

# 平成23年東北地方太平洋沖地震による津波被災農地の 1年経過後の除塩の進行状況

瑞慶村知佳\* 北川 巖\* 友正達美\*\* 坂田 賢\*\*

\* 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

キーワード：津波被災農地, 塩害, 除塩, ナトリウム, 塩素, 排水

## I 緒言

平成23年東北地方太平洋沖地震による津波は多くの農地に甚大な被害をもたらした。宮城県では農地の冠水等の被害が約1万5千haに及んだ(農林水産省, 2011)。津波被災地ではガレキの堆積が少なく用排水施設の復旧が完了した地区から、圃場の排水条件に応じて縦浸透法や溶出法などによる除塩が進められている(千葉ら, 2012)。平成24年4月までには、5780 haの農地で除塩工事が完了した(宮城県, 2012a)。宮城県の除塩工事における水田土壌の化学性の目標値は作土の土壌EC(電気伝導度; 1:5水浸出法)で0.3 mS/cm以下であり、これは塩素含量による塩害の目安を元に算出されている(宮城県, 2011; 千葉ら, 2012)。

塩害による水稻の生長阻害の要因は、過剰な塩素による根の活動への障害と、ナトリウム吸収によるイオンストレスの大きく2つに分けられ(Dobermann, A., Fairhurst, T., 2000)、水稻の地上部の生育障害においては、土壌の塩素含量よりもナトリウム含量の方が高い相関があるとされる(山内ら, 1989)。また、一般的にナトリウムは交換性塩基の1つとして土壌に保持されるため、塩素イオンより土壌から溶脱・除去されるのに時間がかかるといわれている。

これまでの除塩や塩害に関する報告には、弾丸暗渠を施工し除塩を促進させる現地試験(兼子, 2003)や2004年のスマトラ島西方沖地震の津波による塩害土壌の被災2ヶ月後から15ヶ月後のモニタリング結果(Nakaya *et al.*, 2010)等がある。これらの報告では、土壌ECや塩素含量の評価はなされているが、除塩工事や降雨によって溶脱するナトリウムの変化については評価されていない。McLeod, M. K. *et al.* (2010)は、スマトラ島西方沖地震の津波による塩害土壌のナトリウムや塩素含量を分析し、いずれも土壌ECとの相関が高かったと述べているが、ナトリウム含量そのものは評価していない。

土壌中の交換性塩基間のバランスが崩れると、拮抗作用により養分の吸収効率が低下し、作物の生理障害が発生しやすくなる(日本土壌協会, 2012)。肥料3要素の1

つのカリウムはナトリウムと拮抗し、作物によるカリウム吸収は、培地のナトリウムの濃度が高くなるほど阻害されやすくなる(下瀬, 1963)。そのため、交換性塩基はそれぞれ単独の含量ではなく、お互いのバランスが重要である。国際稲研究所(IRRI)はナトリウムに関する塩害の指標として、交換性ナトリウム飽和度(Exchangeable Sodium Percentage; ESP)を示している。ESPは土壌が交換性塩基を吸着できる容量(陽イオン交換容量; Cation Exchange Capacity; CEC)のうち交換性ナトリウムが占める割合を表す。CECと交換性ナトリウム含量の分析の前処理は非常に煩雑であり、ESPは現場で早急に判断する除塩の目標値として活用することが難しいと考えられる。しかし、土壌ECを目標値とした除塩工事が完了しても、過剰なナトリウムによるイオンストレスが長期間にわたって作物の生育に影響を与える恐れがあるため、除塩工事後や一定の期間経過後のナトリウム含量の実態を把握する必要がある。

そこで、本報では、震災から13ヶ月経過した津波被災水田において、土壌ECを目標値とする除塩工事を実施した水田と、除塩工事未実施の水田における、ナトリウムと塩素含量の実態を把握するとともに、今後農地復旧および除塩工事が行われる地域の実態と問題点を明らかにし、除塩工事にあたっての対応方針について論ずる。

## II 調査方法

### 1 調査の概要

震災から13ヶ月後の2012年4月12日に、宮城県亶理町および山元町内の津波によって被災した水田14点、津波が到達しなかった水田3点で津波堆積物および水田の土壌を採取した(Fig.1)。これらの調査地点は、北川ら(2012)が、被災1ヶ月後および3ヶ月後に水田に堆積したヘドロ、海砂、水田土壌の理化学性を調査した水田と同一の地点である。調査地点のNo.1-14は亶理町内、No.15-19は山元町内である。

津波によって被災した水田14点のうち、2012年4月12日までに除塩工事が完了したのは7点(No.6, 7, 10,

14, 15, 17, 19) で、残りの7点 (No.4, 5, 8, 11, 13, 16, 18) はガレキの撤去はなされていたが、除塩工事は完了していなかった (亶理町, 2011; 山元町, 2012)。用排水施設については、ガレキの撤去はほぼ全ての地点でなされていたが、除塩工事が未実施の7点における用排水施設の本格的な復旧は平成24年度以降に予定されていた。

