WorldView-3衛星画像データを用いた都内樹木の 葉面積指数の広域推定

國分優孝 原誠一* 星純也 (*株式会社NTTデータCCS)

要旨

東京都内市街地における植物起源揮発性有機化合物 (BVOC) の放出量算出のため、WorldView-3 衛星画像データから都内市街地に現存する樹木の葉面積の分布と総量の推定手法の開発を行った。衛星画像データのスペクトル解析から樹木分布マップを 2m メッシュで作成し、樹木の正規化植生指数 (NDVI) を算出した。この NDVI について、現地観測した樹木の葉面積指数 (LAI) データと照合することで LAI – NDVI 関係式を導き出した。この関係式の導入により、都内市街地における樹木の葉面積の分布と総量を、WorldView-3 衛星画像データから推定できるようになり、BVOC 放出量の算出と、大気質シミュレーションモデルを活用した BVOC の大気影響予測の可能性が高まった。

キーワード: 植物起源揮発性有機化合物 (BVOC)、WorldView-3 衛星画像データ、葉面積指数 (LAI)、正規化植生指数 (NDVI)

1 はじめに

東京都内市街地における高濃度光化学オキシダントの出現日数は、工場・事業所等からの揮発性有機化合物 (VOC) の削減により近年減少傾向にあるが、光化学スモッグ注意報発令日数は依然として全国で上位にあるため、大気環境の更なる改善が求められている。光化学オキシダントの原因となる VOC としては、工場・事業所等からの人為起源があるが、街路や緑地の樹木もVOC の放出源として都市大気に無視できない影響を与えている可能性が指摘されている。しかし、都内市街地における樹木の VOC 放出実態はいまだ十分に把握できておらず、VOC 削減対策を促進するうえで重要なテーマとなってきている。

樹木起源の VOC が都内市街地の光化学オキシダント高濃度に与える影響を評価するため、樹木の資源量と VOC 放出速度を考慮した大気質シミュレーションモデルの活用を目指している。多くの大気質シミュレーションモデルでは、計算の入力データに与える樹木の資源量として、樹木の葉面積指数(Leaf Area Index、以下 LAI)の分布データを準備する必要があり、そのデータの精度が予測値に大きく影響する 1)。

都内市街地全域にわたり樹木の LAI を把握するため には、現地観測による直接的な調査方法では膨大な時間 と労力が必要となり困難である。樹木の LAI を広域的 に把握する手法として、衛星画像データを用いた間接的 な推定方法がある。これまでの研究により、衛星画像デ ータから算出した正規化植生指数 (Normalized Differen ce Vegetation Index、以下 NDVI) と、現地観測した樹 木のLAIに有意な関係があることがいくつか報告され ており、森林など比較的マクロな群落を対象に、LAND SAT 衛星に代表される地上分解能 10m 以上の中空間分 解能クラスの観測データを用いて樹木 LAI を広域推定 する試みがなされている^{2,3)}。しかし、衛星画像データ の地上分解能以下のスケールに樹木以外のものが複数 混在した場合、LAI の推定精度が著しく低下することが 指摘されており、都市域の街路樹のように小規模なスケ ールで点在している樹木の LAI を推定するのは困難で あった^{4,5)}。

2014年10月より、世界最高水準の解像度(マルチスペクトル画像で2m)を有すWorldView-3衛星の地球観測画像が商用データとして利用可能となった。この衛星画像データを利用することで、樹木一本一本の識別が可

能となり、従来の中分解能衛星画像データに比べて推定精度の飛躍的な向上が期待できる。しかし、WorldView -3 衛星画像データを用いてLAIを推定する方法は未だ確立されていなかった。そこで本研究では、(1)現地観測により樹木LAIを計測し、(2)WorldView-3 衛星画像データから算出したNDVIとの相関を検証することで、NDVI—LAI関係式を導出した。この関係式の導入により、都内市街地の全域にわたって樹木LAIの水平分布図を2mメッシュで準備できる見通しが立った。

