

〔農工研技報 214〕  
〔241～249, 2013〕

## レベル2津波対策における沿岸農地・排水施設系の 調査・点検上の留意点

中矢哲郎\* 桐 博英\* 丹治 肇\*

\* 水理工学研究領域沿岸域水理担当

キーワード：レベル2津波，減災農地，除塩，排水施設，防潮堤，海水浸透

### I 緒言

2011年3月11に発生した東日本大震災に伴う大津波の被災地においては、海岸保全施設の設計方針と復旧、地域の津波防災計画の策定が急務となっている。今後の海岸保全施設の復旧・設計方針については、津波災害の実態を踏まえて土木学会より提示されている（今村ら，2012）。ここでは、すべての人命を守ることを前提とした上で、数十年～百数十年に一回の頻度で発生すると考えられる津波防護レベル（L1）、津波防護レベルをはるかに上回り、構造物対策の適用限界を超過する津波減災レベル（L2）の二つの津波レベルを設定している。L1津波では堤内地の浸水を防止するように計画・設計され、L2津波では堤内地の浸水を許容するが、破壊・倒壊をしにくく、被害が拡大しないように計画・設計される。

これまで海岸保全施設の設計においては越流を許容した計画ではなかったために、堤内地浸水後の農地・水利施設の外力評価、経済的損失の軽減や二次災害の防止、早期復旧など、L1津波対策にない防護目標に関しては、今回の津波災害の実態を踏まえた検討が今後は必要である。

よって本報告では、東日本大震災津波による農業地域の被害状況、復旧復興状況の現時点における調査結果等を踏まえて、今後発生が想定されるL2津波に対する減災のために、農業地域の事前の調査・点検事項および事後の対策項目について、その内容と留意点を速報として整理した。そして今後各地域で検討される具体的な点検・調査手法の基礎資料とすることを目的とした。

### II 東日本大震災津波の復旧状況

東日本大震災にともなう大津波から1年以上経過した現在においても、被災地では復旧・復興への取り組みが継続しており、平成24年3月11日現在で農地の復旧面積割合は32.9%にとどまっている（農林水産省，2012）。2004年インド洋津波は過去最大規模の被害を出したが、一年後には復旧をほぼ復旧を達成していた（中矢ら，2006）。このことは、今回の災害が社会基盤の整備が進

んだ地域での前例にない被災状況であったことを示している。

甚大な被害を受けた仙台平野南部の事例を見ると、直線的に平坦な地形が続く海岸線に多数配置された、洪水時および常時の排水機場のほとんどが壊滅的に被災し、湛水被害が継続した（丹治ら，2012a）。津波による浸水深は名取市沿岸部で4～6m、亘理町・山元町沿岸部は6～12m、浸水距離は名取市は5km、亘理・山元町で4kmにまで及び（東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ，2012）、家屋倒壊や瓦礫、車の散乱や人的被害など甚大な被害を受けた。この地区の津波被災農地面積合計は5,147haであり被災前農地の80%の農地の被害を生じた。被災から1年経過後における農地復旧面積割合は38%であり、排水施設の復旧の遅れによる排水環境の不備により十分な除塩効果が得られない報告や（千葉ら，2012）、排水流域全域で平均すると40cm程度の地盤沈下が生じたこと、地下水環境の流動停滞により地下水塩分濃度が震災以降上昇したままであることや（森ら，2012）、海水浸透により排水路が塩水化している傾向にあることも報告されている（中矢ら，2013）。

### III 調査・点検個所の概要

IIで示した大規模な地盤沈下や排水施設の被災による長期間の湛水や海水浸透、塩害の長期化などは、これまで経験したことがない被害内容であり、被災地および津波危険地域でのL2津波対策においては優先的に調査・点検を行う必要がある。よって、本報告においては農業地域全体の調査・点検項目として全体の網羅には不十分であるが、現時点での被災地の復旧事例、被災事例を中心に点検・調査における留意点としてまとめる。

Table 1に調査・点検個所の枠組みを示す。点検対象は、Fig.1に示すような沿岸域農業地域における、広域防災、排水機場、農地の大きく3項目に分けた。L2津波の発生の可能性は、数十年～百年以上という長期間の対策であるため、災害に対する備えや危機感が時期とともに薄れる傾向にある。よって津波が発生した場合の想定を常に考えるために、点検内容を事前点検と被災時の事後点

検の二つを考慮する案とした。常時点検は被災時の備えのための点検であり、被災時の事後の点検は迅速な復旧、二次災害防止対策としての点検に焦点をあてている。また、農地の塩害の長期化と排水施設系の被害の関係は、その復旧と密接にかかわりあっていることが被災事例で明らかになっているために、農地排水と広域排水との関連を考慮しながら点検を行う。農地においては、生活基盤としての農業の迅速な復旧は、経済性を含めた地域全体の復興につながるため、津波浸水後の迅速な復旧を目的として点検を行う。

