

リモートセンシングデータによる斜面の  
土壌水分変動域の抽出に関する基礎的研究

福 田 真 也

2015

## < 目 次 >

第1章	緒言	1
1.1	本研究の背景	1
1.2	本研究の目的	3
第2章	リモートセンシング	6
2.1	リモートセンシングの概念	6
2.2	センサが取得する電磁エネルギー	7
2.3	センサによるリモートセンシングの種類	8
2.4	分光反射率と分光反射特性	14
2.5	解析指標	16
2.6	画像処理と画像解析	21
2.7	前処理	21
2.8	土壌水分変動域指標	22
第3章	樹冠部の葉内含水率の推定手法及び航空写真データによる土壌水分変動域の抽出の検討	24
3.1	はじめに	24
3.2	材料及び方法	24
3.3	結果及び考察	27
3.4	摘要	34

第4章	人工衛星 Landsat-5/TM を用いた土壌水分変動域の検討	
	の検討 .....	37
4.1	はじめに .....	37
4.2	材料及び方法 .....	37
4.3	結果及び考察 .....	48
4.4	摘要 .....	58
第5章	人工衛星 ALOS/AVNIR-2 データを用いた土壌水分変動域	
	の抽出の検討 .....	62
5.1	はじめに .....	62
5.2	材料及び方法 .....	62
5.3	結果及び考察 .....	74
5.4	摘要 .....	83
第6章	地上リモートセンシングによる土壌水分変動域の抽出の	
	検討 .....	84
6.1	はじめに .....	84
6.2	材料及び方法 .....	84
6.3	結果及び考察 .....	88
6.4	摘要 .....	115
第7章	総括 .....	117
	謝辞 .....	123
	参考文献 .....	125
	SUMMARY .....	135

## 第1章 緒言

### 1.1 本研究の背景

近年、地球温暖化の影響によって局所的な豪雨が頻発するようになり、全国各地で様々な被害が発生している。事例として2003年7月に鹿児島北部を中心に24時間雨量500mm以上の記録的な大雨となり、水俣市宝川地内では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2010年6月中旬から7月上旬に日本列島付近に梅雨前線が停滞し、鹿児島県と宮崎県の県境にある霧島市（鹿児島県）と都城市（宮崎県）付近、及び鹿児島県南大隅町付近に1時間雨量100mm以上の豪雨をもたらした。その豪雨が要因となり、2010年7月4日に鹿児島県南大隅町根占で斜面崩壊が起こり、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。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では、熊本、大分、福岡の各県を中心に1時間雨量が熊本県阿蘇市で108mm、福岡県八女市で91.5mmを観測するなど記録的な大雨が局所的にしかも頻繁に発生し、多くの箇所でも斜面崩壊などの土砂災害が発生した。3県で30人が死亡、2人が行方不明となり、住宅の全壊は約1,860棟に及んだ。さらに2013年10月に伊豆大島において、台風26号により24時間雨量が800mmを超え、大規模な土砂災害が発生した。この土砂災害では、伊豆大島は火山地域であり、溶岩に堆積していた火山灰を主体とする表層土が崩壊し、狭い範囲に多くの表層崩壊が集中し、大量の泥流と流木が発生し、大規模な土砂災害となり甚大

な被害となった。

鹿児島県は火山地域であり、土壌は火山堆積物からなるシラス台地が広く分布しており、豪雨による土砂災害が繰り返し発生している。土砂災害（がけ崩れ・地すべり・土石流）の発生件数は全国的にみても多く、平成元年から平成20年までの20年間の発生件数は全国1位である。平均すると1年間に90件の土砂災害が発生している状況である<sup>1)</sup>。

気象庁ではこのような豪雨に対して、従来の警報をはるかに超える現象に対して特別警報の運用を2013年8月から開始し、斜面崩壊等の災害への警戒を呼び掛けている。また斜面崩壊などの土砂災害に対しては、土砂災害防止法に基づく土石流や急傾斜の警戒区域や特別警戒区域を設定し、土砂災害防止の工事等のハード対策と併せて、危険区域の周知、警戒避難体制の整備、住宅等の新規立地の抑制、既存住宅の移転促進等のなどのソフト対策を実施している<sup>2)</sup>。

従来の土砂災害ハザードマップとして、土砂災害警戒区域及び特別警戒区域並びにこれらの区域における土砂災害の発生要因となる自然現象の種類（急傾斜の崩壊、土石流、地滑り）を表示した図面に、規定する事項（①土砂災害に関する情報の伝達方法、②急傾斜の崩壊等のおそれがある場合の避難地に関する事項、③その他警戒区域における円滑な警戒避難を確保する上で必要な事項）を記載したものがあつた。それに加え現在は、降雨量データ、過去の災害履歴を踏まえたハザードマップや三次元の地形データ解析による手法が提案されている。しかしながら、土砂災害は毎年のように全国各地で発生しており、人命にかかわるような大事故や、長期の交通止めとなつたりして、社会的に混乱をさせることがある。そこで未然に

防災措置を図る上で、斜面崩壊に関するハザードマップ構築の際に、斜面崩壊の危険性が高い箇所を事前に把握することは重要な課題となっている。

リモートセンシングは、離れた所から直接触れずに対象物を同定あるいは計測し、またはその性質を分析する技術である<sup>3)</sup>。その利用用途は屋内での工業計測から広域的な陸域・大気・海洋情報の収集や地球規模の環境変動の監視まできわめて多岐にわたっている。また土地開発の進展や緑地・植生の変化監視や森林減少など地球スケールの自然状況を把握するのに不可欠な手段となっており、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・品質推定に関する研究<sup>4-26)</sup>、山林の樹種判別等に関する研究<sup>27-31)</sup>が行われている。このリモートセンシング技術を応用して、斜面崩壊ハザードマップ構築のために利用できれば、生活を脅かす土砂災害の防災上有効な手法となると考えられる。

## 1.2 研究目的

斜面崩壊は、斜面表層の土砂や岩石が地中のある面を境にして滑り落ちる現象であり、山崩れ、がけ崩れ、あるいは一般に土砂崩れと言われているものはこれに相当するとされている<sup>32)</sup>。

斜面が崩壊する場合、その原因には素因と誘因がある。素因とは地山がもともと持っている崩れやすい地質等の条件をいい、斜面の場合、次の三つが挙げられる。①物性：土質、岩質条件をいい、地山が硬いか柔らかいか、風化に対する耐久性、亀裂の多少、浸食に対する抵抗力などである。②構造：地質構造をいい、地層がどのよ

うに構成されているか、それらの地層や節理が斜面に対してどちらの方向に傾斜しているか、断層がどのように入っているかなどである。③水：地下水、土中水をいう。つまり、地中の含水量の多少、地下水位（水圧）の高低、裂化水（水みち）や湧水の有無などである。また次に誘因は外部から与えられるものであり、斜面の場合、次の三つが挙げられる。①人為的誘因：苛酷な設計、施工や維持補修の不備などである。②降水：集中豪雨、長雨、春先の雪融けをいう。つまり、一度に表面水が多量に流れる場合や長い期間の水の補給により、地下水位（間隙水圧）が異常に上昇した場合などである。③地震：動的な外力による滑動力の増加である。

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。そこで、斜面崩壊の素因の一つである斜面の土壌水分に着目し、リモートセンシングにより土壌水分の状態がある程度推定可能となれば、斜面崩壊の可能性がある箇所を事前に把握し、斜面崩壊の発生予測精度の向上に繋がると考えられる。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<sup>33,34)</sup>。これまで石川ら(2008)は、樹冠部の葉内含水率と分光反射特性の関係から、土壌水分変動域の抽出する試みを報告している<sup>35-39)</sup>。

リモートセンシングで用いるデータとしては人工衛星データ、航空機ならびにデジタルカメラで撮影した画像等がある。人工衛星データは広域な観測には有益であるが、波長分解能、空間分解能が限られ、しかも観測周期（時間分解能）に制限を受ける。航空写真データは人工衛星データに比較すると広域な観測領域は劣るものの空間分解能に優れている。観測頻度を上げ時間分解能を高めることも

可能であるが、データを取得する際のコストの面で頻繁に利用することができないのが現状である。

本研究では、上記の特性を考慮し、近赤外域の観測帯を有しない航空写真データにおいて、樹冠部の葉内含水率の推定手法について検討を行い、土壌水分変動域の抽出を試みた。次に近赤外域の観測帯を有する人工衛星データとして Landsat-5/TM データと、波長分解能や時間分解能がほとんど同じであるが、空間分解能が 10m と面積比で約 10 倍の精度を有する ALOS/AVNIR-2 データを用いて、土壌水分変動域の抽出精度の検討を行った。さらに人工衛星データに比べて空間分解能が非常に高くかつ簡易的なデジタルカメラを利用した地上リモートセンシングによる分光画像データを使用し、土壌水分変動域の抽出の検討を行った。



## 第2章 リモートセンシング

### 2.1 リモートセンシングの概念

リモートセンシング技術は、地球観測衛星等のように遠く離れたところからでも、対象物に直接触れずに対象物の大きさ、形及び性質を観測する技術である。対象物に直接触れることなく観測できるのは、観測を行う対象物が反射または放射している光等の電磁波の特性を利用している。観測の対象物が反射または放射している光等の電磁波は、地球観測衛星に載せられたセンサー（または「観測機器」）で受けとめている。リモートセンシングによって電磁波の観測から地表の対象物や現象を判読・解析できるのは、「全ての物体は種類及び環境条件が異なれば、異なる電磁波の反射または放射の特性を有する」という物体の電磁波特性に基づいている。つまり、リモートセンシングとは、物体から反射または放射される電磁波の固有性に着目し、電磁波を観測して、物体の識別やそれが置かれている環境条件を把握する技術である<sup>40,41)</sup>。

リモートセンシングでは、利用する電磁波のスペクトル帯域により、可視・近赤外リモートセンシング、熱赤外リモートセンシング、マイクロ波リモートセンシングの3タイプに分けることができる。可視・近赤外リモートセンシングにおいて観測する電磁波の放射源は太陽であり、データは地表対象物の反射率に大きく依存する。例外として、レーザレーダがあり、この放射源は装置自身である。熱赤外リモートセンシングは、観測する電磁波の放射源は対象物である。常温の地表物体は約10,000nmをピークとする電磁波を放射する。マイクロ波リモートセンシングにおいて観測する電磁波の放射

源は対象物の場合(受動)とレーダの場合(能動)がある。受動では対象物のマイクロ波放射を観測し、能動ではレーダから送信されたマイクロ波に対する対象物の散乱の強さ、すなわち後方散乱係数を観測している。

## 2.2 センサーが取得する電磁エネルギー

みかけの単位面積から単位時間で単位立体角に放射される電磁エネルギーは放射輝度と呼ばれている。ここで、みかけの単位面積とは放射される方向から見た単位面積であり、放射方向に直行する平面への正射影が単位面積となる物体の表面部分面積のことである。

入射する全ての電磁波を完全に吸収し、反射も透過もしない仮想的な物体のことを黒体と呼ぶ。熱力学的平衡状態にある物体から放出されるエネルギーと、吸収されるエネルギー比の物質によらず一定で、波長 $\lambda$ と温度 $T$ のみに依存するというキルヒホッフの放射法則(Kirchhoff's law of radiation)から、黒体はある程度の温度において、他の物質よりも大きい放射をする物体であり、完全放射体と呼ばれる。

また黒体放射は、黒体の熱放射のことであり、全ての方向に均等な放射をする。その放射輝度は温度と波長の関数で与えられ、プランクの放射法則で表される。

$$\beta_{(\lambda)} = \frac{2 c^2}{\lambda^5} \times \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{k\lambda T}\right) - 1} \quad (2-1)$$

ここで、

$\beta(\lambda)$ ( $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot nm^{-4}$ ): 黒体の分光放射輝度

$T(K)$  : 黒体の絶対温度

$\lambda$  (nm) : 波長

$c(2.98 \times 10^8 \text{m} \cdot \text{s}^{-1})$  : 光速

$h(\text{J} \cdot \text{s})$  : プランク定数 ( $6.626 \times 10^{-34}$ )

$k(\text{J} \cdot \text{K}^{-1})$  : ボルツマン定数 ( $1.380 \times 10^{-23}$ )

式(2-1)において、 $c$ 、 $h$ と $k$ は定数であるため、プランクの式は、黒体の絶対温度  $T(K)$ と波長  $\lambda$  (nm)の関数として捉えることができる。

図 2-1 に太陽放射に起因する対象物の分光放射輝度と地表放射に起因する対象物の分光放射輝度を比較したものを示す。太陽の表面温度は 6,000K、地上の対象物の平均温度を 300K とした場合、最大ピーク値は太陽では 500nm、対象物では 10,000nm となる。このため、400nm~700nm の可視領域では、太陽光由来の放射輝度がセンサーに最も多く検出される。すなわち、400nm~1,000nm の波長帯を用いた可視・近赤外リモートセンシングでは、地表面に入射した太陽の放射輝度が対象物に反射し、センサーで検出される。また熱赤外リモートセンシングでは、対象物の放射輝度をセンサーで検出している。植生を対象とした場合、この 2 種類の波長帯の放射輝度を用いたリモートセンシングが一般的である。

### 2.3 センサーによるリモートセンシングの種類

センサーは光から電波まで広い波長帯の電磁波を検出することで、様々なデータを取得できる。リモートセンシング技術では、それぞれのセンサーが搭載されている装置(プラットフォーム)によって、

衛星リモートセンシング、航空機リモートセンシング、近接リモートセンシングに大別される<sup>42-59)</sup>。

衛星リモートセンシングは、その軌道や搭載センサー等により特徴づけられる。衛星リモートセンシングの主な種類として、気象衛星ひまわりは、赤道上空約 36,000km の静止軌道から日本を含む西太平洋地区を常時観測し、気象観測を目的としている。静止軌道とは、人工衛星の周期が地球自転周期と一致し、地上からは常に静止しているように見える軌道である。Landsat 衛星は、高度約 700km の太陽同期軌道から雲や水陸の様々な現象を観測する陸域観測を主目的としており、植生状況の把握にもよく使われている。太陽同期軌道とは、衛星の軌道面が地球の公転と同じ傾きに 1 回転する軌道である。ALOS 衛星は、高度約 700km の太陽同期軌道であり、地図作成、地域観測、災害状況把握及び資源探査を主要ミッションとしており、植生状況の把握にもよく使われている。また、気象衛星 NOAA 高度約 850km の極軌道から雲や水陸の様々な現象を観測するのは気象観測が主目的であるが、その観測データは全球的な陸域の植生分布の把握などにも活用されている。ただし、空間分解能は 1km と低い。本研究では、対象物を陸域の植生としているため、衛星リモートセンシングとして、Landsat 衛星及び ALOS 衛星のデータを利用している。

Landsat 衛星は、アメリカが 1972 年に世界で初めて打上げた本格的な地球観測衛星であり、その優れた観測能力から人工衛星によるリモートセンシングの飛躍的な発展を遂げた。その後、2 号と 3 号、更に発展した 4 号、5 号と引き続き打ち上げられ 8 号まであり、

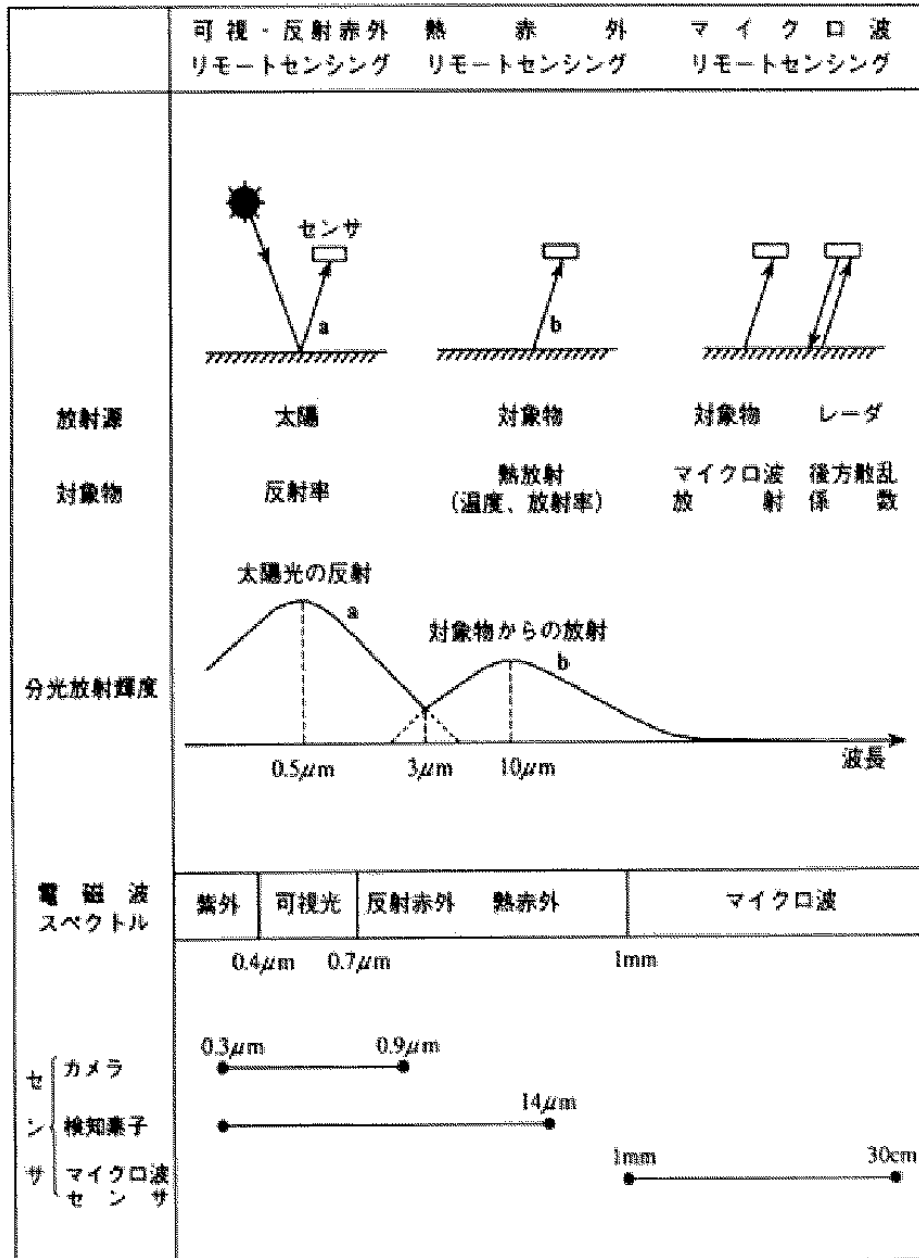


図 2-1 波長帯による 3 種類のリモートセンシング 40)

7号の場合は可視から熱赤外まで8バンドの観測波長を持っている。Landsat-5/TM 衛星の主要諸元を表 2-1 に示す。Landsat 衛星は、地球の全地表面を観測している。衛星画像には、衛星データの1シーンあたりの位置を特定するため東から西を Path、北から南を Low として、Path と Low を組み合わせた番地がふられている。

ALOS 衛星は、Advanced Land Observing Satellite(陸域観測技術衛星)の略で、宇宙航空研究開発機構(JAXA)が開発した地球観測衛星として 2006 年 1 月 24 日に H-II A ロケット 8 号機で打ち上げられた、世界最大級の地球観測衛星である。地球資源衛星 1 号「ふよう」(JERS-1)と地球観測プラットフォーム技術衛星「みどり」(ADEOS)の開発と運用によって蓄積された技術をさらに高性能化したもので、地図作成、地域観測、災害状況把握、資源調査などへの貢献が目的である。観測機器としては、標高など地表の地形データを読みとる「パンクロマチック立体視センサー(PRISM)」、土地の表面の状態や利用状況を知るための「高性能可視近赤外放射計 2 型(AVNIR-2)」、昼夜・天候によらず陸地の観測が可能な「フェーズドアレイ方式 L バンド合成開口レーダ(PALSAR)」の 3 つの地球観測センサーを搭載し、詳しく陸地の状態を観測する機能を持っている。ALOS/AVNIR-2 の主要諸元を表 2-2 に示す。

航空機リモートセンシングは、衛星に比べ飛行高度が低いことから、大気の影響はあまり受けない。また任意の時期に観測が可能のため、天候に左右されずに頻繁に高い空間分解能の観測ができるという利点があるが、コストパフォーマンスは劣る。

地上リモートセンシングは、対象物の状態を最も反映する波長帯を抽出し、ビデオカメラやデジタルカメラなどの簡易な装置を使用

表 2-1 Landsat-5/TM の主要諸元

項目	諸元
打ち上げ日	1984年3月1日
高度	705km
軌道	太陽同期準回帰軌道
回帰日数	16日
周期	98.9分
観測波長帯	Band1:450-520nm
	Band2:520-610nm
	Band3:630-690nm
	Band4:760-900nm
地上分解能	30m
観測幅	185km

表 2-2 ALOS/AVNIR-2 の主要諸元

項目	諸元
打ち上げ日	2006年1月24日
高度	691.65km
軌道	太陽同期準回帰軌道
回帰日数	46日
周期	98.7分
観測波長帯	Band1:420-500nm
	Band2:520-600nm
	Band3:610-690nm
	Band4:760-890nm
地上分解能	10m
観測幅	70km



して観測を行う技術である<sup>60-62)</sup>。地上リモートセンシングは、衛星・航空機リモートセンシングに比べ、広域性は劣るが、時間分解能、波長分解能を任意に設定し観測することができる点が大きな特徴である。頻繁にデータを取得することで、対象物情報の精度を向上させ、衛星・航空機リモートセンシングでは取得できない時期の補完が行えるなど、他のリモートセンシングとの相互補完性を持っている。

## 2.4 分光反射率と分光反射特性

### 2.4.1 分光反射率

反射率とは、ある面への入射光束に対する反射光束の比率である。反射率は0から1までの値で表される。単に反射率といえ、光の波長帯および入射、反射の方向は明確でないことが多いが、もとの定義では、白色光の半球全方向の入射および反射を考える。

反射係数は、試料面と完全反射面が同じ入射光を受けているとき、完全拡散面からの反射光束に対する試料面からの反射光束の比率である。光(電磁波)の波長ごとの反射率を分光反射率または分光反射スペクトルといわれている。

物体の分光反射率は、物体の種類により異なる。物体からの分光放射輝度は分光反射率の影響を受けているため、分光放射輝度を観測することによって遠方から物体を識別することができる。

図 2-2 は代表的な土地被覆である植物、土、水の分光反射率を示したものである。図に示すように、植物では可視領域では 500nm 付近でわずかなピークがあり、近赤外の領域で強い反射をしている。土では植物と特性が異なり、可視領域と短波長赤外域で反射が強く

なり、土の種類によって分光反射率曲線が異なる。また、水は赤外域ではほとんど反射をせずに、きれいな水と濁った水とでは分光反射率曲線が異なる。

#### 2.4.2 分光反射特性

葉内含水率及び分光反射率のデータは、石川ら(2008)によって測定された結果を本研究において使用した。石川ら(2008)では、スタジイ(*Castanopsis cuspidata* var. *sieboldii*)を供試しているが、スタジイは、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ている。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ている。含水率(%)は24時間経過後の対象葉を恒温乾燥器で絶乾(80℃、72時間)後、ウェットベースで算出されている。経過時間によるスタジイの葉内含水率の関係を図 2-3 に示す。葉内含水率は経過時間とともに指数的に減少している。

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している。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( $\text{BaSO}_4$ )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。

図 2-4 は、石川ら(2008)によって報告されているスタジイの葉内含水率毎の分光反射特性である<sup>35)</sup>。40%～58%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ている。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くなっている。可視域では 440nm と 660nm 付近が、クロロフィル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くなっている 550nm 付近は、反射率が最大となっている。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、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 となるとされている。結果として 740nm 以降はプラトーな反射率となっている。また、660～740nm 付近は、クロロフィル吸収最大の領域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ている。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<sup>63)</sup>、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とされている。

## 2.5 解析指標

Landsat 衛星が打ち上げられた以降、可視域の赤と近赤外の波長域の衛星データを用いて様々な指標が提唱されている。特に植物の赤の波長域から近赤外の波長域への急激な反射率の上昇を利用して、

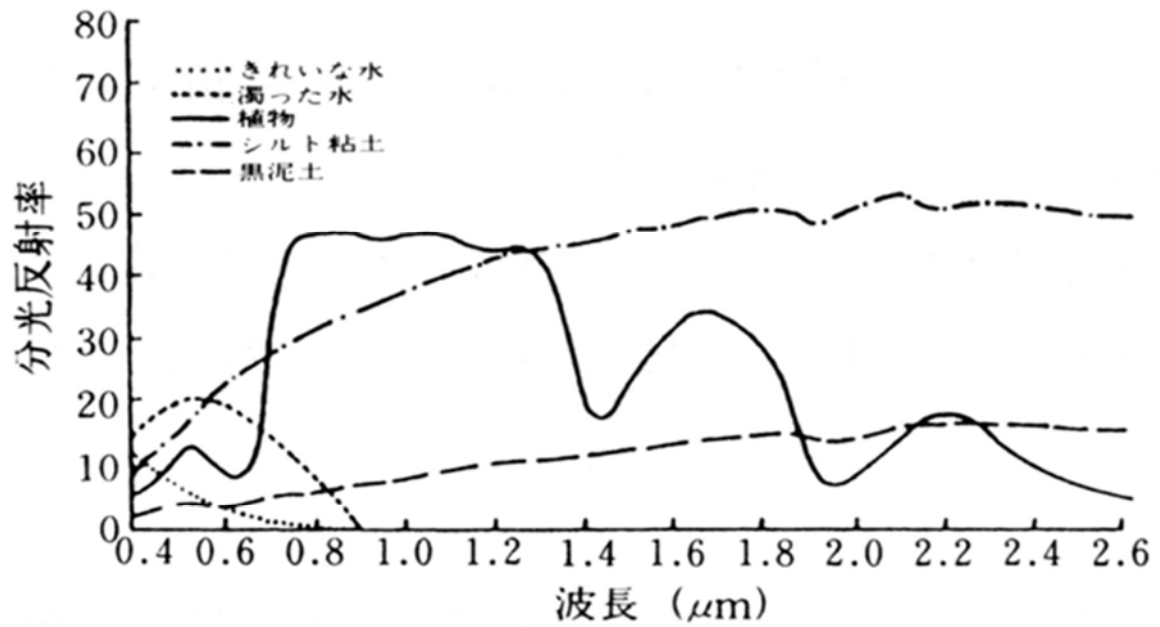


図 2-2 植物、土、水の分光反射率 40)

