

東北塩害農地における
除塩事業の事前・事後評価と塩移動の
長期モニタリング

財団法人 国土地理協会

助成金報告書

申請者

福井大学大学院工学研究科 寺崎 寛章

目次

1.	序論	3
1.1.	研究背景	3
1.1.1.	東日本大震災における津波被害	3
1.1.2.	塩害事例	4
1.1.3.	除塩工法の種類と特徴	5
1.1.4.	復興状況	6
1.2.	研究目的	6
2.	実験概要	7
2.1.	関係者	7
2.2.	実験地概要	7
2.3.	実験方法	8
2.4.	センサーキャリブレーション	10
3.	実験結果	11
3.1.	センサーキャリブレーション	11
3.2.	気象ステーション	13
3.2.1.	気温および相対湿度	13
3.2.2.	風速	14
3.2.3.	降雨量	14
3.3.	土壌センサー	15
3.3.1.	土壌温度	15
3.3.2.	土壌塩分	16
3.4.	土壌および表流水サンプリング	17
3.4.1.	表流水	17
3.4.2.	総塩量	18
4.	結論	18
	図表一覧	19
	図	19
	表	20
	参考文献	20
	謝辞	20

1. 序論

1.1. 研究背景

1.1.1. 東日本大震災における津波被害

2011年に発生した東日本大震災は、東北地方を中心に人的・物的ともに甚大な被害をもたらした。人的被害では死者15,883名、行方不明者2,654名および負傷者6,146名に、物的被害では全壊126,576戸、半壊272,292戸および一部破損742,629戸に達し、農業分野の被害額は9,049億円¹⁾に到った。中でも津波による農地の塩害(土壌中の塩類に起因する作物の生育障害)は深刻であり、その被害面積は岩手県、宮城県、および福島県を中心に約2.4万haに達し、耕地面積の約2.6%に相当する(表1-1を参照²⁾)。特に宮城県の被害は最も広範囲で約1.5万ha(当県耕地面積の約11%に相当)に及び、その約85%が水田であった。この3県の基本的な農業関連指数を見ると、全国に占める割合は、生産物、労働力、農地のいずれの項目においても10%前後と高い値を示しており(表1-2を参照³⁾)、日本の農業全体にも大きな影響を及ぼしている。

表 1-1 東日本大震災における農地冠水被害

県名	耕地面積 (ha)※2011年	冠水面積 (ha)	面積率 (%)	冠水面積内訳	
				田(ha)	畑(ha)
青森県	156,800	79	0.1	76	3
岩手県	153,900	1,838	1.2	1,172	666
宮城県	136,300	15,002	11.0	12,685	2,317
福島県	149,900	5,923	4.0	5,588	335
茨城県	175,200	531	0.3	525	6
千葉県	128,800	227	0.2	105	122
合計	900,900	23,600	2.6	20,151	3,499

表 1-2 東北3県の農業指数

	単位	岩手	宮城	福島	全国計に被災 3県が占める 割合(%)
米	億円	597	891	948	13.1
野菜		252	261	546	5.2
畜産		1,271	641	513	9.2
販売農家数	戸	55,347	49,384	70,520	10.7
農業就業人口	人	89,993	70,869	109,048	10.4
耕地面積	ha	153,900	136,300	149,900	9.6

1.1.2. 塩害事例

今までに、地下水涵養による地下水位の上昇や、塩分を含む水や肥料を用いた灌漑等による塩害が世界各国で報告されており、塩害の原因は主に自然要因と人為的要因に分けられ、代表的な塩害メカニズムとして以下の4つのケースがあげられる(図 1-1 を参照⁴⁾)。

- (A) 浅層塩性地下水を有している場合、地表からの灌水・降水によって地表と地下水間にみずみちが形成される。その後、蒸発に起因する水分の上方移動に伴い、地下水中の塩類も地表へ移動し、集積・析出する。特に、地下水涵養によって地下水位が上昇するような場所では、みずみちが形成され易くなるため、塩害を誘発し易くなる。
- (B) 土壌内に岩塩等の塩類を有している場合、降水・灌水によってそれらが融解され、(A)と同様に、土壌水の蒸発に伴い地表に塩類が移動し、塩害が進行する。
- (C) 灌漑水や肥料に塩類が含まれている場合、それが土壌に蓄積され、塩害が発生する。なお、これは塩性地下水を灌漑に利用している農地で多く観られ、強風による海水の飛散や津波に起因する土壌の塩害もこれに該当する。
- (D) 今回の東北塩害のように、台風による海水巻上げや高潮による冠水、さらに津波による海水の浸入に伴う塩分流入により塩害が発生する。

