

地域災害特性把握と防災力向上のための衛星データ利用方法の提案

— 時系列衛星データを利用した広域被災状況評価方法の開発とその応用 —

A Proposal on the Practical Method Using Multi-Spectral Remote Sensing Data
for Grasping Local Disaster Characteristics and Reducing Community's Vulnerability

— Development and its Application of the Disaster Areas evaluation Method Using Multi-Temporal Satellite data —

古田明広*, 白木渡**, 大林成行***

Furuta Akihiro, Shiraki Wataru, and Obayashi Shigeyuki

*工修 香川大学大学院工学研究科信頼性情報システム工学専攻 (〒761-0396 香川県高松市林町 2217-20)

** 工博 香川大学工学部教授, 信頼性情報システム工学科 (〒761-0396 香川県高松市林町 2217-20)

*** 工博 株式会社国土情報技術研究所顧問 (〒150-0036 東京都渋谷区南平台町 16-28)

In order to apply satellite remote sensing data to the survey of damaged conditions over wide areas, it is required extracting of disaster areas with a constant processing accuracy independently of “observation period” and “landform or land coverage of the object area”. This study adopted “Vegetation-Soil-Water (VSW) Index” which do not require the setting of training data or threshold values as changed part extracting index using the satellite data observed at two different days. Newly “Normalized VSW (N-VSW) Index” was proposed, and the extraction method of disaster areas with N-VSW was examined using the temporal ASTER data observed in the Niigata Earthquake in 2004. As a result, the effective and efficient estimation on the extracting disaster areas could be achieved with N-VSW in the mountains.

Key Words: natural hazards, remote sensing, image interpretation, VSW index, temporal analysis

キーワード: 自然災害, リモートセンシング, 画像判読, VSW 指数, 時系列分析

1. はじめに

災害予防対策、応急対策、復旧・復興対策といった災害対応の各局面を対象に人工衛星から観測・収集されたマルチスペクトルデータ（以下、本研究では「衛星データ」と呼ぶ）の具体的な利用方法が多数提案されており、衛星データから得られる情報の信頼性や実利用への適用性が多方面で議論されている^{1), 2)}。衛星リモートセンシングはヘリコプターや航空機を用いたリモートセンシングに比べてデータ観測・収集の迅速性や機動性に劣る部分があり、観測できるデータの空間分解能も低いといった点が短所とされている。一方、データ観測・収集の広域性、周期性、同時性は長所であり、災害発生時から復旧時、復興時といったタイムスケールを対象に同一の精度で被災領域をモニタリングできる点は他の手段では得がたい衛星リモートセンシングの特徴の一つとされている³⁾。

このような衛星リモートセンシングの長所に注目して、防災拠点・避難所の選定や斜面崩壊・浸水被災の予測、災害発生時の被災状況調査に衛星データを利用した研究が報告されている。中でも被災状況の抽出・推定に関する研究アプローチが多い。例えば地震による建物被害域や液状化被害域のスペクトル特性を分析した事例^{4), 5)}、斜面崩壊面積を検出した事例^{6) - 8)}、火山活動や林野火災で被災し

た植生域の回復状況をモニタリングした事例^{9), 10)} などがある。これらの事例では、地上設置型の各種計測システムや人的資源による被災状況調査で補うことが困難な広範囲にわたる被災の全体像を把握することを目的に、衛星データの適用方法が検討されている。

また、近年では空間分解能が最大で1m以下の高分解能衛星データが入手可能となり、衛星リモートセンシングによる地表面被覆の識別精度は格段に向上してきている。道路面の亀裂などの小規模な被害の判読は困難であるが、斜面崩壊や液状化被害の判読には航空写真と同程度の活用効果が期待できることが報告されている¹¹⁾。しかしながら、空間分解能が高いが故に地物の倒れ込みや陰影までもが明瞭となるため、被災領域の推定・評価手法そのものを見直す必要があるといった新たな問題も指摘されている。

ところで、被災状況調査における衛星データの画像処理・解析面に目を向けて見ると、一般的に、災害発生前後に観測・収集された衛星データを用いて地表面被覆の変化箇所を抽出する方法が実施されている。変化箇所を自動抽出する方法は以下の2通りに大別できる。

- ① 2時期の衛星データからそれぞれ分類図を作成して、分類結果が変化した画素を抽出する方法^{例1) 例3)}
- ② 2時期の衛星データの画像特徴量を計算して、この特徴量の変化量を判別基準とする方法^{例1) 例4)}

