

斜面崩壊ハザードマップ構築のための基礎的研究 II

—陸域観測技術衛星 (ALOS) データを用いた鹿児島県大隅地方の斜面崩壊地抽出事例—

福田 真也^{*1}・石川 大太郎^{*2}・有満 重徳^{*3}・山口 晃裕^{*4}
韋 江俊^{*3}・大場 和彦^{*5}・石黒 悦爾^{*6}

Fundamental Study on Construction of Hazard Map Causing by Landslide II A Case of the Identification of Landslide Area at Ohsumi District in Kagoshima Using the Advanced Land Observation Satellite (ALOS) Data

FUKUDA Shinya, ISHIKAWA Daitaro, ARIMITSU Shigenori, YAMAGUCHI Kosuke
WEI Jiang Jun, OBA Kazuhiko and ISHIGURO Etsuji

Summary

In recent years, the localized heavy rain of which the global warming may be a major reason has occurred frequently in several areas of Japan, especially the southern part of Kyusyu district. The huge landslide is caused by their heavy rains, so that the quest for evaluation and/or prediction of their effects over the mountainous area is a main concern for the protection of human life. This study therefore was conducted to develop an identification method for landslide by means of remote sensing technique. A high correlation coefficient for water contents in leaves was obtained from the normalized vegetation index (NDVI) described by the reflectance of red and near infrared (NIR). The water contents fluctuation (WCF) image developed by the ratio of different year NDVI images agreed well with the actual landslide. The result obtained in this study suggests that WCF image based on the data of Advanced Land Observation Satellite (ALOS) / Advanced Visible and Near Infrared Radiometer type2(AVNIR-2) can be successfully applied to identify the landslide.

Keywords : (ALOS/AVNIR-2-data, Estimation of landslide, Normalized vegetation index (NDVI),
Water contents fluctuation (WCF))

1. 緒言

近年、豪雨などの異常気象による斜面崩壊が頻繁に発生している。2013年10月には伊豆大島西部において、台風26号により24時間雨量が800mmを超え、複数の

表層崩壊による大規模な斜面崩壊が発生し、甚大な被害が生じた。これらの事例以外にも2012年7月に発生した九州北部豪雨など記録的な大雨が局所的にしかも頻繁に発生し、多くの箇所では斜面崩壊などの土砂災害が生じ

^{*1} 大学院生

^{*2} 東北大学農学研究科助教

^{*3} 大福コンサルタント株式会社

^{*4} 鹿児島大学

^{*5} 総合情報学部総合情報学科教授

^{*6} 新技術創成研究所客員教授

ている。今回対象とする鹿児島県大隅地方においても2010年7月4日に南大隅町根占で豪雨による大規模な斜面崩壊が発生しており、広域な斜面崩壊地の予測手法の開発による防災ハザードマップの構築は喫緊の課題となっている。

リモートセンシング技術は、非破壊・非接触で対象を観測可能であることに加えて、広領域を繰り返し測定可能であることから、山腹の土壌水分が推定可能となれば、防災マップ構築に有効な手法となると考えられる¹⁾。土壌の分光反射特性と土壌含水率には、密接な関係があることは報告されており、赤色域～近赤外付近の反射率は土壌水分に反比例することなどが示唆されている¹⁾。しかし、日本国内では、山腹が樹木に覆われていることが多いため、衛星画像を用いる場合、実際的には樹木葉の反射特性を取得することになる。

ここで、山腹の樹木の葉内水分は、周辺の土壌水分をある程度反映することは既に報告されている²⁻⁴⁾。そこで、我々の研究グループでは、葉内含水率と分光反射特性の関係から、斜面崩壊地を抽出する試みを実施してきた⁵⁻¹⁰⁾。石川らは、局所豪雨等で水分が過飽和な斜面では、通常の斜面より土壌水分変動が少ないと仮定し、二時期の分光画像から含水率変動率推定指標：Water Content Fluctuation Index (WCF)を考案し、実際の崩壊地が把握可能となった事例を示している⁵⁾。しかし、石川らの手法は、デジタルカメラによって取得されたもので、対象領域が限られていた。実際の防災マップ構築には、より広領域を取得可能な衛星や航空機画像の利用が不可欠であると考えられる。