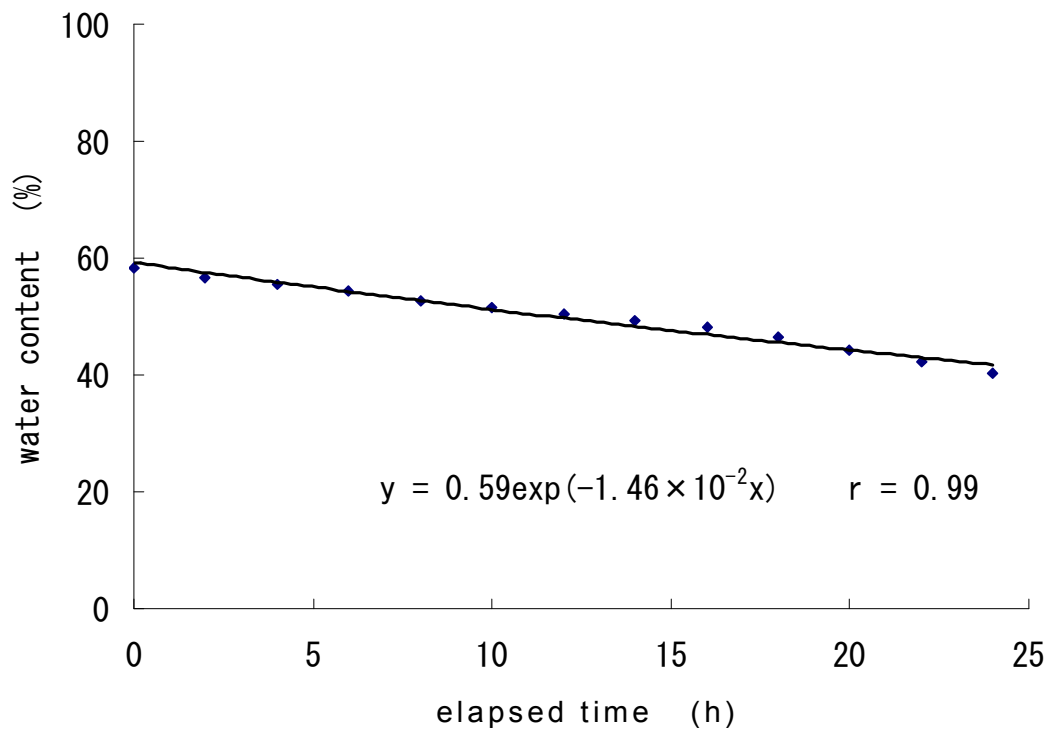


図 2-3 スタジイの葉内含水率と経過時間の関係 <sup>35)</sup>

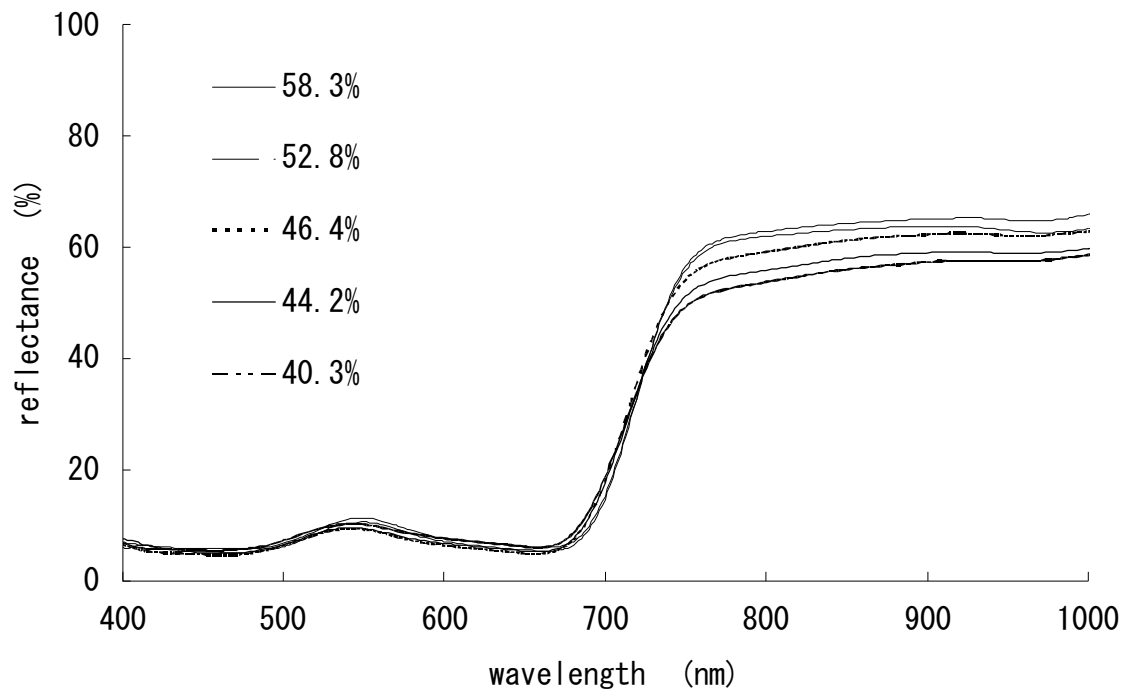


図 2-4 葉内含水率の分光反射特性 <sup>35)</sup>

赤の反射率と近赤外の反射率を用いた正規化指標が考案されている。正規化指標(NDVI: Normalized Differential Vegetation Index)や比植生指標(RVI: Ratio Vegetation Index)を用いて植物の活性度、生育量や生育状態の推定が可能であることが示されている<sup>64-67)</sup>。特に正規化指標 NDVI は、その後広く利用されるようになり、正規化することによって場所、季節、大気効果等の観測条件の違いによる影響を小さくすることができるとされている。

NDVI と RVI は以下の式(2-2)及び(2-3)で定義される。

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad (2-2)$$

$$RVI = \frac{NIR}{R} \quad (2-3)$$

ここで、 $NIR$ : 近赤外域波長帯の反射率

$R$ : 赤色域波長帯の反射率

また、その他の指標としては、差植生指数 DVI や RGB 波長域を用いる解析指標の RI(Ratio Index)などがある。

RI は以下の式(2-4)で定義される。

$$RI = \frac{R_{Green}}{R_{Red}} \quad (2-4)$$

ここで、 $R_{Green}$ : 緑色域波長帯の反射率

$R_{Red}$  : 赤色域波長帯の反射率

## 2.6 画像処理と画像解析

画像処理には前処理と後処理があり、前処理では取得したデータを解析に用いるための補正を行い、後処理では正規化指標 NDVIなどを算出するための画像間演算処理等の画像解析を行うことである。

本研究では、画像解析については、ERDAS IMAGINE(ver9.2 Leica Geosystem Co.)を用いて行った。

## 2.7 前処理

### 2.7.1 位置補正

衛星によって取得された画像データは、地球の不規則な表面を表現したものである。平坦に見える地域の画像であっても、地球の曲率やセンサーの特性、観測角によって歪んでいる。位置補正はこうした幾何学的な歪みを除去することを意味している。撮影時期の異なる画像を解析する場合には、基準画像と比較する画像内に基準点 (Ground Control Point : GCP) を万遍なく設定し、基準画像データに一致させるように位置補正を行う。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する。

### 2.7.2 大気補正処理

衛星と地表面の対象物の間には大気が存在し、地表面から反射・放射されるエネルギーは大気分子及び大気中に含まれるエアロゾル粒子によって吸収及び散乱される。その影響の大きさは大気の状態



に依存する。衛星データは大気の影響を含んでおり、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、大気補正処理を行う。

### 2.7.3 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、小野ら<sup>68)</sup>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る。

正規化を施したデータを Band1'、Band2'、Band3' と Band4' とすると、以下の式(2-5)～(2-9)で補正される。

$$\text{Band1}' = 4\text{Band1} / [\text{Band1} + \text{Band2} + \text{Band3} + \text{Band4}] \quad (2-5)$$

$$\text{Band2}' = 4\text{Band2} / [\text{Band1} + \text{Band2} + \text{Band3} + \text{Band4}] \quad (2-6)$$

$$\text{Band3}' = 4\text{Band3} / [\text{Band1} + \text{Band2} + \text{Band3} + \text{Band4}] \quad (2-7)$$

$$\text{Band4}' = 4\text{Band4} / [\text{Band1} + \text{Band2} + \text{Band3} + \text{Band4}] \quad (2-8)$$

$$\text{Band1}' + \text{Band2}' + \text{Band3}' + \text{Band4}' = 1 \quad (2-9)$$

## 2.8 土壌水分変動域指標

NDVI は季節による変動の差異、土地の起伏及び日向や日陰の影響を受けることが報告されている<sup>69,70)</sup>。よって一時期の解析結果ではこれらの差異や影響を含んでいることが考えられるため、石川ら(2008)では二時期の解析した画像から、土壌水分変動域指標: Water

Content Fluctuation Index(WCF)を考案し、以下の式で表示した。

$$WCF = (ND_A - ND_B) / ND_B \quad (2-10)$$

ここで、 $ND_A$ と $ND_B$ は異なった撮影日(A,B)におけるND画像のDN値である。

## 第 3 章 樹冠部の葉内含水率の推定手法及び航空写真データによる 土壌水分変動域抽出の検討

### 3.1 はじめに

本章では基礎的研究として、リモートセンシングにより分光反射特性を用いて、樹冠部の葉内含水率を推定する手法について検討を行った。また 1997 年 7 月 10 日に実際に土砂災害が発生した鹿児島県出水市針原地区を対象に、航空写真のカラー画像を用いて土壌水分変動域の抽出の検討を行った。対象地の航空写真を図 3-1 に示す。

### 3.2 材料及び方法

#### 3.2.1 基礎実験

鹿児島県の山腹で占有率が高い樹種として、ある程度本研究の対象地域の山腹樹木を代表できる広葉樹のスダジイを対象とした。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)を用いて分光反射率を測定した。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。

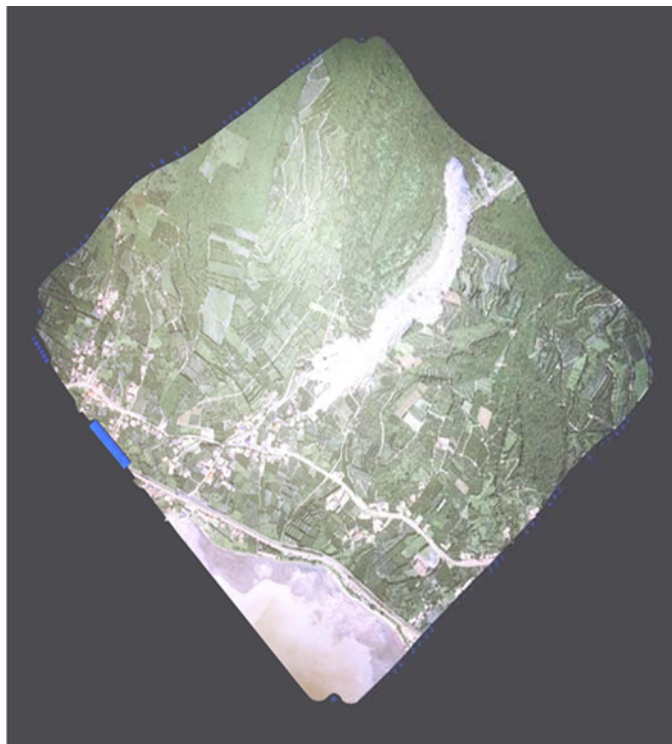
#### 3.2.2 航空写真と画像解析

画像解析に用いた 1997 年 7 月 18 日と 2000 年月日不明の土砂災害発生後に撮影された航空写真を図 3-2 に示す。航空写真を RGB に分解し、緑色域と赤色域の波長帯の比を用いた RI により解析を行った。



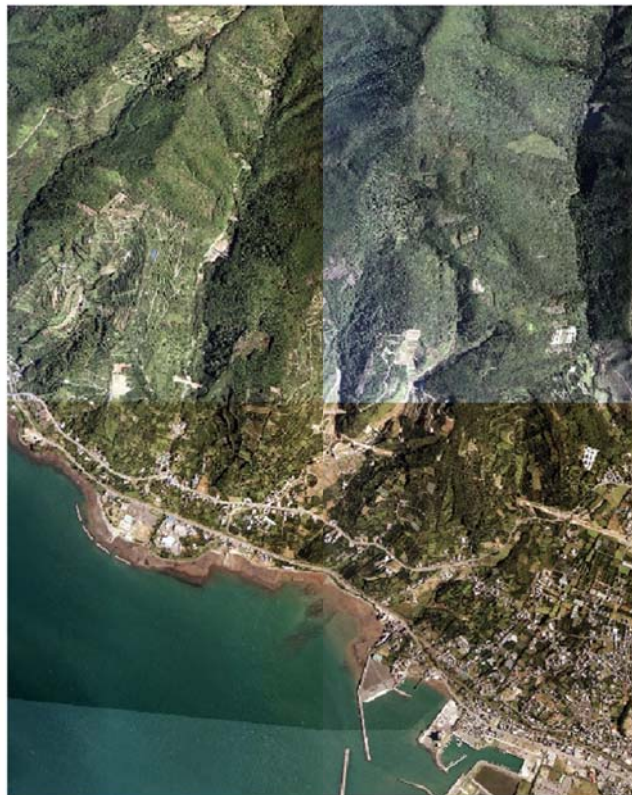
撮影日：1997年7月10日(株PASCO提供)

图 3-1 航空写真(出水市針原地区)



撮影日：1997年7月18日

(縮尺 S=1:5,000)



撮影日：2000年月日不明

(縮尺 S=1:20,000)

図 3-2 航空写真真データ

### 3.3 結果と考察

#### 3.3.1 分光反射特性曲線

第2章の図2-4の葉内含水率の分光反射特性より、航空写真に対して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分光反射率を算出した。これらの時系列解析を行った結果を図3-3に示す。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。またいずれの波長帯においても、単バンドにおいては相関が低いものとなった。

第2章の図2-4の葉内含水率の分光反射特性曲線を微分した結果を図3-4と図3-5に示す。図3-4の一次微分曲線では、520nm、570nmと720nmにピークが生じた。一方、図3-5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3-6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伴い、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。ピーク波長における分光反射率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経時変化によって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。

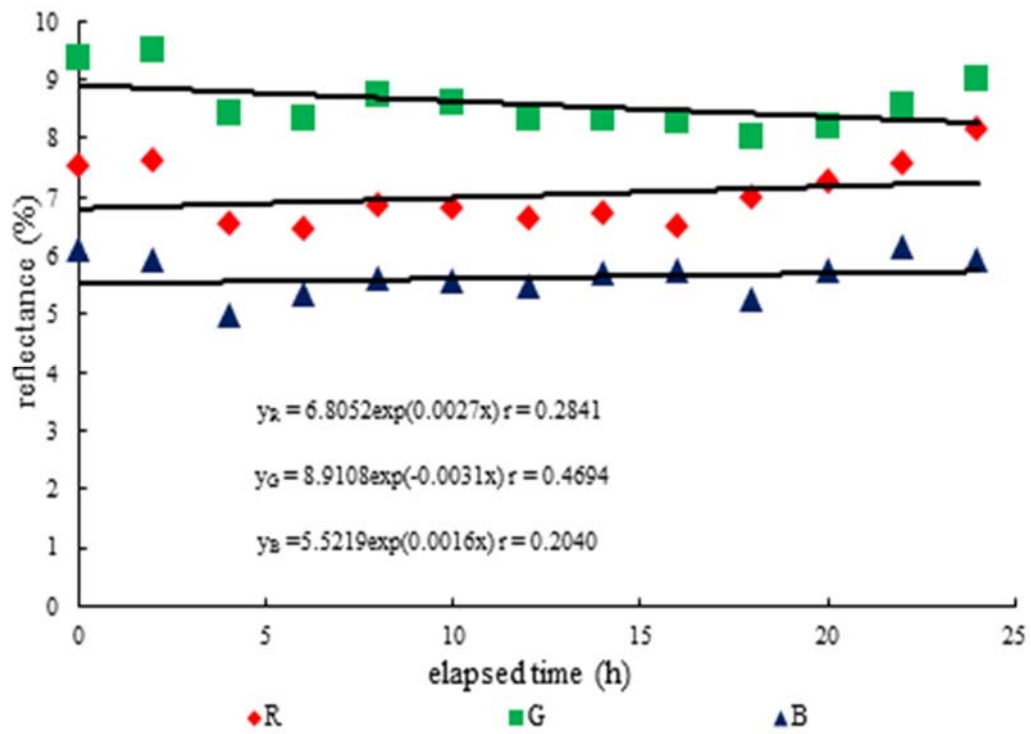


図 3-3 R・G・B 領域に対応した波長帯の  
平均分光反射率の経時変化

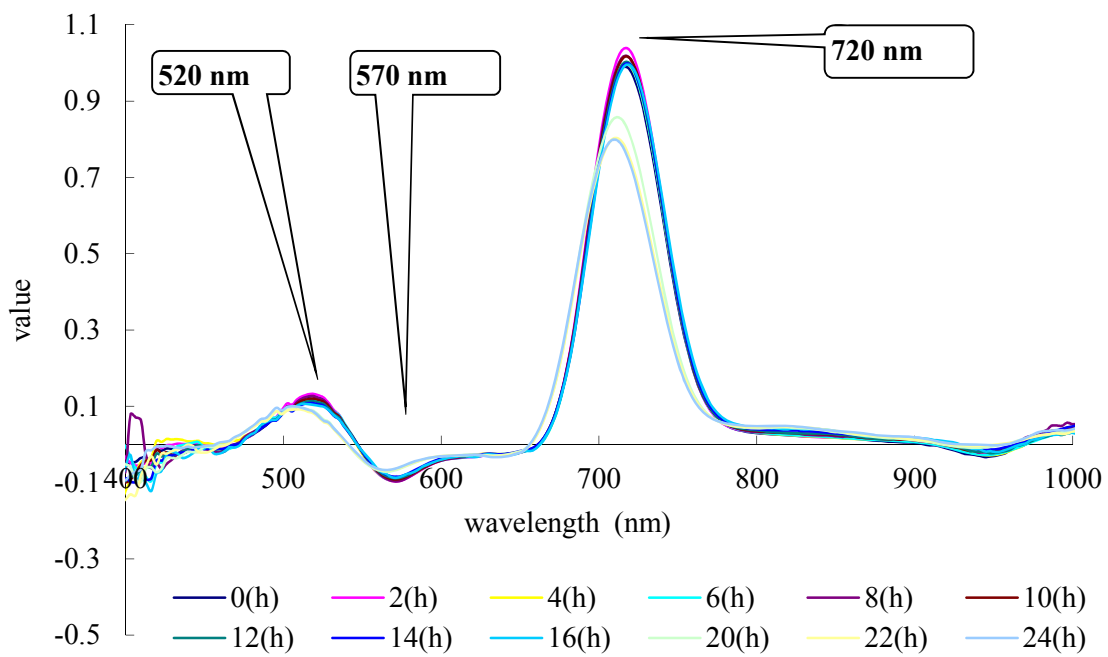


図 3-4 分光反射曲線の一次微分曲線



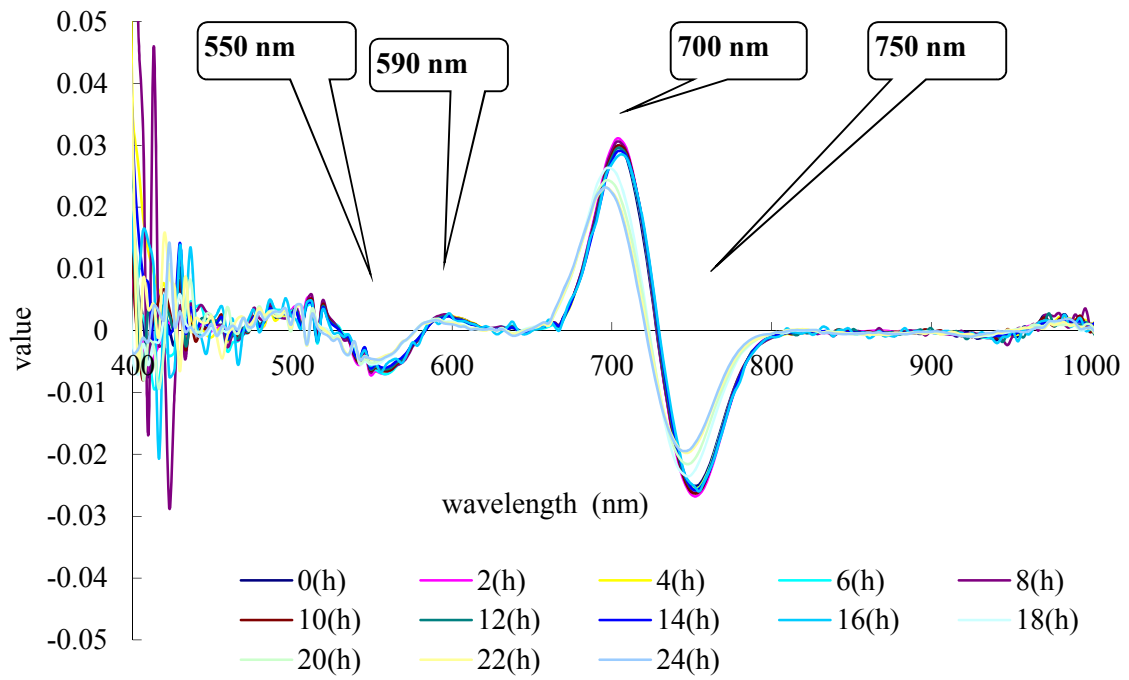


図 3-5 分光反射曲線の二次微分曲線

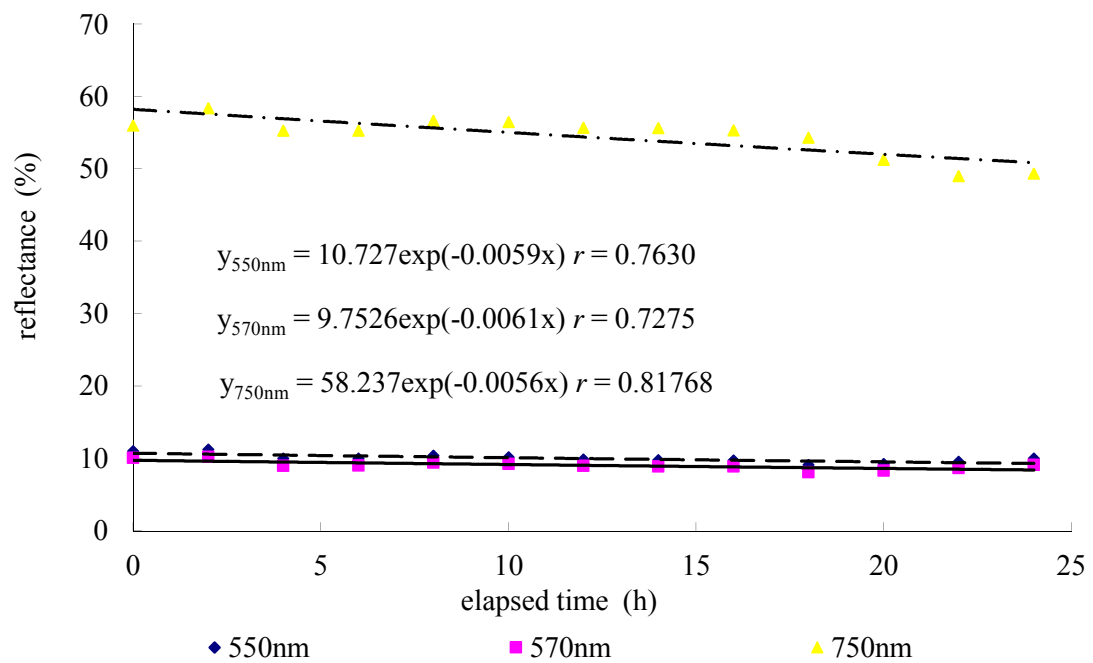


図 3-6 特性波長の経時変化

### 3.3.2 指標の検討

近赤外域の観測帯を有しない航空写真の場合、RGB に分解した、緑色域の反射率  $R_{Green}$  と赤色域の反射率  $R_{Red}$  の波長帯を用いた以下の RI を用いて検討を行った。

$$RI = \frac{R_{Green}}{R_{Red}} \quad (3-1)$$

RI 値の指標の検討結果を図 3-7 に示す。単バンドでは、いずれの波長でも低い相関となったが、RI 値の指標は経過時間とともに指数的に減少し、高い相関を示した。よって、航空写真の場合において葉内含水率の推定指標として RI が有効である可能性が示された。

### 3.3.3 航空写真の解析例

1997 年 7 月 18 日と 2000 年月日不明の航空写真を RGB に分解し、緑色域と赤色域の比を用いて RI から作成した葉内水分分布画像を図 3-8A と B に示す。WCF 指標を適用して作成した土壤水分変動域の画像については、2000 年の航空写真においては、4 つの航空写真データがモザイクされた画像であり各画像間の色調が違うため、1997 年の航空写真に対してなるべく共通している箇所を切り抜いた B 画像を用いて行った。土壤水分変動域の画像を図 3-8C に示す。ここで WCF 指標は以下の式を用いている。

$$WCF = (RI_a - RI_b) / RI_a \quad (3-2)$$

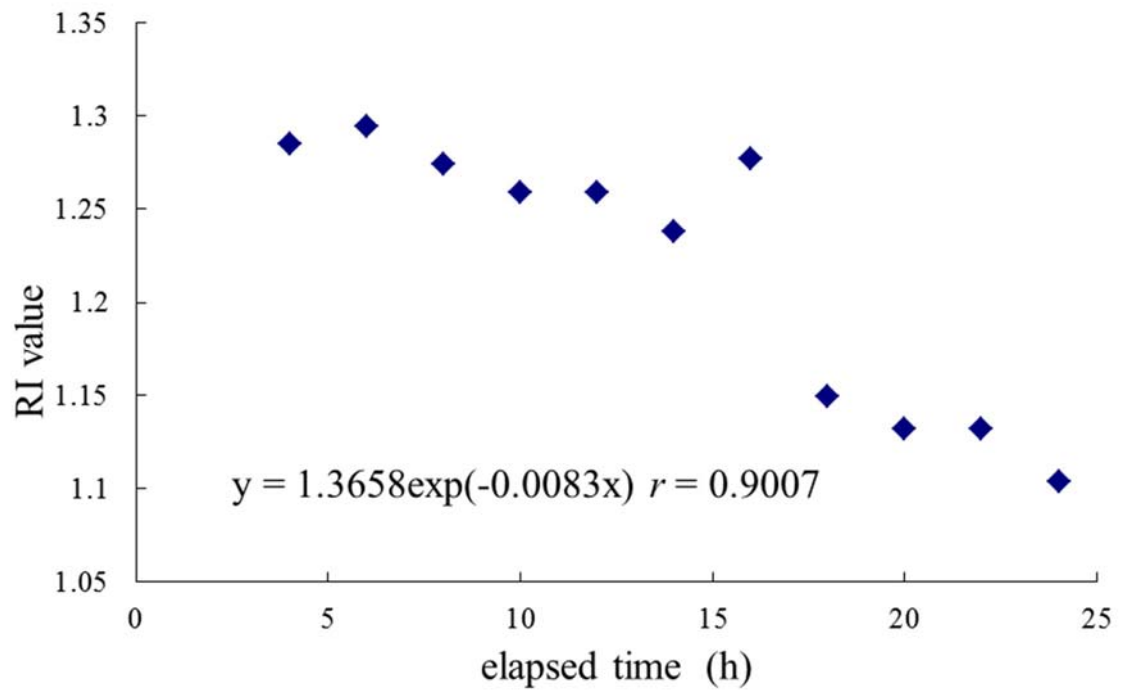


図 3-7 分光反射特性から得られた RI 値の経時変化

ここで、**a** と **b** は異なる撮影データの **RI** 値である。

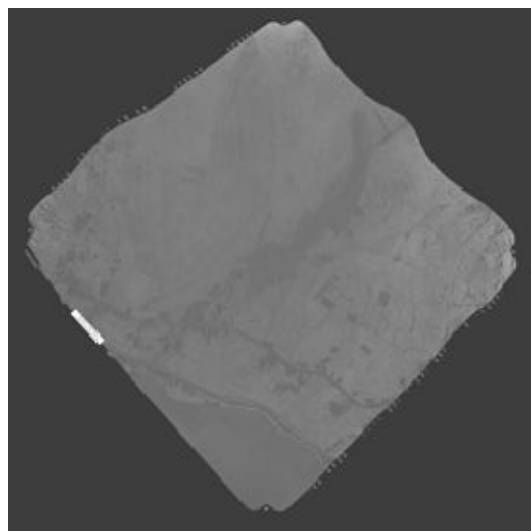
図 3-8C 中で黒色部は土壌水分の変動域が少ない箇所を示している。しかし、1997 年から 2000 年の航空写真を比較すると、この期間にほぼ中央部では伐採が行われ、土地被覆が異なっていた。その結果、土壌水分の変動域が少ない箇所として抽出されたこの黒色部は土地被覆の差異によるものであり誤抽出と判断される。よって右上の土地被覆が同じである黒色部のみが土壌水分の変動域が少ない箇所と考えられる。

### 3.4 摘要

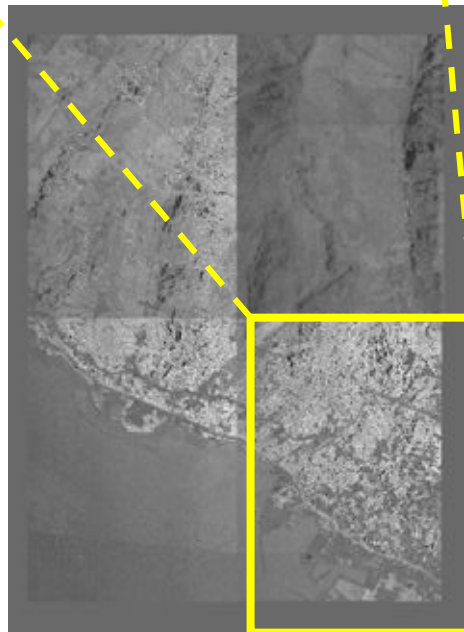
本章では、分光反射特性による樹冠部の葉内含水率の推定手法について検討を行った。また近赤外域を有しない可視域の航空写真データにおいて、**RGB** に分解し、緑色域と赤色域の波長帯の比から **RI** を適用し葉内水分分布画像作成した。これらの画像を用いて、**WCF** 指標を適用して作成した土壌水分変動域の画像から、土壌水分の変動が少ない箇所を抽出し以下の結果を得た。