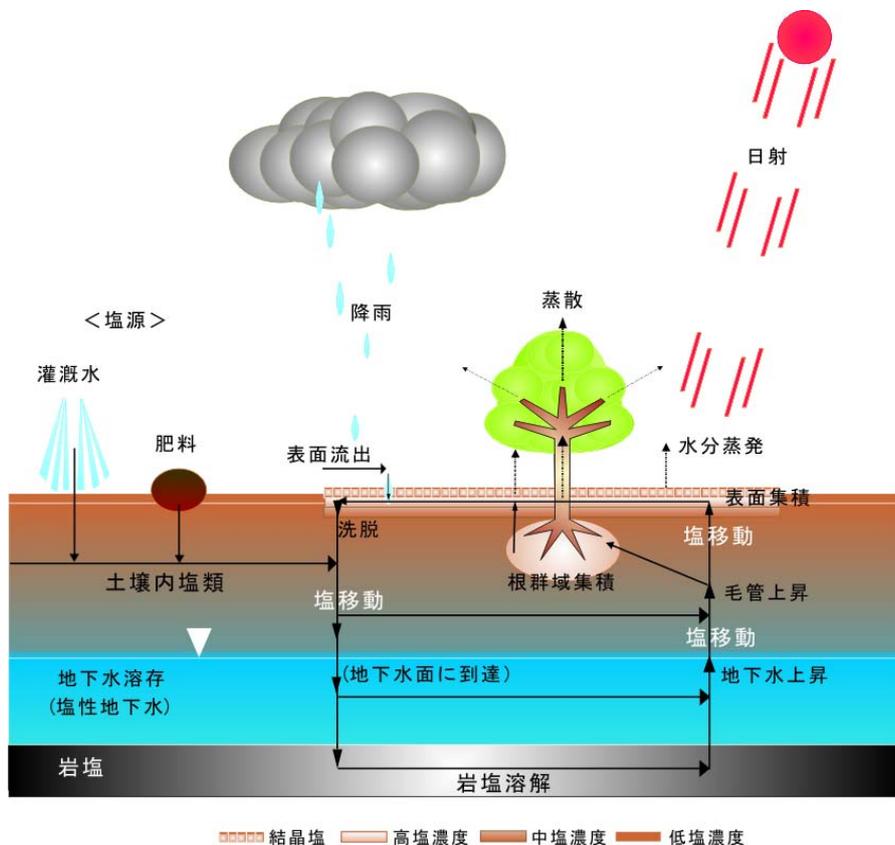


図 1-1 土壌の塩循環

1.1.3. 除塩工法の種類と特徴

次に、主な除塩工法の実例とその特徴を紹介する(表 1-3 を参照)。

(1) リーチング

リーチングは最も普及している除塩方法であり、地表から淡水を灌水することで土壌中の塩類を溶解し、塩を含んだ土壌水を地下水もしくは排水溝へ排出することで塩を洗脱する方法である⁵⁾。従って、土壌の排水性が高い方が効果的であり、代掻きや土壌改良材等と併用されることが多い。ただし、排水施設が貧弱な場合、排水溝および隣接する田畑で塩集積が起こることがある。

(2) 溶出法

圃場に淡水を灌水し土壌中の塩分を湛水中に溶出させた後、水尻から塩水を排水する除塩方法である。土壌の透水性が小さく縦浸透が期待できない場合および暗渠が未整備あるいは機能が不十分な場合などに選択する。ただし十分に排水が行われないと作土層表面に塩分が残留する可能性があるため、排水や除塩後の塩分濃度等に留意する必要がある。

(3) 土壌表層の排土

塩害は表層土壌に塩類が集積した状態であるから、表層土壌を除去(排土)することで大量の塩を取り除くことができる⁶⁾。しかしながら、これは塩とともに貴重な土壌資源も除去してしまう。また、大規模な土壌の廃棄場所を要する等の残土処理に課題を有する。

(4) 耐塩性植物による塩分吸収

塩害が軽微な場合、アブラナや向日葵、綿花および塩トマト等の耐塩性の高い作物を栽培し、植物に塩類を吸収させることで除塩と営農を同時に実施できる⁷⁾。この場合、農業を継続できる点が利点であるものの、土壌の養分バランスの変化や栽培に必要な新たな設備投資および技術の習得等を理由に、耐塩性作物の栽培に消極的な意見もある。また、海外ではアイスプラントやアルファルファのような塩分吸収性能の高い植物の研究・開発が進められている⁸⁾。

表 1-3 塩害対策の種類と特徴

除塩工法	内容	備考
リーチング	湛水させ地下浸透により排水	排水施設の整備が必要
溶出法	湛水させ水尻より排水	十分な排水が必要
土壌表層の排土	高塩濃度の表層土壌排土	土壌喪失、廃棄場所が必要
排水性の向上	本暗渠の整備、土壌改良剤	リーチングとの併用が多い
溶出効率の向上	代掻き	溶出法に用いる場合がある
耐塩性植物による塩分吸収	アブラナ、綿花に転作	農家によっては敬遠している
塩類の分解	微生物処理、土壌改良剤	作物への影響が不明瞭

1.1.4. 復興状況

宮城県の塩害農地ではリーチング、表土削除および弾丸暗渠の施工などの除塩工事が行われており、2014年4月時点で復旧対象面積の約90%の圃場で着手しているが完成面積は約80%であり、完全な復旧の予定は2年後となっている⁹⁾。工事の長期化の原因としては除塩工事が一般的に多大なコストと時間を要するものであることや作業量に対する人員不足等が挙げられる。特に沿岸部の農地では排水不良、地下水の塩性化、塩性地下水の噴出、作土層の流出および高塩濃度土壌の堆積などの問題も重なり、除塩工事完了および営農再開に到るまでに今まで以上の時間と労力を要すると推察される。

例えば、筆者らが2011年8月から定期的に土壌塩害調査を実施している宮城県名取市小塚原南地区では、津波から3年と1ヶ月後に除塩工事が行なわれた。また同市内の閑上地区においても2014年3月に工事完了予定であったが、沿岸部の高塩濃度土壌の堆積、瓦礫撤去および圃場の整備遅延などにより2ヶ月の遅れが生じた。このような現状から、現地の農家からは除塩工事の遅れのみならず、営農再開時期、除塩効果に関する情報不足を指摘する声が聞かれた¹⁰⁾。また、営農再開が長引いたことにより、営農意欲の低下および営農を断念した事例も見られた。

1.2. 研究目的

先述のように、塩害農地では震災から3年以上が経つものの、未だに多くの農地が除塩未処理状態である。さらに、今後行われる海岸付近の高塩濃度土壌の除塩には今まで以上の時間および労力を費やす必要があると言われており、早期営農再開のために除塩工事の効率化が求められている。したがって、溶出法を実施する際の湛水量や湛水深、湛水期間、湛水 - 排水回数および除塩効果の予測は不可欠であり、そのためには除塩工事中の土壌中の塩移動を定量的に把握することが重要である。

