

デジタル航空写真を用いた渡良瀬遊水地における植生高の推定

誌名	農業氣象
ISSN	00218588
著者名	武田,知己 小熊,宏之 石濱,史子 竹中,明夫
発行元	養賢堂
巻/号	66巻4号
掲載ページ	p. 237-244
発行年月	2010年12月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター
Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council
Secretariat



デジタル航空写真を用いた渡良瀬遊水地 における植生高の推定

武田知己・小熊宏之・石濱史子・竹中明夫

(国立環境研究所)

Estimation of vegetation height in the Watarase wetland from digital aerial photographs.

Tomomi TAKEDA, Hiroyuki OGUMA, Fumiko ISHIHAMA, and Akio TAKENAKA

(National Institute for Environmental Studies 16-2 Onogawa, Tsukuba-City, Ibaraki, 305-8506 Japan)
National Institute for Environmental Studies, Environmental Biology Division

Abstract

Information on the ground surface can now be acquired easily and highly accurately using digital aerial photographs. A digital canopy model (DCM), which is calculated by subtracting a digital terrain model (DTM) from a digital surface model (DSM) of the vegetation, provides useful information for studies of wild animal habitats and plant species distributions. However, DCMs have been used mainly for forests, and their validity for herbaceous plants requires further verification. In this study, we used the ADS40 airborne digital sensor to clarify the relationship between a DCM and the height of herbaceous species. Our study area was the Watarase wetland in the northern Kanto Plain, central Japan. Suitable habitats for the many rare plants found in this wetland are maintained by controlled burning in early spring. We acquired three DSMs: just after the controlled burn in April 2006; in August 2006, when the vegetation height peaked; and in April 2007, also just after the controlled burn. We calculated the DCM based on the difference between the August DSM and a DTM developed by using the minimum height values from the two April DSMs. We also performed a field survey during the August DSM acquisition, during which we measured the height of the uppermost leaves with a measuring pole at 16 measurement points and estimated the vegetation structure from photosynthetic photon flux density (PPFD) profiles measured with quantum sensors at each point. The calculated DCM height correlated very well to the height of the uppermost leaves ($r^2=0.96$), although it was about 100 cm lower. In contrast, the DCM and the height of maximum intercepted PPFD were highly correlated ($r^2=0.97$) and showed a 1:1 relationship.

Key words: ADS40, Amur silver grass (*Miscanthus sacchariflorus*), Digital canopy model (DCM), Reed (*Phragmites australis*), Vegetation structure.

キーワード: ADS40, オギ(*Miscanthus sacchariflorus*), 植生構造, デジタル植生高モデル, ヨシ(*Phragmites australis*)

1. はじめに

湿地生態系には絶滅危惧種を始めとした固有の動植物が生息しており、生物多様性保全の観点から、湿地は最も重要な生態系の一つとして認知されている。更には温室効果をもつメタンガスの放出源としての観点からも、湿

地の状態を正確に把握し、その変動を追跡する必要性が増してきている。冠水状態により踏査性が悪い低層湿原においては、直接踏査による広範囲の調査が極めて困難であるほか、泥炭の蓄積により形成されている高層湿原では、踏査による調査自体が大きな攪乱要因となる。このような背景から航空機や人工衛星によるリモートセンシングは、継続性、広域性、非破壊性という観点から極め

2008年11月7日 受付, 2010年4月15日 受理

て有効な湿地調査の手段と考えられる。

近年、商用衛星により空間分解能(地表面における解像度)が1 mを切る画像が入手可能となっているが、観測頻度の問題を始め、湿地内の詳細な植生調査には空間分解能が不足している。一方、航空写真用のカメラは旧来のフィルムタイプのカメラから急速にデジタル化が進み、可視域だけではなく、植生の観測に有効な近赤外域も同時に撮影し、10 cm程度の空間分解能を達成するセンサーが開発、運用されている。更に、複数枚の画像をデジタル的に立体視することによる高さ方向の情報の抽出や、レーザー距離スキャナーを搭載し、地表面の立体構造を計測するセンサー(LiDAR)など、これまでの二次元的な撮影に加え、三次元的な情報を広範囲に取得することが可能となった。これらの技術により、森林においては樹冠の形状、樹冠高等の計測が可能であることが検証されている(e.g. Vega and St-Onge, 2008; Esseen *et al.*, 2006)。