各地点において土壌化学性の分析用にヘドロ、海砂、各土層 (0-5cm, 5-10cm, 10-20cm, 20-30cm, 30-40cm, 40-50cm, 50-60cm) の試料を採取した。No.9は採土を行った当日に除塩工事が行われていたため、No.12は圃場面が湛水していたため、それぞれ試料を得なかった。また、他の調査地点でも一部で地下水位が高い等により採取できなかった層もあった。

対象地域の震災以降の積算降水量 (宮城県亶理町のアメダスの降水量データ) は、2011年3月15日から2012年4月12日までで1426 mmであった。なお、原口ら (2012) によると、除塩に必要な用水量は100 mm以上であると述べている。

## 2 分析方法

各調査地点の塩分濃度や除塩の進行状況を把握するため、採取した試料を風乾・砕土し、土壌の化学性として、pH (H<sub>2</sub>O)、土壌EC、陽イオン交換容量 (CEC)、原子吸光法により交換性塩基含量 (K<sub>2</sub>O, CaO, MgO, Na<sub>2</sub>O)、イオンクロマトグラフィ法によりCl<sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>の水溶性陰イオン含量を分析した (土壌環境分析法編集委員会, 1997)。なお、pHの分析では風乾土試料の1:2.5浸出液を、土壌ECおよび水溶性陰イオン含量の分析では風乾土試料の1:5浸出液を用いた。

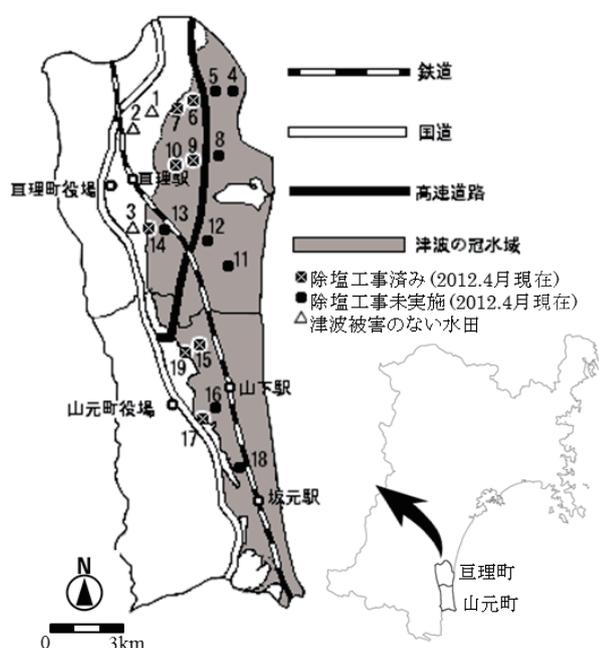


Fig.1 調査対象地  
Study area.

分析結果から以下の式により、塩基飽和度式 (1)、交換性ナトリウム飽和度式 (2) を算出した。K<sub>2</sub>O・CaO・MgO・Na<sub>2</sub>Oはそれぞれ交換性カリウム・交換性カルシウム・交換性マグネシウム・交換性ナトリウムの含量 [meq/100g] を表す。

$$\begin{aligned} & \cdot \text{塩基飽和度} [\%] \\ & = \{(\text{K}_2\text{O} + \text{CaO} + \text{MgO} + \text{Na}_2\text{O}) / \text{CEC}\} \times 100 \quad (1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \cdot \text{交換性ナトリウム飽和度 (ESP)} [\%] \\ & = (\text{Na}_2\text{O} / \text{CEC}) \times 100 \quad (2) \end{aligned}$$

## 3 除塩工事の手順

宮城県亶理町および山元町の農地復旧作業を含む除塩工事は以下を基本として行われた (亶理町, 2011; 山元町, 2012)。

亶理町では、1) 弾丸暗渠の施工 (本暗渠がない場合は明渠も施工)、2) 耕起、3) 湛水・落水、4) 作土層の塩素濃度の測定、5) 目標値を満たすまで3) から4) の繰り返しの手順で行われた。山元町では、1) ヘドロや海砂等の津波堆積物の除去、2) 畦畔・溝畔補修、3) 田面の均平、4) 弾丸暗渠の施工、5) 耕起、6) 湛水・落水、7) 作土層の塩素濃度の測定、8) 目標値を満たすまで6) から7) の繰り返しの手順で行われた。いずれの町でも被災した水田周辺の用排水施設が復旧したことを確認できた地区から除塩工事が進められていた。

亶理町 (2011) では、ヘドロや海砂等の津波堆積物の除去が手順として明記されていないが、復興庁 (2011) はヘドロが厚く又は広範囲に堆積している場合にはその除去を推奨しており、実際に亶理町内においてもガレキや津波堆積物の除去作業が行われていた。平成24年4月時点で除塩工事が完了した7点の調査地点のうちNo.6, 15, 17, 19で除塩工事前にヘドロの除去作業が行われた。