以下に各項目における具体的な調査・点検上の留意点を記す。

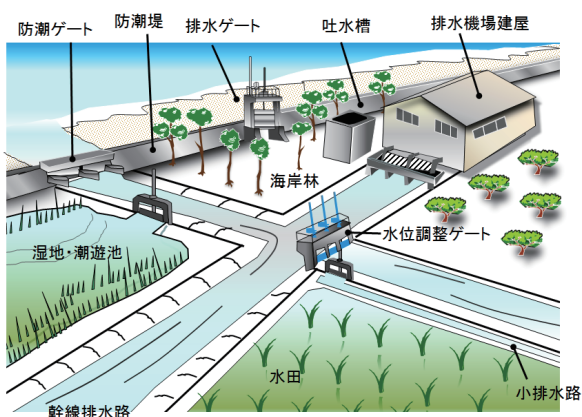


Fig.1 沿岸部農業地域の津波に対する点検箇所

The key items for inspection in a coastal agricultural area for preparing countermeasures against tsunami

Table 1 主要な点検箇所の基本的な枠組み  
A framework of items for investigation

点検対象		点検項目	
		事前点検	事後点検
広域防災		海岸保全施設 減災農地の効果 避難計画 警報システム 過去津波情報整理	警報システム 避難経路確保 安全確保 海岸保全施設 被災状況把握
排水施設系	排水機場	機場の耐水化、電源の確保、吐水槽の配置、非常時開口部の確保	電源状況、排水機能状況、必要排水量、瓦礫流入状況、破損箇所
	ゲート・樋門	自然排水機能の確保、瓦礫除去口確保	瓦礫状況、破損状況、作動状況、排水機能
	排水路	自然排水機能の確保、浸食防止工	瓦礫状況、破損状況、排水機能
農地		除塩計画 小排水路、暗渠の排水機能 塩水侵入状況	塩害実態 除塩水確保 小排水路・暗渠の排水機能 塩水侵入状況

## IV 調査・点検上の留意点

### 1 広域防災機能の調査・点検上の留意点

#### a 海岸保全施設

被災した海岸堤防等の復旧に関しては、海岸における津波対策検討委員会(2011)より基本的な考え方が示されている。また、設計対象の津波高を超えた場合でも施設の効果が発揮できる「粘り強い構造」が提案されている。その基本的な考え方は、①設計対象の津波高を超え、海岸堤防の天端を越流した場合であっても、施設が破壊、倒壊するまでの時間を少しでも長くする、②施設が完全に流失した状態である全壊に至る可能性を少しでも減らす、といった減災効果を目指した構造上の工夫を施すこと、としている。

津波越流による堤防破壊メカニズムは、大きく以下の三つのパターンに分けられている(渡邊ら, 2012)。

- ①緩傾斜護岸の堤防背後が津波の越流によって洗掘され乗っていたコンクリートが流出すること、
- ②直立堤防を越流した津波により地盤が洗掘され安定性を失い倒れるもの、
- ③これらの組み合わせだった場合

実際に仙台湾南部海岸では堤防復旧イメージが記されており、地震前の堤防断面から、断面を拡大し裏法尻保護、裏法被覆強化、堤防天端強化を行い天端標高をTP6.2mからTP7.2mにする提案がなされている(佐藤ら, 2012)。これらの検討は海岸堤防の復旧が速やかに進むために必要な内容を取りまとめたものであり、粘り強い海岸堤防の構造については、以下の点等について検討を要する。①堤防断面の拡大による十分な締め固め方法、②堤体盛土自体の耐力強化、③堤体内の残留空気等による揚圧力対策、などである。なお、粘り強い堤防の構造の検討については、国総研により引き続き検討されており、逐次検討結果の速報が行われている(国土交通省, 2012)。

既存の海岸堤防等については、これまでも一定の機能を発揮してきたことも考慮すべきである。具体的な防護効果として、釜石における津波被災の例では、流速が5割減、津波高が4割減、防潮堤を超える時間は6分遅延したとされている。一方で10m以上の津波堤防の決壊は甚大な人的被害をまねく結果にもなっているため、海岸堤防は万能ではなく、津波は堤防を越流するという前提にたちその効果を事前より把握することで、警報システムや避難方法とあわせる防災計画にする必要がある。

#### b 減災農地

海岸保全施設により津波の侵入を完全に阻止しようとするには、広範囲にわたり10mを超す堤防をつくることになり、時間的、財政的にも現実的ではない。よって盛土構造の活用、地域計画、土地利用規制等による多重的な防護機能を備えた減災対策を講じるべきことが提唱されている(今村ら, 2012)。津波対策を費用対便益の面

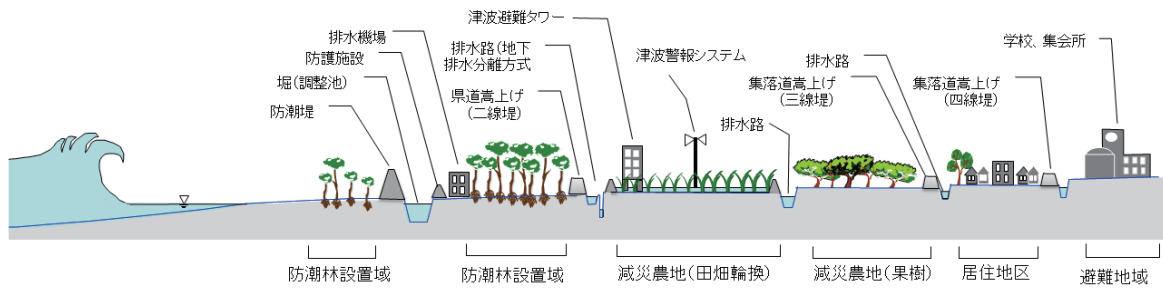


Fig.2 排水対策、海岸林、土地利用を考慮した減災農地の例

An example of tsunami mitigation for farmland by providing drainage measures, coastal forest, and land use

