

能登半島地震被害地の生活水（井戸水，湧き水，山水）の調査と水田の塩害調査結果

（環境調査・研究班）

田崎和江¹，野村正純²，馬場奈緒子³

<要約>

本環境調査・研究班の調査結果と研究結果は、地学団体研究会の学術雑誌<地球科学>に特集号 61-4 July 2007 (313 page) および 61-5 September 2007(404 page)に掲載した。そのうち本研究班の著者が入っている論文は下記のとおりである。

- (1) 能登半島地震の地震災害の概要とねらい(61-4, 239-242)
- (2) 能登半島地震被害地の生活水（井戸水，湧き水，山水）の調査結果：地震災害時の迅速な指導と指示(61-4, 281-292)
- (3) 能登半島地震による水田の塩害被害(61-5, 389-400)
- (4) 空間放射線がとらえた能登半島地震：被災地における空間ベータ線測定(61-5, 343-361)
- (5) 能登半島地震と角間 2 号井戸の地下水について(61-4, 293-300)
- (6) 能登半島地震；旧七尾市における建造物の被害(61-4, 255-263)

本報告書ではページ制限のため<能登半島地震による水田の塩害調査と現状>についてのみ報告する。2007年3月25日9時41分にマグニチュード6.9の地震が石川県能登半島を襲った。その地震のため1~2週間電気や水道が止まった。住民は近所の井戸，湧き水，山水を注意深く使用した。なぜならば，地震後のそれらの水は，泥などで色が変わり，pHも硫酸イオンのために中性から酸性に変化し飲料不可になった井戸水があったからである。一方，地震から2ヶ月後，亀裂や陥没等々の地下構造の変化のため，海水が水田に浸透し稲が枯れる塩害が発生した。塩害が発生した水田を始め，周辺の用水路，貯水池の水を現地で測定したところ，pH8.0を示し，電気伝導度（EC）も高い値を示した。また，塩害を起こした水田の土壌と稲を蛍光X線分析により半定量分析をおこなったところ高濃度の塩素のほか典型的な塩害現象を示すNa，S，Feが検出された。地元農民は塩害の防止対策を行政に求めている。

1. 序論

2007年3月25日午前9時41分に能登半島地震（M6.9）が発生し，能登半島一帯において，死者1名と多くの家屋の倒壊，道路の陥没，崖や斜面の崩落などの被害をもたらした。また，1990年代のカリフォルニア地震の際に作られた専門用語“ライフライン”である電気・ガス・水道などにも被害が及んだ。災害時には上水道がストップすると決めてかかるのがよい。関東大震災や阪神大震災（1995年1月）のとき，小さな井戸が生きていて，地震の影響で一時的に多少の濁りは生じたがすぐに清澄さを取り戻し，多くの被災者の飲料水として大変役立った（井上・高井，1996）。また，新潟県中越地震（2004年10月）のとき，湧き水や山からの地下水を炊飯や用水に使用したとの報告

¹ 金沢大学大学院自然科学研究科（平成20年3月現在）

² 金沢大学大学院自然科学研究科・博士後期課程（平成20年3月現在）

³ 金沢大学大学院自然科学研究科・博士前期課程（平成20年3月現在）

がある（新潟県越路・大地の会，2007）．その教訓をもとに，私たちはすぐに水質測定の実地調査を行い，地質専門家の立場で地域のライフラインに貢献した．石川県輪島市では，断水した被災地の15ヶ所の生活水（井戸水，湧き水，山水）の水質測定を行った．その結果，白色，灰色，褐色の濁りのある水が pH5 と酸性に変化していたため，飲料不可の指摘を行い，かつ，分析結果をもとに硫酸イオンの増加による湧き水の酸性化について保健所に報告した（田崎ほか，2007）．また，生活水に使用した湧き水や井戸水から多量の微生物や大腸菌が認められ，これについても飲料不可の指導を行った．

