

津波による海水浸入を受けた水田の畝立てによる除塩

Restoration of a Paddy Field Where Seawater Entered with a Tsunami by Ridging

藤川 智紀[†]
(FUJIKAWA Tomonori)中村 貴彦[†]
(NAKAMURA Takahiko)駒村 正治[†]
(KOMAMURA Masaharu)細野 衛[†]
(HOSONO Mamoru)

I. はじめに

2011年3月11日に発生した東日本大震災は大きな津波被害をもたらした。その影響は東北地方の広範囲に及んだ。農林水産省の推計では津波の被害を受けた農地は東北3県を中心に23,600 haと報告されており、中でも宮城県では約15,000 haと最も被害が大きい¹⁾。

津波によって農地土壌が受ける被害は、①海水に含まれる塩分が農地土壌に蓄積することによって生じる塩害、②津波に含まれるヘドロの堆積による農地土壌の理化学的悪化、③津波の寄せ・引き波による水田作土の侵食および海砂の堆積、の3種類に大別される。平坦な地形もしくは地形の影響が小さい地域では津波の運搬作用や掘削作用は海岸からの距離に応じて小さくなるため、農地が海岸から離れた場所にあれば海水のみの浸入で済むが、海岸に近づくにつれ数cm以下のヘドロの堆積が見られるようになり、さらに近づくにつれてヘドロの堆積が厚くなり²⁾、がれきの堆積も見られるようになる。海水のみが浸入した農地では、生じた上記①の被害に対して除塩が必要になる一方、より海岸近くに位置する農地ではヘドロやがれきといった堆積物や表層土壌を重機により取り除く必要があり、農地として復旧するにはより多大な労力が必要となる。また海岸近くでは被害③の分類に対して、分類④として津波による掘削や地震による地盤変動、液状化により地盤沈下が生じ海拔0m地帯が現れることもある。このような地域では堆積物の除去だけでなく、客土などの圃場の再整備が必要になる場合も多く、復旧をさらに難しくしている。

農地における塩害対策の基本は、地表から水を浸透させ土壌中の塩分を地下水へ溶脱させるリーチングである。リーチングは水さえ確保できれば非常に有効な方法である³⁾が、東北地方沿岸部の主要農地である水田に関しては、もともと灌漑水の豊富な地域に発達してきた経緯から塩害を受けることが少なく、リーチングの適応例も少ない。水田は湛水を維持するために浸

透性が低い土層を有するため、塩分が下方へ移動する速度が小さく、表層からの浸透によるリーチングの効率が低くなる可能性が高い。また、海水が浸透した水田では土壌に含まれる粘土が海水のNaにより膨潤し、土壌全体の透水性が低下する⁴⁾可能性がある。通常畑地やハウス土壌などで利用される降雨や灌漑水を浸透させ塩分を溶脱させる縦浸透除塩に対して、透水性の低い農地を想定して湛水させた水に土壌中の塩分を溶出させ落水する溶出法がある。しかし、地震や津波による灌漑・排水施設の損壊により用水不足と排水不良が生じている地域も多く、そのような地域では適応するのが難しい。

水田のリーチング効率を上げるための対応法の一つとして、土壌の排水性を改良することが想定される。水田の排水性の改良は汎用化につながる技術であり、客土や混層工などの土層改良や堆肥など有機物資材の投入による土壌改良が効果的であることが知られている⁵⁾。千葉ら⁶⁾は宮城県の海水が浸入した水田圃場において、暗渠の施工や耕起の実施、灌漑水の利用が縦浸透除塩に対して有効であること、その一方で圃場整備されていない水田や暗渠が未整備で排水性の悪い水田では除塩水が圃場に残り、除塩に時間が掛かることを報告している。

本研究では東日本大震災の際に発生した津波により海水が浸入した水田において、除塩のための排水改良対策をおこない、土壌および地下水にどのような影響を与えるかを調べた。具体的には、除塩のみの対策で早期の復元が期待される被害分類①の水田を対象とする初期の復興対策として、大型機械による施工や新規の資材投入が不要な「畝立て」の効果を検討することとした。

