Terra/ASTER 衛星データによる緑化適地選定に向けた土壌水分量推定

野々村敦子¹⁾・宮川智史²⁾・山中 稔¹⁾・長谷川修一¹⁾・増田拓朗¹⁾

1) 香川大学工学部安全システム建設工学科 Fac. of Engineering, Dept. of Safety Systems Construction Engineering, Kagawa Univ.

nonomura@eng.kagawa-u.ac.jp

2) 香川大学大学院 工学研究科 安全システム建設工学専攻 Dept. of Safety Systems Construction Engineering, Graduate School of Engineering, Kagawa Univ.

摘要: 研究対象地域である香川県直島北部裸地斜面での緑化は、一度は成功したが、その後植生が衰退し、試行錯誤を繰り返して来た。その原因の一つとして土壌の乾燥が指摘されている。土壌の水分状態に適した樹種を選定し植栽するためには、土壌水分量の空間分布を把握することが不可欠である。本研究では、Terra/ASTER 衛星データの近赤外線 (バンド 3, 0.78-0.86 μm) 及び短波長赤外 (バンド 4, 1.600-1.700 μm) のデータが表層土壌の含水比との間に有意な相関関係をもつことを明らかにし、これらのバンドを用いて裸地斜面を、含水比 3.5% を閾値に 2 つのクラスに分類した。次に、この推定結果と斜面傾斜角及び現在実施している緑化試験の結果を合わせて裸地斜面を評価し、今後の緑化に対する基礎データを得た。

キーワード: リモートセンシング, 衛星データ, Terra/ASTER, 含水比, 傾斜角度

NONOMURA, Atsuko, MIYAGAWA, Satoshi, YAMANAKA, Minoru, HASEGAWA, Shuichi, and MASUDA, Takuro: *Estimating soil moisture for afforestation using Terra/ASTER satellite data*

Abstract: Bare land is widely distributed over the northern part of Naoshima Island in Kagawa Prefecture. Afforestation is difficult in this area because of dry soil conditions. To determine which parts of the region might be afforested the distribution of soil water content over the region was estimated using Terra/ASTER satellite data. Data from Band 3 (NIR, 0.78-0.86 μm) and Band 4 (SWIR, 1.600-1.700 μm) was used, after demonstrating that these bands are closely related to surface soil moisture. It was found from field work in forested areas that areas with water content more than 3.5% and slopes less than 30 degrees could be easily afforested. The satellite data was used to identify the areas with the required water contents for planting. The method appears to be a very useful and efficient tool in planning afforestation.

Key words: remote sensing, satellite data, Terra/ASTER, water content, angle of gradient

1. はじめに

瀬戸内地域は、年間降水量が 1,100 mm 程度の寡雨地帯である。また、花崗岩の風化土壌であるマサ土地帯が広く分布し、土壌は保水力・保肥力に乏しく侵食を受けやすい。このような気候的かつ土壌的条件から、かつては至るところにはげ山が多く見られた。調査対象地域である香川県直島 (図・1) でも古くから治山工事が試みられてきた。現在では島の中・南部の 4 分の 3 の地域は緑化に成功し緑に覆われている部分が多いが、北部の 4 分の 1 では、一度は緑化に

成功したにもかかわらず、その後植生が衰退し、試行錯誤を繰り返してきたのが現状である。平成 13 年度に香川県と筆者らの研究グループ (香川緑化技術研究会) は直島北部の裸地において調査を行い、この調査結果をもとに平成 14 年度から緑化試験を実施している。試験の結果から植生が衰退した原因の一つとして土壌の乾燥が指摘され²⁾、土壌の水分状態に適した樹種を選定し植栽するためには、土壌水分量の空間分布を把握することが不可欠であるということが明らかになった。植栽樹木の生育環境として、透水係数や三相分布などを考慮する必要があるが、これらは現地観測にもとづく

図-1 解析対象地域 左：調査地概要 右：直島北部における試験地の位置（国土地理院 2000 年撮影空中写真）
Fig. 1 Study area. left: Overview of the study area, right: Test sites of this study (the north part of Naoshima)