そこで本研究では、人工衛星として Landsat/TM を利用した研究成果^{8,9)}を踏まえ、さらなる防災ハザードマップ構築のための基礎的知見を得るため、空間分解能が10mと高分解能の陸域観測技術衛星(ALOS)データへのWCF指標の適用を検討し、衛星画像を用いた場合の本指標の有効性を鹿児島県大隅地方を対象として調査した。

2. 材料および方法

2.1 葉内含水率と分光反射率

葉内含水率および分光反射率のデータは、共同研究者である石川らによって測定された結果を用いた⁵⁾。石川らは、スダジイ(*Castanopsis cuspidata* var. *sieboldii*)を

供試しているが、スダジイは、鹿児島県の山腹で占有率が高い樹種であり、ある程度本研究の対象地域の山腹樹木を代表できると考えられる。

摘葉は樹冠部から数葉行われ、即座に湿潤重量を測定した後、重なりがないよう重量計の上に載せたサンプルフォルダーに敷き詰めた。時間毎の対象葉の重量は重量計の目盛を記録することで、24時間後まで実施された。含水率(%)は24時間経過後の対象葉を恒温乾燥器で絶乾(80°C、72時間)後、ウェットベースで算出された。分光反射率は、サンプルフォルダーに敷き詰められた対象葉に対して天頂の方向に携帯用分光放射計(エルム社：KE-1、視野角：3度、観測波長領域：400nm～1100nm、観測波長間隔：3nm)をセットし、光源としてレフランプを用いて室内で実施された。この手法を用いることで、経過時間内の葉内含水率と分光反射率がほぼ同時に測定することが可能で、かつ対象葉を測定中に移動させることなく同一領域の測定が可能となっている。測定時には硫酸バリウム(BaSO₄)を塗布した標準白色板の放射強度もレファレンスとして常に測定し、供試材料の分光反射率を白色板と対象葉との比で算出している。

2.2 ALOS データ対応指標作成

2.1の葉内含水率と分光反射率のデータを用いてALOS/AVNIR-2の各バンド(Band1：420-500nm, Band2：520-600nm, Band3：610-690nm, Band4：760-890nm)に対応する平均分光反射率を算出し、これらの波長帯を組み合わせ、葉内含水率と対応させることで、ALOSデータ対応の含水率推定指標作成を行った。

2.3 衛星画像と画像解析

衛星画像として、ALOS/AVNIR-2データを使用した。ALOSの主要諸元をTable 1に示す。

本研究では、斜面崩壊を生じた時期に最も近い2007年1月22日と2007年7月25日に撮影されたものを解析に使用した。また画像解析については、ERDAS IMAGINE(ver9.2 Leica Geosystem Co.)を用いて行った。

2.3.1 位置補正処理

人工衛星画像は、毎回同じ場所・角度等で撮影することができないため、異なる日時の衛星画像を比較する場合に、ずれや歪みを補正する必要がある。衛星画像は、

基準点(Ground Control Point: GCP)を観測画像内に万遍なく設定し、一方の画像データに一致させるように行った。補正の際に、二乗平均誤差 (Root mean square error : RMSE) が 0.01pixel 以下になるように設定した。

Table1 major specifications of the ALOS/AVNIR-2

項目	諸元
打ち上げ日	2006年1月24日
高度	約691.65km
軌道	太陽同期準回帰軌道
回帰日数	46日
周期	約100分
観測波長帯	Band1:420-500nm
	Band2:520-600nm
	Band3:610-690nm
	Band4:760-890nm
地上分解能	10m(直下)
観測幅	70km(直下)

2.3.2 大気補正処理

地表面から反射・放射されるエネルギーは大気中を伝播する際、吸収・散乱され、その量は大気の状態に依存するため、衛星データはこれらの影響を含んでいる。そのため画像を解析する際には大気の影響を考慮する必要がある。大気の影響で増加した分の輝度値を差し引くことにより、大気補正処理を行った。大気補正処理の一例として、2007年7月25日のALOS/AVNIR-2のBand1の画像を Fig.1 に示す。(A)は補正前、(B)は補正後の画像とヒストグラムである。補正は、(A)のヒストグラムで立ち上がりまでの輝度値が、散乱の寄与によって増加したと考え、それを差し引くことで行った。

