

講演要旨

津波被災地の農業再生に向けた対策技術研究の貢献と課題

伊藤豊彰

1. はじめに

2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震に伴って発生した巨大津波は、東北地方から関東地方の太平洋沿岸部を襲い、約23,600haという広大な農地(被災6県の農地の2.6%)に甚大な被害を与えた。宮城県では海岸から2~5km離れた内陸部まで津波が達し、その被害面積は仙台平野の沿岸部を中心に15,002ha(県農地全体の約11%)に及んだ。津波被災農地(復旧予定農地としては21,480ha)のうち、宮城県が約2/3を占め、そのほとんどが水田であった。2011年に宮城県で営農再開できたのは、主に石巻地区のわずか1,220haであった。津波被災農地には瓦礫が堆積し、用排水施設には瓦礫や土砂が流入し、基幹排水路が通水不能になった。沿岸部に配備されている排水機場が壊滅的な被害を受け、海への排水ができなくなったために、除塩による多量の用水使用とそれに伴う排水が下流部にさらなる浸水被害をおよぼす可能性があったために、2011年は津波の影響が軽微であった圃場においても、作付けが自粛された。

2012年から本格的に開始された除塩工事(宮城県の例)では、瓦礫の撤去、津波堆積物の除去(2cm以上の堆積物)、弾丸暗渠の施工(本暗渠が無い圃場では排水溝の施工)、耕起、湛水(2~3日間)、排水、という工程で、縦浸透法による除塩が行なわれた。作土と次表層の塩素濃度の基準値(水田の場合0.1%)より低下するまで湛水と排水が繰り返された。除塩基準(塩素濃度0.1%(農林水産省農村振興局,2011))未満まで低下した圃場では、塩分濃度が高いことによる水分吸収阻害(浸透圧ストレス)による塩害は起こりにくいことが実態調査で明らかにされてきた。例えば、ある除塩圃場では水稻や転換大豆の塩害が生育後半に観察されている(星・遊佐,2012)。これは、中干し時や夏期に下層土から塩分が上昇したためであり、塩分が下層土に残留する場合の塩害リスクが明らかにされている。また、除塩土壌においては吸着態Naが多く残存する場合は、作物にNaの過剰吸収によるイオンストレスを想定する必要がある。さらに、津波は農地に塩分だけでなく、河底・海底のヘドロ状堆積物や土砂や作土の消失をもたらす場合もある。

本稿では、津波被災農地の生産性を早期に回復するための対策技術について、主に2011年東日本大震災津波で被災した地域で行われた水田圃場の実態調査と対策研究を以下の5つに整理して紹介する。(1)津波被災農地の実態、(2)自然降雨による津波被災農地の除塩に関する要因、(3)津波堆積泥土の問題と対策、(4)津波や除塩工事によって作土が削剥された農地の問題、(5)除塩土壌の交換性塩基の問題と対策

2. 津波被災農地の実態

2011年の東日本大震災によって農地が被災した各県では、被災農地の実態調査が行われたが、ここでは演者も関わった宮城県と東北大学が2011年5月に共同で実施した緊急土壌調査の結果を紹介する(菅野, 2012)。

宮城県の農業振興課、農業改良普及センター、古川農業試験場、農業・園芸総合研究所と東北大学大学院農学研究科ともに各管内の市町、JA、土地改良区等の関係機関が連携して被災農地全域の土壌調査(2011年5月11日～19日)が行われた。344の調査地点のうち堆積層は275地点で確認され、堆積泥層の厚さの中央値は2.0 cm(最大値16.3 cm)であり、塩分濃度は作土に比べて高く、水溶性塩分濃度($EC_{1:5}$)の中央値は 12.8 dS m^{-1} であった。仙台平野の水田圃場の調査地点(240地点)の水溶性塩分濃度は、作土層(0～10cm)、次表層(10～20cm)で平均2.4、 1.2 dS m^{-1} であった。作土層、次表層の水溶性および交換性陽イオンの総量は、平均で23、 18 cmolc kg^{-1} と非常に高く、その内の35、30%をNaが占めた。この調査によって、作土および下層土の水溶性塩類の除去と塩基組成の改善が必要であることが明らかとなった。