II. 調査対象地および測定項目

1. 調査対象地

調査対象水田は宮城県岩沼市中條地区のT氏水田である(図-1)。沿岸部に位置する岩沼市は被害農地

[†]東京農業大学

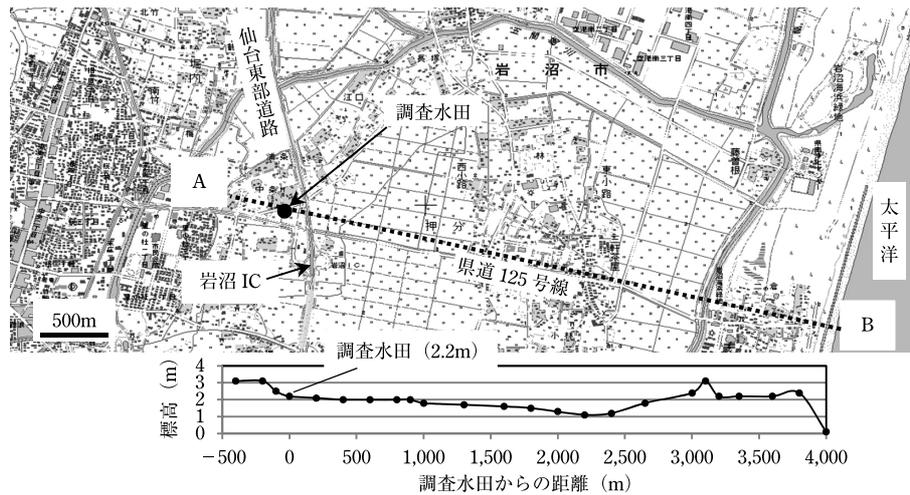


図-1 調査水田の位置⁷⁾および周囲の標高

面積が1,300 haと推測されており¹⁾、宮城県のなかでも亙理町、山元町に次ぐ比較的被害率が高い市町村である。津波は海岸部より浸入し、高速道路（仙台東部道路）の岩沼インター付近の県道岩沼海浜緑地線（125号線）との交差点の空間部から排水路を遡ったと推測される。南北方向に走る高速道路によって津波の進行が遮断され、津波の被害は道路を挟んで海側（東側）が大きく、山側（西側）ではほとんど被害を受けない傾向が強いが、調査水田付近では東西方向の道路と高速道路との立体交差部が開口しており、この箇所から津波が浸入したと考えられる。また図-1に震災前の調査水田から太平洋岸まで（地図中のA-B）の標高を示す。調査水田の標高は2.2m、西側の標高は2.5mであり、東側に向かって徐々に標高が低くなり、調査水田から2.2km付近（海岸より1.8km）の新長者森地点が1.1mと最も低かった。さらに東側へ進むと砂丘列のため標高が高くなり、調査水田より約3.1kmの貞山堀付近が3.1mと最も高かった。それより海側には約1kmの砂丘が広がっており、津波は海岸よりこの砂丘を越えて、貞山堀を通過して本地域に浸入してきたと考えられる。

調査水田は、東西方向の短辺が38m、南北方向の長辺が56mおよび50mの台形（20a区画）である（図-2）。周辺地域は東側が低くなる傾斜があり、調査水田も東西に隣接する水田とはそれぞれ30cmの高低差があった。現地での聞き取りの結果、調査水田では一時20~30cm程の海水が冠水したが、翌日には浸透したとの情報が得られた。なお、すぐ海側（東側）に隣接する水田にはヘドロやがれきが堆積し、震災から3ヵ月後の調査時にも立入りが困難な状況であった。また、調査に先立ち、2011年は用水路の損傷および排水路機能停止のため水田稲作が実施されないとの報告が

あった。

調査水田周辺は水稲単作地帯であり、調査水田も畑作物栽培の経験がなく、暗渠も設置されていなかった。そのため、降雨による縦浸透除塩をおこなうには排水性が不十分であると予想され、効率的な除塩のためには排水改良の対策が不可欠であると判断された。そこで畝立てをおこない、見かけの地下水深を増加させ乾燥を促進するとともに、畑作物栽培が可能になるように排水性の高い有効土層を整えた。畝の高さは20cm、畝間および畝幅を70cmとした。6月中旬に畝立て作業をおこない、続いてトウモロコシとヒマワリおよびワタを播種した。

2011年6月25日に土壌断面調査を実施した（図-3）。土壌断面の観察の結果からは、最上部に作土層（深さ0~30cm）があり、その下にややち密な耕盤層が30~45cmに存在すると判断された。作土層が30cmと厚い理由は、畑作物栽培のための畝立て（15cm）部分を含むためである。山中式硬度計による土壌硬度の測定からは、調査水田は耕盤の発達が弱く基盤層との境界がそれほど明確でないという特徴が示さ

