

## WG4 津波による塩害並びに水害廃棄物に関する調査研究

研究テーマ	研究者名	ページ
津波による塩害被災土壌の化学的特徴と除塩対策	(株)エイト日本技術開発 岡山大学大学院 今田真治 諸泉利嗣	1
津波による塩害被災と除塩状況を指標植物から探る	岡山大学大学院 岡山大学大学院 沖 陽子 中嶋佳貴	10
水害廃棄物の発生量推計と処理対策	岡山大学大学院 藤原健史	16

## 津波による塩害被災土壌の化学的特徴と除塩対策

(株)エイト日本技術開発 今田 真治  
 岡山大学大学院環境生命科学研究科 諸泉 利嗣

### 1. 津波堆積物による塩害被災土壌の化学的特徴と対策

#### 1.1 はじめに

農林水産省の報告<sup>i)</sup>によれば、東日本大震災で23,600 haの農地が津波による流出や冠水の被害を受けている。

津波によるガレキの流入や農作物の流出など直接的な被害が発生していない農地でも、海水の冠水の影響で土壌中に塩分が過剰に存在すると、土壌溶液の浸透圧が増加して、植物の根の吸水機能の低下や植物体外への水分流出が起こり、水分不足（生育障害）となって植物が枯死する可能性がある。さらに海水が土壌中に浸入すると、土壌の単粒化や緊硬度を高め、土壌の透水性が著しく低下し、排水不良による作物の根腐れが発生する懸念がある。

これらを踏まえ、農林水産省では除塩の作業手順や技術的な留意事項等について整理して、平成23年6月に「農地の除塩マニュアル」<sup>ii)</sup>として公表している。

本研究では、津波堆積物による塩害被災土壌の化学的特徴と対策について、同マニュアルを含め既往の文献調査を行った。

#### (1) 岡山地域における被害予測

図-1に岡山県の主要農地の一つである児島湖周辺の干拓地周辺の標高区分図を示す。児島湖周辺の干拓地及びその周辺は標高1~2m程度の平坦な低地が広がり、笹が瀬川周辺では局所的に標高0mのエリアが存在している。

図-2に示す岡山県危機管理課が公表する「岡山県津波浸水予測図」<sup>iii)</sup>によれば、この低地には南海トラフ巨大地震発生の際、2~3m程度の津波浸水被害が想定されている。また、同資料によれば、岡山県東部の笠岡湾干拓地でも5m以上の津波被害予測が示されている。また、津波ではないが、瀬戸内海においては平成16年台風16号により高潮による塩害が発生している。

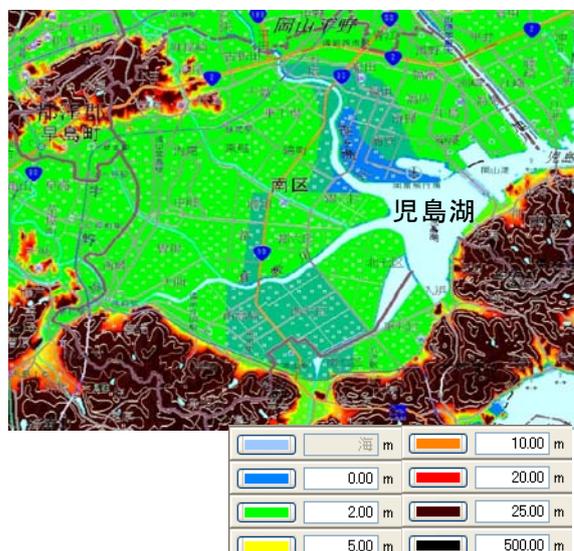


図-1 児島湖周辺の地形区分図  
 (国土地理院電子国土データをカシミール 3D  
 (<http://www.kashmir3d.com>)を用いて図化)

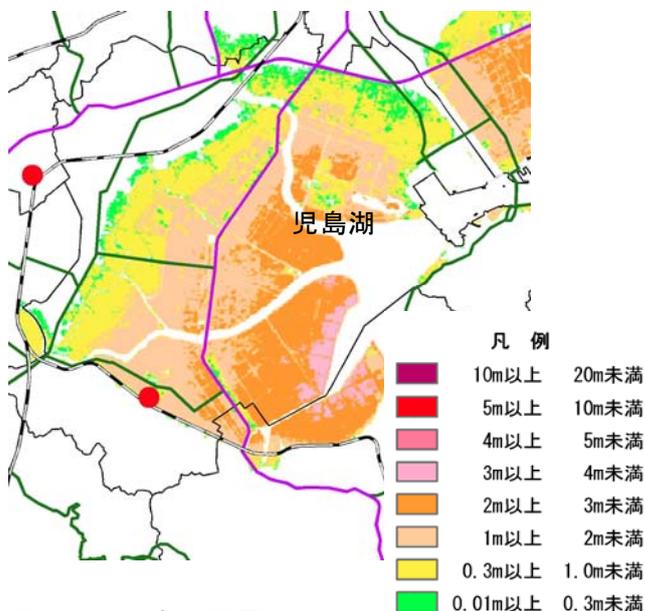


図-2 児島湖周辺での  
 津波被害想定

#### 1.2 東日本大震災被災地での除塩研究事例

##### (1) 津波堆積物の化学的特徴

研究の一環として東日本大震災被災地で調査された津波堆積物の化学的特徴について文献による事例収集を行った。

東北大学南條教授による報告<sup>v</sup>によれば、仙台平野における津波堆積物には以下の様な特徴が見られたと報告されている。

- ・仙台平野の海岸沿いでは4～5 km 内陸まで津波が到達した。被災した箇所では、場所により大きく異なるが、建築破砕物、樹木、その他の瓦礫が見られた。
- ・瓦礫類は次第に除去された後、夏には特に内陸側で雑草が繁茂していた。
- ・内陸部の水田の津波堆積物は、0～20cm 程度堆積しており、最表層は泥質物でその下に砂質物があるという規則性が認められた。
- ・この泥質物は、浅海堆積物を起源とするものと津波の影響により海岸付近の水田から浸食された作土を起源とするものとの2つが考えられる。
- ・泥質堆積物の表面に見られる塩類の結晶を電子顕微鏡と X 線回折法で調べると、塩化ナトリウムの立方体状の結晶の他に、棒状の石こう（硫酸カルシウム）の結晶が確認された。石こうは水田土壌に多く存在しているカルシウムが、海水中のナトリウムイオンと交換し、海水中の硫酸イオンと反応して生成されたものと推察される。土壌中に交換性ナトリウムが過度に存在すると、粘土鉱物や腐植は集合体から次第にバラ

バラの状態に変わり、多量の水があると濁り水になりやすく、乾くと土壌固結が顕著となり、多くの作物の生育も悪くなりがちとなる。ただし、津波堆積物中のナトリウム濃度はこの状態に近いものが認められたが、その下の土壌の交換性ナトリウムの増加はわずかであった。

- ・水田土壌の電気伝導率(EC)は津波堆積物の EC の数分の 1 以下であった。畑地で透水性の高い土壌では、被災後数百ミリ程度の降雨を受け、作物生育可能な程度まで EC が低下しているところもある。津波堆積物のうち砂質堆積物では EC の低下傾向がある。

また、東京農業大学後藤逸男教授らの報告<sup>v</sup>によれば、津波被害を受けた農地に堆積した津波堆積物の電気伝導率(EC)は 12～24mS/cm であり、多量の交換性マグネシウムとカリウム、可給態ホウ素が含まれていた。加えて、津波堆積物には、1%程度の全イオンが含まれていることから、長期的に土壌が酸性化する可能性が指摘されている。

農村工学研究所北川主任研究員らの報告<sup>vi</sup>でも、津波堆積物の pH は一時的に高い値(アルカリ側)を示しているが、過酸化水素を用いた pH 試験(pH(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>))が低いことから酸性硫酸塩土に分類

表－1 宮城県福島県内の農地での津波堆積物の化学的特徴(文献-vi より抜粋)

	非被災農地	被災農地(被災 3 ヶ月後)		農作物への影響
	表層土壌	泥質堆積物(ヘドロ)	堆砂	
pH(H <sub>2</sub> O)	5.0～6.1	5.7～7.0	5.6～7.9	※pH(H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> )が低く、被災農地は今後酸性化する
pH(H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> )	5.0～5.3	2.3～5.5	3.9～7.0	
EC(mS/cm)	0.08 程度	3.6～14.1	1.0～9.5	塩害発生の目安 水稲:0.3～0.7 以下
Cl-(mg/kg)	12～17	6361～95233	1320～22235	塩害発生の目安 水稲:500～1000 野菜:4000～1500
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/kg)	49～75	679～12680	109～4152	記載なし
0.1N 可溶性 Zn (mg/kg)	4.7～5.5	2.9～41.6	0.7～13.9	畑作物野生育の適正範囲の目安 2～40 →被災農地ではやや高い
0.1N 可溶性 Cu (mg/kg)	4.1～4.6	0.4～6.0	20.4～4.8	畑作物野生育の適正範囲の目安 0.5～8.0 →被災農地ではやや高い
0.1N 可溶性 Cd(mg/kg)	0.10～0.18	0.19～0.75	0～0.30	0.3 未満ではリスクが低い

されることから、長期的には酸性化を呈すると考えられ、EC 塩害発生の目安となる 0.7ms/cm を超える値(3.6~14.1ms/cm)であったとしている。また、Cl<sup>-</sup>イオンの濃度は塩害発生の目安(水稲:500~1000、野菜:4000~1500mg/kg)を大きく超える値(最大 95233 mg/kg)であったとしている。

一方、亜鉛、銅、鉛については、ほぼ農作物の適正範囲であったと示されている。(表-1)

## (2) 塩害対策の例

### 1) 東北農政局による報告<sup>vii</sup>

東北農政局が宮城県名取市で実施した津波堆積物を撤去した農場における除塩実証実験では、水田では暗渠未使用の場合でも最大 0.24% (2400ppm)であった塩素濃度が 2 回の除塩作業(湛水~排水)により塩分濃度を目標値(0.1%)以下に低下させることができたことが報告されている。

また、降雨は除塩を促進するものの、ほ場条件によりその効果にはバラツキがあることから、土壌中に残留した塩分を確実に除去するためには人為的な除塩作業が必要であるとしている。

畑においては予め耕起し、ほ場の排水を良好に保つことにより、一定のかん水量(雨量換算 180mm)で当初 0.4%程度あった土壌中の塩素濃度が 0.03%以下に低下できることが明らかとなり、降雨により除塩効果が促進されたと報告されている。ただし、この実証実験が行われた農地の表層はいずれも砂質土であり、粘質土系土壌の耕作地と比較すると除塩効果が得られやすかった可能性もあるとされている。また、土壌中に残留した塩分は、表層に比べ下層の塩分濃度が高い傾向にあるため、除塩の必要性を評価する場合には作土層深部についても塩素濃度を測定する必要があるとしている。

