

衛星画像からの土砂災害検出における 地表面含水比の影響について

THE INFLUENCE OF SURFACE WATER CONTENT ON SLOPE
DAMAGE DETECTION FROM SATELLITE IMAGES

辻子 裕二¹・河邑 眞²・辻野 和彦³

Yuji TSUJIKO, Makoto KAWAMURA and Kazuhiko TSUJINO

¹豊橋技術科学大学大学院工学研究科 (〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1)

E-mail: tsujiko@ace.tut.ac.jp

²豊橋技術科学大学大学院工学研究科 (〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1)

E-mail: kawamura@ace.tut.ac.jp

³福井工業高等専門学校環境都市工学科 (〒916-8507 福井県鯖江市下司町)

E-mail: tsujino@fukui-nct.ac.jp

Key Words: slope disaster, 2004 Niigata-ken Chuetsu Earthquake, satellite image, water content

1. はじめに

平成16年10月23日に発生した新潟県中越地震を誘因とした土砂災害箇所における検出に関し、光学、SARを含めた解析が諸所で進められた^{1),2)}。筆者らにおいても主として被災前後のIKONOSパンシャープン画像を用いた土砂災害検出を行った。IKONOS等の高解像度衛星画像は空間分解能の優位性から判読のみで大半の被害を検出することが可能である。加えて、上記地震による被災箇所は極めて多く、それぞれを個別に判読することが効率的でないこと等の理由から、広域性、同時性を有する衛星画像の利用が効果的である。この広域性、同時性の利点は、被災直後の混乱期において迅速で確度の高い成果を求める際に重要な要素となる。したがって、被害検出の際には、できる限り単純なパラメータを用いた一括同時処理が肝要と考えられる。

一方で、撮影時間の関係および衛星のオフナディア角の関係から影となる部分については、物理的に災害検出が困難となることも想定される。実際に災害直後のIKONOS画像(図-1)は岡山上空を通過する軌道を東方向に約35度傾けて観測されたものである¹⁾。しかしながら、一括同時検出の過程で、上記物理的要因以外の明らかに被害のある箇所において被害検出が困難なケ

ースを確認した。単純なパラメータを用いた自動判別手法の採用が一つの原因と推察されるが、検出精度の統計的な安定性を維持するためには、できる限り検出パラメータの肥大化を避けたい。このような背景から、本報ではあくまでも単純な検出手法を採用した際に、「誤検出」あるいは「未検出」となり易い災害箇所の特徴について、とくに表土の含水状態に着目し検討した内容について示す。なお、便宜上、以下では「崩壊」は「災害」と同義として取り扱うこととする。

2. これまでの検出結果と本論の位置づけ

(1) これまでの検出結果の概要

新潟県中越地震で発生した多数の斜面崩壊、地すべりは、地質が新第三紀、第四紀と新しく、脆弱な斜面であったことが原因とされる。現地ではこれらの被害を全て把握することが困難であったため、空中写真での土砂災害の判読が行われた³⁾。その際の写真判読範囲は旧山古志村を中心として東西約25km、南北約50km、面積1,310km²に含まれる旧山古志村、川口町、魚沼市等15市町村であり、撮影は平成16年10月24日から29日に実施された。なお、この際の縮尺は約1:10,000から1:12,000であった。なお、IKONOSパンシャープン画像

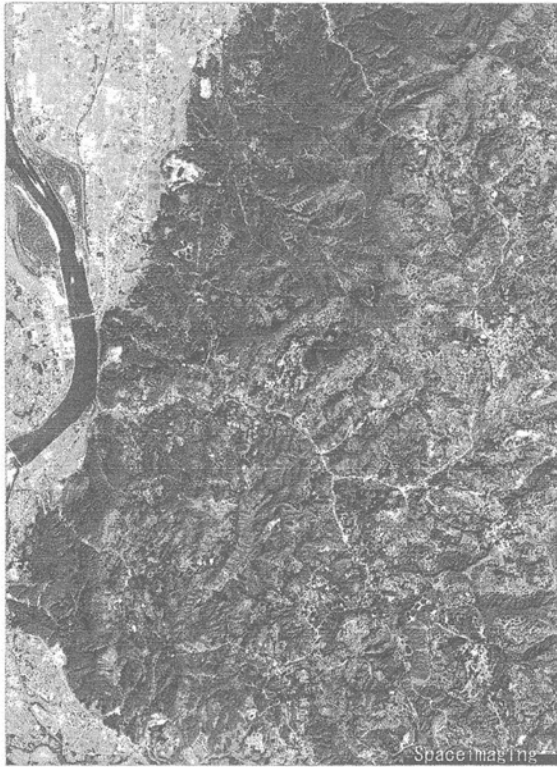


図-1 解析対象域 (IKONOS カラー合成)
(平成 16 年 10 月 24 日観測)