①の方法では、地表面被覆の分類精度が変化箇所の抽出精度に直結することになる。すなわち、採用する分類手法やクラス数、教師データの設定が重要になる¹²⁾。②の方法では、画像特徴量としてスペクトルデータの輝度値を直接利用するものやNDVI(Normalized Difference Vegetation Index)のように異なるスペクトルデータの比を取るものなどがある。被災領域を判別する際には閾値を設定する機会が多い。この判別基準となる閾値の良否が変化箇所の抽出精度に影響をおよぼすことになる。このため、①、②の方法を被災領域の自動抽出手法とする場合、以下のような問題が常に付いて回ることになる。

- ・被災の種類や範囲が未知な災害発生直後では、教師や閾値の設定の良否を十分に吟味できず、抽出結果の信頼性を確保することが困難である。
- ・パラメータを設定する解析者のスキルや経験によって自動抽出結果が変化する可能性がある。
- ・誤分類・誤判別が少なからず発生する。被災状況調査においてこの誤差は重要な被災箇所を見落としてしまう危険性に繋がる。

災害発生時には、できるだけ迅速に被害状況を把握する必要がある。このため、画像処理・解析作業に充てられる時間には制約がある。また、データの観測時期や対象領域の地形・被覆状況に関わらず、画像処理・解析結果からは、被災の位置を一定の精度で把握できることが要求される。

そこで本研究では、このような問題点への対策として、空間分解能や観測頻度が異なる複数の衛星データでも汎用的に利用可能であり、処理工程で教師や閾値の設定を必要しない広域被災状況評価方法の開発に着手した。具体的には、災害発生前後における地表面被覆の変化状況の評価する尺度として山形ら¹³⁾によって提唱された植生・土壌・水(VSW)指数に着目し、様々な地表面被覆が混在している領域でも地表面被覆の変化箇所と変化の状態を同時に判読できる評価図の作成を試みた。

2. 広域被災状況評価方法の開発と検証

2.1 地表面被覆の時系列変化を評価する指標の提案

VSW 指数の特徴について概説するとともに、2時期の地表面被覆の変化状況の評価するために本研究で提案する「正規化 VSW 指標変化量」について述べる。

(1) VSW 指数の計算

VSW 指数は土壌水分含有量の変動を考慮した植生指標の考え方を発展させた指標であり、衛星データを用いて植生・土壌・水の要素が混在する領域を定量化できる特徴がある。本指数の計算には可視域の赤色波長帯域 (Red バンド) と近赤外波長帯域 (NIR バンド) のスペクトルデータを用いる。現在運用中である殆どの光学式衛星センサは Red バンドと NIR バンドのスペクトルデータを観測・収集している。VSW 指数は空間分解能などの仕様が異なる複数の衛星データにおいても同一の手順で計算できる。

Red バンドを横軸、NIR バンドを縦軸にとった平面 (以下、本研究では「R-NIR 平面」と呼ぶ) にスペクトルデータをプロットすると、三角形の領域が現れる (図 1)。この三角形の3辺と R-NIR 平面上の任意の点 P からの距離となる線分 PV、PS、PW を計算することにより、植生 (Vegetation)・土壌 (Soil)・水 (Water) の3つの指数を抽出できる。三角形の各頂点は純粋な植生・土壌・水に対応するスペクトル空間上の点 (エンドメンバー点) を表す。本研究では、山形ら¹³⁾によって開発されたエンドメンバー点の自動決定アルゴリズムを踏襲し、VSW 指数を計算するプログラムを構築した。

(2) 正規化 VSW 指標変化量の提案

季節が異なる2時期間ではエンドメンバー点の変動するため、VSW の各指数を直接比較することは難しいとされている。そこで本研究では、1時期ごとに VSW 指数を正規化した後、2時期間における植生・土壌・水の各成分の変化量を計算することとした。

正規化とは、R-NIR 平面上における VSW の各指数の相対的な大きさ (線分の長さの比) を保持したまま各エンドメンバー点における指数値を“1”にする処理である。正規化された各成分を正規化植生指標 (NVI: Normalized Vegetation Index)、正規化土壌指標 (NSI: Normalized Soil Index)、正規化水指標 (NWI: Normalized Water Index) とした場合、NVI、NSI、NWI は式(1)、(2)、(3)で計算できる。

$$NVI = PV / (PV+PS+PW) \quad (1)$$

$$NSI = PS / (PV+PS+PW) \quad (2)$$

$$NWI = PW / (PV+PS+PW) \quad (3)$$

PV、PS、PW は注目画素の植生指数、土壌指数、水指数である。正規化処理によって R-NIR 平面は歪められ、VSW ラインにより囲まれる三角形はエンドメンバー点を頂点とする高さ“1”の正三角形に変換されることになる。これにより独立した物理量であった VSW の各指数は注目画素で植生・土壌・水の各成分が占める割合に指標化される。