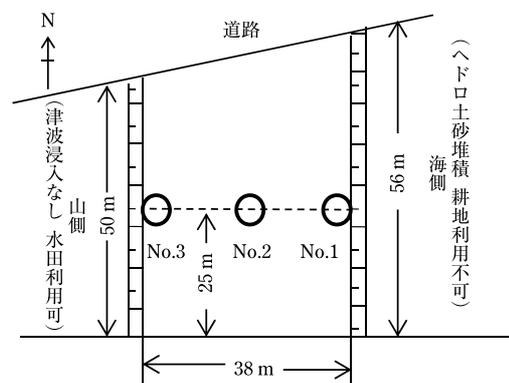


図-2 調査水田内の調査位置

深さ	土層	土色	斑鉄	土性	構造	粗密	可塑性	透水性	湿り	硬度 (mm)
0cm	作土 (畝立て)									6.8
15	作土	7.5YR2/3 極暗褐色	なし	HC	粒状	粗	大	中～小	潤	7.2
30	耕盤	7.5YR2/2 黒褐色	管状 幕状 含む	SiC	角塊	密	大	小	湿	14.8
45	耕盤									16.4
60	基盤	7.5YR4/3 褐色	管状 含む	SC	角塊	やや密	中	小	湿	19.6
										17.0

図-3 調査水田の土壤断面

れた。このため、耕盤層（深さ 30～45 cm）と基盤層（45 cm 以深）の境界は土色、土性、粗密、可塑性、透水性、硬度などから総合的に判断することとした。

調査水田の各土層の基本的物理性を表-1 に示す。特徴的な項目として、畝立て後の作土層の乾燥密度が 0.82 g/cm³ と小さいことが挙げられる。なお透水係数は基盤層が最も小さく、この水田では耕盤層だけでなく基盤層によって湛水を維持していたと判断される。

2. 測定項目および方法

調査水田において、土壤水分ポテンシャル、地下水位および地下水の塩分濃度を測定した。測定地点は調査水田の北端（道路）から南に約 25 m の 3 点（No.1～3）である。No.1 と No.3 はそれぞれ東側および西側の畝近く（畝から 1 m 以内）であり、No.2 は No.1 と No.3 のほぼ中間に位置する。No.1 と No.3 は畝間であり、No.2 は畝立ての影響をみるために畝立てしたところ（畝部）と隣接する畝間（畝間）を含んだ地点を選んだ。

土壤水分ポテンシャルをテンシヨメータを用いて

No.2 で測定した。測定深さは畝部の 5, 15, 25, 35, 45 cm, 畝間の 5, 15, 25 cm とした。

地下水に関する測定のために No.1～3 の各測定地点に観測用の塩ビ製パイプを埋設した。No.1 と No.3 の埋設した塩ビパイプに自記式の水深測定センサー（HTV-020-KP-05-V, HI-NET 社製）を埋設し、地下水位を測定した。また、No.1 の塩ビパイプ内に塩分計（U24-001, HOB0 社製：以下、「自記濃度計」という）を設置し、地下水の塩分濃度を測定した。地下水位、塩分濃度ともに測定間隔は 1 時間である。また、6 月 25 日から 10 月 25 日の間に 5 回、巻尺型水位計および簡易塩分濃度計（B-173, 堀場製作所：以下、「簡易濃度計」という）による測定をおこない、自記濃度計の測定値と比較した。

III. 結果および考察

1. 深さ方向の土壤水分変化および地下水位

2011 年 7 月 1 日から 9 月 6 日までの 68 日間の土壤水分張力を図-4 に示す。降雨のない時期は畝部の深さ 5 cm の水分張力が最も大きく、この部分が最も乾燥していることが分かる。続いて畝間の 5 cm の水分張力が大きく、7 月中旬以降は畝部の深さ 25 cm がこの値と近似していた。また畝部の深さ 35 cm の水分張力が畝間の 25 cm の水分張力よりも大きくなったことから、絶対的な深さが同じ層で比較すると、畝立

表-1 調査水田の土壤物理性

土層	真比重	乾燥密度 (g/cm ³)	間隙率 (%)	透水係数 (cm/s)
作土	2.54	0.82	67.7	8.3×10 ⁻³
耕盤	2.57	1.08	58.0	5.2×10 ⁻⁵
基盤	2.66	1.11	58.3	2.3×10 ⁻⁵