から分析した場合に、津波の被害を防止する防災対策は不可能であることも丹治(2012b)によって示されている。

農業地域における多重的防護として、粘り強い防潮堤に加え、堤防背後の農地を棚田のように段差を設けた圃区として整備し、堤防を越流する津波を減勢する減災農地という考え方が農村工学研究所より提案されている(毛利・丹治, 2012)。さらに、農地の侵食や崩壊の防止や、津波の湛水の排除と日常時の汎用農地化のための排水施設、除塩に必要な灌漑施設を高い位置に設置するなどの整備も可能である。このように、減災農地は津波減勢のみならず、津波遡上、塩害分布、排水、土地利用を含んだ広域の防災対策を考慮することで、農地・水利施設被災後の早期復旧と二次災害防止効果、日常時の生産性向上も期待することができる。よって減災農地を事業として成立させるために必要な条件として丹治(2012b)によって提示されている、①農地の生産性が向上する、②農地の利用で地域の防災機能が向上する、ことを満たすことが期待できる。減災農地は地域の特性に応じて様々な計画案に適用できる。Fig.2に、海岸林、潮遊池を津波緩衝帯として設置し、減勢効果や、被災後の海岸浸透による農地の二次災害を防除する機能を付加した減災農地の例を示す。堤防裏の排水路や潮遊池、湿地は水流と混合することで乱流抵抗となり減勢効果が期待できる。また海岸林を用いた減災対策(松富ら(2005), Kobayashi(2005))は、食用や燃料とすることで生活基盤の復旧にもなり、インド洋津波後の復旧復興対策として多くの国で採用された。

c 津波減勢効果の調査手法

L2津波発生時における津波波力、浸水深、遡上高を迅速に点検するためには、流体の基礎方程式であるナビエ・ストークス方程式を数値的に解くVOF法を用いた断面二次元解析が実用的である。Fig.3にダム破壊法により段波を発生させ津波を模擬した場合の、減災農地における津波の越流状況の解析結果を示す。本手法は地形変化や海岸林等の障害物を表計算ソフトで簡易に設定でき、入力値も三次元計算や平面二次元計算に比較し少ない利点がある。

一般に公開されている解析手法としては、海岸保全施設の耐波設計などに使用される数値波動水路

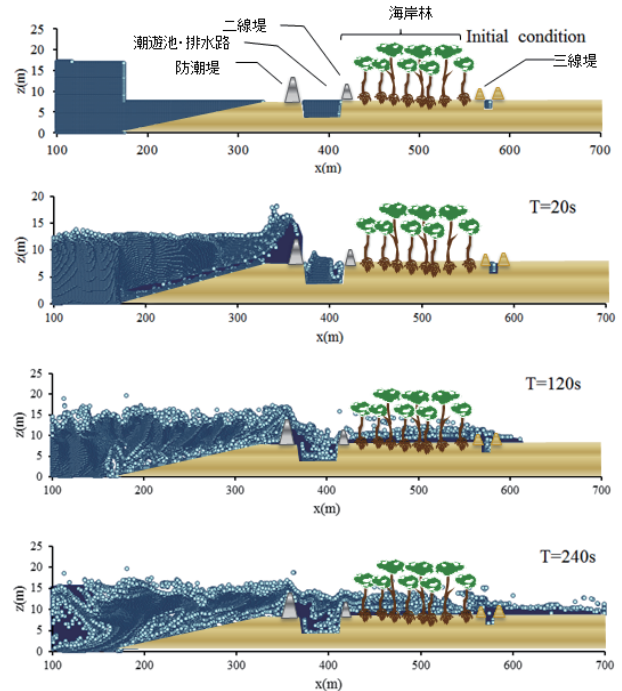


Fig.3 潮遊池・海岸林によるL2津波の減勢効果の数値計算結果 (DX=1m, DY=0.75m, dt=0.001, 津波波高10m)

Results of numerical computation of tsunami energy dissipation by seawall, drainage ditches and coastal forest

(CADMAS-SURF)がある。段波以外でも造波板位置制御法などにより津波を模擬することが可能で、かつ少ない入力項目で簡易に津波の減勢効果の概要を点検でき、同センターのWEBサイトにてプログラムが公開されている(沿岸開発技術研究センター, 2001)。

平面的な津波浸水域の分布を把握したい場合は、平面二次元解析を行い、さらに破堤メカニズムなど詳細を把握したい場合は三次元解析を実施する。

d 避難計画

避難計画は、東日本大震災の教訓を生かしL2津波を基本とした避難計画を作成する。沿岸部農業地域は干拓地を含めて平地部に開かれている箇所が多いため、通常避難場所として選定されうる高台になる場所が非常に少ない。また高齢者も多いため、近距離に避難場所があることが重要である。そこで津波避難タワーを建造することが考えられる(Fig.4)。現在コストの問題から導入が