上述の方法で災害発生前後の衛星データから正規化 VSW 指標を計算した後、NVI、NSI、NWI の2時期間におけるユークリッド距離を画素単位で求める。本研究ではこの距離を「正規化 VSW 指標変化量」と定義して、地表面被覆の時系列変化を評価することとした。

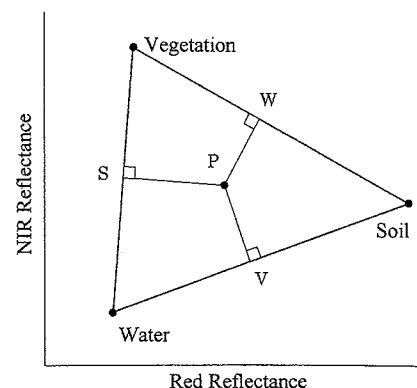


図1 VSW 指数の計算原理の概念

2.2 新潟県中越地震被災地を対象にした評価方法の検証

(1) 対象領域

本研究では2004年10月23日に発生した本震とそれ以降の余震により甚大な被害が発生した新潟県中越地震被災地を対象領域とした(図2)。本被災地では、斜面崩壊や湛水被害の影響により山間部の被災地へ地上からの侵入が困難であったことが報告されている。対象領域の大きさは長岡市東部、栃尾市南部、小千谷市、川口町、山古志村(現:長岡市)を含む20km×20kmの領域である。本震災に伴う大規模な被害はほぼ本対象領域で発生している。

(2) 使用データ

本研究では、可視・近赤外波長帯域に3つのスペクトルバンドを持つTerra/ASTERデータを用いた。空間分解能は15mである。新潟県中越地震の発生前後に本対象領域を観測したASTERデータの中から出来るだけ観測間隔が短く、かつ雲の影響が少ないデータを選定した。具体的には、災害発生前のデータとして2004年6月3日(時刻:10時37分)、災害発生後のデータとして2004年11月10日(時刻:10時33分)を選定した。

(3) 時系列衛星データの前処理

検証に利用する2時期のASTERデータには観測時の太陽の位置、地形の起伏、衛星の位置の幾何学的な関係と大気の状態に起因する差異が含まれている。このような観測条件の違いは正規化VSW指標変化量の計算に影響をおよぼすため、前処理の段階で低減する必要がある。本研究では次の3つの工程で前処理を実施した。

STEP1: オルソ補正処理

地形起伏と衛星の位置関係から生じる地形の倒れ込みの影響を低減した。システム補正の段階で地球の曲率に依存する歪は除去されているが、以下の誤差が残されている。

- ①システム補正時のパラメータに含まれる誤差
- ②観測対象点の標高とセンサの位置関係に伴う誤差

事前検討の結果、①の誤差は画像全体を予め設定した座標系に対して平行移動させるオフセット補正によって除去できることが分かった。②の誤差については、標高データ(10mメッシュ標高データ)を基準にASTERデータを幾何補正することによって低減した。

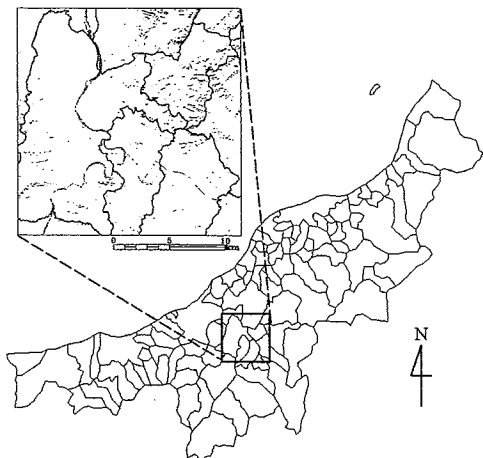


図2 対象領域

STEP2: 相対輝度の補正処理

輝度補正処理により時系列データ間における大気の影響を相対的に低減した。大気の状態(大気の透過率およびパスラジアン)と太陽天頂角が観測時に対象領域の範囲内で一定であると仮定した場合、センサに入射する放射輝度 L_s は地表面反射率 ρ を変数とする線形式で近似できることが知られている¹⁴⁾。本研究ではこの概念に沿って、2時期の放射輝度の間で線形回帰式を作成する方法でバンド毎の相対輝度を補正した。RedバンドとNIRバンドのスペクトルデータでは共に回帰式の相関係数が0.9以上の高い値が得られた。これより相対輝度補正に回帰式を適用できると判断しバンド毎に補正処理を実施した。

STEP3: 地形効果の補正処理

太陽の位置(太陽天頂角、太陽方位)と斜面方位の関係から生じる放射輝度のばらつきを補正した。本研究では実用的な地形効果の補正方法として利用されているMinnaert定数¹⁵⁾を用いた補正方法を採用した。