そこで本研究では、除塩工事の事前・事後評価を行うために、土壌サンプリングおよび水分・塩分センサーにより除塩工事中の土壌塩の挙動を調べたので、その結果をここに報告する。

2. 実験概要

2.1. 関係者

総責任者・・・福井大学大学院工学研究科 特命助教 寺崎寛章

アドバイザー・・・福井大学大学院工学研究科 教授 福原輝幸

実験補助・・・福井大学大学院工学研究科 2年 山元謙侑

福井大学工学部 4年 竹崎寛之

協力企業・・・東北重機工事株式会社 佐々木一敏

2.2. 実験地概要

本実験は 2013 年 11 月の 7 日間にわたり宮城県名取市牛野伊藤の水田を対象に行われた(図 2-1 および表 2-1 を参照)。除塩工事は圃場の短辺方向に沿って約 5m 間隔で 10 本弾丸暗渠を施工した後、地表から約 200mm の深さを耕起し、3 ヶ所の入水口から水を取り込んだ。そして 7 日間の湛水後、1 ヶ所の排水口から排水を行った(図 2-2 を参照)。



図 2-1 実験地と周辺の津波浸水高さ



図 2-2 湛水の様子

表 2-1 実験地概要

圃場面積	0.093ha
津波浸水高さ	2.59m
浸水深	2.17m
海岸からの直近距離	2.9km
本暗渠	なし
土壌	地表から 200mm 以深 が粘土層

2.3. 実験方法

本実験では、各種センサーを設置して土壌データ観測、微気象観測を行った(図 2-3, 図 2-4および表 2-2を参照)。また、定期的に土壌および表流水を採取し、土壌の深度別に、土壌塩濃度 $C(\text{kg}/\text{m}^3)$ 、土壌体積含水率 $\theta(\text{m}^3/\text{m}^3)$ 、含塩量 $M_{\text{salt}}(\text{mg}/\text{cm}^3)$ 、塩化物イオン量 Cl_s (乾燥土100gあたりの Cl 質量 $\text{mg}/100\text{g}$)および水中の塩化物イオン量 Cl_w (水100gあたりの Cl 質量 $\text{mg}/100\text{g}$)をそれぞれ測定した。なお、使用器材の写真を図 2-5から図 2-10に示す。

表 2-2 使用機材

測定項目	センサー	製造元	備考
土壌温度(°C)	2極センサー	Campbell Scientific	地表から深さ20,60,100,150,200, および300mmに埋設
土壌塩濃度 $C(\text{kg}/\text{m}^3)$			
土壌体積含水率 $\theta(\text{m}^3/\text{m}^3)$			
風速(m/s)	3杯式風速計	Davis	地表から高さ2.0mに設置
降雨量(mm)	転倒ます型雨量計	竹田計器工業	
気温(°C)	気温・湿度センサー	Vaisala	地表から高さ1.0および2.0mに設置
相対湿度(%)			
データ収集	データロガー	Campbell Scientific	動力源としてそれぞれカーバッテリーを用いる
		MCS	

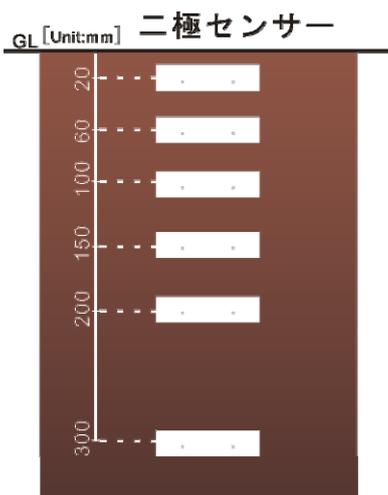


図 2-3 2極センサーの配置

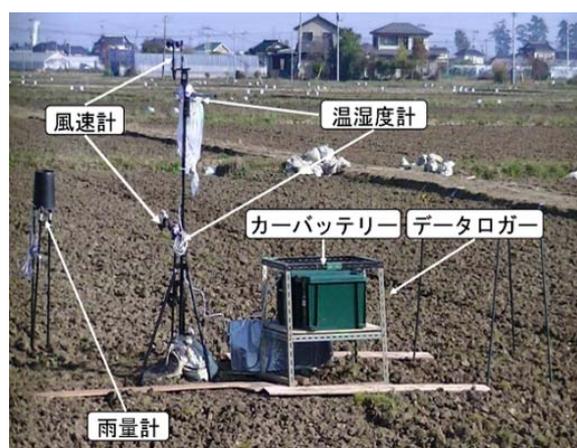


図 2-4 気象ステーションの配置

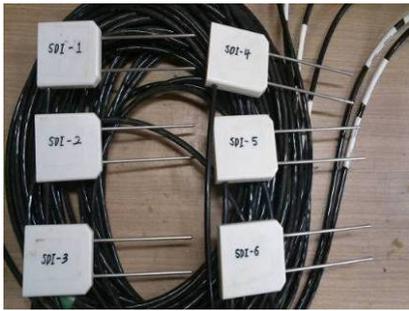


図 2-5 2極センサー



図 2-6 風速計



図 2-7 雨量計



図 2-8 温湿度センサー

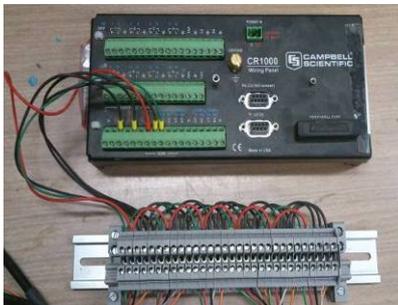


図 2-9 データロガー (CR1000)



図 2-10 データロガー (MCS)



図 2-11 土壌サンプリングの様子



図 2-12 排水後の様子

2.4. センサーキャリブレーション

2 極センサーは付帯する電極棒を土壤に挿入することで土壤の電気伝導度 EC (dS/m), 体積含水率 θ (m^3/m^3) および温度 ($^{\circ}C$) を測定する装置である. EC は土壤の体積含水率 θ および塩濃度 C (%) によって変化するため, EC および θ から C が求められるが, その感度はセンサー毎に固有である. ただし, EC とセンサーの出力値の体積含水率 θ (m^3/m^3) から連立方程式を解いて θ および C は求められる.