### 2) 農村工学研究所による報告<sup>viii</sup>

農村工学研究所瑞慶村研究員らの報告によれば、亘理町の水田を対象とした検討において以下のとおり示されている。

水稲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、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。

このため、塩害土壌中のナトリウム濃度を評価する必要があるが、土壌 EC を目標値として除塩を行った場合でも、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確認された。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。

立地や暗渠の施工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。

堆積した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ことが確認された。

ただし、「農地の除塩マニュアル」では、海水に含まれるナトリウムイオンの影響で土壌がナトリウム粘土化し、土壌構造の単粒化や固結化などの進行により、土壌の透水性が著しく低下している場合は、石灰質資材を散布し、悪化した土壌の物理性を改善した上で除塩することを提唱している。

### 1.3 岡山地域における作物の耐塩性

香川県による資料<sup>ix</sup>に示される作物ごとの耐塩性に関する資料を表-2に示す。

岡山県の主要な農産地である児島湖周辺の干拓地では、水稲のほか、全国 13 位<sup>x</sup>の生産量を誇るナス(千両ナス)などが栽培されている。

表-2を参考にすれば、ナスの土壌中の Cl<sup>-</sup>濃度 50~60mg/100g(500~600mg/kg、すなわち 0.05~0.06%)を目安とし、用水中の Cl<sup>-</sup>濃度は 300ppm 以内とされている。文献<sup>vii</sup>を参考とすれば、この 60mg/100g という値は、津波堆積物の除去を行った後、雨量 180mm 程度のかん水を行う程度で十分にクリアできる濃度である。なお、岡山気象台観測の平年の降雨量観測値<sup>xi</sup>は 1100mm 程度であり、180mm は約 2 ヶ月程度の雨量となる。

また、文献<sup>vi</sup>に示される畑における塩素濃度と電気伝導率の関係では下式の通りとなっている。

$$\text{塩素濃度 } Cl^{-}(\%) = 0.16 \times EC(\text{ms/cm}) - 0.03$$

ナスの塩害発生時の塩素イオン濃度 Cl<sup>-</sup>を 60mg/100g とすると、上式より EC は 0.56(ms/cm) 程度となる。

実際の現場においては、測定が簡易に行うことが可能である電気伝導率による塩分濃度管理を行っていくことも考えられる。

ただし、児島湖周辺の干拓地では、図-3に示す通り、表層を除けば透水性の低い粘性土が厚く堆積している。このため、文献<sup>vii</sup>の条件よりも排水性が劣ると考えられるため、暗渠などの併用

が必要と考えられる。

表-2 作物ごとの耐塩性 (文献-ix より抜粋、原典は熊本県資料)

分類	作物名	土壌中 Cl mg/100g	用事中 Cl ppm
弱	メロン	40～50mg を目安	200ppm 以内を目安
	イチゴ・インゲン・ニンジン	40～50mg を目安	210ppm 以内を目安
	レタス	104.160mg 不可	210ppm 以内を目安
中	タマネギ	100mg でも健全	250ppm 以内を目安
	トウガラシ・サツマイモ・ソラマメ・バレイショ・ショウガ・ゴボウ・エンドウ	50～60mg を目安	250ppm 以内を目安
	ナス	品質では 50～60mg を目安	300ppm 以内
	アオジソ	50mg 以下を目安	170ppm で障害
強	ハウレンソウ	100mg を目安	300ppm 以内を目安
	キャベツ	120mg を目安	300ppm 以内を目安
	スイカ・カボチャ・サトイモ・トウモロコシ	60～70mg を目安	300ppm 以内を目安
	トマト	70～100mg 以下を目安	300ppm 以内を目安
	ブロッコリー	90mg 以下を目安	210ppm 程度
	アスパラガス	90mg 以下を目安	300ppm 程度
	ダイコン	150mg 以下を目安	300ppm 程度
	ネギ	150mg 以下を目安	700ppm 程度
極強	ハクサイ	150mg 以下を目安	300ppm 程度
	ササゲ	80～90mg を目安	350ppm 以内を目安
	ダイズ	90～110mg を目安	同上



深度(GL-m)	土質
0.0～0.45	埋土(真砂土)
0.45～1.5	粘土
1.5～12.25	シルト質粘土
12.25～14.7	粘土
14.7～15.45	砂質粘土
15.45～17.75	砂

図-3 児島湖周辺(興陽高校周辺：赤丸)での調査ボーリング結果(深部を省略)

「おokayama 全県統合型 GIS の地盤情報」より引用

#### 1.4 被災農地の塩分管理のためのモニタリング技術

被災農地のモニタリングをスムーズに行うための手法についての文献資料を以下に示す。

##### (1) 電磁探査法による農地の塩分測定技術

(独)農業・食品産業技術総合研究機構により公表されている「農業の震災復興に向けた提言(第2版) xii」では、電磁探査装置を持ち、ほ場内を歩くことにより、ほ場の塩分分布を測定し、GPS 情報との併用により農地の面的な塩分分布を測定する技術が紹介されている。この手法自体は地盤の比抵抗を直接測る電気探査などと比較すると精度は下がるが、簡易に実施できることから、水源開発や法面調査などに利用されている手法と同様なものである。

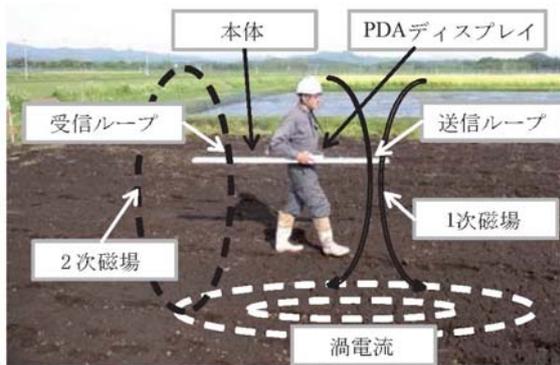


図-4 測定の概要(文献-xii より引用)

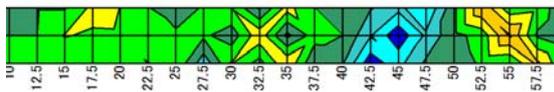


図-5 測定例

## (2) 現場で実施可能な簡易土壤塩分測定技術

「農業の震災復興に向けた提言(第2版)」では、海水浸水農地の簡易な土壤塩分測定法として市販の土壤 EC センサが利用の紹介している。土壤 EC センサは、ペースト状か湿潤状態の土壤を圧密して測定すると測定値が安定する。土壤 EC センサ測定値から慣行法へ読み替えて除塩の指標とする方法である。



図-6 測定の概要(文献-xii より引用)

### 1.5 まとめ

本研究では、津波堆積物による塩害被災土壤の化学的特徴と対策について既往文献の調査を行った。

その結果、以下のことが確認された。

- ・東日本大震災による津波堆積物は、作物に影響を及ぼす電気伝導率(EC)を呈し、多量の交換性マグネシウムとカリウム、可給態ホウ素が含まれていた。
- ・3ヶ月程度後の pH は問題なかったが、 $\text{pH}(\text{H}_2\text{O}_2)$  が高く硫酸酸性塩土に分類されることから、長期的な酸性化の懸念がある。
- ・水田では湛水～排水を繰り返すことにより、津

波堆積物の除去水稻の生育に支障のない程度の塩分濃度まで低下することができる。

- ・ナスを例に取れば、速やかに津波堆積物の除去を行った上で、排水性を確保することにより、2ヶ月程度のかん水により生育に支障のない程度の塩分濃度となる。

(今田 真治)

## 2. 数値シミュレーションを用いた津波による塩害被災土壤の除塩対策

### 2.1 はじめに

津波によって被災した塩害土壤に対しては、「農地の除塩マニュアル」<sup>ii</sup>等をもとに、現地土壤に適したな除塩対策を確立することが重要である。低コストで最適な除塩対策を立てるためには、現地調査、要素試験により塩害被災土壤の特性を精査するとともに、数値モデルを用いてリーチング水量やリーチング期間、暗渠間隔及び暗渠埋設深などを予めシミュレーションしておくことが有効な手段となる。

農地の除塩対策には、農地に湛水した水が降下浸透した際に土壤中の塩分を下方に押し流すことにより除塩する方法(縦浸透法)と、土壤中の塩分を湛水中に溶出させ落水する方法(溶出法)がある。そこで、津波による塩害被災土壤に対して、縦浸透法と溶出法の効果を数値シミュレーションを用いて検討した。また、津波による土壤の塩害化プロセスを明らかにするために、津波による土壤への海水浸入過程および海水浸入終了後の塩類集積についても同時に明らかにした。

### 2.2 シミュレーションモデルの概要

土壤中の水分・溶質移動モデルとして公開されている汎用コードの中から、本研究では、HYDRUS を用いた。HYDRUS は、アメリカ農務省塩類研究所(U. S. Salinity Laboratory)において開発され、現在はカリフォルニア大学リバーサイド校において改良が続けられている不飽和土壤中の水分・化学物質・熱移動プログラムである。農耕地への適用だけでなく、農耕地以外の対象(例えば、廃棄物処分場、核廃棄物地層処分等)においても多数の適用実績がある。HYDRUS には2次元および3次元のバージョンもあるが、本研究では無償で利用することができる1次元のHYDRUS-1Dを用いた。

#### (1) 共通の計算条件

湛水による土壤への海水浸入、海水浸入後の塩

類集積、除塩方法等、検討項目によってシミュレーションの条件は異なるが、共通の計算条件は以下の通りである。

### 1) 土壌水分特性

土性はシルト質粘土ロームとした。これは、笠岡湾干拓地で多く見られる土性と同じである。

土壌水分保持曲線および透水係数のモデルパラメータは、HYDRUS に実装されているデータベースよりシルト質粘土ロームに対応する van Genuchten パラメータを用いた。本研究で用いた土壌水分保持曲線を図-7に示す。