Fig.4 農業地域における津波避難タワーの例  
A tsunami refuge tower in an agricultural area



Fig.5 排水機場の津波による被災状況  
Damage to a drainage pump station caused by the tsunami

ためられるケースが多いが、津波避難タワーを集会所や、駐車場などとして日常においても多用途に使用することで、生活基盤と一体となり、費用対便益の面で有効性が生じることがある。日常から使用することは防災意識を高めることにもつながり、不測の事態での迅速な対応が期待できる。こうした地域性を具体的に反映した実用性の高いハザードマップの構築も避難の計画に利用する。

#### e 警報システム

大津波に対して人的被害を最小限に抑えるには、警報や情報を待たずに避難するように住民に防災教育、防災訓練をおこなうことが最も重要である。しかし、近年の情報端末の幅広い層への利用状況や、地震波観測、津波観測技術の高精度から積極的に警報システムを利用することで防災効果を高めることが期待できる。GPS波浪計による計測方法は、今回の大津波において来襲時の欠測や破損の例があるため、水圧式波高計など壊れにくい観測設備の開発が必要である。

津波警報システムは安価かつ既整備の防災無線を活用した簡易なものから導入し、高機能化してゆくことが必要であり、長期間のメンテナンスコストや管理体制を確立しておくことを点検しておく必要がある。津波警報の課題と対策については尾崎ら (2012) によってまとめられている。

### 3 排水系施設の調査・点検上の留意点

#### a 排水機場

排水機場は被災後の早期復旧の面から重要な点検事項である。多くの海岸沿いの排水機場が大破に近い被害を出したことから、機場建屋の耐波性を再度優先的に点検する必要がある。津波波力に関しては現在評価方法が検討されており、大別して静水圧型と抗力型が用いられる。ハザードマップから簡単に算定できる方法は飯塚、松富ら (1994) の次式で求められる。

$$F = \frac{1}{2} C_d \rho h B U^2 \quad (1)$$

ここで  $F$ : 津波波力 (N),  $C_d$ : 抵抗係数 (=1),  $\rho$ : 流体密度 ( $\text{kg/m}^3$ ),  $h$ : 水深 (m),  $B$ : 建物の幅 (m),  $U$ : 流速 (m/s) である。

静水圧型の式としては次式が用いられる。(朝倉ら, 2000))

$$F = 4.5 \rho g B h^2 \quad (2)$$

ここで、 $g$ : 重力加速度 ( $\text{m/s}^2$ ) である。なお、建物の破壊基準としては松富らによると、家屋の造り別の大破に至る浸水深、流速と抗力は、鉄筋コンクリート造で7m以上、9.2m/s以上、332-603kN/m以上、コンクリート・ブロック造で7m、9.2m/s、332-603kN/m、木造で2m、4.9m/s、27.4-49.0kN/m、となっている。東日本大震災では10m/s以上の最大流速で鉄筋コンクリート造の建屋も破損しているため、本基準の正しさが検証されている。

吐水槽の配置は、排水機場の耐波化に寄与する点検項目であり、Fig.5のように、建屋の前に吐水槽がない場合は建屋は大破し地域の排水機能の復旧が大きく遅れることになる。しかし建屋の前に吐水槽があることで、大幅に津波を減勢することが可能になり、現地でも建屋の破壊を免れた機場のほとんどが海側に吐水槽が配置されていた。しかし既設の吐水槽の移動は簡単ではないため、機場前面に大型土嚢を用いた簡易な耐波化など実現性の高い対策を行う。

機場の耐水化は、配電盤を高所に移動する方法と、電気系統への覆による防水化があげられる。防水被覆に関しては運転時に異常高温等への配慮も必要になる。

電源の確保は、万が一機場の排水機能が失われた時でも、移動型ポンプを起動する際に大きな役割を担う。系統電源に依存しない、自家発電機等の設置が望ましい。

非常時開口部の確保は、被災した排水機場の修理に必要な機能として点検する必要がある。

#### b ゲート・樋門

津波来襲時の閉門機能と被災後の開門操作による自然排水機能の確保は必須となるが、人力操作では、暴風雨等悪条件の中での操作を強いられる場合や、急激な水位



**Fig.6** 遠隔監視が望まれる海側のゲート  
A tidal gate adjacent the sea requiring remote supervision

上昇時の対応が間に合わないことがある。東日本大震災時においては、ゲート操作で多くの犠牲者が発生した。よって開閉操作には素材の軽量化、遠隔監視制御機能など操作性の改善が必要である。海岸における津波対策検討委員会（2011）においても、水門や陸閘などの遠隔操作化の必要性が提示されている。

ゲートの構造的な点検項目に関しては、国土交通省（2008）より点検マニュアルが提示されている。

### c ゲート・樋門の監視手法

遠隔監視装置の設置が望まれるゲートの例を Fig.6 に示す。遠隔監視制御は、通常大型の排水施設のみ導入の対象とされるが、小規模のゲートであっても日常排水管理で活用することで、運用性が高まり、不測の事態においても適応性が高まることが期待できる。近年は PLC・SCADA により小規模に運用可能な遠隔監視制御が可能になっている（Tom and Gill, 2010）。SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) とは遠隔によるデータ収集・モニタリング・施設制御をパソコンレベルで可能とするオペレーション、インターフェイスであり、PLC とは入出力部を介して各種装置を制御し SCADA に接続する、プログラマブルな命令を記憶するためのメモリを内蔵した電子装置である。PLC は複雑な配線を簡略化でき、リレー盤に比べ格段に小型化が可能であるため、小規模での遠隔監視制御も可能である。また構成機器やプログラム言語は標準化されているため、汎用性のあるシステム構築が可能である。ゲートを対象とした PLC・SCADA システムの基本的なシステム例を Fig.7 に示す。図のようにシンプルかつ汎用性のあるシステムとなるため増設や移設も容易であり、通信手段も携帯電話網から、デジタル簡易無線、防災無線など通信距離や用途に応じて選択が可能になる。