一方，輪島市門前町のじんのびの湯の温泉水はこの地震の後，中性からアルカリ性（pH8.1）に変化し，塩化ナトリウムが多く含まれ，海水が流入した可能性を示した（田崎ほか，2007）．すなわち，今回の地震により，地下水の水脈に大きな変化を生じたことを示している．ライフラインは人間のみならず，生物，植物，特に農作物にとって大変重要である．農業用水はおもに灌漑用に使われている真水であり，米作農家にとって真水の有無は死活問題である．3月末の能登半島地震の時には，まだ水田には水も稲もない用水路の整備期間中，4月中旬から水入れと田起こしが始まり，5月の連休に一斉に田植えが行われた．苗が20 cm 位になった6月初旬，干拓地である石川県七尾市中島町奥吉田地内の水田に塩害が現れ始め，一部の水田の苗はほぼ全滅した．農業用水を貯水池に溜め，各水田に水をポンプで給水する配管システムが完成してから20年たつが，これまで塩害にみまわれたことは一度もなかったという．この貯水池口への用水路の沈下，そして貯水池に隣接する日用川（ひょうがわ）の土手のあちこちに亀裂・陥没・ずれが生じていることから，能登半島地震によってこの貯水池へ日用川の海水が浸透した可能性が考えられ，本調査研究を開始した．能登半島地震後約2ヶ月たった5月末から6月にかけて，石川県七尾市中島町奥吉田における地震被害と水田の塩害調査を実施しその結果を報告し，対策について地元の方に提案した．

2. 調査方法と試料採取

私たちは6月6～7日に現地で水質測定と空間ベータ線の測定を行った．測定項目は，pH，酸化還元電位（ORP），電気伝導度（EC），溶存酸素（DO），水温（いずれも HORIBA カスタニーメーター使用）および空間ベータ線である．空間ベータ線の測定は GM サーベーター（TGS-146，ALOKA 社）を使用した．また，豊川水利組合員数名から聞き取り調査を行い，日用川の河川水，農業用ため池の水，被害の出ている3つの水田の水と土壌，稲苗を採取し，蛍光 X 線分析（XRF）により含有元素の半定量分析を行った．日本電子製エネルギー分散型蛍光 X 線分析装置 JSM-3201，Rh-K α 線源を分析に用いた．なお，今回着目する塩素は X 管球ターゲット材 Rh と重なるため，一時フィルターに Cr 用フィルターを用い，加速電圧は 30kV と 50kV で2回測定した．定量分析はフィルターなしの測定と Cr，Pb 用フィルターの3つを組み合わせたフィルター FT 法で，スペクトルの強度差による定量的な判定を行った．水試料は専用ホルダ（1530 タイプ+プロレン）に試料液体 4 ml をシリンジで採取し，測定した．比較のために塩素が検出されない昭島市工業用水も用いた．稲苗の試料は水道水で付着している土壌を洗浄した後，純粋で洗浄し，70度で約3時間乾燥させ，細かく切断した後試料成形プレスで成形した．土壌試料 6.69 g を 70度で約3時間乾燥させた後，重量は 3.68 g になり，メノウ乳鉢で粉碎後，成形プレスで成形した．植物は慣例にならって元素表示を，水と土壌は酸化物で表示した．

3. 結果

このたび塩害の被害を被った石川県七尾市中島町奥吉田は能登半島の一番細くなった七尾西湾に面しており、和倉温泉の北西 5km にある干拓地である。200 年前に湾の一部を埋め立てて水田にし、約 20 年前の圃場整備事業で耕地整理を行い用水の循環システムを設置したところである。用水循環システムの源である貯水池は、海から 600m 内陸に位置し、日用川の右岸にある。日用川の水質測定点を N1~3、水田の水質測定地点を T1~3、そして、用水路の水質測定点を Y5~7 で示している(第 1 図)。日用川の右岸および左岸の十数ヶ所の石垣部分で亀裂や湾曲が起こり、水色のシートで覆われている。石垣部分が河川側にせり出しているが、コンクリートの部分は一見すると異常がないように見える(第 2 図 A)。日用川沿いの貯水池は深さ 2-3m で、水は赤褐色に濁り、フナや亀が死んでいた(第 2 図 B)。その貯水池の南側角の金網のフェンスは根元のコンクリートの陥没により傾き破損している(第 3 図)。この陥没部分は水田を循環してきた水が貯水池に集められる場所であり、ここに接する大型の U 字溝は 5cm ほど海側にずれを生じている。今回塩害を被った水田は 4 月中旬に水を入れ、5 月 6 日に田植えをしたが、6 月 7 日現在約 20cm に成長した稲の葉先が枯れ(第 4 図 A)、または、完全に茶色になって立ち枯れしている(第 4 図 B)。その完全に立ち枯れした水田の水や湧き水も採取して水質測定を行った(第 5 図)。第 6 図は 6 月 7 日に調査した水田とその 20 日後の様子を示した。この間の雨水による掛け流しの効果が上がり、少しは稲が緑色に復活したが、生育状態はよくない。なお、第 6 図 B の右下に注水栓を示したが、ここから塩水化が生じたことを示している。6 月 7 日の水質調査の後、地元の農家の数軒が集まり、結果の報告を求めたので説明会を開いた(第 7 図)。当日は、行政側も十数名で調査を行っていたが、地元農家に説明をする機会を持たなかったし、我々の調査結果の説明も求められなかった。