本キャリブレーションでは, $C=0, 5, \text{ および } 10\%$ における $EC-C$ 関係および $\theta-C$ 関係を求めた. なお, キャリブレーションには 2 極センサーを 6 本用意し, 実際の東北塩害農地から採取した土を使用した. 以下に測定手順を示す(図 2-13 および図 2-14 を参照).

- (1) 土壤と塩水を混合・攪拌し, 任意の θ および C の土壤を作製する.
- (2) 土壤を容器に充填し, センサーの電極棒を挿入する.
- (3) 測定値が安定したのを確認し, EC , θ および C を記録する.
- (4) θ (0.1~0.37) を変え, (1)から(3)を繰り返す.
- (5) C を変え, (1)から(4)を繰り返す.

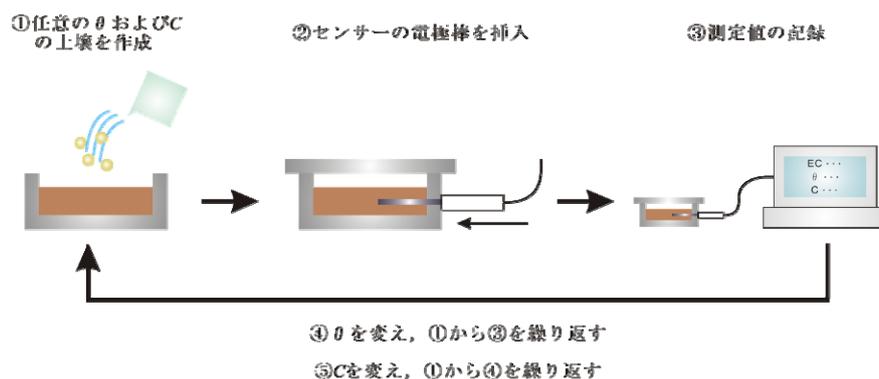


図 2-13 キャリブレーションの手順



図 2-14 2 極センサーキャリブレーション

3. 実験結果

3.1. センサーキャリブレーション

図 3-1 は 2 極センサーのそれぞれの θ (0.1~0.37) における $EC-C$ 関係を示す。 C は EC の増加に伴い線形的に増大する。 また、 $EC-C$ 関係式は次式で表される。

$$C = A(EC - B) \quad (3-1)$$

ここに、 A および B はセンサー固有の定数であり θ によって変化する。

図 3-2 および図 3-3 は $\theta-A$ および $\theta-B$ 関係をそれぞれ示す。 θ の増加に伴い A は非線形的に減少し、 B は非線形的に増大する。 また、 $\theta-A$ および $\theta-B$ 関係式はそれぞれ次式で表される。

$$A = a\theta^b \quad (3-2)$$

$$B = (\theta^c) \times 10^{-5} \quad (3-3)$$

ここに、 a 、 b および c はセンサー固有の定数である。

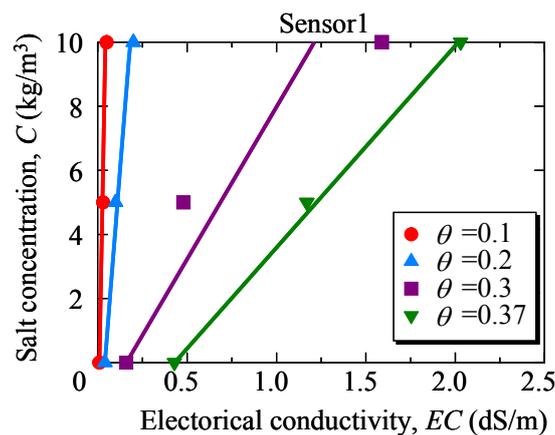


図 3-1 2 極センサーの EC と C の関係

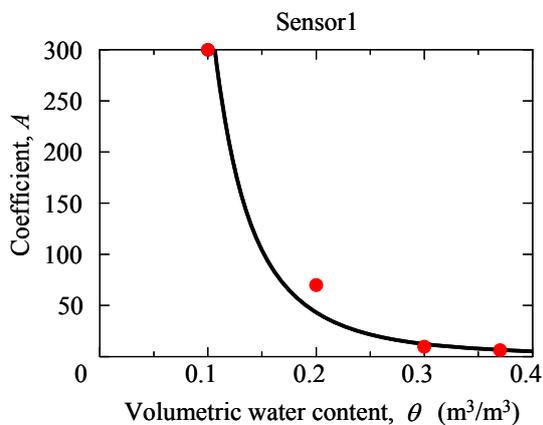


図 3-2 2 極センサーの θ と A の関係

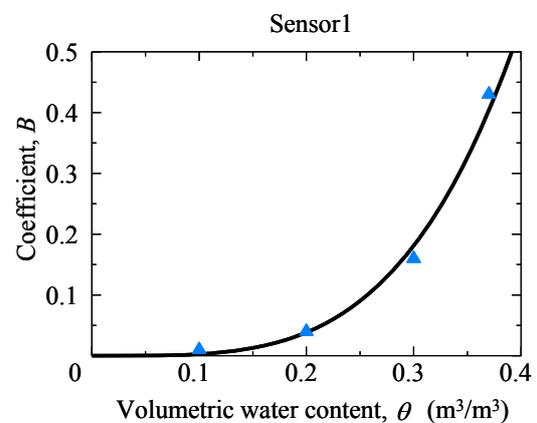


図 3-3 2 極センサーの θ と B の関係

図 3-4 は 2 極センサーのそれぞれの $C(0\sim 10\%)$ における $\theta'-\theta$ 関係を示す。また、 $\theta'-\theta$ 関係式は次式で表される。