ものであり、広域での分布を把握することは容易ではない。そこで本研究では、まず衛星リモートセンシングデータと現場観測データを用いて、直島北部の裸地斜面において表層の土壌水分量の空間分布を広域にわたり把握する。次に、土壌水分量推定結果と地形データを用いて、裸地斜面の緑化適性を評価し、今後の緑化試験に向けた指針を得る。

2. リモートセンシングによる土壌水分量推定

近年、土壌水分量の空間分布を推定するためにリモートセンシング手法が用いられてきた^{6,7,8,9,11,12}。これらはマイクロ波センサーによる方法^{7,8,9}と光学センサーによる方法^{6,11,12}の2つに大別される。

マイクロ波データは雲の影響をほとんど受けない（全天候型）という長所を持つ。マイクロ波による土壌水分量検出は、地表面から発生するマイクロ波を用いるもの（受動型）とセンサーから発生したマイクロ波を用いるもの（能動型）の2通りある。受動型センサーのデータは空間解像度が粗いため、本研究が対象としている領域には相応しくない。一方、能動型データによる方法は、地表面の土壌水分の違いによって地表面での後方散乱係数が変化することを利用するが、推定精度は地表面の粗度に大きく起因するため、本研究のように至る所にガリがあり、地表面の起伏が激しい場合、この手法の適用は困難であるとされている。よって本研究は光学センサーのデータを用いる方法を用いた。

土壌水分量の光学センサーによるリモートセンシングは、観測に用いる波長によって、1) 熱赤外データ、2) 可視・近赤外域から短波長赤外域データによる方法に分けられる。熱赤外のデータを利用する方法では、熱慣性を利用して土壌水分量を推定する（例えば、宇都宮¹²）。この手法は、表層だけではなく表層から 10 cm 程度までの土壌水分量を推定することができるという長所があるが、多数の気象観測データ

を必要とする。浦井ら¹¹は ASTER（Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer、詳細は 3. 解析方法参照）センサーのデータを用いて、熱赤外域データの比演算により土壌水分量の推定が可能であることを示した。これは利便性の高い方法であるが、使用したデータの空間解像度が 90m と低いため、本研究のように複雑な地形をもつ規模の小さい領域での緑化を目的とした土壌水分量把握には適切であるとはいえない。一方、Liu ら⁶は、土壌水分量が多い場合と少ない場合とに分けて、土壌水分量と土壌の反射率の関係を室内実験により詳細に示した。ここから、土壌水分量が少ない場合、土壌水分量と短波長赤外域（1,998 nm）の反射率との間に密接な関係があることを示した。

本研究では以上のことを踏まえ、空間分解能の高い ASTER センサーの近赤外、短波長赤外データを用いて直島北部裸地斜面の表層土壌水分量の空間分布を推定し、さらに推定結果をもとに緑化候補地として裸地斜面を評価した。

3. 解析方法

研究対象地域は香川県直島北部の裸地斜面（図-1 右）である。試験地 A は、昭和 29 年、47 年、55 年、平成 9 年に緑化工事（苗木植栽）が行われたが、いずれも失敗に帰していた所で、平成 14 年から香川緑化技術研究会は新たに土壌改良を行い、緑化試験を行っている。試験地 B、C においても、昭和 40 年、51 年、61 年に緑化工事が行われたが、いずれも失敗に終わっている。試験地 B は、試験地 A と同じく平成 14 年から緑化試験を開始した所であり、試験地 C は裸地斜面のまま放置してある。A、B、C はいずれも未熟なマサ土斜面である¹⁰。

土壌水分の測定は、2003 年 8 月 4 日に試験地 A 付近の裸

図-2 解析手順

Fig. 2 Flow chart of this analysis

地部と試験地 C において計 15 地点で行った。測定には FDR 土壌水分センサー（ロッド長 6 cm、大起理化学工業製シートプローブ ML2）を用い、センサーの出力電圧を含水比に換算した。体積含水率に換算するためには現地の非攪乱土壌試料を採取する必要があるが、今回は攪乱資料しか採取できなかったため含水比を用いた。なお、含水比データと衛星データを対応させるために、土壌試料採取地点を GPS（Trimble 製 Pathfinder Pro XR）で測位し、土壌試料は 3 サンプル採取し、含水比はその平均値をとった。

