

平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震による津波被災農地の堆積物・土壌の理化学的特徴

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 独立行政法人 農業・食品産業技術総合研究機構 農村工学研究所 公開日: 2025-12-26 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 北川, 巖, 友正, 達美, 原口, 暢朗, 塩野, 隆弘, 若杉, 晃介, 芦田, 敏文, 瑞慶村, 知佳 メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.24514/0002001441

〔農工研技報 213〕
39～51, 2012〕

平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震による 津波被災農地の堆積物・土壌の理化学的特徴

北川 巖*・友正達美**・原口暢朗*・塩野隆弘***
若杉晃介*・芦田敏文****・瑞慶村知佳*

目 次

I 緒 言	39	6 イオウ含量 (S)	43
II 調査方法	40	IV 考 察	44
1 被災地における調査の概要	40	1 塩分と土壌理化学性	44
2 分析方法	41	2 重金属	47
III 津波被災農地のヘドロ・堆砂・土壌の基本特性	41	3 津波堆積物の酸性硫酸塩土壌の判断と対策	47
1 土性	41	4 客土材の理化学性の評価	48
2 pH(H ₂ O)と EC	41	V 結 言	48
3 陽イオン交換容量と交換性塩基含量 (K ₂ O, CaO, MgO, Na ₂ O)	42	参考文献	48
4 水溶性陰イオン含量 (Cl ⁻ , NO ₃ ⁻ , SO ₄ ²⁻)	42	Summary	51
5 0.1NHCl 可溶性亜鉛・銅・カドミウム含量 (Zn, Cu, Cd)	43		

I 緒 言

2011 年 3 月 11 日に三陸沖を震源とし、地震の規模が M9.0 の巨大な東北地方太平洋沖地震が発生した。本地震に伴い最大波高が 3～6m を超える大津波が発生し(気象庁, 2011)、東北地方から関東地方の太平洋沿岸に甚大な被害をもたらした。

この津波による海水浸水面積は 561km² で(国土地理院, 2011)、このうち農地の面積は約 266 km² に及んだ(農林水産省, 2011)。津波により冠水等の被害を受けた農地は、耕地面積あたり宮城県で 11%、福島県で 4% と、この 2 県が特に多い。また、津波以外の被害を含めた本地震による農業に関する被害・破損箇所と被害額は、農地 17,456 カ所で 4,012 億円、農業用施設等 21,457 カ所で 3,658 億円と、極めて甚大である(農林水産省, 2011, 11 月 7 日時点)。

沿岸部の農業地帯は津波により大きな被害を受けるとともに、農地には海水が多量に流入し、船や車、家屋

の破壊物などの様々な瓦礫、ヘドロ(農学会法の土性 L 以下の細粒質)や海砂が堆積した。平成 23 年 12 月時点で、大きな瓦礫類は重機や人力により撤去が進んでいる。しかし、大量に流入したヘドロや堆砂の本格的な排除は始まった段階である。また、農地の用排水施設についても損壊、用排水路内への瓦礫等の堆積といった被害が甚大で、多くの地域でそれら施設の機能が十分に回復するまでには至っていない。そのため、海水が流入した農地においては、作物生産を行うために不可欠な土壌の除塩作業が行えずにいる。2011 年内に除塩作業が行われた農地は、全浸水農地面積の 1 割にも満たない。また、降雨による除塩効果も期待されているが、その効果は、降雨量や農地排水機能の高低、土壌条件に左右されるため、一律に見込むことが難しい。さらに、津波被災農地では、塩害のみならず、長期的に作物の生育障害要因や農産物の成分面の問題となる硫化物や重金属が津波堆積物に含まれることへの懸念もある。

しかし、これまでに、津波被災農地の堆積物や土壌の理化学性の pH や EC、塩基類などから、塩分(例えば、農林省東海近畿農業試験場, 1961;宮城県立農業試験場, 1961;兼子, 2003)や硫化物(米田, 1961)、重金属までを総合的に評価した報告はみあたらない。今後の農地の復旧にあたっては、被災農地の土壌の理化学性を総合的に評価し、その特徴に応じた復旧工事の検討や営農への反映が求められる。

以上の背景から、被災地において農業を再開するため

* 農地基盤工学研究領域水田高度利用担当

** 農地基盤工学研究領域用水管理担当

*** 農地基盤工学研究領域畑地工学担当

**** 農村基盤研究領域地域計画担当

平成 23 年 12 月 15 日受理

キーワード: 津波被災農地, 津波堆積物, 理化学性, 塩分, 酸性硫酸塩土壌, 重金属

には、より適切な農地土壌の理化学性を回復させるための取り組みが必要と考える。そこで、本報では、海水の流入、ヘドロや海砂などの堆積による農地土壌の理化学性への影響について把握するとともに、津波被災農地の短期から長期にわたる各段階の問題点を整理し、今後の農地復旧の取り組みのための基礎的知見を示す。

II 調査方法

1 被災地における調査の概要

今後の津波被災農地における復旧工事の計画策定に向けては、津波による冠水や津波堆積物により懸念される農地土壌の課題を整理することが求められるため、津波堆積物と農地土壌の理化学的特徴を明らかにする必要がある。そこで、本調査では、津波により被災した宮城県内15地点 (Fig.1のNo.4~18) と福島県内2地点 (Fig.1の松川浦と八沢干拓地) の農地の土壌、宮城県内の2地点 (Fig.1の名取市と山元町) の道路上に堆積した堆砂、並びに宮城県内の被災農地周辺の3地点 (Fig.1のNo.1~3) の非冠水農地の土壌、比較対照となる北海道石狩地方の海砂と川砂、宮城県北部地域において農地への客土として利用可能と考えられる1地点 (Fig.1の大和町) の火砕流堆積物の土壌試料を採取し、土壌理化学性の分析を行った (Fig.1)。

農業施設及び農地の被害調査については、被災6日後

の2011年3月17日に宮城県亶理町と名取市の農地や排水機場等の農業用施設に赴き、調査地の道路上に堆積している堆砂を採取し、塩分を含むことを確認した。その調査地点近傍にある排水路内の大量の停滞水は、ECが27mS/cmと高く、海水が多量に混入していた。このときの農地の調査については、道路の寸断や燃料の制限による機動力の限界、湛水や瓦礫等の散在、余震等に対する安全確保、優先すべき復旧作業や人命救助などの観点から、安全かつ適切に農地土壌の採取などを行える状態ではなかった。

被災26日後の2011年4月6日に津波被災農地の土壌の状態を把握するため、宮城県亶理町と山元町において15地点のヘドロ (ヘドロと砂を混合採取) や堆砂 (明らかに砂の場合)、農地の表層 (0~10cm) と次層 (10cm以下) の土壌を採取した。

その後、被災94日後の2011年6月13日に同地点の農地において、ヘドロや堆砂の堆積厚を把握し試料を採取、各土層 (0~2.5cm, 2.5~5.0cm, 5.0~7.5cm, 7.5~10cm, 10~20cm, 20~30cm, 30~40cm, 40~50cm, 50~60cm; 一部地点では土壌崩落のため採取できなかった層がある。) の試料を採取した。

なお、2011年3月11日以降の積算降水量は、被災26日後の4月6日に亶理町で26mm、仙台市で44mm、被災94日後の6月13日に亶理町で253mm、仙台市で345mmであった。