(4) 正規化VSW指標変化量評価図の作成

2.1節で述べた方法で2時期のASTERデータから正規化VSW指標変化量を計算した。さらに、NVI・NSI・NWIの各変化量にそれぞれ緑色(Green)・赤色(Red)・青色(Blue)を割り当てることで擬似カラー合成画像を作成した。本研究ではこのカラー合成画像を「正規化VSW指標変化量評価図」と定義する。図3に本研究で作成した正規化VSW指標変化量評価図を示す。本評価図は明度でVSWの各指標の変化量を示すとともに、三原色(R、G、B)の加法混色の関係から変化の状態を評価できる特徴がある。

(5) 正規化VSW指標変化量評価図の解釈

三原色の加法混合の概念に従って、正規化VSW指標変化量評価図の解釈方法について述べる。

①白色系画素:NVI(植生指標)・NSI(土壌指標)・NWI(水指標)の全ての指標で変化が生じた画素である。図3では山間部の領域Aなどで判読できる。植生、土壌と同時に水の成分にも変化が現れている点が特徴的であり、河道閉塞による湛水被災地が含まれている可能性がある。

②Yellow系画素:NVIとNSIで大きな変化が生じた画素である。図3では山間部の領域B、Cに点在している。植生と土壌の成分が変化していることから、斜面崩壊などに伴い山林が裸地化した領域が含まれている可能性がある。

③Cyan系画素:NVIとNWIで大きな変化が生じた画素である。図3では主に山間部で広く分布している様子が判読できる。植生と水の成分に変化が現れた画素であるが、評価図では植生域の分布との関連性が確認できる。

④Magenta系画素:NSIとNWIで大きな変化が生じた画素である。図3では河川や領域Dの耕作地で広く分布している様子が判読できる。土壌と水の成分に変化が現れた画素であり、2時期間における水田や溜池の被覆変化(水の有無)や水域の濁度の変化が影響している可能性がある。

