

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-

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

Basic Research on Methods to Predict Natural Disasters Using Remote Sensing Data: Leaf Water Content in Tree Canopies

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

Summary

Recently, various meteorological disasters such as landslides and slope failure due to severe localized rainfall have occurred frequently as a result of global warming. Apprehension about landslides is particularly strong in Kagoshima Prefecture, where the tableland is primarily Shirasu soil formed from the accumulation of pyroclastic flows. It is well known that the remote sensing technique and data is a powerful tool for wide-area monitoring to predict the landslides occurring more frequently each year and to prevent natural disasters. To this end, we conducted basic research on the method to estimate leaf water content using spectral reflectance of visible and near infrared region. The indices obtained can be summarized as follows.

This is, the leaf water content can be estimated by: 1) the Landsat TM data from an artificial satellite using Band 3 and Band 4, 2) RI using the rate of green and red wavelengths from high altitude photography, and 3) $ND_{66,75} = (R_{750} - R_{660}) / (R_{750} + R_{660})$ using 550nm and 750nm from spectroscopic images.

The results suggest that the relationship of leaf water content in tree canopies and soil water content in the tree-growing area is closely connected. Our study aims to establish a method to evaluate leaf water content using the remote sensing method, especially the danger of slope failure using the spectral reflectance on leaves.

Keywords : (Remote Sensing, Spectral reflectance, Leaf water content, Prediction of Disaster)

*1 新技術創成研究所客員教授

*2 環境建築学部人間環境学科教授

*3 大学院院生

*4 関西学院大学

*5 鹿児島大学

*6 大福コンサルタント株式会社

2013年 3月 23日受付

2013年 7月 29日受理

1. はじめに

近年、地球温暖化により局地的な豪雨が頻発するようになり、様々な被害が多発するようになってきている。2003年7月に鹿児島北部を中心に日雨量500mm以上の記録的な大雨となり、水俣市宝川内地区では2kmもの大規模な土石流が発生し19名が犠牲になり、菱刈町大山口地区では200mにわたって表層崩壊が起こり、2名が犠牲になった。また、2006年7月にも記録的な大雨があり、大規模な斜面崩壊・大小の河川の氾濫など、多大の被害・損害を被っている。2011年9月は台風12号により紀伊半島を中心に豪雨が発生し、至る所で斜面崩壊を生じた。また、2012年の台風14号と15号により沖縄本島および周辺の島々で数多くの崩壊を生じた。これらの事例以外にも記録的な大雨が局所的に、しかも頻繁に発生し、多くの箇所で斜面崩壊などの土砂災害が生じた。鹿児島県においても2010年7月に南大隅町根占で豪雨による斜面崩壊が起こり、人家に多大の損傷を与えるとともに長期間にわたって幹線道路が封鎖され生活物資の輸送に困難を生じた災害であった。実際に2003年7月に水俣市宝川内地区に発生した崩壊の航空写真を図1に、また2010年の南大隅町根占の斜面崩壊地の位置図と航空連続写真を図2に示す。

鹿児島県内では広域に火砕流堆積物が堆積しており、「シラス」が切り立った台地地形を呈し、斜面崩壊が懸念されている。斜面崩壊は崩壊の深さによって、表層崩壊と深層崩壊に分けられる。表層崩壊は斜面を覆う風化した土層が滑り落ちるものであり、その深さは樹木の根が及ぶ範囲(0.5~2m程度)である。鹿児島県ではシラス斜面で発生する表層崩壊によってしばしば災害が発生している。一方、深層崩壊は風化した基岩が深いところから崩壊するものであり、基岩内の地下水流路が破壊されたときに地下水圧が異常に上昇して発生する。1997年出水市針原で発生した崩壊はその典型である(図4)。これらのことから広域な斜面崩壊地の予測手法の開発は、防災の観点から急務であると考えられる。

リモートセンシングは、植物の光合成に密接に関与する光子の伝達メカニズムの解明ならびに農作物の葉面積・バイオマス・収量予測に関する研究¹⁻¹⁸⁾、山林の樹種判別等に関する研究¹⁹⁻²³⁾が行われている。人工衛星等のリモートセンシングデータは同時に広域を観測できる特

性を有している。一方、分光反射特性を用いて葉の含水率を推定する研究は報告されているが²⁴⁻²⁷⁾、可視・反射域に関する実用的な指標はまだ確立されていない。

このように近年増加しつつある崩壊による災害防止の一助に、リモートセンシング技術が貢献できるかを検討する目的で本研究をはじめた。まず、人工衛星データを利用する場合、次に衛星データが取得できない場合、中域のモニタリングとしての近赤外域のデータが無い航空写真、さらにはいずれのデータが無い場合の対策として手軽に撮影できるデジタルカメラ等を用いた場合についても目的とした。これらの目的のための基礎研究として、分光反射特性による樹冠部葉の含水率の推定する手法の確立を目指すものである。