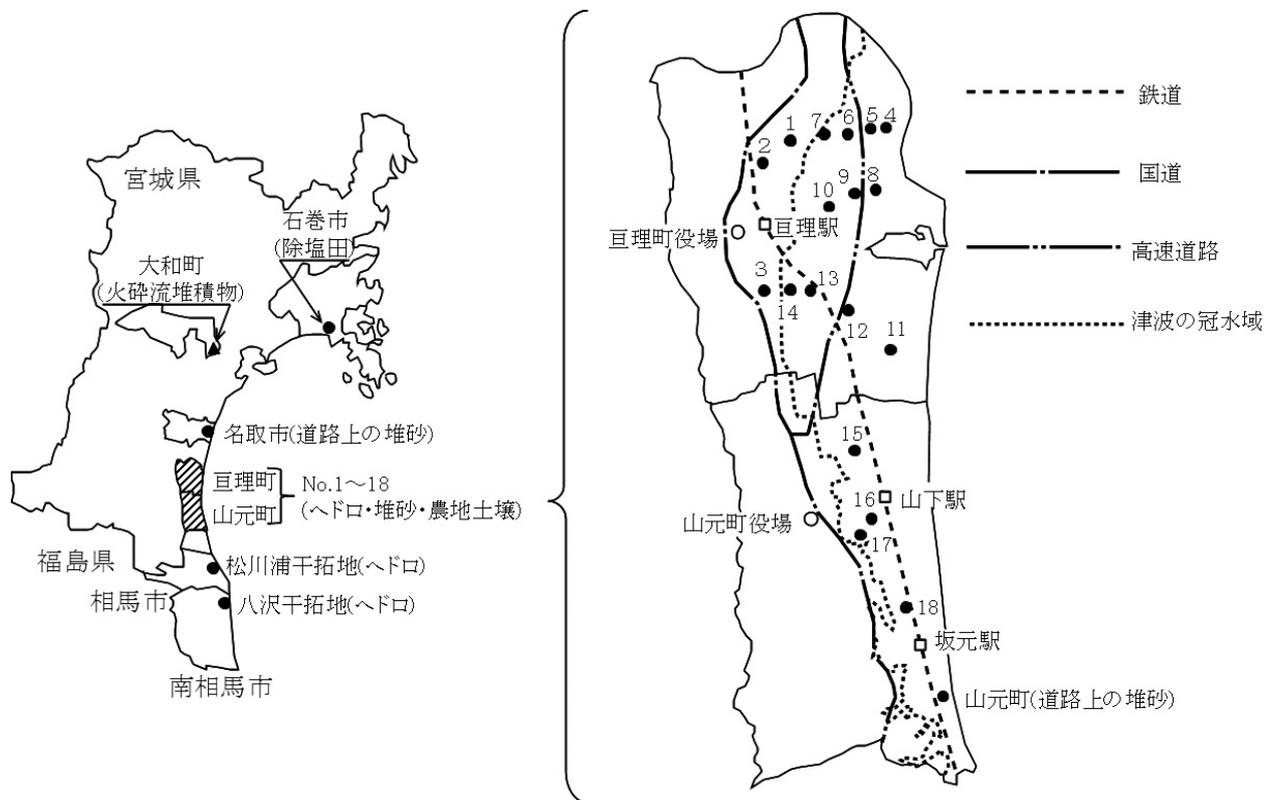


Fig. 1 調査地点の概要
Overview of investigation spots

2 分析方法

土壌物理性は、土性（農学会法）を触感による判定（日本ペドロロジー学会 1997）で、土壌化学性は、pH (H₂O), EC, 陽イオン交換容量, 交換性塩基含量 (K₂O, CaO, MgO, Na₂O), 0.1NHCl 可溶性銅・亜鉛・カドミウム含量を分析した。水溶性陰イオン含量 (Cl⁻・NO₃⁻・SO₄²⁻) は風乾土試料の 1:5 水浸出液をイオンクロマトグラフィ法により分析した。また、ヘドロ等の酸性硫酸塩土壌の判定を行うため過酸化水素により酸化した懸濁液の pH (H₂O₂) と、その抽出液による過酸化水素可溶性イオウ含量 (S(H₂O₂)) をバリウム法（土壌環境分析法編集委員会, 1997; 日本分析化学会北海道支部, 1994, 米田 1961, 村上, 1961）により分析した。さらに、過酸化水素可溶性イオウ含量から水溶性イオウ含量に換算した水溶性硫酸イオン含量を差し引いた値を易酸化性イオウ含量として示した（川崎, 1989, 米田, 1961）。

なお、理化学性の評価方法について、土壌の各成分の含量は、各試料の採取時期が近いことから、特に時期を指定しない場合は、すべての試料を堆積物毎にまとめて評価した。

Ⅲ 津波被災農地のヘドロ・堆砂・土壌の基本特性

1 土性

津波被災農地の表層土壌の土性は、海岸付近で S や SL, 一部で L や CL で、一般的な水田土壌より砂質な傾向にあった。

津波被災農地に堆積したヘドロ (C, CL, L) と堆砂 (SL, S) の土性の分布は、Fig.2 に示すように地域別に同質の粒径の堆積物が固まって分布する傾向が見られた。これは、津波により隣接する海底の堆積物が運ばれ堆積した際、海岸の形状や湾、港などの違いによる海底堆積物の粒径の差が影響したものと考えられた。また、津波に対して堤防の役割を果たした高速道路の手前に砂が、奥に行くほど粒径の細かいヘドロが堆積する傾向が現場踏査を含めて確認された。

堆積物の土性には、関連性の強い理化学性があり、土性の区分によって理化学性の大小が大まかに予想できる。この関連性は、例えば堆積物の粒径による透水性や保肥力との関連から、除塩や土壌改良の方法とその効果発現程度の予想に活用できる。これを応用した事例として、粒径の細かいヘドロでは、陽イオン交換容量が大きくナトリウムの保持力が高いことや塩素濃度も高いことから、除塩に時間を要することが言える。また、粒径が細かく還元的なヘドロでは、海底堆積中における硫化物の蓄積の懸念から、農地堆積後の酸化で土壌が強酸化して作物生産に大きく影響を与えることも想定できる。

このことから、現場において農地の復旧技術の事前検討をする場合には、分析によらない土壌の調査である触

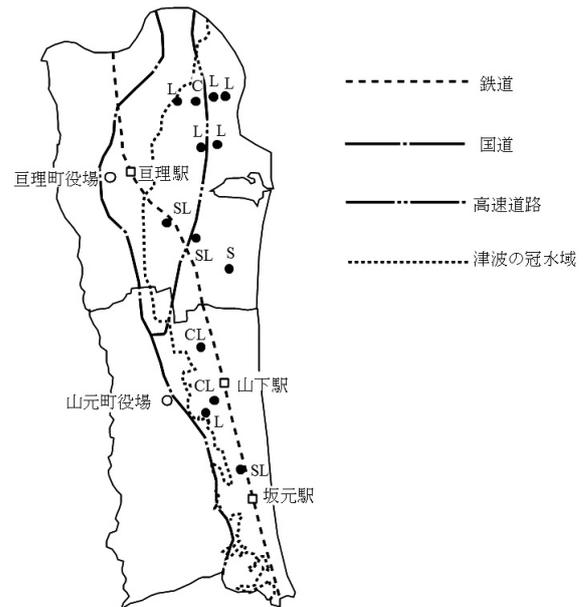


Fig. 2 堆積物の土性
Soil texture of Tsunami deposits

感による土性の判定が簡便かつ迅速に把握できる土壌の理化学性であり、多くの地点で調査される（宮城県立農業試験場, 1963）ことが望まれる。

2 pH (H₂O) と EC

宮城県と福島県における津波被災農地の土壌の理化学性を Table 1 と Table 2 並びに、その他の土壌試料の理化学性を含めて Table 3 に示す。

非被災農地の表層土壌の pH (H₂O) は、5.0 ~ 6.1 の平均 5.7 である。津波で被災した農地土壌の pH (H₂O) は、4 月 6 日のヘドロと堆砂で 5.2 ~ 7.5 の平均 6.2, 6 月 13 日のヘドロで 5.7 ~ 7.0 の平均 6.3, 堆砂で 5.6 ~ 7.9 の平均 6.8 と海水の成分が影響してやや高い。このように、ヘドロと堆砂の pH (H₂O) は、数ヶ月の短期間で全体的にやや上昇した。同様に被災農地の表層土壌の pH (H₂O) も、4 月 6 日が 4.8 ~ 6.2 で平均 5.5, 6 月 13 日で 5.6 ~ 7.9 の平均 6.8, 数ヶ月の短期間で 1.0 程度上昇した。これは、降雨により塩素などの陰イオンの溶脱とナトリウムなどの塩基の土壌保持によるイオンバランスの変化が影響したものと推察された。時間経過に伴い表層からの塩素の溶脱の進行と溶脱の遅いナトリウムの土壌保持量の減少などによって pH (H₂O) は、初期に上昇した後に徐々に低下していくと予想できる。なお、堆積物中に多くの硫化物が存在する場合は、半年から数年単位で pH (H₂O) の低下が進み、強酸性化していくであろう。

非被災地の表層土壌の EC (mS/cm) は 0.08 程度である。津波で被災した農地土壌の EC は、4 月 6 日のヘドロと堆砂で 2.0 ~ 29.0 の平均 15.6, 6 月 13 日のヘドロで 3.6 ~ 14.1 の平均 8.9, 堆砂で 1.0 ~ 9.5 の平均 3.4 と、いずれにおいても水稲で塩害が発生するとされる目安の値の範囲 0.3 ~ 0.7mS/cm 以上（長谷川, 1998, 兼子, 2003,

香川県農業経営課, 2004; 荒井ら, 2011) より高値である。特にヘドロは、ECが極めて高く、数ヶ月後にECが低下しているが、堆砂に比べ依然として高値で、塩分の影響がなくなるまでに長い時間を要すると予想できた。

このことから、降雨によるECの低下は、一律に全ての圃場で急速に進むものではなく、土壌の粒径や排水条件などにより大きく異なると考えられた。

3 陽イオン交換容量と交換性塩基含量

(K_2O , CaO , MgO , Na_2O)

肥力評価する陽イオン交換容量 (me/100g) は、表層土壌 (4月6日の農地土壌と6月13日の0~10cmの平均値) が砂質な土壌も多いため、10.2~40.6の範囲で平均23.4と中庸より若干低めである。全ての分析値において、ヘドロ (4月6日と6月13日の全ての分析値) で17.2~52.8の平均32.3と高いものが多い。これは、粒径が細かく、有機物を多く含むものが多いことによると考える。これにより、ヘドロの混入による農地土壌の陽イオン交換容量への影響は少ないと言える。しかし、他の理化学性で大きな問題が懸念される。一方、堆砂の陽イオン交換容量は、2.4~34.8の平均17.6とやや低値のものが多い。堆砂の混和は陽イオン交換容量を低下させる懸念があるが、本地域では元の表層土壌の値と大差がない場合も多い。このことから、例えば平成15年北海道日高地方台風10号被災地における堆積砂圃場の農地復旧方法を参考にすると、堆砂10cm程度までを元の作土の厚さと同量以下で混和する場合は、他の土壌改良対策を併せることで対応可能であると考えられる。

交換性塩基含量 (mg/100g) は、津波の被害がない内陸側のC~Lの表層土壌が、 K_2O で9~12, CaO で106~263, MgO で8~14, Na_2O で16~23であった。

4月6日の被災農地の表層土壌では、 K_2O で7~17の平均11, CaO で53~213の平均113, MgO で1~45の平均15, Na_2O で84~404の平均251となった。津波による冠水で海水中の Na_2O と MgO が土壌に陽イオン吸着し、土壌の陽イオン交換容量の40~79%の平均40%を Na_2O が占めるなど塩基飽和度が高まった。6月13日の農地の表層土壌では、 K_2O で4~27の平均12, CaO で30~271の平均99, MgO で1~80の平均33, Na_2O で17~662の平均209と大きな変化はなく、 Na_2O と MgO の溶脱が数ヶ月程度では大きく進まないことが伺える。

4月6日のヘドロの交換性塩基含量は、 K_2O で18~124の平均69, CaO で165~325の平均236, MgO で103~343の平均247, Na_2O で746~1,548の平均1,251といずれの塩基も極めて高含量であった。塩基飽和度も124~434%と100%を超え、粒子表面だけでなく表面張力などにより海水が粒子間の空隙にも相当量が保持されていると推察された。同4月6日の堆砂は、 K_2O で8~16, CaO で47~136, MgO で1~45, Na_2O で244