2 方法

(1) 現地観測による樹木LAIの計測

東京都江東区の木場公園において、LAIの現地観測を行なった。LAIは、樹木のVOC放出量を決定する重要なパラメーターであり、単位面積当たりの片面葉面積の総和である(単位:m²/m²)。LAIの測定方法には、実際に単位地表面積上にある葉を全量あるいは部分的にサンプリングして総葉面積を計測する直接的方法と、葉の量と樹冠に入射する光の減衰との間の光学的な相関関係を仮定して推定する間接的方法がある。直接的方法は精度の高いLAIが得られるが、測定に多くの時間と労力を費やす必要があり、植生の破壊にもつながる。間接的方法は多数地点の測定も比較的容易なため、代表性のある値が得られる。本研究では、利便性と費用、また非破壊的で環境に影響が少ない間接的方法を採用した。

間接的方法には2種類あり、1つは魚眼レンズ装着カメラで撮影した全天写真を画像解析する方法、もう1つはLAI推定の専用機器プラント・キャノピー・アナライザー(LI-COR社製LAI-2000等)で測定する方法がある。

松山ら(2003)は、プラント・キャノピー・アナライザーとデジタルカメラ(Nikon社製COOLPIXに魚眼レンズNikon社製FC-E8を装着)によるLAI推定値を比較した結果、データの取得方法によっては測定値として同じ程度の精度が得られることを確認した。したがって、本研究では、松山ら(2003)が考案したデジタルカメラを用いる方法を採用し、LAIの推定を行った。

全天写真の撮影は、魚眼レンズ (Nikon社製FC-E8) を装着したデジタルカメラ (Nikon社製COOLPIX 5100) を用いた (図1)。撮影は、樹冠と同じ光量条件とするため、林外で基準光をとる方法で行った。具体的には、林

外の全天下でオートモード撮影した際のシャッター速度とレンズF値を用いて、樹木の下部においてマニュアルモードで撮影した。撮影には三脚を用いて、水準器を使うことで撮影面が水平になるように固定した。



図1. 魚眼レンズ装着カメラによる全天写真撮影

撮影条件によるLAI推定値の誤差を避けるため、撮影は太陽の直接光が映り込まない夕方15時30分から17時の晴天日で、被写体がぶれないほぼ無風の時に行った。 観測は冬季(2017年の1月31日、2月1日、2月3日)に、 江東区木場公園内の全69地点で行なった(図2)。

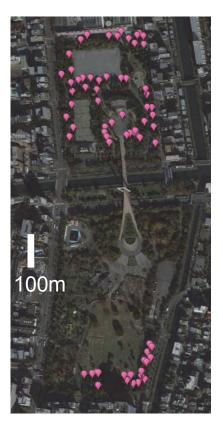


図2. LAI観測地点(東京都江東区木場公園)

観測地点ごとのLAIを算出するため、撮影した全天写真(図3、a)を、植生解析プログラムLIA for Win32^{7)を}用いて、まず閾値により画像を葉群とそれ以外の葉間隙とに2値化することで互いの区別を行った(図3、b)。閾値の算出は、Intermeansアルゴリズムを用いて画像の青ピクセル値から閾値を算出する方法⁸⁾を選択した。LIA for Win32の設定は、画像読み取り精度を100dpi、全天画像半径を11.5mm、魚眼レンズ画角90°とした。2値化された葉群と葉間隙の各ピクセル数を用い、LIA for Win32は、15度の幅を持つ5つの天頂角(i)における葉間隙(開空度Ti)を式(1)より算出し、式(2)からLAIを求める。

Ti = (対象天頂角での葉空隙のピクセル数) / (対象天頂角の総ピクセル数) ・・・(1)

$$LAI = -2\sum_{i=1}^{5} \frac{ln(T_i)}{S_i} W_i \qquad \qquad \cdot \cdot \cdot (2)$$