### d 排水路

津波湛水後の自然排水を行う上で重要な施設である。沿岸域の排水路は土水路が多いことから、コンクリートマットや布製型枠により浸食防止工法を施し、排水路の瓦礫除去においても車両進入に際しての軟弱地盤の保護になるため復旧作業性の面で有用である。

## 3 農地の点検・調査上の留意点

スマトラ沖地震津波による農地塩害の事例においては、被災直後は大きな塩害が広域にわたり生じたものの、1000mm 程度の降雨により1年後には営農ができるまでに回復している（中矢ら, 2006）。我が国においても被災から1年経過後1000mm以上の降雨があったにもかかわらず、仙台平野や石巻などの低平地沿岸農地は、1年以上経過した現在においても復旧への取り組みが継続している。

よって、農地の点検においては、津波来襲時の海水の除塩のみならず、今回の津波被災で問題となった、排水機場など大型の水利施設が大きく被災したことによる排水不良や、地盤沈下、地下からの海水浸透など広域排水問題や、圃区レベルの排水機能低下の影響を考慮する必要がある。以下にこれらの影響を考慮した農地塩害対策において考慮すべき事項を整理する。

### a 塩害の指標

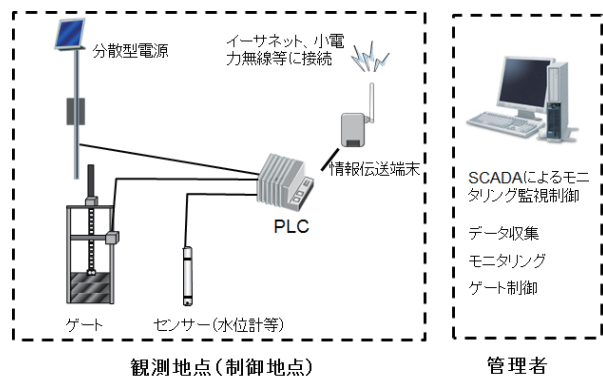
土壌の塩分濃度の指標には電気伝導度（以後  $EC_w$  と記す）を用いる。得られた試料は深さ毎に1:5水浸出法7)に準拠し、EC（以下  $EC(1:5)$  と記す）の測定を行うのが一般的である。EC(1:5)は飽和抽出液のEC（以下  $EC_e$  と記す）よりかなり低い値になることが知られているため、EC(1:5)を  $EC_e$  に換算する際は、 $9.7 \times EC(1:5)$  を用いる（Al-Busaidi et al. 2006）。土壌採取以外でも塩水侵入を受けた農地の土壌電気伝導度を非接触の電磁探査法を用い根圏域のECの水平分布を簡便かつ迅速にマッピングする手法がある（UCIL, 2012）。

塩害土壌の判定には塩害発生地において一般的に用いられている以下の判定基準を用いる（UCIL, 2012）。

- ・非塩類 ( $EC_e < 4dS/m$ )
- ・塩類 ( $EC_e > 4dS/m$ )

なお、作物によって耐塩性は異なり、被災地の作物はほとんどが水田であることから稲の生長限界  $EC_e$  の  $3.0dS/m$  付近が限界とみなせる（FAO, 1992）。灌漑水に関しては以下の判定基準を用いるとよい。

- ・非塩類 ( $EC_w < 0.75$ )



**Fig.7** ゲートを対象とした PLC・SCADA システムの構成例  
An example configuration of a PLC-SCADA system for monitoring and controlling a sluice gate

- ・ 中レベル (0.75 < ECw < 3.0)
- ・ 高レベル (ECw > 3.0)

灌漑水の場合は、蒸発により水位が低下した場合は濃縮され濃度が上昇する傾向にある。

**b 小排水路、暗渠の排水機能**

除塩を行うにあたり、除塩水の排水経路を確保することが必要である。Fig.8 上部に震災後の排水位の状況と、理想的な排水位の関係を示す。まず低平地における震災後の排水位の状況は Fig.9 のように、排水機場の復旧の遅れと、地下からの海水浸透の予防のために排水位と田面水位がほぼ等しくなっている。除塩を促進するために小排水路水位を Fig.8 上部の暗渠排水位の位置まで下げるには、排水機場を運転させ幹線排水路の水位を下げ、自然排水機能を確保する必要がある。しかし沿岸部においては、地下からの海水浸透を考慮し水田内や排水路水位を上げ、地下淡塩境界深を下げている場合がある。Fig.9 の事例も、地下からの塩水浸透の影響に配慮して、水田湛水を行い排水強化を行っていない事例である。

これらの影響を考慮した対策としては、排水路水位を暗渠排水以下にするために、幹線排水路へ残留塩分や浸透による塩分を含めて圃場レベルで排水を行う。このとき Fig.8 下部に示すように、小排水路からポンプで幹線