⑤黒色系画素:全ての指標で変化の小さい画素である。家屋や道路が密集する人工被覆域で判読できる。

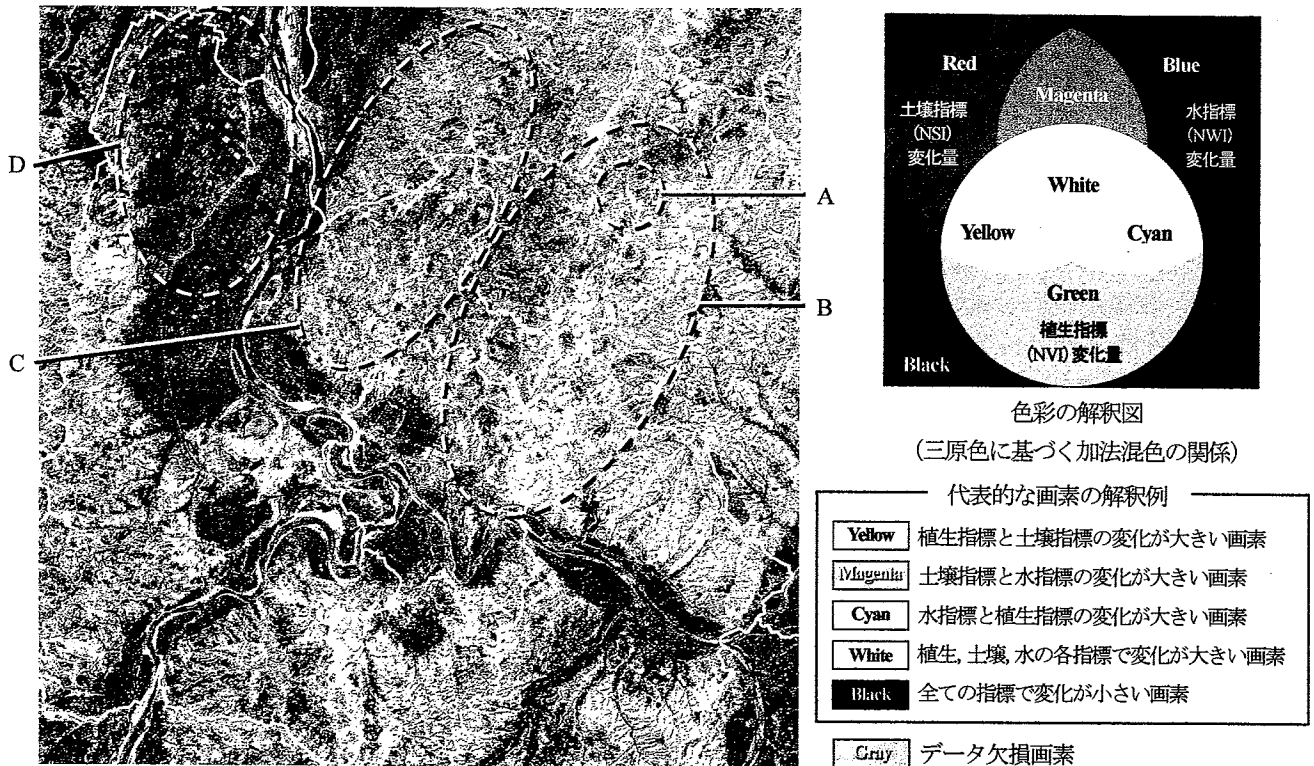


図3 正規化 VSW 指標変化量評価図 (R, G, B に NSI 変化量, NVI 変化量, NWI 変化量を割り当てたカラー合成画像)

3. 正規化 VSW 指標変化量評価図による地域災害特性把握

3.1 被災領域の識別状況の調査

本評価図による被災領域の識別状況を調査するために、災害発生後に現地を撮影したカラー航空写真(撮影: 国土地理院)を比較対照として判読を実施した。調査範囲は2.2節(1)で述べた対象領域の全域である。斜面崩壊領域に関する評価図と航空写真の一例を図4に示す。また、耕作地(液状化被害)、溜池(崩壊被害)の一例を図5に示す。なお、比較判読作業を容易にするため、評価図には既存の空間デ

ータ(道路網、鉄道網、河川、溜池分布、等)を統合した。

(1) 斜面崩壊領域

空中写真との比較判読の結果、評価図の「White」と「Yellow」系画素の分布が湛水被災領域と斜面崩壊領域の位置と形状に合致した(例えば図4-②, ③, ④の領域A, B, C, D, E)。山間部に点在している裸地化を伴う斜面崩壊領域は調査範囲の全域で「Yellow」系画素として判読できた。このことから、正規化 VSW 指標変化量は災害発生前後の地表面被覆の変化を表す評価指標として機能していることが確認できた。