大気中のラドン値は 40~50cpm と低い、貯水池や日用川周辺の亀裂や陥没部分はいずれも 90~140cpm と 2~3 倍高い値を示した。なお、土壌や水田は 70~80cpm を示している。すなわち、今回の地震による陥没や亀裂の部分でラドンが発生しており、地下深部の変化を示唆している。また、貯水池および周辺の水質測定結果のうち、日用川には海水が流入しているので勿論 pH8.0 を示したが、地震による亀裂や陥没が生じた場所、すなわちラドン値が高い場所も pH8.0 を示した。特に、貯水池の金網が破損している所は pH8.1 を示し、試掘溝も pH7.9 と高い値を示した。すなわち、ラドン値と pH 値には相関関係がある。また、pH 値が高いところでは EC 値も高く、両者に相関関係が認められることが明らかになった。さらに、採集した水の XRF 分析結果から EC 値と塩素 Cl の含有量には正の相関が認められる。すなわち、現地でも得られた EC 値は塩素の含有量を示している、塩害の有無が現地ですぐに判断できることを示している。現地における DO、Eh および水温については大きな差異は認められない。塩害をおこしている水田(T1~3)の EC は 14~29 mS/cm であり、Cl 濃度も 1.38 wt% と際立って高い値を示している。さらに、塩害を起こした稲には Cl のみならず、K、Ca、Mn、Fe、Br、Sr の元素が多く含まれているほか、重金属(Cu、Zn、As)も 0.001 から 0.004 wt% 含まれている。塩害を起こした土壌は土壌の主成分である SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃ に加え、海水の成分である Na₂O、MgO、SO₃、Cl、K₂O、CaO が多いことが特徴である。この値からも海水が水田に侵入したことを示唆している。一方、稲の化学成分についても、稲独自の成分である Si 2.1 wt% の他に、海水由来の Cl が 1.3 wt% 入っているのを確認した。なお、Fe が 5.2~5.4 wt% と高濃度に認められたのは、塩害を受けた根は、土壌中の鉄が根の表面に付着して沈積するため、褐色に変色し、根ぐされに似た養分吸収阻害の結果を示している(千葉県, 1990)。

4. 考察

河川水と異なり、地下水がどのように流れているのかをイメージするのはなかなか難しい。自然状態では、帯水層中の土粒子の微細な間隙をぬって流れる層流水の流速はせいぜい 1 日数 cm から数百 m 程度であり、河川水が 1 日数 km から数十 km もながれるのとは比べものにならないほど遅い。とくに被圧地下水の流動速度は遅く、道水勾配が小さいところでは、自然状態のままでは動かないといってよいくらいである(真柄, 1997)。しかし、今回七尾市中島町では地下水または貯水池の塩水化が起こった。海岸地帯では海水が淡水地下水の下方に侵入しており、自然状態では互いに動的平衡を保っている。実際に、七尾西湾に河口を持つ日用川では表層水が pH 7.9 であるのに対して底の部分の塩水層は pH 8.2 と高くなっている。一般に、潮位差の小さい日本海側の河川では塩水の侵入は弱混合型であり、塩水くさび型として流入することが知られており、新潟県の阿賀野川、島根県の大橋川がその代表例である(藤井他, 2006; 立石他, 2006)。大橋川の水深 1.5 m 付近に形成される塩分躍層の震動により EC は 30 mS/cm 以上(塩分 16 psu 以上)の塩水が河川を遡上し、それと同時に DO 3 mg/l 程度の貧酸素水になる。

