

ハイパースペクトルに基づく植生の塩分ストレス評価

Salt stress evaluation on vegetation based on hyperspectral data

宇都 有昭†

Kuniaki Uto

齊藤 秀武†

Hidetake Saito

小杉 幸夫†

Yukio Kosugi

1. まえがき

自然環境の中で栽培される農作物は、四季の気候の影響で、その収量や食味が影響を受けることは言うまでもないが、台風や洪水、津波といった自然災害は、時として農作物の生育に致命的な被害を与えることになる。このような農作物に与えられる被害を定量的に観測することは、被害を最小限に抑えるための技術の選択に有効な情報を与えるのみならず、不条理な形で発生する被害への補償を公平に実施するための基礎資料を作成する手段としても、広範囲にわたって迅速な観測が求められている。本論文では、ハイパースペクトル観測によってこのような自然災害を受けた農作物の被害を定量的に観測する手段を開発するための基礎データを得ることを目的としている。

2011 年 (平成 23 年) 3 月 11 日 14 時 46 分 18 秒 (日本時間)、宮城県牡鹿半島の東南東沖 130km の海底を震源とした東北地方太平洋沖地震に伴い発生した大津波により、東北・関東の 6 県において太平洋沿岸市町村の農地の 40% が被害を受け、23,600ha の農地が流失または冠水しており、農業部門の被害額は 6000 億円を超えている。海水が引いた後も農地の土壌中には過剰な塩分が残り、排水性の低下や還元化が起き、塩害によって作物は水分不足、養分の吸収阻害を受けるため、農地の塩害により廃業を余儀なくされている農家も出ている。

これを受け、農林水産省は 3 年後の完了をめどに瓦礫の撤去や土中の塩分の除去を進め、正常な土壌へ戻す方針を固めた。農地の塩害対策の進め方に関しては、まず対策が必要な圃場の把握のために、冠水した圃場を特定した上で EC メータを用いて EC 値を測定する。そして基準値 (0.3~0.6mS/cm) 以上の圃場に対して耕起、湛水作業、代かき作業、静置、排水を行い、再び EC 値を測定し、基準以上の圃場には再び先ほどの 5 行程を繰り返すこととなる [1]。しかし、EC メータによる土壌中の EC 値測定には多くの手順を必要とし、広域情報を取得することは困難である。

そこで本研究では、リモートセンシング画像に基づき、迅速に広域の土壌塩分濃度分布の推定を行い、農業の状態管理技術として利用することを目的とした基礎的データ取得および解析を実施する。

土壌中の硝酸カリウム濃度は 2,450-2,470nm 付近の吸収と相関があること [2] から、光学リモートセンシングによる土壌中塩分濃度推定の可能性が示されている。しかしながら、[2] で想定している土壌中塩分濃度が被災地における土壌濃度と比較して非常に高濃度である点、さらに土壌中の水分が排除されている点を考慮すると、光学リモートセンシングデータに基づく被災地の土壌中塩分濃度推定は困難

であることが予想される。そこで、本論文では、土壌中塩分によるストレスが植生に与える影響に着目し、土壌中塩分濃度と植生ハイパースペクトルデータの関係の解析をおこなう。

本論文では、2 節において被災地において実施した土壌中塩分濃度調査の結果、3 節で示される塩分ストレスの再現実験により得られた植生のハイパースペクトルに基づき、4 節において塩分ストレスによるスペクトル特徴の推移を解析した。

2. 津波被害における土壌塩分濃度調査

異常気象による農作物への被害が単年度に限定されることに比し、津波によってもたらされる塩害は、土壌中の塩分濃度が低下しない限り、場合によっては複数年に亘って、その被害が継続し、農業生産へ深刻な被害をもたらすため、被害地域の土壌塩分量計測および塩分の除去が不可欠である。本節では、2011 年東日本大震災の津波による農地の塩分濃度調査結果を示す。

2.1 土壌塩分調査

東北地方太平洋沖地震の発生に伴う大津波は、宮城県亘理町荒浜 [3] の海湾で約 7.7m に達した。亘理町は水はけのよい沿岸部でのイチゴ栽培で知られていたが、亘理管内のイチゴ栽培施設 380 戸のうち 95% の 356 戸において、大津波によって畑やビニールハウスが流されるなど倒壊・冠水するという壊滅的な被害を受けた。