本研究で利用したリモートセンシングデータは Terra 衛星に搭載された ASTER センサーによって 2003 年 8 月 2 日に取得されたデータである。ASTER センサーは財団法人資源探査用観測システム研究開発機構（JAROS）によって地質情報の把握などを目的に開発された。センサーは可視近赤外（VNIR）、短波長赤外（SWIR）、熱赤外（TIR）波長領域ごとに別々のサブシステムから構成され、可視から熱赤外にわたる広い波長範囲をカバーしている。とくに、他のセンサー（例えば LANDSAT TM など）に比べて SWIR の波長域で高いスペクトル分解能を持つことがこのセンサーの特徴の 1 つである（表-1）¹³⁾。解析には、放射量・幾何補正済みの Level 1B データ¹³⁾（パス：110，ロウ：104）を利用した。衛星の飛来日と現地観測日が異なるが、その間及び観測期間を先行して降雨は無かったため、8 月 2 日と 4 日で土壌水分量状態に大きな格差はないと仮定して使用した。

解析は以下の手順で行った（図-2 参照）。まず、土壌の含水比と衛星データとの関係を波長ごとに求めた。次に、土壌水分量との相関が高い波長の衛星データを合成し、教師なし

表-1 Terra/ASTER データの概要

Table 1 Wave length and spatial resolution of the ASTER data

		波長(μm)	空間解像度
バンド1	VNIR	0.52-0.60	15m
バンド2		0.63-0.69	
バンド3		0.78-0.86	
バンド4	SWIR	1.600-1.700	30m
バンド5		2.145-2.185	
バンド6		2.185-2.225	
バンド7		2.235-2.285	
バンド8		2.295-2.365	
バンド9		2.360-2.430	
バンド10	TIR	8.125-8.475	90m
バンド11		8.475-8.825	
バンド12		8.925-9.275	
バンド13		10.25-10.95	
バンド14		10.95-11.65	

分類を行うことによって、土壌水分量分布図を作成した。次に、直島町森林基本図（1：5000）から等高線をデジタル化して取り込み、不整三角網モデル（TIN）を利用して内挿し、解像度 15 m の数値標高モデル（DEM）を作成した。さらに作成した DEM から斜面の勾配を算定した。これらを地形情報として用い、土壌水分量の分布と斜面傾斜角度から裸地面の緑化適性を評価した。データの解析には、クラーク大学が開発した GIS ソフトウェア idrisi32¹⁾を用いた。

4. 解析結果

4.1 衛星データと表層土壌含水比の関係

現地で観測した表層土壌の含水比と衛星データとの関係を調べた。含水比と有意な相関（有意水準 5%）があるのはバンド 3（0.78-0.86 μm）とバンド 4（1.600-1.700 μm）であることがわかった（図-3）。そこで、これら 2 バンドを用いて表層土壌水分量の空間分布を推定する。空間解像度の異なるデータを解析するため、すべてのラスタデータはバンド 3 の解像度（15 m）に合わせた。

土壌水分量の空間分布を推定するために、土壌水分量と有意な相関関係がある衛星データを分類する。本研究では直島北部の裸地面積に対して土壌水分量を測定した地点は少ないため、信頼性の高いトレーニングサイトの取得が困難である。そこで、データを統計的に分類し、分類結果に意味付けをするという教師なし分類を行った。分類には histogram peak technique¹⁾を用いた。

ここでは植生がほとんど無いと考えられるクラスのみを

示す(図-4)。クラス1とクラス2は裸地斜面, クラス3は工場敷地や宅地などである。ここで, クラス1とクラス2に注目し, 現地にて観測した含水比を, 少数第2位を四捨五入して比較した。その結果, 含水比3.5%以上の地点は全9地点中7地点がクラス2に分布し, 含水比3.5%以下の地点は6地点中5地点がクラス1に分布していることがわかった。

図-3 含水比とバンド値の相関関係(上:バンド3, 下:バンド4)。*は $P < 0.05$ を示す。

Fig. 3 Correlation between water content and digital number of Band 3 (above) and Band 4 (below). * indicates $P < 0.05$.

