究の他，初期投資や維持管理の費用の確保が難しい中小規模の土地改良区等でも活用の可能性がある。

Ⅵ　結　言

本報では，農業水利施設等への導入を想定した小規模，低コストの水質遠隔監視システムを紹介するとともに，問題点についてまとめた。また，連続観測が容易な濁度センサーを用いた遠隔／自記観測により，連続観測がコスト的に難しい水質項目の簡易推定について検討を行った。摘要を以下に示す。

ⅰ）濁度からSSの推定ができれば，簡易的にT-P濃度や放射性Cs濃度の推定が可能であることが確認された。

ⅱ）濁度観測によってSS濃度が精度よく推定できることが確認された。SS濃度は，濁度を用いて近似直線で精度よく表すことができるが，累乗型の回帰曲線を適用すると，低濃度の領域の適合性が改善される。

ⅲ）異なる水源をもつ5地点における河川水・農業用水に対して，濁度が40NTU程度までの比較的低濃度の濁水に含まれるSS濃度は，近似的に1本の累乗型回帰曲線（$Y = 0.997X^{1.077}$）によって推定することが可能であった。

ⅳ）低平地の水域などの一部の地点では，濁度センサーに固着する汚れの影響で，濁度センサーの長期設置によるSS濃度やT-P濃度の簡易推定は困難であった。

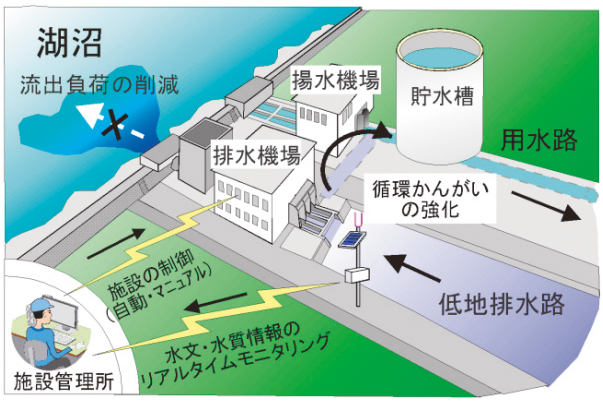


Fig. 16　循環灌漑地区における水質遠隔監視の活用
Use of WQRMS in cyclic irrigation management

謝辞：本研究の実施にあたっては，関東農政局印旛沼二期事業所，東北農政局，福島県，関係土地改良区等の協力を得た。また，本研究の一部は，SIP(水管理)および農水プロ「営農再開」の支援により実施した。記して謝意を表する。

参考文献

Evrard O, Laceby JP, Lepage H, Onda Y, Cerdan O, Ayrault S (2015): Radiocesium transfer from hillslopes to the Pacific Ocean after the Fukushima Nuclear Power Plant accident: A review, *J. of Environ Radioact*, **148**, 92-110

平野順子（2013）：濁度計の測定方式と濁度標準液,かんきょう **112**，8-19

池田英史（2012）：森林流域からの土壌流出の実態・支配因子と予測モデル開発の現状と課題，水文・水資源学会誌，**25**（**6**），396-409

川西澄，山本洋久，余越正一郎（1998）：超音波流速計と散乱光式濁度計を用いた懸濁粒子の濁度，粒径，フラックスの測定，水工学論文集，**42**，559-564

久保田富次郎，吉永育生，原貴洋，島武男，高嶺典子，生駒泰基（2011）：国頭マージ地帯における新規作物導入による赤土流出低減と栄養塩の流出，農業農村工学会大会講演要旨集，500-501

久保田富次郎，田渕尚一，濵田康治，申文浩（2015a）：遠隔監視による濁度・水文観測の課題と今後の活用，農業農村工学会誌，**83**（**2**），97-100

久保田富次郎，申文浩，濵田康治，人見忠良（2015b）：阿武隈高原に立地するNため池における水中の放射性セシウムのモニタリング，農村工学研究所技報，**217**，85-100