## 4 水稻の除塩の評価基準 <塩素>

水田土壌に対する除塩の目標値の尺度は地域によって異なり (原口ら, 2012)、土壌中の塩素含量では1000-1500mg/kg以下が用いられることが多い (兼子, 2003; 香川県, 2004)。本報では塩素含量による除塩の評価基準を1000mg/kgとした。

なお、現場においては、塩素含量や塩分濃度の目標値を土壌ECに換算し管理されることが一般的である。

## 5 水稻の除塩の評価基準 <ナトリウム>

国際稲研究所 (IRRI) では、ESPと減収の関係を以下のとおり示している (Dobermann, A., Fairhurst, T., 2000; 近藤ら, 2012) :

ESP < 20 %	著しい減収は認められない
ESP > 20-40 %	1割程度の減収
ESP > 80 %	収量が半減

**Table 1** 津波堆積物および水田土壌の化学性  
Chemical properties of deposits and rice paddy soils in tsunami devastated rice paddies.

地点	深さ	2012年 4月時点 の 除塩の 進行状況	pH (H <sub>2</sub> O)	EC [mS/ cm]	交換性 塩基含量 [mg/100g]				陽イオン 交換容量 [meq/ 100g]	塩基飽和度 [%]		水溶性 陰イオン含量 [mg/kg]	
					K <sub>2</sub> O	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O		Total	Na <sub>2</sub> O (ESP)	Cl	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
No 1	0-20 cm	水稲作付 (被害なし)	5.2	0.05	35	319	62	18	16.3	97	4	12	64
No 2	0-20 cm	水稲作付 (被害なし)	6.1	0.05	37	427	80	17	19.8	104	3	9	81
No 3	0-20 cm	水稲作付 (被害なし)	5.5	0.03	15	252	49	11	19.3	62	2	8	52
No 4	へドロ(0.5cm)	ガレキ 撤去	6.1	2.82	75	310	204	371	32.2	108	37	6558	1183
	0- 5 cm		5.0	0.60	58	168	133	175	27.9	70	20	917	569
	5-10 cm		4.8	0.71	55	179	130	186	20.4	98	29	1248	609
	10-20 cm		6.0	1.00	49	329	154	216	19.7	139	35	2125	450
	20-30 cm		6.0	0.87	26	365	136	183	22.3	118	26	2052	219
	30-40 cm		5.6	0.83	17	433	156	136	24.6	113	18	2047	74
	40-50 cm		5.1	0.55	16	353	148	83	29.2	79	9	1332	45
	50-60 cm		5.1	0.42	16	322	138	62	16.6	125	12	896	82
No 5	0- 5 cm	ガレキ 撤去	5.9	0.05	35	87	55	34	11.8	65	9	7	66
	5-10 cm		5.8	0.07	21	79	47	38	13.1	52	9	6	130
	10-20 cm		5.8	0.11	19	91	43	50	11.8	63	14	16	211
	20-30 cm		6.2	0.11	18	111	44	54	13.1	63	13	23	180
	30-40 cm		6.7	0.06	3	38	14	21	3.6	78	19	23	74
	40-50 cm		6.9	0.05	1	30	10	17	2.4	88	23	23	60
	50-60 cm		7.0	0.04	1	27	8	17	2.3	84	24	21	51
No 6	0- 5 cm	除塩 工事済	6.0	0.18	56	301	141	111	24.0	94	15	105	192
	5-10 cm		6.0	0.30	51	350	127	118	22.1	107	17	298	323
	10-20 cm		6.1	0.39	27	415	97	102	22.4	105	15	645	281
	20-30 cm		6.3	0.45	20	494	94	102	20.2	129	16	831	230
	30-40 cm		5.8	0.45	16	359	78	61	21.0	90	9	919	166
	40-50 cm		5.3	0.48	19	273	76	54	20.2	78	9	909	214
No 7	50-60 cm	除塩 工事済	5.5	0.40	17	211	63	51	14.8	86	11	698	265
	0- 5 cm		6.3	0.10	44	298	129	116	23.3	93	16	34	51
	5-10 cm		6.2	0.13	43	310	127	124	23.8	94	17	58	96
	10-20 cm		6.6	0.18	29	479	108	122	19.5	139	20	131	187
	20-30 cm		6.7	0.24	22	479	108	115	24.1	110	15	213	226
	30-40 cm		6.4	0.40	21	580	129	104	18.6	166	18	554	368
No 8	40-50 cm	ガレキ 撤去	5.9	0.40	22	531	144	90	29.6	99	10	669	237
	50-60 cm		5.4	0.38	13	442	126	75	29.2	85	8	634	211
	へドロ(0.5cm)		7.0	3.43	80	319	120	356	14.9	205	77	8538	1734
	砂(0.5cm)		7.4	0.62	53	190	86	143	9.2	182	50	1109	258
	0- 5 cm		5.0	0.67	29	122	74	127	12.5	102	33	1348	470
	5-10 cm		5.3	0.65	22	142	71	118	9.2	140	41	1383	323
	10-20 cm		5.8	0.49	29	238	56	90	16.1	91	18	954	320
	20-30 cm		5.4	0.45	32	213	62	80	17.6	79	15	862	250
No 10	30-40 cm	除塩 工事済	5.5	0.32	28	227	60	58	11.5	118	16	650	75
	40-50 cm		5.8	0.28	25	234	102	55	10.5	149	17	539	62
	0- 5 cm		6.4	0.18	46	234	90	119	19.2	92	20	134	143
	5-10 cm		6.7	0.23	28	326	89	109	21.5	94	16	211	198
	10-20 cm		6.0	0.36	23	381	82	98	18.5	115	17	501	403
No 10	20-30 cm	除塩 工事済	5.7	0.39	26	340	74	82	25.8	74	10	497	449
	30-40 cm		5.6	0.33	27	364	86	56	20.6	95	9	577	172
	40-50 cm		5.6	0.26	28	374	101	28	24.6	81	4	498	64