ここで、LiDARは航空機に搭載されたレーザー距離計の一種であり、センサーから照射されたレーザーパルスが対象物から反射されて戻るまでの時間を計測することで、対象物の高さを計測するものである。この方式では、反射レーザーのパターン解析により、森林においては地盤面と樹冠を分離した高さ(標高)の計測が可能であるが、対象の植生タイプを分類しマッピングを行うことは困難である。LiDARで求めた植物群落の高さの情報と、群落の植生タイプの情報とを座標ごとに対応させるためには、デジタルカメラや空撮カメラによる撮影を同時搭載あるいは別フライトにて行い、両者の位置合わせ処理(オルソ化)を行う必要がある。そのため、フライト費用に加え、データの処理費用も増加することになる。一方、デジタルカメラ型のセンサーではADS40(Leica Geosystems)の様に複数の撮像センサーが異なる角度で地表面を撮影し、観測画像と共に同一場所の標高DSM(Digital surface model)を出力するタイプも存在する。この高解像度画像と三次元情報が同時に得られる撮像型センサーを湿地観測に適用した場合、植生タイプの分布把握や近赤外などのマルチバンド画像による植生の生化学的な評価に加え、群落高や群落のラフネスといった高さ情報を付加した広範囲の植生情報の取得が期待できる。しかしながら、同種のセンサーを草本群落に適用し、高さ情報の精度評価を行った事例は存在せず、地上で取得した草丈高との比較、植生タイプによる違いなどを検証し、適用限界を明らかにすることが必要である。検証によって観測手法として確立することにより、湿地に限定せず、草本生態系や河畔等の生態系調査、農地等の調査手法として、その適用範囲を広げることが可能となる。

そこで我々は、関東平野の北部に位置する本州最大の湿地であり、オギ *Miscanthus sacchariflorus* Benth やヨシ *Phragmites australis* Steud, チガヤ *Imperata cylindrica* Beauv などの草本によって主に構成される渡良瀬遊水地をテストサイトとし、航空機デジタルカメラADS40による空撮からの群落高推定と、同時に地上踏査による検証データの取得を行った。ADS40によって推定されるDCM(Digital canopy model)が草本群落のどの高さを表しているのか明らかにするため、地上で群落構造の調査を行った。草丈のほか、葉群の垂直分布の情報を得るため、群落内での光の減衰パターンを測定し、DCMとの比較を行った。

2. 材料と方法

2.1 実験サイト

渡良瀬遊水地(北緯36度14分,東経139度41分)は、関東平野北部に位置する面積約33 km²の人工的な湿地である。第一調節地,第二調節地,第三調節地,渡良瀬貯水池(谷中湖)に分かれており,第一から第三の3つの調節地は河川の洪水時を除いて常時冠水している場所はごく一部である。また,遊水地内の湿生草本群落は木本化するのを防ぐと同時に,ヨシズや茅葺屋根の材料として用いられるヨシ・オギの生長を促進するために,毎年3月頃に野焼きが行われていることが特徴である。近年の遊水地の乾燥化にともない,ヨシ群落やスゲ群落からオ

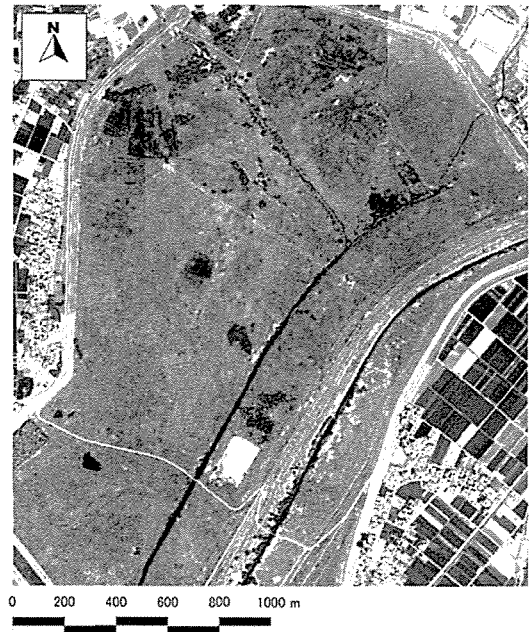


Fig. 1. Gray scale image of Watarase wetland obtained on 5 August 2006.