1. **RGB** に分解した単バンドの各波長帯では、葉内含水率との相関は低かった。しかしながら、緑色域と赤色域の波長帯の比を用いた複数バンドの **RI** を用いることで、葉内含水率の推定には有効であった。
2. **RI** から葉内水分分布画像を作成し、**WCF** 指標を適用した土壌水分変動域画像を作成することにより、土壌水分の変動が少ない箇所の抽出の可能性が示唆された。
3. 近赤外域を有しない可視域の航空写真において、**WCF** 指標を適用することで、同じ土地被覆であるという条件下で、土壌水分変

動域の抽出に有効であることが示された。



A : 撮影日 1997 年 7 月 18 日  
(縮尺 S=1:5,000)



B : 撮影日 2000 年月日不明  
(縮尺 S=1:20,000)



C : 土壌水分変動域の画像

図 3-7 航空写真による葉内水分分布画像及び土壌水分変動域の画像

## 第 4 章 人工衛星 Landsat-5/TM データを用いた土壌水分変動域の抽出の検討

### 4.1 はじめに

本章では、近赤外域の観測帯を有している Landsat-5/TM データを用いて、実際に 2010 年 7 月 7 日に斜面崩壊が発生した鹿児島県大隅半島を対象に、各波長帯の平均分光反射率と樹冠部の葉内含水率の関係を解析し、樹冠部の葉内含水率を推定する指標を検討した。さらに、異なる観測時期の Landsat-5/TM データにこの指標を適用し、樹冠部の葉内含水率の変動率から異なる時期の土壌水分変動域の抽出を試みた。これらをさらに多期間の Landsat-5/TM データに適用し、抽出精度を検討した。

実際に発生した斜面崩壊箇所の位置図と航空連続写真（大福コンサルタント(株)提供）を図 4-1 に示す。

### 4.2 材料及び方法

#### 4.2.1 衛星画像と画像解析

画像解析に用いる衛星画像のデータは Path-Low;112-38 で、1984 年 10 月 22 日、1989 年 10 月 14 日と 1999 年 3 月 6 日の観測日を使用した。今回、鹿児島県大隅半島を対象としているため、衛星画像元データを画像解析用として切り抜いた画像を使用している。

#### 4.2.2 衛星画像前処理

##### 4.2.2.1 位置補正

1999 年 3 月 6 日の画像データを基準として、1984 年 10 月 22 日、



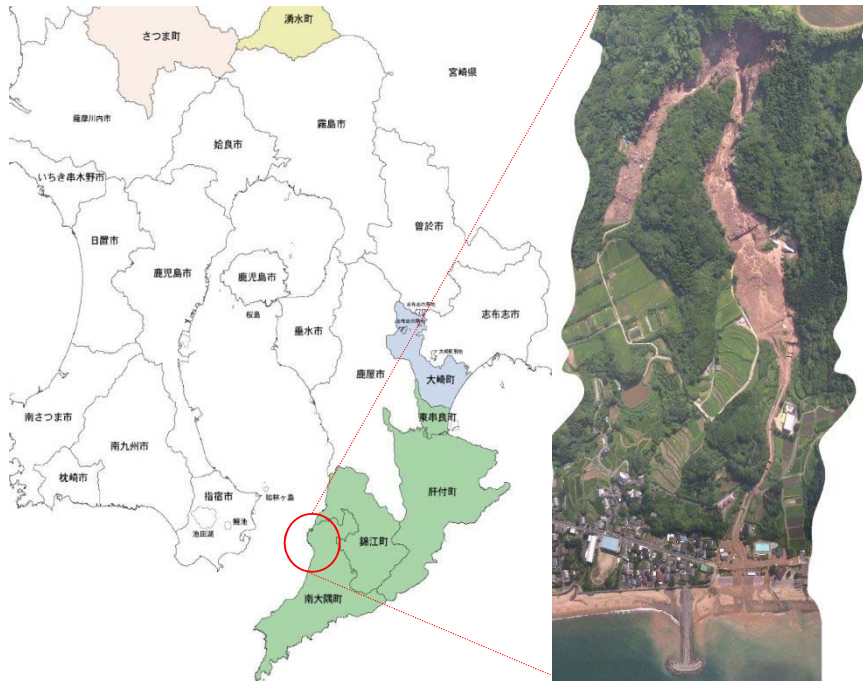


図 4-1 実際に発生した斜面崩壊の位置図と航空連続写真  
 (撮影日：2010年7月7日)

1989年10月14日の各画像データの位置補正を行った。基準画像を図4-2に、位置補正した前後の画像を図4-3と図4-4に示す。画像内に基準点を万遍なく設置し、全ての点において二乗平均平方根誤差(RMSE)が0.01pixel以下になるように設定した。

#### 4.2.2.2 大気補正

大気補正の一例として、1984年10月22日のLandsat-5/TMのBand1、Band2、Band3とBand4の画像を図4-5、図4-6、図4-7と図4-8に示す。(A)は補正前の画像で、(B)は補正後の画像である。画像下に示しているヒストグラムは画像の輝度の分布を表すものであり、縦軸がピクセル数、横軸が輝度である。大気分子による散乱は、波長に比べて小さい粒子による散乱となるため、レイリー散乱となる。各バンドにおけるヒストグラムの立ち上がり値の関係を図4-9に示す。補正前の画像の明暗で立ち上がりの輝度は、Band1:60、Band2:30、Band3:15、Band4:5と波長帯域が大きくなるにつれて小さくなる。大気補正は、各バンドの画像の立ち上がりの輝度を差し引くことで行った。その結果、ある程度レイリー散乱の影響が除去され、画像の輝度は全体的に低下し鮮明となった。

#### 4.2.2.3 正規化処理(地形補正)

正規化処理として、1984年10月22日のLandsat-5/TMのBand1、Band2、Band3とBand4の画像を図4-9、図4-10、図4-11と図4-12に示す。一例としてBand2の画像の一部をクローズアップしているが、(B)の正規化後の画像は、(A)の正規化処理前の画像に比べて、山の稜線等が不明瞭になり、地形の起伏が軽減された。

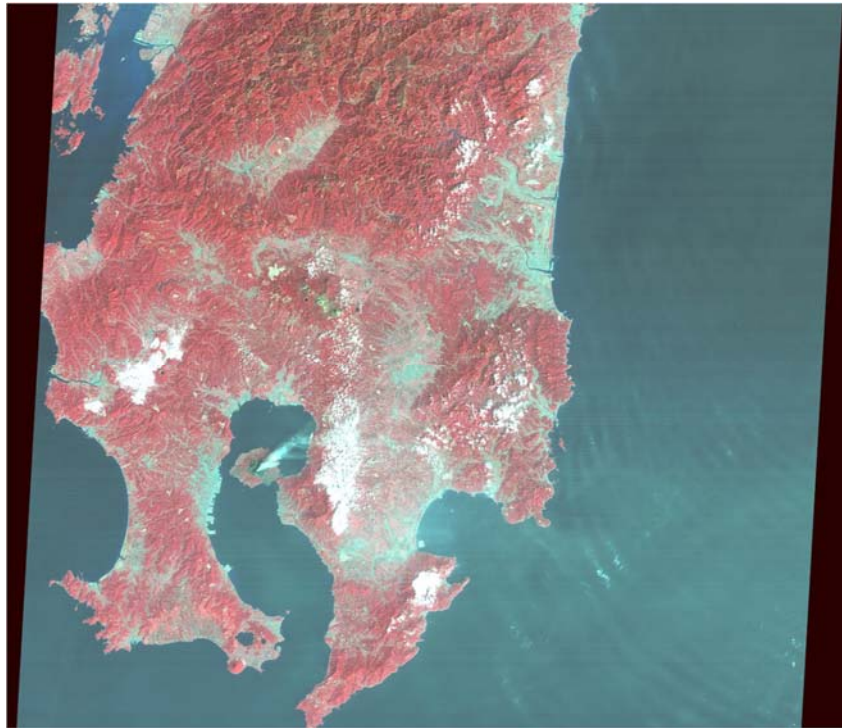


図 4-2 衛星画像元データ(1999年3月6日)



(位置補正前)



(位置補正後)

図4-3 位置補正前後の画像(1984年10月22日)



(位置補正前)



(位置補正後)

図4-4 位置補正前後の画像(1989年10月14日)

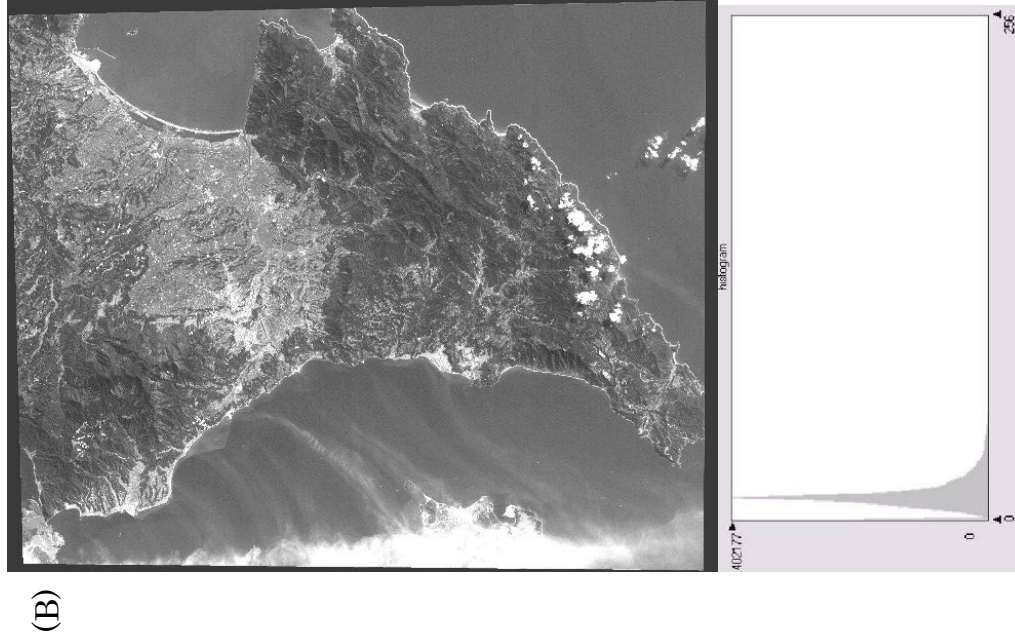
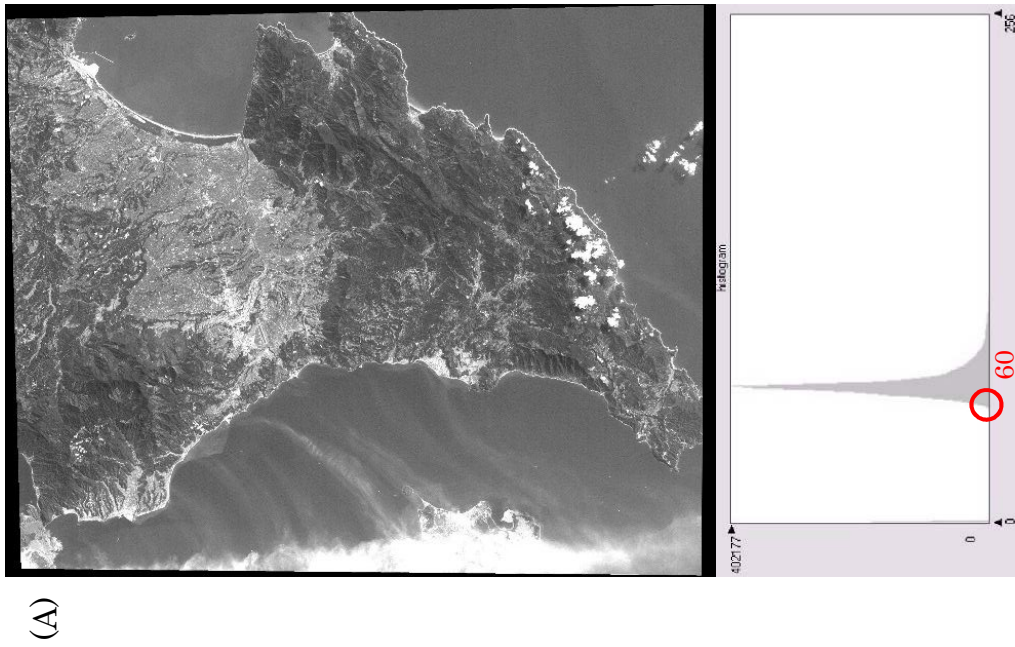


図4-5 Landsat-5/TMの大气補正の一例

(1984年10月22日, Band1 A:補正前 B:補正後)

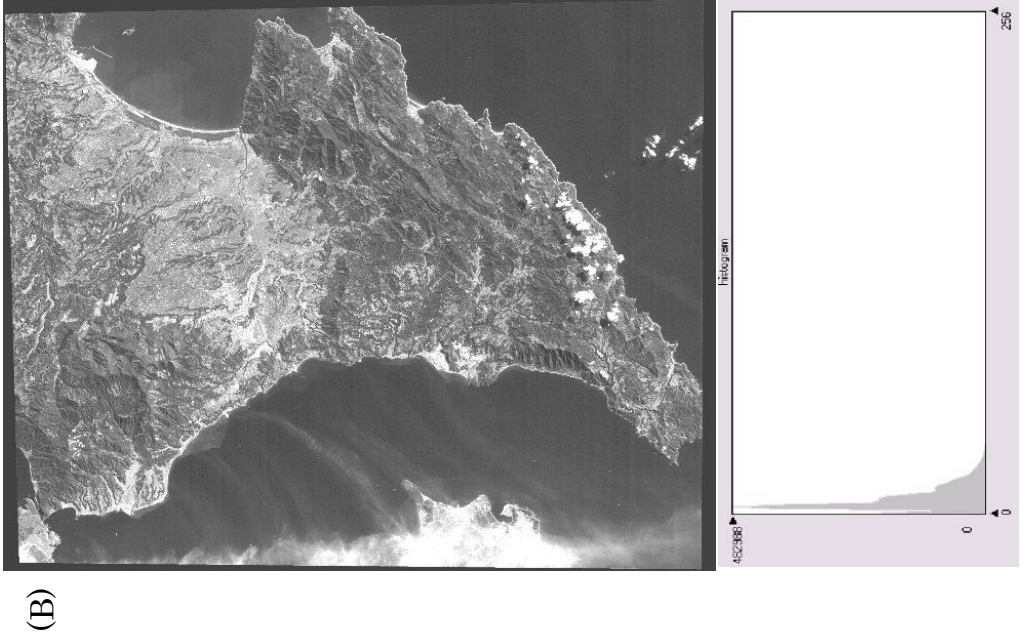
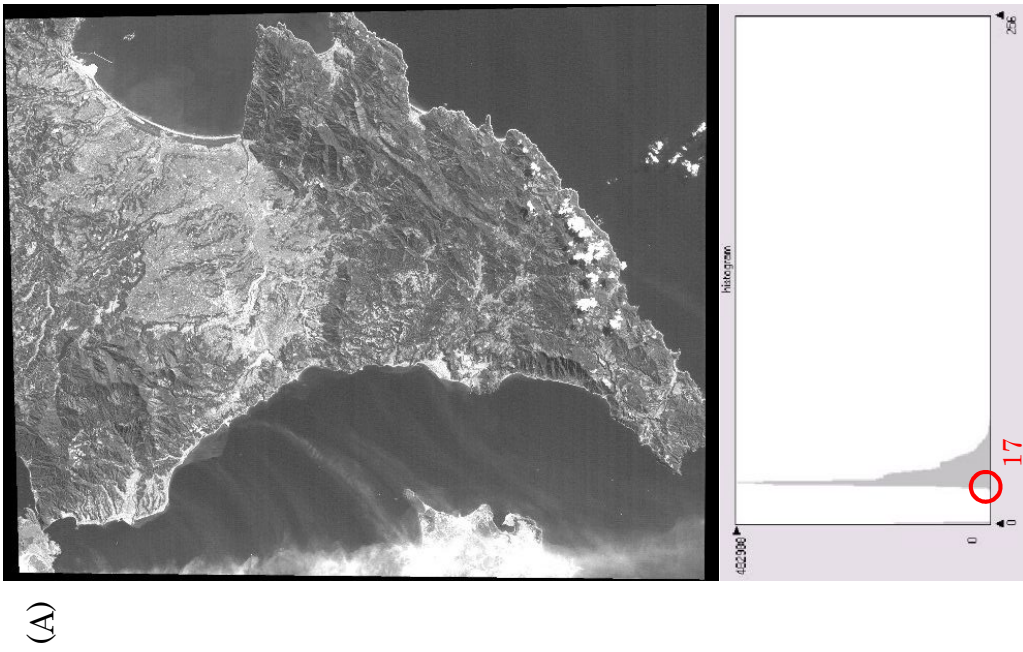


図4-6 Landsat-5/TMの大气補正の一例

(1984年10月22日, Band2 A:補正前 B:補正後)

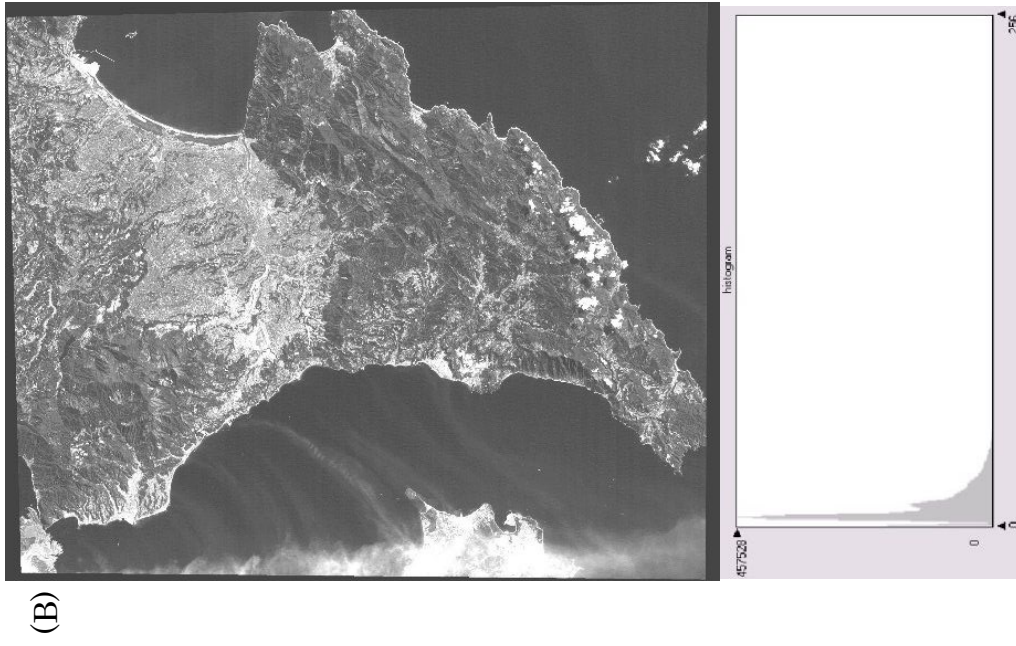
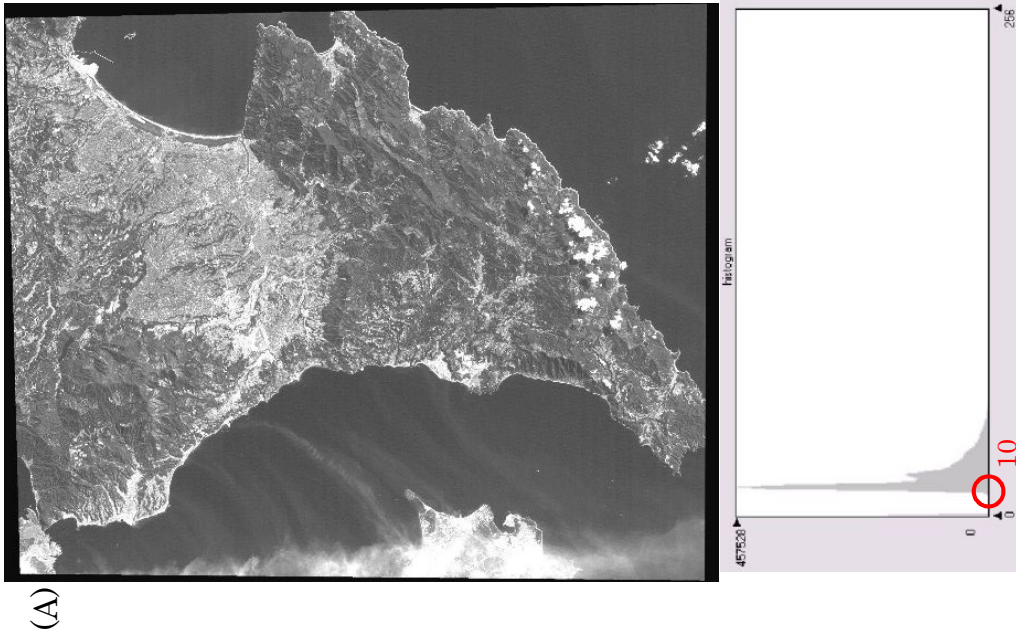


図4-7 Landsat-5/TMの大气補正の一例

(1984年10月22日, Band3 A:補正前 B:補正後)



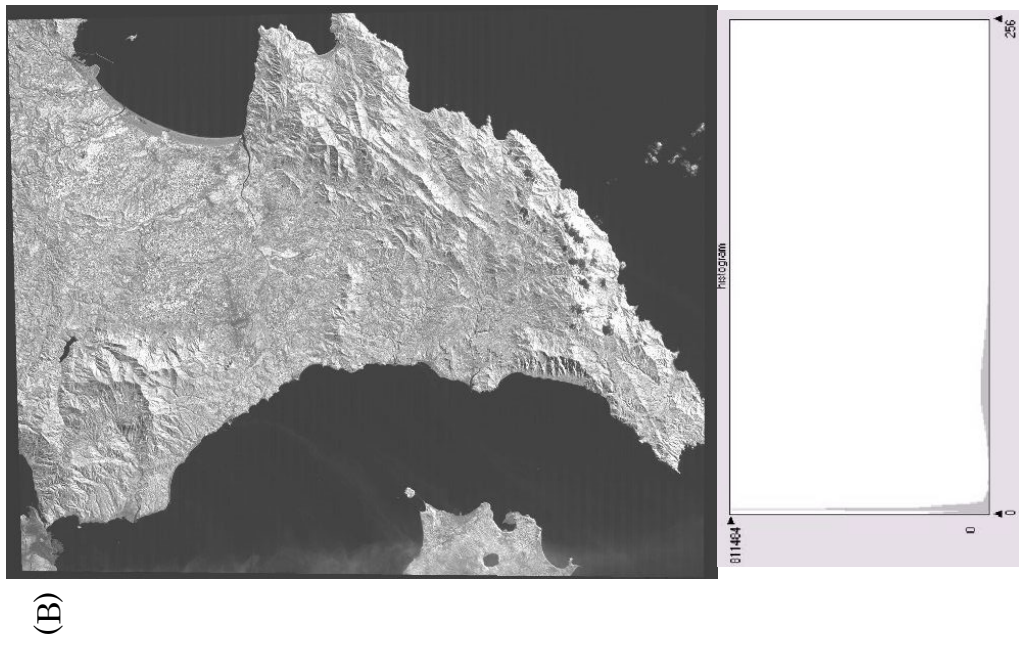
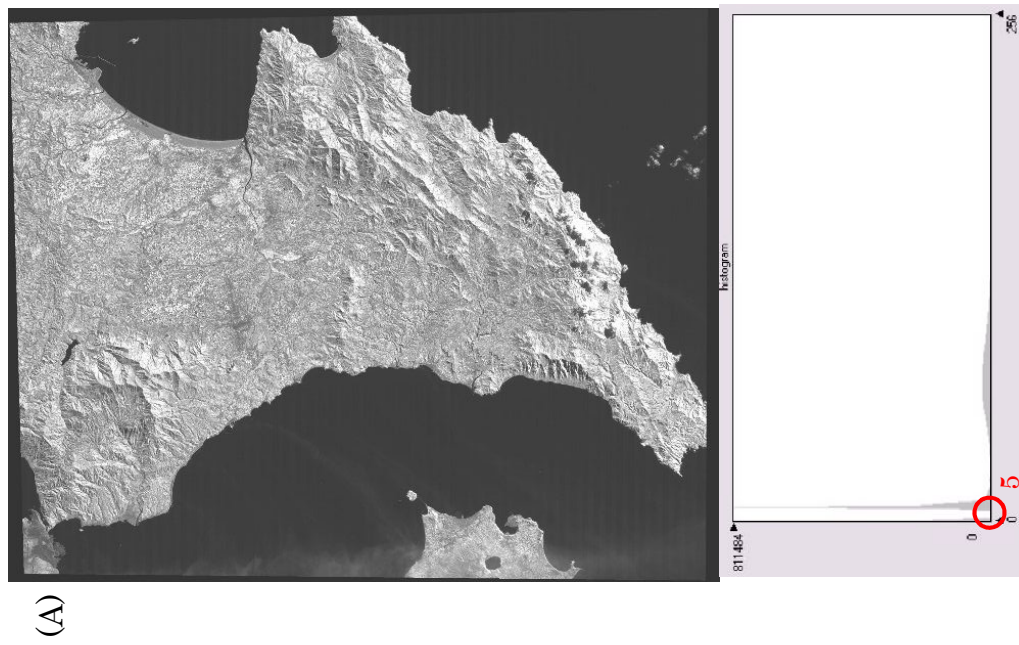


図4-8 Landsat-5/TMの大气補正の一例

(1984年10月22日, Band4 A:補正前 B:補正後)

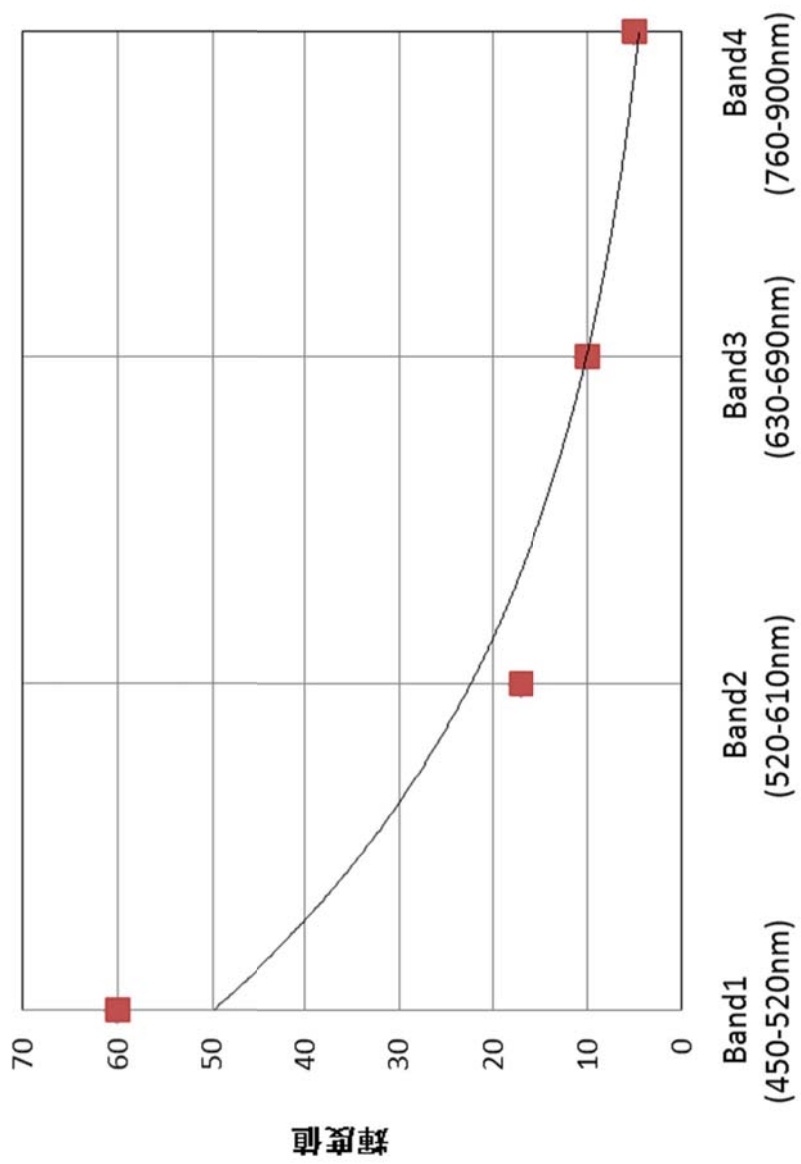


図4-9 各バンドにおけるヒストグラムの輝度値の立ち上がり値

## 4.3 結果及び考察

### 4.3.1 葉内含水率の指標の検討

第 2 章のスタジイの葉内含水率の分光反射特性から、Landsat-5/TM の各バンドにおける平均分光反射率を算出し、葉内含水率の指標の検討を行った。実際の衛星データに対する解析では、撮影時の天候により対象物から反射されるエネルギー変動が、大気中の分子やエアロゾル等により、吸収、散乱されてセンサーに届くため、画像に影響を及ぼす場合がある。これらの影響を軽減させるために、二つのスペクトル・バンドを使用して比率画像を計算することにより、これらの影響を除去して画像のスペクトルの相違を強調することができる。しかし、一つのスペクトル・バンドだけに何らかの影響があった場合は、比率計算により増幅される可能性があるため、クロロフィルの光吸収スペクトルである赤の波長帯 Band3 と近赤外の波長帯 Band4 の二つのバンドを用いた以下の正規化指標：NDVI を用いて、指標の検討を行った。

$$\text{NDVI} = (\text{Band4} - \text{Band3}) / (\text{Band4} + \text{Band3}) \quad (4-1)$$