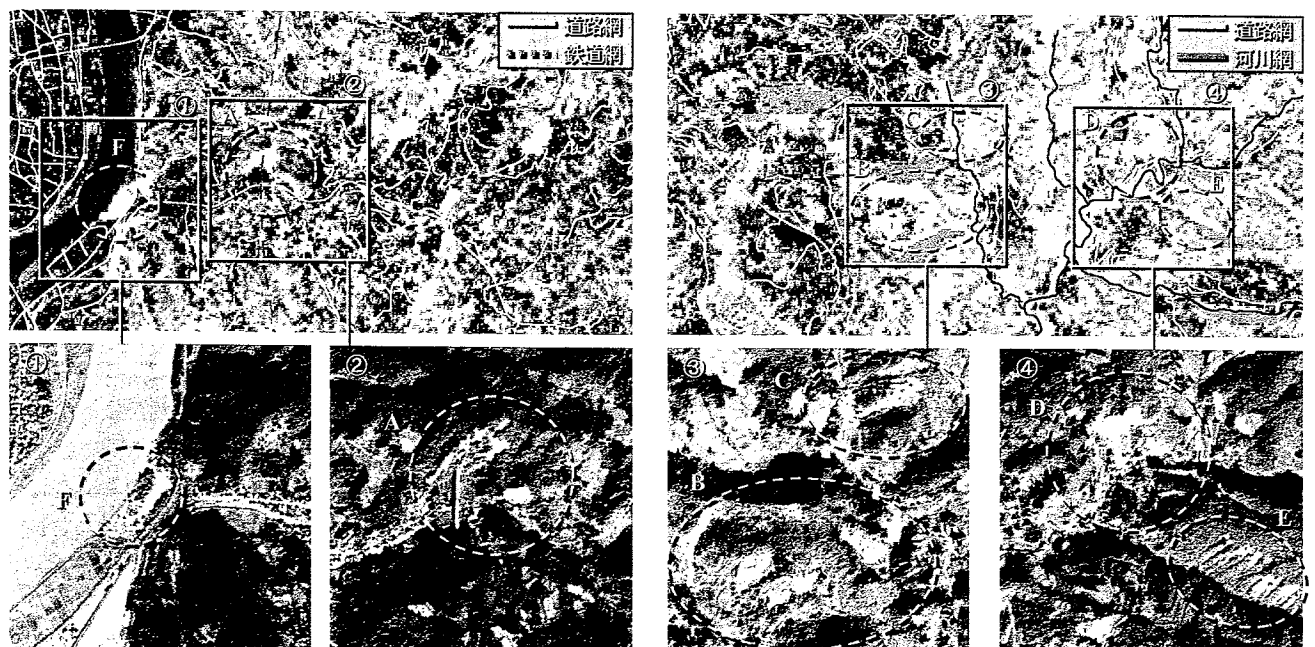


図4 斜面崩壊領域に関する正規化 VSW 指標変化量評価図とカラー航空写真の一例

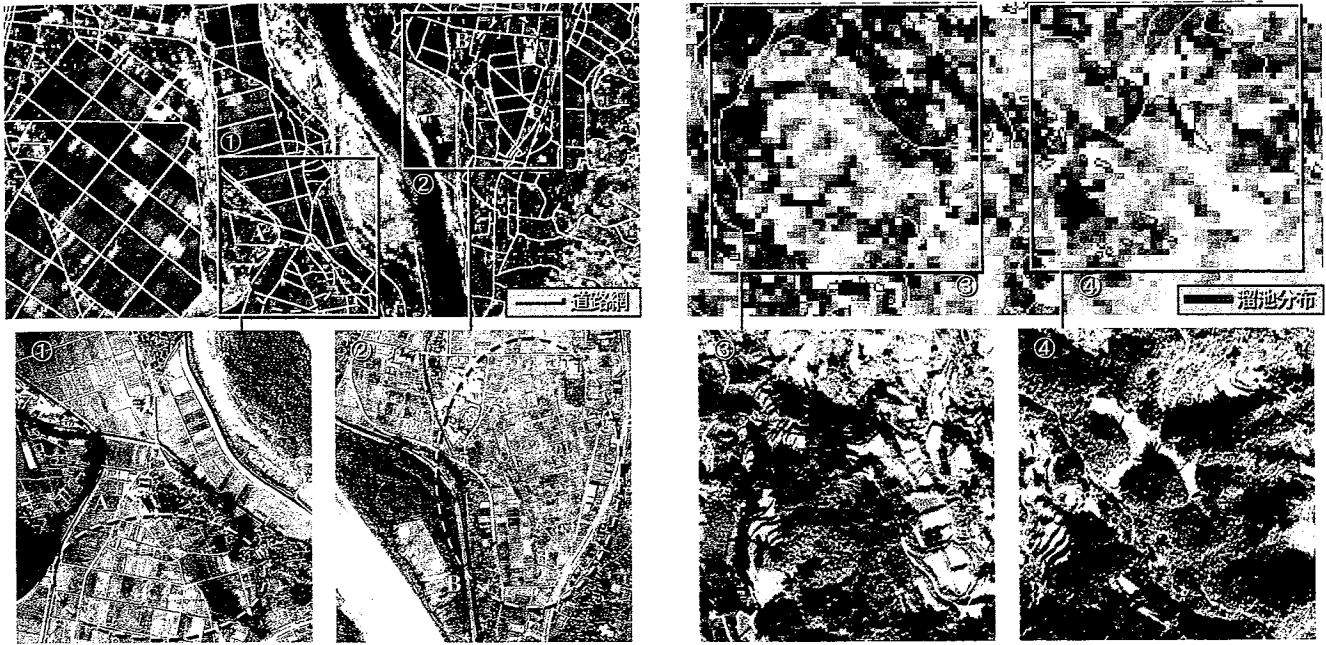


図5 耕作地(左図)と溜池(右図)に関する正規化 VSW 指標変化量評価図とカラー航空写真の一例

本評価図の作成に使用した衛星データの観測時期は6月と11月である。このため、植生域の季節変化により山林域の NVI は変化する。また、斜面崩壊により裸地化した領域も NVI は変化する。このため NVI 変化量のみ注目した場合、植生の「季節的な変化」と「斜面崩壊に伴う変化」を区別することは困難である。一方で、斜面崩壊により裸地化した領域では NSI にも大きな変化が発生する。植生の季節変化では NSI に顕著な変化は殆ど生じない。この結果、山間部の斜面崩壊領域は NVI と NSI の変化が顕著である「Yellow」系画素として表示されたものと推察できる。これは複数の指標を同時に取り扱うことができる「正規化 VSW 指標」の特徴が反映された結果である。

一方で、「Yellow」系の画素は斜面崩壊領域以外でも確認できた(例えば図4-①の領域F)。低層の植物が分布する河川敷などは植生の季節変化により裸地に近い状態となる。このため評価図では斜面崩壊領域と同様の「Yellow」系画素として表示されたものと推察できる。