津波による農地の被害範囲が最も広がった宮城県亘理郡亘理町にて、2011 年 7 月 15~17 日と 9 月 11 日の 2 度にわたりイチゴ圃場 16 カ所、砂浜 1 カ所、それぞれ 3~5 地点の土壌サンプル (表面 1cm および深さ 10cm) の採取、農業用水である地下水の塩分濃度測定を実施した。

本研究では、日本土壌肥料学会の定める測定プロトコル [4] に準拠して、以下の方法で塩分測定及び、EC 値測定を行った。

1. 採取した土壌サンプルをそれぞれ電子レンジを用いて脱水し、前後の重量を比較することで土壌中乾土と土壌水分との重量比を求める。
2. 乾土 10g 相当量の未風乾新鮮土を 125ml 容量のポリエチレン製振とうビンに入れる。
3. 土壌水分を考慮して乾土に対する水の比が 1:5 になるように純水を加える。
4. 60 分間振とうする。
5. 試料液を塩分計 C-121 及び、電気伝導率計 B-173 で測定する。

†東京工業大学, Tokyo Institute of Technology

農業現場では、土壌塩分の管理に主として電気伝導率 (EC 値) が用いられることから、HORIBA B-173 を使用して EC 値の測定を行った。

測定結果に基づき判定された亘理町内の作物の栽培の可否の分布を図 1 に示す。図中の色つきの丸が、それぞれの圃場の土壌塩素濃度によって判定した可否であり、赤が作物の栽培不可（塩素濃度 150mg/100g 以上）、黄が塩害耐性が中程度以上の作物が栽培可能（塩素濃度 50~150mg/100g）、緑が塩害耐性の弱いイチゴの栽培が可能（塩素濃度 50mg/100g 以下）をそれぞれ示している[5]。A, J, L, M の 4 圃場において圃場の塩素濃度が低下した理由としては、圃場主やボランティアの方々が地道に行ってきた除塩作業によるところが大きいと考えられる。塩素濃度が上昇した F, Q の 2 圃場に関しては、塩分を含んだ地下水により土壌に塩分が蓄積された、または、除塩作業の代掻き段階において圃場に張った水の塩分が土壌に蓄積されたこと等が原因として考えられる。

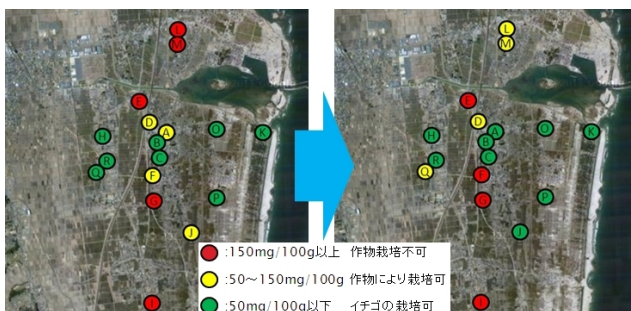


図 1 EC メータによる土壌塩分濃度評価 (左:7 月, 右:9 月)

3. 塩害再現実験

本実験では、人為的に制御した複数の土壌中塩分濃度条件下で生育する農業作物の葉の反射スペクトルを継続的に観測することで、土壌中塩分濃度とスペクトル変化の推移データを取得する。

3.1 測定対象の概要

本実験ではイチゴ、キャベサイ、ハクサイ、3 品目各 6 株を対象とした。各苗の重量は 200g 程度で大きな差異は見られなかった。各苗に含まれている土壌重量をすべて 100g と仮定し、塩分を加えないものを 1 番、各品目に対して“土壌中の塩素含量が作物の生育に被害を及ぼす限界濃度に相当する塩分量を土壌に添加したものを 2 番、2 番に添加した塩分量を 2, 4, 8, 16 倍した量を添加した苗をそれぞれ 3, 4, 5, 6 番とした (Table 1)。ここで、キャベサイの限界濃度はキャベツの塩素濃度と同様とした。

塩素濃度から塩分濃度への換算は、NaCl 中の Cl の比率を考慮し下記の式を用いる。

$$[\text{土壌中の Cl}(\text{mg}/100\text{g})] \times 1.65 = [\text{土壌中 NaCl}(\text{mg}/100\text{g})]$$