~484と、ヘドロよりも塩基含量が低いが、津波被災した表層土壌と同じレベルであり、塩基飽和度が158~218%とヘドロと同様に高い。

6月13日のヘドロの交換性塩基含量は、 K_2O で24~103の平均55, CaO で94~470の平均238, MgO で71~291の平均168, Na_2O で422~1,340の平均951と、いずれの塩基ともに、4月6日と比較して若干低下しているが、まだ高含量であった。塩基飽和度は平均141%, Na_2O が平均で88%を占めており Na_2O の保持量が顕著に多い。同6月13日の堆砂も、 K_2O で6~45, CaO で36~288, MgO で7~111, Na_2O で67~783と、ヘドロよりも塩基含量は低いが、時間が経過してもあまり低下していない。塩基飽和度が平均で120%, Na_2O が平均65%を占め、ヘドロと同様に Na_2O の保持量が多い。

以上のことから、津波被災農地の表層土壌、ヘドロや堆砂の交換性塩基含量は、海水由来の Na_2O や MgO が顕著に多く、陽イオン交換容量のすべてを埋めて、さらに相当量が表面付着や空隙保持され高くなっていた。また、これら塩基含量は、農地の土壌、ヘドロや堆砂のいずれにおいても自然条件下では短期間で低下するものではない。このため農地復旧にあたっては、作物の生育に影響する Na_2O の迅速な置換・排除が不可欠である。

なお、ヘドロのように塩分が顕著に高い堆積物が大量に堆積した条件では、一般的な除塩対策以外に、排土処理や排水路側への一時堆積後に長期間かけて除塩するなどの特別な処理が必要な場合も想定される。

4 水溶性陰イオン含量 (Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-})

海水は河川水などより塩素イオン(Cl^-)や硫酸イオン(SO_4^{2-})を多く含む。そのため、津波被災農地の土壌は、塩素イオンや硫酸イオンが高くなる。津波被災農地の表層土壌の Cl^- 含量(mg/kg)と SO_4^{2-} 含量(mg/kg)は、 Cl^- 含量で663~7,850の平均3,787, SO_4^{2-} 含量で145~648の平均341であった。表層の Cl^- 含量は、昭和35年宮城県チリ地震津波被害(宮城県立農業試験場, 1961)や東海近畿農業試験場(1961), 兼子(2003)と同程度の範囲であった。

津波堆積物の Cl^- 含量は、ヘドロで6,361~95,233の平均37,001, 堆砂で1,320~22,235の平均6,540と、表層土壌より明らかに高い。 SO_4^{2-} 含量も、ヘドロで679~12,680の平均4,292, 堆砂で109~4,152の平均1,016と高い。

このように、津波堆積物の Cl^- 含量と SO_4^{2-} 含量は、宮城県立農業試験場(1961)や東海近畿農業試験場(1961)の報告と同様に表層土壌より極めて高い傾向が示され、かつ、他地域の北海道石狩湾の浚渫砂 (Table 3) と比較して同程度である。

塩素による作物の塩害は、発生の目安として土壌の Cl^- 含量で、例えば水稻500~1,000(千葉県, 1991), 水稻1,000~1,500(兼子, 2003), 野菜類400~1,500(香

川農農業経営課 2004) mg/kg や、各生育ステージでの塩害発生濃度（荒井ら, 2011）などが示されている。ただし、塩害の発生は、水管理や品種の違いなどにより障害発生の強度や発生する塩分濃度が異なる。今後の農地復旧にあたっては、作土の Cl⁻ 含量をこれら目安の値より低く保ち、営農による塩害対策を実施できる条件を整えることが求められる。

また、津波被災農地では、Cl⁻ 含量だけでなく SO₄²⁻ 含量も高い特徴がある。硫酸イオンは下方浸透が遅く、長期間にわたり土壌中に残存するため、ナトリウムなどの塩基が土壌から置換され溶脱していくと酸性化を進める原因になる。加えて、ヘドロなどが堆積している場合には、これら津波堆積物に含まれる硫化鉄などの硫化物による SO₄²⁻ の酸化生成もあり、作物の酸性障害を助長することが考えられる。そのため、津波堆積物や農地土壌が高 SO₄²⁻ 含量の場合は、石灰質資材による中和や鉄資材による酸化還元容量の増大（後藤ら, 2003）によって、酸性硫酸塩による酸性障害などを回避する対策が必要である。

さらに、NO₃⁻ 含量 (mg/kg) も堆砂で高い地点が散見された。これは、津波堆積物中の有機物等が酸化分解したことで生成したと推察された。ヘドロでも時間経過により若干増加している地点もあり窒素の放出源となる有機物が含まれていると思われるが、還元条件のためアンモニア態で保持されているものと考えられた。これら津波堆積物の混入による窒素の土壌への供給は、作物生産にあたって施肥設計や農産物の品質管理において留意すべき項目であり、今後、培養窒素等（村上ら, 1971a）を把握して留意する必要がある。

5 0.1NHCl 可溶性銅・亜鉛・カドミウム含量 (Zn, Cu, Cd)

安全な農産物生産にあたっては、農地土壌の重金属の管理が不可欠である。土壌に含まれる重金属には、農産物中に一定量以上が含まれることで人体などに影響を与えるカドミウムや水銀、鉛など、作物の生育過程に発生する要素の欠乏症状や過剰症状を引き起こす銅やホウ素、ニッケルなど、両方に影響する亜鉛やマンガン、ヒ素などがある。津波被災農地の多くには海底堆積物のヘドロや堆砂が堆積している。これら海底堆積物には、自然の堆積作用や人間活動等の影響による重金属類の集積が考えられる。そこで、農業生産における一般的な土壌診断で考慮されている銅・亜鉛・カドミウムについて調査した。

銅や亜鉛は畑作物の生産に影響する。銅は麦やカンキツ類などで欠乏症状を発生させる。国内の畑作では麦の不稔（長谷部・水野, 1969）などの実際の障害事例がある。これに対してブドウの銅欠乏症状の改良資材であるゴールド液の散布はよく知られた対策である。亜鉛でも豆類やトウモロコシ（横井・菊地, 1977）、タマネギ（南ら,

1971）などで欠乏症状の障害事例が発生している。銅と亜鉛には過剰症状もあり、また、亜鉛は食品中の含量にも留意が必要である。これらのことから、農地土壌の銅と亜鉛の含量上限値は農用地の土壌の汚染防止等に関する法律（1970）において 0.1NHCl 可溶性銅含量 125mg/kg、農用地における土壌中の重金属等の蓄積防止に係わる管理基準（昭和 59 年 11 月 8 日付け環水土第 149 号環境庁水質保全局長通達）で全亜鉛含量 120mg/kg が設定されている。また、北海道施肥ガイド 2010（北海道農政部, 2010）では、畑作物野生育に対する適正値として 0.1NHCl 可溶性銅 0.5～8.0mg/kg、0.1NHCl 可溶性亜鉛 2～40mg/kg の目安が示されている。

0.1NHCl 可溶性銅含量 (mg/kg) は、ヘドロで 0.4～6.0 の平均 2.9、堆砂で 0.4～4.8 の平均 2.3、表層で 0.6～6.5 の平均 3.7 であった。いずれの土壌とも適正な範囲である。

0.1NHCl 可溶性亜鉛含量 (mg/kg) は、ヘドロで 10.8～57.7 の平均 38.0、堆砂で 2.9～41.6 の平均 13.9、表層で 0.7～13.9 の平均 4.9 であった。表層の土壌は適正な範囲内である。ヘドロや堆砂の亜鉛含量は、目安より若干高い地点もあるが、表層との混和や他の復旧対策などにより低減できる範囲であると考えられた。

カドミウムについて、コーデックスの新基準では精米で 0.4mg/kg 未満とする穀物の生産管理が必要となる。しかし、一般的に米のカドミウム含量と土壌の含量の関係性は弱く、品種や土壌の酸化還元、pH などが大きく影響する。そのため、土壌の基準値は設定されていない。被災地の農地土壌の 0.1NHCl 可溶性カドミウム含量 (mg/kg) は、ヘドロで 0.19～0.75 の平均 0.34、堆砂で 0～0.30 の平均 0.12、表層土壌は 0.06～0.30 の平均 0.14 であった。土壌のカドミウム含量の目安としては、0.1NHCl 可溶性カドミウム含量が 0.3mg/kg 以上の圃場ではリスク低減対策が有効であるが、それ未満ではリスク自体が低い（中津ら, 2009）ことが示されている。このことを勘案すると、元々リスクの低い農地が多いことや、少量のヘドロ等の堆積であることから、他の復旧技術や既存の営農によるリスク低減対策（中津ら, 2009）で十分に対応できるものと考えられた。

6 イオウ含量 (S)

海・湖沼の底泥には、地上に打ち上げられ好气的条件になると酸化して硫酸となり強酸性化する硫化物を含む酸性硫酸塩土壌が多く存在する。酸性硫酸塩を含む土壌では、好气的条件下で pH (H₂O) が 3 以下になり、植物の生育障害を引き起こす。

日本において海成の酸性硫酸土壌による農業被害報告には、古く霞ヶ浦の干拓地での被害がある（小林, 1938）。その後、高潮による農地への海成酸性硫酸塩土壌の堆積（東海近畿農業試験場, 1961）、干拓や客土などの農地整備事業における被害が広く認知された（石渡

ら, 1989; 1992)。しかし, 酸性硫酸塩土壌による農業被害は, いずれも予見できずに事業実施後に被害(水野ら, 1992; 北川ら, 2006)として明らかになることが多い。