3. 自然降雨による津波被災農地の除塩に関する要因(圃場排水性、津波堆積物の影響)

津波被災農地を除塩するために除塩工事が行われたが、モニタリング調査によって自然降雨による除塩が想像以上に進行すること、除塩効率には圃場排水性(暗渠の影響も含む)と津波堆積物が影響することが明らかにされた。

宮城県亘理農業改良普及センターが実施した複数の被災水田のモニタリング調査によれば、津波堆積物が無い圃場では合計952 mmの降雨(2011年5月16日～10月28日)によって作土(20 cm)の $EC_{1:5}$ は平均で4.3 から 0.5 dS m^{-1} に低下した(図1)。しかし、塩分濃度の高い泥土堆積物がある場合(厚さ3.5～4.8 cm, EC の平均値 18 dS m^{-1})は、上記の自然降雨では作土の除塩は不十分だった(図2、1.7から1.1に低下 dS m^{-1}) (伊藤ら, 2015)。岩手県のモニタリング調査(調査期間の降雨:1019 mm)によって、圃場の排水性が自然降雨による除塩効果に影響することが明らかにされている。排水良好な圃場では作土の EC が 0.6 dS m^{-1} 以下に低下したが、耕盤層を含む20～40 cmの層の緻密度が高く、排水性が低い圃場で作土や下層の EC が低下しにく

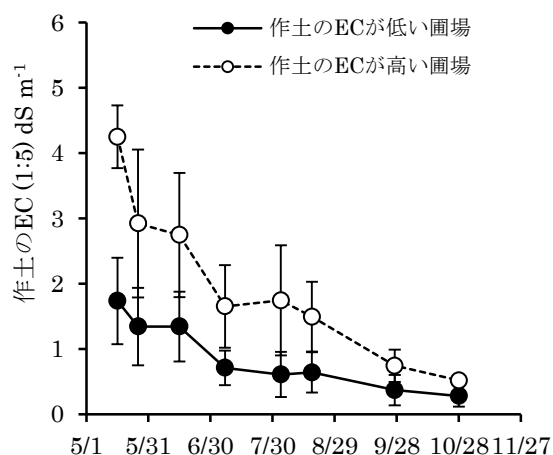


図1 津波堆積物がない水田のECの推移

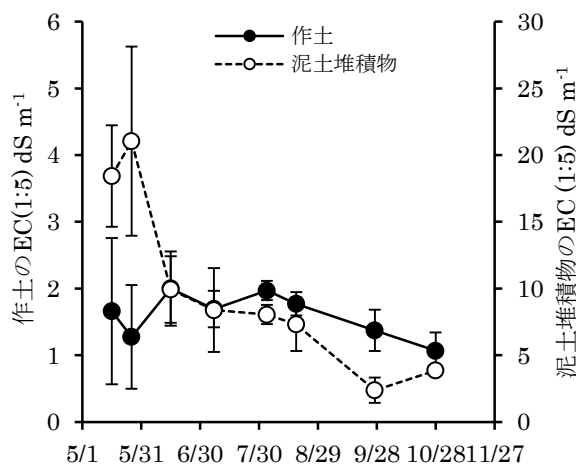


図2 作土の塩分濃度に対する泥土堆積物の影響

いことが明らかにされた(佐藤、2015)。また、被災水田圃場において弾丸暗渠の施工が除塩を促進することが実証された。千葉ら(2012)によれば、本暗渠が施工された圃場(宮城県名取市)において弾丸暗渠の施工が自然降雨(643 mm)によって塩化物イオン量の溶脱量が約 1.4 倍に増加させることが明らかにされた。