の空間分解能は約 1m とされ、上記のような縮尺の空中写真に匹敵する。

図-2 から図-5 は本研究において現地調査を実施した 4 つの被害箇所における現地写真と IKONOS 画像ならびに IKONOS 可視光(赤)のバンド(波長:632~698nm)のレベルスライス処理によって崩壊検出を行った結果である。レベルスライス時の閾値は、被害調査結果を検証データとして正解画素数が多く、誤検出の少ない値を事前にトレーニングした上で決定した。図-3(c) (Site2) および図-4(c) (Site3) からは、良好な検出が行われていることが確認できる。換言すれば、閾値を決定するトレーニングデータの統計に基づき、このように見える被害を検出するパラメータの設定が行われたことになる。一方で、図-2(c) (Site1) では未検出画素が、図-5(c) (Site4) では誤検出、未検出画素が確認できる。Site1 を被覆する土は明らかに周囲にある棚田と比較して暗色を呈しているために未検出となったと考えられる。Site4 は崩壊土砂が河川に流入して汚濁したところを崩壊と判断してしまう一方で、犠牲者を出した岩盤崩壊を正確に検出できていない。緑被の影響も関係すると考えられるが、現地写真からは土(岩)の被覆が認められる。降雨の影響を考え観測前後の気象データを調べたところ、22 日に降水はあったものの、23 日、24 日に目立った降水はないことが確認された。IKONOS 観測時は快晴であったことから、日射の影響などによって表土の含水状

態の変化に時間差があったか、若しくは全く別の要因が重なったと見られる。

なお、空中写真によって把握できた崩壊、地すべりの総数は 3,791 箇所であった³⁾。そのうち、崩壊方向は南および南西のものが最も多く見られた。高解像度衛星画像からの検出と同様、現地調査で崩壊が確認されたにも関わらず、空中写真での災害箇所の検出が不可能なケースも多く見られたとの報告もある。

(2) 課題の設定

これまでの成果の中で誤検出や検出困難な状況が発生した理由として、①崩壊箇所が太陽光入射角の関係で影となっていた、②マスマーブメントは確認できるものの崩壊箇所の上に緑被が残存しており変化を確認しにくい状態となっていた、③地点によって被覆物(土や岩)の含水状態が異なっていたために反射特性が異なった、④崩壊箇所を被覆する土(岩)の密度の違いによって乾燥の様相が異なっていた、等の仮説を設定することができる。先述の Site1 (図-2) および Site4 (図-5) では当該斜面が観測時(午前 11 時頃)に日陰となりやすい傾斜方向であることが原因の一つと言える。加えて、Site4 においては緑被が残存している事実も否定できない。上記①および②に対応するための地形補正や緑被の状態把握に関しては、単純なパラメータを用いた自動判別という本研究の状況設定の中で高解像度衛星画像に対応する基礎情報の整備面での課題が多いと判断し、まず③および④の仮説の検証を行うこととした。

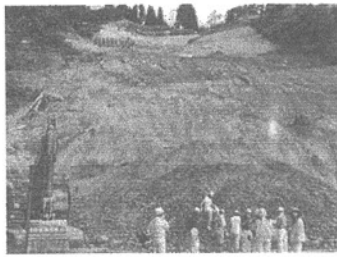
なお、崩壊の見られた地域のほとんどは風化花崗岩、いわゆるマサ土の分布地帯であり、現地調査においても目視で大きな差異は確認されなかった。それにも関わらず反射率に大きな差が見られたことに着目した。土壌水分の増加に伴い各波長帯での反射率が極端に低減することで、崩壊斜面が相対的にあたかも影のように映ってしまうことが判別できなかった原因と見ることができると。この点で含水比を実験パラメータとした屋内実験を実施することとした。ここに、含水比は土粒子の質量に対する水の質量の百分率で表される。なお、対象とする試料は、図-2 から図-5 に示した調査地点で採取したものである。