2.3.3 正規化処理

地表面から反射されセンサーへ入射する電磁波エネルギーは、地形の起伏によって変化し、観測した画像に陰影が生じる。そのため正規化処理を行い、山間部の起伏や日陰の影響を軽減し、画像を平坦化する必要がある。そこで、解析の手法として、小野¹⁾らが提唱している衛星画像の起伏の影響を軽減する方法として、バンド間演算の手法を用いた。正規化処理を施したデータを Band1'、Band2'、Band3'、Band4' とすると、

$$\text{Band1}'=4\text{Band1}/ [\text{Band1}+\text{Band2}+\text{Band3}+\text{Band4}] \quad (1)$$

$$\text{Band2}'=4\text{Band2}/ [\text{Band1}+\text{Band2}+\text{Band3}+\text{Band4}] \quad (2)$$

$$\text{Band3}'=4\text{Band3}/ [\text{Band1}+\text{Band2}+\text{Band3}+\text{Band4}] \quad (3)$$

$$\text{Band4}'=4\text{Band4}/ [\text{Band1}+\text{Band2}+\text{Band3}+\text{Band4}] \quad (4)$$

のように補正される。正規化処理の一例として、正規化処理後の画像を Fig.2 に示す。(B)の正規化後の画像は、(A)の正規化前の画像に比べて、山間部の起伏や日陰の影響が軽減された。

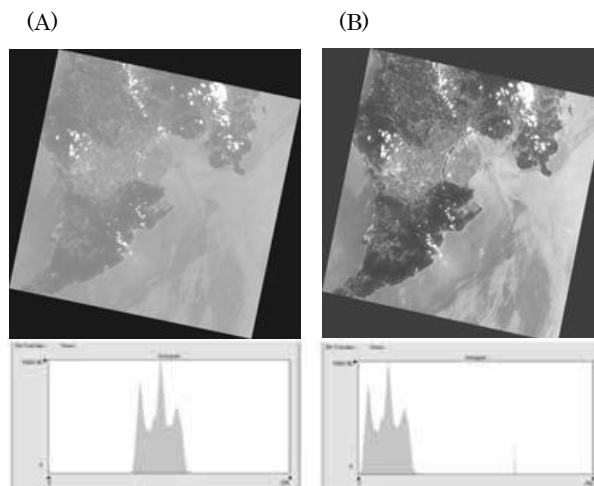


Fig.1 The images of band1 on ALOS/AVNIR-2 obtained at 25th July 2007, A is original image and B is the image of atmospheric effect corrected by means of differenced histogram of brightness.

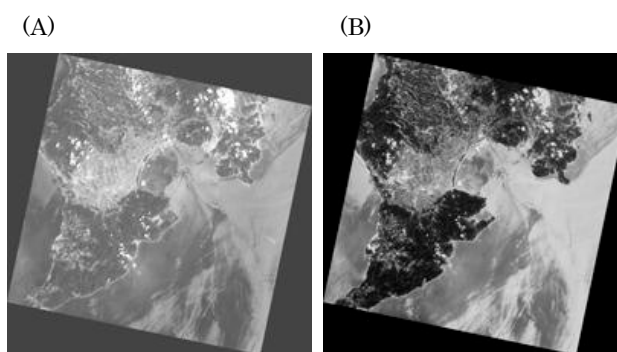


Fig.2 The images of band1 on ALOS/AVNIR-2 obtained at 25th July 2007, A is original image and B is the image of topographic effect corrected.