$$\theta = D(\theta')^f \quad (3-4)$$

ここに、 D および f はセンサー固有の定数であり、 C の増加に伴い D は線形的に減少する。図 3-5 は 2 極センサーの $C-D$ 関係を示す。また $C-D$ 関係式は次式で表される。

$$D = dC + e \quad (3-5)$$

ここに、 d および e はセンサー固有の定数である。また各センサーにおける $a\sim f$ の値を表 3-1 に示す。

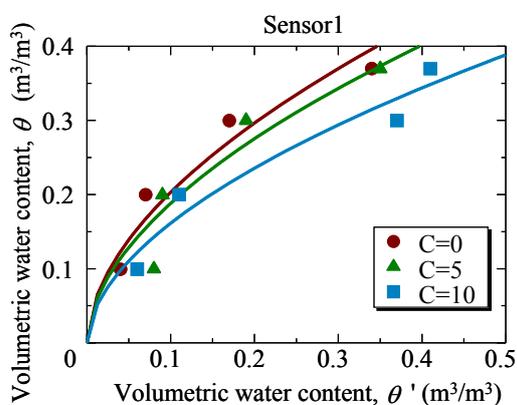


図 3-4 2 極センサーの θ' と θ の関係

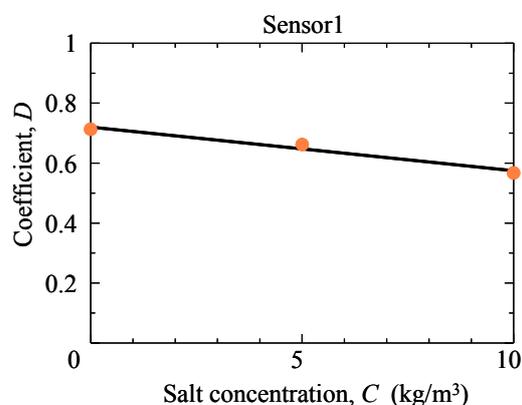


図 3-5 2 極センサーの C と D の関係

表 3-1 各センサーの係数

センサー 係数	1	2	3	4	5	6
a	4.24×10^5	4.11×10^5	3.31×10^5	4.54×10^5	4.06×10^5	3.93×10^5
b	-3.07	-3.07	-3.0	-3.11	-3.07	-3.06
c	2.9	2.92	2.94	2.94	2.96	2.96
d	-1.46×10^{-2}	-1.65×10^{-2}	-1.53×10^{-2}	-1.79×10^{-2}	-1.73×10^{-2}	-1.58×10^{-2}
e	0.720	0.757	0.815	0.779	0.767	0.770
f	0.546	0.581	0.627	0.606	0.609	0.614

3.2. 気象ステーション

3.2.1. 気温および相対湿度

図 3-6 および図 3-7 は 11 月 20 日から 11 月 28 日までに気象ステーションで測定された気温および相対湿度を示す。気温は、高さ 2.0m では最高 17.8℃(最低 0.5℃), 高さ 1.0m では最高 18.5℃(最低 1.8℃) を記録し、早朝は湛水表面の凍結が見られる日が確認された。また気温と湿度には負の相関関係が見られ、日の出に伴い気温は上昇し、相対湿度は低下する。