このように、自然降雨による被災圃場の除塩効率を高めるために、塩分濃度の高い津波堆積物の除去、圃場排水性の評価、暗渠の施工が有効であることが明らかにされている。

4. 津波堆積泥土の問題と対策

(1) 多量の塩分と可給態養分

上述のように、宮城県の津波被災農地広域土壌調査によって、泥土状津波堆積物は水分を多量に保持し、塩化 Na を主体とした多量の塩分を含むために、鋤き込んだ場合や農地表層に放置した場合は多量の Na が作土に供給されることになる。1年間自然降雨によって塩分が溶脱したにも関わらず、厚い津波堆積泥土は塩分を多量に保持しており、このような堆積物を作土に混和した場合に水稻に塩類濃度障害が生じる可能性がある(図 3)(伊藤、2014)。泥土は農地への塩分持ち込み量を増加させるので、厚く堆積している場合は可能なかぎり早急に除去することが望ましいと考えられた。

しかし、堆積物を除去するためには、費用と時間を要し、後述するように作土を削剥することになり、堆積物の保管も必要になる。津波堆積泥土は有害な重金属の含有が少なく(後藤・稲垣、2015a)、比較的多くの可給態リン酸(高橋、2015)や可給態窒素(佐々木、2015、図 3)を含有するので、塩分濃度と可酸化性イオウの含有量やその後の酸性矯正などを前提として、農地還元によって利用可能であることが明らかにされている(後藤・稲垣、2015b)。

(2) 硫化物

津波堆積泥土は多量の硫化物を含む場合があり、好気条件では主に微生物酸化によって硫酸を生じ、土壌を酸性化する。このような泥土が水田に多量にすきこまれると、硫酸イオンは水稻栽培期間中に還元され、硫化水素に変化する。遊離酸化鉄含量の少ない土壌では硫化水素の一部が遊離の形態で存在し、水稻根の養分吸収阻害や根腐れを引き起こす可能性がある。

宮城県の被災農地表層に堆積した泥土 295 試料のうち 104 試料を分析した結果(秋田ら、2012)によれば、可酸化性イオウ(過酸化水素水を用いた酸化処理によって

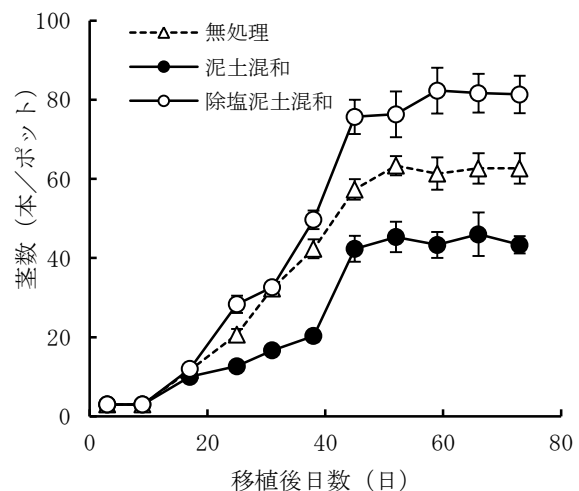


図 3 塩分濃度の高い泥土混和が水稻生育に及ぼす影響

(EC 5.8 の津波堆積泥土 2.5cm を灰色低地土 12.5cm に混合して、慣行的施肥を行い、1/2000a ポットで水稻の栽培を行った。)

硫酸に変化するイオウ(硫化鉄やパイライト、等)の濃度は、 $0\sim 16\text{gS kg}^{-1}$ (平均で 2.2gS kg^{-1})であり、変動が大きかった。石巻市の海岸近くの圃場に厚く堆積した海底由来と推定された泥土は、非常に高い過酸化性イオウ濃度(7.7gS kg^{-1})を示した。しかし、ほとんどの泥土試料の可酸化性イオウ濃度は低かった。このことは、泥土状の堆積物の多くは津波によって浸食された作土の細粒物質が混合物であることを示唆する。硫化物濃度の高い泥土を多量に鋤き込んだ場合は、多量の硫酸が生成し、強酸性となる可能性がある。福島県相馬市の例(後藤・稲垣、2015b)では、10cmほどの津波堆積土砂を作土に混入した場合、作土のpHが4未満にまで低下している。東北地方では転換畑で大豆が栽培されることが多い。大豆は酸性に対する耐性は高くなく、Caの要求量が多いので、泥土を鋤き込んだ場合は、転作ダイズ作を考慮して、土壌pHの矯正とCa補給は不可欠と考えられる。