ここで、Ti は各天頂角($i=1\sim5$)における開空度(空隙率)を示し、5 つの天頂角の範囲はそれぞれ $0\sim14^\circ$ (i=1)、 $15\sim29^\circ$ (i=2)、 $30\sim44^\circ$ (i=3)、 $45\sim60^\circ$ (i=4)、 $61\sim75^\circ$ (i=5) である。なお、Si は天頂角別の 1 / $\cos\theta$ を、Wi は既知の重み付け係数を示す。本研究では、全天写真の天頂角 $0\sim45^\circ$ の範囲(図 3、a)の LAI を算定し、それ以外の範囲は樹木以外の構造物や歩行者等が含まれるため除外した。

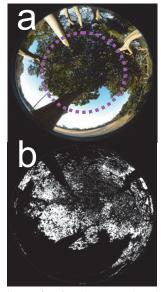


図3. (a) 全天写真と解析範囲天頂角、(b) LIA for Win32による全天写真の2値化結果

(2) NDVI—LAI関係式の導出

WorldView-3 衛星画像データから算出する正規化植生指数 (NDVI) を用いて、樹木の LAI を直接推定する方法を検討した。NDVI は、葉緑素が近赤外域の波長帯で際立った反射を示すという特性を活かし、衛星リモートセンシングで地表面の植生を抽出する指標であり、次の (3) 式により算出する。

$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED) \cdot \cdot \cdot (3)$$

ここで、NIRは近赤外波長帯、REDは赤色波長帯の分光 放射輝度(単位: $W/m^2/sr/\mu m$)を示す。値は $-1.0\sim1.0$ の間をとり、植生の存在する可能性が高いほど値はプラスに大きくなり、その他の負の値では存在する可能性が低いとみなされる。一般的に雲や水は負の値になり、裸地ではおよそ $0\sim0.1$ 、植生が増すにつれ $0.1\sim0.7$ 程度の値を示す。木場公園のWorldView-3衛星画像データ(図4、a)の画素毎($2m\times2m$ 単位)に、式 (3)の演算を行うことで、NDVI分布を得た(図4、b)。

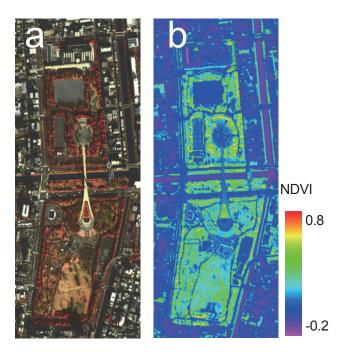


図 4. (a) 木場公園の衛星画像、(b) 算出した NDVI 分布 (2015 年 1 月 27 日撮影の衛星画像データ)

なお、式 (3) のNIRにはWorldView-3衛星画像データの Band5 (赤色波長帯域、630~690μm)、REDにはBand7 (近赤外波長帯域、770~895μm) の分光放射輝度を用いた。

さらに、LAI現地観測を行った地点近傍のNDVI値を 図4 (b) の衛星画像NDVI分布から取得し、LAIとの相 関がとれるか検証を行った。NDVI とLAIの相関関係に ついては、森林域では次式(4)の指数関数として提案 されている^{9,10})。

$$NDVI = a * ln(LAI/b) \cdot \cdot \cdot (4)$$

ここで、aとbは定数である。一般的に樹木の葉は重なりが多くなる程(つまり、真のLAIが大きくなる程)、衛星によって上空から観測される見かけの葉面積(つまり、NDVI)の増え方は次第に鈍くなる。そして、葉の重なりが一定以上になると、衛星から観測される見かけの葉面積は飽和して上がらなくなるため、NDVIとLAIの関係式は直線ではなく指数関数の曲線を描く。この観測原理に基づいて式(4)の近似式が提案された。そこで本研究においても、式(4)の形で、NDVIとLAIとの間に相関がとれるか検証することにした。