また、越後平野には多くの伏在活断層が推定されており、断層の活動等に依る地盤の沈降が地形的に平坦な越後平野内陸部への海水の侵入と後退を引き起こした可能性は高い。堆積システムの後退と沈降との関係の解明は、平野部の地震災害の面でも新たな問題点を提示している。例えば、阿賀野川では 1965 年に新潟水俣病が発生し、その原因として前年の新潟地震において信濃川河口部の農薬倉庫が被害を受け、そこから流出した農薬が海に出て、さらに阿賀野川に塩水の遡上とともにもたらされ、下流域に被害をおよぼしたとする<塩水くさび>説が主張され、現在も塩水くさびについての調査が行われている(立石他, 2006)。それによると塩水は河口から 6km 以上遡上していて、河川流量、干満によって変化すること、塩水と上位の淡水の境界はかなり明瞭であり、弱混合の状態にある。阿賀野川の潮位変動量は大潮時で 46cm、小潮時で 10cm、感潮区間は河口から 16km、最大塩水遡上距離は 14km である(建設省土木研究所, 1993)。越後平野は日本海側の活構造地域に位置し、厚い沖積層は、海水準変動と沈降運動によって形成されたと考えられている。このバリアーラグーンシステムは、現在の海岸線まで 3~4 回の前進と後退を繰り返した。この堆積システムの後退の中には、地震に起因した急激な沈降による影響を含んでいると考えられている(ト部ほか, 2006)。

一方、太平洋側でも河川の塩分濃度と流速プロファイルのモニタリングが行われている(Tsuzuka, 2006)。また、四万十川の塩水遡上について大潮時に塩水くさび音響プロファイリング装置 SC-3 と水質計を用いて調査した結果、塩水遡上は通常は河口から 5.6km の井沢の淵までであることを明らかにした(井内ほか, 2006)。彼らは海水が上げ潮時に下流側から河床に供給され、淡塩境界を押し上げて行き、次第に境界が明瞭になって行く状況を明らかにした。そして、四万十川河口域では昭和 49 年当時に海水の浸透による農業被害を巡って裁判で争われ、中筋川<塩害訴訟>事件として知られている。

本研究地域である日用川は七尾西湾から海水が遡上するが、河口からわずか 600~700m の間で、今回の地震により石積みの数十ヶ所に間隙が生じた(第 2 図 A)。コンクリートの見えている部分には亀裂は認められていない。石積みの部分は、海水が陸地側へ侵入するのを防ぐだけの圧力、すなわち淡水の海洋側への圧力が不足したため、普段の平衡が破れ、海水が内陸へ侵入し、地下水の塩水化が起こったと考えられる。2007 年 3 月 25 日の地震から、ほぼ 2 ヶ月後に塩害が確認されたが、地震当時、水田には水も入っておらず、稲も植わっていなかったため発見が遅れた。なお、塩水化は現在の海水によるものばかりではなく、化石塩水によっても引き起こされる場合もある(真柄, 1997)。七尾市中島町奥吉田の場合、河口まで数

100m しかなく、かつ、貯水池内の敷地の掘削を行い、最深 190 cm で pH8.2 の海水がしみ出していることから現在の海水による塩水化が生じたと考えられる。