※ ( )内の数字は堆積物の厚さ。Deposits width in parentheses.

Table 2 津波堆積物および水田土壌の化学性 (つづき)  
(Continued)

地点	深さ	2012年 4月時点 の 除塩の 進行状況	pH (H <sub>2</sub> O)	EC [mS/ cm]	交換性 塩基含量 [mg/100g]				陽イオン 交換容量 [meq/ 100g]	塩基飽和度 [%]		水溶性 陰イオン含量 [mg/kg]	
					K <sub>2</sub> O	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O		Total	Na <sub>2</sub> O (ESP)	Cl	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
No 11	へドロ(6 cm)	ガレキ 撤去	8.3	0.13	27	140	30	23	2.6	303	29	22	36
	砂(13 cm)		8.7	0.08	14	99	18	16	4.0	129	13	5	15
	0- 5 cm		6.3	0.33	21	66	28	66	5.6	114	38	376	364
	5-10 cm		5.8	0.51	15	81	28	91	9.6	78	31	959	371
	10-20 cm		5.8	0.64	16	95	29	106	9.5	90	36	1358	295
	20-30 cm		5.4	0.69	5	46	12	72	4.1	114	57	1558	168
	30-40 cm		5.5	0.78	4	47	11	85	4.7	107	58	1925	103
	40-50 cm		4.8	0.53	2	25	7	45	3.6	76	40	1156	92
No 13	へドロ(0.2 cm)	ガレキ 撤去	7.4	2.22	55	759	104	184	7.1	555	84	4684	1538
	砂(15 cm)		8.3	0.15	4	303	8	20	4.7	256	14	102	87
	0- 5 cm		5.7	0.79	21	143	37	99	11.6	91	28	1662	514
	5-10 cm		5.6	0.72	17	147	20	87	9.8	96	29	1570	331
	10-20 cm		5.6	0.64	14	176	23	72	9.7	104	24	1325	332
	20-30 cm		6.0	0.75	10	213	21	59	12.6	85	15	1451	553
No 14	0- 5 cm	除塩 工事済	5.8	0.09	46	198	81	48	25.9	53	6	14	57
	5-10 cm		5.9	0.11	37	220	72	65	27.5	52	8	15	82
	10-20 cm		5.9	0.18	23	323	85	98	32.5	60	10	40	149
	20-30 cm		6.2	0.11	2	184	32	46	15.0	65	10	32	74
	30-40 cm		6.3	0.05	1	71	13	20	9.4	42	7	20	35
	40-50 cm		6.3	0.05	0	56	11	13	7.2	41	6	22	32
	50-60 cm		6.3	0.04	0	38	6	13	3.2	65	13	27	34
No 15	0- 5 cm	除塩 工事済	5.3	0.17	16	134	39	40	12.0	70	11	179	205
	5-10 cm		5.4	0.16	9	125	33	38	9.7	77	12	179	195
	10-20 cm		5.7	0.18	6	177	35	44	11.0	87	13	227	176
	20-30 cm		6.1	0.15	7	169	34	37	10.1	89	12	178	133
	30-40 cm		6.5	0.12	3	100	39	29	6.8	95	13	148	100
	40-50 cm		6.2	0.08	0	41	33	16	4.8	76	11	124	29
No 16	へドロ(1 cm)	ガレキ 撤去	6.2	0.15	34	154	64	52	12.3	90	14	124	144
	0- 5 cm		6.0	0.14	20	176	28	58	18.6	54	10	56	232
	5-10 cm		6.3	0.12	15	203	44	60	20.9	56	9	58	162
	10-20 cm		6.5	0.08	4	140	27	35	8.3	90	14	46	74
	20-30 cm		6.8	0.04	0	57	9	13	3.5	83	12	21	16
	30-40 cm		6.9	0.03	0	45	8	14	5.2	47	8	22	19
	40-50 cm		6.7	0.04	0	35	6	13	6.5	30	7	36	26
	50-60 cm		5.8	0.04	20	138	32	6	13.6	53	1	12	35
No 17	0- 5 cm	除塩 工事済	5.6	0.03	9	134	29	6	10.8	62	2	8	44
	5-10 cm		6.0	0.03	6	162	32	6	12.7	61	2	9	42
	10-20 cm		6.4	0.04	4	171	34	7	10.8	75	2	13	53
	20-30 cm		6.5	0.03	2	162	33	7	9.7	79	2	9	28
	30-40 cm		7.4	7.43	110	591	234	443	21.1	234	68	23751	2410
No 18	へドロ(1 cm)	ガレキ 撤去	8.4	0.18	6	172	14	27	3.5	221	24	284	19
	砂(8 cm)		6.2	0.40	15	158	33	67	9.7	100	22	620	467
	0- 5 cm		5.6	0.32	8	141	29	44	9.7	84	15	320	469
	5-10 cm		5.4	0.27	0	66	8	15	3.6	90	13	0.29	500
	10-20 cm		5.9	0.08	0	53	6	6	3.5	67	5	35	164
	20-30 cm		6.1	0.05	0	52	6	7	3.7	64	6	13	118
	30-40 cm		5.5	0.11	28	181	61	49	16.7	70	10	61	154
No 19	0- 5 cm	除塩 工事済	5.3	0.19	20	198	51	57	19.3	61	9	143	224
	5-10 cm		5.5	0.25	9	261	39	70	13.5	102	17	272	268
	10-20 cm		5.9	0.27	5	309	43	69	17.6	88	13	401	224
	20-30 cm		6.4	0.25	5	323	41	62	15.2	103	13	384	142
	30-40 cm		5.6	0.51	6	473	50	82	21.2	104	12	994	265
	40-50 cm		5.3	0.74	11	694	71	91	26.7	118	11	1695	280
	50-60 cm		5.3	0.74	11	694	71	91	26.7	118	11	1695	280