それぞれの苗の下に、プラスチックカップを設置し、各苗に 40ml の浄水を給水した。2 日目以降は苗から流出した水を受けたプラスチックカップに、更に水を加え 40ml

としてから苗にかけることで、塩分の流失・変動を極力起こさないように配慮した。

また、正確な土壌中塩分濃度を取得するため、スペクトル測定の最終日 (12 月 21 日) の測定完了後、植物の苗をそれぞれ土壌から引き抜き、土壌の塩分計と EC メータを用いて算出された土壌塩分濃度を表 2 に示す。

低濃度の計測値について、塩分計と、仮定した濃度がほぼ一致することに対し、EC メータからの換算値が高めの値を示しているが、これは EC メータが肥料が分解して発生する硝酸等の影響を受けているものと推察される。

表 1 各苗に添加した塩分量

項目	資料番号・添加塩分量					
作物	1	2	3	4	5	6
イチゴ	0mg	82.5mg	165mg	330mg	660mg	1320mg
キャベサイ	0mg	198mg	396mg	792mg	1584mg	3168mg
ハクサイ	0mg	247.5mg	495mg	990mg	1980mg	3960mg

表 2 土壌塩分濃度(%)

品種	番号	塩分計の値から換算	EC 値から換算	実験前仮定
イチゴ	1	0.05	0.496	0
	2	0.1	0.4278	0.0825
	3	0.15	0.651	0.165
	4	0.2	0.403	0.33
	5	0.5	0.806	0.66
	6	0.5	0.775	1.32
キャベサイ	1	0	0.0837	0
	2	0.1	0.1736	0.198
	3	0.3	0.4278	0.396
	4	0.6	0.682	0.792
	5	1.1	1.147	1.584
	6	3.4	3.441	3.168
ハクサイ	1	0.05	0.2108	0
	2	0.15	0.3596	0.2475
	3	0.25	0.4681	0.495
	4	0.5	0.713	0.99
	5	1.15	1.364	1.98
	6	2.2	2.573	3.96

3.2 ハイパースペクトル測定

暗室内において、ハロゲンライトを光源とした各苗の葉の分光反射スペクトルを ASD 社製 FieldSpec3 (スペクトル帯域: 350-2500nm, 波長分解能: 3nm@700nm, 8.5nm@1400nm, 6.5nm@2100nm) を用いて計測した。計測データは補間され 1nm 間隔で保存される。標準拡散反射板 Labsphere 社製 Spectralon® の反射輝度値を基準として、測定された苗葉の反射率を算出した。1 測定につき 5 データが観測され、イチゴの苗に関しては各苗向きを変えて 5 回ずつ、キャベサイとハクサイの苗に関しては各苗 3 回ずつ、計 330 回分観測した。