(3) 現地調査結果に見る被災域の特徴

現地調査は平成 18 年の予備調査を経て平成 19 年 8 月 24 日に実施した。以下に、両調査に共通して立ち入った調査地点(試料採取地点)の概要を示す。なお、試料は堆積した崩壊土の最上部を採取した。

a) Site1 (羽黒トンネル付近)

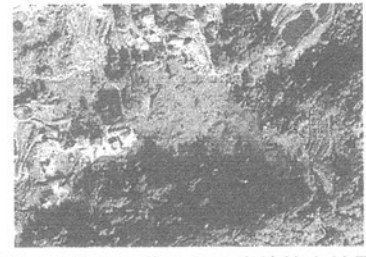
Site1 は北北西の方角に斜面崩壊が発生した場所で



(a) 現地写真
(平成 18 年 8 月 24 日撮影)

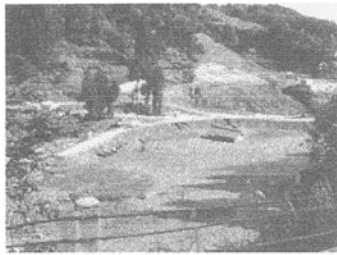


(b) IKONOS オルソ画像
(平成 16 年 10 月 24 日観測)

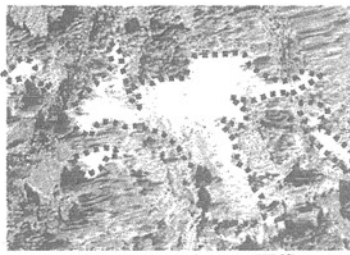


(c) IKONOS 画像からの崩壊検出結果
(抽出結果を塗りつぶし)

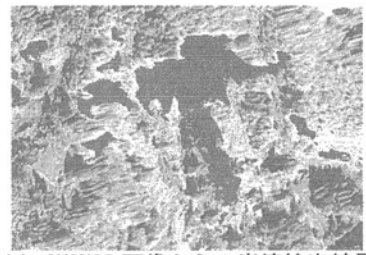
図-2 Site1 (羽黒トンネル付近) ※(b)中の破線は崩壊土砂の分布範囲



(a) 現地写真
(平成 18 年 8 月 24 日撮影)



(b) IKONOS オルソ画像
(平成 16 年 10 月 24 日観測)

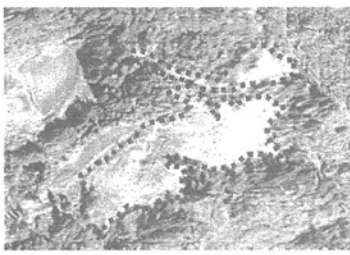


(c) IKONOS 画像からの崩壊検出結果
(抽出結果を塗りつぶし)

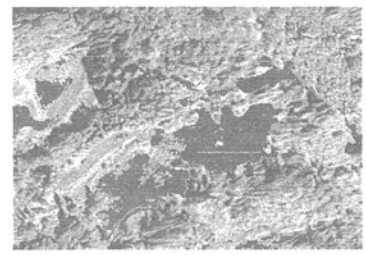
図-3 Site2 (木籠羽黒河道閉塞箇所) ※(b)中の破線は崩壊土砂の分布範囲



(a) 現地写真
(平成 18 年 8 月 24 日撮影)

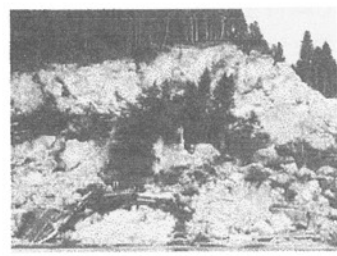


(b) IKONOS オルソ画像
(平成 16 年 10 月 24 日観測)



(c) IKONOS 画像からの崩壊検出結果
(抽出結果を塗りつぶし)

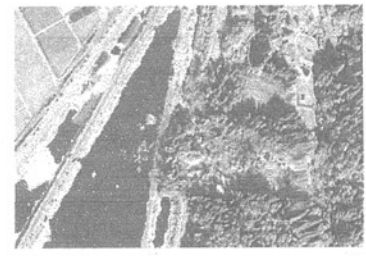
図-4 Site3 (梶金付近) ※(b)中の破線は崩壊土砂の分布範囲



(a) 現地写真
(平成 18 年 8 月 24 日撮影)