※ ( )内の数字は堆積物の厚さ. Deposits width in parentheses.

**Table 3** 被災3ヶ月の塩素含量およびESP（北川ら（2012）から算定）

Chlorine content and ESP three months after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake from Kitagawa *et al.* (2012) and revised.

地点 被災1年後の状況	No. 4		No. 5		No. 6		No. 7		No. 8		No. 10	
	ガレキ撤去		ガレキ撤去		除塩工事済		除塩工事済		ガレキ撤去		除塩工事済	
分析項目	塩素含量 [mg/kg]	ESP [%]										
ヘドロ Sludge	23903	102	6361	51	20201	95	-	-	31594	87	-	-
0-2.5 cm	6550	70	3604	42	4349	36	3922	27	3770	45	4740	39
2.5-5 cm	3517	33	2450	30	3814	26	2354	28	3523	38	2951	26
5-7.5 cm	1970	24	2704	38	3509	23	1980	24	2934	43	3266	32
7.5-10 cm	1203	18	3052	38	2755	15	2404	24	1805	20	2973	21
10-20 cm	463	8	2140	44	987	6	2012	15	604	8	1008	7
地点 被災1年後の状況	No. 11		No. 13		No. 15		No. 16		No. 17		No. 18	
分析項目	ガレキ撤去		ガレキ撤去		除塩工事済		ガレキ撤去		除塩工事済		ガレキ撤去	
	塩素含量 [mg/kg]	ESP [%]										
ヘドロ Sludge	* 1320	* 88	-	-	* 22235	* 73	6737	29	11416	56	41133	103
0-2.5 cm	755	17	14255	94	3936	31	1499	21	1096	23	1184	16
2.5-5 cm	420	12	2423	57	2752	24	1102	14	1356	24	416	15
5-7.5 cm	251	9	1040	22	2749	22	846	15	1657	21	138	12
7.5-10 cm	95	5	651	17	1849	12	682	12	1708	20	71	10
10-20 cm	40	2	303	14	1561	18	573	8	985	15	49	13

\*海砂 Sea Sand.