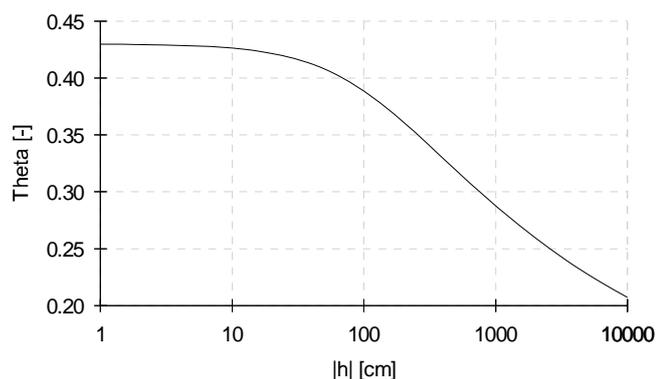


図-7 土壌水分保持曲線

### 2) 溶質移動特性

海水中には様々な化学物質が含まれているが、ここでは主成分である塩化ナトリウムのみが含まれていると仮定した。また、海水濃度は約3% ( $0.53 \text{ mmol cm}^{-3}$ ) とした。

溶質移動特性として、分散長は  $1 \text{ cm}^{\text{xiii}}$ 、水中での分子拡散係数は  $1.75 \text{ cm}^2 \text{ day}^{-1}$  とした。

### 3) 初期条件

津波湛水による海水浸透時における土壌水分の初期条件は圃場容水量 ( $-1,000 \text{ cmH}_2\text{O}$ ) とし、除塩開始時の初期条件は土壌全層が海水で飽和されているものとした。また、土壌中の塩濃度の初期条件は、海水浸透開始時はゼロとし、塩類集積および除塩シミュレーションでは土壌全層が海水濃度に等しいとした。

### 4) 境界条件

既に述べたように、上端の境界条件は、湛水による土壌への海水浸入、海水浸入後の塩類集積、除塩方法等、検討項目によって異なるため、当該シミュレーションの項目で述べることとする。

下端の境界条件は、深さ  $200 \text{ cm}$  の位置に地下水面があるとした。これは、国土交通省が岡山市にある沖新田北東で観測している金岡東 No.2 の2012年の平均地下水位 ( $-263 \text{ cm}$ ) を参考に設定

した。2012年の月平均地下水位と降雨量の変化を図-8に示す。5月の地下水位が約  $-550 \text{ cm}$  と他の月に比べて非常に低いのは、降水量が少なかったことに加えて灌漑水として用いられていたためであると考えられる。6月および7月には、梅雨時で降水量が多かったため地下水位は回復している。

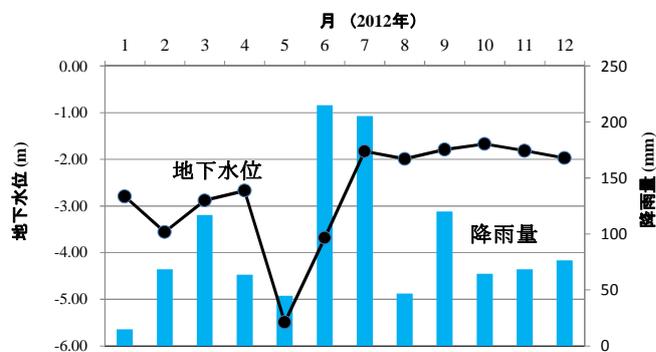


図-8 地下水位と降雨量の変化 (金岡東 No.2)

## 2.3 シミュレーションとその結果

### (1) 海水浸入過程と塩水集積

#### 1) 海水浸入過程

東日本大震災クラスの津波の場合、津波高さは数m～数十mに及ぶが、この高さのままで農地に長時間湛水するケースはそう多くはないと考えられる。そこで、湛水深を  $50 \text{ cm}$  と仮定し、これをシミュレーションの上端境界条件とした。

次に、湛水期間をどの程度とるのが問題となる。湛水期間は、地形によるところが大きいと考えられるが、排水施設の能力にも左右される。東日本大震災の場合は、5日間程度<sup>xiv</sup>から数100日程度<sup>xv</sup>と様々である。本研究では、湛水期間を60日間と仮定してシミュレーションを行った。

結果を図-9に示す。深さ  $40 \text{ cm}$  の塩分濃度は約10日ほどで海水と同じ濃度となった。この深さは、普通畑の主要根群域に相当する<sup>xvi</sup>。また、深さ  $200 \text{ cm}$  での塩分濃度変化より、全層が海水濃度

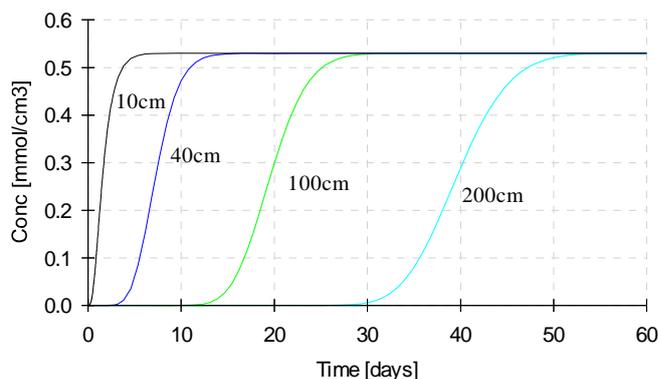


図-9 海水湛水による塩分濃度の経日変化

と同じになるのは湛水開始から 50 日後であることが分かる。

## 2) 塩類集積過程

津波による海水湛水の終了後に除塩対策を行わなかった場合に、土壌面蒸発による塩類集積がどのように進行するかを検討した。上端境界条件となる土壌面蒸発強度は、山本の研究成果<sup>xvii</sup>を参考に、 $2.5 \text{ mm day}^{-1}$ とした。

シミュレーション結果を図-10、図-11に示す。地表面の塩分濃度は、湛水終了後 10 日ほどで急激に上昇し、10~20 日にかけて  $6.5 \text{ mmol cm}^{-3}$  前後となった。20 日以降は徐々に低下していった。これは、地表面濃度の急激な上昇により、地表面濃度とそれより深い位置での濃度との間に深さ方向に向かう濃度勾配ができたため分子拡散により深さ方向に塩が拡散移動したためと考えられる。ま

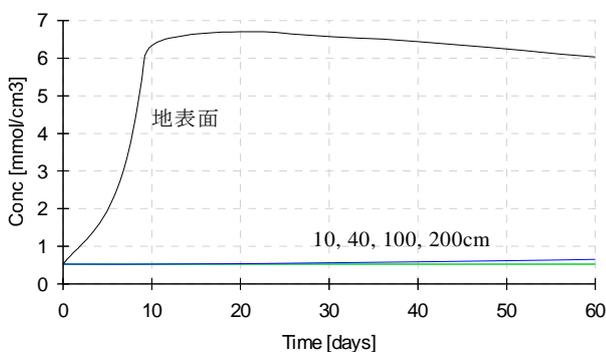


図-10 海水湛水終了後の塩分濃度変化

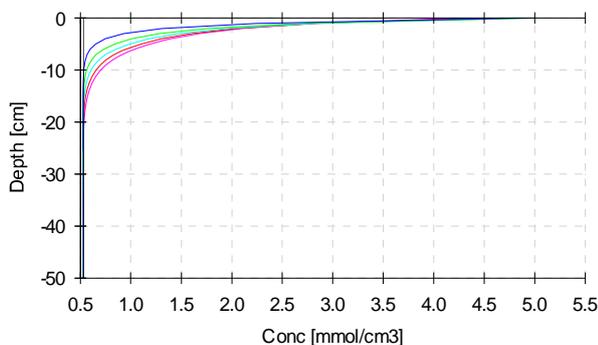


図-11 海水湛水終了後の塩分濃度プロファイル

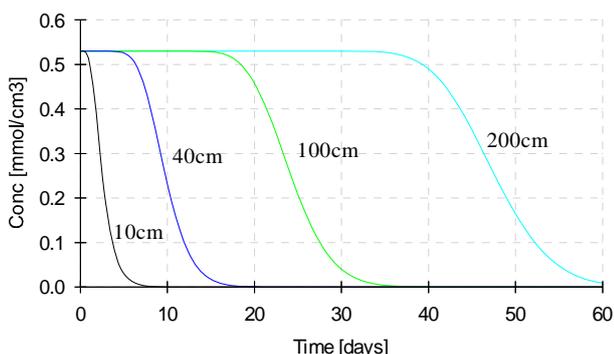


図-12 縦浸透法による塩分の濃度の経日変化

た、深さ 10 cm 以深では、60 日経過後も海水濃度のままであり、塩類集積は深さ 20 cm よりも浅い層で主に生じることが分かる (図-11)。

## (2) 除塩対策

縦浸透法、溶出法のいずれの場合も、除塩に必要な用水は、耕起した土壌の表面が完全に水没するまで湛水させるものとして、その 1 回の湛水量は代かき用水量相当とされている<sup>ii</sup>。そこで、本研究では湛水深を 15 cm とした。

### 1) 縦浸透法

湛水期間を 60 日としたときの土壌中の塩分濃度変化を図-12に示す。深さ 10 cm の塩分は 10 日までに、ほとんど洗い流されている。また、根群域の末端である深さ 40 cm では、20 日までに塩分濃度はゼロとなっている。全層で塩分濃度がゼロとなるのは 60 日後であることが分かる。

ここでは、下端の境界条件は深さ 200 cm の位置に地下水面があるとしてシミュレーションを行っているが、深さ 200 cm に暗渠があると仮定して計算した結果も図-12とほとんど同じとなった。

深さ 50 cm に暗渠がある条件でシミュレーションした結果を図-13に示す。深さ 40 cm の塩分濃度は約 13 日後にはゼロとなり、深さ 200 cm に案強がある場合よりも 7 日程度速く除塩が可能となる。したがって、迅速な除塩を行うためには、通常の暗渠と同じように、深さ 50 cm 前後に暗渠を施工することが有効であると言える。

### 2) 溶出法

60 日間湛水させ続けた場合の塩分濃度変化を図-14に示す。水中での濃度は、約 8 日後にピーク ( $7.6 \text{ mmol cm}^{-3}$ ) を迎え、その後徐々に低下し、60 日経過時には  $5.7 \text{ mmol cm}^{-3}$  となった。これは、分子拡散により水中での濃度が一様に向かったためであると考えられる。土壌中の深さ 10 cm の濃度は徐々に上昇し、 $3.3 \text{ mmol cm}^{-3}$  でほぼ平衡状態となった。また、40 日以降は、水中およ