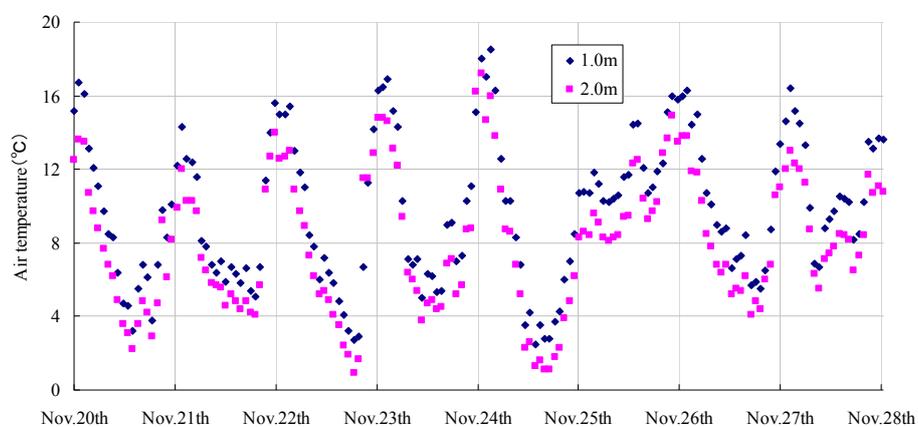


図 3-6 気温の経時変化

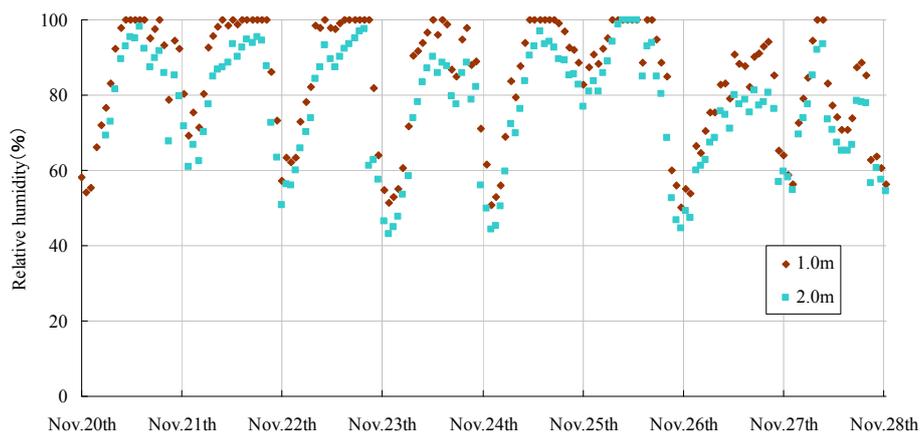


図 3-7 相対湿度の経時変化

3.3. 土壌センサー

3.3.1. 土壌温度

図 3-10 および図 3-11 は 11 月 20 日から 11 月 28 日までに二極センサーにより測定された土壌温度および代表的な日における土壌温度鉛直分布を示す。土壌温度は地表から深さ 20mm で 2.2~15.3°C, 60mm で 4.2~12.2°C, 100mm で 5.6~11.1°C, 150mm で 6.8~10.5°C, 200mm で 7.7~10.1°C, 300mm で 8.8~10.1°C であった。また、深さ 20mm と 300mm の変動幅を比較すると、前者は後者の約 10 倍であった。このように、土壌温度は地表に近いほど気温の影響を受け、日変化は大きいことが知れる。

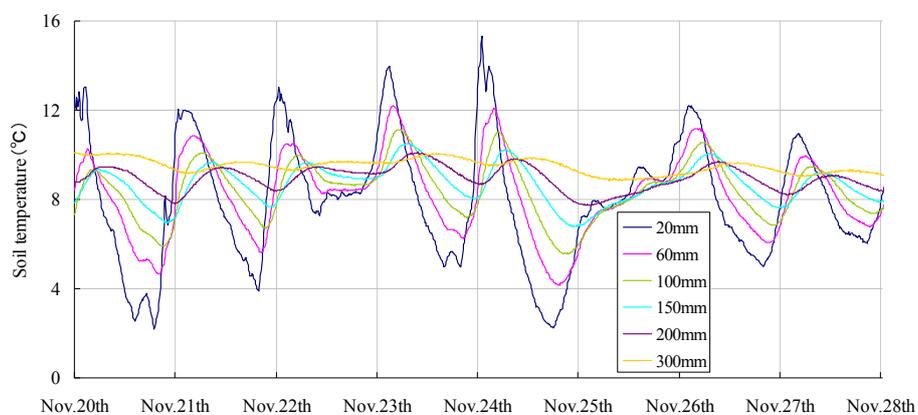


図 3-10 土壌温度の経時変化

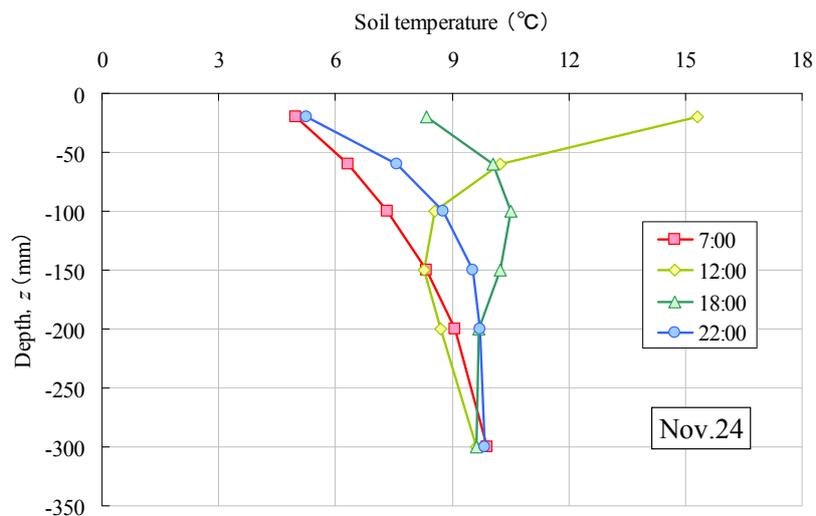


図 3-11 土壌温度鉛直分布の経時変化

3.3.2. 土壌塩分

(a) 電気伝導度

図 3-12 は湛水期間中の土壌の各深度における電気伝導度 EC の経時変化を示す。プロットは EC の実験値を、曲線は近似曲線(指数関数)をそれぞれ表す。 EC の時間変化は次式で表される。

$$EC = a\{\exp(-bt) - 1\} + c \quad (3-6)$$

湛水完了直後の EC は深度が増すにつれて大きくなる。 $z = -20\text{mm}$ および -60mm の EC は湛水完了後から 16 時間で大きく低下した。その後、96 時間までは緩やかに低下したが、それ以降の低下率は鈍化した。なお、 $z = -100\text{mm}$ および -150mm の EC は湛水直後から排水直前まで緩やかに減少し続けた。また、 $z = -200\text{mm}$ および -300mm の EC の時間的低下は無視できるほど小さい。

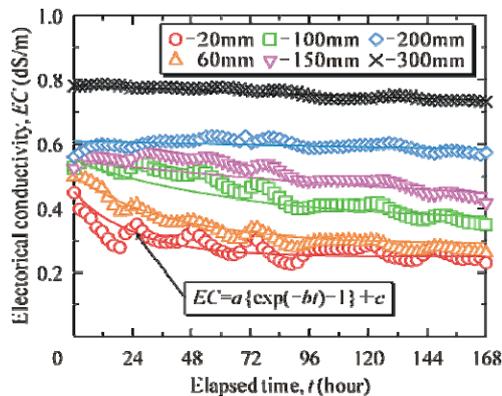


図 3-12 電気伝導度の経時変化

表 3-2 は深度毎の $EC-t$ 近似曲線式 ($EC = a\{\exp(-bt) - 1\} + c$) に含まれる係数を示す。上述したように EC の時間的減少は地表に向かって大きくなるため、 b は増大する。また、 EC のレベルは地表に向かって小さくなることから c は小さくなり、結果として a は大きくなった。 $z = -200\text{mm}$ 以深では EC の変化が極めて小さいことから、塩移動は殆ど起こらなかったと推察される。