ここで、Band4 と Band3 は Landsat-5/TM の Band4 と Band3 の平均分光反射率を示す。

図 4-13 に NDVI 値と樹冠部の葉内含水率の関係を示す。その結果、グラフの散布図から NDVI 値は、葉内含水率に対して高い相関を示した。また、さらに葉内含水率の推定精度を検証するために、図 4-14 に実測値と推定値と比較したものを示す。実測値と推定値では直線で近似する結果となり、高い相関が認められていることか



(A)



(B)

図4-9 Landsat-5/TMの正規化(地形補正)の一例  
(1984年10月22日, Band1 A:補正前 B:補正後)

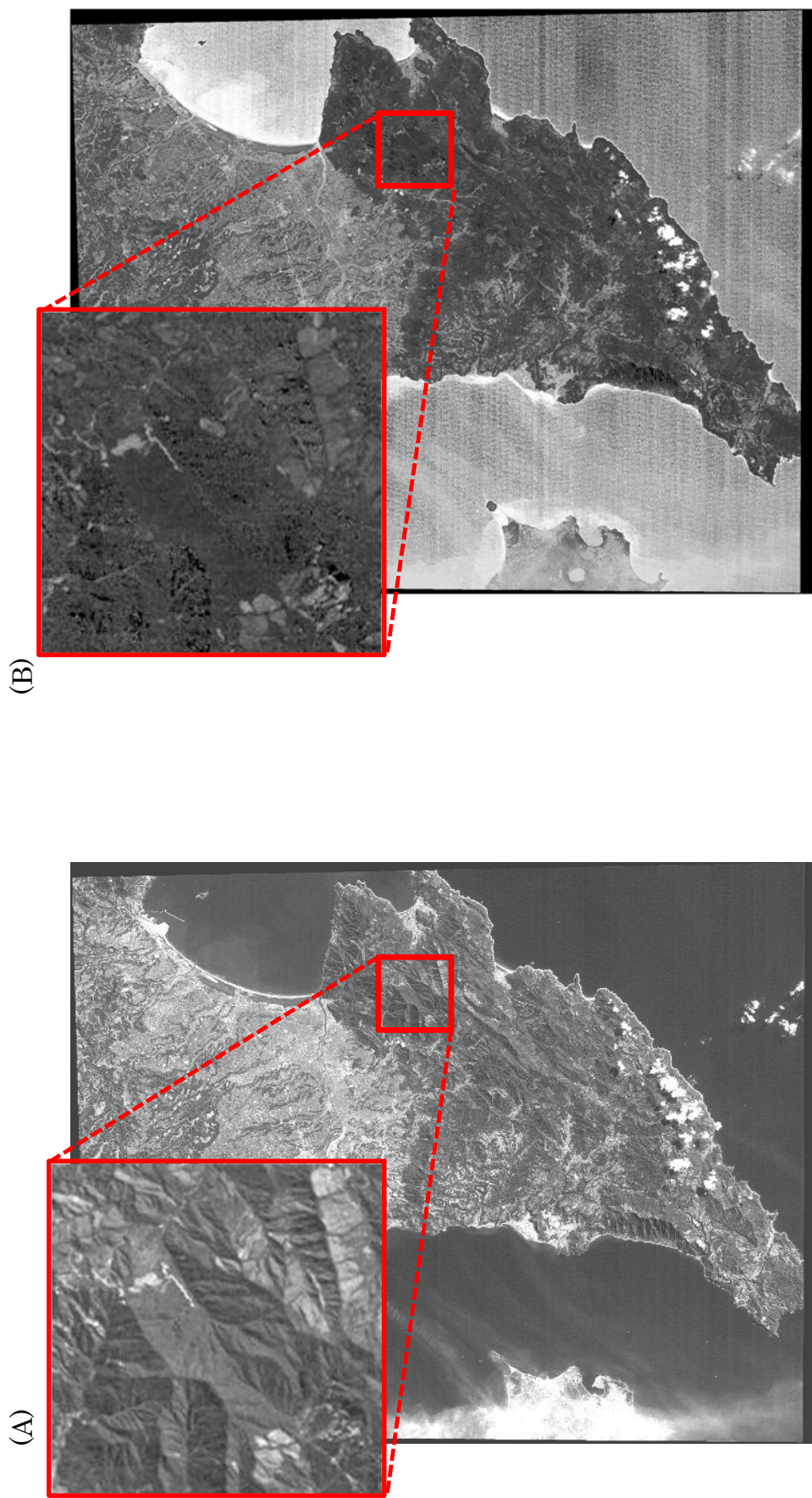


図4-10 Landsat-5/TMの正規化(地形補正)の一例

(1984年10月22日, Band2 A:補正前 B:補正後)

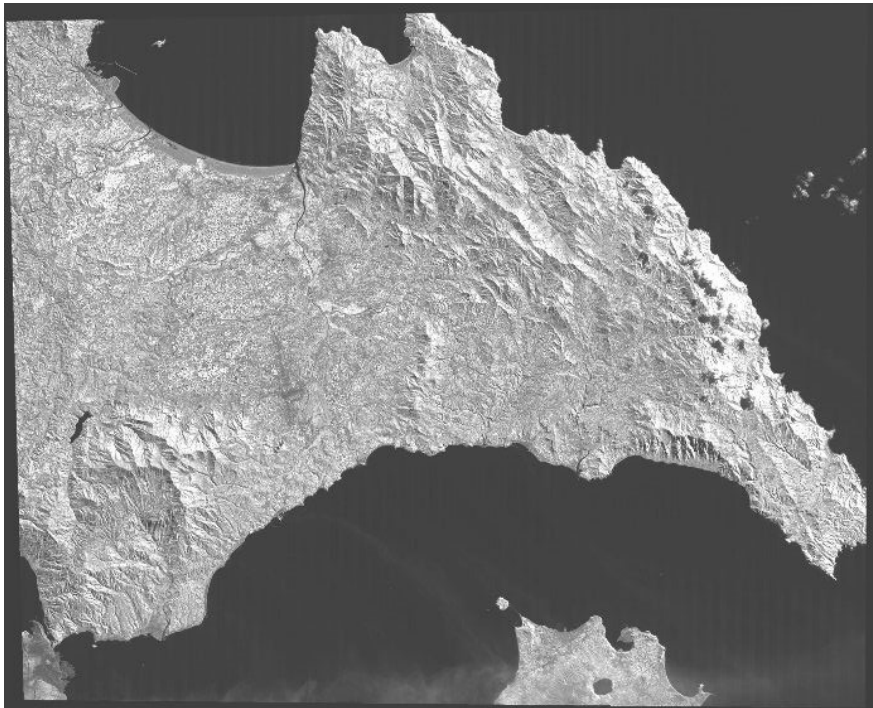


(A)

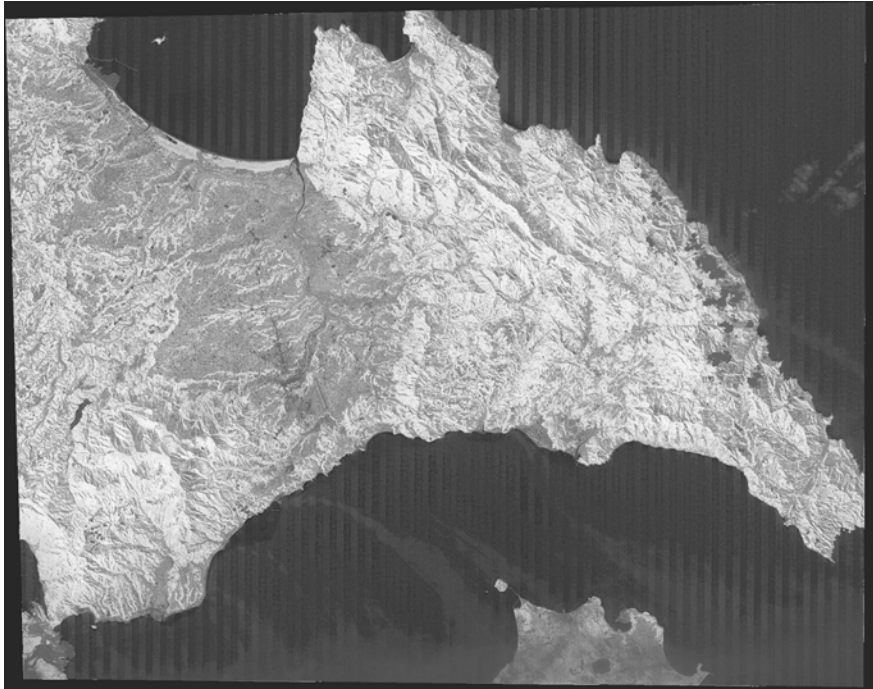


(B)

図 4-11 Landsat-5/TM の正規化(地形補正)の一例  
(1984年10月22日, Band3 A:補正前 B:補正後)



(A)



(B)

図 4-12 Landsat-5/TM の正規化(地形補正)の一例  
(1984年10月22日, Band 4 A:補正前 B:補正後)

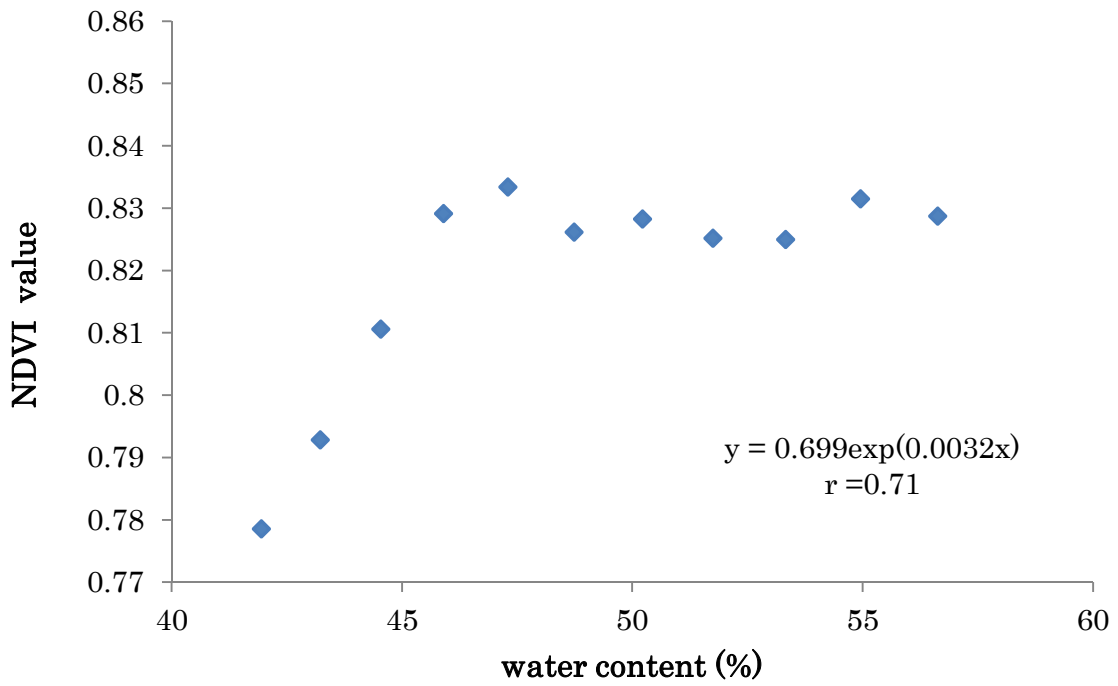


図 4-13 Landsat-5/TM による NDVI 値と葉内含水率の関係



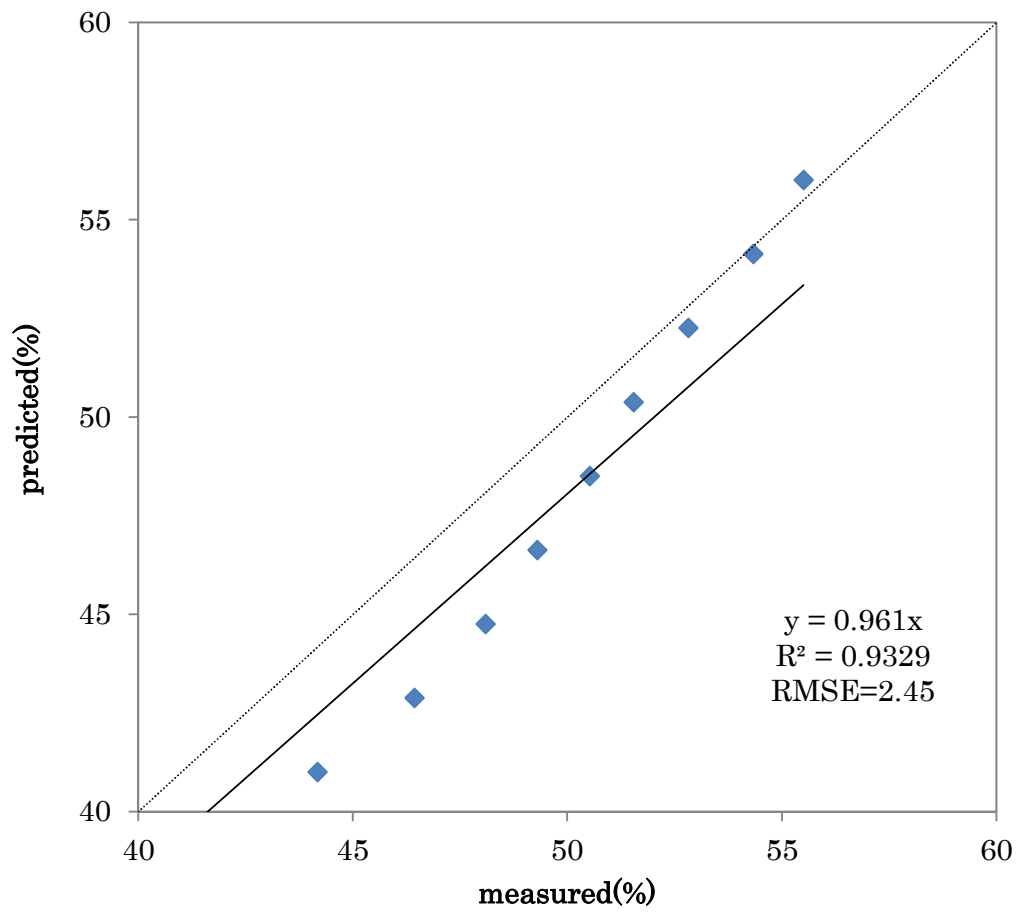


図 4-14 葉内含水率の実測値と推定値との比較

ら、Band3 と Band4 を用いた NDVI の指標により、葉内含水率の推定ができる可能性を示した。

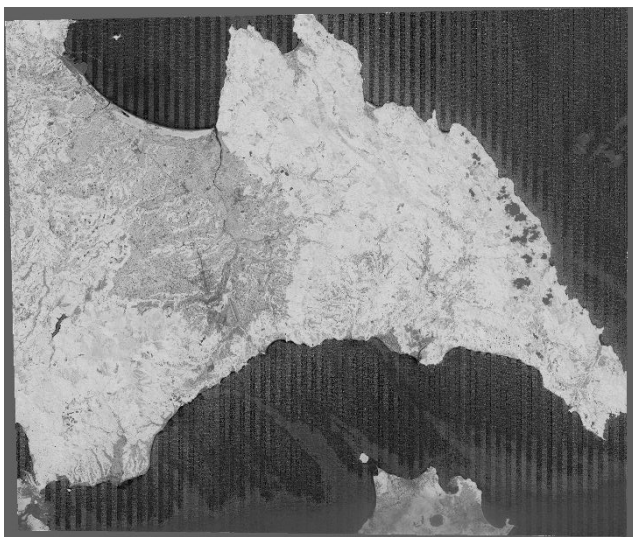
#### 4.3.2 画像解析

1984年10月22日、1989年10月14日と1999年3月6日のNDVI画像を図4-15に示す。画像においてNDVI値が高い、すなわち輝度が高い(明るい)部分が、樹冠部の葉内含水率が高いことが推定される。樹冠部の葉の水分状態は、その樹木が生育している地形や斜面方位により影響を受けるが、基本的には土壤水分に密接に関係がある。ここで各バンドは大気補正ならびに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(2008)では地形の影響を軽減するため、土壤水分変動域：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り、以下の式で表示される。

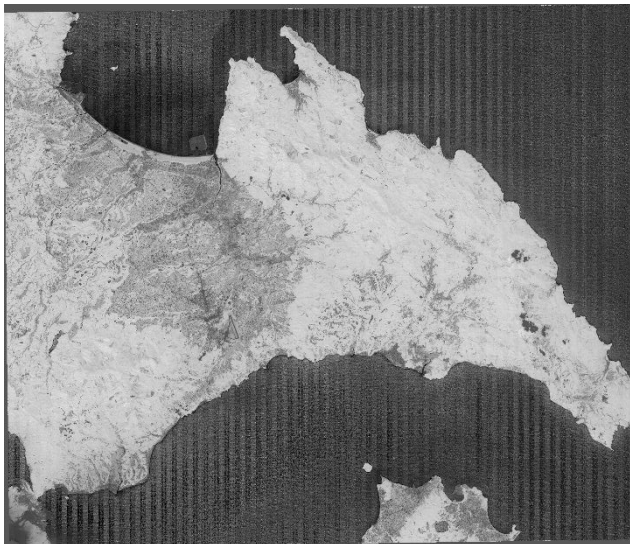
$$WCF = (NDVI_a - NDVI_b) / NDVI_a \quad (4-2)$$

ここで、aとbは異なる撮影日の衛星データを表す。

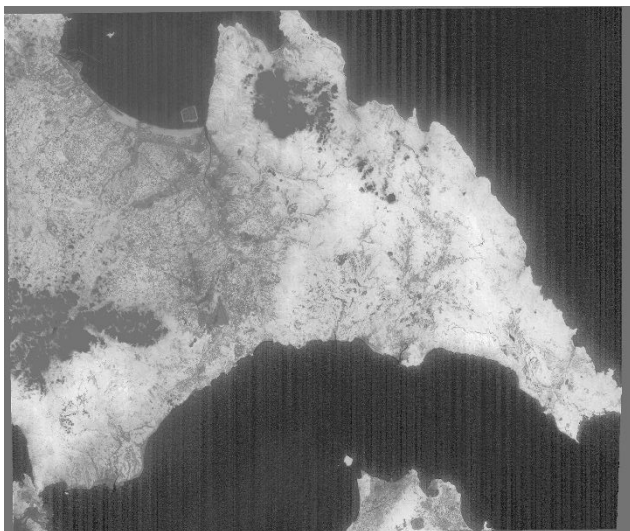
1984年10月22日、1989年10月14日と1999年3月6日のNDVI画像を用いて作成した土壤水分変動域の画像を図4-16に示す。ここで、黒色部は土壤水分の変動が少ない箇所、土地被覆が異なる場所と雲に覆われた箇所を示している。一般にモンスーン地帯では観測日により通常は土壤水分が異なる。したがって、異なる時期を比較して土壤水分の変動が少ない箇所は、常時土壤水分が高い



撮影日：1984年10月22日

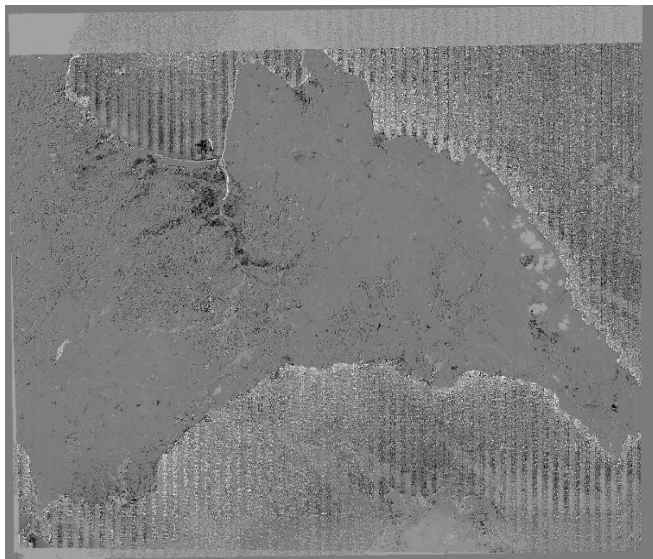


撮影日：1989年10月14日

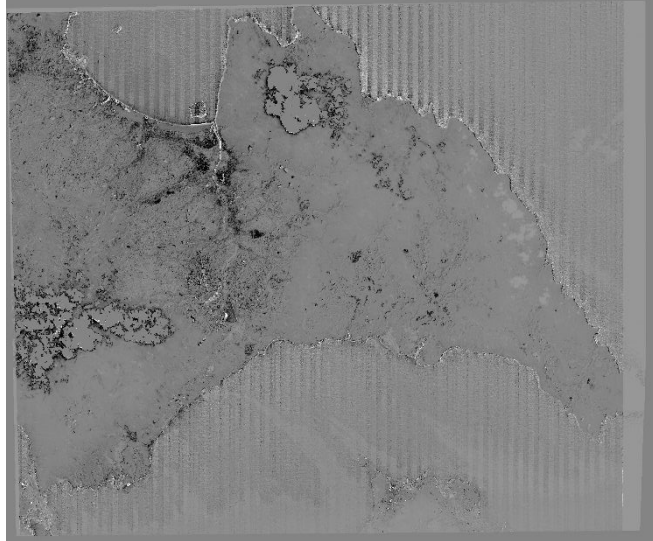


撮影日：1999年3月6日

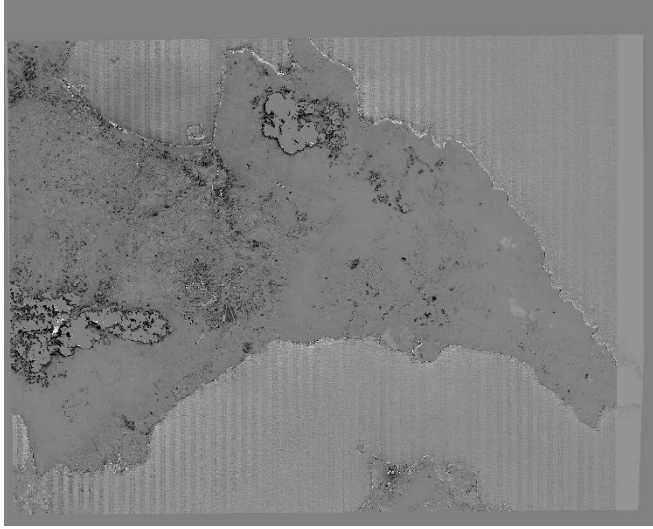
図 4-15 Landsat-5/TM の NDVI 画像



$(NDVI_{89} - NDVI_{84}) / NDVI_{89}$



$(NDVI_{99} - NDVI_{84}) / NDVI_{99}$



$(NDVI_{99} - NDVI_{89}) / NDVI_{99}$

図 4-16 Landsat-5/TM の土壤水分変動域(WCF)画像

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、力学バランスが崩れ、また土のせん断強度の低下等が起き、斜面崩壊の発生の要因になり得る可能性が高いと考えられる。

図 4-16 の各画像で抽出された黒色部分の重なった部分を図 4-17 に示す。3 時期を考慮した土壌水分変動域の抽出を行うことで、より土壌水分変動域が少ない箇所の抽出が行えると考えられる。また抽出された箇所の一部に、2010 年に実際に発生した土砂災害発生箇所（○印）が含まれているため、斜面崩壊の危険性のある箇所の抽出に有効である可能性が示唆された。

図 4-18 に土壌水分変動域の抽出画像と土地被覆分類図と比較したものを示す。土地被覆分類図は、JAXA が提供の高次研究プロダクトを使用している。土壌水分変動域の変動が少ないと抽出された箇所には、雲の影響による誤抽出や土地被覆分類によっては、畑地や都市などの斜面崩壊の対象とならない箇所についても抽出されていた。よって、WCF 指標を用いて土壌水分変動域の抽出から斜面崩壊の危険性が高い箇所の抽出に適用するには、ある程度一様な植生に覆われた地表面に対して有効であると考えられる。

#### 4.4 摘要

本章では、近赤外域の観測帯を有している人工衛星 Landsat-5/TM データを用いて、分光反射特性から Landsat-5/TM データの各バンドに対応する平均分光反射率を算出し、葉内含水率を推定する指標の検討を行った。葉内水分分布画像から異なる時期の土壌水分変動域の抽出の検討を行い、以下の結論を得た。

1. 近赤外の観測帯を有している人工衛星データ Landsat-5/TM を用いた葉内含水率の推定指標には、クロロフィルの光吸収スペクトルである赤の波長域の Band3 と近赤外の波長域の Band4 を用いた NDVI が有効であった。
2. 多時期(3 時期)を考慮した土壌水分変動域の抽出を行うことで、土壌水分変動が少ない箇所での抽出の判読性の向上には一定の効果があった。
3. 実際に発生した土砂災害箇所にて土壌変動域の少ない箇所の一部含まれているため、斜面崩壊の危険性のある箇所の抽出に有効である可能性が示唆された。
4. 土壌水分変動域の抽出から斜面崩壊の危険性が高い箇所の抽出に適用するには、ある程度一様な植生に覆われた地表面に対して有効であると考えられる。