2. 実験・解析方法

基礎実験と現地調査の2つの方法で実験を行った。まず、基礎実験として、樹木の樹冠部またはその付近の葉の水分含有量を推定する方法の確立を試みた。そのためには、人為的に水ストレスを与え葉の水分含有量を変化させた

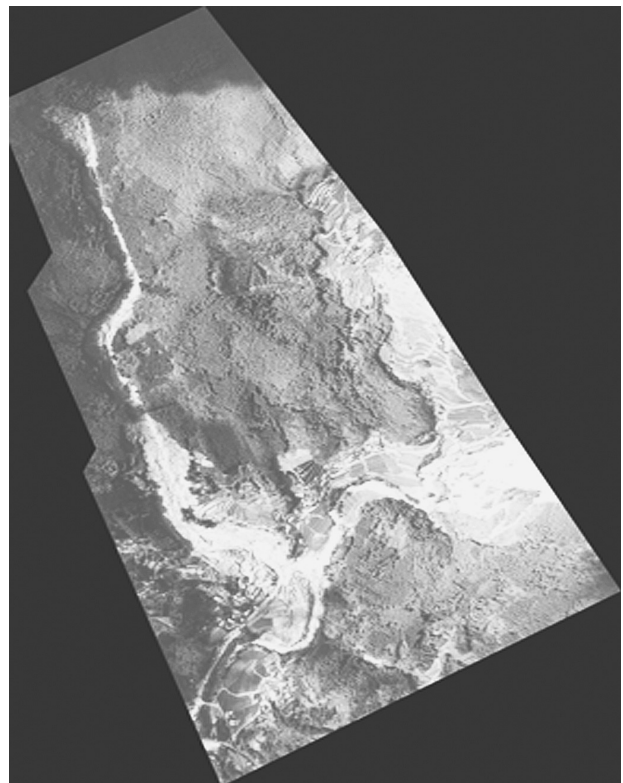


図1 航空写真(水俣市宝川内地区)
2003年7月22日撮影(PASCO(株)提供)

樹冠の分光反射特性を測定する。現地調査としては崩壊が予測される地点に生育している樹冠部の葉の分光反射特性を測定するとともに分光画像を撮影し、現地調査地点を衛星データや航空写真で照合した。

2.1. 基礎実験

山腹に生育する樹種として、広葉樹では最も多く生育しているスダジイ(*Castanopsis cuspidata* Schottky)を、また人工林では針葉樹のスギ(*Cryptomeria japonica* L.)を対象とした。これらの樹種の樹冠部の葉を採取し、携帯用分光反射率計(400nm~1,100nm、3nm 間隔、視野角3度)を用いて測定した。分光反射率測定時に葉の生重量を、また測定終了後80℃で72時間乾燥させ、乾燥重を測定し、葉の含水率を湿潤基準で算出した。図3に基礎実験の風景を示す。

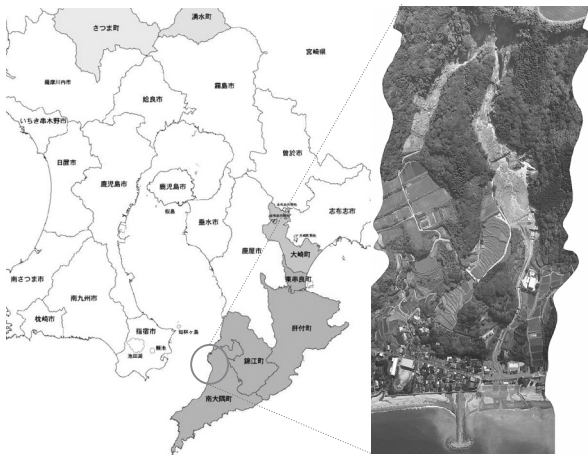


図2 2010年の鹿児島県南大隅町根占の斜面崩壊地



図3 基礎実験の風景

2.2. 現地調査

1997年7月には降り始めから土石流発生直前までに400mmの降雨を観測し、針原川の上流で大規模な山崩れが発生、その崩土が農業用溜め池になだれ込み、水を得て土石流と化した。土石流は麓の針原集落を襲って住宅16棟・非住家2棟をのみ込み、死者21名・重軽傷者14名の犠牲者を出した(図4参照)。この地域は鹿児島大学農学部が湧水地点の調査等を災害後から継続的に行っている。それらデータの結果との比較として、2006年に現地調査を3回行った。