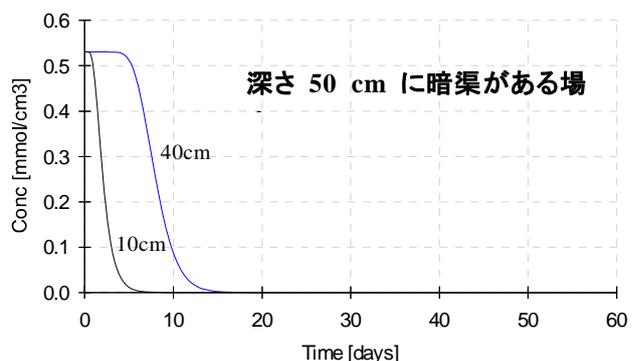


図-13 縦浸透法による塩分の濃度の経日変化

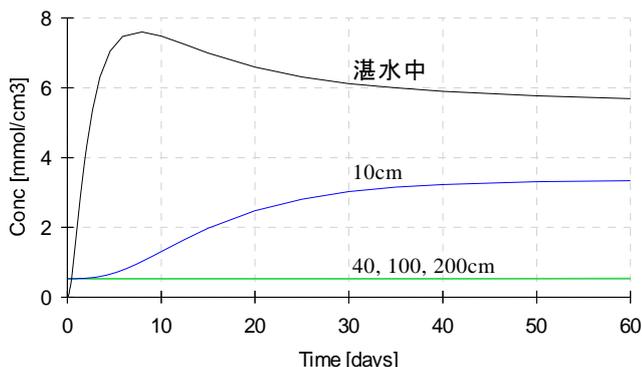


図-1-4 溶出法による塩分の濃度の経日変化

び土壌の各深さでの濃度がほぼ平衡状態になっていることから、除塩を促進させるためには、水中濃度がピークを迎える8日までに塩分を含んだ湛水を一旦排水し、新たな淡水を農地に導入することが必要である。これは、侵出法は、塩分濃度の高い土壌から濃度が低い湛水中へ分子拡散により塩が移動するメカニズムに基づく方法であるからである。

### (3) 自然環境下での除塩過程

前述した除塩方法は灌漑用水を必要とするが、津波災害の場合、用・排水路が破壊され、灌漑水を農地に導水できない事例が報告されている<sup>xiv</sup>。そこで、自然の降水のみによる除塩の効果を検討した。岡山市における2012年の日降水量を上端境界条件として与えた。また、蒸発散量は海水浸入過程の場合と同じ $2.5 \text{ mm day}^{-1}$ とした。

シミュレーション結果を図-1-5に示す。深さ10 cmの塩分濃度は200日までにほぼゼロとなった。深さ40 cmの濃度は200日前後で急激に低下し、最終的に初期濃度の1/10以下となった。また、100 cm以深では濃度の低下はほとんど無かった。

図-1-6は、深さ50 cmに暗渠を施した場合の結果である。図-1-5と比較すると、180日ほどで深さ40 cmの塩分濃度はほとんどゼロとなり、暗渠の効果が認められる。これより、暗渠の施工は、自然の降雨を利用する場合においても縦浸透法の場合と同様に、重要であることが明らかとなった。

## 2.4 課題

### (1) 除塩対策の前に必要なこと

縦浸透法、溶出法のいずれの方法も対象となる農地に大量の灌漑水を導水し、大量の水とともに土壌中の塩類を農地外に排出することが基本となる。そのため、その実施にあたっては、用水路と排水路が必要となる。しかし、例えば東日本大震

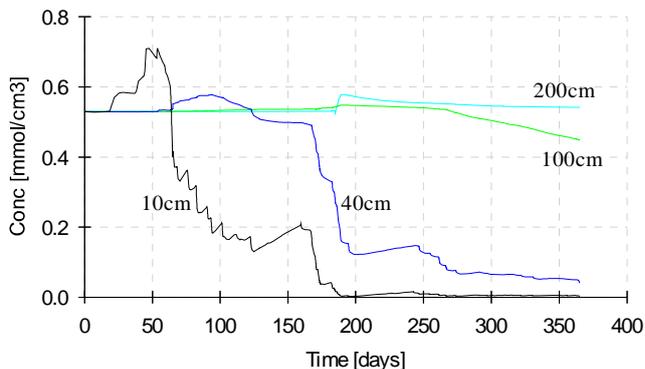


図-1-5 降水による塩分の濃度の経日変化

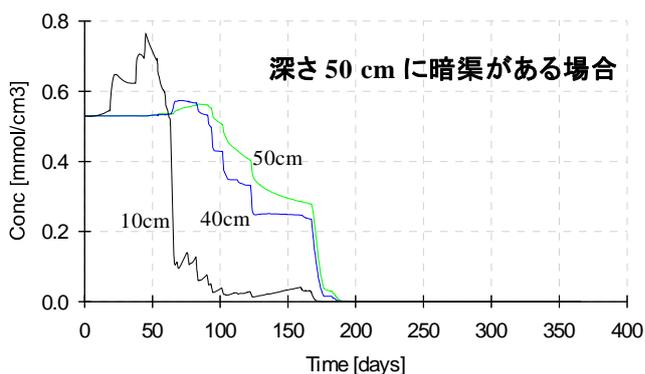


図-1-6 降水による塩分の濃度の経日変化

災では、排水機場などの主要な排水施設が甚大な被害を受けたため排水機能の著しい低下が生じた。このような状況では、ほとんどの津波被災農地は排水施設が復旧するまで除塩が実施できない状況であった。

縦浸透法と溶出法の実施にあたっては、用排水路施設の確保または速やかな復旧が重要である。

### (2) 数値シミュレーション

今回のシミュレーションは鉛直1次元で行った。その結果は単位面積当たりとして考えられることができる。例えば、暗渠に関しては単位面積当たりとして解釈できる。しかし、実際の農地では、暗渠は一定の間隔で施工されるのが一般的であるため2次元以上の数値モデルでシミュレーションを行い、暗渠の埋設深さに加えて、埋設間隔も検討することが重要である。図-1-7は、2次元モデルを用いて作成した圃場スケールにおける有限要素メッシュと暗渠間隔および暗渠埋設深を示している。あらかじめ暗渠間隔や暗渠埋設深を変えてシミュレーションすることで、低コストで最適な除塩対策のより精密な立案が可能になる。

また、今回は除塩用水および地下水面は塩分を含まないものとしてシミュレーションを行ったが、実際の除塩用水や地下水は真水ということはありません、いくらかの塩を含んでいる。こうした塩を

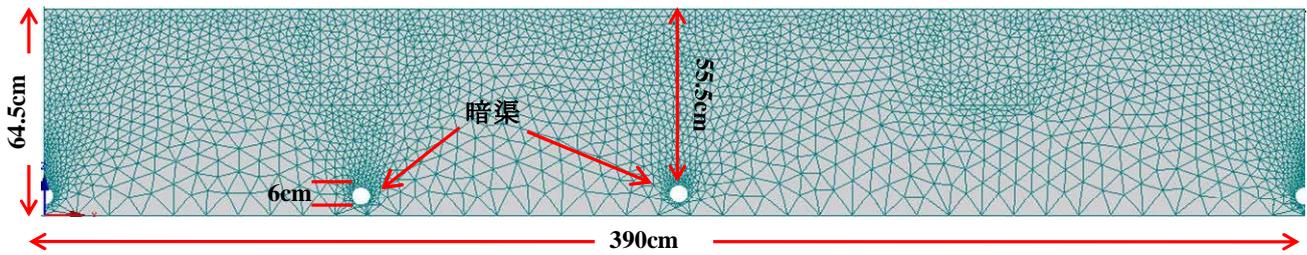


図-17 圃場スケールにおける FEM メッシュと暗渠間隔および埋設深

考慮した場合、除塩にかかる期間は若干長くなると考えられる。

(諸泉 利嗣)

<引用文献>

- i 東日本大震災（津波）による農地の推定被害面積 平成 23 年 3 月 農林水産省統計部農村振興局 <http://www.maff.go.jp/j/tokei/saigai/pdf/shinsai.pdf>
- ii 農地の除塩マニュアル 平成23年3月 農林水産省 <http://www.maff.go.jp/j/press/nousin/sekkei/pdf/110624-01.pdf>
- iii 岡山県津波浸水想定について 岡山県危機管理課 <http://www.pref.okayama.jp/page/329011.html>に  
加筆
- iv 農地土壌に対する東日本大震災の影響と対策 東北大学 南條正巳 <http://www.agri.tohoku.ac.jp/agri-revival/ocu6bi0000002cz-att/a1322803240058.pdf>
- v 東日本大震災における津波被災農地の塩害対策 東京農業大学後藤逸男他 [http://www.academy.nougaku.jp/annual%20report/kaiho16/10\\_rondan.pdf](http://www.academy.nougaku.jp/annual%20report/kaiho16/10_rondan.pdf)
- vi 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 北川巖他 農工研技報 213 p.39～51, 2012 [http://www.naro.affrc.go.jp/publicity\\_report/publication/files/213No4.pdf](http://www.naro.affrc.go.jp/publicity_report/publication/files/213No4.pdf)
- vii 農地の除塩現地実証試験の結果について 平成 23 年 3 月 東北農政局 <http://www.maff.go.jp/tohoku/press/seibi/bousai/110929.html>
- viii 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 瑞慶村知佳他 農工研技報 214 p. 9～16, 2013 <http://www.maff.go.jp/tohoku/press/seibi/bousai/110929.html>
- ix 農地への海水の流入が農作物に及ぼす影響とその対策 平成 16 年 12 月香川県農業経営課 <http://www.pref.kagawa.jp/agrinet/files/saigai/engai.pdf>
- x 岡山県農林水産部ホームページ <http://www.pref.okayama.jp/page/detail-26752.html>
- xi 岡山県の気象年報平成 25 年岡山地方气象台 <http://www.jma-net.go.jp/okayama/guide/geppo/npo25.pdf>
- xii 農業の震災復興に向けた提言(第 2 版)「復興を支える新技術」平成 25 年 4 月(独)農業・食品産業技術総合研究機構 [http://www.naro.affrc.go.jp/disaster/files/disaster\\_teigen\\_2012.pdf](http://www.naro.affrc.go.jp/disaster/files/disaster_teigen_2012.pdf)
- xiii 中村公人・取田伸夫, 形態変化を 1 次反応式により考慮した土中の窒素移動モデル, 土壌の物理性, 105, 83-97, 2007.
- xiv 千葉克己・加藤徹・富樫千之・冠秀明, 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(農業農村工学会誌), 80(7), 527-530, 2012.
- xv 国土交通省東北地方整備局, 東日本大震災における活動記録(報告)～全国からの排水ポンプ車や TEC-FORCE の応援が貢献～, <http://www.thr.mlit.go.jp/bumon/b00037/.../H231202houkoku.pdf>, 2011 (参照日: 2014/8/20).
- xvi 農林水産省構造改善局, 土地改良事業計画設計基準計画「農業用水(畑)」, (社)農業土木学会, 1997.6.
- xvii 山本将也, 岡山県 3 河川流域における実蒸発散量と水収支の推定, 岡山大学環境理工学部環境管理工学科卒業論文, 77p, 2006.

