

震災からの復旧過程における農業用水の 塩分濃度モニタリング

友正達美* 谷本 岳* 内村 求*

*農地基盤工学研究領域用水管理担当

キーワード：地震，地盤沈下，農業用水，塩分濃度モニタリング，電気伝導度，水稲

I 緒言

平成23年東北地方太平洋沖地震の発生から2年を経過し、被災農地の復旧は、被害の大きかった沿岸部や河川沿岸が中心となりつつある。こうした沿岸部や河川沿岸では、水門等の水利施設が津波で損壊し、さらに地盤沈下によって、河川への塩水浸入が見られる。こうした河川が農業用水の水源となっている場合、塩水浸入は農地の復旧や営農再開の大きな妨げとなる。筆者らは、北上川下流左岸の皿貝川を対象に、2012年5月から9月まで農業用水の電気伝導度（EC）観測による塩分濃度モニタリングを行い、ECは時間的な変動が大きいことから、モニタリングは営農再開の時点だけでなく、継続的に行うこと、また塩害を回避するためにリアルタイムでECの観測値がわかる方法で行うことの必要性を明らかにした（友正ら，2013）。

本稿では、その後継続して行っている塩分濃度モニタリングの2013年9月までの結果、および2013年5月から試行している塩害回避のためのリアルタイムのモニタリングの結果を報告する。また、これまでの調査結果を踏まえて、震災後の被害調査、復旧、営農再開の各段階に応じたモニタリングの方法について検討する。

II 塩分濃度モニタリングの対象と方法

2.1 モニタリングの対象

農業用水の塩分濃度モニタリングの対象は、北上川下流左岸の支流、皿貝川の下流である（Fig.1）。2011年3月11日の東日本大震災の津波により、北上川との合流点（北上川河口より上流3.0km）にある月浜第一水門が被災し、周辺一帯の農地は冠水した。北上川下流の地盤は平均で約0.8m沈下した（遠藤ら，2011）。

その後、2011年6月に月浜第一水門が応急復旧、2013年3～4月に付帯する防潮水門が復旧した。皿貝川下流左岸の大長尾（月浜第一水門より上流2.4km）、小長尾（月浜第一水門より上流3.3km）で農業用水を取水する水田では、2012年5月から水稲作が再開された。営農再開時には農業用水の塩分濃度に異常がないことが確認されて

いたが、出穂後の2012年8月には農業用水が原因と見られる塩害が発生した（Fig.2）。

これを受けて、翌2013年の水稲作について、宮城県では、皿貝川下流左岸の水田に代替水源として北上大堰（北上川河口から上流17.2km）で取水した農業用水を送水し、大長尾、小長尾における皿貝川からの取水を停止する対策を取った。この水田は、震災以前から実施中の土地改良事業により、北上大堰からの用水に切り替える計画となっており、皿貝川右岸の幹線水路から大長尾、小長尾の中間付近で左岸側に送水するサイホンが建設済みであった。そのため、このサイホン出口に仮設の管路を設置して大長尾、小長尾に送水することが可能であった。しかしながら、更に皿貝川の上流左岸の曾呂美（月浜第一水門より4.5km）では、地形勾配からサイホンからの送水が困難なため、皿貝川からの取水が継続された。

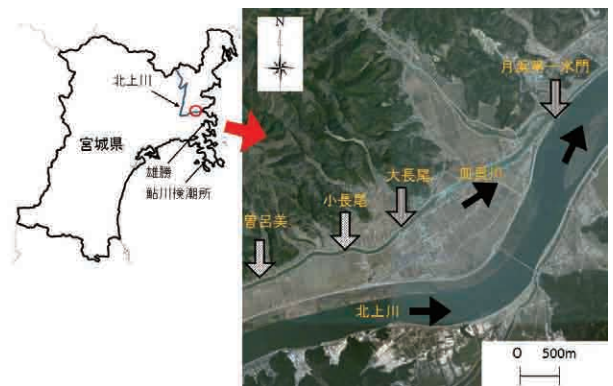


Fig.1 皿貝川とモニタリング地点の位置
Location of Sarakai River and EC monitoring points



Fig.2 2012年に発生した水稲の塩害
Rice damaged from salt water, in 2012

2.2 モニタリングの方法

a ECロガーによるモニタリング

大長尾、小長尾では、2012年5月より、ECセンサーと観測データを蓄積するロガーが一体となったECロガー（Hobo社製U-24、測定範囲0～15mS/cm、精度±3%）による農業用水のモニタリングを行っている。ECロガーは大長尾、小長尾の取水地点に各2個ずつ、設置時（2012年5月16日）の水面から深さ0.8m（浅部）、2.0m（深部）とし、10分間隔でECを記録した。なお、浅部のECロガーの位置は、大長尾、小長尾でポンプに接続している取水ホースの呑み口高さと同様一致させている。