下記に地震後の地下水の変動、特に塩水化による塩害調査およびその手がりについて考察し、その対策について述べる。

(1) 水質測定からの手がり

現地における水質測定値とラドン濃度との同時測定により、両者に相関関係があることが明らかになった。大気のラドン濃度が 40～50 cpm であるのに対して、地上の建造物の破損箇所や亀裂、陥没の生じている場所はラドン濃度が 2～3 倍高く、80～140 cpm を示した。また、ラドン濃度が高い場所の pH と EC が相関して高い傾向が認められた。すなわち、地震の影響が認められる場所の pH は海水の 8 に近い値を示し、かつ、EC が 6～11 mS/cm を示した。特に、塩害を起こしている水田の EC は 28.9 mS/cm とほぼ日用川の海水 (27.3～41.8 mS/cm) と同じ値を示した。また、pH、EC がともに高い値を示す箇所の XRF 分析による塩素濃度の高さとも合致した。すなわち、地震の影響がみとめられる箇所は、ラドン濃度—pH—EC—XRF 塩素濃度が一致して高い値を示している。分析機器の価格や分析時間を考慮すると、現地での塩害調査の折、塩分の直接測定よりも EC による間接測定の方が簡易であり、感度も高く、実用的であることが明らかになった。緊急に塩害対策を行う場合、ラドン調査と同時に、土壌中および灌漑水中の EC を測定し、塩分濃度の高い場所を迅速かつ容易に知る必要がある。この方法は塩水の侵入箇所の特定に有力な手がりとなる。

(2) XRF 分析からの手がり

今回の試料のすべてに塩素が検出され、日用川の表層水 (N1) には 1wt% も含まれていた。標準試料として昭島市工業用水を分析したが塩素は検出されなかった。海水には、塩分 (Na, Cl) の他に一般に Br や Sr が含まれている。そこで Br と Sr に着目して XRF 分析を行った所、0.0001～0.0024 wt% の Br や Sr が検出された。すなわち、海水由来の塩害であれば、Cl 含有量の増減に伴って Br や Sr も変化するであろう。しかし、標準試料や水田に散布されている肥料や農薬等に Br や Sr が含まれていないことが条件となる。

塩害で立ち枯れた土壌と稲からは Cl が 2wt% 検出されたほか、少量ながら Cu, Zn, As, Pb などの重金属が認められた。農用地の土壌汚染防止法等に関する法律第 3 条第 1 項に基づく対策地域指定要件によれば、米については Cd のみに基準があり、1 mg/kg 以上となる恐れがある地域とされている。そこで、土壌および稲の中の Cd の存在の有無を調べるため、20,000 秒測定したが、両者とも Cd のスペクトルは確認できなかった。従って、Cd は 2 または 1ppm 未満の検出限界以下の濃度と考えられる。また、Hg はスペクトルが確認できなかったので数 ppm 未満の濃度と考えられる。さらに、特定有害物質のうち Cu, As, Zn は農用地 (田に限る) の土壌中にそれぞれ 125 mg/kg, 15 mg/kg, 120 mg/kg 以上が指定要件となっている。

一方、産業技術総合研究所地質調査総合センター (2004) が行った河川堆積物の地球化学図によれば、七尾市の沿岸には Fe_2O_3 (9.80-10.8%), P_2O_5 (0.317-0.788%), TiO_2 (1.82-3.19%), Pb (100-150ppm) が濃集している。本研究における七尾市中島町奥吉田の土壌成分についても、これらの酸化物やイオン含有量が高い傾向が認められる。しかし、多量の Fe の含有量の起源については、海水にはこのオーダーでは含有されていない。日用川 (N1) で Fe 0.0090 wt% に対して貯水池内の水の Fe が 0.0106～0.0169 wt% と一桁多くなっている。貯水池の地下から鉄分の多い地下水が湧出している可能性も否定できない。

(3) 塩害の土壌と水稻

本調査研究結果より、塩分濃度が高い水が圃場に流入すると、作物に塩害を起こすことが明らかになった。高濃度の塩水が水田に流入すると、短時間のうちに全葉が枯死する。塩害を受けた根は、土壌中の鉄が根の表面に付着して沈積するため、褐色に変色し、根ぐされをおこす。塩水が流入した水田の土壌は、塩基置換反応を起こし、塩分中のナトリウムを吸着して、塩基類、二価鉄などを放出する。このため二価鉄は活性化され、水稻は二価鉄によって根ぐされに似た養分吸収阻害を起こす。被害発現濃度は水稻の生育時期および環境条件によって異なるが、土壌中の塩素濃度として、活着期 0.05～0.07 %、分けつ期 0.07～0.1 %、出穂期以降 0.07～0.1 %位と考えられる。通常の場合、塩素濃度が 0.05 %以下の水を使用していれば、被害が発生する可能性は低い(千葉県, 1990)。本研究による塩害を受けた水田土壌 CI が 2wt%と枯死した稲の CI が 1.4wt% の分析結果は、まさにこの事例に相当する。