表 3-2 近似曲線式の係数

Depth \ Coef.	a	b	c
-20mm	0.20	0.04	0.45
-60mm	0.21	0.025	0.50
-100mm	0.19	0.015	0.55
-150mm	0.18	0.005	0.55
-200mm	0.09	0.003	0.61
-300mm	0.15	0.003	0.78

(b) 含塩量

図 3-13は湛水期間中における単位土壌体積当りの含塩量 M_{salt} (mg/cm^3)の鉛直分布経時変化を示す。湛水直後から2日後に $z=-20\text{mm}$ と $z=-60\text{mm}$ の M_{salt} は湛水への溶出によって減少したと推察される。湛水による塩分の下方浸透により $z=-150\text{mm}$ と $z=-200\text{mm}$ の M_{salt} は微増したと思われる。さらに2日後以降の M_{salt} は全ての深さで減少し、溶出域の拡大が認められた。 M_{salt} の変化量は表層に近いほど大きく、難透水性である $z=-200\text{mm}$ 以深での変化はごくわずかであった。

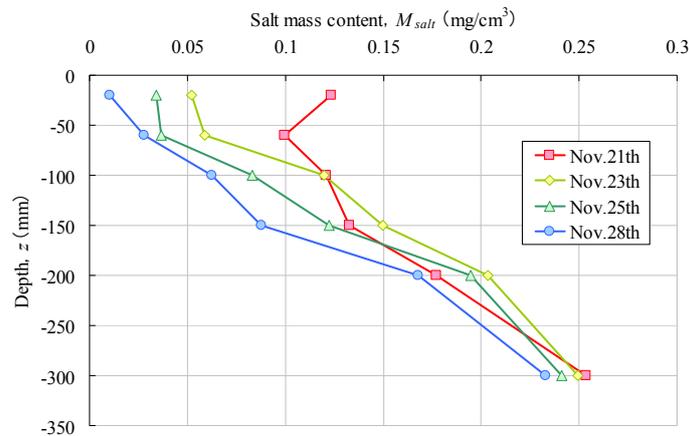


図 3-13 含塩量鉛直分布の経時変化

3. 4. 土壌および表流水サンプリング

3. 4. 1. 表流水

図 3-14 および図 3-15は湛水期間中の Cl^-_w と湛水深 D_w の経時変化および Cl^-_w と湛水深 D_w の関係を示す。湛水期間中は圃場の畦畔や側道からの一部漏水，降雨および水位調整のための給水作業により湛水深の増減が頻繁に起こった。湛水量の増減に伴い Cl^-_w は変化し，湛水深と Cl^-_w の間には負の相関関係が確認された。

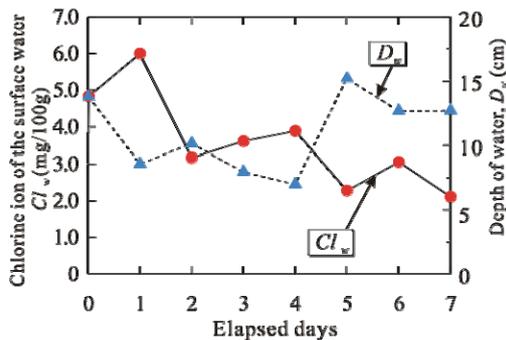


図 3-14 湛水深と Cl^-_w の経時変化

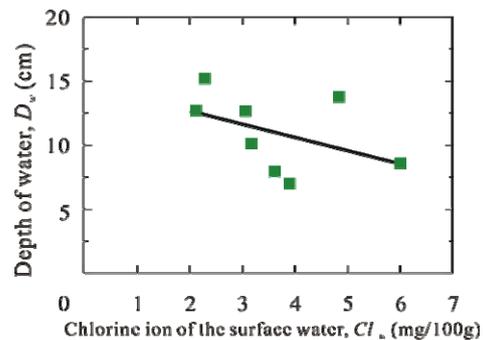


図 3-15 湛水深と Cl^-_w の関係

3.4.2. 総塩量

図 3-16 および図 3-17 は湛水中の総塩量 ΣM_w の経時変化および土壌中の総塩量 ΣM_s と湛水中の総塩量 ΣM_w の和である総塩量 ΣM の経時変化を示す。また、 ΣM は次式で表される。

$$\Sigma M = a \times \exp^{bt} \quad (3-7)$$

ΣM_w は湛水直後に最も大きく、その後 2 日間にわたり湛水の漏水とともに減少し、それ以降の変動は少なくなった。土壌からの溶出は湛水後 2 日間は著しく、それ以降の溶出速度は鈍化した。また湛水前に $0.035(\text{kg}/\text{m}^2)$ あった ΣM は時間とともに指数関数的に減少し、排水後には $0.016(\text{kg}/\text{m}^2)$ になり、約 53% の塩分排出効果が得られた。