b ECデータ送信システムによるモニタリング

2013年に皿貝川からの取水を行う曾呂美では、塩分濃度が上昇した場合に取水を停止する用水管理を行うことを意図して、新たにECデータ送信システムを導入し、2013年5月15日よりモニタリングを開始した。

ECデータ送信システムは、ECを観測し、その値を指定したメールアドレスにメールで送信するものである（Fig.3）。これによって、用水管理者はECの観測値をリアルタイムで把握でき、それに応じた用水管理を行うことができる。

ECデータ送信システムはECセンサー、メール送信器、電源から構成される。ECセンサー（東邦マーカントイル社製AQUA watcher、測定範囲0.05～100mS/cm、精度±0.5%+0.001mS/cm）は、取水するホースの先端付近（水深約1.2m）に設置した。EC観測の時間間隔、メールの送信間隔はそれぞれ任意に設定できるが、用水管理者と協議して、メール受信の回数があまり多すぎず、かつ、用水管理を行う上で実用的な頻度として、試行的に1時間間隔、毎正時に観測しメール送信することとした。電源は外部からの電力供給を必要としないよう、太陽光パネルとバッテリーを使用した。

c ECに応じた用水管理の検討

曾呂美におけるECデータ送信システムによるリアルタイムのモニタリングの結果に応じて、具体的にどのような用水管理を行うかを検討した。

水田かんがい用水におけるECの基準としては、農業（水稲）用水基準では0.3mS/cm以下となっている。ま



Fig.3 ECデータ送信システム
EC data-mail sending system

た、島根県が行った試験では1.5mS/cm以上でコシヒカリ等の収量に大きな影響があった（道上ら、1998）。またIRRIでは2.0mS/cm以上はかんがいに適さないとしている（IRRI、2009）。

皿貝川からの取水の場合、2012年かんがい期の塩分濃度モニタリングの結果（友正ら、2013）から、農業用水基準（水稲）の0.3mS/cmを基準とすると、取水可能な日数が少なくなりすぎる恐れがあった。そのため、塩害による減収をなるべく回避するという観点から、1.5mS/cm以上の場合に原則として取水停止、2.0mS/cm以上の場合に取水停止することとした。農業用水の塩分濃度がこの基準を超えても、かんがい時に田面に湛水があれば希釈されるため、直ちに水稲が高濃度の塩水にさらされるわけではない。しかし、田面湛水の有無や量は水田の水管理によって異なるため、用水管理上安全側の措置として、これらの基準で取水を停止することとした。

また、用水管理者がメールでECが基準を超えたことを把握してから、実際に取水を停止するまでには、施設を操作する者への連絡、移動等に一定の時間を要し、この間に基準値を超える用水が水田に送水される。特に夜間は、メールの確認遅れなどにより、対応までの時間が長くなるおそれがある。そのため、ECが上記の1.5mS/cmに達する以前に、用水管理者、耕作者の双方が、取水停止に備える準備段階を設けることとした。この取水停止に向けた準備に入る基準値は、ECの作物への影響ではなく、用水管理の作業上の目安とする値である。ここでは、2012年のECのモニタリング結果、および概ね1時間程度で用水管理上の対応が可能との聞き取り結果に基づいて、試行的に1.0mS/cmに設定した。以上の検討に基づいて作成した、ECに応じた用水管理の案をTable 1に示す。

III 塩分濃度モニタリングの結果

a ECロガーによるモニタリングの結果

2012年5月から2013年9月までの、大長尾、小長尾でのECロガーによる塩分濃度モニタリングの結果をFig.4に示す。全体的な経過としては、2012年は測定開始後にECは2.0mS/cmを超えて大きく上昇するようになった。翌2013年の3月から4月にかけてECは大幅に低下し、5月以降は前年より全体的に低い水準で推移した。