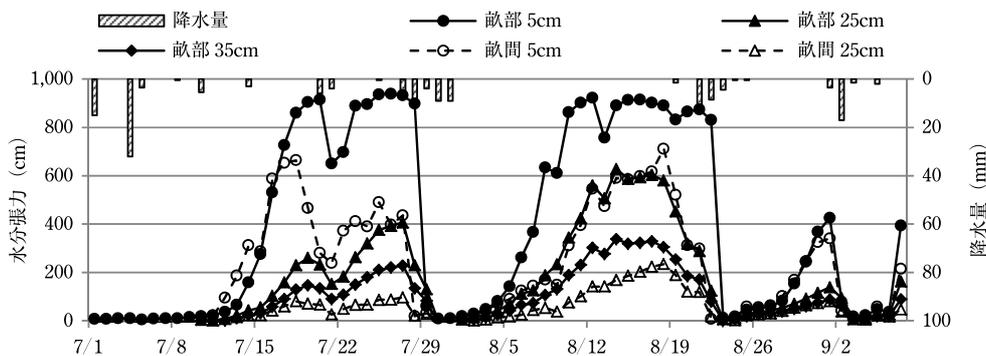


図-4 土壤水分張力の時間変化 (No.2)

表-2 各深さにおける飽和状態の日数 (No.2)

深さ (cm)	畝部					畝間		
	5	15	25	35	45	5	15	25
飽和状態の日数 (d)	0	0	11	15	18	11	14	17

てした部分では水分張力が約 20 cm 低下していることが確認された。

畑作物栽培が可能かどうかの判定をする際に、降雨により湛水が生じるかどうかの一つの基準となる。また、表層が湛水していない不飽和状態であっても、浅い部分で飽和状態が生じるとより深い層への酸素の供給が阻害され、畑作物の生育に支障が出る。各深さの飽和状態が継続する日数を推測するために、観測期間中 68 日間の各深さの水分張力が 24 時間以上継続して 0 以下となる日数を数えた (表-2)。畝間部ではすべての深さにおいて 10 日以上飽和状態が生じるのに対し、畝部では深さ 5, 15 cm で飽和状態が生じなかった。栽培期間中、約 2 カ月の間畝立てによる乾燥効果が継続したことから、対象地区における暗渠が設置されていない水田においても適切な土壌管理方法を選択することで畑作物の栽培が可能になる可能性が示された。ただし、8 月下旬からは畝部 5 cm と畝間 5 cm および畝部 25 cm と畝間 25 cm の水分張力の差がなくなり、畝立ての効果が約 2 カ月経過後に消失している可能性も示唆された。降雨やその後の乾燥による土壌の締固めの影響と思われるが、より長期間の栽培を想定する場合は注意が必要と言える。

測定地点 No.1 および No.3 における地下水位の変動を図-5 に示す。どちらの地点においても地下水位は降雨により急激に上昇し、無降雨期間になるとゆっくり低下している。2 地点を比較すると山側の No.3 よりも海側の No.1 の地下水位が低い傾向がみられた。調査水田より 30 cm 高い位置にある山側の水田では 2011 年にも稲の作付けを行うために湛水していたことから、その浸出水の影響を受け、山側の No.3 の方が地下水位が高くなったと考えられる。

今回収量調査は実施していないが、栽培したトウモロコシなどの作物の生育には湿害の影響はみられておらず、周囲の畑地と遜色なく成長していた。塩害を受けた水田を汎用農地化し、耐塩性の作物を栽培することができれば、除塩までの期間の経済的なつなぎとなるほか、畑作物の蒸散に伴う亀裂の発生、団粒化による排水性の促進が期待され、さらに耐塩性の作物を用いた除塩の可能性も見えてくる。

2. 地下水の塩分濃度変化

7 月 21 日から 10 月 21 日までの No.1 における地下水の塩分濃度変化を図-6 に示す。当初、塩分濃度は約 0.2% (3.8 mS/cm) であったが、7 月下旬の降雨により低下し 0.13% (2.5 mS/cm) となった。その後 8 月上旬はほぼ同じ値で推移していたが、8 月 20 日の降雨によって急激に上昇し 0.25% (4.6 mS/cm) を超えた。さらに 9 月 22 日の台風 15 号の豪雨により再び 0.15% (2.9 mS/cm) 程度に低下したが、10 月 6 日の降雨によって 0.2% まで上昇した。No.1 における