## 津波による塩害被災と除塩状況を指標植物から探る

岡山大学大学院環境生命科学研究科 沖 陽子  
岡山大学大学院環境生命科学研究科 中嶋佳貴

### 1. はじめに

東日本大震災が発生してはや3年半が過ぎ去った。2011年3月11日に発生した東日本大震災では、農林水産業関係にも大きな被害が生じ、太平洋沿岸地域を中心に2万ha以上の農地が津波による冠水や流失等の被害を受けた。海水は約3.5%の塩分を含んでおり、津波で冠水した農地では塩害が問題となった。現在まで、灌水による除塩対策等が行われてきたが、除塩に必要な用水を確保するのが困難な地域もあり、他の方法による除塩対策が望まれており、その一つに植物を利用した除塩対策が考えられる。

これまで耐塩性に関する研究は多く行われているが、Naを対象とした塩類集積土壌のファイトレメディエーション技術の研究はあまり行われていない。今後、津波被災農地の除塩対策に植物を利用するに当たり、耐塩性が強く、またNa吸収能の大きな植物を選抜する必要がある。そこで、植物の耐塩性等に関する既往の研究から、津波由来塩害地の除塩に利

用できる植物の検討を作物、飼料作物及び雑草別に行う。そして、それらの植物の中から指標植物として活用可能な草種を選抜する。また、選抜種の耐塩性や好塩性を検証することにより、岡南地域において津波による塩害被害が生じた場合の指標植物への可能性並びに除塩効果を検討し、その活用に向けた提言を行う。

### 2. ファイトレメディエーションとは？

植物を用いた環境修復技術はファイトレメディエーションと呼ばれ、その機能からphytoextraction（除去）、phytotransformation（分解）、phytovolatilization（拡散）、phyto-stabilization（固定）及びphytostimulation（分解）の大きく5つに分けられる。これら5つの手法のうち、塩類や重金属、放射性物質を対象とした場合に有効な手法はphytoextractionとphytostabilizationである。

高橋ら（1998）が行ったNaの有用性に関する研

究の結果から、塩害農地のphytoextractionに利用できる植物を推測し、それらを中心に、過去に行われた耐塩性等に関する研究から、塩害農地のphytoextractionに適する植物の検討を行った（表1）。

塩害農地のphytoextractionに利用できると思われる植物は、イネ科の大麥、イタリアンライグラス、ローズグラス及びトウモロコシ、アカザ科植物、アブラナ科植物、キク科のヒマワリである。特に、アカザ科植物は好塩性作物の一種であるテンサイや塩生植物のアッケシソウを含み、極めて耐塩性が強く、Na吸収能も大きいことから、塩害農地のphytoextractionに有効であると考えられる。アブラナ科植物は、比較的速やかに地上部へのNa移行が行われるため塩害農地のphyto-extractionに適すると考えられるが、作物種間及び品種間に差がみられること、葉菜類は害徴が生じやすいことから、事前に適切な作物及び品種の選抜試験を行う必要がある。キク科植物は地上部へのNa移行抑制によって耐塩性を獲得しているためphytoextractionに適さないと考えられるが、ヒマワリは高収量を見込めるため、利用できる可能性はある。雑草はNaの吸収あるいは地上部への移行を抑制することによって耐塩性を獲得しているものが多いと思われることから、塩害農地のphytoextractionに利用することは難しいと思われる。ただし、ギョウギシバは系統によって利用できる可能性があり、ヨシも塩害被害が生じた場合の指標植物への可能性が高く、研究対象として興味のある草種となる。なお、表1においては、雑草の除塩への利用可能性は不可とされているが、筆者らはギョウギシバのようなC<sub>4</sub>植物においては、十分に可能性はあると考えている。

そこで、塩生植物であるアッケシソウ群落と耐塩性の高い中生植物であるヨシ群落が混成する錦海塩田跡地を対象に、その土壤環境における塩分濃度と両草種の生育状況の検証調査を実施したので、その結果を次項で報告する。

表—1 津波由来塩害農地の除塩に利用できる植物

	科名	植物名	耐塩性	除塩への 利用可能 性	備考
作物	イネ科	大麦	強	○	
	アカサ科	テンサイ (サトウダイコン)	極めて強	◎	
		アッケシソウ	極めて強	◎	
	アブラナ科			△	・事前に適切な作物及び品種の選抜試験が必要
	キク科		比較的強	×	
飼料作物	イネ科	トウモロコシ	中程度	○	
		イタリアライグラス	極めて強	○	・飼料として利用する場合は注意が必要
		ローズグラス	強	○	・飼料として利用する場合は注意が必要
	キク科	ヒマワリ	中程度	○	
雑草	イネ科	ヨシ	強	×	
		キョウキシハ	強	×	・系統によっては利用できる可能性がある
	キク科	モギ	中程度	×	

### 3 塩田跡地に自生するヨシとアッケシソウの指標植物としての可能性

#### 3.1 はじめに

ヨシ(*Phragmites communis*)は日本の湖沼や河川下流域の沿岸帯において、最も一般的にみられる多年生の大型抽水雑草である。ヨシは多少の塩分環境にも耐えることができる耐塩性機構を有していることが知られている。本研究では、塩田跡地に自生する耐塩性を有するヨシ群落と好塩性を有する塩生植物のアッケシソウ(*Salicornia herbacea*)群落下の土壌環境を比較することで、両草種が形成される土壌環境を把握し、塩分濃度等の生物指標として活用する可能性を検討した(増田ら, 2014)。

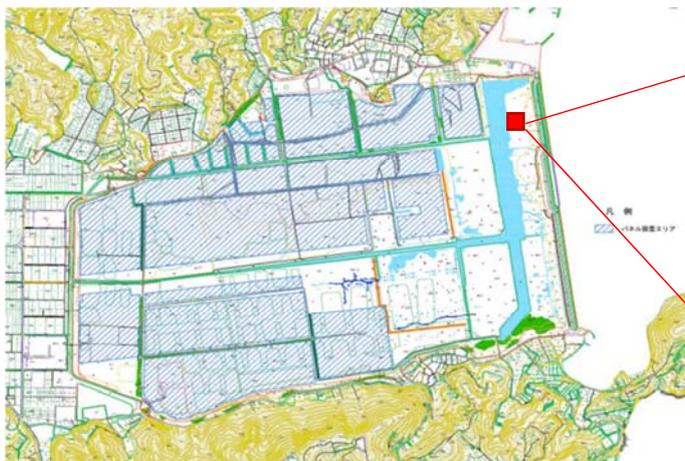
#### 3.2 調査地点および方法

図—1に示す錦海塩田跡地内(岡山県瀬戸内市

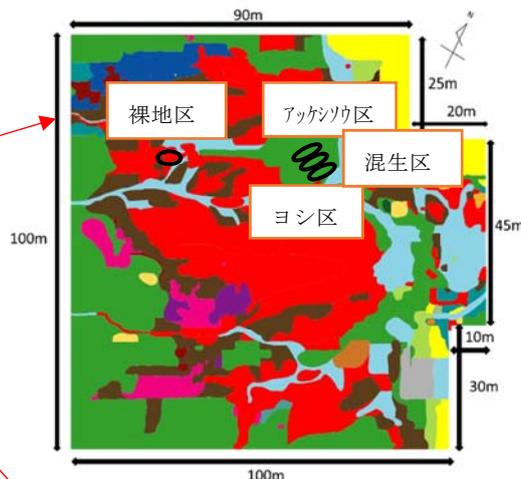
牛窓町)において、隣接するヨシ群落(以下ヨシ区)、ヨ

シ・アッケシソウ混生群落(以下混生区:写真—1)、アッケシソウ群落(以下アッケシソウ区)および裸地(以下裸地区)の4調査区を設定し(図—2)、植物体調査および土壌環境調査を実施した。土壌表面積400cm<sup>2</sup>(20cm×20cm)、土深10cmの直方体の土壌ブロックを2013年11月21日に採取し、土壌および植物体のサンプリングを実施した。各々3反復とした。植物体についてはヨシおよびアッケシソウの草高、地上部および地下部別現存量の測定と共に、ヨシの稈数とアッケシソウの個体数も測定した。土壌環境については土壌ブロックを0~3cm層(以下表層)、3~6cm層(以下中間層)、6~10cm層(以下下層)の3層に分割し、各々含水比と酸化還元電位を測定した。さらに土壌:水=1:5の

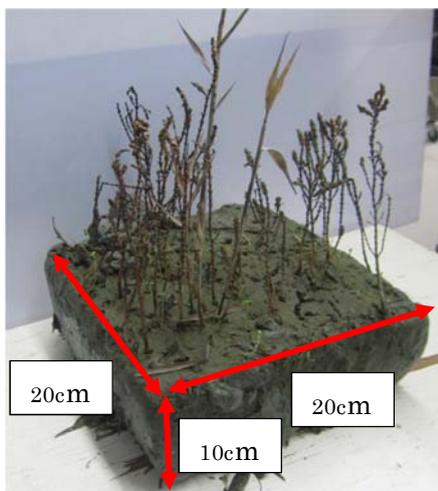
土壌溶液を作成し pH, EC, 塩分濃度を測定した。



図—1 錦海塩田跡地(岡山県瀬戸内市)  
(出典：錦海塩田跡地活用基本計画 瀬戸内市)



図—2 調査区域植生分布図



図—3 土壌のサンプリング方法



写真—1 ヨシ・アッケシソウ混生群落  
(2013年8月1日撮影)

### 3.3 結果及び考察

ヨシ区におけるヨシの平均草高は 29.1cm, 平均地上部現存量は 210gDW/m<sup>2</sup>であった。同時期の児島湖人工干潟内におけるヨシ群落の平均草高は 200cm, 平均地上部現存量は 659gDW/m<sup>2</sup>であり, 塩田跡地内のヨシは著しく生育が制限されていることが明らかとなった(表—2)。一方, 図—4に各調査区の深度別ヨシ生存地下茎の現存量を示し

た。それによると, ヨシ区の下層で生存地下茎の分布が確認されたことなどから, ヨシは下層の塩分濃度が低い土壌において地下茎を形成し, 生育することが示唆された。また, 土壌ブロックの土壌塩分濃度は裸地区では 0.53~0.69%, 他の植生がある 3 調査区では 0.18~0.29%の範囲であった(図—5)。そして, ヨシ区における下層の塩分濃度は 0.20%とアッケシソウ区の 0.24%よりも有意