土砂災害発生箇所

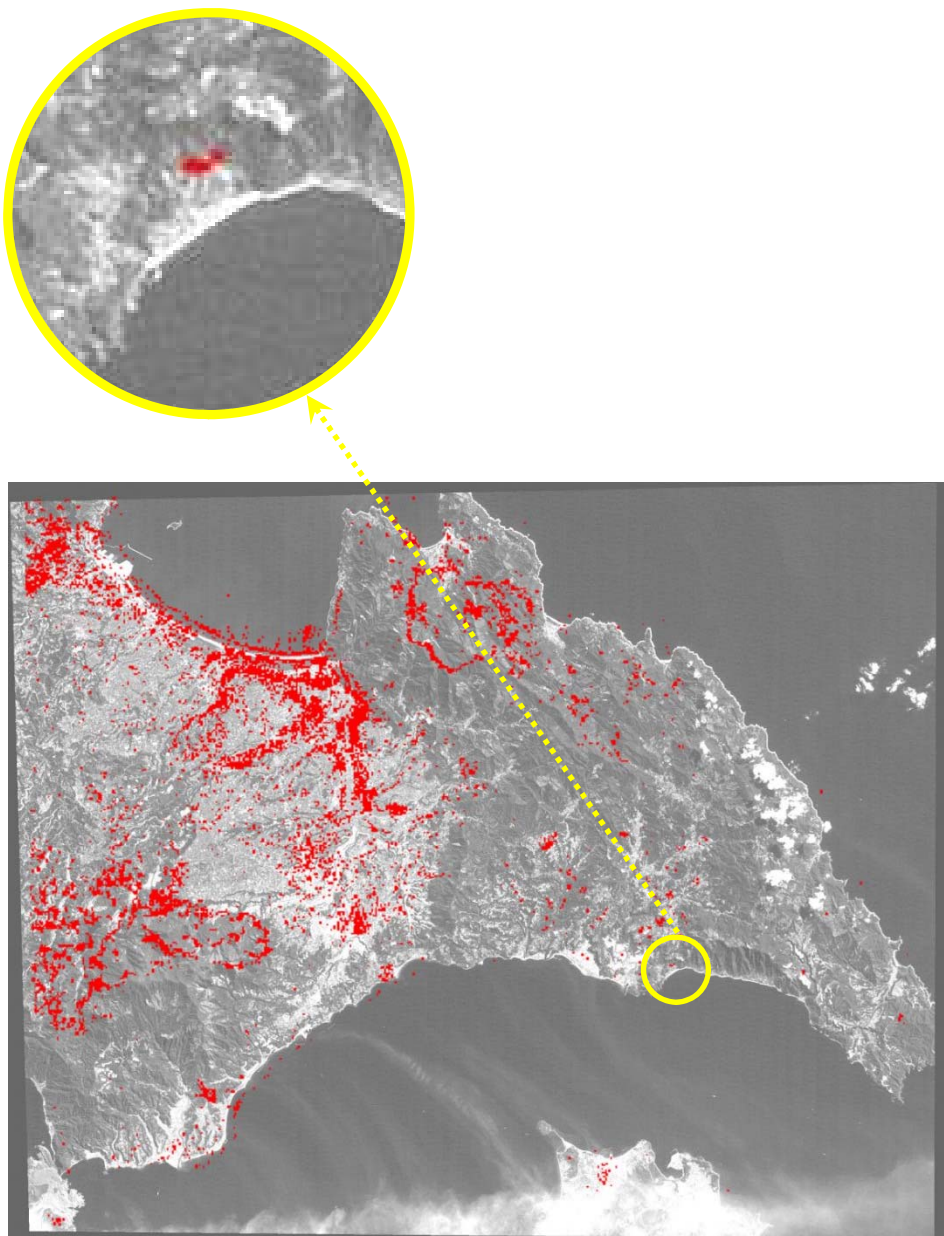


図 4-17 各 WCF 画像で抽出された土壌水分変動が少ない箇所を重ねた画像

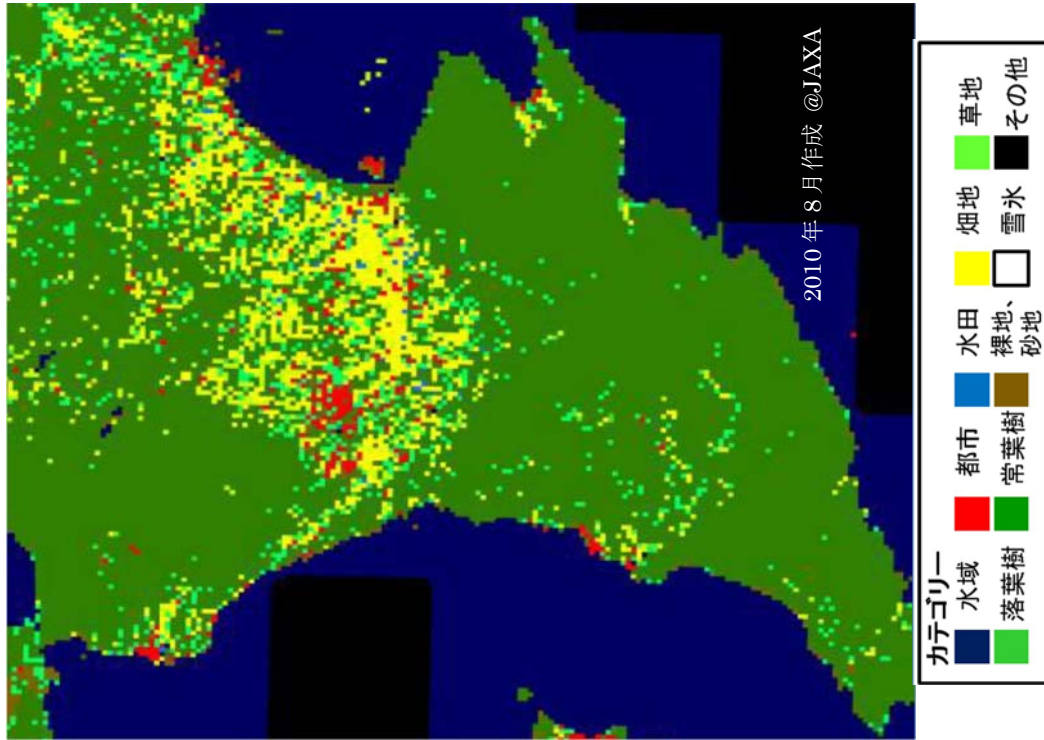
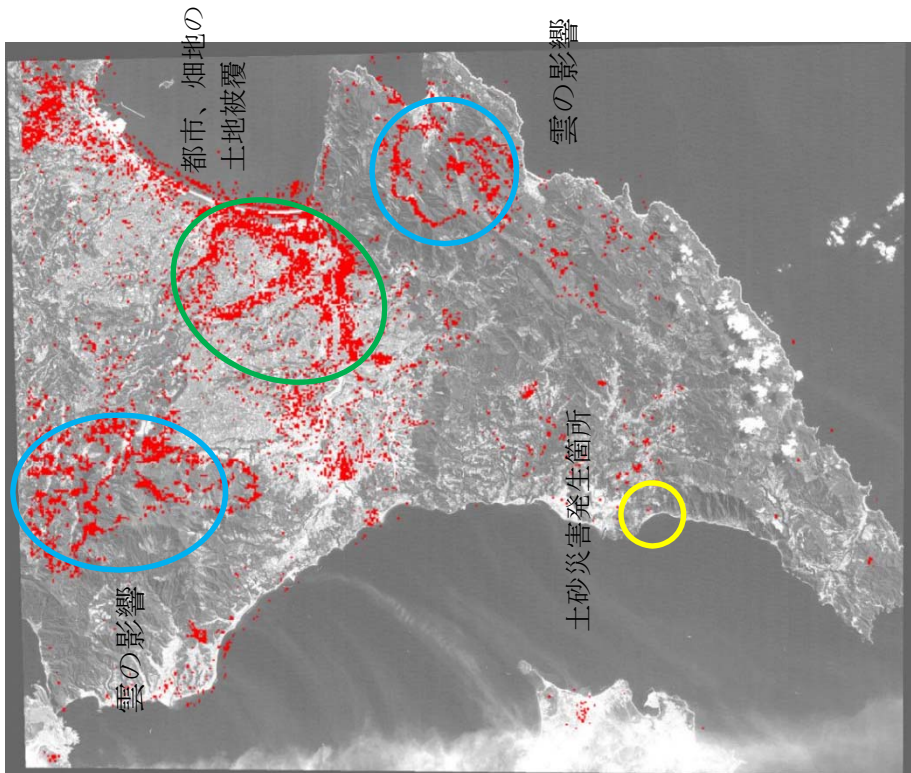


図 4-18 土壌水分変動が少ない箇所の抽出画像と土地被覆分類図との比較



## 第 5 章 人工衛星 ALOS/ AVNIR-2 データを用いた土壌水分変動域の抽出の検討

### 5.1 はじめに

前章では、多時期のデータの利用が可能な Landsat-5/TM データを利用し、土壌水分変動域の少ない箇所を抽出し、斜面崩壊の危険性が高い可能性がある箇所の抽出について検討を行った。

本章では、波長分解能と時間分解能は Landsat-5/TM データとほぼ同じであるが、空間分解能が Landsat-5/TM の 30m に比べ 10m と高分解能の陸域観測技術衛星(ALOS)データを利用し、空間分解能による土壌水分変動域の抽出精度を検討した。

### 5.2 材料及び方法

#### 5.2.1 衛星画像と画像解析

2007 年 1 月 22 日と 2007 年 7 月 25 日に観測した ALOS/AVNIR-2 データを解析に用いた。

#### 5.2.2 衛星画像前処理

##### 5.2.2.1 位置補正

2007 年 1 月 22 日の画像データを基準とし、2007 年 7 月 25 日の画像データの位置補正を行った。基準画像データを図 5-1 に、位置補正した前後の画像を図 5-2 に示す。画像内に基準点を万遍なく設置し、全ての点において二乗平均平方根誤差(RMSE)が 0.01pixel 以

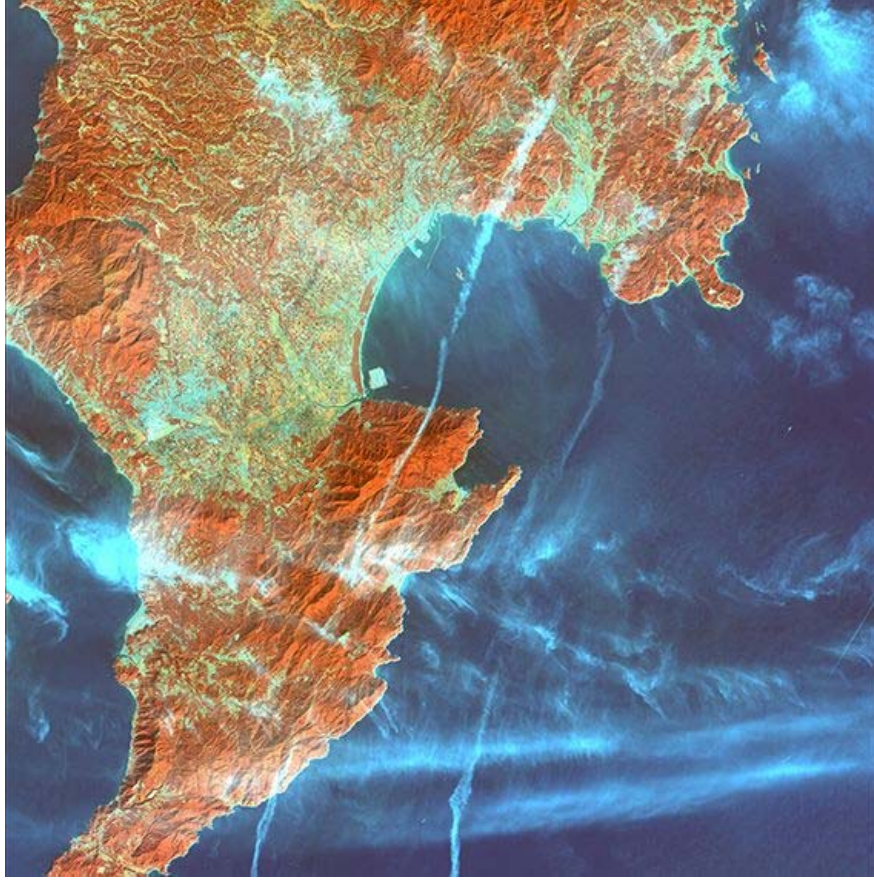


図 5-1 基準画像データ(2007年1月22日)



(位置補正前)



(位置補正後)

図 5-2 位置補正前後の画像(2007年7月25日)

下になるように設定した。

#### 5.2.2.2 大気補正処理

2007年7月25日のALOS/AVNIR-2のBand1、Band2、Band3とBand4の画像を大気補正処理の一例として、図5-3、図5-4、図5-5と図5-6に示す。(A)は補正前の画像で、(B)は補正後の画像である。画像下に示しているヒストグラムは縦軸がピクセル数、横軸を画素数として、画像の輝度分布を表している。電磁波の散乱は波長に比べて小さい粒子の場合レイリー散乱を生じる。散乱は波長の逆数の二乗に比例すると報告されている。補正前の画像の明暗で立ち上がりの輝度値は、Band1：88、Band2：60、Band3：36、Band4：7と波長帯域が大きくなるにつれて小さくなった。これらの数字はレイリー散乱を生じる傾向と一致している。そこで、この立ち上がりの輝度を差し引くことで大気中の微小粒子によるレイリー散乱の影響の除去、すなわち大気補正を行った。その結果、画像の輝度は全体的に低下し鮮明となった。

#### 5.2.2.3 正規化処理(地形補正)

2007年7月25日のALOS/AVNIR-2のBand1、Band2、Band3とBand4の画像を正規化処理の一例として、図5-7、図5-8、図5-9と図5-10に示す。(B)の正規化処理後の画像は、(A)の正規化処理前の画像に比べて、山の稜線等が不明瞭になり、地形の起伏が軽減された。

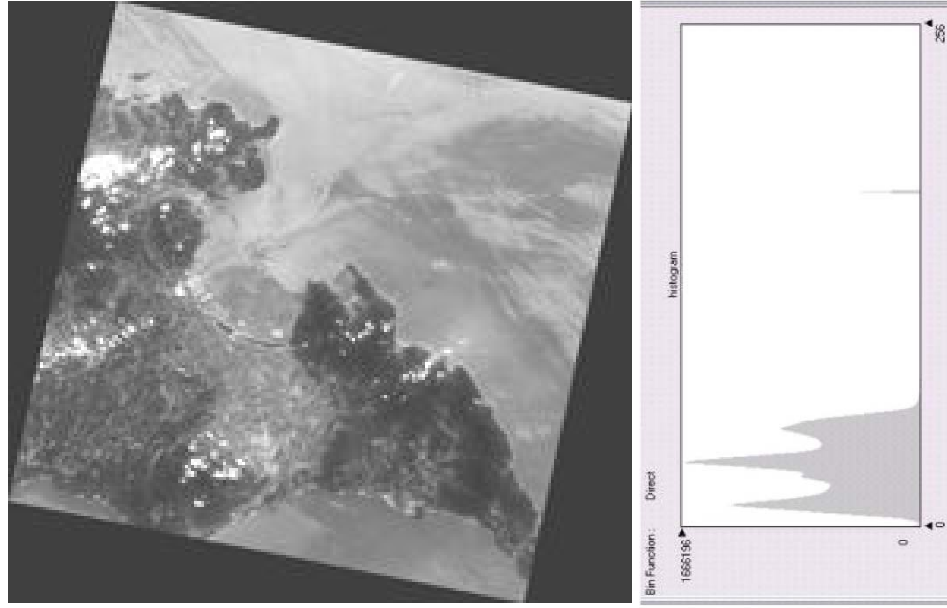
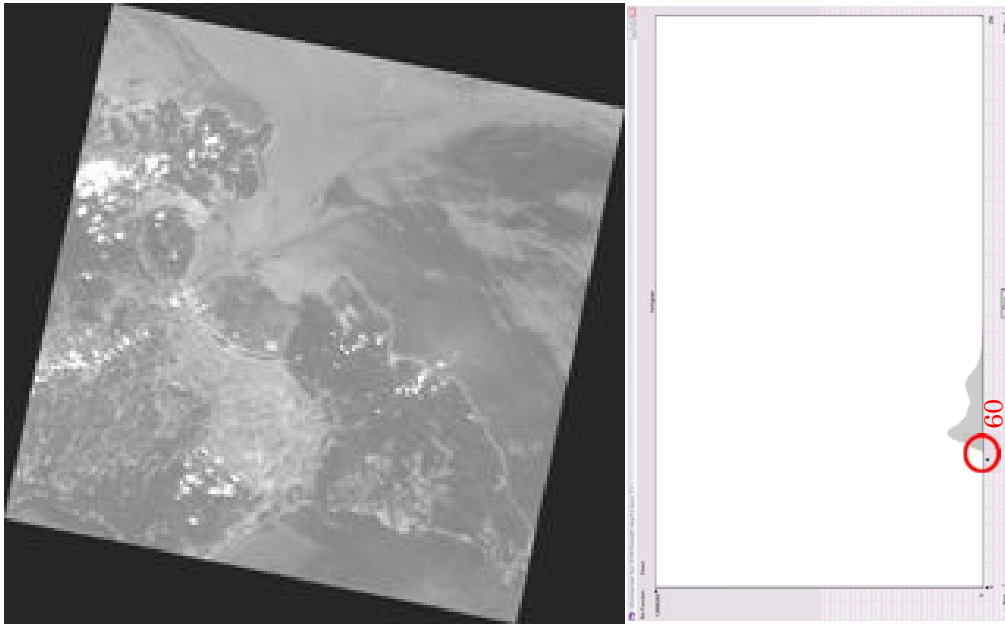


図 5-3 ALOS/AVNIR-2 の大気補正の画像

(2007年7月25日、Band1 A：補正前 B：補正後)

(A)



(B)

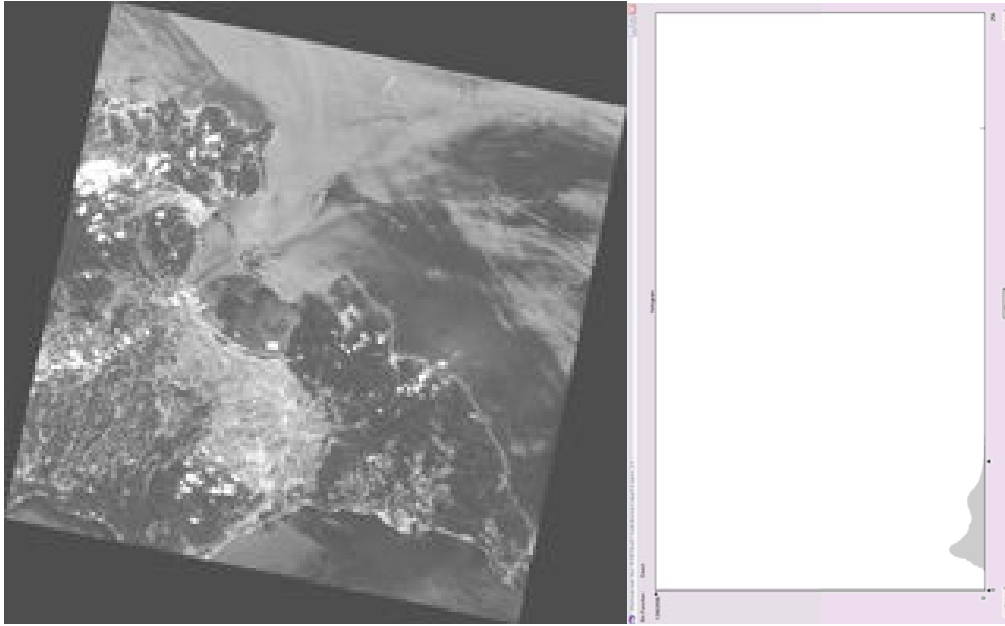


図 5-4 ALOS/AVNIR-2 の大気補正の画像

(2007年7月25日、Band2 A：補正前 B：補正後)

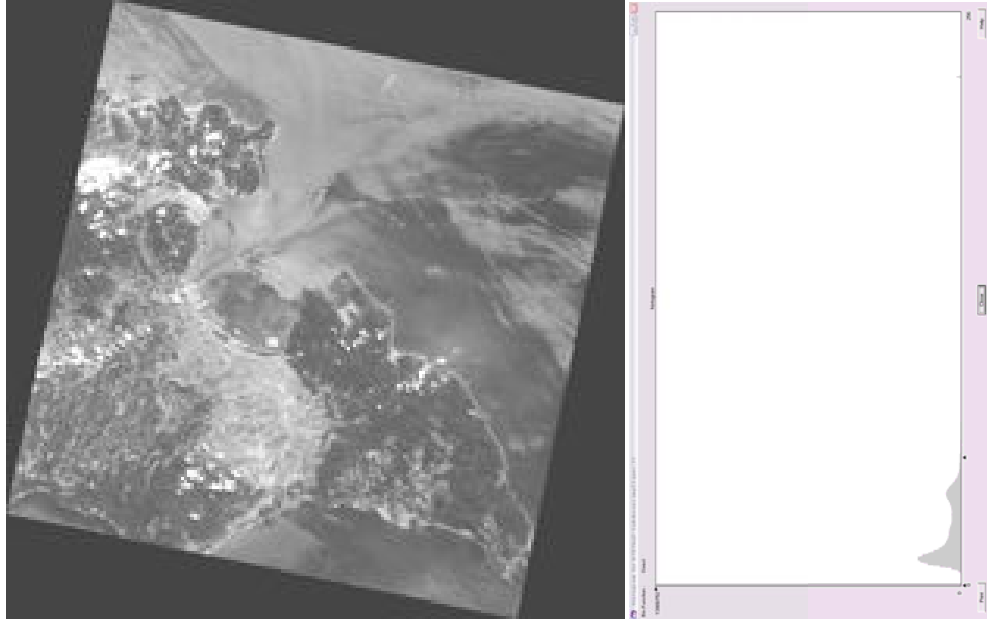


図 5-5 ALOS/AVNIR-2 の大気補正の画像

(2007年7月25日、Band3 A：補正前 B：補正後)

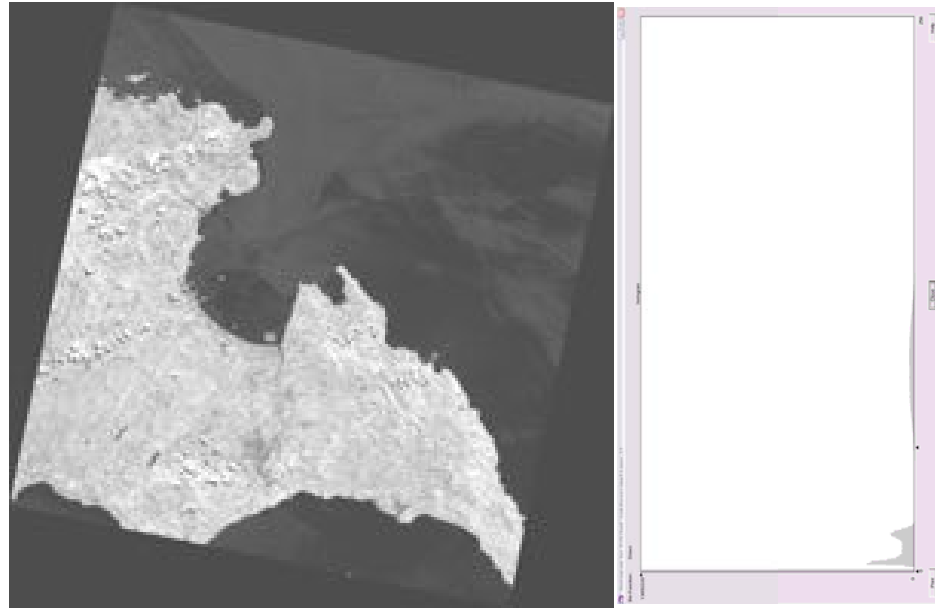
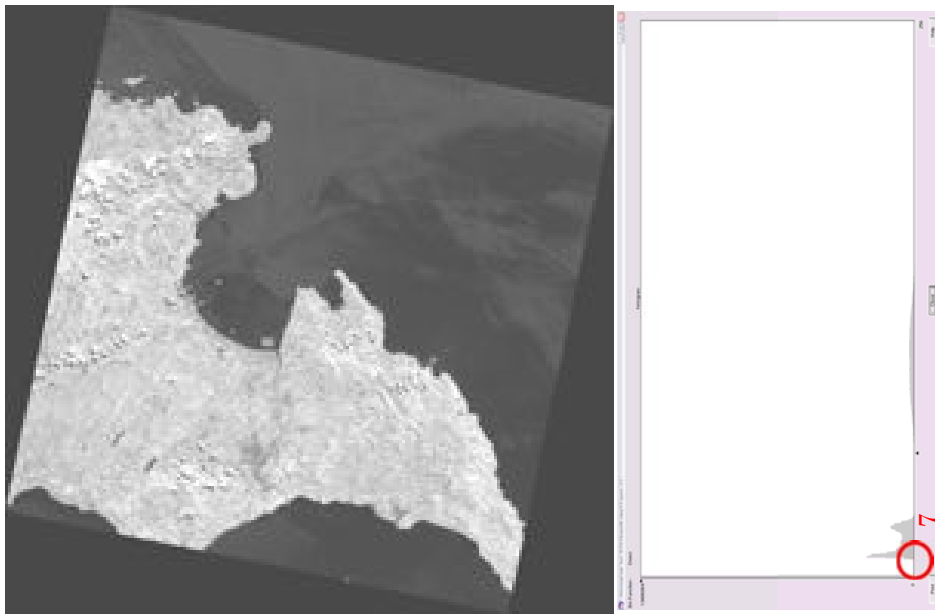
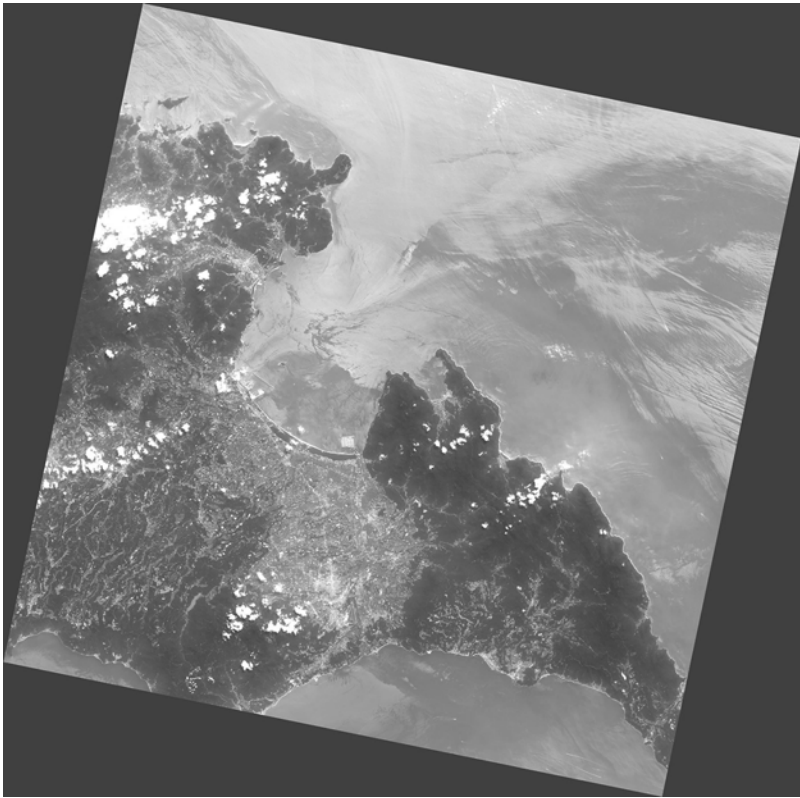


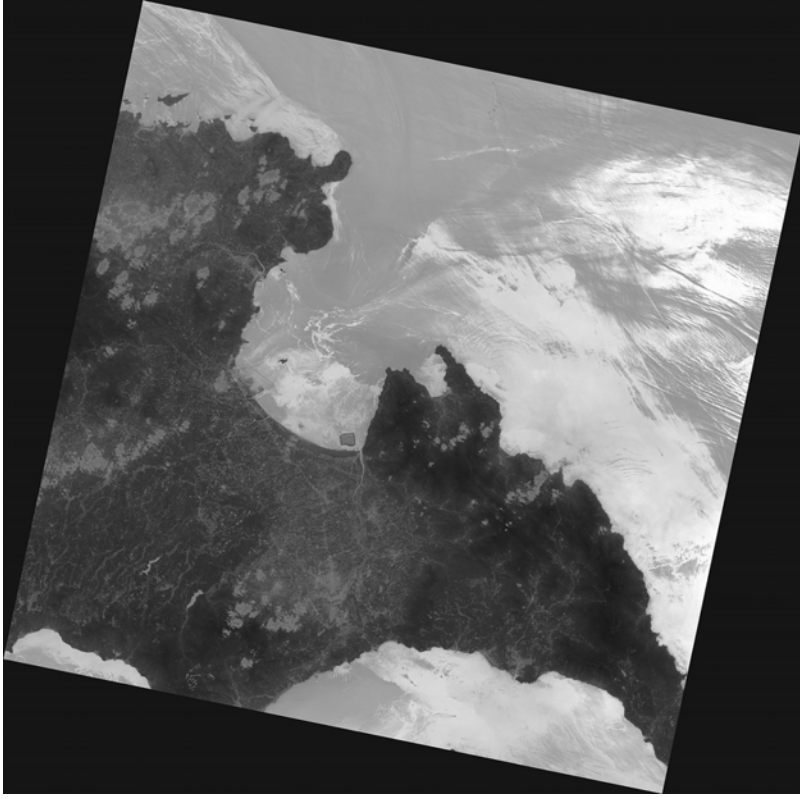
図 5-6 ALOS/AVNIR-2 の大気補正の画像

(2007 年 7 月 25 日、Band4 A : 補正前 B : 補正後)