ただし、2013年5月以降に、ECの上昇が全く見られなくなったわけではない。2013年5月から9月のECの

Table 1 ECに応じた用水管理（案）
Irrigation management plan according to EC level of water

EC(mS/cm)	用水管理
1.0以下	(通常通りに取水)
1.0～1.5	取水停止に備える準備段階。EC上昇の速度、用水管理上の対応時間を考慮してこの範囲を設定する。更なるEC上昇に即応できるよう、夜間かんがいの停止、農家への注意喚起などを行う。
1.5～2.0	減収が発生する濃度。異常渇水時を除き、原則として取水を停止する。
2.0以上	塩害が発生する濃度。取水を停止する。

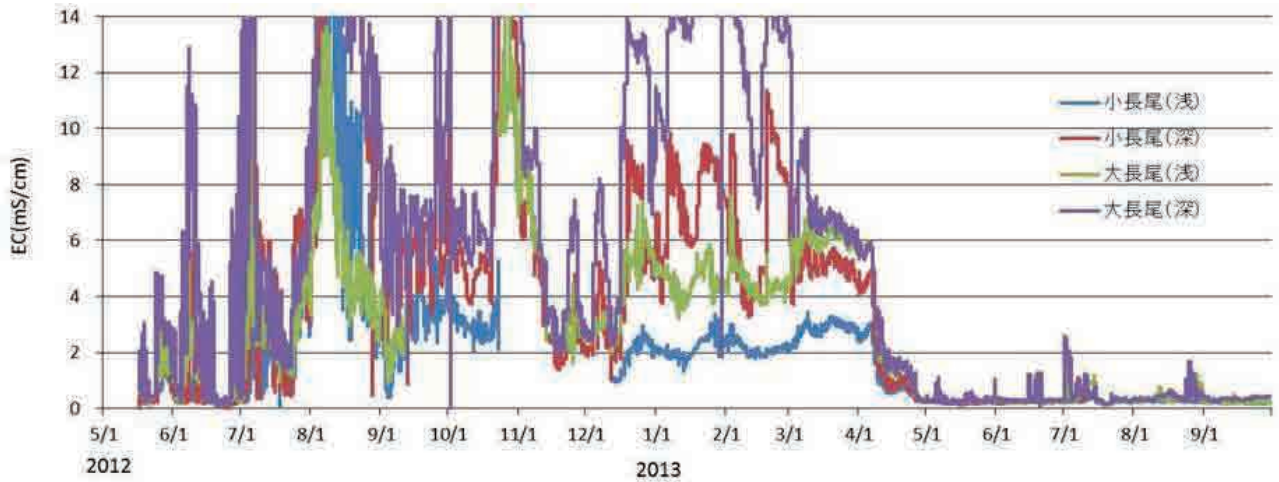


Fig.4 大長尾, 小長尾における EC の推移 (2012年5月~2013年9月)
Trend of EC at Ohnagao and Konagao May.2012-Sep.2013

推移を Fig.5 に示す。大長尾では、7月1日から2日にかけて、2.0mS/cm を超える EC の上昇が観測された。同時期に小長尾では7月2日に1.2mS/cm の最大値を観測した。

b ECデータ送信システムによるモニタリングの結果

ECデータ送信システムを設置した曾呂美では、システムの運用を開始した2013年5月15日以降、9月30日までECは最大値で0.3mS/cmと低い水準で推移した。その最大値を記録した、7月1日の大長尾, 小長尾, 曾呂美の観測値の推移を Fig.6 に示す。

7月1日に大長尾では2.0mS/cm を超える EC の上昇が観測されているが、曾呂美では0.3mS/cm と EC の変動はほとんど見られていない。

こうした経過から、曾呂美では Table 1 の EC に応じた用水管理 (案) は実施に移されることはなく、また、かんがい用水が原因と考えられるような塩害の発生も見られなかった。

IV 考察

4.1 ECの変動に関係する要因とモニタリングの重要性

Fig.4 に示した EC の推移から、皿貝川への塩水浸入は、2013年3月~4月の月浜第一水門に付帯する防潮水門の復旧によって、大きく減少したと考えられる。ただし、Fig.5 に示したような一時的な EC の上昇が見られることから、塩水浸入が完全に防止されたわけではない。皿貝川および北上川下流周辺では、河川堤防, 水門等の復旧, 改修工事が現在も継続して実施されており、今後も、これらの進捗によって塩水浸入の起こりやすさが変化する可能性がある。