今回の津波被災農地への堆積物においても, 塩害とともに海成の酸性硫酸塩土壌が強酸性化して農業生産に影響を与える懸念がある。

酸性硫酸塩土壌を $\text{pH}(\text{H}_2\text{O}_2)$ により判定する手法は, 一般的な迅速判定法である。本調査での $\text{pH}(\text{H}_2\text{O}_2)$ は, ヘドロで 2.3 ~ 5.5 の平均 4.2, 堆砂で 3.9 ~ 7.0 の平均 5.8, 表層で 4.1 ~ 5.8 の平均 4.9 と米田(1961)の値に近似的な範囲にあり, 津波以外の酸性硫酸塩土壌による被害の土壌とは異なる範囲を示した。塩基溶脱型の酸性土壌を想定した $\text{pH}(\text{H}_2\text{O}_2)$ による酸性硫酸塩土壌の判定では, 閾値を 3.5 以下(佐々木, 1978, 石渡ら, 1986, 北海道立中央農業試験場, 1992)や 3.0 以下(村上, 1961, 土壤環境分析法編集委員会, 1997)としている。しかし, 米田(1961)は津波による堆積物を酸性硫酸塩土壌と判断した $\text{pH}(\text{H}_2\text{O}_2)$ の閾値はそれより高く, 干拓地などの海水を含む水底泥のヘドロにおいて 4 程度を強酸性として示している(米田・河内, 1972)。これは, 被災直後の津波堆積物, 特にヘドロにおいて, 高濃度のナトリウムやマグネシウムの塩基が多く含まれる条件では, これら成分が $\text{pH}(\text{H}_2\text{O}_2)$ に影響し, 硫化物を含んでいる条件でも pH がやや高く評価されることを示していると考えられた。

これについて, 石渡ら(1989)や村上(1961)の報告でも, 海成の酸性硫酸塩土壌では, 貝殻の混入や塩基, 土性などの要因により, 必ずしも硫酸塩の含量がそれほど多くない時に, 適切な評価ができない場合があることを示唆していた。このことから, 津波被災農地のヘドロや堆砂などの堆積物の場合, ある程度の塩分の溶脱が進んだ条件でなければ, 塩基溶脱型の酸性土壌を想定した $\text{pH}(\text{H}_2\text{O}_2)$ の閾値だけによる酸性硫酸塩土壌の判断が難しいと考えられた。

村上(1961)や石渡ら(1989)によると, 津波堆積物などの酸性硫酸塩土壌の評価にあたっては, イオウ自体を評価する方法が確実であり, H_2O_2 処理や全分解した試料によるイオウの定量や全含量分析によりイオウを定量することが望ましいとしている。村上ら(1971b)の報告でも $\text{pH}(\text{H}_2\text{O}_2)$ ではなく H_2O_2 処理のイオウを定量する方法を用いている。これらのことから酸性硫酸塩土壌のイオウを評価するため, 土壌を H_2O_2 処理で酸化したイオウ (H_2O_2) 含量と海水由来の水溶性 SO_4^{2-} 含量を差し引いた易酸化性イオウ含量を評価した。

イオウ含量は, 全含量 0.1% 以上で酸性硫酸塩土壌との判断があり(北海道農政部, 1992), 全含量よりイオウの検出量が少ないイオウ (H_2O_2) 含量や易酸化性イオウ含量でも同閾値で確実な判断ができる。イオウ (H_2O_2) 含量(%) は, 非冠水農地の表層土壌が 0.03 ~ 0.05 と低値, 被災農地の表層土壌が 0.04 ~ 0.11 と低値, ヘドロが 0.08

~ 1.02 と高値, 堆砂が 0 ~ 0.24 と高値のものがある。このことから, ヘドロや堆砂に酸性硫酸塩土壌と予想されるものがある。

ヘドロや堆砂には海水由来の塩分や硫酸イオンなどが多く含まれる。そのため堆積物中の硫化物から被災直後の水溶性硫酸イオンを海水由来として差し引いて評価した易酸化性イオウ含量(%)によると, ヘドロでは 0.02 ~ 0.90 の平均 0.17 とパイライトや硫化鉄などの硫化物が高含量の土壌が多いが, 堆砂では 0 ~ 0.17 の平均 0.05 と硫化物が高含量の土壌に限られる。

なお, 津波被災農地において多少でもヘドロや堆砂のある圃場では, 堆積物の $\text{pH}(\text{H}_2\text{O}_2)$ だけではなく, イオウ含量(少なくとも全含量や全分解含量, H_2O_2 可溶性含量のいずれか)を分析し, 酸性硫酸塩土壌の判定を行うことが望ましい。これにより酸性硫酸塩土壌と判断された地域においては, 詳細な全イオウ含量の分析を行い, 排土の判定や混和時の石灰中和量の算定などの検討が不可欠である。

IV 考察

1 塩分と土壤理化学性

津波被災農地では, ヘドロや堆砂, 表層土壌に塩分が多い。塩素は作物生育上の障害となる塩害を引き起こす主成分である。水稲において塩害の発生する土壌の塩素含量としては 500 ~ 1,000mg/kg 以上(千葉県, 1991)の目安がある。この濃度以下でも農地の土壌水分条件や営農管理の方法によっては, 塩害が発生することがあるので, 留意が必要である。

津波被災農地においては, これらの目安の塩素含量にするため, 灌水により除塩作業が行われる。しかし, 土壌にイオン吸着している海水由来のナトリウムは排除されにくい。本来, 我が国の一般的な農地土壌にはナトリウムがあまり多く含まれておらず, ナトリウムが多くなると, 作物生育上の障害となる。水稲では地上部の生育障害が土壌の塩素濃度以上にナトリウム濃度と関連があり(山内ら, 1989), 高濃度の溶質に起因する高浸透圧による作物の吸水阻害や地上部の生育障害などが示されている。そこで, 農地土壌の過剰なナトリウムによる塩害を軽減するカルシウム(山内ら, 1983)に置換するため, 石灰質資材を津波被災土壌に混和し, 水によりナトリウムを排除しやすいようにすることが効果的とされている(宮城県立農業試験場, 1963)。

本調査の津波被災農地においては, 海水由来の成分である塩素イオンや硫酸イオン, ナトリウムは堆積物と水田の一般的な耕起深 10cm 程度の表層土壌が高含量で, これまでの報告と同じである(中矢ら, 2006)。

被災後 94 日における各成分の浸透状況は, No.7 の地点のように内陸側で排水路も機能している条件では, 下層まで塩素イオンや硫酸イオンが下方浸透しており, 比

Table 1 津波被災地の堆積物・農地土壌の理化学性
Physicochemical properties of deposits and agricultural soils in tsunami devastated farmlands