ギ群落への植生の遷移や動植物の生育環境の悪化が懸念されている (Committee on history of Fujioka town, 2002)。

測定は第三調節地の約 5 km² を対象とし、航空機実験と地上測定を実施した。Fig. 1 に 2006 年 8 月 5 日に ADS40 で撮影した対象地の画像を示す。

2.2 航空機実験

2.2.1 撮影について

航空機に搭載した ADS40 は、機体の進行方向と垂直の方向に地表面を 1 ライン撮影し、これを航空機の進行に合わせて連続して行うことで切れ目のない 1 枚の帯状の画像を取得することができる。同時搭載された GPS (Global Positioning System) による機体の位置と IMU (Inertial Measurement Unit) による機体の三次元の角速度と加速度を取得し、撮影画素に位置座標を付与できる。ADS40 で取得される画像は、パングロマトミック画像 (465 ~ 680 nm) と赤 (610 ~ 660 nm)、緑 (535 ~ 585 nm)、青 (430 ~ 490 nm)、近赤外 (835 ~ 885 nm) のマルチバンド画像である。今回の撮影時の飛行高度では、地上での空間分解能は 1 画素あたり 20 cm であった。更に ADS40 の特徴として DSM を作成するために、パングロマトミック画像を機体の直下を 0 度としたときに前方 28 度、前方 16 度、後方 14 度の 3 方向を同時に撮影し、緑画像を機体の直下 (0 度) を撮影するように設計されている。これにより、地上の同一ターゲットを 1 飛行中に 4 つの異なる角度から撮影することになる。

撮影は、2006 年 3 月 25 日および 2007 年 3 月 17 日に行われた野焼き後の 2006 年 4 月 1 日と 2007 年 4 月 21 日、植生が繁茂している 2006 年 8 月 5 日の 3 回、いずれも快晴の日に行った。Table 1 に各撮影条件を示す。

2.2.2 DSM の作成方法

DSM の作成原理は、同一対象を異なる角度で撮影した画像を立体視し、高さを求めるものであり、この過程をデジタル画像処理によって行う。ADS40 の特徴は 1 フライト中に 4 つの角度から同一対象を撮影することである。本研究ではさらに、隣接するコース間で撮影画像が 60% 重なるよう (サイドラップ) に飛行コースを設定し、

これらの画像を全て使用して DSM の作成を行った。次に、複数の角度から撮影された同一対象物を特定し、角度差から高さを算出する。DSM 作成までの作業は航空測量会社 (パスコ) によって行われ、高さ解像度 10 cm の DSM が作成された。なお、DSM の位置精度や高さ精度に関しては、Okada *et al.* (2004) や Cramer (2006) の報告から 1 ピクセルのサイズ以内に収まることが確認されている。

2.2.3 DCM の計算

一般に、DCM は DSM と地盤高 DTM (Digital terrain model) の差分として求められる。本研究では、野焼き後に取得した DSM を DTM とし、植物が繁茂している時期に取得した DSM との差分から DCM を推定した。ただし、野焼き後も枯れたオギやヨシの燃え残りが部分的に存在し、DTM の誤差要因となる。そこで、燃え残りの場所が年によって違うことに着目し、2006 年 4 月 1 日と 2007 年 4 月 21 日に取得した DSM について、同じ座標から値の低い方のピクセルを抽出することで DTM を作成した。

2.3 地上測定

測定は光の測定時に直達日射の影響により過大なばらつきが生じないように曇天日を選び、2006 年 8 月 1 日に行った。測定点は全部で 16 地点あり、優占種の植生タイプ別に、オギ群落を 5 地点、ヨシ群落を 8 地点、オギとヨシが混在する群落を 3 地点を選定した。植生の高さについても各優占種タイプのなかで幅を持たせるよう測定点を選んだ。オギ群落の植生高は 130 cm から 355 cm、ヨシ群落は 140 cm から 440 cm の範囲であった。各測定点の位置は GPS (Pathfinder ProXT, Trimble) で測位した。

各測定点では、まず草丈先端高として、対象植生の自然な状態での最高点の高さを測高ポールで各測定点につき 1 回測定した。続いて、光量子計 (Li-190SB, Li-Cor) を使って群落内に入射する PPF (Photosynthetic Photon Flux Density) の垂直分布を測定した。二つの高さのあいだで遮断される PPF は、その高さのあいだに含まれる葉群による光吸収を反映するので、PPF の垂

Table 1. Data acquisition parameter values for each of the three ASD40 measurements.