に低い( $P < 0.05$ )ことが明らかになった。一方、ヨシ区とアッケシソウ区の酸化還元電位を比較すると中間層( $p < 0.05$ )および下層( $p < 0.001$ )において

有意差が生じた。このことからヨシは比較的還元状態の土壤に地下茎を分布することが認められた。

表-2 錦海塩田跡地および児島湖人工干潟におけるヨシ地上部現存量の比較

調査地	調査区	茎部	葉身部	花部	新芽		枯死部	合計 (gDW/m <sup>2</sup> )
					茎部	葉身部		
錦海塩田	ヨシ区	54.48±9.02	1.25	—	9.06±5.96	0.80±0.39	144.60±36.21	210.19
	混生区	16.61±6.59	—	—	8.13±5.62	1.88±1.06	29.29±10.15	55.90
児島湖	人工干潟	403.53±139.79	100.53±40.37	26.59±20.03	11.31±10.48	5.97±4.57	111.34±55.58	659.27

注1) 児島湖人工干潟内での植生調査は2013年11月13日に実施。

注2) —は3反復全て0gDW/m<sup>2</sup>であることを示す。

注3) 数値は3反復の平均±標準偏差。ただし、現存量が0gDW/m<sup>2</sup>の場合はそれを除く平均(±標準偏差)を示す。

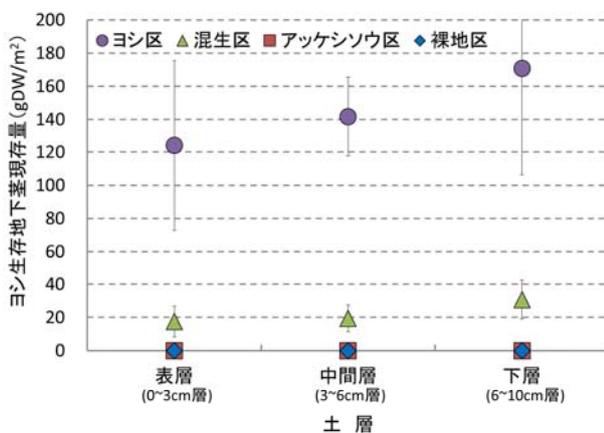


図-4 各調査区の深度別ヨシ生存地下茎の現存量

注) 3反復の平均値および標準偏差(エラーバー)を示す。

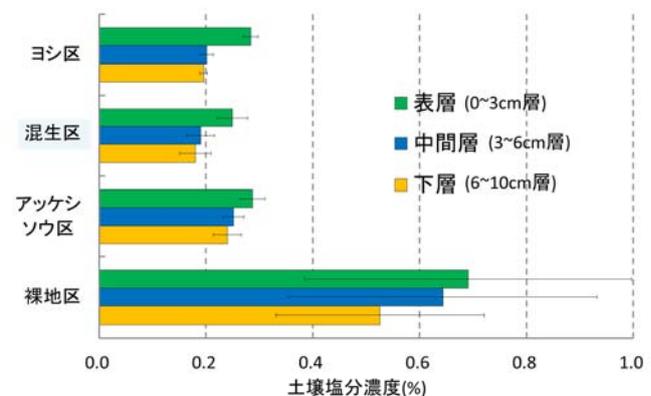


図-5 各調査区における土壤塩分濃度の比較

注1) 3反復の平均値および標準偏差(エラーバー)を示す。

注2) 土壌:水=1:5の土壌溶液を作成し、塩分濃度を測定した。

#### 4. まとめ

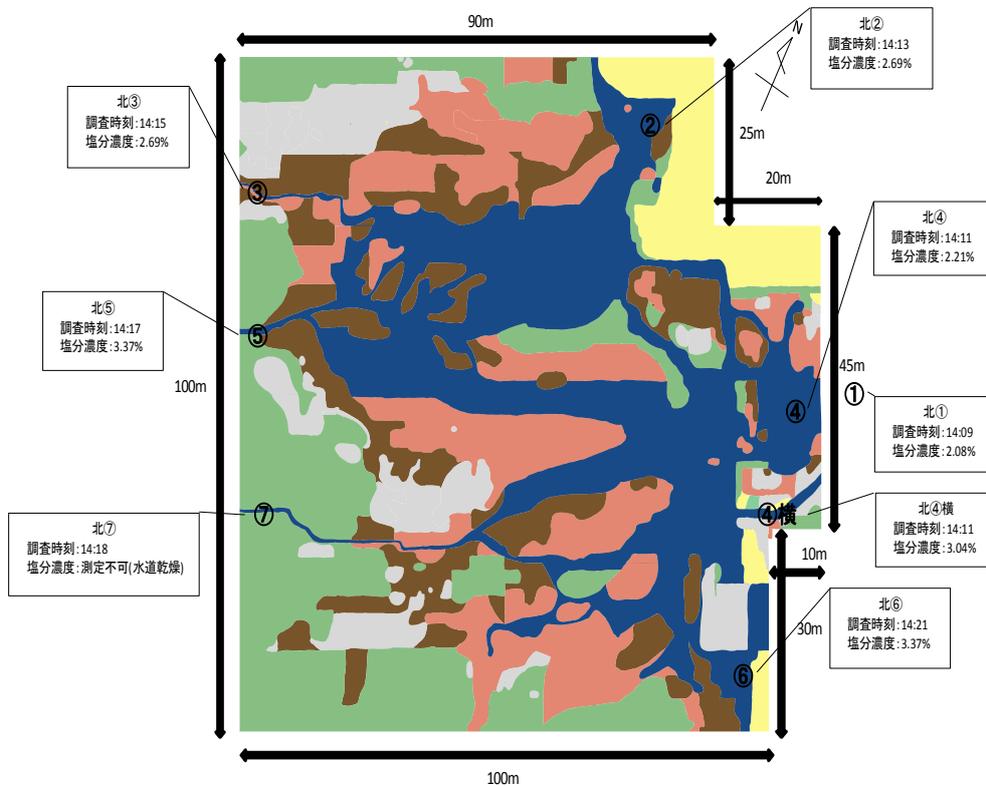
以上の結果から、錦海塩田跡地に自生するヨシは、塩分が含まれない児島湖人工干潟に生育するヨシと比較して、土壤塩分の影響を受けて著しく生育が制限されることが把握された。すなわち、図-6に示した通り、防波堤から海水が滲出することにより、水道の塩分濃度が2.08~3.37%を推移する塩性湿地で育つヨシは、塩分が含まれない土壤で生育したヨシの地上部バイオマス量を100%とした場合の31.9%、混生区のヨシは8.5%しか茎葉部を生産していないことが把握された。また、草高は平常値の14.6%しかなく矮性化している。また、秋季になっても開花・結実が確認されず種子生産は不可能であることが把握された。また、ヨシの地下茎の生育はアッケシソウの有無で大きく異なり、特に塩分濃度が低い下層に分布させることで、また還元が進んだ土壤でも中空の稈により地下茎に酸素を輸送することで、繁殖に

重要な地下茎の枯死を防ぐ適応戦略をとっているものと推察された。

立地条件としての土壤塩分濃度を層別に検討した結果、0~3cmにおける表層では、ヨシ区で必ずしも低濃度ではなく0.27~0.30%の値はアッケシソウ区と有意差が無かった。しかしながら、深度3~6cm並びに6~10cmにおいてのヨシ区は0.19~0.21%の範囲で、混生区はさらに低い0.15~0.22%であった。一方、アッケシソウ区の中間層と下層は0.21~0.27%の範囲であった。裸地区の表層が0.41~1.02%、中間層が0.37~0.95%、下層が0.35~0.73%であることを考えると、津波等の被災後にヨシ群落が確認された場合は、その時点で表層から深度10cmまでの土壤塩分は30~40%が除塩されていると推測できる。一方、塩生植物のアッケシソウについては図-5で示した値は小型の植物群落下のものである。生育晩期の11月では中型や大型植物も発生するが、それらの群

落下の土壤塩分濃度は表層から下層にかけて非常に低く、中型で0.07~0.10%, 大型で0.02%であ

った。この結果は土壤中の塩分がアッケシソウの成育中に吸収されたと推測されるが、さらに再調



図—6 現地水質調査 (2013年10月31日)

■ 水道      ■ アッケシソウ      ■ ヨシ  
■ セイタカアワダテソウ      ■ 裸地      ■ その他

注1) 図中の①~⑦および④横は水質調査地点を表す。  
 注2) 水道を最前面に配置し、不透明度100%で表示している。裸地は不透明度70%、その他の項目は不透明度50%で表示している。

査等が必要と考える。植物がNa濃度の高い土壤に生育する場合には、細胞質のNa濃度が高まらないようにする必要がある。そのために植物が取る手段としては、a) 根がNaの吸収を抑制する、b) 根が吸収したNaを再び根から排出するか、地上部の特定の組織から排出する、c) 根が吸収したNaを細胞の液胞中に隔離する、の3つが挙げられる。ヨシは淡水域から河口などの塩分濃度の高い汽水域まで分布する広塩性植物であるが、土壤溶液の塩分濃度の高いところでも、体内のNa濃度は低く抑えられている。このヨシに比べて耐塩性の劣るイネとヨシを比較したところ、ヨシではイネよりもNaの根への流入速度が小さく、地上部への移行

率も低いだけでなく、地上部のNaが根に再輸送されて排出され、地上部へのNaの集積が低く抑えられていることが報告されている。ヨシの根を代謝阻害剤で処理すると、吸収したNaの排出減少し、Naの吸収が著しく増加した。この結果から、ヨシにはエネルギーに依存したNa排出系のあることが示唆されている(高橋, 1989・1991)。

一方、塩生植物の浸透圧調節には、Naを吸収して浸透圧調節に利用する双子葉塩生植物と、Kによって浸透圧調節を行い、Naの吸収を抑える単子葉塩生植物の2種類がある。Naを吸収して浸透圧調節を行う双子葉塩生植物では、吸収したNaを液胞へ隔離して代謝が乱されないようにし、

細胞質にはベタインなど不活性な溶質を蓄積して液胞との浸透圧バランスを取っている（間藤，1997・侯野，1983）。以上の見解を踏まえた上で、

津波被災地の現場でいかに指標植物を活用するかを具体的に提言する。

## 5. 課題

指標植物を導入することは、津波被災農地における耐塩性の強い雑草の侵入及び繁茂を招くこともある。宮城県の農地を対象とした植生状況調査では、イヌビエやコウキヤガラ等耐塩性の強い雑草の侵入や優占が確認された。除塩作業を実施するまでの期間が長くなる可能性がある農地では、耐塩性植物以外の植物も徐々に再生してくることが予想される。そのため、農地復旧後の雑草管理を容易にする視点から、干拓地における植生遷移系列などと比較しながら、除塩作業に着手するまでの期間の植生管理（除草剤や耕起など）のあり方を検討する必要がある（嶺田・友正，2011）。今後、指標植物を用いた除塩実証試験を行い、被災農地の修復をより効果的に進めるマニュアルを整備することが望まれる。