分光反射率の測定には標準白色板を対象とする樹冠の近傍に設置することができないため、図5に示すように分光反射率計から1mの位置に垂直に設置した。一方、ビデオカメラにバンドパスフィルタを装着し、種々の波長帯の分光画像を撮影する際は、画面の一部に標準白色板が入るようにして行った。



図4 航空写真(出水市針原地区)
1997年7月撮影(PASCO(株)提供)



図5 分光反射特性測定風景

2.3. 解析

取得した分光反射特性曲線を、3nmの波長分解能毎に30nm波長帯による移動平均処理を行い、特性曲線の平滑化を行った。衛星データとしてLandsat/TMを想定し、Band-1: 450-520nm、Band-2: 520-600nm、Band-3: 630-690nmとBand-4: 760-900nmの各バンドの平均反射率を算出した。航空写真に対しては、RGBのそれぞれの領域を、B: 400-500nm、G: 500-600nmとR: 600-700nmと想定し、これらの領域の平均反射率を算出した。分光画像に対しては、先ず分光反射曲線を波長に対して微分処理を施し、ピークとなる波長(以後、特性波長と呼ぶ)を抽出した。これらの特性波長を用いて、樹冠部の葉の含水率と相関が高い指標を検討した。

各画像の一部に映っている標準白色板内の平均輝度値を算出し、これらの平均輝度値が100となるように輝度変換を行った。この結果、撮影した樹冠部の輝度値は太陽照度等の影響を受けない、分光反射率となる。分光画像内で特徴が明確な点(Ground Control Point: GCP)を設定し、ERDAS IMAGINE ver.8.1を用いて、これらの修正分光画像の位置合わせを行った。

3. 結果および考察

3.1. 分光反射特性曲線

樹冠部の分光反射の一例として、スダジイの葉の分光反射特性の経時変化を図6に示す。葉の摘葉直後から2時間毎に24時間までは、550nm付近の緑色でわずかなピークが認められるが、400nmから700nmの可視領域では変化はほとんど見られなかった。一方、700nm以上の近赤外領域では非常に高い反射率を示し、しかも時間の経過とともに大きく変化した。