	1 April 2006	5 August 2006	21 April 2007
Data acquisition time	11:40-12:44	10:36-11:56	10:07-11:15
Flight altitude (m)	1932	1929	2192
Flight velocity (km/h)	200	240	192
Spatial resolution (cm)	20	20	20
Integration time (ns)	3.6	3.0	4.2

直分布から葉の垂直分布構造の情報を得ることができる。あらかじめ相対校正した光量子計 2 式を用い、レファレンス用の光量子計を群落上に固定し、もう一方の光量子計を地表 50 cm から 50 cm 間隔で上方へ動かし、2 つの光量子計の測定値を同時記録した。

以上の草丈先端高と光の測定を各測定点で 5 回行い、平均値を求めた。

なお、地表面近くでは泥の上に枯れた植物体が折り重なっており、地上 0 cm で光の測定は困難なため行わなかった。そのため、0 ~ 50 cm の層での正確な光の吸収量は求められないが、地上 50 センチまで入り込んだ光がすべて地表面までのあいだで吸収されたと仮定すれば、この層での吸収量の上限を求めることができる。

3. 結 果

3.1 DCM の推定

Fig. 2(A), (B), (C) にそれぞれ 2006 年 4 月 1 日、2006 年 8 月 5 日、2007 年 4 月 21 日に取得した DSM を示す。野焼き後の DSM と 8 月の DSM では明らかに値が異なっており、ADS40 によって植物の生長による DSM の変化を検出できている。また、野焼き後の 2006 年 4 月 1 日と 2007 年 4 月 21 日に取得した DSM では遊水地内部に燃え残りによって周囲よりも高くなっている場所がみられ、その場所は年によって異なっていた。

Fig. 3 に、2006 年 4 月 1 日と 2007 年 4 月 21 日の野焼き後の DSM から決定した DTM を示す。Fig. 3 と Fig. 2(A) や Fig. 2(C) を比較すると、燃え残りの大部分が取り除かれていることが分かる。

Fig. 4 に、2006 年 8 月 5 日の DSM から DTM を引いて求めた DCM を示す。DCM は、DTM の起伏と関係なく場所によって大きく違っている。Fig. 4 では DCM の範囲を 0 cm から 500 cm までで示しており、遊水地内部の植生部分は大部分が 100 cm から 400 cm の範囲にあった。DCM が 500 cm 以上の場所の大部分は樹木であり、100 cm 以下の場所の大部分は水面や舗装面であった。

3.2 地上測定との比較

航空写真から推定される DCM が草本群落のどこの高さを表しているのかを明らかにするため、地上で測定した草丈先端高や PPF D の垂直分布と比較を行った。

Fig. 5 に、草丈先端高と DCM との比較を示す。DCM の値は、地上測定点を測位した GPS の精度が 50 cm 程度であることを考慮し、GPS で決定した座標から半径 1 m のバッファ内の平均値を使用した。図中のエラーバーは、平均からの標準偏差を示している。草丈先端高については、各地上測定点での 1 回の測定値を示して

ある。Fig. 5 では草丈先端高と DCM にはよい相関が見られるが ($r^2 = 0.96$)、DCM は草丈先端高よりも低めに推定されていた。両者のずれかたには植生タイプや草丈先端高とは明確な関係はなく、先端高と DCM の差の平均、標準偏差、RMSE はそれぞれ -97.1 cm、31.0 cm、101.6 cm だった。