また、皿貝川への塩水浸入の有無や程度に関連する要因として、潮汐や降雨が考えられる。2013年のかんがい期における日最大潮位 (最寄りの鮎川) の推移と、大長尾において EC が 1.0mS/cm を超えた期間を Fig.7 に示す。

EC が 1.0mS/cm を超えた時期は、潮位上昇から 5~6

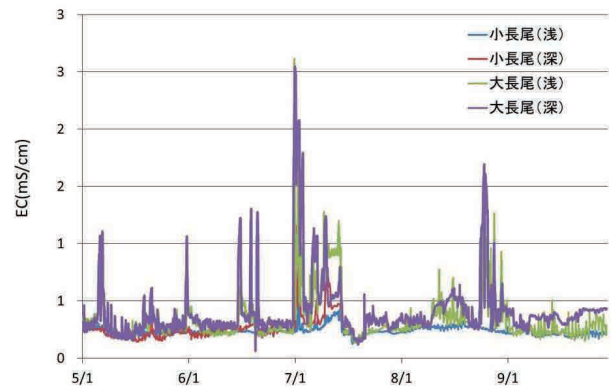


Fig.5 大長尾, 小長尾における EC の推移
(2013年5月~9月)

Trend of EC at Ohnagao and Konagao during irrigation period

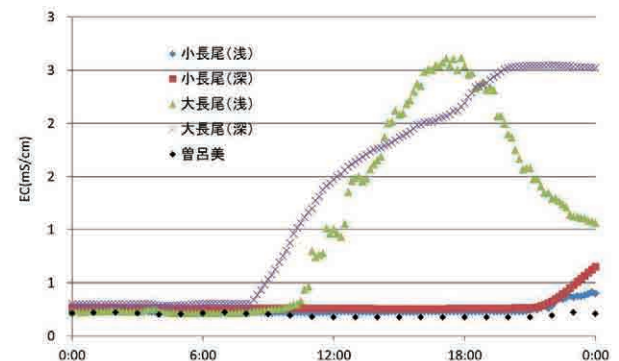


Fig.6 2013年7月1日の EC の推移
Trend of EC on July 1 2013

日後に発生しているが、他方、5月~9月の期間中に最も高い潮位となった7月下旬の前後に EC の上昇が見られないなど、その対応関係は明確ではない。

かんがい期間中の最寄りのアメダス地点 (雄勝) における 2012年, 2013年, 平年の旬別降水量を Fig.8 に示す。

2013年は7月上旬まで少雨傾向, 7月中旬に大きな降雨量が観測され, それ以降は平年に近い傾向で推移した。

Fig.7 において, 2013年の7月下旬の前後に, 大長尾で

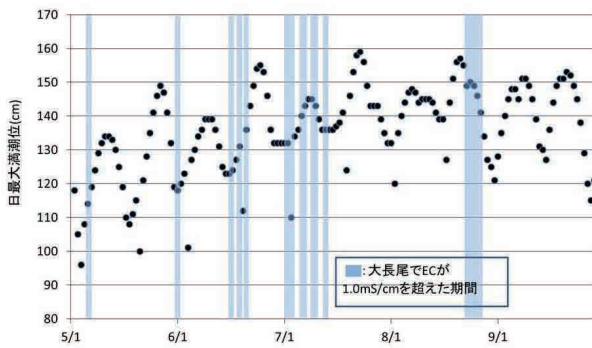


Fig.7 2013年かんがい期の日最大潮位（鮎川）と大長尾におけるECの上昇時期

The highest tide levels in a day at Ayukawa and high EC days at Ohnagao monitoring point during irrigation period 2013