樹冠部から葉を切り取ってからの経過時間と葉の含水率の関係を図7に示す。葉内の含水率は時間とともに非

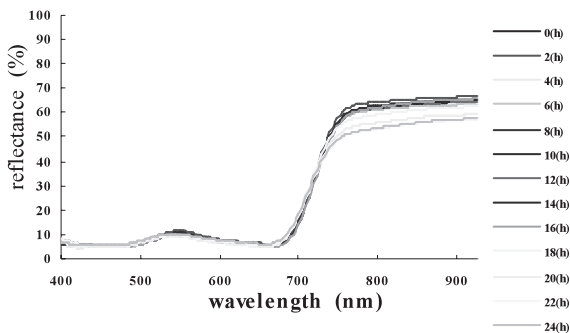


図6 スダジイの葉の分光反射特性の経時変化。

常に高い相関で指数関数的に減少することが認められた。

Landsat/TMの各バンドと航空写真のRGBの各領域に対応する平均分光反射率を算出し、時系列解析を行った。結果を図8と図9に示す。

TMバンドならびにRGB領域に対応した平均分光反射率は経過時間とともに減少した。これらは、Band-1と

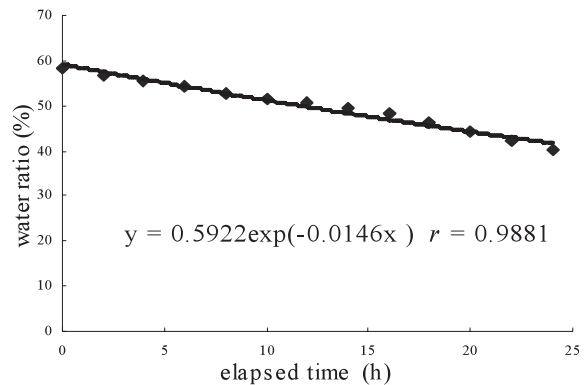


図7 摘葉後の経過時間とスダジイの葉の含水率の関係。

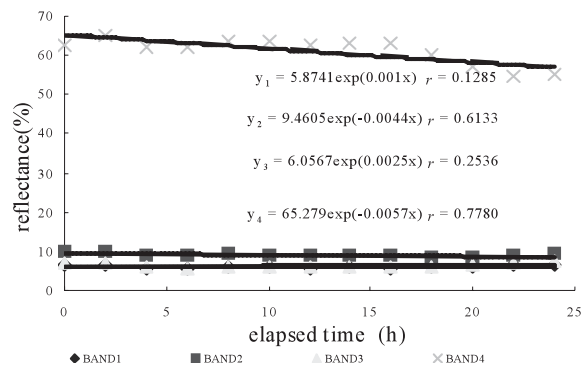


図8 Landsat/TM対応波長帯の平均分光反射率の経時変化。

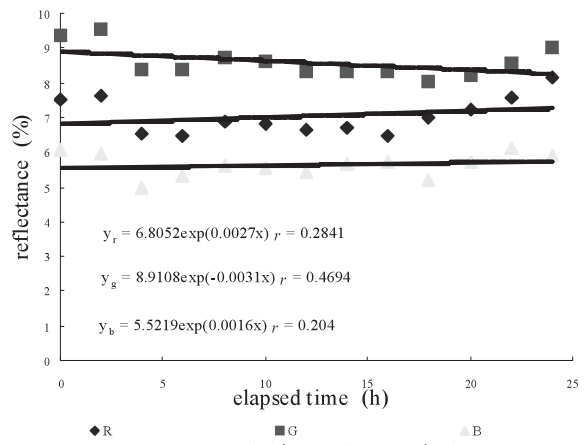


図9 R・G・B領域に対応した波長帯の平均分光反射率の経時変化。

Band-3 では直線回帰ならびに指数回帰でも高い相関は得られなかったが、Band-2 と Band-4 では高い相関が得られた。一方、RGB 対応では、いずれの波長帯でも TM バンドよりは低い相関となった。TM バンドと RGB の相関の差異は、これらの観測波長の幅に起因するものと考えられる。

スダジイの葉の分光反射特性曲線を微分した結果を図 10 と図 11 に示す。図 10 の一次微分曲線では、520nm、570nm と 720nm にピークを生じた。一方、図 11 の二次微分曲線では、550nm、590nm、700nm と 750nm にピークを生じた。これらのピーク波長における分光反射率の経時変化を図 12 に示す。550nm、570nm、750nm の波長帯において時間が経過し乾燥するにともない高い相関でピーク値は指数関数的に減少することが明らかとなった。ピーク値を生じた波長帯が経時変化している場合、それらの波長を特性波長と定義する。分光反射特性より算出した特性波長のピーク値は指数的に減少していることから、ピーク値の経時変化が葉内水分と関係があることが示唆された。

3.2 指標の検討

Landsat/TM のバンドに対応した平均分光反射率と葉内の水分含有率に対応した経過時間の関係をスダジイの場合について検討した。図 13 に示す散布図からは、両者の関係は 2 直線で近似する方が適切だと考えられる。しかし、この場合、前半部と後半部になぜ分割しなければならないかの現象の把握が困難であり、またどの含水率が変曲点になるかの理由を明確にすることが困難である。そこで、60~40%の範囲内、換言すれば 25 時間内は同一の傾向で変化すると考え、Landsat/TM の複数のバンドを用いた葉内水分含有率を推定する指標を検討した結果、

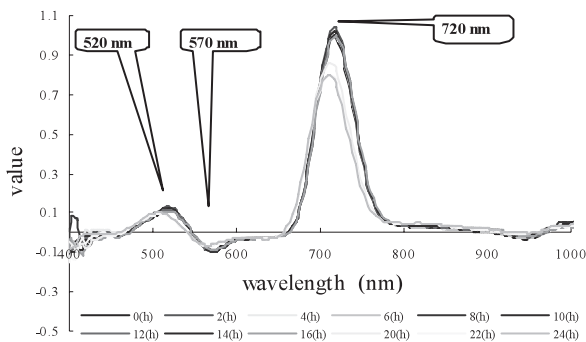


図 10 分光反射曲線の一次微分.

種々の組み合わせの中で NDVI が最も相関が高かった。以下に式を示す。

$$NDVI = (Band-4 - Band-3) / (Band-4 + Band-3) \quad (1)$$

NDVI 値は時間の経過、すなわち水分含有率とともに指数的に減少することが示された(図13)。

針葉樹における水分含有率推定指標は約 200 時間の測定時間内で、非常に高い相関で直線的に減少した。しかし、広葉樹の場合、葉の水分が減少すると葉は次第に萎縮し、底部が露出するようになり、測定範囲がミクセル

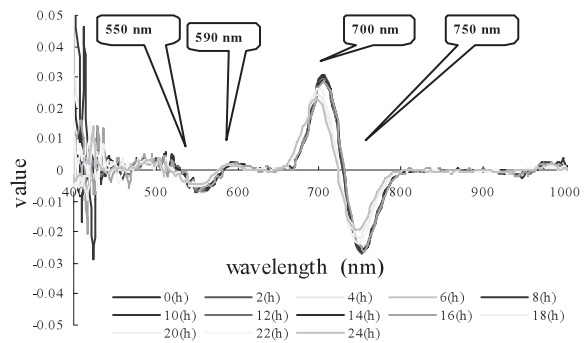


図 11 分光反射曲線の二次微分.