地点	層名	採取日	土性 (農学 会法)	pH			交換性塩基含量 (mg/100g)			陽イオン 交換容量 (me/100g)	塩基飽和度 (%)			0.1NHCl可溶性含量 (mg/kg)			水溶性陰イオン含量 (mg/kg)			イオウS含量 (%)		
				(H ₂ O)	(H ₂ O ₂)	(m S/cm)	K ₂ O	CaO	MgO		Na ₂ O	Total	CaO	Na ₂ O	Cu	Zn	Cd	Cl ⁻	NO ₃ ⁻		SO ₄ ²⁻	(H ₂ O ₂) (易酸化性)
No.1	非冠水表面層	4/6	C	6.1	5.0	0.08	11	263	14	23	28.0	39	33	3	4.1	5.5	0.11	14	6	49	0.03	0.03
No.2	非冠水表面層	4/6	CL	6.1	5.3	0.09	11	188	8	23	27.2	30	25	3	4.3	5.0	0.10	12	18	75	0.03	0.02
No.3	非冠水表面層	4/6	L	5.0	5.0	0.08	9	106	9	16	18.8	26	20	3	4.6	4.7	0.18	17	14	67	0.05	0.05
No.4	ヘドロ 表面層	4/6	L	6.1	4.3	11.50	60	205	244	1287	50.3	124	15	83	4.2	46.0	0.51	38,680	1	2,094	0.13	0.06
	ヘドロ 1.5cm		CL	4.9	4.1	1.05	11	109	7	144	32.2	28	12	14	5.3	6.3	0.19	1,591	7	145	0.06	0.06
	0-2.5cm			5.9	3.9	8.40	50	173	130	936	29.5	149	21	102	4.5	43.2	0.65	23,903	3	2,780	0.18	0.09
	2.5-5.0cm			4.9	4.3	3.00	22	93	56	424	19.6	103	17	70	5.4	6.1	0.09	6,550	4	1,069	0.09	0.06
	5.0-7.5cm			4.8	4.3	1.90	18	93	51	253	25.1	57	13	33	5.7	5.5	0.14	3,517	1	635	0.08	0.06
	7.5-10cm	6/13		5.5	4.6	1.14	13	151	9	181	23.9	50	23	24	5.9	4.8	0.22	1,970	0	222	0.06	0.05
	10-20cm			5.5	4.1	0.86	9	179	21	137	24.4	50	26	18	5.5	3.5	0.19	1,203	2	132	0.06	0.05
	20-30cm			6.0	3.8	0.44	7	287	40	59	24.6	58	42	8	5.0	3.3	0.16	463	1	79	0.06	0.06
	30-40cm			6.6	4.3	0.36	7	199	29	36	23.3	42	31	5	3.7	4.6	0.11	70	1	293	0.05	0.04
	40-50cm			6.6	4.3	0.30	7	232	46	32	23.5	50	35	4	4.8	4.5	0.09	52	1	368	0.07	0.06
	50-60cm			6.1	4.6	0.29	9	236	38	41	28.0	42	30	5	6.1	5.1	0.07	83	1	313	0.07	0.06
No.5	ヘドロ 表面層	4/6	L	6.3	3.7	20.00	76	316	258	1,353	30.1	231	37	145	4.3	38.3	0.57	46,878	2	3,195	0.24	0.13
	ヘドロ 0.5cm		L	5.6	5.2	2.30	12	88	15	276	22.3	58	14	40	4.0	5.6	0.10	3,933	0	380	0.06	0.05
	堆砂 0.5cm			5.9	4.3	4.00	35	187	71	422	26.7	92	25	51	6.0	36.5	0.42	6,361	23	3,105	0.15	0.04
	0-2.5cm			5.6	6.3	2.10	15	69	28	232	14.0	83	17	53	3.7	7.6	0.11	3,393	22	649	0.06	0.04
	2.5-5.0cm			4.9	5.2	2.00	13	64	37	214	16.5	69	14	42	4.5	4.3	0.07	3,604	26	439	0.05	0.03
	5.0-7.5cm			4.9	5.0	1.68	10	50	18	190	20.4	44	9	30	5.1	4.6	0.09	2,450	18	457	0.05	0.04
	7.5-10cm	6/13		4.9	5.2	1.79	11	65	34	190	16.0	65	15	38	4.5	3.5	0.07	2,704	4	311	0.04	0.03
	10-20cm			4.9	3.6	1.68	12	96	18	185	15.8	67	22	38	4.3	4.0	0.09	3,052	1	303	0.04	0.03
	20-30cm			5.3	3.6	1.50	5	78	18	128	9.3	85	30	44	2.1	3.0	0.04	2,140	3	224	0.00	0.00
	30-40cm			5.3	5.2	0.92	4	34	0	85	7.3	55	17	38	1.6	1.4	0.02	1,280	4	111	0.00	0.00
	40-50cm			6.0	5.3	0.31	6	50	8	39	5.7	63	32	22	1.0	0.7	0.01	350	2	22	0.00	0.00
50-60cm			6.1	5.0	0.20	5	23	3	24	3.5	53	23	22	0.8	0.6	0.00	199	2	25	0.00	0.00	
No.6	ヘドロ 表面層	4/6	C	6.5	4.3	20.00	68	325	299	1,412	36.3	202	32	125	2.4	42.6	0.75	49,108	1	2,844	0.27	0.18
	ヘドロ 1.0cm		L	5.6	4.8	2.40	12	155	24	344	27.9	65	20	40	3.3	8.1	0.18	3,677	1	421	0.06	0.04
	0-2.5cm		CL	5.2	4.8	1.58	12	213	17	178	28.5	51	27	20	4.0	7.8	0.20	2,472	2	246	0.05	0.05
	2.5-5.0cm			5.7	4.1	7.50	62	197	179	880	29.8	153	24	95	5.7	40.8	0.65	20,201	2	4,412	0.23	0.08
	5.0-7.5cm			4.8	4.8	2.40	20	105	44	348	31.3	56	12	36	5.5	7.2	0.11	4,349	1	924	0.07	0.04
	7.5-10cm	6/13		5.1	4.5	2.00	16	147	45	252	31.6	50	17	26	5.3	7.1	0.16	3,814	3	726	0.06	0.04
	10-20cm			5.3	4.1	2.00	16	200	47	213	29.4	57	24	23	5.4	7.1	0.22	3,509	4	521	0.05	0.04
	20-30cm			5.5	4.2	1.78	8	235	42	137	29.6	51	28	15	4.7	4.6	0.13	2,755	4	230	0.04	0.04
	30-40cm			6.0	4.4	0.78	9	251	31	53	28.7	43	31	6	2.3	3.0	0.07	987	6	82	0.03	0.03
	40-50cm			6.2	4.1	0.54	8	252	54	42	27.5	48	33	5	2.6	3.3	0.06	639	2	87	0.03	0.03
	50-60cm			6.0	4.4	0.17	6	121	20	17	24.3	25	18	2	1.6	2.2	0.04	94	2	108	0.04	0.04
No.7	ヘドロ 表面層	4/6	L	5.2	4.5	9.20	18	223	103	793	26.4	148	30	97	3.5	10.8	0.23	20,415	9	1,182	0.08	0.04
	ヘドロ 0.5cm		CL	5.2	4.8	2.90	12	185	45	377	34.1	62	19	36	3.9	6.2	0.15	4,958	2	473	0.06	0.04
	0-2.5cm			5.1	4.8	2.40	20	137	37	281	33.5	48	15	27	6.4	13.9	0.13	3,922	38	1,642	0.09	0.03
	2.5-5.0cm			5.0	5.0	1.90	14	110	50	246	28.7	51	14	28	6.2	7.3	0.13	2,354	23	777	0.07	0.04
	5.0-7.5cm			5.1	5.0	1.49	12	106	31	235	31.7	41	12	24	6.2	6.1	0.13	1,980	25	681	0.06	0.03
	7.5-10cm	6/13		5.0	4.7	1.65	13	131	42	217	28.7	49	16	24	6.1	6.3	0.13	2,404	22	679	0.06	0.04
	10-20cm			6.2	4.7	1.30	11	243	37	158	33.0	48	26	15	5.2	5.0	0.13	2,012	43	334	0.04	0.03
	20-30cm			6.8	6.1	1.21	8	266	46	104	32.1	48	30	11	3.7	4.4	0.10	1,816	23	195	0.00	0.00
	30-40cm			6.1	5.2	0.85	8	255	37	81	35.3	39	26	7	3.5	5.0	0.06	1,143	10	175	0.02	0.02
	40-50cm			4.8	4.1	0.82	7	162	50	68	28.0	38	21	8	4.1	4.9	0.05	1,073	9	257	0.06	0.05
	50-60cm			4.7	4.5	0.87	7	214	46	74	28.8	43	26	8	4.9	8.2	0.09	1,163	1	273	0.06	0.05
No.8	ヘドロ 表面層	4/6	L	6.4	3.9	29.00	70	299	258	1,548	17.2	434	62	290	4.0	39.1	0.29	95,233	2	9,841	0.55	0.22
	ヘドロ 1.0cm		L	6.2	5.0	2.40	11	69	16	264	17.3	69	14	49	2.9	6.0	0.15	4,203	0	335	0.06	0.05
	堆砂 0.5cm			6.8	3.5	14.10	78	470	211	1,102	41.0	157	41	87	3.4	40.2	0.29	31,594	14	11,468	0.49	0.11
	0-2.5cm			7.7	6.6	3.10	17	209	56	344	19.9	109	38	56	2.3	15.4	0.16	5,099	59	841	0.06	0.04
	2.5-5.0cm			5.2	5.9	2.40	8	67	40	267	19.1	69	13	45	2.9	5.9	0.08	3,770	42	784	0.07	0.04
	5.0-7.5cm			5.3	5.2	2.20	8	61	49	241	20.3	62	11	38	3.0	6.9	0.13	3,523	2	573	0.06	0.04
	7.5-10cm	6/13		5.1	5.4	1.96	7	63	58	219	16.3	76	14	43	2.8	4.5	0.09	2,934	0	419	0.05	0.04
	10-20cm			5.6	5.9	1.28	5	77	14	145	23.1	36	12	20	2.9	4.8	0.11	1,805	0	115	0.03	0.03
	20-30cm			5.3	5.0	0.62	7	101	49	66	25.5	32	14	8	5.0	6.4	0.13	604	0	211	0.06	0.05
	30-40cm			5.9	5.0	0.34	5	107	60	59	35.3	25	11	5	3.8	3.2						

Table 2 津波被災地の堆積物・農地土壌の理化学性 (つづき)

(Continued)