2.3.4 対象葉の葉内含水率の経時変化

Fig.3 は、石川らによって発表された広葉樹の葉内含水率の経時変化である⁵⁾。葉内含水率は本実験期間である24時間までは単調減少が認められる。ただし、植物葉の含水率変化は、指数的に変化することが一般的であるた

め、石川らは、指数近似を行っている⁵⁾。

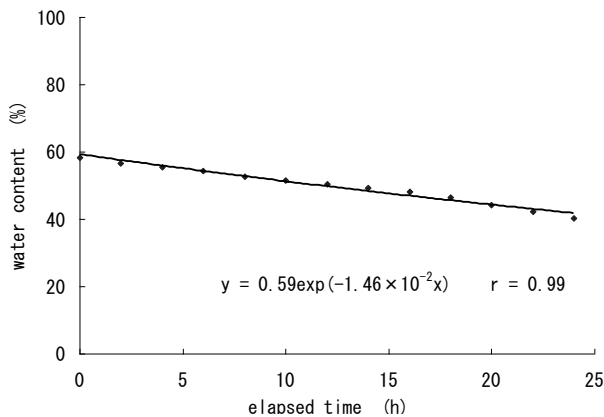


Fig.3 Relationship between water content in the leaves of broad leaf (var. sudaji) and elapsed time⁵⁾.

2.3.5 樹木葉の分光反射特性

Fig.4 は、石川らによって発表されたスダジイの葉内含水率毎の分光反射特性の一例である⁵⁾。

40%~53%までの含水率について 400nm から 700nm の可視域では 550nm 付近にわずかなピークが認められた 700nm~1000nm の近赤外域では可視域に比べ高い反射率を示し、含水率による差異も大きかった。可視域では 440nm と 660nm 付近が、クロロフィル分子の光吸収によって最も反射率が低下し、それに対応しクロロフィルによる吸収が最も小さい 550nm 付近は、反射率が最大となる。近赤外域では、電子遷移に加えて、分子振動の高次倍音や結合音に由来するピークの存在が考えられるが、

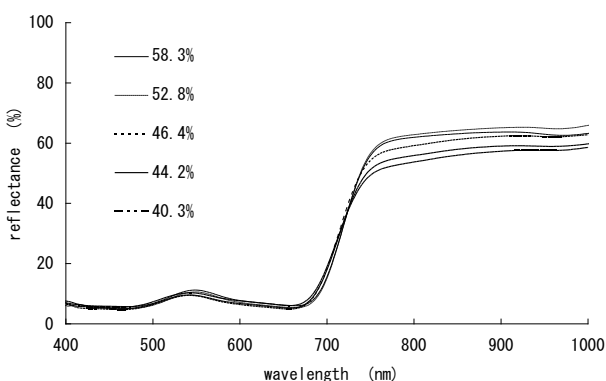


Fig.4 Spectral reflectance curves in the 400 – 1000 nm region corresponding to water contents.

植物葉では、電子遷移、分子振動双方で明確な吸収帯はこの領域には存在しないため、吸収はほぼ 0 となる。結果として 740nm 以降はプラトーな反射率となる。また、660~740nm 付近は、クロロフィル吸収最大から吸収がない領域であるため、クロロフィルの吸収程度によって最大反射率に差異が生じる。クロロフィルの吸収量を変化させる一因として葉内水分含水率も考えられるため¹⁰⁾、水分吸収帯は、この領域には存在しないが、結果として葉内の水分変化によって 740nm 以降の反射スペクトルに差異が生じる。

3. 結果と考察

3.1 指標の検討

樹冠部の葉内含水率の検出は、特定の波長を用いることで可能であることが示されている⁵⁾。実際の衛星データは、撮影時の天候により対象物から反射される放射エネルギーの変動が、画像の Digital Number (画像の濃淡を 0-255 までの数値で表示) に影響を及ぼす。これらの影響を低減させるため、2 つの波長を組み合わせる指標の検討を行った。

ALOS/AVNIR-2 の Band3 と Band4 を用いた以下の正規化指標：NDVI と葉内含水率と検討した式を以下に示す。

$$\text{NDVI} = (\text{Band4} - \text{Band3}) / (\text{Band4} + \text{Band3}) \quad (5)$$

NDVI と樹冠部の葉内含水率の経時変化を Fig.5 に示

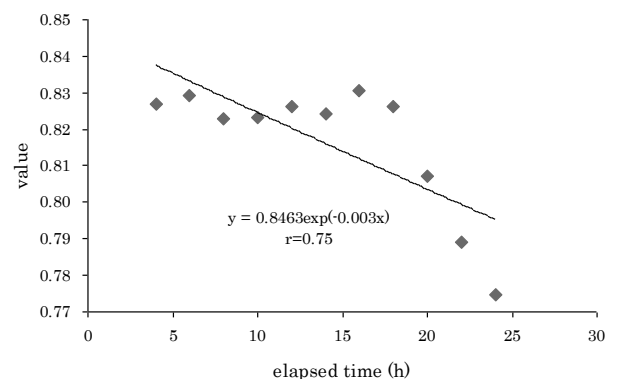


Fig.5 Change of NDVI calculated by average spectra of the broad leaf (var. sudaji) corresponding to band-4 and band-3 of ALOS/AVNIR-2 with elapsed time.