なお、宮城県の広域土壌調査によれば、津波堆積泥土は農地土壌に比べて重金属濃度がわずかに高い傾向があるが、ヒ素濃度が基準値より高い1試料を除いて、農用地土壌汚染防止法の基準値(銅、ヒ素)未満であり(宮城県農業振興課支援班、2011)、2cm以上の津波堆積物層は排土されていることから、津波が搬入した泥土による農地汚染の可能性は非常に低いと考えられる。

泥土堆積物を作土に混合し、その豊富な可給態養分(窒素やリン酸など)を利用する場合は、堆積泥土の厚さ、成分に関する調査結果を基に、減肥や硫化物の酸化による硫酸生成・酸性化や水田での硫化水素害の発生に対する対策が必要になる。酸性化対策としては、福島県相馬市において泥土混合と転炉スラグ($5\sim 10\text{Mg ha}^{-1}$ 施用によってpHが5.2~6.3に上昇)によるpH調整による早期の農地復旧が成功している(後藤・稲垣、2015b)。水稻への硫化水素発生害に対しては、酸化的な水管理(早い時期からの間断灌漑など)や有機物管理(生わらにかえて堆肥の施用)による対策が考えられる。

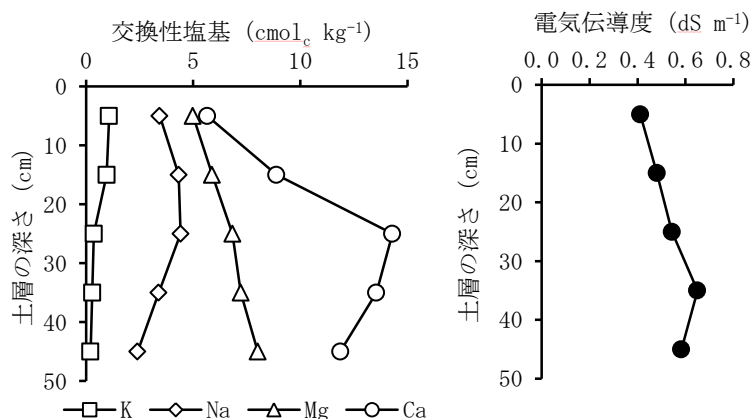
5. 津波や除塩工事によって作土が削剥された農地の問題

東北地方太平洋沖地震津波は、作土の浸食を引き起こした。海岸に近い一部の圃場では、前年秋に耕起され、柔らかくなっていた作土が津波によって除去され、表層から硬い下層土が現れていた(伊藤、2014)。作土は、海に流出しただけでなく、周辺の圃場にも津波堆積物の一部として再堆積したと推定される。また、津波によって海岸の砂や河底・海底由来の泥土状堆積物が堆積した農地も見られた。宮城県では、2cm以上の堆積物は除塩工事によって除去されたが、機械の操作精度の問題により堆積物だけを除去することはできず、作土の一部も除去された。

このようにして、作土の一部、またはすべてを失った圃場や海岸近くの地盤沈下した圃場では、近隣の山地の低肥沃度の土壌が客土された。本来であれば、適切な土壌を客土すべきであるが、津波被災は低生産圃場の造成という、新たな問題を生じさせたことになる。この問題は非常に深刻であり、土壌診断を基に堆肥などの有機物やケイカル、溶リンなどの土壌改良資材を適切に活用し、新たに作土を創出していかなければならない。