黒木幹男（2006）：流域学事典－人間による川と大地の変貌，新谷融，黒木幹男編著，北海道大学出版会，**102**

国土交通省（2009）：河川水質試験法（案），**58**

松尾宏，熊谷博史，楢崎幸範，田中義人，白川ゆかり（2008）：都市河川における亜鉛の流出特性とその存在形態，福岡県保健環境研究所年報，**35**，98-101

長沢徹明，片岡隆四，梅田安治，桜田純司（1987）：濁度計による河川浮流土砂量の推定，農業土木学会論文集，**125**，81-87

長澤徹明，井上京，横山慎司（2000）：降雨時における浮流土砂流送挙動―農林地流域河川の浮流土砂流送に関する研究（Ⅰ）―，農業土木学会論文集，**208**，1-6

中達雄，穴瀬真，鬼塚宏太郎，島崎昌彦（1992）：渦動排砂管を用いた造成地内の流出土砂制御工法の実用化，農業土木学会論文集，**161**，91-97

中達雄，島崎昌彦，樽屋啓之（2008）：畑地圃場から流出する微細土砂の制御工法，農業農村工学会論文集，**255**，69-75

大澤和敏，池田俊介，久保田龍三郎，赤松良久（2008）：石垣島名蔵川流域における土砂輸送に関する長期観測およびWEPPの検証，水工学論文集，**52**，577-582

申文浩，久保田富次郎，濵田康治，人見忠良（2015）：農業用

水の放射性Csのリアルタイム予測と水管理への展開，農業農村工学会誌，**83**（**1**），35-38

塩野隆弘，奥島修二，髙木東，福本昌人（2004）：黒ボク土畝立て圃場の土壌浸食に対するキャベツ栽培の影響，農業土木学会論文集，**230**，1-9

Shiono T, Yamamoto N, Haraguchi N, Yoshinaga A (2007): Performance of grass strips for sediment control in Okinawa, *JARQ*, **41(4)**, 291-297

末次忠司，日下部隆昭，坊野聡子（2005）：土砂管理施策のためのキーノート～土砂動態の時空間的不連続性を考慮した流域管理に向けて～，国土技術政策総合研究所資料，**231**，35-45

山口甲，三田村一弘，渡辺浩司（2000）：大河川における濁度観測値による土砂輸送量の計算，水工学論文集，**44**，401-406

山本博，遅澤省子，石原暁，花野義雄（1995）：四国の急傾斜畑地におけるマルチングの土壌侵食防止効果，土壌の物理性，**71**，41-46

山本浩一，二村貴幸，坂野章，日下部隆昭，末次忠司，横山勝英（2003）：濁度計による懸濁態栄養塩負荷推定に関する研究，河川技術論文集，**9**，515-520

横山勝英（2008）：多点濁度観測による筑後川水系のSS流出・輸送特性に関する研究，水工学論文集，**52**，553-558

横山勝英（2002）：濁度計の粒径依存特性と現地使用方法に関する考察，土木学会論文集，**698/II-58**，93-98

受理年月日：平成27年10月30日

Remote observation of turbidity and estimation of concentrations of suspended solids, total phosphorus and radioactive Cs in irrigation facilities

KUBOTA Tomijiro*, HAMADA Koji*,HITOMI Tadayoshi* and SHIN Moono**

*Department of Hydraulic Research Division
**Agricultural Radiation Research Center, Tohoku Agricultural Research Center, NARO

Abstract

With the development of the information and communications technology (ICT) , remote observation and control of irrigation water is becoming easy and less costly with each year. However, more sophisticated technology would still be required for future irrigation management with environmental considerations such as conservation of water quality. In this study, a low-cost remote observation system for monitoring water quality was investigated and methods for estimating concentrations of suspended solids, total phosphorus, and radioactive cesium by the system using the output of turbidity sensors were evaluated. The proposed system could achieve remote water sampling at an arbitrary time through PCs or smartphones. This feature enables safe water sampling in restricted areas or during stormy weather. The overall features of the system are as follows: i) 8 analogue inputs for analogue sensors and 2 digital inputs for rainfall gauges; ii) remote water sampling at arbitrary times through PCs or smartphones; iii) utilization of mobile communication line ; and iv) 10 min interval for default observation . Good correlations were found not only between turbidity and total suspended solids but also between turbidity and total phosphorus. The concentrations of total suspended solids and total phosphorus could be estimated from turbidity values using these relationships . Furthermore, the concentrations of radioactive Cs could also be estimated in a similar manner.

Key words: total phosphorus, radioactive cesium, turbidity, suspended solids, remote monitoring system