す。24 時間の測定期間内で、NDVI は経過時間、すなわち葉内含水率とともに減少することが示された。

葉内含水率の NDVI による推定精度について、Fig.6 に示す。実測値と推定値と比較した場合、ある程度の高い相関が認められたため、Band-3 と Band-4 を用いた NDVI の指標により、葉内含水率の推定が可能であることが示された。

ここで、各バンドは正規化処理を行っているが、NDVI 画像は完全には地形の影響を除去することはできない。そこで、石川ら⁵⁾ は地形の影響を軽減するため、土壌水分変動率：WCF の概念を導入している。WCF は、異なる二時期の NDVI 画像の変動割合を用いることで、樹冠部の葉内含水率の変動を強調する指標である。今、二時期の衛星データを a, b とすると、

$$WCF = (NDVI_a - NDVI_b) / NDVI_a \quad (6)$$

で表示される。

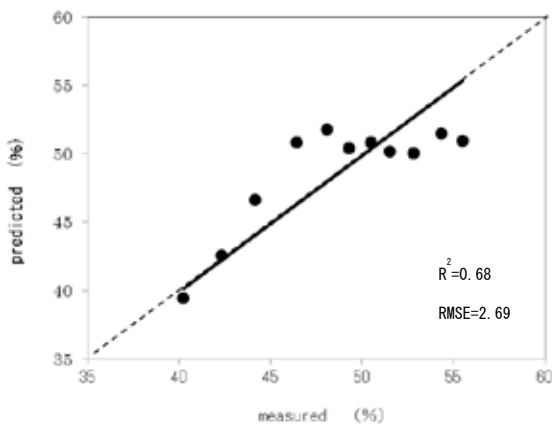


Fig.6 Relationship between measured and predicted water content in the leaves of broad leaf (var. sudaji) by NDVI.

3.2 画像解析

2007 年 1 月 22 日と 2007 年 7 月 25 日の NDVI 画像を Fig.7 と Fig.8 に示す。画像において輝度が高い（明るい）部分が、樹冠部の葉内含水率が高いことを示している。石川ら⁵⁾ は樹冠部の葉の水分状態は土壌水分に密接に関係すると仮定し、今回のようにある程度一様な植生に覆われた地表面において、NDVI 画像が地表付近の

水分分布を表している。

2007 年 1 月 22 日と 2007 年 7 月 25 日における土壌水分変動率の画像を Fig.9 に示す。一般にモンスーン地帯では観測日により通常は土壌水分が異なる。したがって、土壌水分の変動が少ない箇所は、常時土壌水分が高い状態であると推定される。土壌水分が高い箇所では、降雨等により土壌がすぐに飽和状態になりやすく、間隙水圧の上昇や土のせん断強度の低下等が起き、斜面崩壊が



Fig.7 Water distribution images (NDVI images) calculated by ALOS/AVNIR-2 22th January, 2007.