本研究における塩害をおこした土壌と稲の定量分析から Na や Cl のみならず、イオウ成分も検出された。土壌中の SO_3 は 0.25～0.48 wt%, 稲の中の S は 0.70～0.72wt%である。堆積物中の CNS 元素分析からも堆積環境の復元とその変遷を知ることができる。吉田ほか(2006)によれば、新潟平野の白根地区で掘削したオールコアボーリング試料中の CNS 元素分析を行った結果、湾頭デルタ—ラグーン—湾頭デルタ—ラグーン—河川—塩水湿地—河川—塩水湿地—河川環境へと変化し、多くの海水流入が確認できた。すなわち、CNS 元素濃度は堆積相から解釈される堆積環境とよい相関性を持ち、海水の侵入・後退の微妙な変遷を復元するための有効な指標となる。なお、ラグーン奥で河口など河川の影響を受ける所では、湾頭デルタが発達することが知られている(Zaitlin et al., 1994)が、本研究地域の貯水池周辺を掘削したところ、130cm までは砂質、190cm になると泥質になり、海水が浸透していた。干拓以前に陥没などの地下変動を泥質が埋めて、今回の地震により、陥没や地盤沈下などにより、新たに塩水が浸透したことも考えられる。

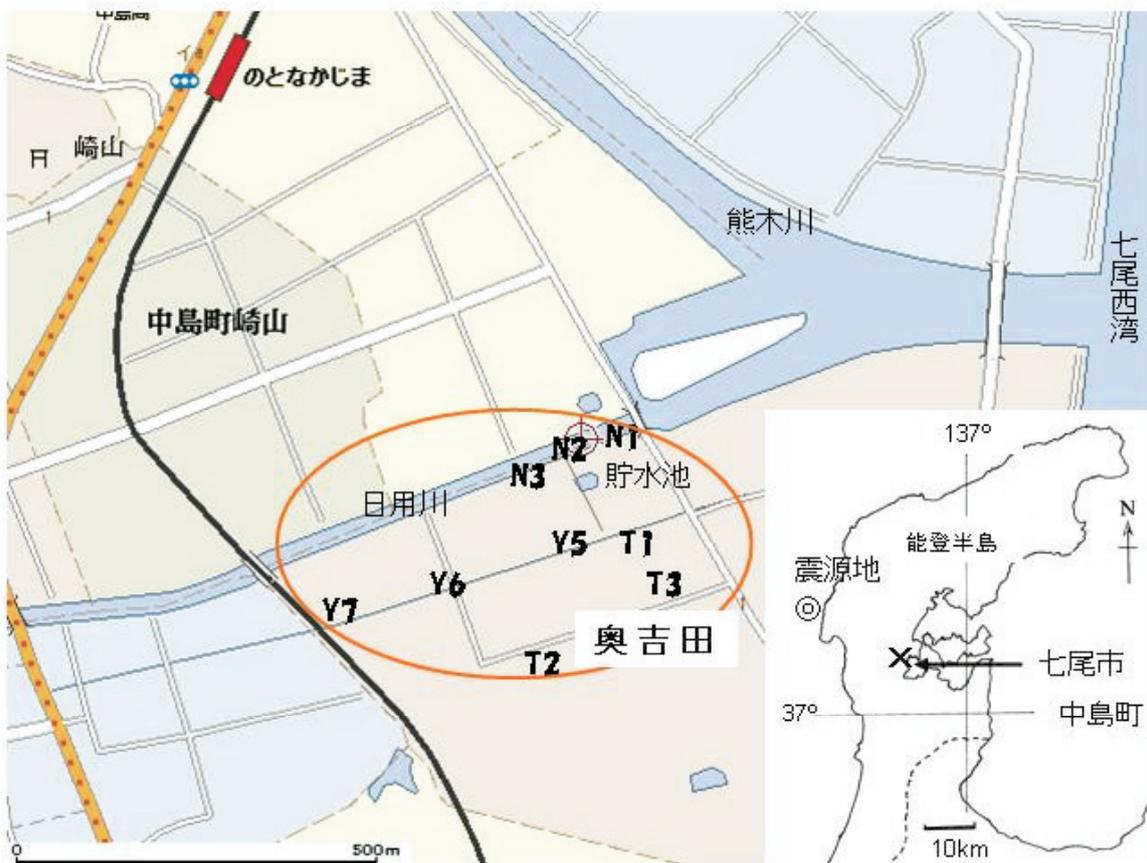
5. 対策と今後の課題

七尾市中島町奥吉田の豊川水利組合は、2007年5月30日午前9時10分に塩水の侵入を確認した。その時の塩分濃度は 0.47 %であった。その後、貯水池の用水を日用川へ排水し、6月8日から9日にかけて降った大雨を利用した水田の掛け流しを行ったところ、当初 0.47%であった塩分濃度が 6月9日には 0.34%に、6月11日には 0.23%に減少した。これらの作業を行いながら七尾市農林課や北陸農政局へ状況報告や対策の陳情を行って来た。その結果、石川県農林水産部は、給水値と日用川をつなぐ排水路に亀裂が発生したため海水が侵入したとし、排水路の復旧工事を年内に完了する予定であると回答している。