次に、草丈先端高よりも DCM が過小評価であった原因を探るため、葉群分布と関連のある PPF D の垂直分布との比較を行った。群落上で計測した PPF D と鉛直方向 50 cm ごとに計測した PPF D の比から、群落内における高さ別の PPF D を相対値として求め、更に 2 高度間での PPF D の相対値の差分から、高さ別に遮断された PPF D を求めた (Fig. 6)。併せて草丈先端高を点線、DCM を実線でそれぞれ示す。また、各地点でのそれぞれ 5 回の光の測定で求めた、もっとも光を吸収する層の位置とその標準偏差を、矢印とエラーバーで示した。なお、方法の節で説明したように地表面から地上 50 cm までの層の正確な吸光量は計算できないが、その最大値は求まる。16 の測定点のうち 15 点で、この最大値を仮定しても 50 cm より高い層に最大吸光層があることがまちがいがなかった。Fig. 6 にはこれら 15 点のグラフを示した。このグラフからは DCM (実線) は群落の最大高 (破線) よりも、PPF D が最も遮断された層と対応しているように見える。DCM と、PPF D が最も遮断された層の高さとの関係を示したのが Fig. 7 である。各測定点とも DCM、最大光吸収高とも 5 回の測定の平均と標準偏差をプロットした。両者の間には高い相関があり ($r^2 = 0.97$)、ほぼ 1 : 1 の関係が見られた。また、両者の差の平均、標準偏差、RMSE はそれぞれ 13.5 cm、29.9 cm、31.9 cm となり、草丈先端高と比べて良く一致した。

4. 考 察

ADS40 を用いて推定した DCM は、植生のタイプや植生の高さに関係なく、地上で測定した草丈先端高さよりも低い場所を示し、PPF D が遮断される割合が最も大きい層と良く一致した。ある層が多く光を遮断したということは、空からの視点ではその層の葉が多く見えていることを意味しており、自動検出される高さが、空からもっともよく見えている層と対応するという結果は理にかなっているものと考えられる。

本研究では、DSM を作成するためのマッチング処理において、複数の画像から同一点を探索するために 8×8 ピクセルの探索領域を設定し、探索領域内の各ピクセル値を比較して最も良く合う場所を探し出すという処理を行っている。このため、測定対象がピクセルサイズの 20 cm よりも小さい場合、ピクセル値は測定対象とその背景