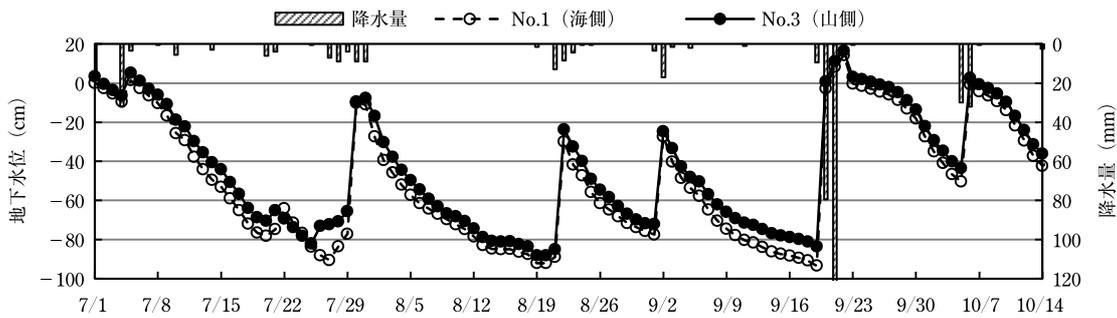


図-5 地下水位の時間変化 (No.1, 3)

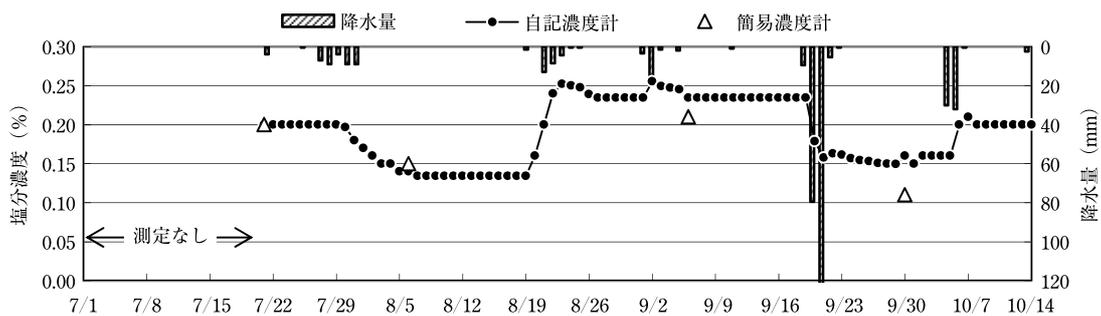


図-6 地下水の塩分濃度変化 (No.1)

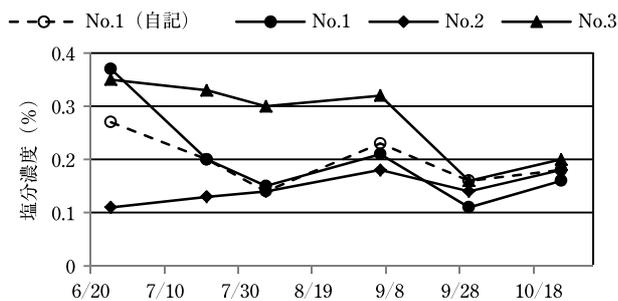


図-7 地下水の塩分濃度変化 (簡易濃度計 No.1~3)

自記濃度計と簡易濃度計の塩分濃度を比較すると、設置直後の6月25日はそれぞれ0.27%、0.37%と簡易濃度計の方が大きな値を示したが、9月以降簡易濃度計の値が若干低い値を示したが、おおむね近い値となっていた。

簡易濃度計を用いて測定された地下水の塩分濃度を図-7に示す。No.2とNo.1の測定値を比較すると、この場合も6月25日は測定値にばらつきが見られたが、7月以降の測定値は同様の傾向を示した。No.3の濃度は他の2点よりも高かったが、9月下旬には他の2点と同様の濃度となった。連続した地下水では溶質は拡散するため、同一圃場内の場所による塩分濃度に約2倍もの差が生じている理由を説明するのは難しいが、簡易濃度計を用いた測定では、測定している水の地表からおよび地下水面からの深さを正確に把握することができていないため、今後は深さを制御した状態での採水や測定などをおこない、ばらつきについて検証する必要がある。