排水路へ排水し、幹線排水路水位や湛水水田水位を高く保った上で排水機場を運転できれば海岸からの塩水侵入を防ぎつつ、地区全体の排水を行うことが可能になる。さらに幹線排水路から小排水路へ逆流しないように新たに水位調整ゲートを設置する。この対策方法は干拓農地において海水浸透による塩害防止のために設置される潮遊池に相当するものである。

**c 除塩計画**

除塩のための排水経路を確保した上で除塩計画を策定する。残留塩分のリーチングによる除塩に必要な水量を算定する。津波塩害において最も簡便で基本的な除塩水量の計算式は以下のとおりである (UCIL, 2012)。

$$D_{fw} = k \times D_s \times EC_0 / EC_1 \quad (3)$$

ここで、 $EC_0$ : 津波浸水後の除塩すべき根圏域の  $EC_e$  (dS/m),  $EC_1$ : 除塩の目標となる  $EC$  (dS/m),  $k$ : 土壌分類による定数,  $D_{fw}$ : 除塩水量 (mm),  $D_s$ : 除塩対象とする土層厚 (mm), である。 $k$ の値は50mm, または100mmの間断灌漑においては、すべての土性において0.1となる。通常は除塩目標  $EC_1$ は4dS/mであるが、今回の災害での被災地は水田が主であり、稲の生長限界  $EC_e$ が3.0dS/m付近である場合は、安全側を見て3dS/mとするなど適宜対応する。ここで (3) 式の前件条件は、灌漑水はすべて根圏域以下に下方浸透により排水され、地下水は根圏域以下に設定され蒸発による上方への水移動は考慮しないことである。また、50mmまたは100mmの間断灌漑による下方浸透の継続が前提であり、自然降雨での除塩の場合は、水分は下方浸透だけでなく、蒸発による上方への移動も考慮する必要があるので必要な除塩水量は増える傾向にある。

Table 2 に東日本大震災津波被害を受けた農地における、除塩水量の計算結果を示す。被災当初は200mmのリーチング水量が必要であったが一年経過後に100mm前後まで下がっているものの塩類土壌に類型される。この地区は、排水が停滞し、海側からの海水浸透の影響により排水路の塩分濃度が上昇していることから、完全に除塩するためには地区全体の排水機能の確保と抑制が除塩には必要となる。

**d 津波浸水後の海水侵入**

前述したように、被災した沿岸農地において、津波由来の塩水は除塩されていても、深層の地下からの海水浸透により地下水が高塩分濃度になることに配慮する必要

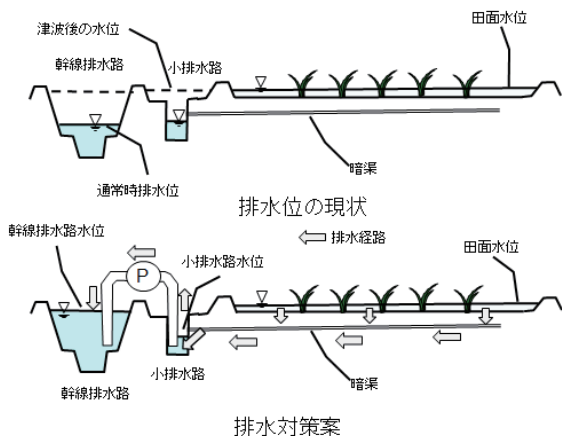


Fig.8 排水位の現状と対策案

Current situation (top) and proposed measures (below) for drainage of a paddy field



Fig.9 塩水浸透予防のために湛水している水田  
A paddy field flooded to prevent the intrusion of salt water

Table 2 除塩水量の計算例  
An example of the computation of water desalination

調査日	海岸からの距離 (km)	EC <sub>e</sub> (dS/m)	塩類区分	地盤標高 (m)	除塩水量 (mm)
2011.4	0.8	19.99	塩類	0以下	200
2012.7	0.8	9.77	塩類	0以下	98

がある。森ら（2012）の巨理地区を対象とした地下水環境の調査結果によると、海岸から約600m付近の地下塩分濃度は明瞭に淡塩境界深さが確認され、震災前は深さ6mだったが震災後に深さ4mとなっている。この2mの塩水域の上昇の原因として、地盤沈下の影響に加え水田灌漑がおこなわれていないことによる地下への淡水供給量の減少が森ら（2012）により指摘されている。

この淡塩境界深さの結果を基に、佐藤ら（2002）の淡塩境界深さの解析手法を適用し地区内の淡塩境界深さ分布を推定することができる。この手法は、淡水と塩水の密度境界面を形成して、非混合状態で流動しているとみなし、混合域の幅は薄いという前提を用いる。これによると鉛直断面二次元の鉛直流速を考慮した淡塩境界面の形状は次式で表せる。

$$h^2 = \frac{q^2}{2k_s^2 \varepsilon^2} + \frac{2qx}{k_s \varepsilon} \quad (4)$$