10 月 20 日から 11 月 16 日までは毎日計測を行い、11 月 21 日から 12 月 21 日までは二日おきでの計測を行った。こ

れにより 1,2000 点を越えるスペクトルデータが得られた。測定最終日に取得した反射スペクトルと、実際の植物の様子をそれぞれ図 2, 3 に示す。

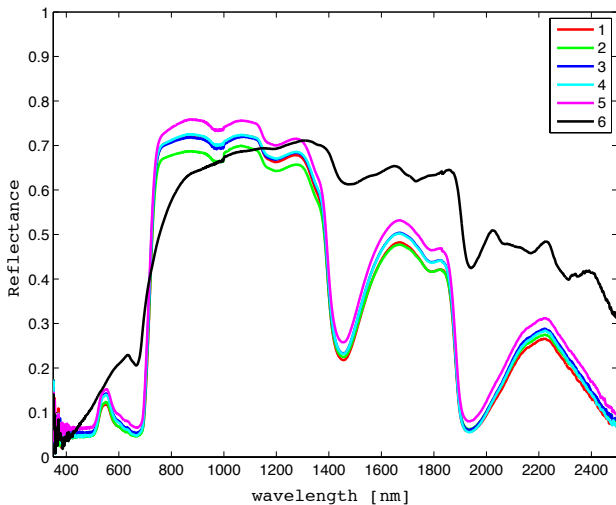


図 2 測定最終日のイチゴ葉スペクトル

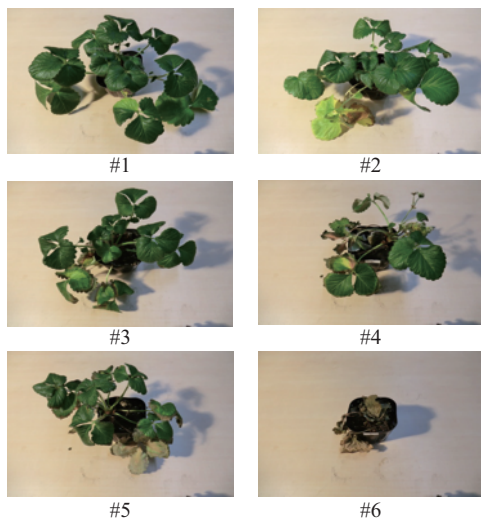


図 3 測定最終日のイチゴ画像

4. 塩分ストレス推定

4.1 NDVI-NDGI 平面による解析

植生の色素（クロロフィル、カロテノイド、アントシアニン、水等）や構造の光学的性質[6, 7]に基づき、高高度リモートセンシング光学データのバンド間演算による植生指標が多数提案されている。

植生は、葉の細胞間の多重反射、および高い透過率・反射率に基づく体積散乱により近赤外帯域において高い反射率となる。また、クロロフィルの吸収特性により赤色帯域において非常に低い反射率となるため、赤色帯域と近赤外帯域の間にレッドエッジと呼ばれる急峻な立ち上がりが発生する。正規化差分植生指標（Normalized difference vegetation index: NDVI）[8]は、近赤外帯域の反射率と赤色帯域の反射率の正規化指標により定義され、バイオマスおよびクロロフィル濃度の高い活動的な植生において高い値

を示す。しかしながら、NDVI は高バイオマスにおいて飽和特性があるため、ストレス初期のスペクトル変動に対する追従性が低下することが予想される。

Gitelson らは、クロロフィルの吸収ピークである青および赤色帯域では、低クロロフィル濃度においても入射光が到達しないため[9]反射率が飽和することを回避するために、吸収係数の低い緑色帯域またはレッドエッジ帯域[10]に基づく比クロロフィル指標を提案した[11]。

我々は、NDVI と同様に正規化差分により定義される指標 NDGI（Normalized difference green index）を提案した[12, 13]。

$$NDGI = (R(\lambda_{green}) - R(\lambda_{red})) / (R(\lambda_{green}) + R(\lambda_{red}))$$

ここで、 $R(\lambda_{green})$ は緑色領域 $\lambda_{green} = 550nm$ の反射率、 $R(\lambda_{red})$ は同様に赤色領域 $\lambda_{red} = 670nm$ の反射率である。NDGI は NDVI と同様、 $R(\lambda_{green})$ に対する $R(\lambda_{red})$ の差を±1 の範囲に正規化した値である。SPOT や Quick Bird 等の衛星に搭載されているセンサは NDVI の定義バンドである λ_{NIR} 、 λ_{red} 領域に加え λ_{green} 領域のデータ取得が可能であることから、NDGI は通常のマルチスペクトル衛星画像に対して適用可能な指標である。

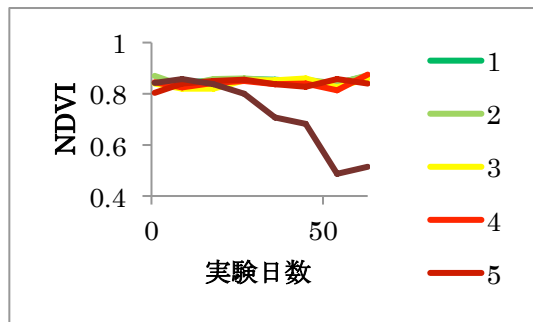
2004 年 8 月に発生した山形県庄内地域における塩害被害推定のために、SPOT 衛星データを NDVI-NDGI 上のプロットしたところ、被災地域と非被災地域の水稲データ間に明確な分布の違いが発生することが確認された[12]。また、実験室における再現実験として人為的に塩水を稲葉に付着させた後葉を定点観測することで得られたスペクトル推移データを NDVI-NDGI 空間にプロットすることで、塩分ストレス下にある稲葉の枯死プロセスの初期においては NDGI の変動が NDVI と比較して大きいことが確認された[13]。