本研究で測定された地下水の塩分濃度について注目すべき点は、降雨により塩分濃度が低下する事例がある一方で、反対に上昇する事実が確認されたことである。中村ら⁸⁾は、海水の浸入した水田において経時的な地下水の塩分濃度の測定をおこない、降雨後に塩分濃度が低下することを報告している。一般的に土壤中に蓄積した塩分は降雨により溶脱されるため、時間が経過すると土壤の塩分濃度も低下すると考えられる。土壤中の塩分が減少すれば降雨による浸透水中の塩分濃度も低下し、降雨後は地下水が希釈され濃度が低下すると考えられる。また、畝間部で生じていた湛水により、降雨後局所的に表面流出が発生していた可能性もあり、その影響についても今後検討が必要である。

測定された地下水中の塩分濃度が降雨後上昇した理由として、①他の地域から高い塩分濃度の地下水が移動してきた可能性が考えられる。調査水田は山側の地下水位が高いことから、山側に隣接する水田から地下水が流入していると考えるのが妥当である。簡易濃度計による測定結果からは同一水田内でも山側のNo.3

の地下水中の塩分濃度が高い傾向は見られるが、No.2についてはより海側のNo.1より塩分濃度が低く、この仮説を支持するものではなかった。山側の水田は標高も高く海から遠いことから津波の浸透量も少ないと考えられる。塩分濃度が高いとすれば、津波の影響をより大きく受けている海側(下流側)の水田であり、何らかの作用により濃度の高い海側の水田の高塩濃度の地下水が混入した可能性も考えられる。また、②浸透水中に多量の塩分が含まれている可能性が考えられる。土壤が乾燥しており小雨の場合は土壤断面中を水がゆっくりと浸透するため、塩の溶解反応が十分平衡に達し、塩分濃度が高くなる可能性がある。そのほか、③無降雨期に、地下水位が低下し土壤が乾燥化した際に、塩分が上昇、集積し、次の降雨時に地下水に溶脱した可能性なども考えられる。

なお、水稻の灌漑水中の許容塩分濃度について、生育段階ごとに異なるがCl濃度で300~500 mg/L(塩分濃度で0.06~0.1%)以下という基準が報告されている⁹⁾。今回の測定結果からは、津波の被害を受けてから半年以上を経過しても、調査水田の地下水の塩分濃度が0.15~0.2%以下には低下していないことが明らかになった。土壤水中の塩分濃度と地下水中の塩分濃度を直接比較することは難しいが、地下水の塩分が降雨や灌漑によって上昇し水稻の生育に支障を与える危険性はきわめて高いと考えられる。本研究の結果からは対象地域では畝立てにより排水を促進しても、降水のみに依存した脱塩作用では塩分濃度を0.15%より下げるのは難しいと言える。さらに地下水位を下げ、浸透を促進することで溶脱量を増加させるとともに、乾燥時に毛管現象による塩類の上昇・集積をおこさないように注意する必要がある。また、調査水田周辺の地下水中の塩分濃度が依然として高いことから、周辺地域の地下水も塩水化が進んでいることが懸念される。地形的にみると、海岸に近い真山堀で地下水が停滞していると推察される。できるだけ早い時期に地下水の排除を目的とした地域の排水強化が必要と考えられる。

海水の浸入に伴って生じる水田の塩害対策として、台風時の高潮による海水浸入への対策例が参考になると考えられる。1999年9月の台風18号による高潮により塩分が集積した熊本県不知火干拓地の水田では、排水路整備、石灰によるNa置換、酸性改善による排水改良と灌漑がおこなわれ、翌年からは栽培が可能になったと報告されている¹⁰⁾。今後、これらの方法と組み合わせることにより、津波により海水が浸入した水田において効率のよい除塩を進めていく必要がある。

IV. まとめ

東日本大震災の際に生じた津波によって海水が浸入した宮城県岩沼市の水田において畝立てをおこない、土壌水分状態や地下水位、地下水中の塩分濃度を経時的に観測した。

測定の結果、20 cm の畝立てにより、畝立てした部分では同じ深さの畝間部分と比べて土壌水分張力が約20 cm 小さくなっていることが明らかになった。栽培期間中、畝間では深さ5 cm の土壌が1日以上飽和状態になるのが11日あるのに対して、畝立てした部分では深さ15 cm まで1日以上継続した飽和状態が見られなかった。本研究対象のような暗渠が埋設されていない排水不良の調査水田においても、畝立てにより畑作が可能な汎用化が実現できる可能性がある。