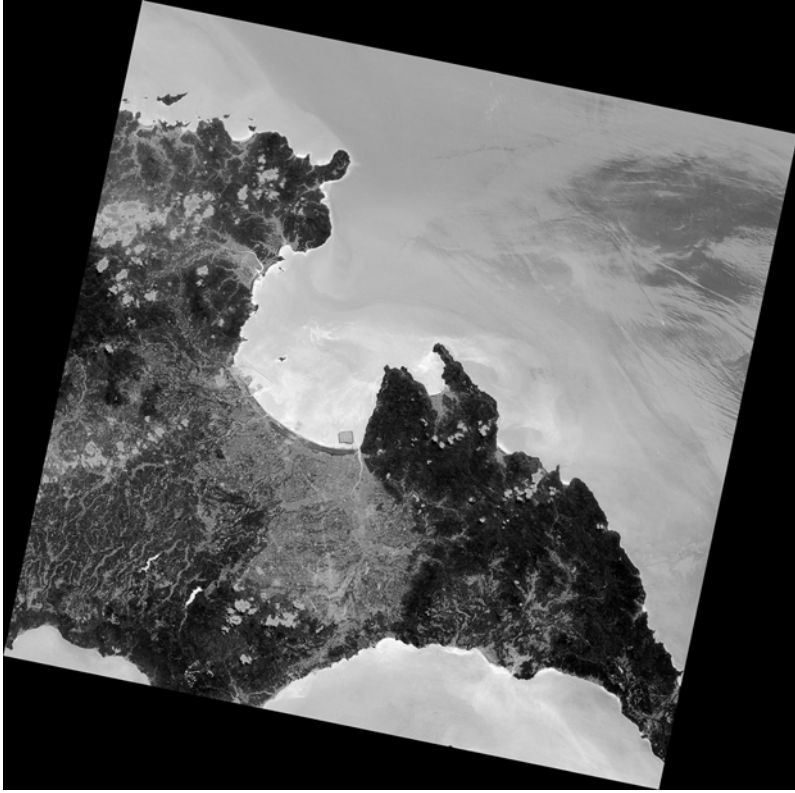
(A)



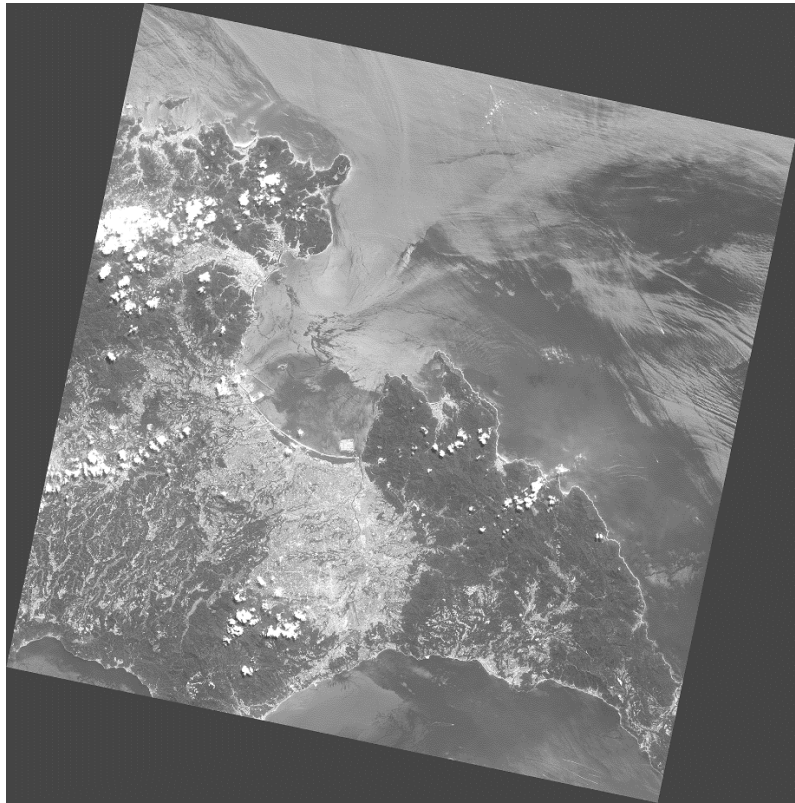
(B)

図 5-7 ALOS/AVNIR-2 の正規化の画像

(2007 年 7 月 25 日、Band1 A : 補正前 B : 補正後)



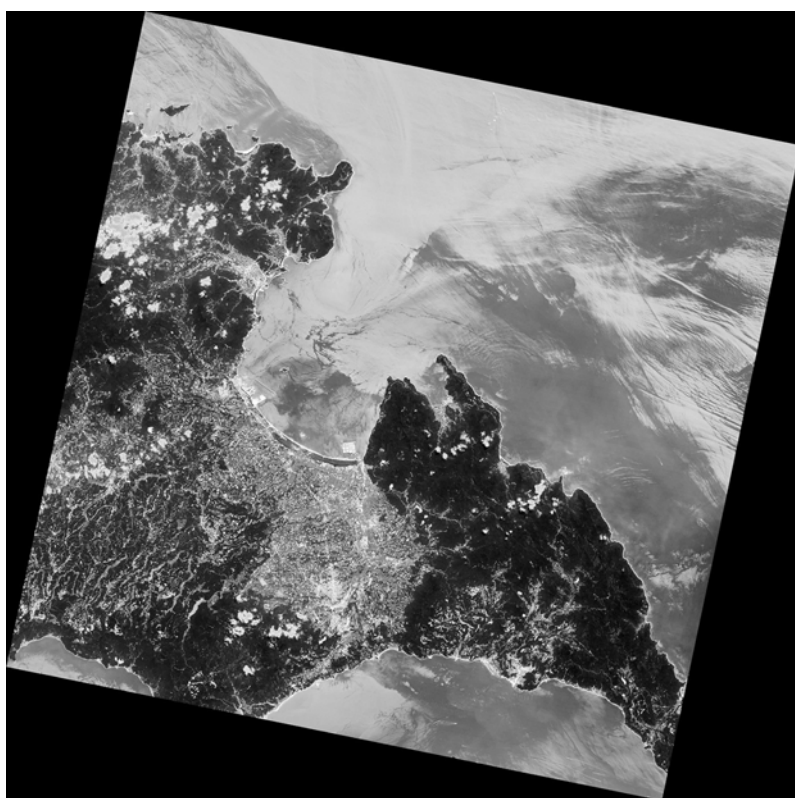
(B)



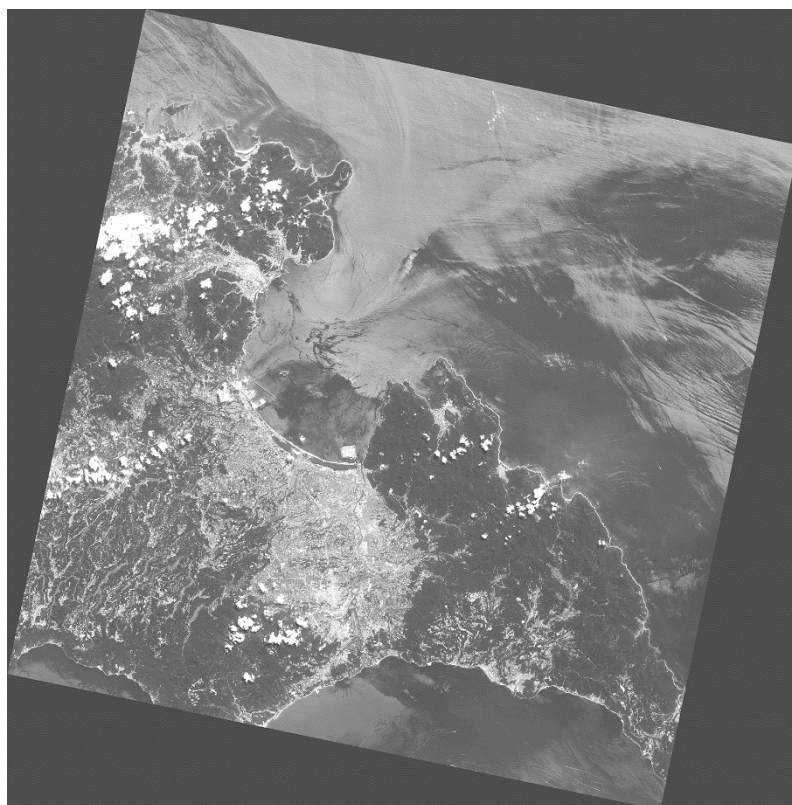
(A)

図 5-8 ALOS/AVNIR-2 の正規化の画像

(2007 年 7 月 25 日、Band2 A : 補正前 B : 補正後)

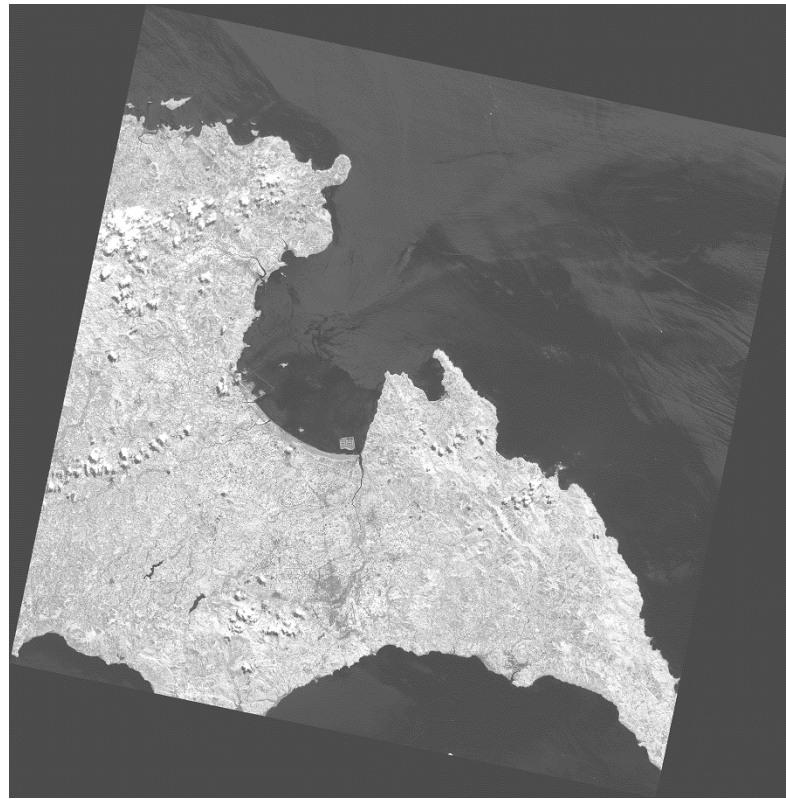


(B)

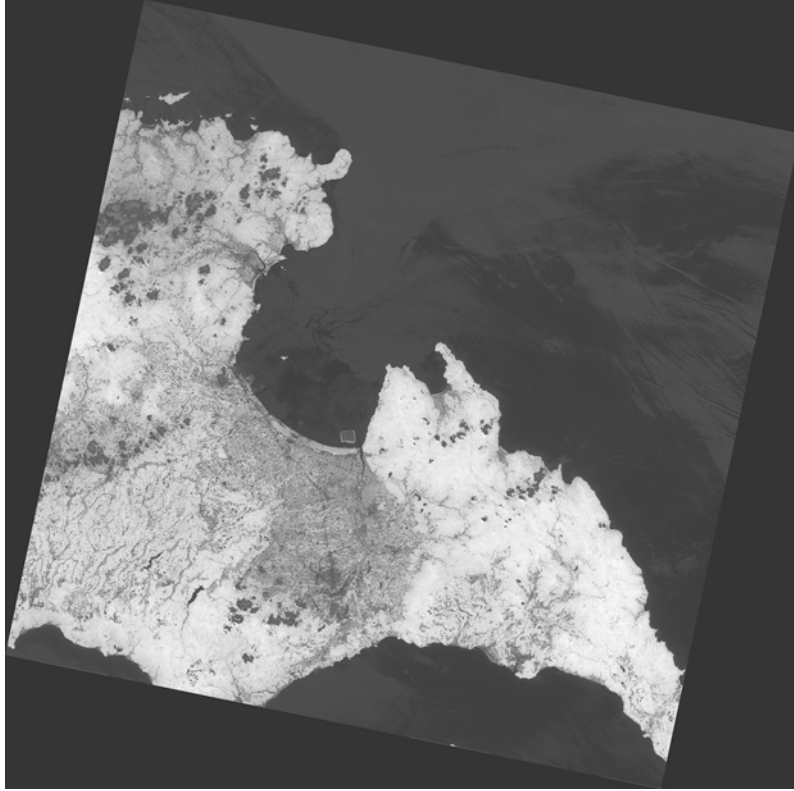


(A)

図 5-9 ALOS/AVNIR-2 の正規化の画像  
(2007 年 7 月 25 日、Band3 A : 補正前 B : 補正後)



(A)



(B)

図 5-10 ALOS/AVNIR-2 の正規化の画像

(2007年7月25日、Band4 A: 補正前 B: 補正後)

## 5.3 結果及び考察

### 5.3.1 指標の検討

第 2 章のスタジイの葉内含水率の分光反射特性から、ALOS/AVNIR-2 の各バンドに対応した平均分光反射率を算出し、葉内含水率の指標の検討を行った。ALOS/AVIR-2 の Band3 と Band4 の二つのバンド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(5-1)に示す。

$$\text{NDVI} = (\text{Band4} - \text{Band3}) / (\text{Band4} + \text{Band3}) \quad (5-1)$$

図 5-11 に樹冠部の葉内含水率と指標の関係を示す。その結果、散布図から NDVI 値は、葉内含水率に対して高い相関を示した。

葉内含水率の実測値と NDVI による推定値と比較した推定精度について図 5-12 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、Band3 と Band4 を用いた NDVI により、葉内含水率の推定ができる可能性が示された。

ここで、Landsat-5/TM の場合と同様に、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 WCF 指標を用いる。今、二時期の衛星データを a, b とすると、

$$\text{WCF} = (\text{NDVI}_a - \text{NDVI}_b) / \text{NDVI}_a \quad (5-2)$$

で表示される。

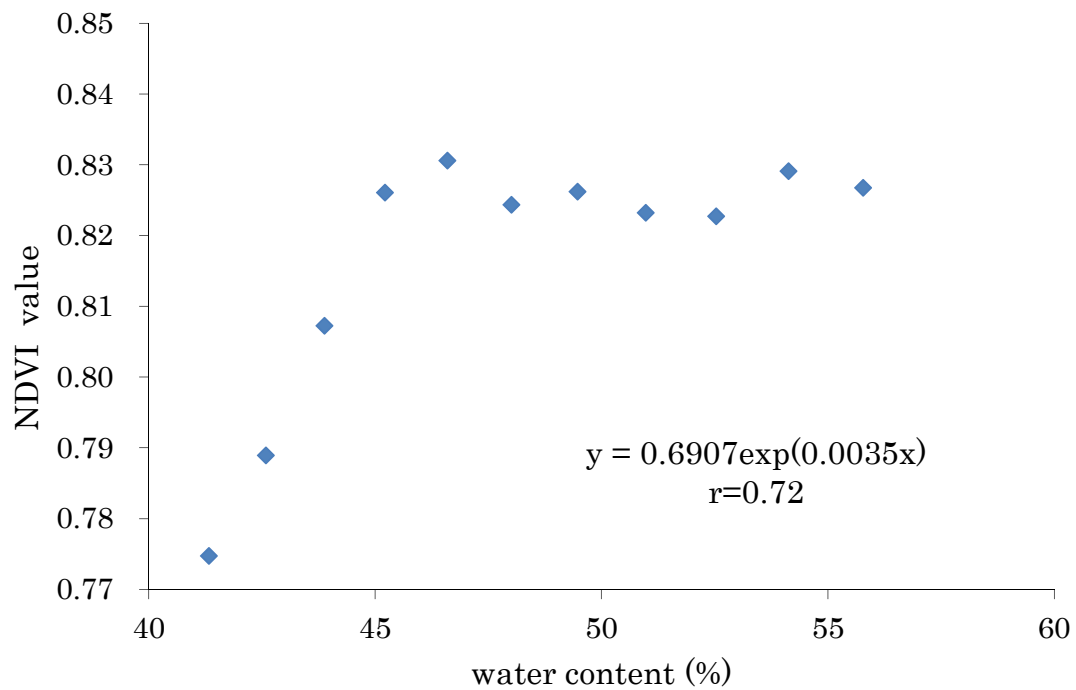


図 5-11 葉内含水率と NDVI 値の関係

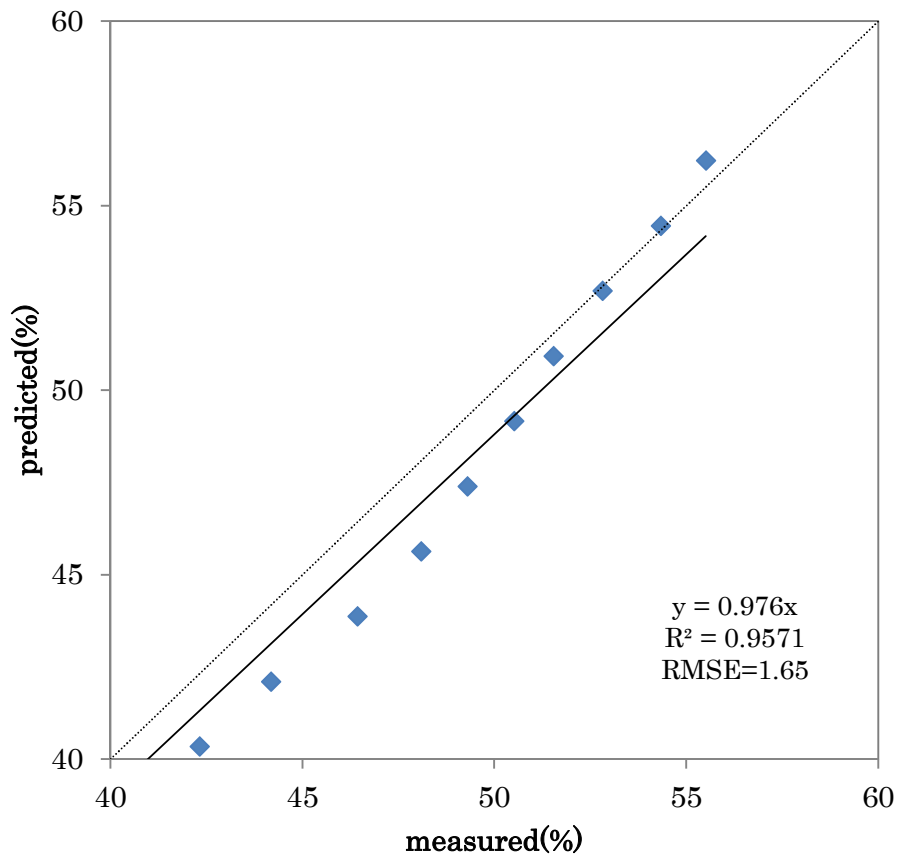


図 5-12 葉内含水率の実測値と推定値との比較

### 5.3.2 画像解析

2007年1月22日と2007年7月25日のNDVI画像を図5-13と図5-14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。

2007年1月22日と2007年7月25日における土壤水分変動域の画像を図5-15に示す。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像を図5-16に示す。土壤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。

図5-17に土壤水分変動域の抽出画像と土地被覆分類図と比較したものを示す。抽出された土壤水分変動域が少ない箇所において、部分的に雲の影響も考えられるが常葉樹の土地被覆において集中している箇所がみられた。





図 5-13 NDVI 画像(2007 年 1 月 22 日)

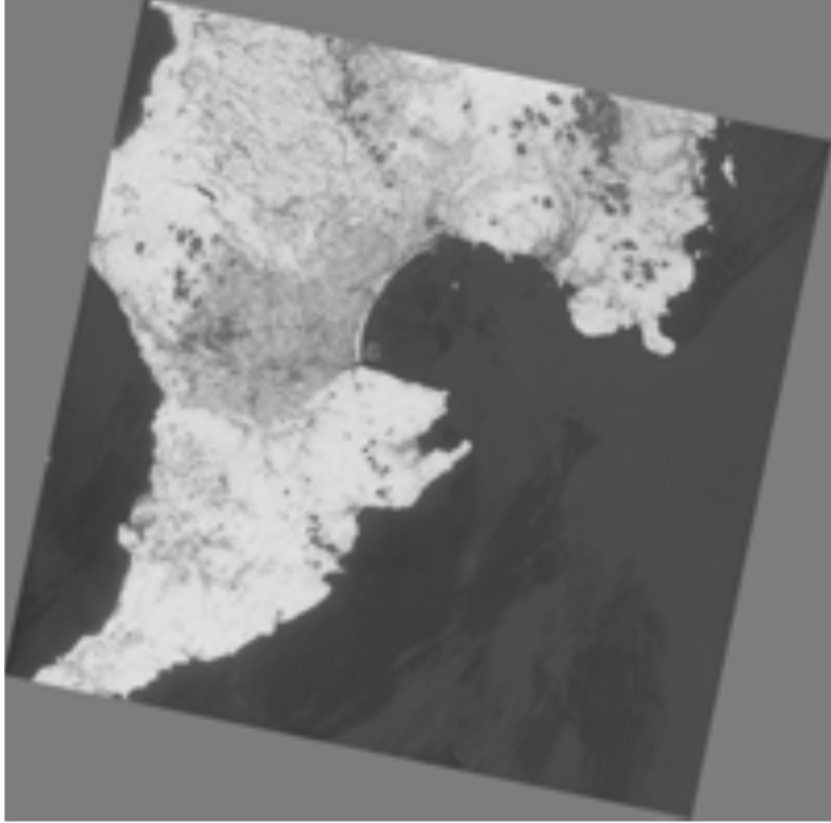


图 5-14 NDVI 画像(2007 年 7 月 25 日)

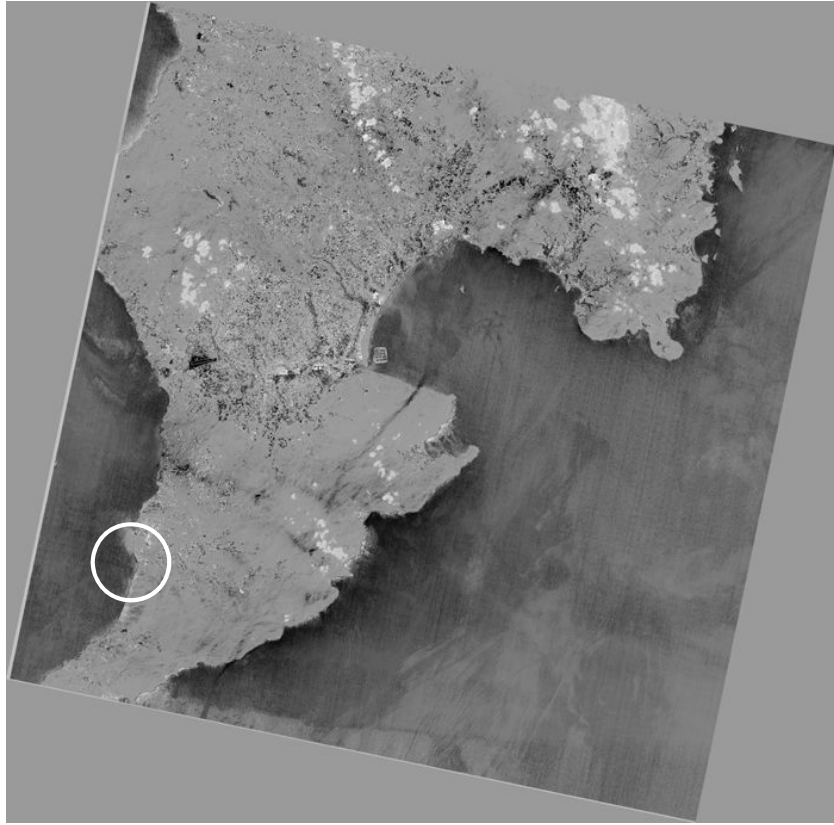


图 5-15 土壤水分变动域(WCF)画像

土砂災害発生箇所

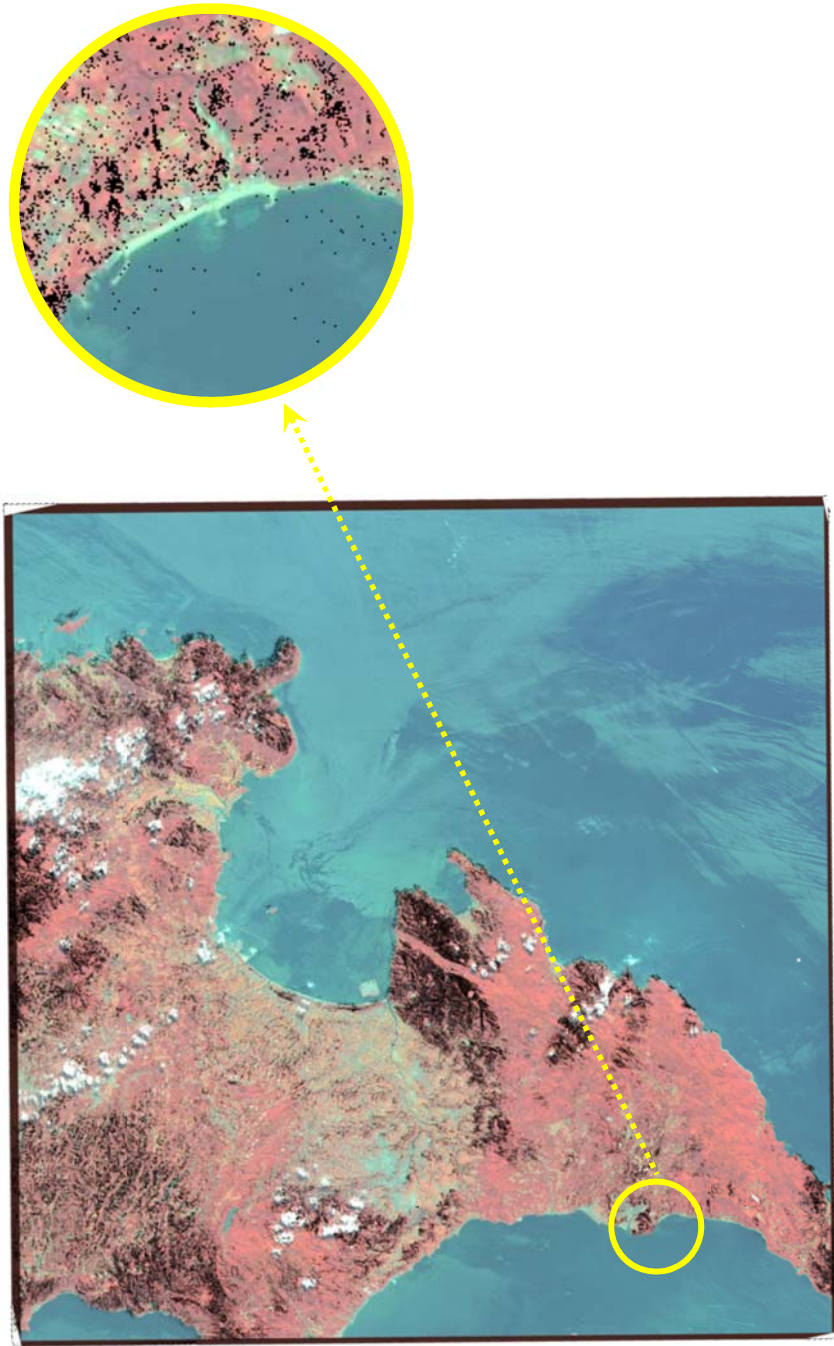


図 5-16 閾値による土壌水分変動が少ない箇所の強調画像

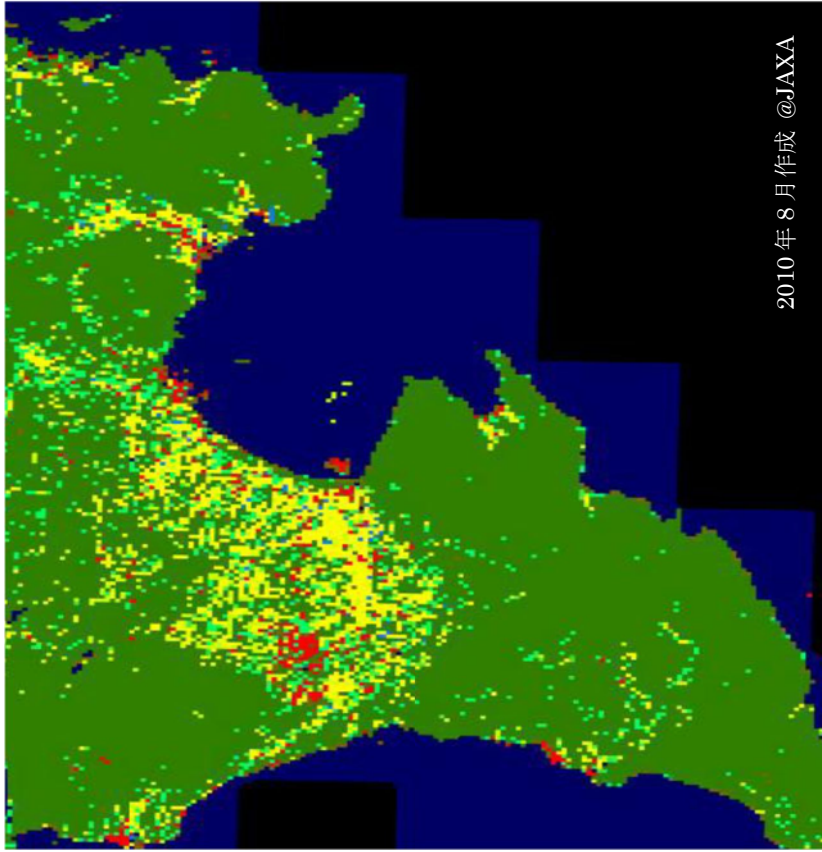


図 5-17 土壌水分変動が少ない箇所の抽出画像と土地被覆分類図との比較

## 5.4 摘要

本章では、波長分解能と時間分解能は Landsat-5/TM データとほぼ同じであるが、空間分解能が Landsat-5/TM の 30m に比べ 10m と高分解能の陸域観測技術衛星 (ALOS) データを利用した。分光反射特性から ALOS/AVNIR-2 データの各バンドに対応する平均分光反射率を算出し、葉内含水率を推定する指標の検討を行った。葉内水分分布画像から異なる時期の土壌水分変動域の抽出の検討を行い、以下の結論を得た。