3.2 節で得られたスペクトルデータに基づく NDVI、NDGI の経時変化、NDVI-NDGI 図を図 4,5,6 に示す。塩害実験の初期段階においては NDGI 値の減少が NDVI 値よりも大きく現れていることが確認された。これは、NDVI の飽和特性による枯死初期のスペクトル変動に対する低い感度を示している。したがって、NDGI は、塩害による枯死初期段階において、被害を推定する際には有用な指標として利用できる可能性がある。

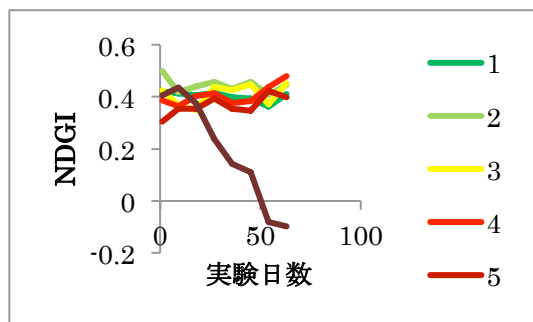
4.2 1 次微分に基づく解析

取得した反射スペクトルデータを用いて、一次微分データによる解析を行う。多くの植物の植生スペクトル特性である 670nm の赤色領域付近から近赤外領域までの反射率の急激な上昇であるレッドエッジは、植生にストレスがかかった時等、植生の活性が低下した際に短波長側に移動する現象（ブルーシフト）が確認されている[14, 15]。ハイパースペクトルデータを用いて植生の活性状態を推定する手法として、このレッドエッジのブルーシフト量を調べる手法が広く用いられている。レッドエッジの位置は反射率の波長に対する一次微分値を解析することで求められる。一次微分波形よりレッドエッジを求め、ブルーシフト量を求めたものを表 3,4,5 に示す。イチゴの 6 番のレッドエッジ帯域の一次微分値分布を図 7 に示す。イチゴの 1,3 番とキャベサイの 2 番以外においてレッドエッジのブルーシフトが

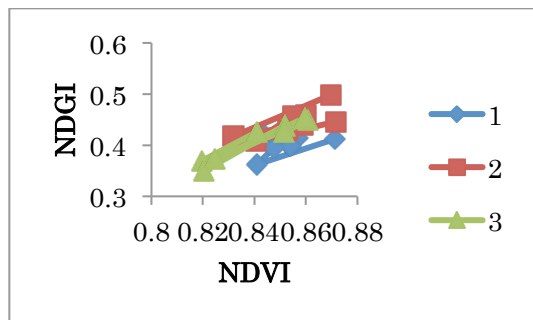
確認された。イチゴの 6 番ではレッドエッジのブルーシフト量が最大値 30nm であった。



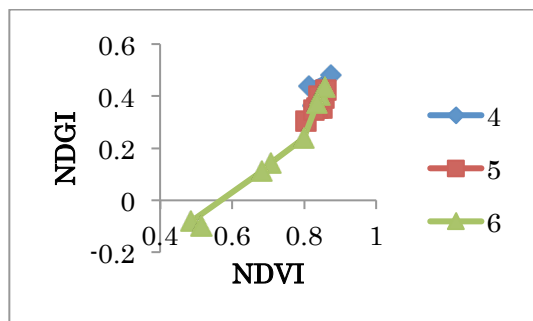
(a) NDVI 推移



(b) NDGI 推移

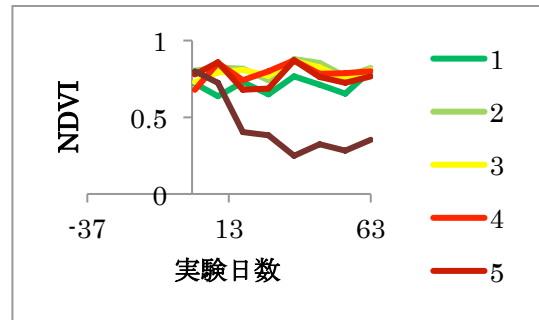


(c) NDVI-NDGI プロット (1-3)