衛星データからのLAI直接推定に活用できるNDVI-LAI関係式を導出するため、現地観測したLAIと相関の とれるNDVIデータの抽出方法を検討した。WorldView-3 衛星画像データの画素毎(2m×2m単位)をもとに、表1 に示す3通りの方法についてLAI実測データ(事実)を 最も良く説明できる衛星NDVIデータの抽出方法につい て吟味した。

表1. LAIとの比較に用いたNDVIデータの抽出方法

	LAIと比較するNDVIの抽出方法	略称
Ι	LAI観測地点の緯度経度に最も近い画素	最近傍
	(2m×2mに相当) のNDVI値	NDVI
П	LAI観測地点を中心とする周辺3×3画素	周辺平
	(6m×6mに相当) の平均NDVI値	均NDVI
Ш	LAI観測地点を中心とする周辺3×3画素	周辺最
	(6m×6mに相当) の最大NDVI値	大NDVI

3 結果と考察

(1) 「最近傍 NDVI」と現地観測 LAI の相関

LAI観測地点の緯度経度に最も近い画素のNDVIデータ「最近傍NDVI」を抽出し、LAIとの関係をプロットした(図5)。また、式(4)の形式で近似した、最近傍 NDVIとLAIの関係式と、その決定係数を図中に示す。最近傍NDVIは、値が高LAIで飽和せず、直線的に増加する傾向を示した。また、LAIと最近傍NDVIのプロットはばらついており、近似曲線との決定係数も低かった。結論として、LAIとNDVIが指数関数で近似されるという既往知見とは一致しない結果となったため、最近傍 NDVIは、式(4)の形でLAIを近似するのに適していないと判断された。

最近傍NDVIとLAI実測データとの対応が良くなかった原因の一つとして、衛星画像の幾何学的補正における位置誤差が考えられる。これによって生じる、LAIの現地観測地点と衛星画像による最近傍画素との位置的なずれが、LAIと最近傍NDVIの相関を低くすることに影響したと考えられる。

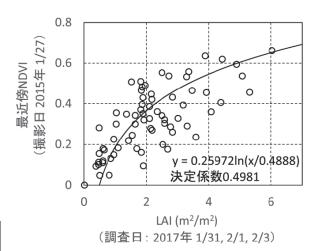


図 5. LAI 観測最近傍画素 NDVI「最近傍 NDVI」と LAI との関係

(2)「周辺平均NDVI」と現地観測LAIの相関

衛星画像幾何補正における位置誤差の影響を避ける ため、最近傍画素ではなく、LAI観測地点の周辺領域の NDVIデータを考慮する方法を検討した。具体的な方法 は、図6に示すとおり、LAI観測地点の最近傍画素を中 心とした周辺3×3画素 (6m×6mに相当) の平均NDVI値 「周辺平均NDVI」をNDVI分布 (図4、b) から抽出し、 LAIとの比較に用いた。

1	2	3	4	5
6	7	8	9	10
11	12	13	14	15
16	17	18	19	20
21	22	23	24	25

図 6. 衛星画像ピクセルと周辺領域の NDVI データの 抽出方法

周辺平均NDVIとLAIのプロットおよび関係式と決定係数を示す(図7)。図により、LAIと周辺平均NDVIの関係は、依然として直線的な比例関係が強く、指数関数分布とは異なるプロットとなった。決定係数は0.6程度となり、NDVIデータ抽出方法 I の「最近傍NDVI」よりは改善がみられたものの精度としては不十分と考えられ、実用上課題が残る。