## 6. 謝辞

本研究を実施するにあたり、岡山大学大学院環境生命科学研究科植生管理学分野の修士課程を修了した寺内綾香氏並びに修士課程在籍中の増田孝宏氏に多大の協力を得た。ここに心から感謝の意を表す。さらに、現地調査等でお世話になった植生管理学研究室の諸氏に謝意を表す。また、錦海塩田跡地を調査地として許可して頂いた瀬戸内市長に御礼申し上げる。

\*なお、アッケシソウ群落は絶滅危惧種Ⅱ類（絶滅の危険性が增大している種）であるので、留意していただきたい。

### <引用文献>

1. 高橋英一・前嶋一宏 1998. ナトリウムの有効性に関する比較植物栄養学的研究, 近畿大学農学部紀要 31, 57-72.
2. 増田孝宏・中嶋佳貴・沖陽子 2014. 塩田跡地に自生するヨシの適応戦略に関する基礎研究, 雑草研究 59 (別号), pp. .
3. 間藤徹 1997. 植物の耐塩性メカニズム, 植物の化学調節 32 (2), 198-206.
4. 但野利秋 1983. 作物の耐塩性とその機構, 化学と生物 21 (7), 439-445.
5. 高橋英一 1989. 作物における塩害発生の機構と耐塩性, 日本土壌肥料学会講演要旨集 (35), 201-202.
6. 高橋英一 1991. 植物における塩害発生の機構と耐塩性, 日本土壌肥料学会編「塩集積土壌と農業」, 博友社, 東京, pp.123-154.
7. 嶺田拓也・友正達美 2011年7月20日. 東日本大震災による津波被災農地の植生状況調査報告, [http://www.naro.affrc.go.jp/org/nkk/2011fukkoushien/fukkyuuhouhou/nouchi/syokusei\\_11070](http://www.naro.affrc.go.jp/org/nkk/2011fukkoushien/fukkyuuhouhou/nouchi/syokusei_11070).

## 水害廃棄物の発生量推計と処理対策

岡山大学大学院環境生命科学研究科 藤原健史

## 1. はじめに

日本は豪雨や洪水などの水害の多い国である。近年、ゲリラ豪雨のように、短時間で狭い範囲に多量の降水をもたらす集中豪雨が増えている。そのため高潮や洪水の危険性も増している。平成 23 年 3 月の東日本大震災では、津波による災害が大きく 2,802 万トンの災害廃棄物と 1,102 万トンの津波堆積物が発生した。同規模の巨大地震が南海トラフ沖で発生すれば、瀬戸内海沿岸部でも津波が押し寄せ、岡山市においては平均高さ 2m 程度の波が来ると予想されている。岡山市の平地面積が広いために津波による全壊・半壊家屋が発生し、床上・床下浸水も入れると大量の水害廃棄物が発生すると考えられる。その水害対策に関して、災害発生時に発生する廃棄物量を正確に予想することができれば、対策が円滑に進められ、都市復旧が早くなると考えられる。本研究では、岡山市の災害マップを利用して、GIS を援用しながら水害により被災する建築物を把握し、水害廃棄物の発生量を推計することを試みる。また、仮置場の適地選定や仮置場への輸送計画についても検討した。

## 2. 研究方法

本研究では災害マップと建物情報を重ね合わせ、被災家屋を選定し、発生量を推計する。次にその結果を活用し、仮置場設置候補地の選定を行う。最後に収集輸送の計画を立てる。

## 2.1 水害廃棄物発生量推計の流れ

まず以下の手順で発生量の推計を行う。

- 1) 洪水被災範囲の特定(災害マップ)
- 2) 建物情報の収集(基盤地図情報)
- 3) 被災範囲の一般住居の選定(GIS)
- 4) 原単位の変換
- 5) 原単位を用いて水害廃棄物発生量を算出

## 2.1.1 被災領域の特定

自治体が配布している防災マップを洪水発生時の被災範囲とし、水害廃棄物の発生量を推計する。防災マップにある深さ別の浸水範囲をもとに、災害廃棄物を推計する。

## 2.2.2 建物形状の収集

GIS を用いて、国土地理院が公開している建物外周線対象地域の建築物外周線のデータから、建物の棟数と建物ごとの建築面積を計算する。ここで外周線は全ての建築物について作成されており、住居タイプの区別はない。そこで、建築面積が 50～99m<sup>2</sup> の建物を一般住宅、178～228m<sup>2</sup> の建物を集合住宅と仮定する。表 1 に計算に使用した総務省統計局が発表している住宅・土地統計調査(H20)の値を示す。

表 1：岡山市の棟数、世帯数、世帯当たり面積

	棟数	世帯数	延べ床面積(m <sup>2</sup> )	建築面積(m <sup>2</sup> )
一般家屋	115,970	115,900	90.2	74.5
集合住宅	16,700	174,487	44.5	44.5

## 2.1.3 被災範囲の一般住居の選定

災害マップから得られる被災領域地図と、建築物の外周線データから得られる建物形状地図を GIS 上でまとめ、被災建築物の棟数と建築面積をカウントする。その結果、図 1 に示すように浸水深ごとの被災領域(ピンク、緑、黄色)と建築物の影が重なった地図ができる。GIS 上でその地図を 500m メッシュに区切ってカウントする。



図 1：災害マップと建築物外周線を重ねた地図

## 2.1.4 原単位の変換

水害廃棄物の発生量原単位として次の 2 種類を考える

1) 兵庫県原単位

岡山市は水害廃棄物発生量原単位を定めていないことから、(財)ひょうご震災記念 21 世紀研究機関)が定めている 1 棟当たりの排出量原単位を用いる。

2) 統計原単位

表 2 は兵庫県と岡山市の建築物についての全棟数、全世帯数、そして戸別の延床面積及び建築面積を表している。この建築統計を用いて次のように災害廃棄物発生量を求める。

- ① 一般家屋：建築物の建築面積から延床面積を推計し、それに延床面積当たりの災害廃棄物発生量を掛けて 1 戸からの災害廃棄物量を求める。
- ② 集合住宅：戸別建築面積と戸別延床面積は同じである。建築物の建築面積を延床面積と仮定してごみ量を求め、水深が 2m を超える場合には 2 階の 2 倍で考える。

表 2：岡山県と岡山市の建築統計

	棟数	世帯数	戸別延床面積 (m <sup>2</sup> /戸)	戸別建築面積 (m <sup>2</sup> /戸)
一般家屋	115,970	115,900	90.2	74.5
集合住宅	16,700	174,487	44.5	44.5

表 3：被害の規模ごとの水害廃棄物原単位

	浸水深 (m)	兵庫県原単位 (t/世帯)	岡山市原単位 (t/世帯)	岡山市原単位 (t/m <sup>2</sup> )
全壊	0-0.5	12.9	12.45	1.1153
大規模半壊	0.5-1.0	9.8	9.46	0.0876
半壊	1.0-2.0	6.5	6.27	0.0581
床上浸水	2.0-5.0	4.6	4.44	0.0411
床下浸水	5.0-	0.62	0.60	0.0055

2.1.5 水害廃棄物量の推計

一般家屋と集合住宅に分け、世帯数や棟数に着目して計算する方式 (方式 1) と、建築面積に着目して計算する方式 (方式 2) の両方で、水害廃棄物量を計算する。

一般家屋と判断される建築物について、(方式 1)、(方式 2) に係らず、浸水深ごとの水害廃棄物原単位を乗算して計算する。

集合住宅と判断される建築物について、(方式 1)

では階当たりの世帯数を掛けること、浸水深が 2m を超える場合は 2 階の世帯も浸水すると考える。

(方式 2) では、階段などの建築面積を引くこと、浸水深が 2m を超える場合は 2 倍ことを考慮する。

以上の条件を考慮し、浸水深ごとの水害廃棄物原単位は表 3 を用いて、水害廃棄物量を下のよう

① 一般住宅の発生量

(方式 1)=棟数(世帯)

×浸水深ごとの岡山市原単位 (t/ 世帯)

(方式 2)=建築面積 (m<sup>2</sup>)

×浸水深ごとの岡山市原単位 (t/ m<sup>2</sup>)

② 集合住宅の発生量

(方式 1)=棟数(棟)

×1 棟あたりの平均世帯数：10.44(世帯/棟)

÷1 棟あたりの平均階数：2.79(階/棟)

×岡山市原単位 (t/世帯)

×浸水する階数(階)

(方式 2)=建築面積 (m<sup>2</sup>)

×岡山市原単位 (t/ m<sup>2</sup>)

÷係数：(R=1.192)

×浸水深ごとの係数(1or2)

2.2 仮置場候補地選定の流れ

被災地から水害廃棄物を撤去する際に、それらを貯留・選別するための仮置場が必要となる。仮置き場は水害廃棄物の発生源に近いと便利である反面、仮置場で作業する重機の騒音や巻き上がる粉じんなど周囲に与える影響が大きい。そこで、仮置場を適正に配置することは大きな意味をもつ。

本研究では、被災地周辺の仮置場候補地として挙げられる場所を、種々の制約条件のもとでふるいにかき、絞り込んでいく。仮置場設置候補の検討手順を以下に示す。

- 1) 仮置場候補地区画の選定
- 2) 適正候補地による選定
- 3) 地図情報による選定
- 4) 許容量の計算

2.2.1 仮置場候補地区画の選定

まず仮置場を設置する可能性のある場所を区画で決定する。仮置場は被災現場から離れすぎるとアクセスが悪くなり、運搬車両が出す環境負荷も多くなるため、仮置場の候補区画はがれきが発

生した区画から 2km 以内に限定する。

### 2.2.2 適正候補地による選定

9 都県市廃棄物問題検討委員会による震災廃棄物の適正処理に関する調査報告書では、仮置場に適していない土地として、河川敷と山麓地域を挙げている。よって、国土地理院から入手した河川ベクトルデータ並びに山麓地域ベクトルデータに含まれる仮置場区画は除外する。

### 2.2.3 地図情報による選定

上記の調査報告書より、仮置場に適している場所として、住宅密集地域（特にオープンスペースである学校や公園）や空港跡地などが挙げられる。よって、学校や公園のある区画や、空港跡地などの面積が広く、環境への影響少なく、同意が得られやすい場所を ZENRIN の地図情報で調べ、仮置場区画として選定する。