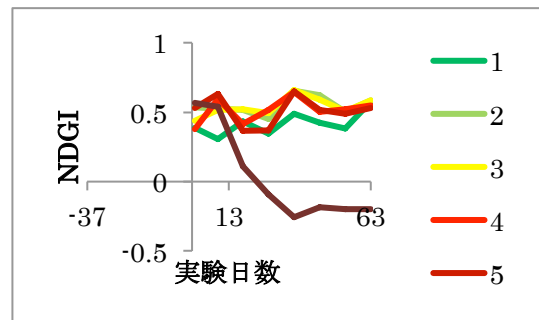


(d) NDVI-NDGI プロット (4-6)

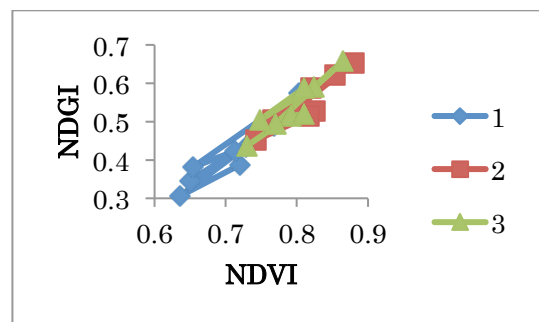
図 4 イチゴの NDVI, NDGI 推移



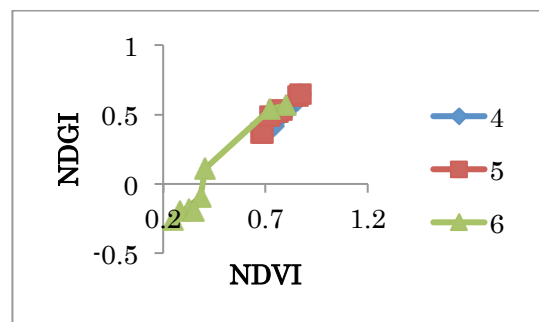
(a) NDVI 推移



(b) NDGI 推移

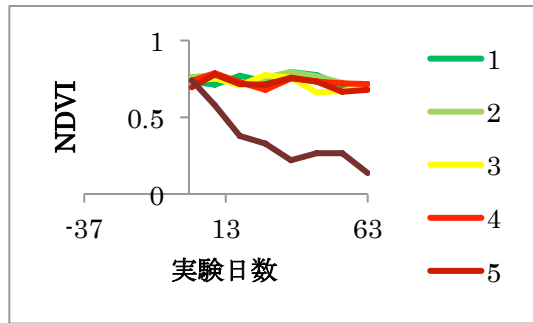


(c) NDVI-NDGI プロット (1-3)

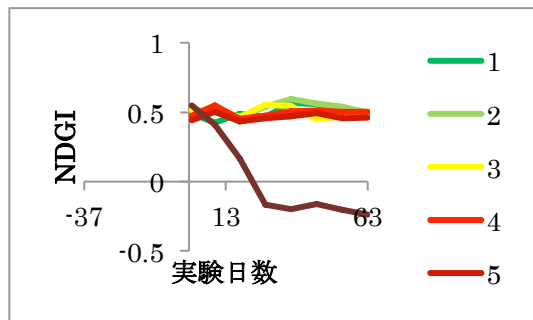


(d) NDVI-NDGI プロット (4-6)

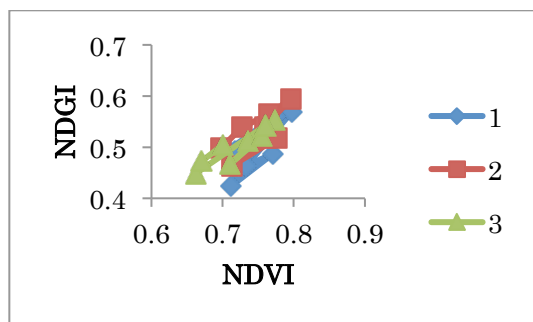
図 5 キャベサイの NDVI, NDGI 推移



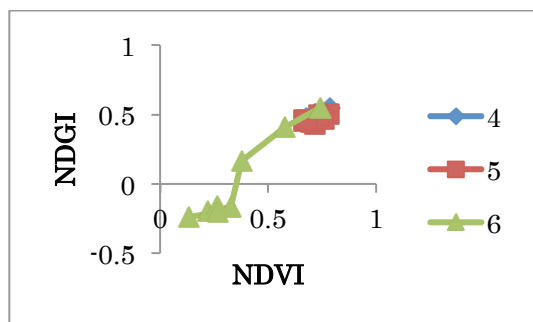
(a) NDVI 推移



(b) NDGI 推移



(c) NDVI-NDGI プロット (1-3)