本調査研究結果により、水田への海水の流入は地震による地下の亀裂や陥没が原因であることが明らかになった。塩分(CI)は、土壌粒子に吸着されず、ほとんど全量が土壌中に溶解してイオンとなっているので、土壌から塩分を除去するには、土壌の水洗によって比較的容易に達成できる。水洗の方法にはく掛け流し法>とく除塩溝法>があるが、いずれも塩害圃場に真水を入れ、田面水を排水するとともに塩分を除去する方法である(千葉県, 1990)。しかし、水田に苗があるまま塩分除去を行うので、耕耘して土壌と真水を混合することができず、根の深い部分の塩分除去は難しい。梅雨時の雨水を最大限に利用して、畝の間の溝から掛け流す方法がよいと考える。

また、降雨時に水田の塩抜きをするとともに、塩水が浸透する亀裂や陥没場所の修復工事が先決である。ラドン値が高い値を示す亀裂や陥没場所、石積みが乱れている場所を修復し、海水の侵入を防ぐことが必要である。さらに、地震後3週間以内に被害届けを県に提出する期限が過ぎていて保証対象にならない。このような場合でも、被災時にさかのぼって補助・支援が適用されるように、支援制度の改正も早急に

解決すべき問題である。一方、能登半島地震の被災地で、海岸沿いの傾斜地に家々が連なる輪島市門前町の住民が、崖の崩壊を防ぐための〈擁壁〉の修復に苦しんでいるが、この修復は〈個人財産の形成〉とみなされ、住宅同様、行政の支援がない。内閣府や県によると被災者生活再建支援制度では、〈個人財産の形成には税金を投入しない〉のが原則であり、住宅、擁壁修復を対象とした助成はない。県の500億円の復旧基金は、〈お役所仕事〉ではなく〈心の通った支援〉の実行を願っている。