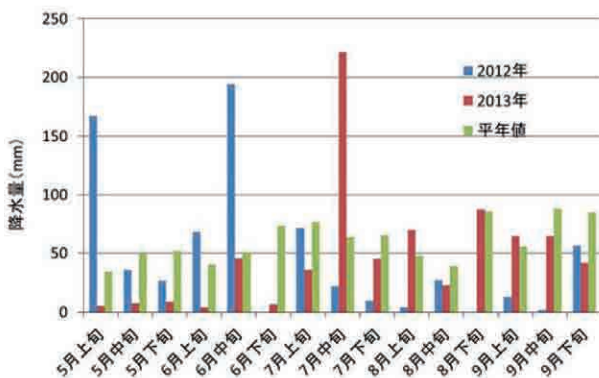


Fig.8 かんがい期の降水量（雄勝）

The precipitation at Ogatsu during irrigation period 2013

潮位が高い時期においても 1.0mS/cm を超える EC の上昇が見られなかった理由として、この大きな降雨量が影響した可能性が考えられる。

皿貝川最下流の月浜第一水門の操作は、内外水位差に基づいて行われており、潮位の変動の他、降雨流出による北上川本川、皿貝川の流量によって影響を受ける。そのため、年ごとによって異なる降雨は、潮位と共に塩水浸入に影響を及ぼすと考えられるが、その過程は複雑である。2012年は6月中旬に大きな降雨がありそれ以降は少雨傾向であった。2013年は7月下旬以降の降雨量は概ね平年並みであった。月浜第一水門に付帯する防潮水門が復旧した2013年も皿貝川下流では Fig.5 に示したような塩水浸入が観測されているが、今後、2012年のように夏期に少雨傾向になった場合、塩水浸入がどのように変化するかは不明である。塩水浸入がどこまで到達するかについても、皿貝川の河床勾配が下流部で $1/2,000$ から $1/3,000$ と非常に小さく（宮城県，2003），地形的条件から判断することは難しい。

このように、農業用水の取水河川への塩水浸入には、周辺の水利施設の復旧の状況、潮位、降雨等の要因が影響しており、その程度や範囲を事前に予測することは難しいことから、実際のモニタリングに基づいて、復旧計

画の策定や、用水管理を実施することが重要と考えられる。

4.2 ECデータ送信システムによる用水管理の有効性

ECデータ送信システムを設置した曾呂美では、前述の通り Table 1 の基準に達するような EC の上昇は観測されず、取水停止等の具体的な用水管理は行われなかった。しかしながら、聞き取りでは、用水管理者は EC データ送信システムの有効性を高く評価しており、少なくとも2014年のかんがい期初めまでの継続的なモニタリングを希望している。曾呂美では、塩害が発生した翌年に同じ水源から取水せざるを得なかったことから、リアルタイムでモニタリングを行いながら取水できたことの安心感は大きいとのことであった。

次に、もし今後、曾呂美で EC の上昇があった場合、Table 1 の用水管理が行うことが可能かどうかを、Fig.6 の2013年7月1日の観測値から検討する。大長尾（浅部）での EC 上昇は、 1.0mS/cm を超えてから 1.5mS/cm に達するまで約2時間、 1.5mS/cm から 2.0mS/cm に達するまで約2時間を要した。前述のように、用水管理者はメールで EC の上昇を知ってから、概ね1時間で対応可能である。そのため、EC 上昇がこれ以上早くならなければ、試行した毎正時のデータ送信の設定で、Table 1 の EC に応じた用水管理は可能と考えられる。

更に、もし仮に、曾呂美より下流の大長尾、小長尾で代替水源が確保できず、皿貝川からの取水を継続せざるを得なかった場合、ECデータ送信システムによる用水管理によって、水稲作が可能であったかを検討する。Fig.5 から、大長尾では、EC が7月に一時的に 2.0mS/cm を超えており、ECデータ送信システムによる用水管理が行われていた場合、取水が完全停止となったのは7月1～2日の2日間のみであったと考えられる。また、小長尾では、2013年かんがい期間中の EC の最大値は 1.2mS/cm であり、EC がこれ以上上昇しない間に取水するよう農家に注意喚起が行われた程度で、取水停止等には至らなかったと考えられる。

以上のことから、塩水浸入の懸念がある場合、農業用水の安全を確認しつつ取水したり、塩分濃度が上昇した場合に取水を停止する等の用水管理を行ったりする場合には、ECデータ送信システムによるリアルタイムのモニタリングは有効な方法であると言える。

ただし、上記の考察はあくまで結果論であって、月浜第一水門の防潮水門の復旧によって、皿貝川への塩水浸入がどの程度抑止できるかは、2013年のかんがい開始の時点では不明であった。従って、代替水源の確保が可能な場合は、それが第一の選択肢であり、EC に応じた用水管理は次善の対策である。

4.3 復旧段階に応じたモニタリングの方法

2012年5月からの継続的なモニタリングによって、塩

水浸入は、潮汐、降雨等の変動だけでなく、農地の復旧と同時並行で進められている周辺の河川堤防、水門等の復旧・改修によって影響を受け、変化していく実態を捉えることができた。また、地震によって大きく沈下した地盤そのものが、余効変動によって徐々に隆起する現象が観測されており（飛田ほか、2012）、今後、塩水浸入に影響を及ぼすことも考えられる。