(d) NDVI-NDGI プロット (4-6)

図 6 ハクサイの NDVI, NDGI 推移

ここで、イチゴのブルーシフト量と EC 値から換算した土壌塩分濃度との相関係数を求めると、 $R=0.572$ という値が得られ、ブルーシフト量と実験前に仮定した塩分濃度とを比べると、 $R=0.946$ という、極めて強い相関が認められた。また、塩分計から換算した塩分濃度とブルーシフト量には $R=0.733$ という、EC 値から換算した塩分濃度よりも

強い相関が得られたことから、EC メータが塩分以外の影響を受けたという可能性が高まった。イチゴの苗においては実験後の EC 値測定によって、苗の番号が一つ大きくなるに従って塩分濃度が倍になるという関係は何らかの要因によって崩れたことが確認できたが、おそらく高濃度の塩分により 6 番の苗が極度に弱ったために根が細り、土壌中に水分を保持することが難しくなったことから、水分と同時に塩分が苗の下に設置したプラスチックカップに流れ出て土壌に定着しなかったためであり、イチゴの塩害特性による限界濃度の 16 倍量の塩分を添加した影響は十分に確認できた。

キャベサイに関しては仮定値、EC メータからの換算値、塩分計による計測値との $R=0.07$ 以下であり、ハクサイでは $R=-0.3$ 程度であった。これは、イチゴと比べハクサイ、キャベサイは土壌の塩分に対する塩害耐性は 3 倍近く強いものであり、用水中の塩素に対する耐性が 1.5 倍近く弱いためであり、土壌から流れ出た塩分を、土壌塩分濃度の維持のために給水時にプラスチックカップでかけ直すという工程によってイチゴが用水中から受けるものより都合 4.5 倍の被害を受けたためだと推測される。

表 3 イチゴのレッドエッジとブルーシフト量(nm)

	1	2	3	4	5	6
10 月 20 日	719	719	716	719	722	719
10 月 28 日	717	717	717	717	717	717
11 月 15 日	718	717	719	719	722	700
12 月 3 日	719	718	718	719	719	695
12 月 21 日	721	717	716	717	717	689
ブルーシフト	-2	2	0	2	5	30

表 4 キャベサイのレッドエッジとブルーシフト量(nm)

	1	2	3	4	5	6
10 月 20 日	703	699	702	702	699	699
10 月 28 日	703	704	702	706	698	695
11 月 15 日	700	700	700	700	700	689
12 月 3 日	700	700	700	700	697	692
12 月 21 日	699	699	698	698	696	696
ブルーシフト	4	0	4	4	3	3

表 5 ハクサイのレッドエッジとブルーシフト量(nm)

	1	2	3	4	5	6
10 月 20 日	698	699	699	699	699	696
10 月 28 日	699	698	697	698	698	692
11 月 15 日	700	697.5	697	695	697	692
12 月 3 日	697	695	695	697	697	692
12 月 21 日	696	694	694	695	696	693
ブルーシフト	2	5	5	4	3	3

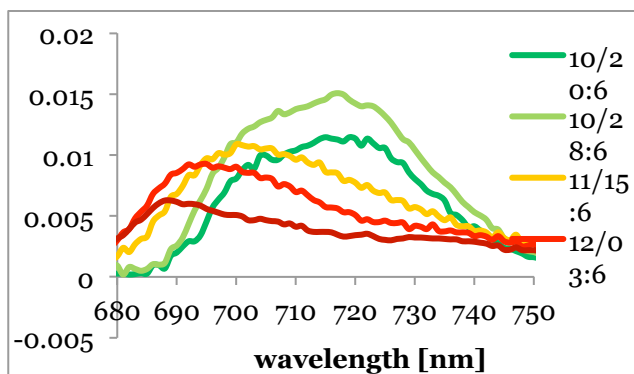


図 7 イチゴ (＃6) の一次微分値分布

5. まとめ

衛星・航空光学画像に基づく土壌塩分濃度分布推定を実現するための基礎データの取得および解析方法の確立を目的として、東日本大震災に伴う大津波による農業用地の実地による塩害評価および塩害再現実験による土壌塩分濃度と植生スペクトルの関係の評価を実施した。