よって, 含水比3.5%を閾値とし, クラス1は含水比が低いクラス(3.5%以下), クラス2は含水比が高いクラス(3.5%以上)であると言える。

4.2 土壌水分量と斜面傾斜角による裸地面評価

2001年から実施している香川県と香川緑化技術研究会による直島北部の裸地面における緑化試験(植栽試験の結果は表-2に示す。)は試験地A(北東部の斜面, 図-1参照)では1年目から良好な成果を挙げている^{2,3,4)}。図5-aは試験地Aの試験前の様子, 図5-bは2003年10月7日に撮影した試験地Aの写真である。ここから, 試験地Aでは, オオバヤシャブシが人の身長以上の高さまで成長していることがわかる。一方, 試験地B(北西部の斜面, 図-1参照)では, 表-2及び写真5-c, dに示すように, 試験地Aに比べると植栽木の生育はよくない。これまでの緑化試験の結果から, 試験地Bの斜面を緑化するためには, 手厚い土壌改良が必要であることが明らかとなった。ただし, 本論文は, 裸地斜面を「緑化試験の難易度」の観点から評価するものであり, 緑化工法の詳細は他の論文で発表する予定である。

ここで, 本研究で推定した土壌水分量の空間分布と斜面傾斜角度から, これまでの緑化試験の結果を踏まえて, 裸地面を評価した。図-6に, 試験地Aで成果を挙げている工法での緑化が可能な箇所と, 試験地Bのように手厚い土壌改良も併せた緑化を必要とする箇所の空間分布の推定結果を示す。斜面の傾斜角として, 種肥土の流亡の危険性が低く緑化工事が平易な0-30度と30度以上に分類した⁵⁾ものを用いた。

試験地Aでは斜面傾斜角が30度以下, 表層土壌の含水比が3.5%以上であった。一方, 試験地Bでは斜面傾斜角が30度以上で, 含水比は一部3.5%以下であるが概ね3.5%以上である。ここから, 表層土壌含水比が3.5%以上かつ斜面傾斜角度が30度以下の場所では, 比較的簡易な工法での緑化が可能であるが, 表層土壌含水比が3.5%以上, 斜面傾斜

図-4 バンド3とバンド4との合成画像の教師なし分類結果(北西部拡大図での含水比で分類した地点との比較)

Fig. 4 Unsupervised classification image of the composite (band3 and band4). left: all over Naoshima, right: part of the test site C

図-5 試験地の前と後（2003 年 10 月 7 日）の様子。試験地 A の試験前(a)と試験後(b), 試験地 B の試験前(c)と試験後(d)
Fig. 5 Photos of test sites before and after afforestation. Before (a) and after (b) afforestation at test site A, before (c) and after (d) afforestation at test site B.

角度が 30 度以上の斜面では、手厚い土壌改良が必要であるといえる。

5. 結論

本研究では、直島北部の裸地斜面において表層土壌の含水比を広域にわたり把握し、斜面傾斜角度と現在実施している緑化試験の結果より裸地斜面を評価した。

表層土壌の含水比の空間分布は Terra 衛星に搭載された ASTER センサーのデータと現場観測の結果から推定した。まず、含水比と ASTER データのバンド 3 ($0.78\text{--}0.86\mu\text{m}$), バンド 4 ($1.600\text{--}1.700\mu\text{m}$) との間に有意な相関（有意水準 5%）があることを示した。この関係は詳細な室内実験により Liu ら⁶⁾が示した土壌水分量と土壌の反射率との関係と類似していることから、本研究で得られた相関関係は妥当であると考えられる。

裸地斜面を表層の水分状態で区分するために、表層土壌の含水比と有意な相関があった衛星データ（バンド 3 とバンド 4）を合成し、教師なし分類を行った。分類の妥当性は現地観測より得た表層土壌の含水比を用いて検証した。裸地面は含水比 3.5%を閾値に 2 つに区分された。この表層土壌の含水比区分と斜面傾斜角から裸地面を分類し、これまでの緑

表-2 試験地 A と試験地 B の緑化試験の結果

Table 2 The results of the afforestation at test site A and B.