ここで、 $h$ : 海水面からの深さ (m),  $q$ : 淡水流量 ( $m^2/s$ ),  $k_s$ : 透水係数 (m/s),  $\varepsilon$ :  $(\rho_s - \rho_f) / \rho_f$ ,  $\rho_s$ : 塩水の密度 ( $kg/m^3$ ),  $\rho_f$ : 淡水の密度 ( $kg/m^3$ ),  $x$ : 海岸線からの距離 (m), である。(1) 式において、 $k_s$ は森ら（2012）の  $8.2 \times 10^{-3} cm/s$  を用い、 $x=600$ で震災前の  $h=6m$  と震災後の  $h=4m$  を代入する。ここで  $q$  は、次式で求める。

$$q = -k_s \varepsilon \frac{dh}{dx} \quad (5)$$

ここで動水勾配に相当する  $dh/dx$  の値の推定が問題になるが、海岸線付近では動水勾配は一定とし、 $x=600m$  付近の淡塩境界深さが測定値と合致するように動水勾配を求めた。ここで海岸線における海水面の先端部分を  $x=0$  とおいた。計算結果を Fig.10 に示す。 $h$  の深さは式(2)より淡水流量  $q$  に大きく依存し、 $q$  が大きいほど境界深さは深くなり、 $q$  が0になれば海水面と一致する。被災前より湛水境界深さは浅くなっているが、内陸の1km程度になると4m以深になり、営農には影響のない深さとなっている。しかし海岸線100m付近では、1m付近まで塩水域がくるため、幹線水路の塩分濃度の上昇につながる事が予想される。

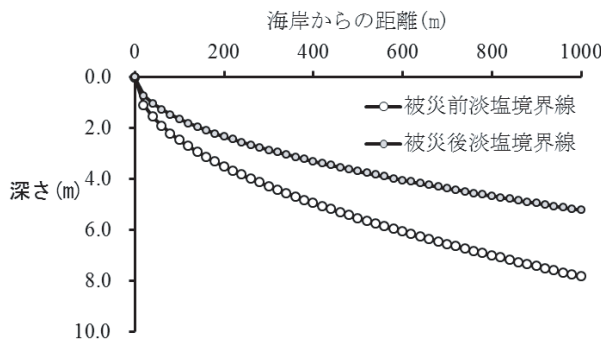


Fig.10 淡塩境界の概要  
An outline of the saltwater-freshwater interface

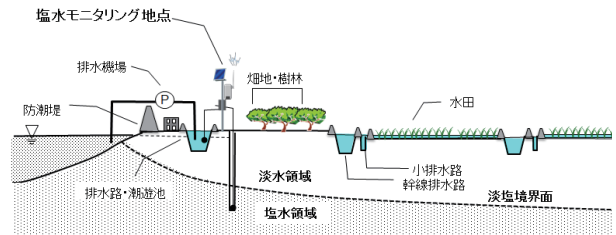


Fig.11 海水浸透の監視手法  
A schematic diagram showing the method of measuring seawater intrusion

### E 海水侵入の監視手法

以上の結果を考慮した海水浸透の点検手法、対策手法を Fig.11 に示す。海岸付近に地下水の塩分濃度のもとにリングポイントを設けることで、式(3)等を利用することで、海岸線から内陸までの淡塩境界深さをリアルタイムで点検することが可能になる。さらに淡塩境界深さが浅くなった場合は、水田の湛水を行うなど自動で制御できれば、農地被害を未然に防ぐことが可能になる。

## VI 結言

東日本大震災津波による農業地域の被害状況、復旧復興状況のこれまでの調査結果を踏まえて、L2津波の減災に向けて、沿岸農地、排水系施設を含む沿岸部農業地域の調査・点検上の留意点を提示した。

本資料が被災地の一日も早い復旧、復興に役立てば幸いである。今後はより具体的な点検手法について検討を行う必要がある。

### 参考文献

- 1) 朝倉良介・岩瀬浩二・池谷毅・高尾誠・金戸俊道・藤井直樹・大森政則 (2000)：護岸を越流した越波による波力に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 47, 911-915.
- 2) Al-Busaidi, A., T. Yamamoto, C. Bakheit and P. Cookson (2006) : Soil Salinity Assessment by Some Destructive and Non Destructive Methods in Calcareous Soils, J. Jpn. Soc. Soil Phys. 104, 27-40.
- 3) 千葉克己・加藤徹・富樫千之・冠秀昭：縦浸透除塩の有効性と宮城県津波被災農地の除塩対策 (2012) : 農業農村工学会誌, 80-7, 527-530.
- 4) 土壌環境分析法編集委員会編 (1997) : 土壌環境分析法, 博友社, 8-11.
- 5) 沿岸開発技術研究センター (2001) : 数値波動水路の研究・開発, 財団法人沿岸開発技術研究センター, 71-276.
- 6) FAO (1992) : The use of saline waters for production, FAO Irrigation and Drainage Paper, 48, 27-31.
- 7) 飯塚秀則・松富英夫 (2000) : 津波氾濫流の被害想定, 海岸工学論文集, 第47巻, pp.381-385.
- 8) 今村文彦・高橋智幸・有川太郎・藤間功司 (2012) : 東日本大震災特別委員会報告, 土木学会誌, 97, No.1, 42-93.
- 9) Kobayashi T. (2005) : Agricultural Damage Caused by