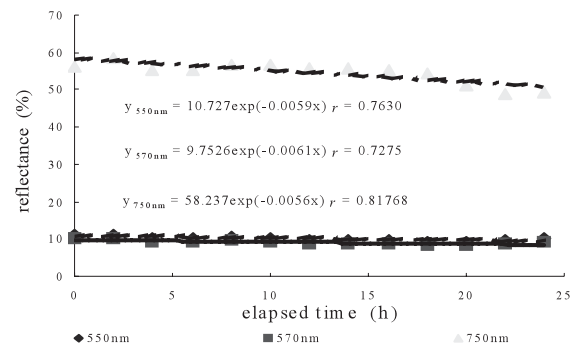


図 12 特性波長の経時変化.

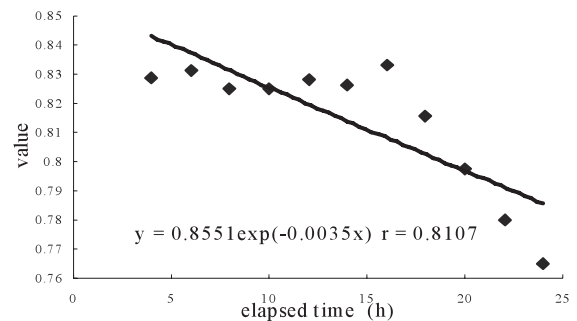


図 13 スダジイの分光反射特性から得られた NDVI の経時変化
 $NDVI = (Band-4 - Band-3) / (Band-4 + Band-3)$

状態となった。そのため測定可能時間は、針葉樹の場合の約1/10の24時間だった。このように、針葉樹と広葉樹では水分含有率の経時変化の様子は異なったが、いずれもNDVIで検出できることが示された。

近赤外域の観測帯を有しない航空写真の場合は緑と赤の波長帯の比を用いたR-index,

$$RI = R_G / R_R, \quad (2)$$

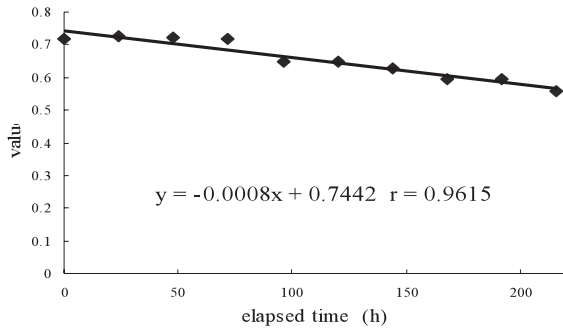


図14 スギの分光反射特性から得られたNDVIの経時変化
 $NDVI = (Band-4 - Band-3) / (Band-4 + Band-3)$

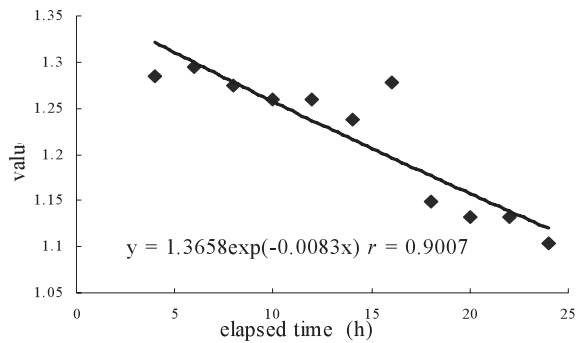


図15 スダジイの分光反射特性から得られたRatio indexの経時変化
 $Ratio\ index = R_G / R_R$

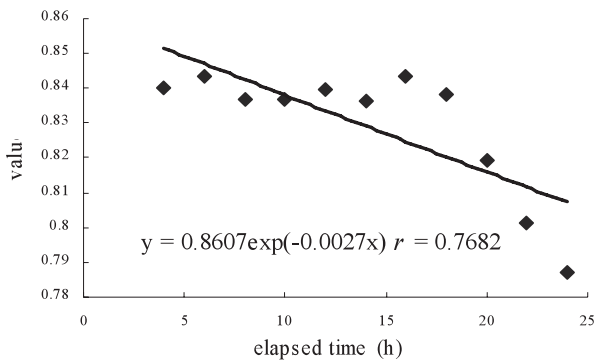


図16 スダジイの分光反射特性から得られたND_{66,75}-indexの経時変化.
 $ND_{75,66}\text{-index} = (R_{750} - R_{660}) / (R_{750} + R_{660})$