一方、地下水中の塩分濃度は時期により変動したが約0.2%で推移した。降雨後に濃度が上昇する場合と低下する場合があった。濃度が低下した理由として、降雨によるリーチングの収束や地下水の希釈効果が考えられるが、濃度が上昇した理由については今後の課題として残された。約4カ月の栽培期間で地下水の塩分濃度が明確に低下せず、既往の研究で報告されている水稲作の許容塩分濃度を下回ることができなかったことから、除塩を進める上では本地域ではほかの排水性改良法も検討するとともに、早急な地域全体の排水強化が必要であると結論づけられた。

排水性の低いほかの水田単作地域においても畝立てによる表土の乾燥化により畑作物の導入が可能になれば、塩性作物の導入によるさらなる除塩や当面の経済活動が可能になると期待される。今後は畝立てや畑作物栽培の有無が土壌塩分濃度や地下水位、塩分濃度を与える影響の解明が課題になる。

なお、本調査研究は主に「岩沼市震災復興会議」の活動の一環として実施したものである。とくに、本会議の議長である東京大学大学院石川幹子教授および井口経明岩沼市長には強力なリーダーシップのもと精力的に推進されたことに深謝する。また、現地調査に際して、岩沼市役所関連職員および地元農家の方々に震災という未曾有の困難な状況下にもかかわらず協力いただいた。関係の皆様方に対して厚くお礼を申し上げるとともに、一日も早い農地復興を祈念する。

引用文献

- 1) 農林水産省大臣官房統計部：東日本大震災（津波）による農地の推定被害面積，<http://www.maff.go.jp/j/tokei/saigai/pdf/shinsai.pdf>（参照2013年5月28日）
- 2) Fujikawa, T., Okazawa, H., Nakamura, T.,

Takeuchi, Y. and Komamura M.: Physical and Chemical Properties of Tsunami Deposits in the Northeast Area of Fukushima Prefecture after the Tohoku-Kanto Earthquake, International Journal of GEOMATE 1(1), pp.44~49 (2011)

- 3) 井上光弘：塩類化の現状と除塩技術，地盤工学会誌 60 (1), pp.12~15 (2012)
- 4) 宮本英揮，取出伸夫：Na・Ca 混合溶液の飽和浸透に伴う粘土の透水性変化について，農土論集 230, pp. 37~45 (2004)
- 5) 佐々木長市：第2章7.水田の汎用化，農地環境工学，文永堂，pp.64~74 (2008)
- 6) 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の津波被災農地の除塩対策，水土の知 80(7), pp.3~6 (2012)
- 7) 国土地理院：国土地理院地図閲覧サービス，<http://watchizu.gsi.go.jp/>（参照2013年4月18日）
- 8) 中村貴彦，藤川智紀，駒村正治，細野 衛：津波被害を受けた福島県相馬市水田の土壌物理性と地下水の塩分濃度，農大集報 58(4), pp.207~213 (2014)
- 9) 兼子健男，村川雅己，小財 伸，身次幸二郎：塩類が累積した水田の暗渠排水を利用した急速除塩技術，農土誌 70(7), pp.27~30 (2002)
- 10) 松丸恒夫，古川雅文：作物の塩化ナトリウム過剰障害と塩分限界濃度，農業および園芸 70(4), pp.475~479 (1995) [2013.6.28.投稿]

略 歴

藤川 智紀 (正会員)



1974年 兵庫県に生まれる
2001年 東京大学大学院農学生命科学研究科博士後期課程修了
2008年 東京農業大学助教
2013年 同准教授
現在に至る

中村 貴彦 (正会員)



1965年 長崎県に生まれる
1994年 筑波大学大学院農学研究科博士後期課程修了
東京農業大学助手
2014年 同講師を経て准教授
現在に至る

駒村 正治 (正会員)



1947年 東京都に生まれる
1969年 東京農業大学農学部卒業
東京農業大学助手
1995年 同講師，助教授を経て教授
2012年 東京農業大学名誉教授
現在に至る

細野 衛



1946年 東京都に生まれる
1969年 東京農業大学農学部卒業
埼玉県立高等学校教諭
2000年 東京農業大学非常勤講師
現在に至る