地点	層名	採取日	土性 (農学 会法)	pH			交換性塩基含量 (mg/100g)				陽イオン 交換容量 (me/100g)	塩基飽和度 (%)			0.1NHC1可溶性含量 (mg/kg)			水溶性陰イオン含量 (mg/kg)			イオウ(S)含量 (%) (H ₂ O ₂) (易酸化性)	
				(H ₂ O)	(H ₂ O ₂)	(mS/cm)	K ₂ O	CaO	MgO	Na ₂ O		Total	CaO	Na ₂ O	Cu	Zn	Cd	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻		
No11	堆砂	4/6	S	6.0	6.3	2.00	8	47	1	244	4.5	218	37	177	0.4	3.7	0.02	3,346	1	372	0.00	0.00
	表層		SL	5.7	5.8	1.01	10	76	1	104	13.3	47	20	25	0.6	3.0	0.11	1,375	1	173	0.04	0.03
	堆砂10cm	6/13		7.1	6.3	1.03	7	36	23	66	2.4	195	53	88	0.8	4.8	0.02	1,320	9	109	0.00	0.00
	0-2.5cm			6.4	6.5	0.67	9	85	33	61	11.5	59	26	17	2.3	3.8	0.13	755	0	155	0.05	0.04
	2.5-5.0cm			6.6	6.1	0.44	10	82	12	44	11.5	45	25	12	2.5	3.9	0.15	420	1	136	0.05	0.05
	5.0-7.5cm			6.6	5.9	0.30	9	85	1	30	10.3	41	29	9	2.4	2.5	0.10	251	0	116	0.03	0.02
	7.5-10cm			6.6	4.6	0.20	9	112	5	17	10.2	49	39	5	2.0	1.4	0.07	95	0	179	0.00	0.00
	10-20cm			6.4	4.2	0.20	7	63	1	7	9.8	27	23	2	2.1	1.8	0.05	40	1	263	0.02	0.01
	20-30cm			6.4	4.3	0.25	6	61	11	8	7.1	44	30	4	1.8	1.2	0.05	62	0	308	0.00	0.00
30-40cm		6.8	4.4	0.08	4	27	9	166	1.8	373	53	291	0.5	0.5	0.00	15	1	77	0.00	0.00		
No12	ヘドロ	4/6	L	6.0	5.0	21.00	77	165	262	1,350	30.1	213	20	145	0.4	48.4	0.37	50,298	1	2,998	0.28	0.18
	表層		SL	5.7	5.2	3.60	16	94	13	378	15.5	107	22	79	1.5	4.9	0.11	6,536	1	560	0.07	0.05
	ヘドロ1.0cm	6/13		6.8	5.0	11.20	64	202	262	1,340	31.3	207	23	138	0.6	41.5	0.37	36,277	1	2,689	0.14	0.05
No13	0-5.0cm	4/6	SL	5.6	5.5	2.80	16	75	51	514	17.2	129	16	97	2.5	4.9	0.07	5,477	2	647	0.06	0.04
	表層		SL	5.9	5.5	0.59	9	123	1	84	12.3	60	36	22	1.3	2.5	0.06	663	15	177	0.06	0.06
	0-2.5cm	6/13		6.6	5.9	6.20	27	271	74	662	22.8	154	42	94	2.9	8.5	0.19	14,255	7	573	0.07	0.05
	2.5-5.0cm			5.0	5.0	1.57	13	128	19	237	13.4	100	34	57	1.8	2.4	0.05	2,423	8	147	0.05	0.05
	5.0-7.5cm			5.1	4.8	0.81	8	90	24	138	20.0	45	16	22	1.8	2.1	0.07	1,040	65	137	0.05	0.04
	7.5-10cm			5.3	3.2	0.59	8	109	22	113	21.3	41	18	17	2.0	2.4	0.09	651	50	136	0.00	0.00
	10-20cm			5.7	4.8	0.35	8	90	3	79	18.3	33	18	14	1.6	1.5	0.06	303	25	118	0.05	0.05
	20-30cm			5.6	4.8	0.55	6	99	8	88	14.8	46	24	19	1.1	0.8	0.06	438	1	381	0.07	0.06
	30-40cm			6.0	5.2	0.58	5	86	9	83	11.7	54	26	23	0.9	0.7	0.05	442	2	414	0.03	0.02
No14	表層	4/6	L	5.1	4.3	4.20	13	146	26	404	25.6	77	20	51	2.4	11.3	0.30	7,850	29	531	0.11	0.09
	0-5cm	6/13		6.6	5.6	0.21	15	98	36	133	28.7	35	12	15	5.5	12.1	0.09	79	5	123	0.06	0.06
No15	ヘドロ	4/6	CL	6.0	3.7	27.00	80	258	343	1,518	37.0	208	25	133	0.5	57.7	0.39	67,001	2	4,437	0.81	0.66
	表層		SL	6.1	5.0	1.86	8	64	17	210	15.0	67	15	45	2.2	2.3	0.11	2,942	2	265	0.07	0.06
	堆砂0.5cm	6/13		6.4	3.9	9.50	35	288	102	783	34.6	119	30	73	2.0	41.6	0.30	22,235	155	2,128	0.24	0.17
	0-2.5cm			5.1	5.0	2.20	12	74	26	241	24.8	48	11	31	2.8	2.0	0.15	3,936	55	350	0.07	0.06
	2.5-5.0cm			5.0	4.6	1.85	11	66	27	180	24.4	40	10	24	2.9	1.4	0.14	2,752	23	315	0.10	0.09
	5.0-7.5cm			4.8	4.6	1.83	10	82	12	181	26.0	37	11	22	2.8	1.4	0.15	2,749	27	291	0.09	0.08
	7.5-10cm			5.1	4.8	1.31	6	78	20	150	40.6	21	7	12	2.7	0.9	0.11	1,849	32	212	0.08	0.07
	10-20cm			5.3	4.8	1.19	5	99	12	121	21.8	37	16	18	2.4	0.9	0.13	1,561	58	189	0.07	0.06
	20-30cm			5.6	4.5	1.21	6	146	31	119	24.6	44	21	16	1.0	0.6	0.08	1,633	52	168	0.06	0.06
30-40cm		5.7	5.0	0.83	4	123	25	80	18.5	45	24	14	0.6	0.4	0.04	1,052	23	99	0.02	0.02		
40-50cm		6.0	5.7	0.48	3	54	1	51	9.7	38	20	17	0.3	0.4	0.04	545	11	72	0.00	0.00		
50-60cm		6.1	4.8	0.36	6	38	15	37	7.8	44	18	15	0.4	0.3	0.02	394	6	56	0.00	0.00		
No16	ヘドロ	4/6	CL	6.0	4.5	17.30	57	180	273	1,274	29.1	214	22	141	0.6	42.9	0.28	41,650	2	3,617	0.21	0.09
	表層		L	5.7	4.8	1.78	7	115	12	194	20.2	55	20	31	3.3	1.6	0.11	2,888	8	238	0.06	0.05
	ヘドロ1.5cm	6/13		6.4	4.5	3.60	28	194	106	475	52.8	53	13	29	0.8	39.7	0.25	6,737	3	679	0.14	0.12
	堆砂9.0cm			6.6	5.9	1.43	12	130	69	202	25.8	58	18	25	2.4	27.9	0.16	1,645	169	468	0.08	0.06
	0-2.5cm			5.0	5.2	1.13	6	63	20	140	21.9	36	10	21	3.8	1.5	0.09	1,499	34	220	0.05	0.05
	2.5-5.0cm			5.3	5.0	0.89	5	85	1	125	28.8	25	11	14	3.2	1.2	0.10	1,102	42	139	0.05	0.04
	5.0-7.5cm			5.7	4.8	0.70	4	103	7	106	23.3	32	16	15	2.4	0.8	0.09	846	28	76	0.05	0.05
	7.5-10cm			5.7	5.2	0.55	4	95	8	81	22.1	29	15	12	2.3	0.7	0.10	682	25	68	0.05	0.05
	10-20cm			5.7	4.5	0.49	3	120	9	68	27.8	25	15	8	2.8	1.3	0.13	573	24	62	0.04	0.04
20-30cm		5.5	3.9	0.42	4	160	30	53	33.9	27	17	5	2.7	0.9	0.13	470	19	63	0.05	0.05		
30-40cm		5.3	3.7	0.65	5	199	41	73	47.4	24	15	5	1.2	0.8	0.14	728	56	172	0.07	0.07		
40-50cm		5.3	4.1	0.75	7	147	14	83	41.1	21	13	6	1.4	0.6	0.09	794	41	309	0.08	0.07		
50-60cm		5.3	3.5	0.74	6	227	37	84	61.3	21	13	4	0.8	3.9	0.11	944	149	236	0.08	0.07		
No17	ヘドロ	4/6	L	5.5	4.4	19.10	52	173	253	1,243	24.7	243	25	162	2.9	30.9	0.24	44,082	1	3,736	0.17	0.05
	表層		L	5.6	5.0	2.20	10	81	21	221	14.3	79	20	50	3.7	2.5	0.09	3,614	1	327	0.06	0.05
	ヘドロ1.0cm	6/13		5.7	5.2	4.60	24	94	77	540	31.3	80	11	56	5.2	16.8	0.19	11,416	10	1,897	0.11	0.05
	堆砂0.5cm			5.9	6.1	1.24	10	41	7	177	20.6	38	7	28	4.4	4.2	0.10	1,742	34	273	0.06	0.05
	0-2.5cm			5.2	5.8	0.96	7	30	29	137	19.6	36	5	23	4.8	2.2	0.05	1,096	38	305	0.06	0.05
	2.5-5.0cm			5.1	5.5	1.14	10	46	15	149	20.4	36	8	24	4.8	2.3	0.08	1,356	12	317	0.06	0.05
	5.0-7.5cm			5.1	5.5	1.27	9	52	30	152	23.2	36	8	21	4.6	2.4	0.07	1,657	9	317	0.06	0.05
	7.5-10cm			5.3	5.3	1.29	9	73	36	145	23.1	40	11	20	4.7	2.2	0.13	1,708	15	264	0.06	0.05
	10-20cm			5.8	5.9	0.79	5	95	37	93	19.7	42	17	15	4.1	1.8	0.10	985	23	103	0.04	0.04
20-30cm		6.0	5.7	0.65	4	95	6	71	24.7	25	14	9	4.2	1.7	0.11	757	26	88	0.04	0.03		
30-40cm		5.8	5.7	0.25	5	126	35	37	14.8	51	30											

Table 3 津波被災地の堆積物・農地土壌並びに被災地周辺に分布する火砕流堆積物、海砂・川砂の理化学性
Physicochemical properties of tsunami deposits, an agricultural soil and a pyroclastic flow deposit in devastated areas,
sea and river sands in Ishikari district, Hokkaido

試料名	採取日	土性 (農学 会法)	pH		EC (m S/cm)	交換性塩基含量 (m g/100g)			陽イオン 交換容量 (me/100g)	塩基飽和度 (%)			0.1NHCl 可溶性含量 (mg/kg)			水溶性陰イオン含量 (mg/kg)			イオウ(S)含量 (%) (H ₂ O ₂) (易酸化性)		
			(H ₂ O)	(H ₂ O ₂)		K ₂ O	CaO	MgO		Na ₂ O	Total	CaO	Na ₂ O	Cu	Zn	Cd	Cl ⁻	NO ₃ ⁻		SO ₄ ²⁻	
巨理町道路上の堆砂	3/17	S	7.5	6.8	0.93	6	56	0	113	1.9	307	106	194	0.5	2.6	0.01	1,520	2	191	0.00	0.00
名取市道路上の堆砂		SL	8.3	6.8	2.40	18	117	31	285	10.8	141	39	85	2.6	11.6	0.05	4,085	2	577	0.00	0.00
八沢干拓地ヘドロ	7/8	CL	7.3	4.6	7.10	59	203	181	976	24.5	200	30	129	1.1	27.8	0.22	23,796	3	3,586	0.21	0.09
松川浦干拓地ヘドロ		CL	7.5	2.3	5.70	88	285	154	746	26.2	167	39	92	1.2	32.7	0.36	14,724	3	3,566	1.02	0.90
石巻市の除塩田表層	6/20	L	7.3	6.6	0.58	8	48	50	70	17.5	38	10	13	11.1	6.0	0.24	487	36	156	0.00	0.00
北海道石狩湾の浚渫海砂		S	7.1	-	2.85	132	62	139	861	7.9	505	28	351	-	-	-	19,510	43	4,175	-	-
北海道石狩川の川砂		S	6.9	-	0.05	27	68	50	11	5.2	111	47	7	-	-	-	<50	<25	<150	-	-
宮城県大和町火砕流堆積物		SL	7.5	6.7	0.03	6	72	22	8	17.5	23	15	1	9.7	5.0	0.19	4	1	1	0.00	0.00