フェーン現象等、異常気象による単年度の被害と比較した土壌の塩分濃度による被害の継続性を考慮し、津波による塩害を受けた圃場の土壌サンプルの取得を実施し、土壌サンプルの塩分濃度を調べ、塩害圃場での作物の栽培可能性を示した。

次に、塩害特性の異なる 3 種類の植物を用い、異なる土壌中塩分濃度環境下でそれぞれを生育させ、その反射スペクトルを取得した。取得スペクトルデータを一次微分データに変換することで、植生の特徴を観察し、ブルーシフト量と土壌塩分濃度を比較することで相関を見出し、塩害植物の反射スペクトルを解析することで土壌塩分濃度を間接的に推定することが可能であるということを明らかにした。

参考文献

- [1] 農水省農村振興局, 農地の除塩マニュアル, 2011, <http://www.maff.go.jp/j/press/nousin/seikei/pdf/110624-01.pdf>
- [2] M. I. Luleva, H. Van der Werff, V. Jetten and F. Van der Meer, "Can infrared spectroscopy be used to measure change in potassium nitrate concentration as a proxy for soil particle movement?", *Sensors*, vol.11, no.4, pp. 4188-4206 2011.
- [3] 日本気象協会, "平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震津波の概要 (第 3 報) 青森県～福島県の津波高・浸水高および青森県～千葉県の浸水状況", 2011.
- [4] 日本土壌肥料学会, 土壌環境分析法, 博友社, 1997.
- [5] 香川県農業経営課, 農地への海水の流入が農作物に及ぼす影響とその対策, 2004, <http://www.pref.kagawa.lg.jp/agrinet/duugubako/saigai/pdf/engai.pdf>
- [6] S. Jacquemoud and F. Baret, "Prospect: A model of leaf optical properties spectra", *Remote Sensing of Environment*, vol.34, no.2, pp. 75-91 1990.
- [7] J. Feret, C. Francois, G. Asner, A. Gitelson, R. Martin, L. Bidet, S. Ustin, G. Lemaire and S. Jacquemoud, "Prospect-4 and 5: Advances in the leaf optical properties model separating photosynthetic pigments", *Remote Sensing of Environment*, vol.112, no.6, pp. 3030-3043 2008.
- [8] J. W. Rouse, R. H. Haas, J. A. Schell and D. W. Deering, "Monitoring vegetation systems in the great plains with erts", eds. S. C. Freden and M. A. Becker, pp. 309-317, NASA.
- [9] R. Kumar and L. Silva, "Light ray tracing through a leaf cross section", *Appl. Opt.*, vol.12, no.12, pp. 2950-2954 1973.
- [10] H. K. Lichtenthaler, "Chlorophylls and carotenoids: Pigments of photosynthetic biomembranes", in *Methods in enzymology*, ed. R. D. Lester Packer, pp. 350-382, Academic Press, 1987.
- [11] A. A. Gitelson, Y. Gritz and M. N. Merzlyak, "Relationships between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and algorithms for non-destructive chlorophyll assessment in higher plant leaves", *Journal of Plant Physiology*, vol.160, no.3, pp. 271-282 2003.
- [12] S. Hoshino, N. Kosaka, K. Uto, Y. Minekawa, Y. Kosugi, G. Saito and K. Oda, "Analysis of salt-damaged paddy field using spot5 satellite images in yamagata prefecture", in *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2005. IGARSS '05. Proceedings. 2005 IEEE International*, pp. 1830-1833, 2005.
- [13] Y. Minekawa, K. Uto, N. Kosaka, Y. Kosugi, A. Ho, Y. Sasaki, K. Oda, S. Mori and G. Saito, "Salt-damaged paddy fields analyses using high-spatial-resolution hyperspectral imaging system", in *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2005. IGARSS '05. Proceedings. 2005 IEEE International*, pp. 2153-2156, 2005.
- [14] W. Collins, S. H. Chang, G. L. Raines, F. Canney and R. Ashley, "Airborne biogeophysical mapping of hidden mineral deposits", *Economic Geology*, vol.78, no.4, pp. 737-749 1983.
- [15] B. N. Rock, T. Hoshizaki and J. R. Miller, "Comparison of in situ and airborne spectral measurements of the blue shift associated with forest decline", *Remote Sensing of Environment*, vol.24, no.1, pp. 109-127 1988.