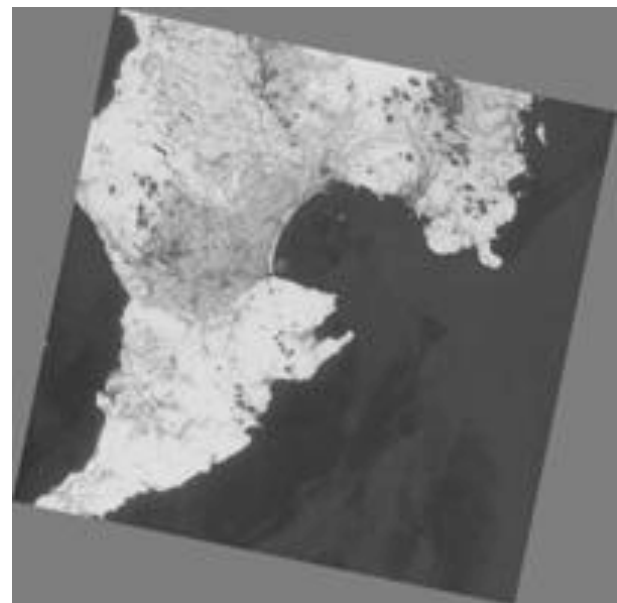


Fig.8 Water distribution images (NDVI images) calculated by ALOS/AVNIR-2 25th July, 2007.

生じやすい箇所である可能性が高いと考えられる。図中に示す○印は、2010年に鹿児島県南大隅町根占で発生した斜面崩壊箇所である。

閾値による強調画像とフォルスカラー画像を重ねた画

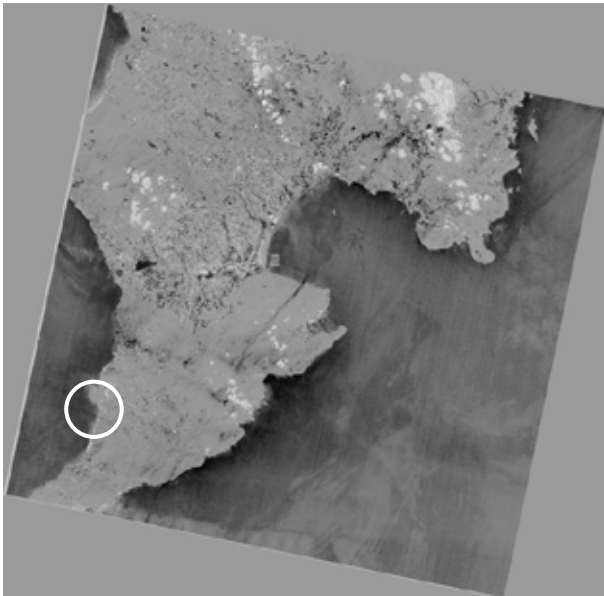


Fig.9 Image of water content feasibility.

$$(WCF=(NDVIa-NDVIb)/NDVI)$$

(○ : Depicts the landslide which occurred in 2010)

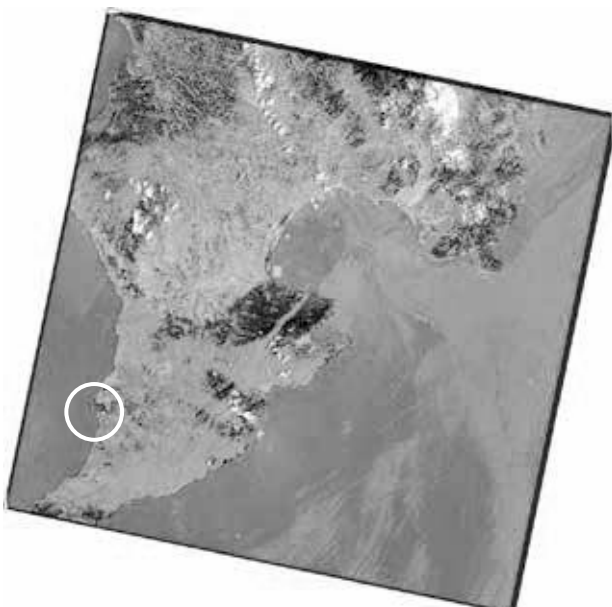


Fig.10 The image which piled up emphasis image by threshold value and false color image.