		試験地A		試験地B	
		2002.3	2003.12	2002.3	2003.12
オオバヤシ	生存個体数(本)	326(100%)	254(78%)	541(100%)	250(46%)
	樹高(cm)	52±5	193±26	42±3	175±36
	地際直径(mm)	5.0±0.6	37.0±7.0	4.1±0.2	28.0±4.0
ヤマモモ	生存個体数(本)	324(100%)	132(41%)	541(100%)	1(0.2%)
	樹高(cm)	47±5	51±8	42±3	52
	地際直径(mm)	4.4±0.4	14.8±2.4	4.1±0.1	10.2

化試験の結果と比較した。ここから、表層土壌含水比 3.5%以上かつ斜面傾斜角度 30 度以下の斜面を緑化する場合、比較的簡易な工法での緑化が可能ではないかと考えられる。

今後は、含水比 3.5%以上かつ傾斜角 30 度以上の裸地斜面や含水比 3.5%以下かつ傾斜角 30 度以上の裸地斜面において植栽の生育環境の因子である透水系数や三相分布などを測定し、立地条件に適した緑化工法を検討したい。

本研究を実施するに際して、香川県環境森林部みどり整備課から直島に関するデータを頂きました。ASTER データは「ASTER データ利用に関する共同研究」により提供して頂きました。データの権利は経済産業省に帰属します。ここに記して謝意を表します。また、緑化試験および調査にご協力

図-6 推定した含水比と斜面傾斜角度による裸地面分類図

Fig. 6 Classified bare land with estimated water content and slope angle

をいただいた三菱マテリアル製錬所および香川県環境森林部環境・水政策課自然保護室の登尾啓次様、佐藤真視子様に心より感謝致します。

引用文献

- 1) Eastman, J. R. (2001) Guide to GIS and Image Processing Volume 1, Clark University, 161pp.
- 2) 古田朋之 (2003) 直島北部地域における緩勾配斜面緑化に関する研究, 香川大学工学部安全システム建設工学科 卒業論文 77pp.
- 3) 香川緑化技術研究会 (2002) 平成 13 年度緑化困難地試験計画策定等業務報告書 40pp.
- 4) 香川緑化技術研究会 (2003) 平成 14 年度緑化試験地モニタリング調査報告書 61pp.
- 5) 倉田益二郎 (1979) 緑化工技術, 森北出版, pp. 69-72.
- 6) Liu, W., Baret, F., Xingfa, G., Qingxi, T., Lanfen, Z., and Bin, Z. (2002) Relating soil surface moisture to reflectance, Remote Sensing of Environment, 81 : 238-246.
- 7) 仲江川敏之・瀬戸心太・S.A. Romshoo・小池雅洋・弘中貞之・沖 大幹・虫明功臣 (2000) 能動型マイクロ波リモートセンシングによる土壌水分計測のための土壌水分を既知とした地表面粗度効果の逆推定アルゴリズム, リモートセンシング学会誌, 20 : 39-52.
- 8) 大久保彰人・高木潤治・黒柳直彦・波多江直之・田村正行 (1999) 衛星データと同期調査による広域土壌水分の推定, リモートセンシング学会誌, 19 : 30-44.
- 9) 三枝健二・長谷部 望 (1997) マイクロ波リモートセンシングによる土壌水分量検出ー関東ロームの誘電率評価ー, リモートセンシング学会誌, 17 : 24-33.
- 10) 氏家健介 (2002) 直島北部地域における裸地斜面緑化に関する研究 香川大学工学部安全システム建設工学科 卒業論文 23pp.
- 11) 浦井 稔・松永恒雄・石井武政 (1997) 中国モウス砂漠で採取された砂丘砂の土壌水分量と赤外域分光放射率との関係, リモートセンシング学会誌, 17 : 14-23.
- 12) 宇都宮陽二郎 (1992) 土壌水分推定のためのサーマルリナーシャモデルに関する考察, 写真測量とリモートセンシング, 31 (4) : 15-26.
- 13) 財団法人 資源・環境観測解析センター (2001) ASTER 共同研究者のためのデータ取得要求提出のための手引き, Ver. 1.0, pp. 3-7.

(2004.6.19 受理)