(2) 耕作地

本震災では河川付近の耕作地で液状化の被害が多発したことが報告されている。しかしながら、評価図では明らかに液状化の被害と判断できる顕著な特徴は判読できなかった(例えば図5-①、②の領域A、B)。この原因には、液状化による NSI と NWI の変化量に比べて、水田に水が張られた状態(6月)から稲の刈り取りを終えた状態(11月)といった2期間の耕作地の変化に伴う NSI と NWI の変化量の方が大きかったためであると推察できる。また、評価に利用した衛星データの観測時期が災害発生時から約半月後であったため、液状化被害が沈静化していたことも原因の一つと言える。

(3) 溜池

本震災では中越地方の風土とも言える山間部の溜池や棚田、養殖池などで斜面崩壊に伴う甚大な被害が発生した。図5の右図の赤線で囲まれた領域は溜池の分布を示してい

る。災害直後の航空写真(図5-③、④)から、本領域の溜池では殆ど水が湛えられていない状況が判読できる。一方で、評価図では「Magenta」系画素が溜池の分布と合致しており、NSI と NWI の変化が大きかったことが判読できる。耕作地と同様に、災害発生前後における水の有無が評価結果に影響を及ぼしているものと推察できる。

3.2 広域被災状況評価方法の効用と限界

衛星データを用いた地表面被覆の時系列分析では、同一観測時期のデータを用いることが多い。これは大気や太陽位置、植生の季節変化による影響を時系列データ間で低減することを目的としている¹⁶⁾。しかしながら、災害は時間、場所を問わず発生するものであり、同一時期の時系列データが常に利用できるとは限らない。本研究では、観測時期の異なる6月と11月のデータを用いた。観測条件や植生の状態が異なる2期間でも、山間部の被災箇所とその状態を判読できたことは、「正規化 VSW 指標」が広域被災状況調査で利用できることを示す結果である。

一方で、溜池などの小規模な被災状況の評価には限界があった。これは使用した ASTER データの空間分解能が15mであることが原因の一つである。高分解能衛星データを使用するなど対策を要する点である。また、他の被災領域や使用する衛星データの観測時期を変えて本評価方法の汎用性に関する検討を重ねる必要がある。

本研究で開発した広域被災状況評価方法は時系列衛星データから作成した「正規化 VSW 指標変化量評価図」を判読することにより被災箇所やその状態を評価するものである。被害状況のランク分けや被災範囲のゾーニングが主な目的ではなく、衛星データの客観性の特徴を保持したまま被災状況の判読支援情報を作成できる点に特徴がある。災害応急・復旧対策の現場で衛星データを活用していく場合、解析者の経験や既知の情報に基づき被災箇所を自動抽出する方法が効果的なのか、災害特性を把握しやすい状態へデータを処理して、最終的な被災状況の判読は人に

委ねる方法が適してきのかは議論を要する点である。本評価方法は判読者を介する被災状況調査の効率化を目的とした衛星データの活用方法の適用が期待できる。

3.3 地域防災力の向上への衛星データの適用性

地域防災力の向上において衛星データを効果的に活用していく際に必要となる項目について整理した。

(1) 災害情報共有のための基盤データとしての利用

住民の避難誘導、物資輸送経路の確保、復旧計画の立案など災害応急・復旧対策では、病院、避難所などの施設や道路、ライフラインの被災状況を迅速に把握することが要求される。災害発生後に観測・収集された衛星データを利用することにより、広域被災状況の全体像は比較的容易に推定・評価できるものの、微細な被災状況の把握は困難である。道路網や施設の位置を示した既存の空間データとGIS上で統合することや刻々と明らかになる現地の踏査結果を取り入れていくなど、衛星データから得られた被災情報の信頼性を向上させることが肝要となる。また、これらの情報をネットワーク環境下で逐次発信することにより、災害情報の共有化に役立てることも一つの方策と言える。

(2) 時系列衛星データによる災害履歴の蓄積

過去に起きた災害から露呈した問題点や教訓は被災を受けた地域では言うまでも無く、他の地域においても防災計画の見直しや地域の防災力向上に有益な情報となる。衛星データは被害の全体像を客観的に記録するのに有効な情報となり、災害発生時から復旧時、復興時と継続的に情報を蓄積することも比較的容易である。行政単位などで一定時期ごとに衛星データを蓄積していくことは将来的な地域防災力向上に役立つものと言える。

(3) 災害発生前後のリモートセンシングデータの安定確保

被災状況の早期把握と復旧状況モニタリングの安定化を実現するためには、単一の衛星データのみを利用したのでは限界があり、仕様の異なる複数のリモートセンシングデータを融合利用することが効果的である¹⁷⁾。特に、光学式のリモートセンシングは天候や時刻によって良好なデータが観測・収集できない場合がある。災害発生直後の被災状況調査では昼夜全天候下で観測が可能な合成開口レーダシステムとの併用が不可欠になる¹⁸⁾。また、仕様の異なる複数のリモートセンシングデータを効率的に蓄積・管理できるような基盤システムの開発・運用も重要となる。