が高い相関を示した(図15)。

さらに、衛星データと航空写真のいずれのデータが無い場合を想定して、分光画像で代用する場合は、図16に示すように中心波長が660nmと750nmの正規化指標、

$$ND_{75,66}\text{-index} = (R_{750} - R_{660}) / (R_{750} + R_{660}) \quad (3)$$

が高い相関を示した。

よって、近赤外領域の使用が可能な人工衛星データと分光画像の場合はNDVIが、近赤外領域の使用ができないRGB航空写真の場合はRIが、葉の含水率推定指標に有効であることが示された。

ここで、NDVIの値は最大値が1であり、またRIの値は上限がないことを考慮すると、葉の含水率の実際の変動範囲を想定してNDVIとRIのいずれの指標が高い検出感度となるかについて検討する必要がある。

3.3. 分光画像の解析

樹冠部の葉の水分はその樹木が生育している地形や位置に影響を受けるが、基本的には土壌の水分と密接な関



図17 針原地区の現場写真(06年8月19日撮影)



図18 針原地区樹冠の葉の含水率表示画像
 (06年5月27日撮影)

係がある。ここで上述の指標を適用して得た水分分布画像は地形や方位の影響を受ける。しかし、ある期間内の含水率の変動割合には地形等の影響が少ないと考えられる。

そこで、土壌水分の変動率[WCF]という概念を案出し、以下の式で表示した。

$$WCF = (ND_A - ND_B) / ND_B \quad (4)$$

ここで、 ND_A と ND_B は異なった撮影日における正規化指標画像である。

図17 に針原の06年8月19日の現地状況を示す。画面右部に崩壊した裸地面が観測されるが、06年5月27日と6月4日の調査時点では斜面崩壊は観測されなかった。6月4日から8月19日の間の7月22日に記録的な大雨、8月11日の台風11号のいずれかにより崩壊したものと考えられる。そこで、5月27日と6月4日の分光画像の解析を行った。樹冠部の葉の含水率の分布を図18と図19に示す。これらの図では樹冠部表面の凹凸の影響がみられた。

図20 に5月27日から6月4日にかけての土壌水分の変動率を示す。図17の斜面崩壊部分に相当する箇所の含水比

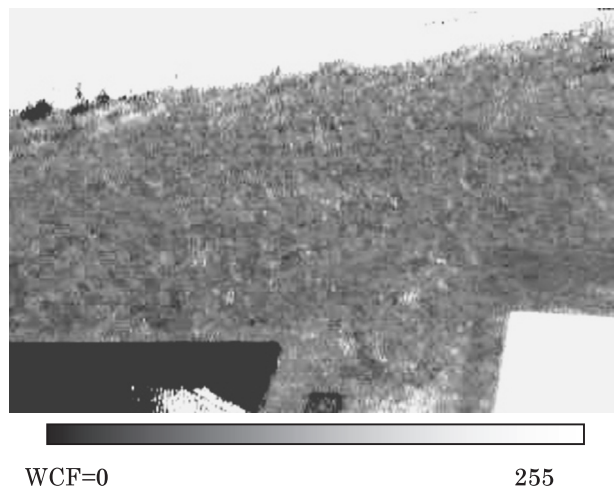


図19 針原地区の樹冠の葉の含水率表示画像
(06年6月4日撮影)

変動率は図20では他の箇所よりも黒く表示されている。従って、樹冠部の葉の水分量は地下の土壌の水分量と密接な関係があり、土壌水分の変動が少ない箇所では一般に水が飽和していると考えられ、崩壊の危険性が高いことが示唆された。

3.4. 航空写真の解析例

1997年と2000年の航空写真をRGBに分解し、緑色と赤色の比、R-Index、適用した地表面水分分布画像を図21AとBに示す。これらの画像で共通の部分に対してWCFを適用して作成した土壌水分の変動率画像を図21Cに示す。図20の分光画像の場合と同様に、図21C中で黒色部は変動率が少ない箇所を示している。しかし1997年から2000年のカラー写真を比較すると、この期間にほぼ中央部では伐採が行われ、土地被覆が異なっていた。その結果、含水率の変動が少ない、すなわち崩壊危険区域だとして抽出されたこの黒色部は土地被覆分類の差異によるものであり、右上の土地被覆が同じである黒色部



WCF=0 255
図20 針原の土壌水分の変動率表示画像
(06年5月27日と6月4日撮影)