(b) IKONOS オルソ画像
(平成 16 年 10 月 24 日観測)



(c) IKONOS 画像からの崩壊抽出結果
(抽出結果を塗りつぶし)

図-5 Site4 (浦柄橋付近) ※(b)中の破線は崩壊土砂の分布範囲

ある。崩壊斜面は発災時(10月)であれば午前中には日陰となることも想定される。図-2(a)に示されるように緑被とともに崩壊した脆弱な岩が斜面下に多く流れ堆積しているが、大きな礫や土塊などは確認できない。この地点のIKONOSカラー合成画像(図-2(b))では崩壊箇所が暗色に表れる。他の崩壊箇所とこの程度濃度に差があれば、単純な検出方法では含水比の高い農地や裸地と同様に判断されてしまう可能性が高い。

b) Site2 (木籠河道閉塞箇所)

Site2 は南南東の方角に斜面崩壊が発生した場所である。芋川の両岸で斜面崩壊が発生し、その土砂により河道閉塞が起きた。崩壊斜面上の緑被は失われている。Site1 と同様大きな礫や土塊などは確認できない。なお、流域は震源に近いこともあり、河道閉塞が 52 箇所に入った。現地調査時は地震発生より約 2 年経過していたにも関わらず、芋川は濁度の高い状態であった。この地

表-1 実験シリーズ

試料の種類		試料の密度	初期含水比	試料の種類		試料の密度	初期含水比
Site 1	A-I	疎 ($\approx 1.3\text{g/cm}^3$)	20%	Site 3	C-I	疎 ($\approx 1.3\text{g/cm}^3$)	20%
	A-II	密 ($\approx 1.6\text{g/cm}^3$)			C-II	密 ($\approx 1.6\text{g/cm}^3$)	
	A-III	疎 ($\approx 1.3\text{g/cm}^3$)	10%		C-III	疎 ($\approx 1.3\text{g/cm}^3$)	10%
	A-IV	密 ($\approx 1.6\text{g/cm}^3$)			C-IV	密 ($\approx 1.6\text{g/cm}^3$)	
Site 2	B-I	疎 ($\approx 1.3\text{g/cm}^3$)	20%	Site 4	D-I	疎 ($\approx 1.3\text{g/cm}^3$)	20%
	B-II	密 ($\approx 1.6\text{g/cm}^3$)			D-II	密 ($\approx 1.6\text{g/cm}^3$)	
	B-III	疎 ($\approx 1.3\text{g/cm}^3$)	10%		D-III	疎 ($\approx 1.3\text{g/cm}^3$)	10%
	B-IV	密 ($\approx 1.6\text{g/cm}^3$)			D-IV	密 ($\approx 1.6\text{g/cm}^3$)	

点の IKONOS カラー合成画像(図-3 (b))では崩壊箇所が特徴的に明るく表れ、周囲とのコントラストが大きい。このため単純な処理によっても崩壊検出は容易である。

c) Site3 (梶金付近)

Site3 は、南西の方角に大規模な土砂災害が発生していた場所である。図-4 (a) に示されるように土の表面は乾いた状態であり、白色に近い色をしていたが、内部は灰色で、表面より固い状態であった。崩壊斜面上に一部緑被は残存しているものの、大きな礫や土塊などは確認できない。巨大な岩や土塊の他斜面崩壊の影響で倒された木々も多く見られた。この地点の IKONOS カラー合成画像(図-4 (b))では、崩壊箇所が特徴的に明るく見える。このため崩壊箇所の検出は容易である。

d) Site4 (浦柄橋付近)

Site4 は西北西の方角に崩壊が発生した場所である。Site3 と同じく、土の表面は乾燥し白色に近い色をしていたが、内部は灰色で表面より固い状態であった。現地調査写真から巨大な土塊と崩壊土、ならびに崩壊土とともにすべり落ちた緑被が多く確認できる。この地点の IKONOS カラー合成画像(図-5 (b))では崩壊箇所が暗色に映る。この黒く見える領域の値を用いて閾値設定を行う場合を除き、同崩壊箇所の検出は困難であると推察できる。つまり、Site2 および Site3 が良好に検出できる閾値設定では、図-5 (c) のように Site4 の検出は極めて困難になると判断できる。