- Earthquake and Restoration Plan for the Northern Sumatra Island of Indonesia, *Farming Japan*, **39-4**, 34-37.
- 10) 国土交通省 河川局 治水課:河川用ゲート設備点検・整備・更新検討マニュアル(案)平成20年3月(2012.11.20閲覧):<http://www.mlit.go.jp/common/000014193.pdf>, 国土交通省ホームページ
  - 11) 国土交通省 国土技術政策総合研究所 河川研究部 (2012): 粘り強く効果を発揮する海岸堤防の構造検討(第1報), 国総研技術速報No.1, <http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/sokuhou/index.html>
  - 12) 海岸における津波対策検討委員会 (2011): 平成23年東北地方太平洋沖地震及び津波により被災した海岸堤防等の復旧に関する基本的な考え方, [http://www.mlit.go.jp/river/shinngikai\\_blog/kaigantsunamitaisaku/kangaekata/kangaekata111116.pdf](http://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/kaigantsunamitaisaku/kangaekata/kangaekata111116.pdf) (2012.11.30閲覧)
  - 13) 松富英夫・首藤伸夫:津波の浸水深,流速と家屋被害(1994): 海岸工学論文集, 41, 246-250.
  - 14) 松富英夫・高橋智幸・松山昌史・原田賢治・平石哲也・Seree Supartid・Sittichai Naksuksakul (2005): タイのKhao LakとPhuket島における2004年スマトラ島沖津波とその被害, 海岸工学論文集, 52, 1356-1360.
  - 15) 森一司・高橋朋佑・岡庭信幸・柴崎直明・大内拓哉: 2011年東北地方太平洋沖地震による仙台平野南部地域での地下水環境変化について(2012): 地下水学会誌, 第54巻, 第1号 11-2
  - 16) 毛利栄征・丹治肇 (2012): (2011年)東北太平洋沖地震による海岸堤防の後背農地による津波減勢 -減災農地の考え方と提案-, 農村工学研究所技報, 213, 105-116.
  - 17) 中矢哲郎・丹治肇・桐博英 (2006): 2004年インド洋津波によるタイ南部農村地帯の長期的被害調査, 海岸工学論文集, 第53巻, 1381-1385.
  - 18) 中矢哲郎・丹治肇・桐博英 (2013): 農地・排水系施設の復旧状況からみる2011東日本地震津波による塩害長期化の事態, 水工学論文集, 57, I\_1471-I\_1476.
  - 19) 農林水産省: 東日本大震災に伴う被災農地の復旧完了面積, [http://www.maff.go.jp/j/tokei/saigai/pdf/shinsai\\_nouchi\\_240311.pdf](http://www.maff.go.jp/j/tokei/saigai/pdf/shinsai_nouchi_240311.pdf), 2012.8.20閲覧
  - 20) 尾崎友亮 (2012): 東北地方太平洋沖地震を踏まえた津波警報の改善, 土木技術資料, 54-6, 30-33.
  - 21) 佐藤邦明・岩佐義朗 (2002): 地下水理学, 丸善株式会社, 123-128
  - 22) 佐藤慶亀・横山喜代太 (2012): 仙台南部海岸における復旧・復興に向けた技術活用最前線 ~津波堆積土砂の活用を中心にして~, 土木技術資料, 54-6, 38-41.
  - 23) 丹治肇・桐博英・田中良和・人見忠良・堀川直紀 (2012a): (2011年)東北太平洋沖地震に伴う津波による水門・樋門と排水機場の被災状況, 農村工学研究所技報, 第213号, pp.255-268
  - 24) 丹治肇 (2012b): 農地海岸の津波対策の論点, 農地海岸の防災, 39, 23-28
  - 25) Tom Gill and Clinton Powell (2010): Cost-Effective Scada Development For Irrigation Districts A Nebraska Case Study, RECLAMATION: Managing Water in the West, United States. Bureau of Reclamation
  - 26) 東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ (2012.8.21閲覧): 東北地方太平洋沖地震津波情報, 土木学会海岸工学委員会ホームページ, <http://www.coastal.jp/tjt/>
  - 27) Uniconsult International Limited (UCIL) (2012, 8.20閲覧): Desalination & Soil Improvement Mobilisation Report, [http://www.Austinhutcheon.com/etesp\\_mobilisationsalinitysoils.pdf](http://www.Austinhutcheon.com/etesp_mobilisationsalinitysoils.pdf)
  - 28) 渡邊国広・諏訪義雄・加藤史訓・藤田光一 (2012): 津波による海岸堤防の被災の分析 ~粘り強く方向性を見いだすための被災分析~, 土木技術資料, 54-6, 12-15.



## **A Framework for the Investigation of Coastal Farmlands and Their Drainage Systems to Provide Countermeasures Against Level 2 Tsunami**

NAKAYA Tetsuo, KIRI Hirohide and TANJI Hajime

### **Summary**

With a view towards disaster mitigation in the event of future Level 2 tsunami events, we investigated the damage caused to and the restoration process of agricultural areas following the tsunami associated with the Great East Japan Earthquake of March 2011. We identified the overall contents and important points to be included in surveys and investigations before tsunamis occur and the measures to be applied after a tsunami disaster in agricultural areas. Three categories were investigated: broad scale disaster prevention measures, drainage facilities, and farmland. Separate inspection check lists were prepared for daily checks and for inspections in the aftermath of a tsunami. The objective of daily checks is to ensure preparedness for tsunami disaster, whereas the inspections following a tsunami are directed towards accelerating recovery and preventing secondary damage.

**Keywords** : Level 2 tsunami, desalinization, agricultural rehabilitation, drainage facilities, sea wall, seawater intrusion