本報では著しい減収が認められないESPが20%以下を除塩の評価基準とした。

### Ⅲ 分析結果

水田土壌の化学性の分析結果をTable 1およびTable 2に示す。宮城県を除塩の目標値は作土層を対象にしている。水稲生育にとって適当な作土の厚さは15から20cmとされており（農業農村工学会，2010），ここでは深さ0-20cmの部分を作土層として扱った。なお，被災3ヶ月後の深さ20cmまでの塩素含量およびESPをTable 3に示す。

除塩工事が未実施の7つの調査地点（No.4, 5, 8, 11, 13, 16, 18）のうち，2012年4月12日にヘドロを確認したのはNo.4, 8, 11, 13, 16, 18の6地点であった。

#### 1 被災13ヶ月後の除塩工事と降雨による水田土壌の塩素含量の変動の実態

Table 1およびTable 2のうち，除塩工事を実施した7つの調査地点（No. 6, 7, 10, 14, 15, 17, 19）では，ほとんどが除塩の評価基準とした塩素含量1000 mg/kg未満であった。まず，作土層にあたる0-20cmの塩素含量は全ての除塩工事済みの調査地点で1000mg/kg未満であった。次に，心土層においても塩素含量が低かったが，No.6の深さ30-50cmおよびNo.19の深さ40-60cmにおいて，それぞれ909, 919mg/kg, 994, 1695mg/kgと塩素含量の高い層があった。一方，除塩工事未実施の7つの調査地点（No.4, 5, 8, 11, 13, 16, 18）では，ほとんどの地点のヘドロ・作土層・心土層ともに塩素含量1000mg/kgを超えていた。まず，ヘドロについて，No.4, 8, 13, 18で塩素含量が4684-23751mg/kgと高かったが，No.11,

16で22, 124mg/kgと低かった。次に，作土層について，No.4, 8, 13では917-2125mg/kgと高かった。No.11では，深さ5-20cmで959-1358mg/kgと高かったが，深さ0-5cmで376mg/kgであった。その他のNo.5, 16, 18では6-620mg/kgと低かった。心土層について，No.4, 11, 13では，896-2052mg/kgと高かった。No.8, 18では13-862mg/kgと評価基準内であったが，同地点のヘドロや作土層は評価基準を大幅に超えていた。その他のNo.5, 16は21-46mg/kgと作土層とともに心土層も低かった。

以上のことから，除塩工事を実施した水田では，一部の心土層で塩素含量が高かったが，作土層はいずれも低かった。除塩工事未実施の水田では，No.5やNo.16のように作土層・心土層ともに塩素の溶脱が進んでいる地点もあったが，ほとんどの地点で塩素の溶脱が十分に進んでいなかった。

#### 2 被災13ヶ月後の除塩工事と降雨による水田土壌のESPの変動の実態

Table 1およびTable 2より除塩工事を実施した7つの調査地点（No.6, 7, 10, 14, 15, 17, 19）では被災から13ヶ月後には全てESP 20%以内であった。一方，除塩工事未実施の7つの調査地点（No.4, 5, 8, 11, 13, 16, 18）において，一部ESPが低い地点もあったが，ほとんどの地点でESP 20%を超えていた。まず，ヘドロについて，ESPはNo.4, 8, 11, 13, 18では29-84%と高い値を示したが，No. 16のように20%以下である地点もあった。次に，作土層について，ESPはNo.4, 8, 11, 13, 18で22-38%と水稲の生育に影響のある範囲であったが，No.5, 16では9-14%と低かった。心土層について，No.11のESPは40-57%と高く，No.16は低かった。

**Table 4** 津波被災13か月後の水田の塩素含量とESPの関係(各調査地点の層の最大値を用いて分類)

Relation between chlorine content and EPS 13 months after the tsunami at rice paddies (Classify survey points using maximum layer at each survey point)

(a) 除塩工事済み水田 After salt removal

塩素含量 [mg/kg]	100未満	1000未満	1000以上
ESP[%]			
5%未満	No. <u>17</u>		
20%未満	No. 14	No. <u>6</u> <u>7</u> <u>10</u> <u>15</u>	No. <u>19</u>
20%以上			

(b) 除塩工事未実施の水田 Before salt removal

塩素含量 [mg/kg]	100未満	1000未満	1000以上
ESP[%]			
5%未満			
20%未満	No. <u>5</u>	No. <u>16</u>	
20%以上			No. <u>4</u> <u>8</u> <u>11</u> <u>13</u> <u>18</u>

※ アンダーラインはヘドロ等が堆積していた地点。  
The points deposits existed is underlined.

No.8, 13, 18の心土層はESPが5-18%と低かったが、同地点のヘドロや作土層のESPは20%を大きく超えていた。No.4の深さ20-30cmでは26%, No.5の深さ40-60cmでは23, 24%と評価基準を超えたが, No.4の深さ30-60cmでは9-18%, No.5の深さ20-40cmでは13, 19%と評価基準内であった。このことから除塩工事未実施の水田では, ヘドロや作土層のESPが依然として高く, 心土層のESPは低い地点が多かった。

#### IV 考察

**Table 4(a)** に除塩工事を実施した地点の, **(b)** に除塩工事未実施の地点の塩素含量とESPの関係について示す。それぞれの調査地点において, 最大値の層を代表値として分類し評価した。最大値の層を代表値として扱ったのは, 心土層においても, 残留塩類が表層に上昇することによって塩害の危険性があるためである。**Table 4(a)** **(b)** の分類項目は, 塩素含量について, 除塩の評価基準の1000mg/kg, 津波被害を受ける前と同等の値として100mg/kg未満とした。同様にESPについては, 除塩の評価基準の20%に加えて, 津波被害を受ける前と同等の値として5%未満とした。