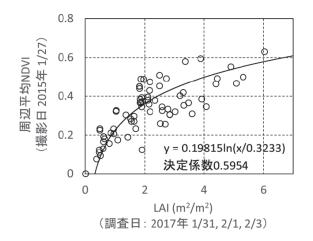


図7. LAI観測地点の周辺3×3画素平均NDVI「周辺平均NDVI」とLAIとの関係

周辺平均 NDVI と LAI 実測データとの対応が良くなかった原因の一つとして、樹木の葉の影の影響が考えられる。解像度 2mの WorldView-3 衛星データでは、樹冠に形成される日向部分と日陰部分が識別される。NDVIは式(3)のとおり樹冠の輝度をもとに算出するため、影の部分では値が低くなる。したがって、LAI 観測地点の最近傍画素を中心とする 3×3 画素 (6m×6m)で NDVIの平均をとると、そのエリアに含まれる陰の部分によって平均の値が小さい側に引きずられることになる。この影響によって、ばらつきの大きい不適正な NDVI が算出されたため、LAI との相関がとれなかったものと考えられる。

(3)「周辺最大NDVI」と現地観測LAIの相関

上記のとおり、NDVIとLAIの正確な関係を導き出すためには、衛星画像の位置誤差、樹冠の陰の影響を考慮する必要があると考えられる。そこで、LAI観測地点最近傍画素の周辺3×3画素を用いることで衛星画像の位置誤差を考慮し(図6)、さらに、日陰の影響を回避するため、周辺3×3画素にある最大のNDVI値を採用する手法を新たに考案した(表1、NDVIデータ抽出方法III)。この手法で図4(b)のNDVI分布から取得したNDVIを「周辺最大NDVI」を呼ぶ。

周辺最大NDVIとLAIとの関係、および関係式と決定係数を示す(図8)。図から、周辺最大NDVIでは、よりLAIとの相関が高くなることが示された。プロットの分布は、LAIが高くなるにつれてNDVIの増え方が鈍くなる傾向を示している。これは、LAIとNDVIが指数関数で近似されるという既往知見と一致するものである。関係式とプロットの決定係数も、NDVIデータ抽出方法 I、IIに比べ大幅に改善がみられ(R²=0.742)、LAI実測データ(事実)を良く説明できる衛星NDVIデータの抽出方法が得られたといえる。

その相関の高くなった要因としては、周辺最大のND VIを抽出するということは、日向に近い画素のNDVIが選択されることを意味するため、その選択された画素の樹冠輝度と、林外で基準光をとる方法で行ったLAI現地観測との光量条件が近くなったからだと推察される。

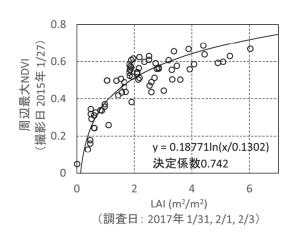


図 8. LAI 観測地点の周辺 3×3 画素最大 NDVI 値「周辺最大 NDVI」と LAI との関係

(4) NDVI—LAI関係式の樹木LAI広域推定への適用 図8の結果より、NDVIとLAIとの関係は、式(5)で 表せることがわかった。

周辺最大NDVI = 0.18771*ln (LAI/0.1302)

· · · (5)

したがって、この関係式に基づくと、NDVIからLAIを 求める式は以下になる。

すなわち、まず周辺3×3画素の最大NDVI値を選択的に利用して、その中心画素のLAIを求める。そして、以下の式(7)のとおり、全ての画素に対してこの計算を行うことで、LAIの分布図を得ることができる。

画素i のLAI = 0.1302 *

 \exp (画素iを含む周辺9画素の最大NDVI/0.18771)

 $(i=1, 2, 3, ...) \cdot \cdot \cdot (7)$

國分ら(2016)は、WorldView-3衛星画像データのスペクトル解析から、都内市街地の樹木分布を2mメッシュで簡単かつ精度良くマッピングする手法を開発した。その手法を用いて、図4(a)と同じ衛星データから推定した樹木の水平分布を図9(b)に示す。これは、ディシ

で衛星画像データのバンド間で比演算を行ない、WorldView-3衛星が捉えた地表面を段階的に5つカテゴリー(樹木、密な草地、疎な草地、影域の植生、非植生)に分類したものである。精度検証として、各カテゴリーが占める地表面積を現地調査で確認した面積と比較した結果、誤差10%以内の高い一致が確認されている(精度検証の範囲は、経度139.82度、緯度35.67度を中心とする東西幅4.2km、南北幅6kmであった)。本研究では図9