像を Fig.10 に示す。土壌水分の変動が最も少ないと考えられる $WCF=0$ を中心に閾値 $WCF=-0.05\sim 0.05$ を設定し、黒色で強調された画像を作成しフォルスカラーと重ねた画像を作成した。今回の閾値については画像の変化を段階的に確認しながら決定した。図中に示す○印の斜面崩壊箇所に黒色部が含まれていることから、斜面崩壊地が抽出されている可能性が示唆される。しかし、前述したように傾斜、土質、地層構造などの影響も斜面崩壊の要因であるため、今後、土壌水分以外の要因や土地利用状況を加味した斜面崩壊地の把握法について追求していく必要がある。

4. 摘要

今回、防災ハザードマップ構築の基礎的知見を得るため、ALOS/AVNIR-2 データへの WCF 指標の適用を検討し、衛星画像を用いた場合の本指標の有効性を鹿児島県南大隅地方を対象として調査し、以下の結果を得た。

- ① ALOS/AVNIR-2 データにおいて、Band-3 と Band-4 を用いた NDVI と葉内含水率との関係性が確認できた。
- ② ある程度一様に植生に覆われた地表面に対して、NDVI 画像を作成することで土壌水分分布の可視化が可能となった。
- ③ WCF 画像により黒色で示された箇所の一部が○印で示した崩壊箇所と一致したことから、WCF 画像は崩壊地の予測に有効であると考えられる。

謝辞

この論文の英文検閲については、環境・建築学部人間環境学科ブライアン・F. バークガフニ教授のお世話になりました。ここに感謝申し上げます。

引用文献

- 1). 伊藤健吾・江塚友康・大槻恭一・神近牧男:反射スペクトルによる芝の塩・水ストレス診断.農業気象.59(2):199-204 (2003)
- 2). Kosugi, K., Tsutsumi, D., Mizuyama, T. and Hasegawa, S: Combined Penetrometer Moisture Probe for Measuring Water Content Distribution in Hillslope. *J. Ero. Control Eng.* 57(3):3-13 (2004)

- 3). Tanigawa, T., Yabe, K., Fukuda, Y., and Ebi, T : Effects to vegetation caused by sudden change of groundwater environment. *J. Soil phys.* 73 : 11-18 (1996)
- 4). Uchijima, Z., and Seino, H: Agroclimatic evaluation of net primary of natural vegetation (1) Chikugo model for evaluating net primary productivity. *J. Agric. Meteorol.*, 40: 343-352 (1985)
- 5). 石川 大太郎・湯田 健之・関岡 信一・肥山 浩樹・石黒 悦爾:分光反射特性を利用した斜面崩壊地の予測樹冠の水分変動による土壌水分変動域の抽出事例.農業気象.64(2):61-68 (2008)
- 6). ISHIGURO E., HIYAMA H., TOGO Y., ISHIKAWA D., NANBA H., and MIYAMA H. : Identifying the Secondary Disaster by the Local Heavy Rain using Remote Sensing Data. *J. Agricultural Meteorology*, **60**(5): 889-892 (2005)
- 7). ISHIKAWA D., FUKUDA S., ARIMITSU S., OHBA K., OZAKI Y and ISHIGURO E: A Case Study on Evaluation of Water Contents Change in Leaves (Sudajii) by using Chlorophyll Absorption Band in the 400 – 1100 nm region. *J. Agricultural Meteorology*, 69(3): 201-207 (2013)
- 8). 福田 真也、石川 大太郎、片平 祐介、有満 重徳、灘波 博章、大場 和彦、石黒 悦爾 : 斜面崩壊ハザードマップ構築のための基礎的研究. Landsat/TM データを用いた斜面崩壊地予測手法の開発. *Kyushu J. Agricultural Meteorology*, II : 21:9-14. (2012/11)
- 9). 石黒 悦爾・石川 大太郎・福田 真也・山口 晃裕・有満 重徳・韋 江俊・下高 敏彰・大場 和彦 : リモートセンシングによる自然災害予測のための基礎研究. -樹冠部の葉の含水率の推定手法-・長崎総合科学大学紀要. 53: 41-50 (2013).
- 10). ISHIKAWA D, FUKUDA S., ISHIGURO E. and OHBA K. : Fundamental Study on Estimation of Tree Height of Japan Cedar by using Visible and NIR Spectra in the 400 - 1000 nm Region of Their Leaves, *J. Agricultural Meteorology*, 69(1): 1-8 (2012)
- 11). 小野朗子・藤原 昇・小野厚夫: Landsat/TM スペクトル値の正規化による地形効果と大気効果の抑制. 日本リモートセンシング学会誌 .22(3):318-327 (2002)