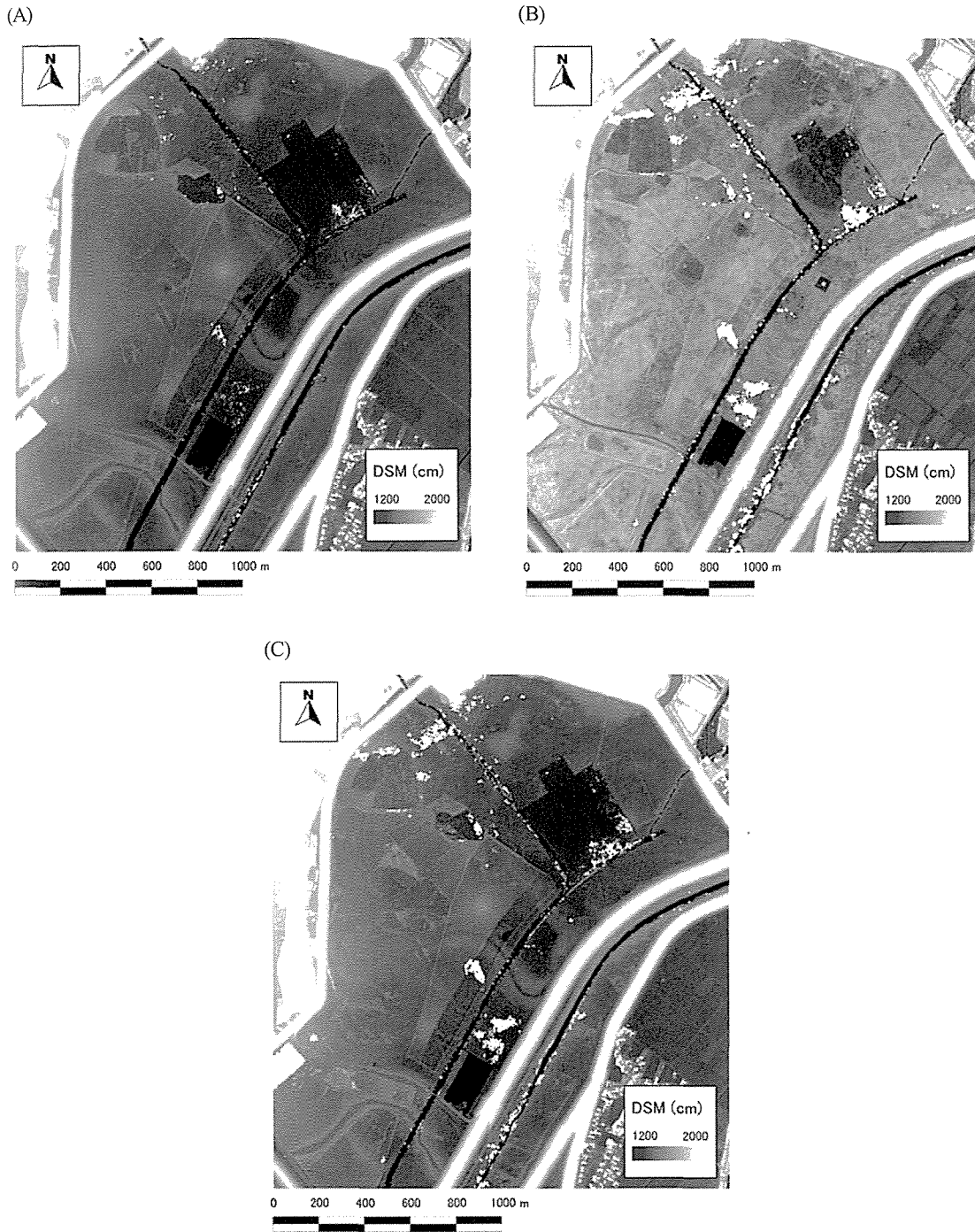


Fig. 2. DSMs of Watarase wetland: measured on (A) 1 April 2006, after a controlled burn; (B) 5 August 2006, at maximum vegetation height; and (C) 21 April 2007, after another controlled burn. The DSMs were obtained with the ADS40 airborne digital sensor.



Fig. 3. DTM developed by using the minimum values from the two DSMs acquired after the controlled burns (April 2006 and 2007).

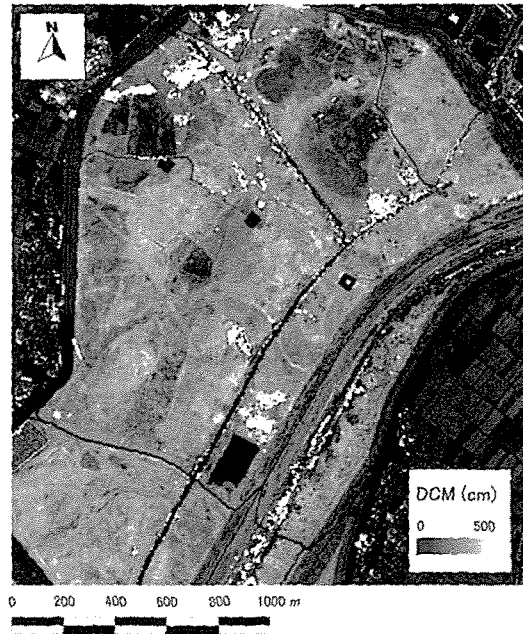


Fig. 4. DCM obtained by subtracting the DTM (see Fig. 3) from the DSM measured at maximum vegetation height (5 August 2006).

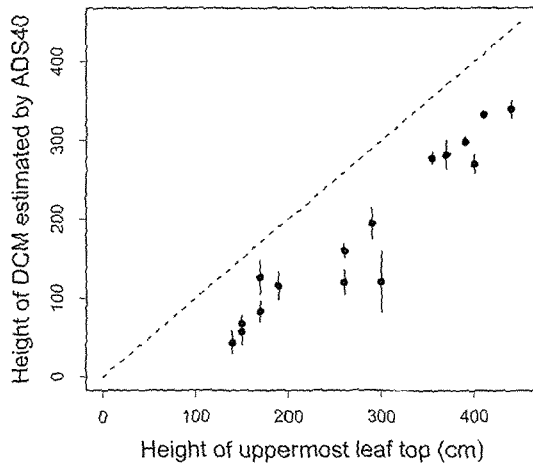


Fig. 5. Relationship between the DCM height and the height of the uppermost leaves at 15 ground measurement points. While we measured PPFD at 16 points, we could not determine height of maximum PPFD interception at one measurement point and did not show the result of this point. The dotted line indicates a 1:1 relationship. Error bars indicate the SDs of five measurements.