ジョン・ツリー法という解析手法を用いて、図10の手順

(b) において樹木として赤色で示された位置を対象に、式 (7) を適用し、LAIの分布を推定した(図9、c)。

なお、図10の衛星画像データのバンド間比演算において、各分類段階のバンド組み合わせと分類の閾値は参考資料の表2に、段階的に分類された各カテゴリーの画素数ヒストグラム分布は参考資料の図11~図15に示す通りであった。

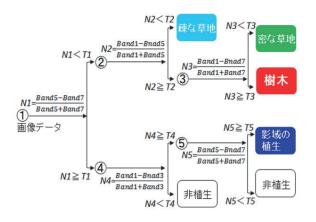


図 10. ディシジョン・ツリー法による画像分類手順

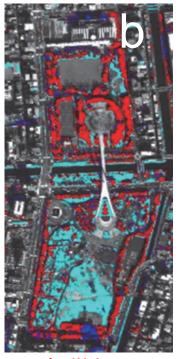
解析フロー

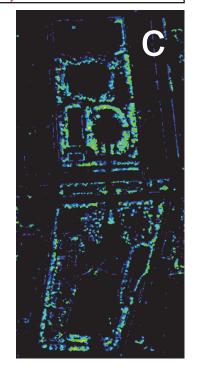
衛星画像を取得

樹木分布を推定

樹木の LAI を推定







赤:樹木 緑:草地(密) 水色:草地(粗) 青:植生(影域)

樹木 LAI(m²/m²)

6.5

図9. (a) 木場公園の衛星画像(2015年1月27日撮影衛星データ)、

- (b) 地表面の分類結果(國分ら(2016)の解析方法をもとに作成)、
- (c) 樹木LAI分布の推定結果(本研究の結果)

4 まとめ

本研究では、WorldView-3衛星データを用いてLAIの水平分布図を作成する方法を検討した。その結果、衛星画像から算出されるNDVIと、現地観測したLAIとの関係を明らかにし、換算式を用いてNDVI分布からLAI分布を直接推定する手法を開発した。これにより、現地観測では膨大な時間と労力を要するLAI分布の広域データを、衛星データの解析から推定できることを確認した。具体的な内容と成果は以下のとおりであった。

- ① WorldView-3衛星データとNDVIと現地観測した LAIの関係式を導き出した。
- ② 現地観測したLAIと最も相関のとれるNDVI衛星データの抽出方法を考案し、衛星データとLAIとの最適な

NDVI関係式を導き出した。

③ 導出した関係式を用いて、樹木のLAI分布を広域的に求めることに成功した。

なお、本研究の手法は都内の市街地全域にわたる樹木のLAI分布を求める一次的な推定方法として提案するものであり、当然、樹種や樹高、樹冠の大きさ、また樹木の下にある草地等の下層植生の違いなど、異なる条件毎にLAI-NDVI関係式を準備することが望ましい。そして、それらの条件の違いに対応して更なる精度向上を図ることは、今後の課題として重要と考える。

また、樹木は一般的に季節によって展葉、紅葉、落葉等のフェノロジー(生物季節)を示し、気候に対応した樹勢や活性度の変化を示す。このため特に、緑葉期と、

本研究で検討した落葉期とでは、LAIとNDVIとの関係が大きく変化すると想定される。そこで、今後は夏季についても同様の調査を実施し、緑葉期のNDVI-LAI関係式を導出することで、LAI分布をより正確に把握する方法を確立する必要がある。

今後は、上記の改善を図りつつ、樹木のVOC放出量を 決定する重要なパラメーターであるLAIを、都内の区部 全域を対象に推定し、大気質シミュレーションモデルへ の活用を目指していく計画である。