6. 除塩土壌の交換性塩基の問題と対策

津波被災農地では、海水中の陽イオンと土壌の吸着イオンとの間で交換反応が起こり、吸着イオンとして Na と Mg の割合が増加している(菅野、2012)。津波被災土壌の水溶性塩分は除塩によって比較的容易に低下するが、相応の Na イオンが吸着態として残存する場合がある。排水不良水田では、除塩が終了した水田においても比較的少量の吸着態 Na(交換性 Na)が残存していることが報告されており(瑞慶村ら、2013)、宮城県石巻市の圃場の例でも、除塩が終了して1年後の水田で交換性 Na の残存が



明確である(図 4)。この圃場では、作土の EC は水稻生育に障害を与えない程度 (EC 0.6 dS m⁻¹ 未満) に低下しているが、交換性 Ca は作土から下層土に溶脱して減少しており、交換性 Na は通常の土壌に比較して増加していた(伊藤、2015a)。

図 4 除塩後 1 年経過した津波被災水田における交換性塩基含量と電気伝導度

吸着 Na イオンの割合が高い場合は、除塩過程の水溶性塩分濃度の低下に伴って粘土が分散し、透水性が減少し、除塩効率も低下することが懸念される。畑地では団粒が崩壊しやすくなり、降雨後に土壌表面にクラスト(粘土皮膜)が生成し、出芽障害を引き起こすことがある。

交換性 Na 率 (ESP: Exchange Sodium Percentage = 交換性 Na / CEC %) が 20% を超えると、イネの生育に悪影響を与えはじめるとされており (Dobermann and Fairhurst, 2000)、このような土壌では Na の過剰吸収による障害 (Na イオンストレス) が懸念される。水耕栽培実験によって、Na 濃度が高い培地に Ca を添加すると地上部への Na 移送が抑制される (Anil, 2005) ことや、Na 吸収が抑制され K 吸収が抑制される (Song and Fujiyama, 1996) ことによってイネの生育が改善されることが明らかにされている。Na 飽和度の高い海岸塩類土壌 (ESP=13%) とインディカ稲を用いたポット栽培試験において、Ca 資材の施用によって体内 Na 濃度の減少、K 濃度の増加とともに水稻生育が向上することが報告されている (Sah Alam et al., 2002)。Ca 施用はイネの Na イオンストレスを緩和することから、除塩土壌における塩基のアンバランス (Na が多く、Ca が少ない) を是正し、作物生育を改善する対策として Ca 資材の施用が有効と考えられる。

さらに、イネはケイ酸を積極的に吸収し、ケイ酸施用によって生育・収量が増加するだけでなく、多様な生物的・非生物的ストレスに対する抵抗性を向上させることが知られている (Ma, 2004)。ケイ酸施用が高 Na 条件のイネの生育を改善することが知られており、ケイ酸による塩害耐性向上に Na 吸収の抑制、葉の蒸散抑制が関係すると考えられている (Match et al., 1986)。ケイ酸施与はイネの根のアポプラスト輸送を抑制し、Na の地

上部への移行を抑制すること(Yeo et al.,1999)、その原因はイネの根の内皮細胞にケイ酸が沈着することにより導管への Na 流入が抑制されることであることが明らかにされている(Gong et al., 2006)。

以上のことは、可溶性ケイ酸と多量の Ca を含む転炉スラグ(製鋼スラグ、転炉石灰とも呼ばれる)が津波被災・除塩土壌における水稻生産性改善に有効であることを期待させる。津波被災・除塩土壌において、交換性ナトリウム率が高い粘土質土壌では転炉スラグの施用によって水稻のカルシウム吸収の増加、ナトリウム吸収の低下、ケイ酸吸収量の増加とともに玄米収量が増加すること、すなわち除塩水田土壌の修復には少なくとも Ca の補給が有効であることが明らかにされている(茄子川ら、2014;伊藤、2015b)。さらに、ダイズは耐塩性、耐酸性、耐湿性が低いこと、ダイズ根粒の窒素固定活性は塩類ストレスへの感受性が高いこと(池田ら、1987)、我が国では水田が畑に転換されて、定期的にダイズが栽培されることを考慮すると、津波被災・除塩土壌の改善には Ca 補給、pH 矯正、団粒構造の維持による透水性向上効果が期待できる Ca 資材の施用は必須と考えられる。