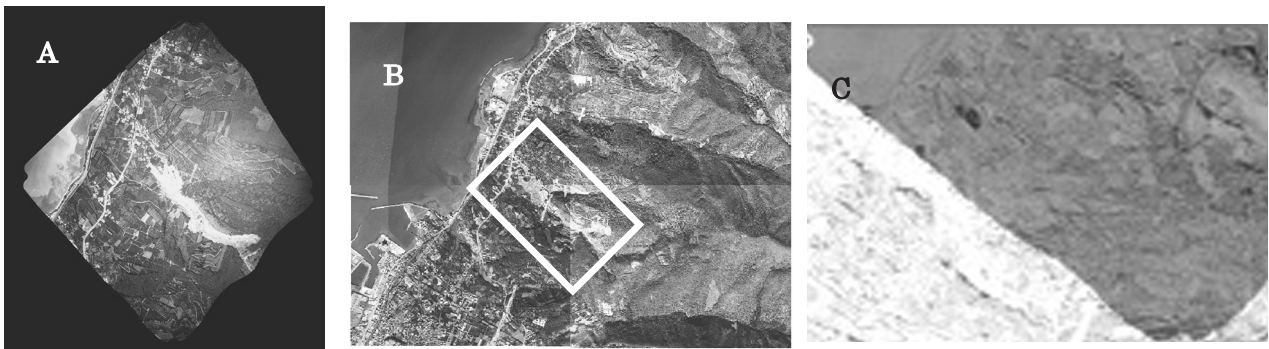


図21 航空写真による広域モニタリング A: 1997年、B: 2000年、C: 土壌水分の変動率表示画像

のみが崩壊危険区域だと考えられる。

4. まとめ

農作物の収量予測・生育調査ならびに山林の樹種判別等に利用されているリモートセンシング技術を、近年頻発している斜面崩壊地を予測し、災害の防止を目的とした研究を行った。可視・近赤外域の分光反射特性を用いて樹冠部の葉の含水率を推定する実用的な指標の確立を目指した基礎研究として以下の結果を得た。

- ① 人工衛星(Landsat/TM)の場合は Band-3 と Band-4 を用いた NDVI が最も含水率の推定に有効である。
- ② 航空写真の場合は緑と赤の波長帯の比を用いた RI が有効である。
- ③ 分光画像の場合は 660nm と 750nm の波長を用いた $ND_{75,66} = (R_{750} - R_{660}) / (R_{750} + R_{660})$ が有効である。

さらに、これらの指標の実用にあたっての検出精度を検討するために、WCF という概念を導出し、分光画像と航空写真に適用した。その結果、土壌水分の変動が少ない、すなわち危険個所の抽出には、同じ土地被覆であるという条件下で、一定の成果で検出可能なことが示され、これらの指標の有用性が示唆された。

謝 辞

この論文の英文校閲については、環境・建築学部人間環境学科ブライアン・F. バークガフニ教授に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) MAJOR D. J., G. B. SCHAALIJE, G. ASRAR and E. T. KANEMASU, (1986). Estimation of whole-plant biomass and grain yield from spectral reflectance of cereals. *Can. J. Remote Sens.*, **12**:47-54.
- 2) MYNENI R. B., R. B. BURNETT, G. ASRAR and E. T. KANEMASU, (1986). Single scattering of parallel direct and axially symmetric diffuse solar radiation in vegetation canopies. *Remote Sens. Environ.*, **20**:165-182.
- 3) SELLERS P. J., (1986). Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration. *Int. J. Remote Sens.*, **6**:1335-1372.
- 4) WEISER R. L., G. ASRAR, G. P. MILLER and E. T. KANEMASU. (1986). Assessing grassland biophysical characteristics from spectral measurements. *Remote Sens. Environ.*, **20**: 141-152.
- 5) POWERS B. J. and S. A. W. GERSTL, (1987). *Modeling of Atmospheric Effects on the Angular Distribution of a Backscattering Peak*, LANL Rep. LA-UR-87-572. Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, New Mexico.
- 6) MAJOR D. J., S. SMOLIAK, G. ASRAR and E. T. KANEMASU, (1988). Use of spectral reflectance to study the effects of various range improvement treatments in Southern Alberta. *Can. J. Plant Soc.*, **68**:1017-1023.
- 7) ROSS J. and A. L. MARSHAK, (1988). Calculation of the canopy bidirectional reflectance using the Monte Carlo method. *Remote Sens. Environ.*, **24**:213-225.
- 8) BADHWAR G. D., R. B. MACDONALD and N. C. MEHTA, (1986). Satellite-derived leaf-area-index and vegetation maps as input to global carbon cycle models: a hierarchical approach. *Int. J. Remote Sens.*, **7**(2):265-281.
- 9) FUNG I. Y., C. J. TUCKER and K. C. PRENTICE, (1986). On the application of the AVHRR vegetation index to study the atmosphere-biosphere exchange of CO₂. *J. Geophys. Res.*, **92**(3):2999-3015.
- 10) KIMES D. S., W. W. NEWCOMB, R. F. NELSON and J. B. SCHUTT, (1986). Directional reflectance distributions of a hardwood and pine forest canopy. *IEEE Trans. Geosci Remote Sens.*, **GE-24**:281-293.
- 11) KIMES D. S., P. J. SELLERS and W. W. NEWCOMB, (1986). Hemispherical reflectance (albedo) dynamics of vegetation canopies for global and regional energy budget studies. *J. Clim. Appl. Meteorol.*, **26**(8):959-972.
- 12) TUCKER C. J., I. Y. FUNG, C. D. KEELING and R. H. GAMMON, (1986). Relationship between atmospheric CO₂ variations and a satellite-derived vegetation index. *Nature (London)*, **319**:195-199.