第1図 七尾市中島町奥吉田の調査地点図

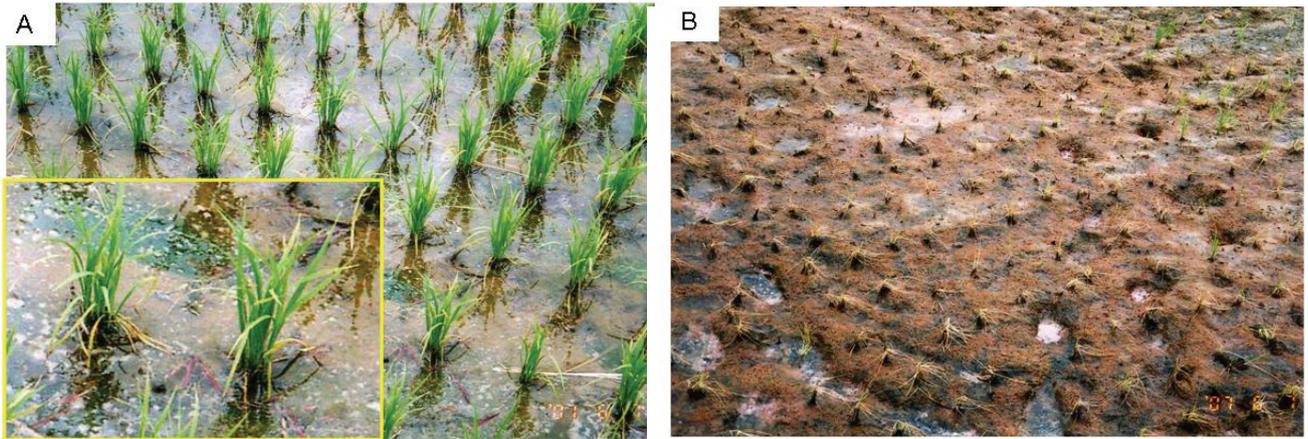
第1図 七尾市中島町奥吉田の調査地点図 (Yahoo 地図に加筆)



第2図 能登半島地震による日用川土手の被害と貯水池



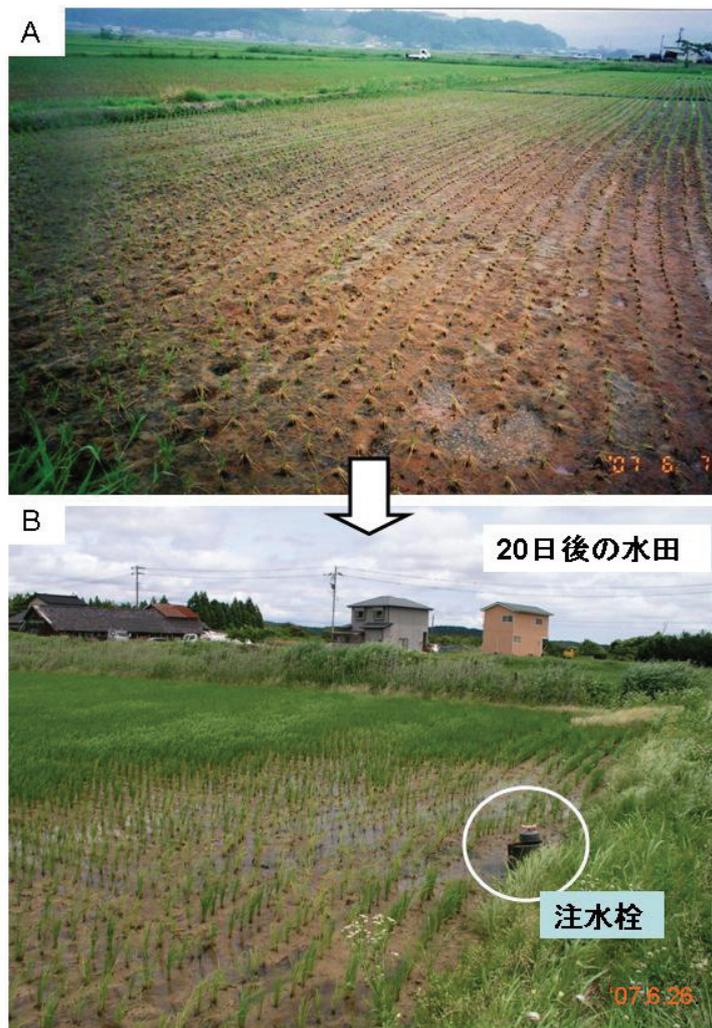
第3図 用水路から貯水池への水の取入れ口での陥没



第4図 葉先が少しかれた苗 (A, 試料T1)と塩害の水田(B)



第5図 採水, A:被害水田(試料T2), B:湧き水(貯水池近辺)



第6図 被害水田（試料T3）の様子



第7図 住民への調査報告