較的、短期間で塩分の除去が進みやすいと考えられる。一方で、No.18 の地点のように、周辺の排水が進まず、また、不透水層が発達して表層に部分的な表面滞水がある条件では、塩分が表層に留まったまま下層に浸透していない。

これまでの知見でも、圃場の排水条件が整っている場合は、一定量以上の降水量が確保できれば除塩が進む (Nakaya et al., 2010) が、圃場の排水条件が確保できない場合は十分な降水量があっても除塩が十分に進まないこと (McLeod et al., 2004) が指摘されており、本調査でも同様の現象が確認された。

これらのことから、圃場の排水条件と土壌条件による陰イオンや陽イオンの移動を考慮して、地形や土壌に対応した除塩等の復旧計画の必要性が高い。また、土壌理化学性の継続した調査による各種条件の整理を適時に行ない復旧作業に反映することが不可欠であろう。さらに、本地域では津波被災によりほとんどの排水施設の機能が消失し回復に時間を要すること、多くの地域で地盤が沈下し、津波被災地の多くで十分に自然排水されないことから、今後の復旧対象となる農地は、より難しい条件での復旧作業の検討となるであろう。

なお、今回の地震で、地域全体が大きく地盤沈下したことにより、河口側から河川の底部に沿って海水がくさび状に侵入・遡上する塩水くさびが、これまでより上流に遡上すると予想できる (須田ら, 2001)。河口から数 km から十数 km 程度上流にある用水の取水口では海水が混入した用水を取水するリスクが高まることから、用水の取水部の塩分濃度を自動観測し、海水の用水への流入を防止する対策が必要になる。これまでに同様の被害が無かった地域においても塩水遡上の確認が必要である。塩水の用水への混入による被害は、津波による海水流入と同様の被害をもたらすことから、留意が必要のためここに記す。

2 重金属

海底の底泥への重金属の含有は、河川の流入状況や海底周辺の環境条件が大きく影響すると考えられる。津波によりこれら底泥が打ち上げられ、ヘドロや堆砂として

農地に堆積した。これら津波堆積物に含まれる重金属の含量は、復旧作業やその後の営農の計画において大きな関心事である。

本報で対象にした銅と亜鉛、カドミウムについて、ヘドロや堆砂では、農地の表層土壌より高い含量を示したが、いずれの地点においても、農地復旧や営農によるリスク低減対策により対応できる範囲と考えられた。

なお、農業生産には海水にも含まれるホウ素 (村上・沢田, 1971) やヨウ素 (水野ら, 1985) なども影響するため、今後、評価すべきと考えている。また、その他の懸念される重金属についても適時に把握することや、これらの長期的な変化についても把握することが望まれる。

3 津波堆積物の酸性硫酸塩土壌の判断と対策

被災農地においては、H₂O₂ 可溶性イオウ含量が 0.1% を超える酸性硫酸塩土壌と判断されるヘドロなどの広範囲での堆積が明らかになった。

H₂O₂ 可溶性イオウ含量が一定以上の津波堆積物がある圃場では、ヘドロや堆砂の堆積物の厚さによって対応策は異なる。堆積厚が厚い場合は、排土や反転埋設処理、客土による耕土確保などの検討が必要になる。堆積厚が薄い場合は、排土が困難なため混和や反転埋設処理、客土などにより濃度を緩和し、石灰質資材の投入による中和処理が必要になる。

迅速な測定法として有効な H₂O₂ 可溶性イオウ含量で酸性硫酸塩土壌と判断された地域においては、詳細な全イオウ含量の分析を行い、排土の判定や混和時の改良目標 pH の設定と石灰中和量の算定などの検討が不可欠である。

なお、酸性硫酸塩土壌に対する水田の改良目標の pH は、あまり高くする必要がなく 5 程度が妥当で効果的かつ経済的との指摘がある。また、酸性硫酸塩土壌の対処方法には石灰質資材の投入など除塩対策などの対策と連動するものもある。例えば、硫化物を含む土壌が堆積している農地での除塩作業では、その時点の pH (H₂O) による石灰質資材の選択ではなく、時間経過による酸性化を考慮に入れると硫酸根を含まない消石灰や炭酸カルシウムなどの利用が適している。さらに、長期的な対応

として鉄資材などの利用によるイオウの影響の予防的軽減技術（後藤ら，2003）など，相互作用を考慮した対策の検討が望まれる。

4 客土材の理化学性の評価

今後の農地復旧の検討にあたっては，除塩や排土，圃場の区画整理や排水路・暗渠，作業道などの具体的な技術の検討が行われる。本報で対象にした農地土壌の理化学性を考慮した整備を考えたとき，耕土の適切な理化学性を確保するための手段として，少なからず客土が必要な場合が予想される。我が国における客土の実施では，北海道の泥炭地を中心に水田圃場への粘土客土（神山ら，1992）が行われている。同地域では，現在においても米の食味向上を考慮した客土が実施されている（柳原，2007）。また，そのときに利用する客土材の理化学性についての目安（北川ら，2011）も検討されている。

当該地域の仙台平野には，平地を囲むように丘陵地が発達している。これら丘陵地の多くは火砕流堆積物などの丘陵地である。北海道の畑作地帯では，このような火砕流堆積物を畑作物の生産を向上させるために客土として利用する技術が広く普及しており（横井，2006），年間に千 ha 規模で実施されている。

そこで，当地域に賦存する農地への客土として利用可能な火砕流堆積物の理化学性について **Table 3** に示した。この火砕流堆積物は，北海道で利用されているものと同質（竹内ら，2000，横井，2006）であり，農業利用に適している。客土として利用するにあたっては，理化学性の把握とともに採取地の確保や運搬距離などの課題もある。

V 結 言

本報では，津波での海水流入，ヘドロや海砂などの堆積による農地土壌の理化学性への影響について把握するとともに，農地土壌の短期から長期にわたる各段階の問題点を評価し，今後の農地復旧の取り組みのための基礎的知見を次のようにまとめる。

津波被災農地に堆積したヘドロや堆砂は，海水由来の塩素イオンと硫酸イオン，ナトリウムやマグネシウムが高含量で，ECが高く，pHが7を超えるものもあった。特にヘドロは，各種含量が高く，ECが平均で14.0と極端に高い。

同様に津波被災農地の表層10cm程度の土壌も，塩素イオンと硫酸イオン，ナトリウムやマグネシウムが高含量で，ECも高い。その一方で，下層の土壌ほど各成分含量やECが低下する傾向である。

被災後94日の津波被災農地では，塩分が下方に浸透して堆積物や表層土壌の含量が低下してきている圃場も見られるが，ほとんど下方浸透せず，堆積物や表層土壌の含量が低下していない圃場も多くある。その様相は，

圃場周辺排水路の排水条件や土壌条件により大きく異なる。

ヘドロや堆砂，表層の土壌の銅・亜鉛，カドミウムの含量は，それほど高含量の地点もなく，いずれの地点においても，農地復旧や営農によるリスク低減対策により対応できる。

ヘドロなどの津波堆積物の一部に硫化物であるイオウを多く含む酸性硫酸塩土壌があった。これら地点では，今後の酸化反応により強酸性化が進み長期的な農業生産上の問題となるため，堆積厚やイオウ含量，圃場の状況に応じて，排土や反転埋設，混和と中和処理などについて他の復旧工事との関連を考慮しながら対策を講じる必要がある。

酸性硫酸塩土壌の迅速判定法であるpH(H₂O₂)の分析値は，過去の数件の報告で示されている値にもあるように，我が国に広く分布する塩基溶脱型の酸性土壌を想定した閾値のpH(H₂O₂)である3.5や3.0に満たないが，高含量のイオウを含む場合がある。そのため，ナトリウムなどの塩基を多く含む津波被災直後の堆積物や土壌に対するpH(H₂O₂)の分析においては，その濾過液を用いてイオウを定量することによる酸性硫酸塩土壌の判断も併せて行うことが必要であると考えられる。

津波被害による耕土流失や化学的な不良土の排除による耕土不足への対処，地盤沈下等による農地面の高上げなどに用いることのできる客土材として，当被災地域の周辺の丘陵地に分布する火砕流堆積物などの利用が考えられる。

参考文献

- 1) 荒井(三王)裕見子・小林伸哉・吉永悟志・高井俊之・近藤始彦(2011)：水稻の塩害とその対策，農業及び園芸，86(7)，737-742.
- 2) 千葉県(1991)：千葉県農林公害ポケットブック改訂版，102-111.
- 3) 土壤環境分析法編集委員会(1997)：土壤環境分析法，博友社，195-196, 202-221, 297-301, 343-352, 367-370.
- 4) 後藤英次・長谷川進・竹内晴信・北川巖：鉄・ケイ酸レベル向上による水田地力の増進，日本土壤肥料学雑誌，74(5)，691-695.
- 5) 長谷部俊雄・水野直治(1969)：北海道網走地方に見られる麦類の生育異常に関する研究，第1報 発生地の分布とその土壌の特徴並びに予備的対策試験，北海道立農業試験場集報，19，63-79.
- 6) 長谷川進(1998)：水稻に対する塩害と対策技術，北農，65(3)，44-51.
- 7) 北海道農政部(1992)：土壌および作物栄養の診断基準，分析法(改訂版)，96-99，<http://www.agri.hro.or.jp/nouseibu/bunseki/index.html>(確認日：2011年11月26日).