### 2.2.4 許容量の計算

仮置場の候補とする学校校庭や公園敷地などはそれぞれ面積が異なるため貯留可能量が違ってくる。そこで、仮置場候補の敷地に沿ったポリゴンを形成して貯留可能量を計算する。

面積から貯留可能量を計算する方法として、得られた面積  $S$  (m<sup>2</sup>) と外周線の長さ  $l$  (m) を元に、容量  $V$  (m<sup>3</sup>) を以下の式で計算する。

$$V = \frac{Sl}{48} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{80}{l} \right)^3 \right]$$

この式では、堆積高さを 5m、法面勾配が 2 割（垂直高さ 1 に対して水平距離 2）となる矩形面積の仮置場を想定している。求められる容量に水害廃棄物の平均比重  $P=0.30$  (t/m<sup>3</sup>) をかけて、許容重量 (t) を求める。

## 2.3 収集輸送計画

水害廃棄物の発生場所と発生量、そして仮置場の場所と許容量から、最適な輸送先を計算する方法を与える。水害の発生した区画の廃棄物量 (t) と仮置場までの距離 (km) を掛け合わせた仕事量 (トンキロ) が最小となるように水害廃棄物の収集先と輸送先を決定する。その手順を以下に示す。

- 1) 収集先の選定
- 2) 支援システムの開発
- 3) 収集期間の推計

### 2.3.1 収集先の選定

発生した廃棄物をどこの仮置場に運搬するかについては、GAMS を用いて LP 問題として解く。

### 2.3.2 支援システムの開発

最適解に拘らず、がれき輸送の判断を迅速に行えるように、コスト最小となる仮置場候補を自分で探せる探索支援システムを作成する。これにより、自分が住んでいる場所を指定したときに、水害廃棄物をどこの仮置場に輸送すれば良いかが視覚的に分かるようになる。

### 2.3.3 収集期間の推計

推計結果を元に発生した廃棄物を全て仮置場に運搬するのに必要な日数を計算する。今回の計算では、発生区域につき 2t トラックを 5 台、5t トラックを 3 台ずつ割り当てるとし、運搬能力 ( $M=25t$ ) とする。また、積み上げ積み込み時間を ( $W=1.5h$ )、平均速度 ( $v=30km/h$ )、一日の作業時間 ( $W=8h$ ) とする。以下に推計式を示す。

$$U_{i,j} = \left\{ (2r_{i,j} \div v) + T \right\} \times \frac{m_{i,j}}{WM}$$

$U_{i,j}$  :  $i$  で発生した廃棄物を  $j$  に輸送し終わるまでの日数

$m_{i,j}$  :  $i$  で発生した廃棄物を収集し  $j$  に輸送する量 (t)

$r_{i,j}$  :  $i$  から  $j$  までの距離 (km)

$U_{i,j}$  が最大となる値を求め、発生水害廃棄物を収集し終わるまでの期間とする。

## 3 研究結果と考察

### 3.1 水害廃棄物発生量の推計結果

外周線と災害マップ、水害発生物発生量原単位によって導かれた結果を表 4 に示す。世帯ベースの計算では面積ベースの計算に比べて大きな値となった。

岡山市の発表している「平成 23 年度一般廃棄物処理実地計画」によると、平成 23 年に岡山市内で発生した一般廃棄物量は 240,926 トンとなっている。本研究において、世帯単位で計算した発生量であれば一般廃棄物量の 38% に相当し、面積単位で計算した発生量であれば、65% に相当する。このことから、一度の洪水で多くの廃棄物が発生し、通常の廃棄物処理では対応しきれないことが分かる。

次にこれらの廃棄物を処理するのにかかる日数を計算した。計算には、岡山市が発表している「岡

山市一般廃棄物（ごみ）処理基本計画」に記載された値を利用する。それによると、岡山市の一般廃棄物の処理能力は 260,610 (t/年) であり、そのうち 201,480 (t/年) が通常ごみの処理量であることから、差の 59,130 (t/年) が災害廃棄物の対応分となる。

水害廃棄物発生量を、災害廃棄物の対応処理能力で割ることで処理にかかる年数を計算すると、世帯単位の発生量は 10.8 年で処理することになり、面積単位の発生量だと 6.4 年で処理することになる。

表 4：各区の水害廃棄物発生量推計

	住宅数 (棟)	面積(m <sup>2</sup> )	世帯ベース発生量 (t)	面積ベース発生量 (t)
北区	31,595	2,781,179	235,095	136,955
中区	19,543	1,686,247	169,930	102,700
東区	13,069	1,173,659	130,160	74,936
南区	21,653	189,376	105,934	63,882
合計	85,860	5,830,461	641,120	378,473

### 3.2 仮置場候補地選定の結果

選定を行い、仮置場設置候補地の選定を進めた。その結果、廃棄物が発生する区画が 1,201 箇所、発生した場所から 2km 以内を対象とした候補地 2,078 箇所となった。ここから適正值選定により 470 箇所に絞り、最後に地図情報による選定で 65 箇所(オレンジ色)が残った。それらの結果を図 2 に示す。

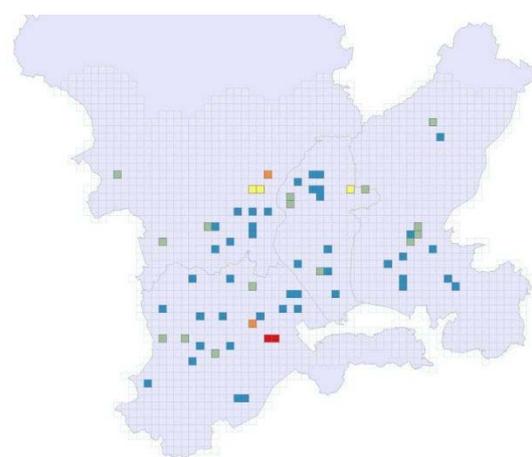


図 2：仮置場 65 箇所の許容量 (t) による色分け

### 3.3 収集輸送計画

発生区画と、仮置場区画それぞれに ID をつけ、その ID を検索することで、どこの仮置場にどれだけ運搬することで、コストが最も小さくなるのかを表示するようにした(図 3)。分散率とは持ち込み先候補ごとに、発生総量から何%持って行くのかを表したものである。

発生源ID	777 (入力: 1~1201)		
持ち込み先候補	1	2	3
持ち込み先ID	38	39	-
分散率	87%	13%	0%

図 3：支援システムの結果

また、道路線を利用した収集経路を図 5 に示す。



図 4：777 区画で発生した廃棄物を 739 区画と 744 区画に運搬する経路

## 4 終わりに

本研究では、災害マップをもとに水害廃棄物の

発生量を推計し、それを仮置場に運ぶための最適な収集輸送を計算するための支援システムの開発を行った。岡山市では災害マップに示される水害が発生した場合、世帯単位で計算すると 641,120 トン、面積単位で計算すると 378,473 トンの水害廃棄物が発生することとなり、それらの水害廃棄物の発生分布を GIS 上で示すことができた。2つの推計値に大きな差が出たことは、原単位のとり方や計算方法の違いに基づくが、推計精度については他の計算手法も比較しながらさらに深く検討する必要がある。

収集輸送に関しては、岡山市において各仮置場に 2 トントラック 5 台、5 トントラック 3 台で作業を行うとすると、全ての発生区画から水害廃棄物を仮置場に運ぶまでに、最小でも 185 日かかることがわかった。

自治体が配布している防災マップや、基盤地図情報、延べ面積などの統計値といった、誰でも入手できる情報から一般廃棄物量の推計手法を確立したことが、本研究の成果といえる。

今後の改善点としては、本研究手法において、自治体ごとに差があることにより発生する誤差を修正することである。災害発生から時間が経過すると、発生した水害廃棄物の量が確定する。確定した水害廃棄物の発生量と本研究手法によって推計された発生量の間で、およそどれくらいの差があるか確認を行い、今後の推計に活かしていくことが必要である。

## 参考文献

- 1)国土交通省 水害対策を考える  
[http://www.mlit.go.jp/river/pamphlet\\_jirei/bousai/saigai/kiroku/suigai/suigai\\_3-3-2.html](http://www.mlit.go.jp/river/pamphlet_jirei/bousai/saigai/kiroku/suigai/suigai_3-3-2.html)
- 2)平山修久、島岡隆行、藤原健史、岡山朋子 (H21.3) : 災害廃棄物フローを考慮した大規模水が時における水害廃棄物処理計画策定手法の開発 平成 20 年度調査報告書  
島岡隆行、山本耕平 (H21.3) : 廃棄物資源循環学会シリーズ③ 災害廃棄物
- 2)国土交通省国土政策局国土情報課 GIS ホームページ 国土数値情報ダウンロードサービス :  
<http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/index.html>
- 3)環境省 水害対策廃棄物対策指針  
[http://www.env.go.jp/press/file\\_view.php?serial=6839&hou\\_id=60593](http://www.env.go.jp/press/file_view.php?serial=6839&hou_id=60593) e-Stat 政府統計の総合窓口 :

<http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/eStatTopPortal.do>

4)岡山市 公式ホームページ :

<http://www.city.okayama.jp/>

5)兵庫県農政環境部環境部環境管理局 築谷尚嗣 廃棄物資源循環学会シリーズ 3 災害廃棄物 豪雨災害により発生する廃棄物の処理 6) 国土交通省国土政策局国土情報課 GIS ホームページ 国土数値情報ダウンロードサービス :

<http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/index.html>

7) 株式会社ゼンリンホームページ :

<http://www.zenrin.co.jp/>

8)岡山市 岡山市一般廃棄物 (ごみ) 処理基本計画 :

[http://www.city.okayama.jp/kankyoku/kankyousoumu/kankyousoumu\\_t00015.html](http://www.city.okayama.jp/kankyoku/kankyousoumu/kankyousoumu_t00015.html)

9)岡山市 建築行政年報 :

[http://www.city.okayama.jp/toshi/.../kenchikudou\\_00081.htm](http://www.city.okayama.jp/toshi/.../kenchikudou_00081.htm)

10)国土交通省 主要都市の不動産市場基本データ :

<http://tochi.mlit.go.jp/chiiki/cities/index.html>

11)震災廃棄物の適正処理に関する調査報告書

[http://www.re-square.jp/data/1211\\_03\\_08.html](http://www.re-square.jp/data/1211_03_08.html)

12)九都県市廃棄物問題検討委員会 :

<http://www.re-square.jp/data/index.html>

13)内閣府防災情報のページ :

<http://www.bousai.go.jp/>

14)Net science :

<http://www.hulinks.co.jp/netscience/software/GAMS/index.html>