**Table 4(a)** より, 除塩工事を実施した水田では,

No.19を除いて, 塩素含量だけでなくESPも水稻生育に影響のない範囲まで低下した。このことから, 土壌ECを目標値とする除塩工事によって, 塩素イオンだけでなく, ナトリウムも十分に溶脱されたことが分かった。No.19は深さ50-60cmの層で塩素含量が1000mg/kgを超えていた。この要因は地盤沈下等により地下水位が下がりにくくなったことなどが考えられる。宮城県の除塩工事实施後の転作田で8-9月頃に大豆が塩害によって枯死した事例が報告されているが(千葉ら, 2012), No.19においても日照りが続き土壌表層が乾燥することによって, 心土層の残留塩類が表層に上昇する危険性があると考えられる。これらのことから, 除塩工事を実施してから数年は土壌表層が乾燥しやすい畑地利用を避けたり, 水稻の中干しを実施しないことで土壌の乾燥を防ぐなど注意が必要である。宮城県では除塩工事を実施した直後は水稻を作付けするよう指導している(宮城県, 2012b)。

**Table 4(b)** より, 除塩工事未実施の水田において, No.4, 8, 11, 13, 18の塩素含量とESPとともに, 評価基準を大きく超えていた。これは, 付近の用排水施設が復旧しておらず, 排水機能が確保されていないため降雨によって塩素含量とESPが水稻生育に影響のない範囲まで下がらなかったと考えられる。一方, No.5, 16については, 平成24年度以降の復旧予定地であるが, 平成23年度中に除塩工事が完了した地区の近くに位置し, さらに, 幹線排水路が近くにあるという立地であった。年間に蒸発散量を上回る降雨量のある日本においては, 排水機能が確保されれば降雨により十分に除塩の効果が期待できるといわれている(原口ら, 2012)。そのため, 他の除塩工事未実施の地点と異なり, 降雨のみで除塩が進んだものと考えられる。以上より, 津波被災農地において農地の立地等の排水条件が塩分溶脱を促進させるのに影響が大きいことが分かった。

除塩工事済み水田のうち, No.6, 15, 17, 19では, ヘドロの除去により一部のナトリウムおよび塩素イオンが圃場の外に持ち出されたと考えられ, 除塩工事後の4地点のESP, 塩素含量ともに評価基準内と除塩が効率的に行われたと考えられる。しかし, 塩素含量については, No.17で8-13mg/kgと大幅に評価基準を下回ったが, No.6で105-919mg/kgであった。亘理町・山元町の地形は, 海岸から4-5kmの位置に南北に延びる山地があり, No.17は調査地点の中で最も山地に近く, 付近の水田よりも1.5mほど位置が高かった。国土地理院のデジタル標高地形図(<http://www1.gsi.jp/geowww/dhmap2/>)によると, 震災後のNo.17の標高は4-5m, No.6の標高は0-1mに区分され, No.17は地下水位が下がりやすく排水が促進されたものと考えられた。

#### V 結言

本報では, 震災による津波被災から13ヶ月経過した

水田土壌において、土壌ECが目標値の除塩工事済みの水田と除塩工事未実施の水田の塩素およびナトリウム含量の実態を把握し、以下のことが明らかとなった。

- 1) 土壌ECを目標値とする除塩工事では、塩素イオンだけでなく、ナトリウムも十分に溶脱された。ただし、除塩工事を行っても、心土層に塩素イオンやナトリウムが残留する場合もある。
- 2) 立地など排水が促進されやすい条件が確保されれば、被災から13ヶ月間の降雨のみで塩素イオンもナトリウムも十分に溶脱できる可能性がある。
- 3) ヘドロをはぎ取ることにより塩素イオンやナトリウムが効率的に除去される。ただし、立地など排水条件が整っていなければ心土層に塩素イオンやナトリウムが残留する場合もある。

除塩を促進させるためには、除塩に必要な用水の確保ももちろんであるが、それ以上に農地の立地など排水条件の大小が大きく影響することが推察された。

水田の立地や周辺用の排水施設の整備状況による排水条件を考慮することで、適切な農地復旧工事及び除塩工事が実施できると期待される。さらに、除塩工事実施後の営農段階での適切な水管理により、被災農地の塩素だけでなく、ナトリウム含量も下げることができると考えられる。