3. 検証実験

(1) 実験概要

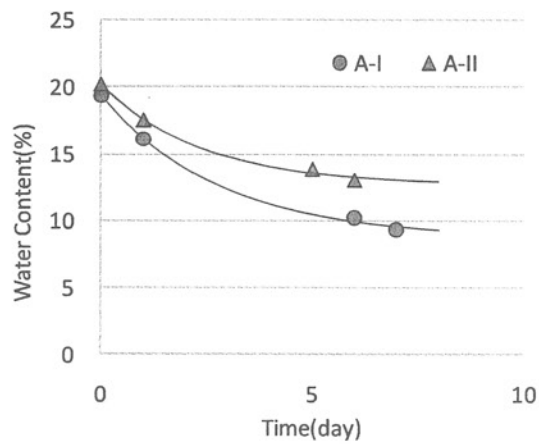
現地調査で採取した 4 地点の土を使用し、含水比と密度を調整した上で分光反射強度の測定実験(屋内試験)を行った。反射強度の測定には Ocean Optics 製 USB2000 を使用し、光源以外の光の入射を失くすため

に暗室にて行った。含水比は 10%、20%付近に、密度は疎な状態で 1.3g/cm^3 付近、密な状態で約 1.6g/cm^3 付近に調整した。ここで、供試体は直径約 50mm の二つ割りモールドに試料土を入れ試験条件の密度となるように静的に締固めて作成した。表-1 に示されるように、1 地点につきそれぞれの条件を満たす計 4 条件の供試体を 1 条件につき 3 体作成し、4 地点分の計 48 体を測定した。また、供試体作成時を 0 日目とし、以下 1 日目、3 日目、5 日目の反射強度と含水比を測定し、供試体の乾燥プロセスを観察した。

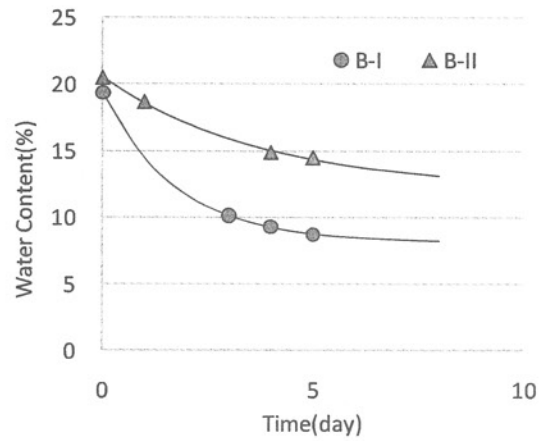
(2) 実験結果

図-6 は初期含水比が 20%の供試体において、密度が疎な場合ならびに密な場合の双方に対し常温(約 20℃)の室内において試料土が乾燥するプロセスを示したものである。同図のように供試体の密度が疎な状態では時間の経過に伴い早い段階で含水比が一定に収束していくのに対し、密度が密な状態ではその収束に時間を要した。これは、密な状態である場合、疎な状態に比べて間隙が少なく、サクシジョンの影響も含めて乾燥速度が遅いためである。ただし、ここで測定した含水比は供試体中央部における値であり、反射特性に影響を与える表面とは若干異なる。

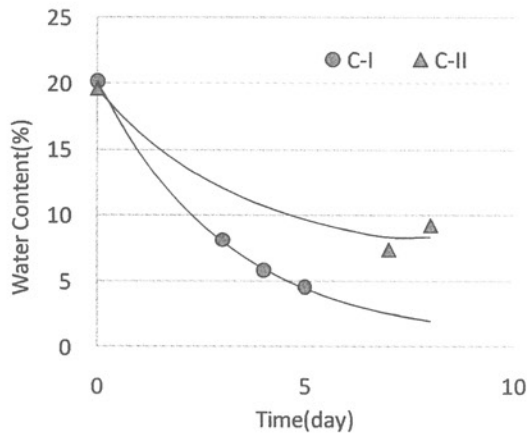
各供試体に対し、波長 660nm における反射強度の変化を示したものが図-7 および図-8 である。波長 660nm 近辺(可視赤)は、筆者らの既往の成果⁴⁾により土砂災害の検出に有利とされている波長である。これらの図より、Site1から Site4 のすべてにおいて、乾燥に伴い含水比が低くなるに従って反射強度が高くなるのが改めて確認できる。広域一括同時検出が困難であった Site1 および Site4 においては他と比較して含水比および密度に大きく影響されることが想定されたが、試料土に依存した明確な影響は確認できなかった。