従って、塩分濃度モニタリングは、農地の復旧後、営農再開の時点で安全確認のために行うだけでは不十分であり、震災発生後の復旧の段階ごとに、必要に応じて方法を変えながら継続して行う必要がある。

その際、モニタリングの実施には、機器の入手の難易、時間、予算、マンパワー等、災害後の様々な制約を考慮しなければならない。そこで、復旧段階に応じたモニタリング方法について検討する。

Table 2に、用水管理者および著者が、調査対象の皿貝川およびその周辺の被災地で実際に使用しているECモニタリング機器について、経験的に感じられた特徴および適した使用方法を示す。

モニタリングの目的、機器の特性、制約要因等を考慮すると、各段階に応じておおよそ以下のようなモニタリング方法が望ましいと考えられる。

a 調査段階

震災発生後は、取水施設本体の被害状況の把握と同時期に、農業用水の水質、特に塩水浸入の有無と程度を把握することがモニタリングの主な目的となる。取水地点で塩水浸入が確認された場合は、深さ方向の濃度分布を把握するとともに、周辺の主要な地点に計測対象を広げ、調査時点での塩水浸入の規模と範囲を概定する必要がある。モニタリング方法としては、準備しやすい、携帯型EC計による、ある調査日の一斉観測が一般的であろう。

その後、塩分濃度の時間的、季節的な変動を把握するため、継続的な塩分モニタリングを行うことが望ましい。観測地点は、取水地点の他、主要な水路、河川との合流点付近などを選定する。観測水深は、用水の取水深さの

他、塩水浸入を観測しやすい河床、水路床付近に設定する。モニタリングの結果から、農業用水の水源を、塩分濃度が常に高く使用できない水源、塩分濃度上昇が一時的に上昇する水源、塩分濃度上昇のおそれの少ない水源、等に区分して、復旧計画の策定に反映させることができる。機器としては、携帯型EC計でも可能であるが、多地点での継続的なモニタリングを行うにはマンパワーが不足しやすい。主要な観測点にECロガーを設置すれば、機器コストは必要であるが、モニタリングに必要なマンパワーを大幅に節約できる。

b 復旧段階

復旧計画の策定において、塩分濃度が常に高い水源は、代替水源の確保が必要となる。塩分濃度が一時的に上昇する水源は、代替水源を確保することが望ましいが、それが難しい場合、塩分濃度が高い時だけ使用を停止する用水管理のためのモニタリング方法を検討する。その際、取水河川の水利施設の復旧等によって、将来的に塩水浸入の解消が期待できる場合には、本調査で導入したような、ECデータ送信システムを導入して、その結果を用水管理に反映させる方法でよい。しかし、将来にわたって一時的な塩水浸入の解消が期待できない場合には、モニタリング機器を取水施設の一部に組み込んで、ECに応じた用水管理を自動的に行うような、恒久的な施設整備を行うことがより望ましい。

農地復旧の進捗が相対的に早く、復旧計画の策定までに十分な塩分濃度モニタリングの期間がない場合、2012年に皿貝川で経験したような、営農再開時に予期していない塩分濃度の上昇に備える必要がある。復旧工事の実施期間中も含めて、取水周辺でECロガーや携帯型EC計による定期的なモニタリングを行い、取水地点には安全確認のためECデータ送信システムを設置することが望ましい。塩水浸入が観測された場合には、対策を取り入れた復旧計画へと変更する。

c 営農再開段階

事前に塩分濃度が一時的に上昇することが分かっており、かつ代替水源が確保できない場合は、ECに応じた用水管理のために、また、塩分濃度上昇のおそれの少ない水源では取水の安全確認のために、ECデータ送信システムを設置する。また、周辺の復旧工事の進捗、地盤の余効変動による隆起・沈降の影響を把握するため、ECロガーや携帯型EC計による定点観測でモニタリングを実施する。

数年程度モニタリングを継続し、将来的にも塩水浸入の懸念がないと判断されればモニタリングを終了する。なお、モニタリング終了後の機器類は、次に復旧を進める地区に移設して使用することができる。

Table 2 ECモニタリング機器の特徴と適した使用方法
Features and typical usage of EC monitoring instruments