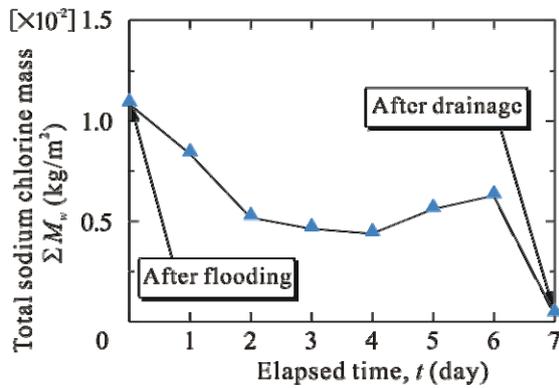


図 3-16 湛水中の総塩量の経時変化

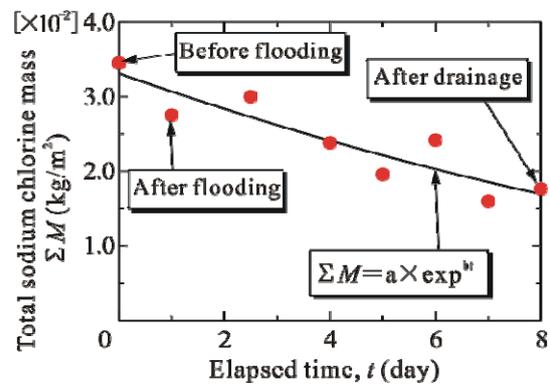


図 3-17 総塩量の経時変化

4. 結論

本研究は除塩工事前・事後評価を行うため、2013 年 11 月の 7 日間にわたって宮城県名取市牛野伊藤での水田除塩工事期間中の塩移動を調べた。その結果を以下に列挙する。

- (1) 除塩効果 (Cl^- の溶出) は地表から 200mm までの耕起層で明確に認められ、地表に近いほど顕著に現れた。また、地表から 200mm 以深 (難透水層) では除塩効果はごくわずかであった。
- (2) 除塩効果は湛水直後から 2 日までの間に著しく、時間の経過とともに小さくなり、湛水直後から 4 日後以降は少ない。
- (3) 湛水期間中の土壌の EC は地表から 150mm までは湛水直後から 96 時間後まで減少し、それ以降の減少率は鈍化した。また、地表から 200mm 以深では EC の減少は無視できるほど小さい。
- (4) 湛水期間中の土壌から湛水への塩分供給は湛水直後より 2 日に顕著に現れ、それ以降の供給速度は鈍化した。
- (5) 今回の除塩工事に限れば、約 53% の塩分排出効果が得られた。

今後は除塩工事前後の塩移動データを蓄積し、除塩効果の定量化を図るとともに、除塩シミュレーションモデルを構築する。

図表一覧

図

図 1-1	土壌の塩循環	4
図 2-1	実験地と周辺の津波浸水高さ	7
図 2-2	湛水の様子	7
図 2-3	2極センサーの配置	8
図 2-4	気象ステーションの配置	8
図 2-5	2極センサー	9
図 2-6	風速計	9
図 2-7	雨量計	9
図 2-8	温湿度センサー	9
図 2-9	データロガー (CR1000)	9
図 2-10	データロガー (MCS)	9
図 2-11	土壌サンプリングの様子	9
図 2-12	排水後の様子	9
図 2-13	キャリブレーションの手順	10
図 2-14	2極センサーキャリブレーション	10
図 3-1	2極センサーの EC と C の関係	11
図 3-2	2極センサーの θ と A の関係	11
図 3-3	2極センサーの θ と B の関係	11
図 3-4	2極センサーの θ' と θ の関係	12
図 3-5	2極センサーの C と D の関係	12
図 3-6	気温の経時変化	13
図 3-7	相対湿度の経時変化	13
図 3-8	風速の経時変化	14
図 3-9	日降水量の経時変化	14
図 3-10	土壌温度の経時変化	15
図 3-11	土壌温度鉛直分布の経時変化	15
図 3-12	電気伝導度の経時変化	16
図 3-13	含塩量鉛直分布の経時変化	17
図 3-14	湛水深と Cl^-_w の経時変化	17
図 3-15	湛水深と Cl^-_w の関係	17
図 3-16	湛水中の総塩量の経時変化	18
図 3-17	総塩量の経時変化	18

表

表 1-1	東日本大震災における農地冠水被害	3
表 1-2	東北 3 県の農業指数	3
表 1-3	塩害対策の種類と特徴	5
表 2-1	実験地概要	7
表 2-2	使用機材	8
表 3-1	各センサーの係数	12
表 3-2	近似曲線式の係数	16

参考文献

- 1) 復興庁：復興の現状と取り組み
- 2) 農林水産省：津波により流失や冠水等の被害を受けた農地の推定面積
- 3) 農林水産省：食料・農業白書
- 4) Xu, P., Shao, Y. : A salt-transport model within a and-surface scheme for studies of salinisation in irrigated areas, *Environmental Modeling & Software*, Vol. 17, pp. 39-49, 2002.
- 5) Letey, J., Hoffman, G. J., Hopmans, J. W., Grattan, S. R., Suarez, D., Corwind, D. L., Oster, J. D., Wu, L., Amrhein, C.: Evaluation of soil salinity leaching requirement guidelines, *Agricultural Water Management*, Vol. 98, pp. 502-506, 2011.
- 6) 金塚千晶, 藤巻晴行：表面剥離法による塩類集積土壌からの除塩，農業農村工学会全国大会講演要旨集，pp.492-493，2010.
- 7) 原田千春, 田中明：養液土耕栽培における塩水灌漑がトマトの品質に及ぼす影響，*Coastal Bioenvironment* Vol. 8, pp. 51-62, 2006.
- 8) Cao, J., Li, X., Kong, X., Zed, R., Dong, L. : Using alfalfa (*Medicago sativa*) to ameliorate salt-affected soils in Yingda irrigation district in Northwest China, *Acta Ecologica Sinica*, Vol. 32, pp. 68-73, 2012.
- 9) 宮城県：復興の進歩状況 平成 26 年 5 月 11 日
- 10) 寺崎寛章, 草間政寛, 福原輝幸：東日本大震災後の宮城県名取市における除塩事業に関するアンケート，土木学会第 68 回年次学術講演会講演概要集，VII-006, pp. 11-12, 2013.

謝辞

本研究は財団法人国土地理協会 平成 24 年度学術研究助成を受けて行なわれたものである。また実験にあたって、東北重機工事株式会社 佐々木一敏氏の多大なご協力を受けて行われた。ここに記して深甚の謝意を表す。