- 8) 北海道農政部 (2010) : 北海道施肥ガイド, 土壌および作物栄養診断基準, 作土の化学性に関する基準値, 34-35, http://www.agri.hro.or.jp/chuo/fukyu/sehiguide2010_index.html, (確認日:2011 年 11 月 26 日).
- 9) 石渡輝夫・沖田良隆・斎藤万之助 (1992) : 北海道における各種酸性硫酸塩土壌の区分, 分布および性状, 土木試験所月報, 467, 2-7.
- 10) 石渡輝夫・沖田良隆・斎藤万之助・石田哲也・宍戸信貞 (1986) : 北海道で見いだされた酸性硫酸塩土壌および熱水変質安山岩風化物の分布と性状, 土木試験所月報, 398, 15-25.
- 11) 香川県農業経営課 (2004) : 農地への海水の流入が農作物に及ぼす影響とその対策, <http://www.pref.kagawa.lg.jp/agrinet/dougubako/saigai/pdf/engai.pdf> (確認日: 2011 年 11 月 26 日).
- 12) 神山和則・宮地直道・粕渕辰昭 (1992) : 石狩泥炭地中央部における客土事業の推移と客土層厚区分図, 北海道農業試験場研究資料, 46, 1-57.
- 13) 兼子健男 (2003) : 水田における台風高潮塩害災害の除塩技術, 水と土, 113, 48-53.
- 14) 川崎弘 (1989) : 我が国の酸性硫酸塩土壌の分布と対策, 農業技術, 44 (9), 25-30.
- 15) 気象庁 (2011) : 津波情報 (津波観測に関する情報), 平成 23 年 3 月 12 日 19 時 39 分, http://www.jma.go.jp/jp/tsunami/observation_04_20110312193944.html, (確認日: 2011 年 11 月 26 日).
- 16) 北川巖・竹内春信・木曾誠二 (2006) : 十勝岳泥流地帯における暗渠管閉塞要因の解明と回避対策, 農業土木学会論文集, 241, 117-122.
- 17) 北川巖 (2011) : 汎用田への品質改善容土の資源分布と利用指針, 農業農村士学会誌, 79 (4), 251-254.
- 18) 小林嵩 (1938) : 茨城県における湖沼の干拓不良土並にその改良に就いて, 第 1 報, 干拓土壌の反応に就いて, 日本土壤肥科学雑誌 12, 308-311.
- 19) 国土地理院 (2011) : 津波による浸水範囲の面積 (概略値) について (第 5 報) (4 月 18 日), <http://www.gsi.go.jp/common/000060371.pdf>, (確認日: 2011 年 11 月 26 日).
- 20) McLeod M.K, Slavich P.G, Irhas Y, Moore N, Rachman A, Ali N, Iskandar T, Hunt C, Caniago C (2004) : Soil salinity in Aceh after the December 2004 Indian Ocean tsunami, *Agricultural Water Management* 97, 605-613 .
- 21) 南松雄・古山芳広・土井晃郎 (1971) : 亜鉛欠乏に起因するタマネギの生育障害, 北海道立農業試験場集報, 23, 20-30.
- 22) 宮城県立農業試験場 (1961) : チリ地震津波による農作災害の実態, 1-74.
- 23) 水野直治・黒沢健治・稲津脩・前田要・土居晃郎 (1985) : 北海道における水稲のヨウ素過剰による赤枯れの可能性について, 日本土壤肥科学講演要旨集, 31, 228.
- 24) 水野直治・丸岡孔一・稲津脩 (1992) : 1926 年十勝岳泥流水田土壌のイオウと鉄の含有率, 日本土壤肥科学雑誌, 63 (6), 677-683.
- 25) 村上英行 (1961) : 過酸化水素による干拓地土壌中の土壌中の可酸化性イオウの半定量法, 日本土壤肥科学雑誌, 32 (6), 276-279.
- 26) 村上英行・古山光夫・花山英夫・田村明長 (1971a) : 水底泥土の有効態窒素, 中国農業研究, 42, 11-12.
- 27) 村上英行・古山光夫・沢田真野輔 (1971b) : パイライトを含む三紀層泥岩からの硫酸塩の生成, 中国農業研究, 42, 13-14.
- 28) 村上英行・沢田真野輔 (1971) : 工場排水による水稲のホウ素過剰障害, 中国農業研究, 42, 9-10.
- 29) 中津智史・中本洋・松本武彦・五十嵐俊成・菅原彰 (2010) : 北海道における水稲カドミウム濃度の変動要因と低減対策, 日本土壤肥科学雑誌, 81 (5), 514-517.
- 30) 中矢哲朗・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, 海岸工学論集 53, 1381-1385
- 31) Nakaya, T., Tanji, H., Kiri, H., and Hamada, H. (2010) : Developing a salt-removal plan to remedy Tsunami-caused salinity damage to farmlands: Case study for an area in Southern Thailand, *JARQ*, 44, 159-165 .
- 32) 日本分析化学会北海道支部 (1994) : 水の分析, 日本分析化学会, 139-143, 156-157, 173-175, 185-188.
- 33) 日本ペドロジー学会 (1997) : 土壌調査ハンドブック改訂版, 博友社, 169.
- 34) 農林水産省 (2011) : 東日本大震災について～東北地方太平洋沖地震の被害と対応～ (11 月 25 日), <http://www.maff.go.jp/j/press/keici/saigai/111125.html>, (確認日: 2011 年 11 月 26 日)
- 35) 佐々木信夫 (1978) : 新第三系に由来する酸性硫酸塩土壌, I. その特性, ペドロジスト, 22 (1), 2-11.
- 36) 須田達也・土居晃郎・甲田裕幸・竹内晴信 (2001) : 塩分を含むかんがい用水の取水管理について, 北農, 68 (4), 18-24.
- 37) 竹内晴信・東田修司・市川信雄・松原一實 (2000) : 軽石流堆積物客土畑における有機物施用効果 -2- 客土と有機物施用が土壌の作物生産力に及ぼす影響, 土壌の物理性, 84, 33-41.
- 38) 東海近畿農業試験場 (1961) : 伊勢湾台風による農作災害とその技術対策に関する調査研究報告, 東海近畿農業試験場特別報告, 1-119.
- 39) 山内益夫・前田吉広・長井武雄 (1987) : 耐塩性の品種間差とナトリウムの吸収・移行特性との関係, (1) イネ, 日本土壤肥科学雑誌, 58, 591-594.
- 40) 山内益夫・島田義明・吉田昌一 (1983) : 水稲における塩化ナトリウム高濃度処理による生育障害の軽減に対するカルシウムの効果, 日本土壤肥科学雑誌, 54, 499-504

- 41) 柳原哲治(2007)：泥炭地水田産米の食味の特徴と客土による改善, 土壤の物理性, 103, 95-103.
- 42) 横井義雄(2006)：砂質火砕流堆積物の客土によるクラスと形成の抑制を主体とした畑土壤の物理性改善技術, 土壤の物理性, 103, 3-12.
- 43) 横井義雄・菊池晃二(1977)：十勝地方におけるトウモロコシの亜鉛欠乏に関する研究, 第1報 トウモロコシの亜鉛欠乏とその実態について, 北農, 44, 12-27.
- 44) 米田茂男(1961)：干拓地土壤に関する研究(第17報) 伊勢湾台風による冠潮塩害地土壤について, 岡山大学農学部学術報告, 18, 51-60.
- 45) 米田茂男・河内知道(1972)：水底の底質, とくにヘドロの特性に関する研究(第1報) 堆積泥中の酸化性イオウ化合物の形態について, 岡山大学農学部学術報告書, 40(1), 45-55.

The Physicochemical Properties of Tsunami Deposits and Agricultural Soils in Devastated Farmlands by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake

KITAGAWA Iwao, TOMOSHO Tatsumi, HARAGUCHI Noburo,
SHIONO Takahiro, WAKASUGI Kousuke, ASHIDA Toshifumi
and ZUKEMURA Chika

Summary

This report presents a comprehensive assessment of the physicochemical effects on agricultural soils of sludge and sea sand deposition and seawater influx as a result of the tsunami caused by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake. These effects have been evaluated in terms of general physicochemical properties, as well as salt, heavy metal, and sulfide content. The following basic knowledge has been acquired for managing agricultural land restoration. (1) Tsunami deposits contained large quantities of chloride, sulfate, sodium, and magnesium, which were derived from seawater. The deposits also had high EC. In particular, these components were abundant in fine sludge particles and in first 10 cm of topsoil, but were less abundant in lower soil layers. (2) In the 94 days following the disaster, salt permeated downward in some tsunami-affected agricultural land, meaning that the salt content was reduced in deposits and surface soil to an extent. However, in agricultural land where the salt did not permeate downward, these components remained abundant in deposits and topsoil. The situation differed greatly depending on the drainage and soil conditions of the agricultural land. (3) Because the copper, zinc, and cadmium content in deposits and topsoil were not especially high, risk reduction measures can be implemented for agricultural land restoration and farming activities. (4) The tsunami deposits included sulfide-containing acid sulfate soils; to prevent agricultural production from being impaired due to strong acidification, it is essential to coordinate countermeasures with other recovery activities according to the thickness of the deposits, their sulfur content, and the state of the agricultural land. (5) Immediately after the disaster, high pH (H_2O_2) due to bases such as sodium was recorded via methods for rapidly evaluating acid sulfate soils in tsunami deposits. As a result, pH could not be appropriately evaluated in cases where the sulfur content was relatively low. Accordingly, additional evaluations were necessary that used filtrates to measure sulfur concentration. (6) The physicochemical properties of soils indicate the possibility of using pyroclastic flow deposits found in hilly areas around the disaster area as supplementary soil in order to deal with soil shortfalls caused by agricultural soil being washed away by the tsunami and by contaminated soil needing to be removed. Additional soil is also needed for land leveling as a subsidence countermeasure.

Keywords : tsunami devastated farmland, tsunami deposits, physicochemical properties, salinity, acid sulfate soil, heavy metal