機器	特徴	適した使用方法
携帯型EC計	・観測値は測定時にリアルタイムでわかる。 ・観測点、観測頻度が多くなると労力を要する。	・被災直後の広域的な概査 ・特定の地点での定期的な安全確認
ECロガー	・観測値はまとめて回収するためリアルタイムではわからない。 ・観測点、観測頻度が多い場合に労力を節約できる。 ・設置数に応じてコストを要する(1カ所8万円程度)	・復旧前後を通じた長期的な観測
ECデータ送信システム	・観測値はリアルタイムで遠隔地でもわかる。 ・機器、設置、通信にコストを要する(1カ所年間100万円程度)	・営農再開後の安全確認 ・流域の復旧が進捗するまで短期的な用水管理 ・安全が確認されたら撤去、他の地区に移設
ECで自動制御する取水施設	・観測値に応じて送水の停止、再開を自動的に行う。	・塩水浸入が長期的に続く場合の用水管理

V 結 言

北上川下流左岸の津波被災地を対象に、2012年5月から農業用水の塩分濃度モニタリングを行った。また2013年5月から新たにECデータ送信システムを導入して用水の安全性の確認を行い、ECに応じた用水管理の案を作成した。その結果、農業用水への塩水侵入は、河川の水利施設の復旧の進捗により変化することが明らかになった。また、農業用水への塩水侵入の懸念がある場合、ECデータ送信システムによる用水管理が有効であることが確認された。更に、これらの結果から、震災復旧における調査、復旧、営農再開の各段階においての、塩分濃度モニタリングの望ましい方法について検討した。

なお、この調査を行うにあたり、宮城県および北上川沿岸土地改良区の関係者各位には多大なご協力をいただいた。記して謝意を表す。

参考文献

遠藤希実, 大沼克弘, 天野邦彦 (2011) : 東北地方太平洋沖地震に伴う地盤沈下が汽水域植生に与える影響の分析, 河川技

術論文集, 18, 53-58.

IRRI (2009): Rice Knowledge Bank, Rice Doctor, Salinity,

<http://www.knowledgebank.irri.org/RiceDoctor/information-sheets-mainmenu-2730/deficiencies-and-toxicities-mainmenu-2734/salinity-mainmenu-2753.html>

道上伸宏, 伊藤淳次 (1998) : 水稻 ‘コシヒカリ’ ‘ときめき35’ の塩分耐性, 近畿中国四国農業研究センター, 1998年度(平成10年度)近畿中国農業研究成果情報, 生産環境推進部会, http://www.naro.affrc.go.jp/org/warc/research_results/h10/kankyo/cgk98074.html.

宮城県 (2003) : 北上川 (1) 流域河川整備計画, 2,

<http://www.pref.miyagi.jp/uploaded/attachment/42691.pdf>

飛田幹男, 木村久夫 (2012) : 余効変動の推移と今後の隆起・沈降の見通しについて, 地震予知連絡会会報87, 535-538, http://cais.gsi.go.jp/YOCHIREN/report/kaihou87/12_10.pdf

友正達美, 坂田賢, 内村求 (2013) : 平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震により地盤沈下した取水河川における農業用水の塩分濃度モニタリングの必要性, 農工研技報214, 25-30.

受理年月日：平成25年12月5日

Salt Concentration Monitoring of Irrigation Water During the Recovery Process from the Earthquake Disaster

TOMOSHO Tatsumi*, TANIMOTO Takeshi* and UCHIMURA Motomu*

*Agricultural Environment Engineering Research Division, Irrigation Management

Summary

Salt concentration of irrigation water from a river in the ground subsidence area by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake is monitored by using the electric conductivity (EC) loggers at 2 points, and an EC data-mail sending system for irrigation management at 1 point. An irrigation management plan according to EC level monitored by the EC data-mail sending system is prepared.

The EC of irrigation water became lower after the restoration of the water gate at downstream, before the 2013 irrigation period. During 2013 irrigation period, the EC level was low for the most time, but raised once over 2mS/cm at the downstream.

The result of EC monitoring suggests that the EC data-mail sending system is useful for irrigation management in the area where the EC of water is not sure after resume of farming. In the disaster-struck area, salt concentration monitoring should be continued according to the recovery process. The outline of the effective monitoring for the each recovering stage is discussed.

Keywords : earthquake, ground subsidence, irrigation water, salt concentration monitoring, electric conductivity, rice