- 10) Chen J.M. and Cihlar J.: Retrieve leaf area index of boreal conifer forest using landsat TM images, Remote Sensing of Environment, <u>55</u>, pp.153—162(1996)
- 11) 國分優孝ら: 東京都における植物起源 VOC 排出量把 握を目的とした高解像度 WorldView-3 衛星画像による樹木 種分類と葉重量推定法の開発, 第 57 回大気環境学会年会 講演要旨集,pp.303(2016)

参考文献

- 1) Chatani S. et al.: Estimate of biogenic VOC emissions in Japan and their effects on photochemical formation of ambient ozone and secondary organic aerosol, Atmospheric Environment, 120, pp.38-50(2015)
- 2) 石井 孝ら: 衛星データによる葉面積 LAI の推定, 水 文・水資源学会誌, 12(3), pp.210-220(1999)
- 3) 星 直弥ら: LANDSAT TM データを用いた落葉広葉 樹天然林における葉面積指数の推定, 日林誌, <u>83</u>(4), pp.315-321(2001)
- 4) 羽柴秀樹ら: 高解像度衛星画像データによる都市域 の小規模植生の抽出, 土木学会論文集, <u>685(20)</u>, pp.27-39(2001)
- 5) 平野勇二郎ら (2002) 都市域を対象とした NDVI による実用的な緑被率推定、日本リモートセンシング学会誌、22 (2)、163-174
- 6) 松山 洋ら: 全天写真から得られる葉面積指数とプラント・キャノピー・アナライザーによる実測地との比較, 地学雑誌,112(3),pp.411-415(2003)
- 7) 山本一清: LIA for Win32(LIA32)(フリーウェア), http://www.agr.nagoya-u.ac.jp/~shinkan/LIA32/, (2003)
- 8) Yamamoto K.: Estimation of the canopy-gap size using two photographics taken at different heights, Ecological Research, <u>15</u>, pp.203 208(2000)
- 9) Nemani R.R. and Running S.W.: Testing a theoretical climate soil leaf area hydrologic equilibrium of forests using satellite data and ecosystem simulation, Agricultural and Forest Meteorology, 44, pp.245—260(1989)

参考資料

表 2. 各分類段階のバンド組み合わせと分類の閾値

分類段階	分類カテゴリー	バンド組み合わせ	分類閾値
1	植生/非植生	バンド5 ・ バンド7	-0.06
2	疎な草地/樹木+密な草地	バンド1 ・ バンド5	0.44
3	密な草地/樹木	バンド1 ・ バンド7	-0.10
4	日向/陰域+水域	バンド1 ・ バンド3	0.30
5	植生(陰域)/非植生	バンド5 ・ バンド7	0.14

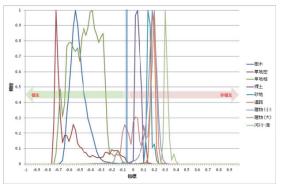


図 11. 分類段階 1

植生と非植生の画素数ヒストグラム

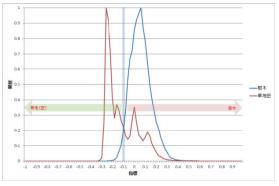


図 13. 分類段階 3

密な草地/樹木の画素数ヒストグラム

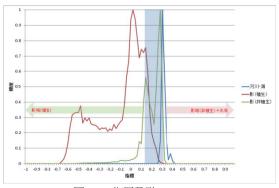


図 15. 分類段階 5

植生(陰域)/非植生の画素数ヒストグラム

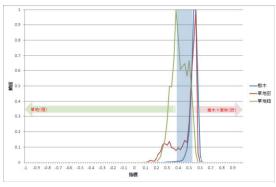


図 12. 分類段階 2

疎な草地/(樹木+密な草地)の画素数ヒストグラム

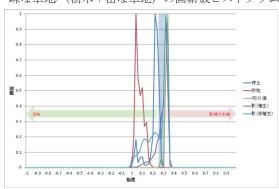


図 14. 分類段階 4

日向/(影域+水域)の画素数ヒストグラム