### 参考文献

- 1) 千葉克己・加藤徹・富樫千之・冠秀昭 (2012)：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，農業農村工学会誌，80(7)，527-530.
- 2) Dobermann, A., Fairhurst, T. (2000)：Rice -Nutrient disorders & nutrient management-, Handbook series, Potash & Phosphate Institute (PPI), Potash & Phosphate Institute of Canada (PPIC) and International Rice Research Institute, 139-144.
- 3) 土壌環境分析法編集委員会 (1997)：土壌環境分析法，博友社，195-196, 202-219.
- 4) 復興庁 (2011)：各府省の事業計画と工程表のとりまとめ，2011年8月26日，  
<http://www.reconstruction.go.jp/topics/01%201%202set.pdf>  
(確認日：2013年1月10日)
- 5) 原口暢朗・友正達美・北川巖・若杉晃介・瑞慶村知佳・塩野隆弘・芦田敏文・中達雄・鈴木尚登 (2012)：津波・高潮により被災した農地，特に水田におけるかんがいによる除塩について，農業および園芸，87(1)，162-170.
- 6) 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：2012年11月29日)
- 7) 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，133, 48-53.
- 8) 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 (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，農工研技，213, 39-51.
- 9) 近藤始彦・曾根千晴・荒井(三王)裕見子・小林伸哉・高井俊之・岩澤紀生・吉永悟志 (2012)：作物の塩害の生理機構とその対策 (2) 品種・栽培管理対策，農業および園芸，87(2)，291-296.
- 10) McLeod, M. K., Slavich, P. G., Irhas, Y., Moore, N., Rachman, A., Ali, N., Iskandar, T., Hunt, C., and Caniogo, C. (2010)：Soil Salinity in Aceh after the December 2004 Indian Ocean tsunami, *Agricultural Water Management*, **97**, 605-613.
- 11) 宮城県 (2011)：東日本大震災に伴う農作物の技術情報 (第2報) - 海水等流入水田における対応等 -，2011年4月12日，  
<http://www.pref.miyagi.jp/uploaded/attachment/66554.pdf>  
(確認日：2012年11月30日)。
- 12) 宮城県 (2012a)：東日本大震災の津波被害に対する農地復旧の見込みについて，2012年4月26日，  
<http://www.pref.miyagi.jp/press/pdf/120426-8.pdf>  
(確認日：2012年10月20日)。
- 13) 宮城県 (2012b)：津波被災農地における除塩後の水稲栽培の留意点について，2012年3月26日，  
<http://www.pref.miyagi.jp/uploaded/attachment/66552.pdf>  
(確認日：2012年11月30日)
- 14) Nakaya T., Tanji H., Kiri H., 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** (2), 159-165.
- 15) 日本土壌協会 (2012)：土壌診断と作物生育改善，41.
- 16) 農業農村工学会 (2010)：改訂七版農業農村工学ハンドブック本編，84.
- 17) 農林水産省 (2011)：津波により流出や冠水等の被害を受けた農地の推定面積，2011年3月29日，  
<http://www.maff.go.jp/j/press/nousin/sekkei/pdf/110329-02.pdf>  
(確認日：2013年1月17日)
- 18) 下瀬昇 (1963)：作物の塩害生理に関する研究 (第1報)，日本土壌肥科学雑誌，34(4)，107-110.
- 19) 亘理町 (2011)：農地の除塩工事について，2011年10月17日，  
<http://www.town.watari.miyagi.jp/index.cfm/7,18164,90,137.html>  
(確認日：2012年11月28日)
- 20) 山元町 (2012)：農地の復旧及び除塩工事に係る開催報告，2012年6月1・4日，  
[http://www.town.yamamoto.miyagi.jp/san-ken/nouti\\_fukyuu.html](http://www.town.yamamoto.miyagi.jp/san-ken/nouti_fukyuu.html)  
(確認日：2012年11月28日)。
- 21) 山内益夫・前田吉広・長井武雄 (1989)：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，日本土壌肥科学会誌，58(5)，591-694.

## **Sodium and Chlorine Content in Rice Paddy Soils and Tsunami Deposits One Year after the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake**

ZUKEMURA Chika, KITAGAWA Iwao, TOMOSHO Tatsumi and SAKATA Satoshi

### **Summary**

The 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake and the ensuing tsunami caused severe damage to large areas of agricultural land in Miyagi prefecture. One year after the disaster, the focus is shift-ing to the removal of salt from rice paddy soils whose drainage facilities have been fully repaired. The aims of salt removal works in Miyagi prefecture are electric conductivity of  $<0.3$  mS/cm and chlorine content of  $<1000$  mg/kg. Although salt removal works do not target sodium, it affects rice yields. Ac-cordingly, we analyzed the physicochemical properties of tsunami deposits, sea sands and rice paddy soils 13 months after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake and found that salt removal works reduced chlorine content and the exchange sodium percentage (ESP). In rice paddy land with good drainage, chlorine content and ESP were reduced even without salt removal works. In contrast, in rice paddy land with poor drainage, chlorine content and ESP were not reduced by either rain or salt removal works.

**Keywords :** Tsunami-inundated rice paddy, salt damage, salt removal, sodium, chlorine, drainage