- 13) SELLERS P. J., (1987). Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration. II. The role of biophysics in the linearity of their interdependence. *Remote Sens. Environ.*, **21**: 143-183
- 14) WESSMAN C. A., J. D. ABER, D. L. PETERSON and J. M. MELILLO, (1987). Foliar analysis using near infrared reflectance spectroscopy. *Can J. For. Res.*, **18**:6-11.
- 15) WESTMAN W. E., (1987). Aboveground biomass, surface area, and production relations of red fir (*Abies magnifica*) and white fir (*A. concolor*). *Can J. For Res.*, **17**:311-319.
- 16) WESTMAN W. E. and C. V. PRICE, (1987). Remote detection of air pollution stress to vegetation: Laboratory-level studies. *Proc. Int. Geosci. Remote Sens. Symp. (IGARSS'87)*. Ann Arbor, Michigan, pp.451-456.
- 17) WILSON M. F., A. HENDERSON-SELLERS, R. E. DICKINSON and P. J. KENNEDY, (1987). Sensitivity of the Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme (BATS) to the inclusion of variable soil characteristics. *J. Clim. Appl. Meteorol.*, **26**:341-362.
- 18) WOODCOCK C. E. and A. H. STRAHLER, (1987). The factor of scale in remote sensing. *Remote Sens. Environ.*, **21**:311-332.
- 19) CARD D. H., D. L. PETERSON, P. A. MATSON and J. D. ABER, (1988). Prediction of leaf chemistry by the use of visible and near infrared reflectance spectroscopy. *Remote Sens. Environ.* **26**:123-147.
- 20) PETERSON D. L., J. D. ABER, P. A. MATSON, D. H. CARD, N. SWANBERG, C. WESSMAN and M. A. SPANNER, (1988). Remote sensing of forest canopy and leaf biochemical contents. *Remote Sens. Environ.*, **24**:85-108.
- 21) RUNNING S. W. and R. R. NEMANI, (1988). Relating the seasonal pattern of the AVHRR normalized difference vegetation index to simulated photosynthesis and transpiration of forests in different climates. *Remote Sens. Environ.*, **17**:472-483.
- 22) SHULTIS J. K. and R. B. MYNENI, (1988). Radiative transfer in vegetation canopies with anisotropic scattering. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, **39**:115-129.
- 23) WESSMAN C. A., J. D. ABER, D. L. PETERSON and J. M. MELILLO, (1988). Remote sensing of canopy chemistry and nitrogen in temperate forest ecosystems. *Nature*, **335**:154-456.
- 24) P. CECCATO, S. FLASSE, S. TARANTOLA, S. JACQUEMOUD, and J-M. GRE'GOIRE, (2001). Detecting vegetation leaf water content using reflectance in the optical domain. *Remote Sens. Environ.*, **77**:22-33.
- 25) D. A. SIMS, and J. A. GAMON. (2003), Estimation of vegetation water content and photosynthetic tissue area from spectral reflectance: a comparison of indices based on liquid water and chlorophyll absorption features. *Remote Sens. Environ.*, **84**:526-537.
- 26) H. C. CLAUDIO, Y. CHENG, D. A. FUENTES, J. A. GAMON, H. LUO, W. OECHEL, H-L. QIU, A. F. RAHMAN, and D. A. SIMS. (2006). Monitoring drought effects on vegetation water content and fluxes in chaparral with the 970 nm water band index. *Remote Sens. Environ.*, **103**:304-311.
- 27) R. COLOMBO, M. MERONI, A. MARCHESE, L. Busetto, M. ROSSINI, C. GIARDINO, and C. PANIGADA. (2008). Estimation of leaf and canopy water content in poplar plantations by means of hyperspectral indices and inverse modeling. *Remote Sens. Environ.*, **112**:1820-1834.