1. ALOS/AVNIR-2 データにおいても、Landsat-5/TM 同様に葉内含水率の推定指標には Band3 と Band4 を用いた NDVI が有効であった。
2. 実際に発生した土砂災害箇所には土壌水分変動域が少ない箇所が含まれており、Landsat-5/TM と比較して詳細に抽出されていた。
3. 2 時期における解析及び閾値を設定した土壌水分変動域の抽出によって、より土壌水分変動域の少ない箇所の判読性には一定の効果があると考えられる。
4. 抽出された土壌水分変動域が少ない箇所において、常葉樹の土地被覆において、部分的に雲の影響も考えられるが、Landsat-5/TM では抽出されなかった箇所が集中している箇所がみられた。

## 第 6 章 地上リモートセンシングによる斜面の土壌水分変動域の抽出の検討

### 6.1 はじめに

地上リモートセンシングは、人工衛星データや航空写真データと比較して空間分解能が高く、雲や天候による撮影の影響を受けず、同じ地点からデータを頻繁に取得が容易であるという特性を有している。

本章では簡易的な手法としてデジタルカメラを利用し、波長分解能が異なる分解画像と分光画像について、異なる対象地及び気象条件の違いを踏まえ、斜面の土壌水分変動域の抽出について検討を行った。また、本研究が、近年活用事例が増えている UAV に今後適用するための基礎的な位置付けとして検証を行った。

### 6.2 材料及び方法

#### 6.2.1 対象地

鹿児島県が土砂災害警戒区域に指定しているエリアを参考に現地調査を行い、斜面がある程度一様に植生に覆われた箇所を対象地として選定した。また対象斜面が近景と遠景のケースを設定した。これらの対象斜面は、データ取得に際して支障がない箇所とした。今回、対象地とした近景の鹿児島市小野町と遠景の鹿屋市大浦町について図 6-1 に示す。

#### 6.2.2 撮影方法

撮影はデジタルカメラで撮影したカラー画像とデジタルカメラの



左：鹿児島市小野町（近景）



右：鹿屋市大浦町（遠景）

图 6-1 対象地写真



前面に中心波長が 520nm、570 nm と 660 nm のバンドパスフィルター（日本真空光学株式会社製：5cm×5cm)(以降 BP)を装着して撮影した分光画像の 2 つの方法で画像を取得した。波長分解能は中心波長に対してそれぞれ±15nm である。いずれの場合も、標準白色版を太陽に垂直に設置して、画面の一部に映るようにし、反射エネルギーを反射率に変換できるようにした。各対象地の撮影日及び気象条件について表 6-1 に示す。今回、撮影時期は 3 回とし、また気象の影響による土壌水分の変動も考慮して、気象条件を連続した晴天時と降雨後 3 日後として撮影を行った。

実験風景について図 6-2 に示す。対象地の見通せる箇所において、三脚にデジタルカメラを設置し、前面に BP を装着して画像を取得している状況である。

表 6-1 各対象地の撮影日及び気象条件

鹿児島市小野町		鹿屋市大浦町	
撮影日	気象条件	撮影日	気象条件
2013/08/15	連続した晴天時	2013/08/03	連続した晴天時
2013/08/19	連続した晴天時	2013/08/08	降雨後 3 日後
2013/08/29	降雨後 3 日後	2013/09/06	降雨後 3 日後

### 6.2.3 反射エネルギーから反射率への変換

デジタルカメラで撮影された画像の明暗、すなわち輝度は、対象物からの反射エネルギーに対応する。これらの反射エネルギーは撮影時の太陽照度や対称面の反射率により大きく異なる。そこで、撮



図 6-2 実験風景の写真

影時の反射エネルギー変動の影響をなるべく除去するため、標準白色板の輝度を基準とした除算処理を行い、反射率画像を作成した。

#### 6.2.4 位置補正処理

位置補正処理は、地形の起伏、家屋の屋根等の識別が容易でしかも撮影時に変化しない基準点（Ground Control Point：GCP）を画像内に万遍なく設定し、分解画像ならびに分光画像の位置補正を行った。

#### 6.2.5 正規化処理(地形補正)

正規化処理は、小野ら<sup>68)</sup>の衛星データによるバンド間演算の手法を用いて、分解画像ならびに分光画像に適用した。

### 6.3 結果及び考察

#### 6.3.1 反射エネルギー画像と反射率画像

反射エネルギー画像を反射率画像に変換した画像の一例として、対象地が鹿児島市は図 6-3、図 6-4 と図 6-5、鹿屋市は図 6-6、図 6-7 と図 6-8 に示す。一般的に植物の葉緑素は 660nm 付近において、光エネルギーを吸収するため、この波長域では全体的に暗い画像となることが多い。しかし、反射率に変換したいずれの画像も輝度の変化が大きく、濃淡差が明瞭な画像となった。

#### 6.3.2 位置補正処理画像

位置補正処理をした画像の一例として、対象地の鹿児島市及び鹿屋市について図 6-9 と図 6-10 に示す。補正後はいずれの補正前の

画像も、基準画像に対して補正された画像となった。

### 6.3.3 正規化処理(地形補正)画像

正規化処理をした画像の一例を図 6-11 と図 6-12 に示す。正規化後の画像は、正規化前の画像に比べて、濃淡差が少なくなり地形の凹凸の影響が軽減された。

### 6.3.4 指標の検討

本章では、樹冠部の葉内含水率の検出について、分解画像と分光画像を用いるため、分解画像は RGB、分光画像は RGB の波長域に対応する画像を用いることを前提とし、以下の式で表示される RI(Ratio Index)を用いて指標の検討を行った。

$$RI_{\text{Green,Red}} = R_{\text{Green}} / R_{\text{Red}} \quad (6-1)$$

$$RI_{520,660} = R_{520} / R_{660} \quad (6-2)$$

ここで(6-1)式の R に対する添字 Green、Red は、分解画像を RGB に分解した緑色域、赤色域を示す。(6-2)式の R に対する添字 520 と 660 は、分光画像の BP の中心波長の値を示す。

図 6-13 にスタジイの葉内含水率と  $RI_{520,660}$  と  $RI_{\text{Green,Red}}$  の関係を示す。分解画像及び分光画像ともに RI 値は含水率によって指数的に増加し高い相関を示した。よって、RI が樹冠部の葉内含水率推定指標に有効である可能性が示された。



反射エネルギー画像



反射率画像

図 6-3 反射率画像 (対象地：鹿児島市 中心波長：520nm 撮影日：2013/08/29)



反射エネルギー画像



反射率画像

図 6-4 反射率画像 (対象地：鹿児島市 中心波長：570nm 撮影日：2013/08/29)



反射率画像

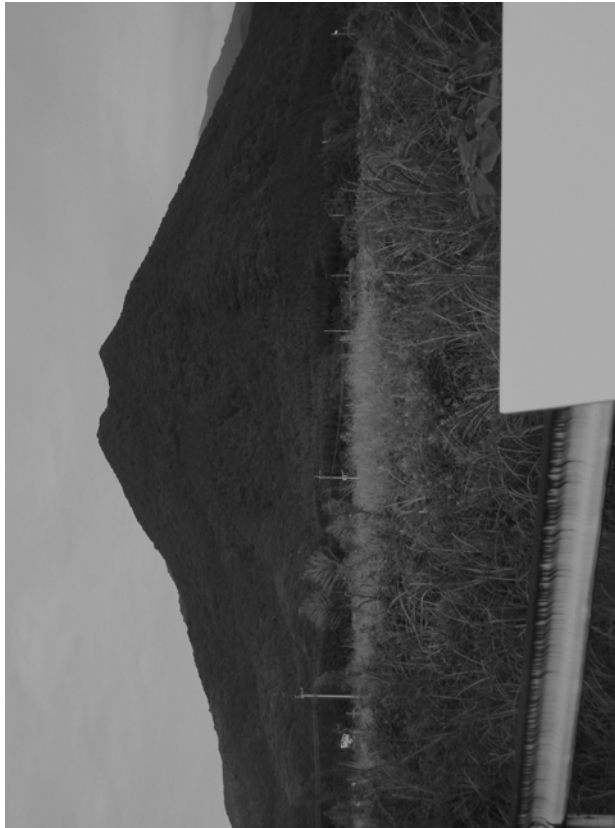


反射エネルギー画像

図 6-5 反射率画像（対象地：鹿児島市 中心波長：660nm 撮影日：2013/08/29）



反射率画像



反射エネルギー画像

図 6-6 反射率画像 (対象地：鹿屋市 中心波長：520nm 撮影日：2013/09/06)

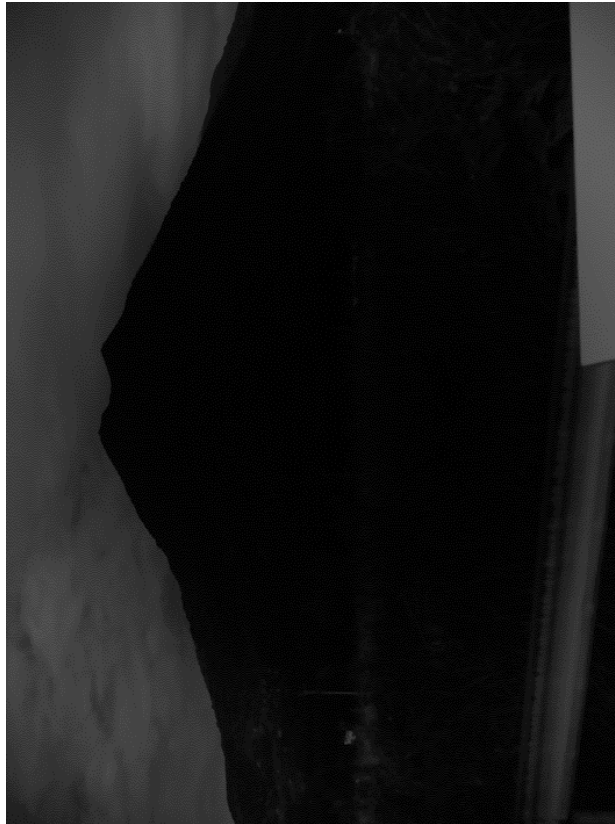




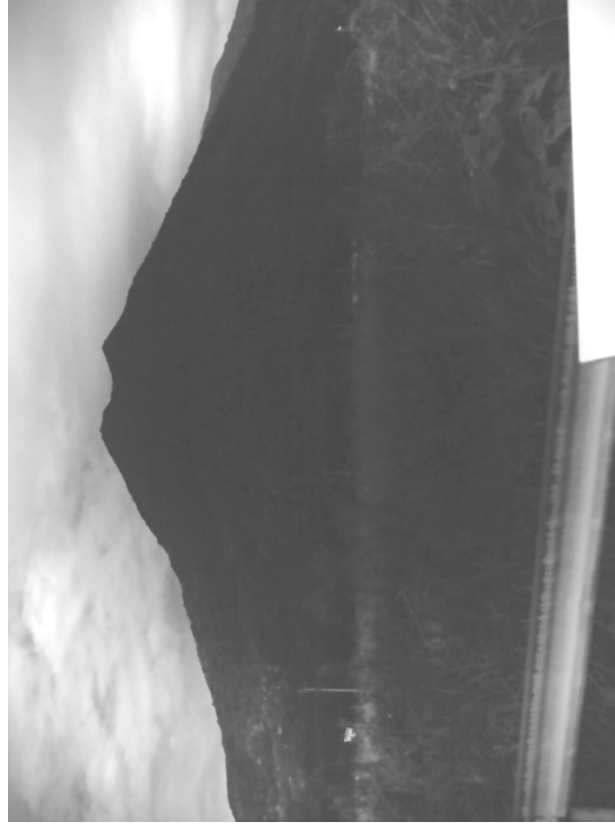
反射エネルギー画像

反射率画像

図 6-7 反射率画像 (対象地：鹿屋市 中心波長：570nm 撮影日：2013/09/06)



反射エネルギー画像



反射率画像

図 6-8 反射率画像（対象地：鹿屋市 中心波長：660nm 撮影日：2013/09/06）



基準画像

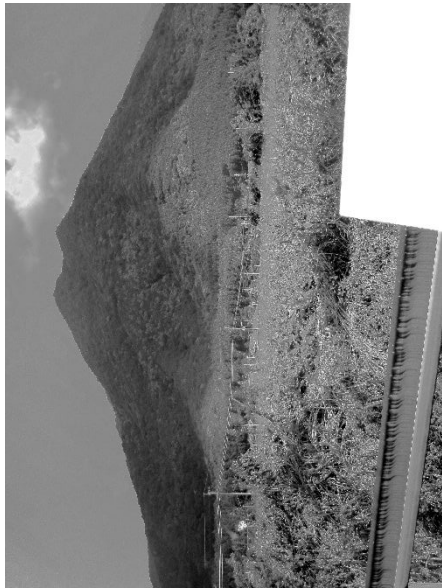


補正前



補正後

図 6-9 位置補正処理画像 (対象地：鹿児島市 撮影部：2013/08/29)



基準画像



補正前



補正後

図 6-10 位置補正処理画像 (対象地：鹿屋市 撮影日：2013/09/06)



処理前画像



処理後画像

図 6-11 正規化処理画像（対象地：鹿児島市 中心波長：520nm 撮影日：2013/08/29）



処理前画像



処理後画像

図 6-12 反射率画像 (対象地：鹿屋市 中心波長：520nm 撮影日：2013/09/06)

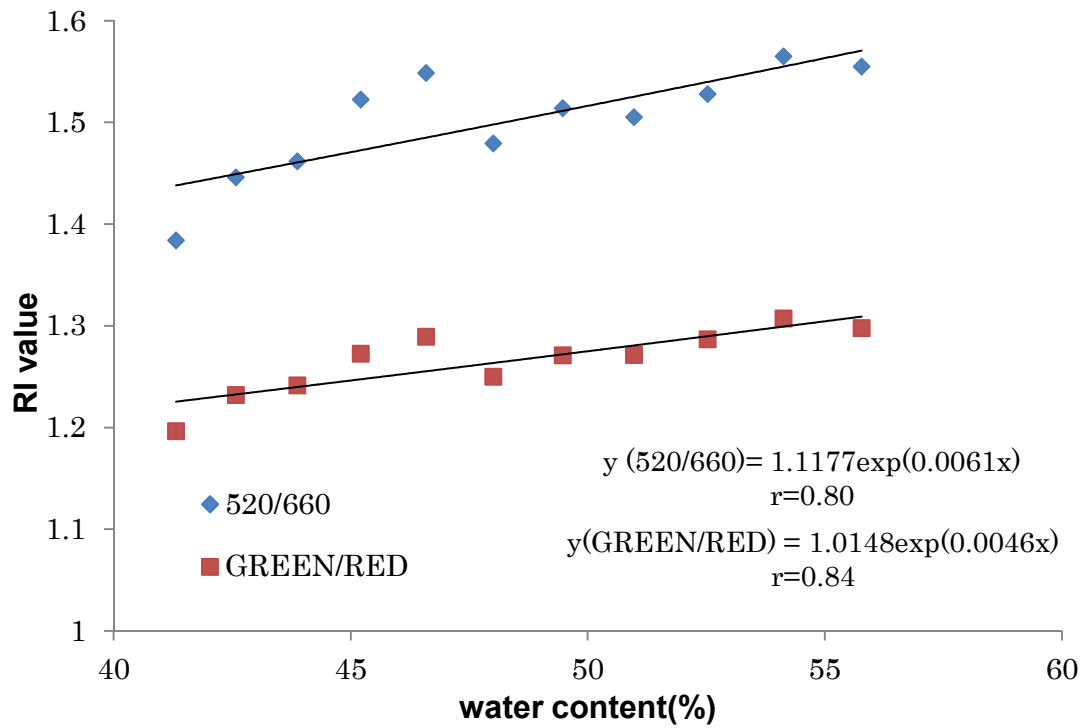


図 6-13 スダジイの葉内含水率と  $RI_{520,660}$  と  $RI_{\text{Green,Red}}$  の関係

### 6.3.5 樹冠部の水分分布画像

鹿児島市における 8 月 15 日(連続した晴天時)、8 月 19 日(連続した晴天時)及び 8 月 29 日(降雨後 3 日後)に撮影した分光画像に対して  $RI_{520,660}$  を適用して作成した水分分布画像を図 6-14 に示す。また、同日に撮影した分解画像の R,G の画像に対して、 $RI_{Green,Red}$  指標を用いて作成した水分分布画像を図 6-15 に示す。

また鹿屋市における 8 月 3 日(連続した晴天時)、8 月 8 日(降雨後 3 日後)及び 9 月 6 日(降雨後 3 日後)に撮影した  $RI_{520,660}$  を適用して作成した水分分布画像を図 6-16 に示し、同日に撮影した分解画像の R,G に対して、 $RI_{Green,Red}$  指標を用いて作成した水分分布画像を図 6-17 に示す。各水分分布画像では、輝度の明るい部分が樹冠部の葉内水分の多い場所となる。いずれの画像も山腹の凹凸や繁茂している樹木の葉の影響を受けていることが確認された。

### 6.3.6 土壌水分変動域の抽出

水分分布画像は上述のように、地形等の影響を受けた濃淡画像で表示された。そこで、地形の影響等を軽減し、土壌水分変動域を抽出するために、(6-3)式に示される WCF 指標を用いた。異なる撮影日の水分分布画像に画像演算処理を行い、水分分布画像の差を求め、無次元化したものである。以下に WCF 指標の式を示す。

$$WCF = (RI_A - RI_B) / RI_A \quad (6-3)$$

ここで、添字 A,B は撮影日を表す。



鹿児島市における図 6-14 に示した  $RI_{520,660}$  の分光画像による葉内水分分布画像に対して、土壤水分変動域を抽出した画像を図 6-18 に示す。図 6-15 に示した  $RI_{Green,Red}$  の分解画像による葉内水分分布画像に対して、土壤水分変動域を抽出した画像を図 6-19 に示す。

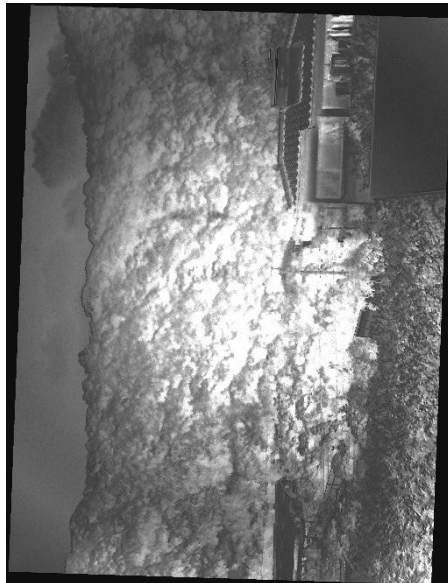
また鹿屋市における図 6-16 に示した  $RI_{520,660}$  の分光画像による葉内水分分布画像に対して、土壤水分変動域を抽出した画像を図 6-20 に示す。図 6-17 に示した  $RI_{Green,Red}$  の分解画像による葉内水分分布画像に対して、土壤水分変動域を抽出した画像を図 6-21 に示す。連続した晴天時と雨天後 3 日後では、通常、土壤水分が異なることが予測されるが、黒っぽい箇所は土壤水分の変動が少ない箇所を示している。モンスーン地帯において、土壤水分の変動が少ない箇所は、平時より水分供給されている状態にあることが考えられ、土壤水分の変動が少ない箇所は他の箇所に比べ、常時土壤水分が高い可能性が考えられる。

### 6.3.7 土壤水分の少ない箇所の強調画像

図 6-22 と図 6-23 に鹿児島市における分光画像及び分解画像、図 6-24 と図 6-25 に鹿屋市における分光画像及び分解画像の土壤水分変動域の画像を用いて、3 日の観測日の画像から強調画像を作成したものである。これらの画像は、各 WCF 画像より抽出された最も土壤水分の変動が少ない値  $WCF=0$  付近で任意のしきい値を設定し、それぞれ抽出された箇所を重ねた画像である。また重なる箇所を着色して位置補正後の画像に重ねることで、どの位置に最も土壤水分の変動が少ない箇所、すなわち常時土壤水分が高い状態の可能性のある箇所を視覚的に判読しやすくしたものである。また本研究では、



対象地画像



撮影日：2013/08/15



撮影日：2013/08/19

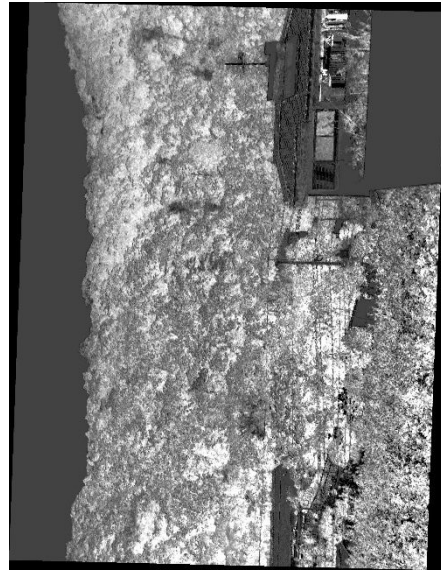


撮影日：2013/08/29

図 6-14 分光画像による葉内水分分布画像 (対象地：鹿児島市)



対象地画像



撮影日：2013/08/15



撮影日：2013/08/19



撮影日：2013/08/29

図 6-15 分解画像による葉内水分分布画像（対象地：鹿児島市）



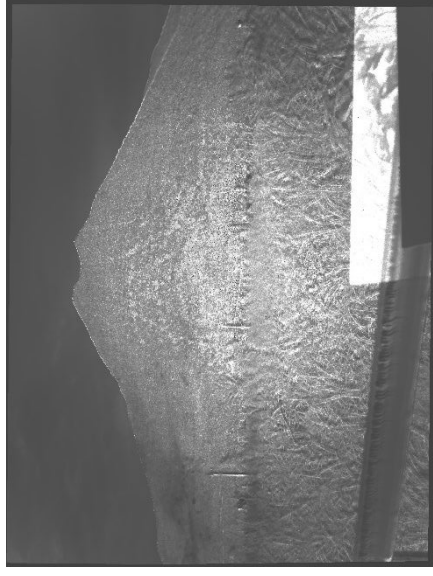
対象地画像



撮影日：2013/08/03



撮影日：2013/08/08



撮影日：2013/09/06

図 6-16 分光画像による葉内水分分布画像（対象地：鹿屋市）



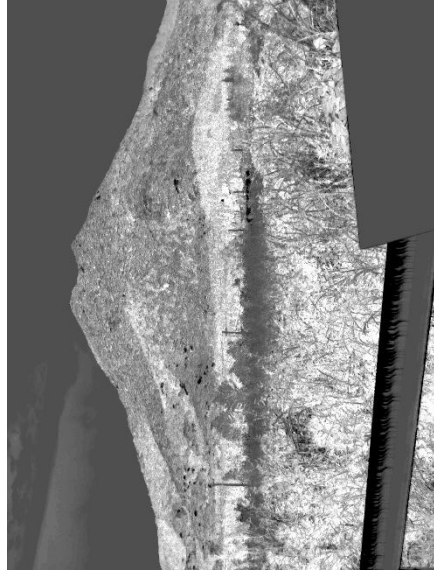
対象地画像



撮影日：2013/08/03



撮影日：2013/08/08

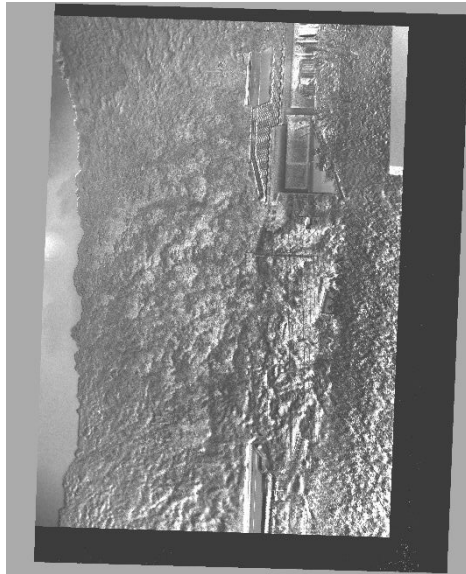


撮影日：2013/09/06

図 6-17 分解画像による葉内水分分布画像（対象地：鹿屋市）



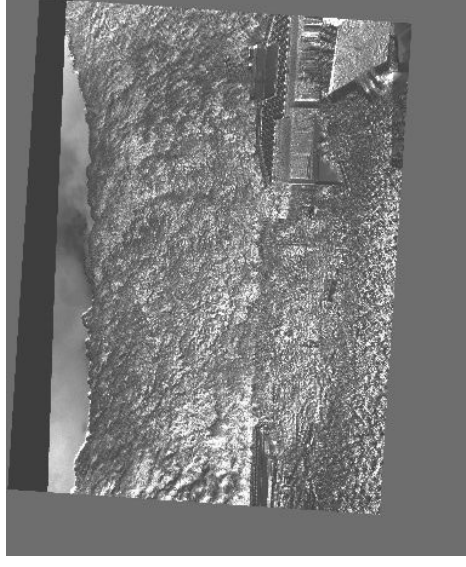
対象地画像



撮影日：2013/08/15-0819



撮影日：2013/08/15-08/29

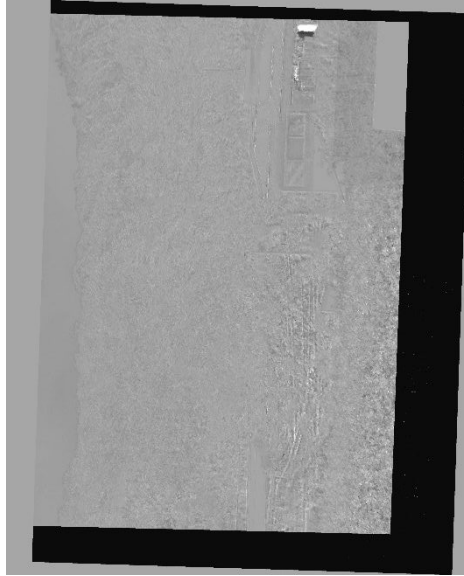


撮影日：2013/08/19-08/29

図 6-18 分光画像による土壌水分変動域の抽出画像 (対象地：鹿児島市)



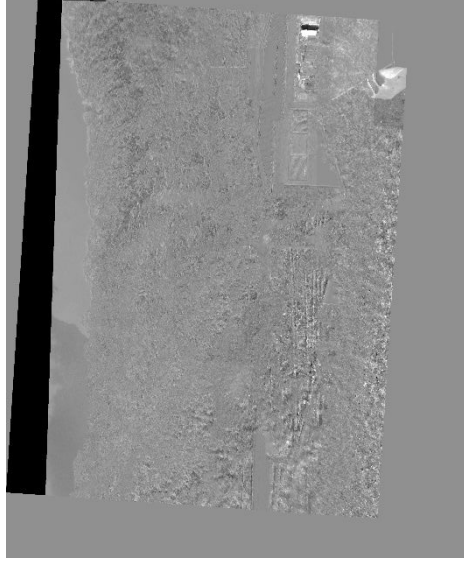
対象地画像



撮影日：2013/08/15-0819



撮影日：2013/08/15-08/29



撮影日：2013/08/19-08/29

図 6-19 分解画像による土壌水分変動域の抽出画像 (対象地：鹿児島市)



対象地画像



撮影日：2013/08/03-08/08



撮影日：2013/08/03-09/06



撮影日：2013/08/08-09/06

図 6-20 分光画像による土壌水分変動の抽出画像 (対象地：鹿屋市)