4. まとめ

衛星データを利用した広域被災状況調査における画像処理・解析面での問題点を指摘するとともに、2時期の地表面被覆の変化箇所とその状態を同時に判読・評価できる「正規化VSW指標変化量評価図」の作成方法を開発した。新潟県中越地震被災地を対象に本評価図を作成して被災領域の識別状況を調査した結果、山間部の斜面崩壊領域の抽出に効果が確認できた。また、本評価図を災害発生時に実利用していく際の問題点と課題について考察するとと

もに、地域災害特性の把握と防災力向上において衛星データを効果的に活用するための留意事項について整理した。

本研究の成果が地域の防災・減災対策の取り組みにおいて何らかの形で寄与できれば幸いである。

参考文献

- 1) 国土交通省：国土交通省における衛星データ利用の方向性。災害等に対応した人工衛星技術に関する総合報告書，第I編，pp.1-40，2003年。
- 2) 松岡昌志：上空および宇宙からのリモートセンシングによる最近の被害地震のモニタリング，「近年の国内外で発生した大地震の記録と課題」シンポジウム論文集，pp.63-70，2002年。
- 3) 竹田厚，宝馨，立川康人 他：自然災害防止・軽減のためのリモートセンシング技術の可能性，自然災害科学，Vol.20，No.2，pp.131-160，2001年。
- 4) 松岡昌志，山崎文雄，翠川三郎：1995年兵庫県南部地震での被災地域における人工衛星光学センサ画像の特徴，土木学会論文集I，Vol.668，No.54，pp.177-185，2001年。
- 5) 細川直史，伊藤陽介，星仰：自己組織化マップ(SOM)による液状化領域の抽出，写真測量とリモートセンシング，Vol.38，No.6，pp.14-23，1999年。
- 6) 河邑眞，辻子裕二：衛星画像による地震時斜面崩壊形態および崩壊規模の検出方法に関する研究，土木学会論文集IV，Vol.597，No.40，pp.11-20，1998年。
- 7) 戎信宏，村瀬悠，丸谷知己：衛星データとGISを用いた崩壊地の判別に関する研究—市房山崩壊地郡を例として—，砂防学会誌，Vol.53，No.1，pp.3-9，2000年。
- 8) 福嶋彩，仲野公章，清水孝一 他：衛星リモートセンシングによる斜面崩壊等の監視手法の検討，土木技術資料，Vol.43，No.6，pp.54-59，2001年。
- 9) 後藤恵之輔，全炳徳，阿部圭吾：衛星データを用いた雲仙・普賢岳噴火による被災域の経時変化，火山工学シンポジウム発表論文集，Vol.1，pp.21-28，1994年。
- 10) 加藤正人：衛星データの実利用を目指した西興部村森林火災のモニタリング，日本リモートセンシング学会誌，Vol.21，No.4，pp.377-387，2001年。
- 11) 向山栄：IKONOS衛星画像を利用した地震発生直後における総覧的災害情報の取得，写真測量とリモートセンシング，Vol.44，No.1，pp.55-57，2005年。
- 12) 小島尚人，大林成行：トレーニングクラスの設定方法に関する一提案，日本リモートセンシング学会誌，Vol.15，No.4，pp.50-65，1995年。
- 13) 山形与志樹，杉田幹夫，安岡喜文：植生・土壌・水(VSW)指標アルゴリズムの開発とその応用，日本リモートセンシング学会誌，Vol.17，No.1，pp.54-64，1997年。
- 14) 財団法人資源・環境観測解析センター：地球観測データからの情報抽出。『光学センサデータの物理量変換・反射率導出』，pp.32-41，2003年。
- 15) Teillet, P. M., Guidon, B. and D. G. Goodenough: On the slope-aspect correction of multispectral scanner data. Can. J. Remote Sensing, Vol.8, pp.84-106, 1982.
- 16) 小泉俊雄，萩原圭一 他：衛星画像による環境評価手法に関する研究(I) —多時期データ間の放射量補正—，写真測量とリモートセンシング，Vol.42，No.4，pp.6-17，2003年。
- 17) 古田明広，白木渡，大林成行：被災領域の時系列データ整備を目的とした異種地球観測データ管理システム，土木学会土木情報利用技術講演集，Vol.30，pp.29-32，2005年。
- 18) 古田明広，浦塚清峰，佐竹誠 他：航空機Pi-SARデータを利用した道路被災状況の判読に関する一考察，日本リモートセンシング学会学術講演会論文集，No.40，pp.167-168，2006年。(2006年8月18日受付)