7. 今後の課題

津波や除塩工事によって作土が削剥され、低肥沃性土壌が客土された圃場の生産性回復は未解決であり、重大な課題である。また、海水流入とその後の除塩によって広範囲な水田土壌の塩基組成(Ca の低下、Mg の増加)が変化していると考えられる。ダイズ作への影響も含めて、モニタリング調査と対策技術研究が必要である。

最後に、被災された多くの皆様に心からお見舞いを申し上げますとともに、一日も早く被災地の農業と農村が復興しますことを祈念いたします。

引用文献

- 秋田和則・千葉ゆか・菅野均志・高橋正・南條正巳・齋藤雅典・伊藤豊彰 2012. 土肥学会要旨集, 58, 98.
- Anil V.S., P. Krishnamurthy, S. Kuruvilla, K. Sucharitha, G. Thomas and M. K. Mathew. 2005. *Physiologia Plantarum*. 124, 451-464.
- 千葉克己・冠秀昭・加藤徹 2012. 土壌の物理性, 121, 29-34.
- Dobermann A, Fairhurst T. 2000. PPI, PPIC and IRR. p 1-191.
- Gong HJ, Randall DP and Flowers TJ 2006. *Plant Cell Environment*, 29, 1970-1979.
- 後藤逸男・稲垣開生 2015a. 日本土壌肥料学雑誌, 86, 412-414.
- 後藤逸男・稲垣開生 2015b. 日本土壌肥料学雑誌, 86, 452-458.
- 星信幸・遊佐隆洋 2012. 日本海水学会誌, 66, 74-78.
- 池田順一・小林達治・高橋英一 1987. 日本土壌肥料学雑誌, 58, 53-57.
- 伊藤豊彰 2014. ペドロジスト, 58, 51-58.
- 伊藤豊彰・今関美菜子・渋谷智行・今野知佐子 2015. 日本土壌肥料学雑誌, 86, 406-408.
- 伊藤豊彰 2015a. 日本土壌肥料学雑誌, 86, 406-408.

- 伊藤豊彰 2015b. 日本土壤肥料学雑誌, 86, 393-395.
- 菅野均志 2012. 環境情報科学, 41, 5-9.
- Matoh, T., P. Kairusmee and E. Takahashi 1986. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 32, 295-304.
- 宮城県農業振興普及支援班 2011. 宮城県記者発表資料 (H23年7月23日)
<http://www.pref.miyagi.jp/press/pdf/110721-3.pdf>
- 茄子川恒・宇野亨・齋藤雅典・田島亮介・伊藤豊彰 2014. 土肥学会要旨集, 60, 136.
- 佐々木次郎 2015. 日本土壤肥料学雑誌, 86, 439-440.
- 佐藤喬 2015. 日本土壤肥料学雑誌, 86, 396-398.
- Shah Alam, S. M. Imamul Huq, Shigenao Kawai and Aminul Islam 2002. *J. Plant Nutrition*, 25, 561-576.
- Song, J. Q. and H. Fujiyama. 1996. *SSPN*. 42, 503-510.
- 瑞慶村知佳・北川巖・友正達美・坂田賢 2013. 農工研技報, 214, 9-16.
- 高橋正 2015. 日本土壤肥料学雑誌, 86, 404-405.
- Yeo A. R., S. A. Flowers, G. Rao, K. Welfare, N. Senanayake and T. J. Flowers. 1999. *Plant Cell Environment*, 22, 559-565.