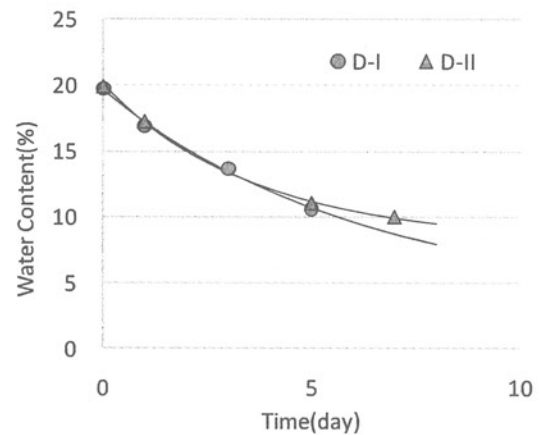
(a) A-I (疎), A-II (密)



(b) B-I (疎), B-II (密)



(c) C-I (疎), C-II (密)



(d) D-I (疎), D-II (密)

図-6 各調査地点における試料土の含水比の変化 (初期含水比 20%)

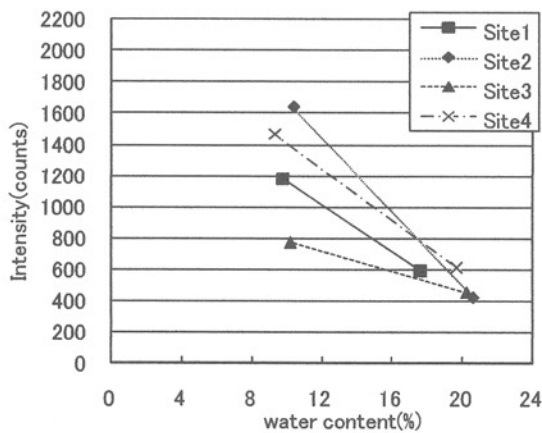


図-7 含水比の低下に伴う反射強度の変化 (波長 660nm における反射強度の推移) —密度が疎 (1.3g/cm³) な場合—

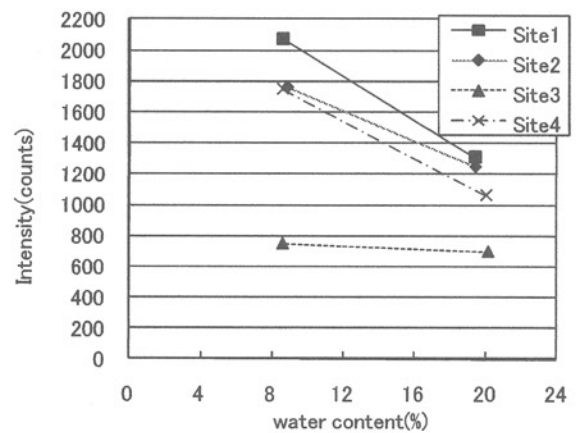


図-8 含水比の低下に伴う反射強度の変化 (波長 660nm における反射強度の推移) —密度が密 (1.6g/cm³) な場合—

4. 衛星観測時における地盤状態の再現

先述のように、被災後の IKONOS 画像が観測された 10 月 24 日において観測地点は快晴であり、その前日および前々日に若干の降雨が確認されている。ここで

は降雨の際に地表面に多少の含水があったと考え、含水比の変化を踏まえて反射強度を推定し考察を加える。実験結果より乾燥速度に違いがあることを踏まえ、降雨から3日たった時点における反射強度を比較する。ただし、本仮定は原位置の条件を精密に再現するものでは

ない。

図-2から図-5に示される現地写真を踏まえ、Site1における土の密度を「疎」と考える。同様に Site2も「疎」、Site4は岩の露頭を踏まえ「密」とする。Site3は疎・密の中間的な状態であるが、仮に「疎」として考える。降雨後に含水比が平均的に20%となっていたと仮定し、その3日後の含水比を図-6より求めると、Site1で約12.4%、Site2で10.1%、Site3で8.0%、Site4で13.7%が導かれる。これらの含水比に対応する反射強度(660nmでの値)は図-7および図-8より、Site1で約1000、Site2で約1700、Site3で約900、Site4で約1400となり、Site1およびSite3での低反射が確認できる。Site1の誤検出(未検出)要素の一つとして土質条件の影響が見出された。とくに、Site1は北側斜面であることを考慮すると他の地点よりも土表面の乾燥が抑制される。この点を含み入れた場合、Site1の反射強度はSite3と比しても有意な差が出ることが推定できる。