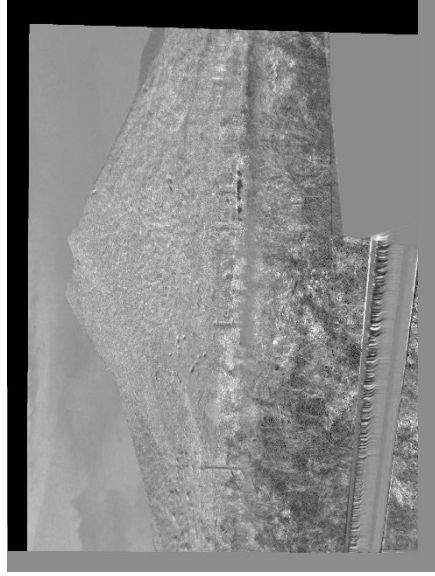
対象地画像



撮影日：2013/08/03-08/08



撮影日：2013/08/03-09/06



撮影日：2013/08/08-09/06

図 6-21 分解画像による土壌水分変動域の抽出画像（対象地：鹿屋市）



図 6-22 分光画像による土壌水分の少ない箇所の強調画像  
(対象地：鹿児島市)



図 6-23 分解画像による土壌水分の少ない箇所の強調画像  
(対象地：鹿児島市)



図 6-24 分光画像による土壌水分の少ない箇所の強調画像  
(対象地：鹿屋市)



図 6-25 分解画像による土壌水分の少ない箇所の強調画像  
(対象地：鹿屋市)

土壌水分が常時高い箇所では、斜面崩壊の素因の一つである水(地下水、土中水)の影響が考えられ、斜面崩壊の危険性が高い箇所の可能性があると考えている。近景の鹿児島市では、分光画像及び分解画像において、同一の箇所に多く抽出されていた。また遠景の鹿屋市においても、分光画像及び分解画像においても同様に抽出が可能であり、斜面の側面部の一部に抽出された箇所が集中している箇所みられた。

#### 6.4 摘要

簡易的な手法としてデジタルカメラを利用し、波長分解能が異なる分解画像と分光画像解析について、異なる対象地及び気象条件の違いを踏まえ、土壌水分変動域の抽出について検討を行った。また、近年活用事例が増えている UAV に今後適用するための基礎的な位置付として、検討を行い以下の結果を得た。

1. 葉内含水率の推定指標として、分解画像は、RGB に分解した緑色域、赤色域の画像を用いた  $RI_{\text{Green,Red}}$ 、分光画像は RGB の波長域に対応する中心波長が  $520 \pm 15\text{nm}$  と  $660 \pm 15\text{nm}$  の BP を用いた  $RI_{520,660}$  が有効であった。
2. 土壌水分変動域の画像において、分解画像と分光画像の波長の違いにより、抽出精度が異なることを示した。また分光画像においては、撮影時の BP 装着等による光輪等の影響が考えられた。
3. 3 回の観測データ解析及びしきい値を設定した土壌水分変動の強調画像により、より土壌水分変動域の少ない箇所の判読性には一定の効果があった。
4. 遠景の斜面の側面部について、撮影時の角度により取得したエネ

ルギーが小さくなり、その結果土壌水分変動域が過小評価され、誤抽出の可能性が示唆された。

5. 撮影は気象条件により土壌水分が大きく変動する時期を考慮することで、平時より水分供給されている箇所への抽出の検証が行え、すなわち斜面崩壊の危険性が高い箇所への抽出に有効であることを示した。
6. 土壌水分変動域の検討において、デジタルカメラにおける簡易的な手法において上記のとおり長所、短所を明らかにし、デジタルカメラを搭載した UAV を用いた撮影手法の実用化に向けて可能性が示唆された。

## 第 7 章 総括

近年、地球温暖化の影響によって局所的な豪雨が頻発するようになり、毎年のように全国各地で斜面崩壊などの土砂災害が発生している。このような災害は、人命にかかわるような大事故や、長期の交通止めとなったりして社会的に混乱をさせるなど、安全に安心して生活するための深刻な問題となっている。

斜面崩壊が発生するには素因と誘因があり、地質の条件、地下水、斜面の構造、時間的降雨強度や総雨量等とされているが、その発生プロセスは複雑で、いまだ事前に斜面崩壊の危険性のある箇所の抽出には至っていないのが現状である。そこで本研究は、斜面崩壊の素因の一つである斜面の土壌水分に着目し、リモートセンシングにより土壌水分の変動域を抽出に関する研究を行った。

解析に用いたデータは、リモートセンシングデータの特性である①空間分解能、②波長分解能と③時間分解能（観測周期）に加えて④データ取得の利便性（期間および価格）を考慮して選択した。

樹冠部の葉内水分含有率をパラメータとした分光反射特性曲線入手した。それぞれのデータの観測波長領域に対応する平均分光反射率を算出し、葉内水分の推定に有効な指標を検討した。

### I：航空写真データ

航空写真データは一般に 3,000m 程度の高度で撮影するため、人工衛星データに比して空間分解能が優れ、しかもデータの取得が任意に可能である特徴を有する。しかしながら、観測波長領域は一般には可視領域に限られる。



1. スタジイの分光反射特性による樹冠部の葉内含水率の推定指標の検討において、近赤外を有しない可視域の航空写真データでは、G（緑色域）とR（赤色域）との波長帯の比を用いたRIが有効であることを示した。
2. 実際に発生した土砂災害後の撮影データを用いて、WCF指標を適用し土壌変動域画像を作成することで、土壌水分変動の少ない箇所抽出の可能性が示唆された。
3. 今回用いた航空写真データは土砂災害後に取得したデータであるため、土砂災害発生箇所以外の箇所において、土壌水分変動域の抽出から斜面崩壊の危険性のある箇所を抽出し、同じ土地被覆の条件において抽出の可能性が示唆された。
4. 航空写真データにおいて、中域のモニタリングとして利点はあるが、コスト面で頻りにデータ取得は困難であり、またオルソ処理の手間やまたモザイク処理した場合の画像間の色調の違いが解析結果に現れる可能性がある。

## II：人工衛星データ

入手が容易なデータとして Landsat-5/TM と ALOS/AVNIR-2 がある。これらのデータは可視域から近赤外域を観測し、しかも観測幅はほとんど同じであるが、空間分解能が異なる特性を有している。

1. 近赤外域の観測帯を有している人工衛星データの Landsat-5/TM 及び ALOS/AVNIR-2 データにおいて、葉内含水率の推定指標には、クロロフィルの光吸収スペクトルである赤の波長域 Band3 と赤外域の Band4 を用いた NDVI が有効であった。

2. Landsat-5/TM では ALOS/AVNIR-2 より回帰性がよく、データ数として 3 時期を考慮した土壌水分変動域の抽出の解析によって、土壌水分の変動が少ない箇所の抽出の判読性の向上には一定の効果が示された。
3. Landsat-5/TM 及び ALOS/AVNIR-2 データにおいて、実際に発生した土砂災害箇所に土壌水分変動域が少ない箇所が含まれており、ALOS/AVNIR-2 データにおいては、詳細に抽出された。
4. Landsat-5/TM の土壌水分変動域の抽出の解析結果として、雲の影響や土地被覆分類によっては、斜面崩壊の対象地ではない箇所も誤抽出される結果となった。
5. ALOS/AVNIR-2 データの土壌水分変動域の抽出の解析結果として、部分的には雲の影響も考えられるが、Landsat-5/TM では抽出されなかった箇所が集中している箇所が見られ、解析に用いたデータ数及び空間分解能が影響していることが考えられた。
6. これらの人工衛星データでは、近赤外域を有しているため NDVI を用いた解析が可能となるが、回帰性に加え雲などの影響により使用できるデータに制限があり、また空間分解能によりミクセル状態での解析結果も考えられた。
7. 人工衛星データを用いた土壌水分変動域の抽出は、広域な範囲における危険箇所の抽出に有効であると考えられるが、斜面に対して崩壊の危険箇所を特定するには、雲などの大気の影響を受けず頻繁にデータ取得が可能な手法によりさらに解析を行う必要性を示した。

### Ⅲ：デジタルカメラによる分光画像と分解画像

航空写真ならびに Landsat-5/TM や ALOS/AVNIR-2 のような人工衛星データを用いると一定の条件下で土壌水分変動域の抽出が可能であることを明らかにした。これらのデータより空間分解能が優れ、しかも簡便な利用が可能なデジタルカメラの利用を検討した。

1. デジタルカメラを利用した地上リモートセンシングにおける葉内含水率の推定指標には、分解画像では R と G、分光画像では BP の 520nm、660nm を用いた、RI 指標が有効であることを示した。
2. 土壌水分変動域の画像において、分解画像と分光画像の波長域の違いにより、抽出精度が異なることを示した。また、分光画像においては、撮影時の BP の装着等が画像の解析結果に影響を及ぼすことを示した。
3. 斜面の側面部は、撮影の角度により取得した反射エネルギーが小さくなり、その結果土壌水分変動域が小さい箇所と誤抽出の可能性があり、対象地が遠景の場合、撮影手法について課題を示唆した。
4. 撮影条件について、土壌水分が大きく変動する時期を考慮することで、平時より水分供給がされている土壌水分変動域の抽出の検証が行え、すなわち斜面崩壊の危険性がより高い箇所の抽出には有効である可能性を示した。
5. デジタルカメラを用いた地上リモートセンシングでは、中広域モニタリングに対して、実際に植生に覆われた斜面を対象として土壌水分変動域の抽出を行うことで、空間分解能に優

れた詳細な解析に有効であることを示した。

#### IV：今後の展望

本研究では、リモートセンシングデータの特性である、①空間分解能②波長分解能③時間分解能（観測周期）に加えて④データ取得の利便性（期間および価格）等を踏まえ、①航空写真、②Landsat-5/TM 及び③ALOS/AVNIR-2 衛星画像データ、そして④地上撮影したデジタルカメラ画像を用い、スタジイの分光反射特性と樹冠部の葉内含水率の関係を利用して土壌水分変動域の抽出を試みた。

これらの結果を踏まえ、将来、活用事例が増えている UAV を用いた撮影手法を適用することで以下の利点が考えられ、本手法ならびに成果と併用して行うことで、詳細な土壌水分変動域の抽出に有効である可能性が考えられる。

1. UAV は撮影コストが安価で頻繁にデータの取得が可能であり、また撮影時の位置情報の取得により定点観測が可能という利点を有している。
2. UAV は機動性を有し、ある程度斜面の地形に沿った撮影が行え、設定高度により 50～200m 範囲のモニタリングが可能となる。
3. UAV に搭載できる近赤外の波長域を観測できるカメラが最近開発されているため、人工衛星データと同様に近赤外域の波長帯を用いた正規化指標 NDVI による土壌水分変動域の抽出精度の検証を行うことが可能である。

以上の特性を有するデジタルカメラ等を搭載した UAV を用いた

撮影手法の実用性に努めたいと思っている。

## 謝 辞

本研究を遂行するにあたり、終始御親切な御指導ならびに御鞭撻を賜りました長崎総合科学大学大学院工学研究科 大場和彦教授に深甚なる謝意を表します。

博士課程の進学や本研究を遂行し論文をまとめるにあたり、リモートセンシングの基本的な考え方をはじめ、研究の進め方や研究の課題に対して具体的なご指導、また研究成果をとりまとめるまでに至って、時には厳しく、そして暖かく多大なご支援を頂きました長崎総合科学大学大学院新技術創成研究所 石黒悦爾客員教授には、心から深く感謝申し上げます。

本論文を作成するにあたり、長崎総合科学大学大学院工学研究科の横山正人教授及び宮崎大学農学部の多炭雅博教授には、審査にあたりまして貴重なご指導と親切丁寧な助言を頂きました。心より感謝申し上げます。

東北大学農学研究科附属先端農業研究センター 石川大太郎助教には基礎実験データや実験方法について、数多くのご助言とご指導を頂きました。心から厚く御礼申し上げます。

本研究における現地調査ならびに現地実験に関して、多大なご協力を頂きました大福コンサルタント株式会社 技術部水工課 有満重徳氏、韋 江俊氏、鹿児島大学理学部物理科学科 山口晃裕氏ならびに長崎総合科学大学大学院工学研究科 博士課程 下高敏彰氏に大変お世話になりました。ここに謹んで感謝申し上げます。

学会等の投稿論文の英文検閲については、長崎総合科学大学環境・建築学部人間環境科 ブライアン・F. バークガフニ教授には

大変世話になりました。ここに感謝申し上げます。

株式会社パスコ 九州事業部 営業部 鹿児島支店長の灘波博章氏にはデータ提供等の便宜を図って頂きました。ここに記して感謝申し上げます。

本研究で得られた様々な実験結果においても、多くの方々の御協力、御尽力無しで取得しえないものであることを痛感致しております。ここに御紹介できなかった方々も含め、皆様の御協力、御支援により本研究が遂行致しましたことを心から感謝申し上げます。

またこれまで3年間、仕事と研究との両立を図りながらここまでに至ったのは、大福コンサルタント株式会社の業務推進室をはじめ、社員の皆様の御蔭であり、大変感謝しております。

本研究の一部は日本リモートセンシング学会 平成24年度優秀論文発表賞に評価され、また更に日本リモートセンシング学会九州支部会 支部長賞を受賞致しました。評価して下さった委員の方々に厚く御礼申し上げます。

最後になりましたが、父である大福コンサルタント株式会社 福田光一社長ならびに母の福田美穂子監査役には、長崎総合科学大学大学院工学研究科 博士課程の社会人入学の許可ならびに日常業務の支援を頂きましたことを深く感謝申し上げます。そして、妻の美絵子には博士課程の間に二人目を出産し、二人の小さな子供の子育て等多忙の中陰ながら支えてもらい、心から感謝しております。

これまで携わって頂きました皆様に改めてここにお礼を述べ謝辞と致します。

## 参考文献

- 1 ) 鹿児島県：砂防読本, 1-2 私たちの鹿児島県について知ろう！  
統計データを見てみよう, pp7-8, 2010.
- 2 ) 国土交通省：土砂災害防止法（土砂災害警戒区域等における  
土砂災害防止対策の推進に関する法律）, 土砂災害基本法の  
概要, 2013.
- 3 ) ASRAR : Theory and Application of Optical Remote  
Sensing, Chapt.1, John Wiley & Sons, Inc., New York, USA,  
1989.
- 4 ) Compton, J.T.: Red and Photographic Infrared Linear  
Combinations for Monitoring Vegetation. *J. Remote  
Sensing Environment*, 8:127-150, 1979.
- 5 ) John C.PRICE: Estimating Leaf Area Index from Satellite  
Data, IEEE Trans. *J. Geosciences Remote Sensing*,  
31(3):727-734, 1993.
- 6 ) P.S Thinkbail: Biophysical and yield information for  
precision farming from near-real-time and historical  
Landsat TM images: *Int. J. Remote Sensing*, 24(14):2879-  
2904, 2003.
- 7 ) P.C.Doraiswamy, J.L. Hatfield, T.J. Jackson, B. Akhmedov,  
J.Prueger, A.Stern: Crop condition and yield simulations  
using Landsat and MODIS, *J. Remote Sensing*, 92:548-559,  
2004.
- 8 ) 竹内渉・安岡善文：MODIS 250m データを用いた中国の水田



面積比率分布図の作成, 日本リモートセンシング学会誌,  
26(3):213-223, 2006.

- 9 ) MAJOR D. J., G. B. SCHAALIJE, G. ASRAR and E. T. KANEMASU, Estimation of whole-plant biomass and grain yield from spectral reflectance of cereals. *Can. J. Remote Sens.*, 12:47-54, 1986.
- 1 0 ) MYNENI R. B., R. B. BURNETT, G. ASRAR and E. T. KANEMASU, Single scattering of parallel direct and axially symmetric diffuse solar radiation in vegetation canopies. *Remote Sens. Environ.*, 20:165-182, 1986.
- 1 1 ) SELLERS P. J., Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration. *Int. J. Remote Sens.*, 6:1335-1372, 1986.
- 1 2 ) WEISER R. L., G. ASRAR, G. P. MILLER and E. T. KANEMASU. Assessing grassland biophysical characteristics from spectral measurements. *Remote Sens. Environ.*, 20: 141-152, 1986.
- 1 3 ) POWERS B. J. and S. A. W.GERSTL, 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, 1987
- 1 4 ) MAJOR D. J., S. SMOLIAK, G. ASRAR and E. T. KANEMASU, Use of spectral reflectance to study the effects of various range improvement treatments in Southern Alberta. *Can. J. Plant Soc.*, 68:1017-1023, 1988.

- 1 5 ) ROSS J. and A. L. MARSHAK, Calculation of the canopy bidirectional reflectance using the Monte Carlo method. *Remote Sens. Environ.*, 24:213-225, 1988.
- 1 6 ) BADHWAR G. D., R. B. MACDONALD and N. C. MEHTA, 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, 1986.
- 1 7 ) FUNG I. Y., C. J. TUCKER and K. C. PRENTICE, On the application of the AVHRR vegetation index to study the atmosphere-biosphere exchange of CO<sub>2</sub>. *J. Geophys. Res.*, 92(3):2999-3015, 1986.
- 1 8 ) KIMES D. S., W. W. NEWCOMB, R. F. NELSON and J. B. SCHUTT, Directional reflectance distributions of a hardwood and pine forest canopy. *IEEE Trans. Geosci Remote Sens.*, GE-24:281-293, 1986.
- 1 9 ) KIMES D. S., P. J. SELLERS and W. W. NEWCOMB, Hemispherical reflectance (albedo) dynamics of vegetation canopies for global and regional energy budget studies. *J. Clim. Appl. Meteorol.*, 26(8):959-972, 1986.
- 2 0 ) TUCKER C. J., I. Y. FUNG, C. D. KEELING and R. H. GAMMON, Relationship between atmospheric CO<sub>2</sub> variations and a satellite-derived vegetation index. *Nature* (London), 319:195-199, 1986.
- 2 1 ) SELLERS P. J., Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration. II. The role of biophysics in the linearity of

- their interdependence. *Remote Sens. Environ.*, 21: 143-183, 1987.
- 2 2 ) WESSMAM C. A., J. D. ABER, D. L. PETERSON and J. M. MELILLO, Foliar analysis using near infrared reflectance spectroscopy. *Can J. For. Res.*, 18:6-11, 1987.
- 2 3 ) WESTMAN W. E., Aboveground biomass, surface area, and production relations of red fir (*Abies magnifica*) and white fir (*A. concolor*). *Can J. For Res.*, 17:311-319, 1987.
- 2 4 ) WESTMAN W. E. and C. V. PRICE, 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, 1987.
- 2 5 ) WILSON M. F., A. HENDERSON-SELLERS, R. E. DICKINSON and P. J. KENNEDY, Sensitivity of the Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme (BATS) to the inclusion of variable soil characteristics. *J. Clim. Appl. Meteorol.*, 26:341-362, 1987.
- 2 6 ) WOODCOCK C. E. and A. H. STRAHLER, The factor of scale in remote sensing. *Remote Sens. Environ.*, 21:311-332, 1987.
- 2 7 ) CARD D. H., D. L. PETERSON, P. A. MATSON and J. D. ABER, Prediction of leaf chemistry by the use of visible and near infrared reflectance spectroscopy. *Remote Sens. Environ.* 26:123-147, 1988.
- 2 8 ) PETERSON D. L., J. D. ABER, P. A. MATSON, D. H. CARD,

- N. SWANBERG, C. WESSMAN and M. A. SPANNER,  
Remote sensing of forest canopy and leaf biochemical  
contents. *Remote Sens. Environ.*, 24:85-108, 1988.
- 2 9 ) RUNNING S. W. and R. R. NEMANI, 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, 1988.
- 3 0 ) SHULTIS J. K. and R. B. MYNENI, Radiative transfer in  
vegetation canopies with anisotropic scattering. *J. Quant.  
Spectrosc. Radiat. Transfer*, 39:115-129, 1988.
- 3 1 ) WESSMAN C. A., J. D. ABER, D. L. PETERSON and J. M.  
MELILLO, Remote sensing of canopy chemistry and  
nitrogen in temperate forest ecosystems. *Nature*, 335:154-  
456, 1988.
- 3 2 ) 奥園 誠之 : 斜面防災 100 のポイント, pp.1-10.1986. 鹿島出  
版会
- 3 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.
- 3 4 ) Uchijima, Z., and Seino, H: Agroclimatic evaluation of net  
primary of natural vegetation (1) Chikugo model for  
evaluating net primary productivity. *J. Agricultural  
Meteorology*, 40: 343-352 .1985.
- 3 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.
- 3 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.
- 3 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.
- 3 8 ) 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.
- 3 9 ) 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 Agric. Meteorol.*, II, 21:9-14, 2012/11.
- 4 0 ) 日本リモートセンシング研究会：改訂版 図解リモートセンシング，pp1-12, 2003.
- 4 1 ) 日本リモートセンシング学会：基礎からわかるリモートセンシング，pp1-6, 2011.
- 4 2 ) Tamotsu Igarashi, Ryoichi Furuta and Makoto Ono: Disaster Information Extraction from ALOS Images, Trans.

- JSASS Space Tech.Japan,Vol,7,pp.Tn\_1-Tn\_6, 2004.
- 4 3 ) 岩田隆敬 : 高精度観測衛星における指向・姿勢・軌道の決定と制御 : 「だいち」と未来への展望, 計測と制御, 47 (12), pp.1007-1016, 2008.
- 4 4 ) Herebert J.Karamer and Arthur P.Cracknell:An overview of small satellites in remote sensing , *Inter. J. Remote Sensing*, 29(15-16):4285-4337, Aug.2008.
- 4 5 ) Yong Xue, Yingjie Li, Jie Guang, Xiaoye Zhang and Jianping Guo: Small satellite remote sensing and applications-history, current and future, *Inter. J. of Remote Sensing*, 29(15-16):4339-4372,Aug.2008.
- 4 6 ) 虎尾正久 : 数学ライブラリ<教養編>宇宙航行の数学 人工衛星の運動, 森北出版株式会社, pp.119-127,1973.
- 4 7 ) K. Shoda, T. Itoh: Orbit Adjust Required for Earth Observations Satellites, XXXI Congress Inter. Astronautical Federation, IAF-80-B-86, pp.1-13, Tokyo, Japan, Sep.2-28, 1980.
- 4 8 ) JAXA 軌道情報提供サービス : 衛星 Live, 衛星位置計算, 衛星軌道作成 <http://odweb.tksc.jaxa.jp/odds/main.jsp/>
- 4 9 ) 芝原正道:宇宙システム概論 - 衛星の設計と開発 -, 培風館, p.69, 1995.
- 5 0 ) NASA : The afternoon Constellation,  
<http://atrain.gsfc.nasa.gov/index.php/>
- 5 1 ) 橋本俊明 : 衛星軌道による衛星の諸条件, 地球大気分光リモートセンシング, 社団法人 日本測量協会, p.99, 1992.

- 5 2 ) 小林繁夫：宇宙工学概論，丸善株式会社，P.229，2001.
- 5 3 ) NASA Dryden Flight Research Center  
<http://www.nasa.gov/centers/Dryden/news/ResearchUpdate/Helios/index.html>
- 5 4 ) 中舘正顯 他：定点滞空試験の概要，日本航空宇宙学会誌，Vol.54 No.629，2006.8.
- 5 5 ) [http://www.vito.be/VITO/EN/HomepageAdmin/Home/Westenschappelijk Onderzoek/Aardobservaite/Pegasus/](http://www.vito.be/VITO/EN/HomepageAdmin/Home/WestenschappelijkOnderzoek/Aardobservaite/Pegasus/)
- 5 6 ) エアロバイロメント社（米国），  
<http://atrain.gsfc.nasa.gov/index.php/>  
[http://www.avinc.com/uas/atratospheric/global\\_observer/](http://www.avinc.com/uas/atratospheric/global_observer/)
- 5 7 ) 石川和敏 他：災害監視無人機システム（固定翼型）の研究開発について，第47回飛行機シンポジウム，日本航空宇宙学会，2009.
- 5 8 ) 特集：無人機の新技术・活用の動向，日本航空宇宙学会誌，Vol.54 No.625-Vol.54No.628，2006.
- 5 9 ) 長谷川昌弘，今村遼平，吉川眞，熊谷樹一郎（編）：ジオインフォテックス入門，理工図書，pp.141-143，2002.
- 6 0 ) 井上吉雄：作物・農地高精度管理のためのリモートセンシング(1) 情報知識集約型作物生産の基礎としてのリモートセンシング-応用可能性と到達点-，日本作物学会記事，66(2):335-344，1997.
- 6 1 ) Shibayama, M. and Munakata, K.: A spectroradiometer for field use.V II . Radiometric estimation of nitrogen leves in field rice canopies, *J. Crop Science*, 55(4);439-445, 1986.

- 6 2 ) Inoue, Y : Radiative Transfer Process of Vegetation in Visible and Near Infrared Wavelength Regions as related to Remote Sensing of Eco-physical Plant Variables- Comparative Analysis of Canopy Reflectance Models and Assimilation of Reflectance Information in Radiation-based Growth Model-, *J. Remote Sensing*, 20(5);56-72, 2000.
- 6 3 ) 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.
- 6 4 ) 井上吉雄 : 作物・農地の高精度管理のためリモートセンシング(2) 高精度農業管理におけるリモートセンシングの将来展開, 日本作物学会紀事, 66(3):511-523, 1997.
- 6 5 ) 興石肇 : 光学センサの最新トレンド、日本リモートセンシング学会誌, 11(1):104-108, 1991.
- 6 6 ) Okamoto, K. and Fukuhara, M.: Estimation of paddy field area using the area ratio of categories in each mixel of Landsat TM, *Int. J. Remote Sensing*, 17(9):1735-1749, 1996.
- 6 7 ) 高橋一義・力丸厚・向井幸男 : 水稻作付面積の高精度推定について-輪郭参照方式の適用事例-, 日本リモートセンシング学会誌, 23(5);491-496, 2003.
- 6 8 ) 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.
- 6 9 ) Ishiguro, E., Yuda, T., Hamano, Y., Ishikawa, D., Sekioka, S., Hukao, T., Nanba, H., Ohira, A., Sinpuku, O., and Ikebe, H. : Fundamental study for identifying method of area varied by soil-water. -water stress analysis using characteristics of spectral reflectance-. *Kyusyu J. Agric. Meteorol.*, II -14:47-50, 2005
- 7 0 ) Kondo, A.: Vegetation and land cover change detection by global remote sensing and its causal analyses. *J. Hydrol. & Water Resour.*, 17:459-467, 2004.

# **Fundamental Study on Identifying of Water Content Fluctuation at Sloping Surface Using Remote Sensing Data**

**FUKUDA Sinya**

**2015**

## **SUMMARY**

In recent years, disasters such as landslide have frequently occurred in all over the country by heavy rains due to climate change. Such disasters threaten our life with safe. The generation process of landslide is complex and complicated; affected by geological and topographical conditions, hydrology such as groundwater aquifer, and weather such as rainfall intensity. Thus, prediction of landslide has not yet achieved. This research focuses on soil-water condition as a cause of landslide, and attempted to identify the locations where soil water content is kept high throughout the year using remote-sensing technique.

Remote-sensing data applied for this study were aerial photographs, two types of satellite images (Landsat-5 TM and ALOS AVNIR-2), and photos by digital camera. These data were selected by considering the spatial, spectral and the temporal resolutions as well as easiness of data access. Using the photos and images, reflectance-based indices that represents leaf water content were examined, with a help of experimental relationship between spectral reflectance and leaf water content at crown.

As a result of analysis using aerial photographs, ratio of green and red reflectance showed a potential to abstract the areas where soil water

content is kept high. The advantage of the aerial photograph was a good combination of spatial coverage and resolution. The disadvantage was the data acquisition cost and the labor cost for data manipulation. These disadvantages of the aerial photographs were not available in satellite images. Also, satellite images such as Landsat-5/TM and ALOS/AVNIR-2 measures near-infrared region, which was advantage on estimating leaf water content via the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). Comparing the two satellite images, Landsat had an advantage in data availability, and ALOS had an advantage in the spatial resolution. As a disadvantage of the satellite-based estimation, cloud prevented the data acquisition and/or analysis. The approach using photo by digital camera was somewhat similar to the one by aerial photograph, since both approach uses green and red reflectance to estimate leaf water content. As a technical difficulty, using band-pass filter generated noises to obtain the reflectance data. However, this method also showed a potential to detect the areas where soil water content is kept high.

The results obtained throughout this research showed a potential to detecting the high-risk areas for landslide. The technique might be further useful with data taken by Unmanned Aerial Vehicle (UAV), which has rapidly been a popular tool of remote-sensing in recent years. UAV has a good combination of spatial coverage and resolution. It can load infrared sensor, and the cost of data acquisition is affordable. This study might further extended by using with UAV.