上記のように土質の影響があると仮定した場合であっても、Site1およびSite4において見られた誤検出(未検出)を説明しきることはできない。すなわち前出の仮説の中で示した①傾斜および④緑被の影響を排除することは困難である。Site1は北斜面、Site4は西斜面であるため南/東斜面と比べて乾燥に遅延が生じ、本論で示した以上の含水比となっていた点の他、Site4は山腹の崩壊箇所であり、地表面が高木で覆われていたことを指摘できる。この植生ため、崩壊土で地表面が完全に覆われることなく緑被の面積占有率が他に比して大きくなっていたと考えることができる。上述の被災時地盤状態の再現の中でSite4の含水比が高かったことに加えて、緑被がある地点の保水性が比較的高い⁵⁾ことを考慮すれば、Site4における未検出の状況を説明できる。以上より、本研究で設定した仮説以外が排除できると考えた際には、被災前の緑被の状態が被災後の被災域の検出に大きな影響を与えていたことは否定できない。

5. まとめ

供試体を用いた室内実験により衛星の観測状況を再現し、含水状態と密度が未検出原因の一つの可能性として挙げられる点について言及した。ただし、土の含水状態や密度による影響は避けられないものの、斜面の傾斜角や傾斜方向に依存して生じる影響はより大きなものである可能性は高い。加えて、緑被による保水性の向上ならびに見かけ上の緑被面積が大きくなることで、低反射率を招く点についても示した。

表層地盤の土質を広範に把握することは精密な検出の実現に寄与すると考えられるが、この実現は極めて困

難である。求められる精度を見据え、つぎのように見える対象を確実に捉えていくことが肝要と結論づける。

①緑被状況の把握

緑被の状態は地表面の乾燥プロセスを支配する大きな要素である。したがって被災前の山腹における植生の状態(樹種、樹高、密度等)の把握が求められる。そのツールとして IKONOS のような高解像度衛星画像が有効であることは既に言及されている通りである⁶⁾。

②乾燥プロセスに基づく強度補正

表土の含水状態が反射強度に影響を与えることを踏まえ、地点ごとの乾燥プロセスを推定し、処理前に補正することで精度の向上が期待できる。例えば、乾燥が遅延し易い緑被のある北斜面の反射強度(DN)を相対的に増加させることが考えられる。

③多角的な衛星画像の利用

本論では緊急時の中でも時間や衛星数に制限がある状況を想定し、極めて単純な方法で単画像を用いる場面を設定した。実際には同災害に対して IKONOS の有効性の他、RADARSAT を用いた岩盤崩壊の検出への有効性についても確認されている。これらの複数衛星画像の効率的で可能な組み合わせについて検討していくことが重要である。

参考文献

- 1) 李雲慶: 災害時における高分解能衛星 IKONOS の観測について、写真測量とリモートセンシング, Vol.44, No.2, pp.36-37, 2005.
- 2) 古田竜一, 島田政信, 田殿武雄: RADARSAT-1 合成開口レーダの差分干渉法による平成16年新潟県中越地震の地殻変動解析、写真測量とリモートセンシング, Vol.44, No.2, pp.32-25, 2005.
- 3) 土木学会新潟県中越地震被害調査特別委員会, 平成16年新潟県中越地震被害調査報告書, 第3章 地盤災害と復旧, 土木学会, 2006.
- 4) Makoto KAWAMURA, Kazuhiko TSUJINO and Yuji TSUJIKO: Detection of sediment disaster due to the 2000 Tokai Heavy Rainfall using high resolution satellite imagery, Proc. of American Society of Civil Engineers (ASCE) Earth & Space 2006, 2006.
- 5) 辻子裕二, 榊原勇一, 塔尾徹, 河邑眞: 処理剤と植生シートの併用による表土の流出および保水性に対する効果, 土木学会第64回年次学術講演会講演概要集, VII-153, 2009.
- 6) 河邑眞, 辻野和彦, 辻子裕二: 森林の樹種に関する高分解能衛星画像特性の分析, 写真測量とリモートセンシング, Vol.44, No.5, pp.82-90, 2005.

(2010.5.14 受付)