のミクスチャになると考えられる。本研究で測定対象となるのは主にオギとヨシの群落であり、葉の幅はピクセルサイズの 20 cm よりも小さため、ピクセルは層別に分布する葉のミクスチャであったと考えられる。ピクセルがミクスチャになっている場合、そのピクセル値に最も寄与するのはピクセルに占める割合が最も大きな測定対象となる。これは、群落を上から見たときに葉が見えている面積の割合が最も大きい場所、すなわち群落上端から入射した PPFD が最も遮断された高さになる。この結果、Fig. 6 や Fig. 7 に示したように、DCM は最も PPFD を遮断した層の高さと良く一致したと考えられる。また、2007 年 4 月 21 日に撮影したときオギやヨシの芽生えが始まっていたにもかかわらず、2006 年 4 月 1 日の DSM とほとんど差が無かったのは、2007 年 4 月 21 日の段階でオギやヨシが展葉していなかったため、群落を上から見たときに地表面の面積割合が大きかったためだと解釈することができる。

ピクセルが代表する高さについては、ピクセルサイズと測定対象のサイズとの相対的な関係が影響すると思われる。ピクセルサイズに対して測定対象が十分に小さければそのピクセルは背景にあるものを代表するだろうし、逆に測定対象が十分に大きければそのピクセルは測定対象そのものを表すことになる。先述した Okada *et al.* (2004)

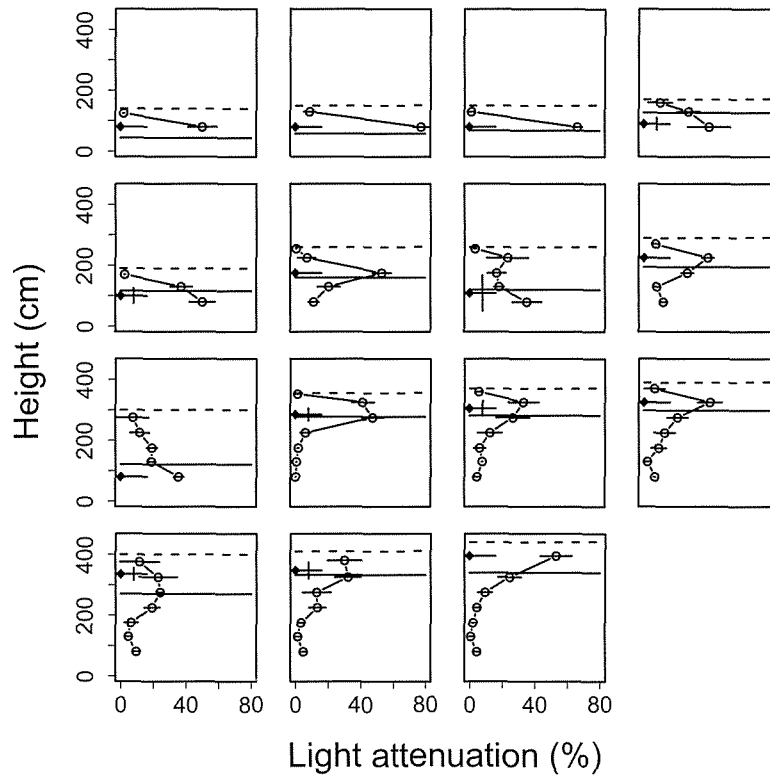


Fig. 6. Vertical profiles of intercepted PPFD between consecutive heights measured at 15 ground measurement points. Dotted and solid horizontal lines indicate the height of uppermost leaves and the DCM height, respectively, at each point. Each plotted value is the average of five PPFD measurements, and error bars indicate SDs. The black arrows indicate the height of maximum PPFD interception. The vertical lines on the arrows indicate its standard deviation.

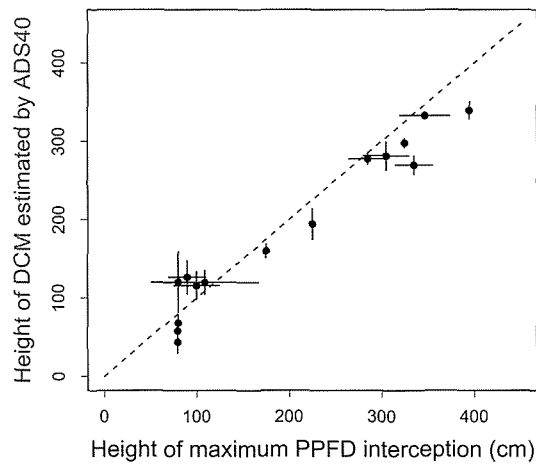


Fig. 7. Relationship between the DCM height and the maximum intercepted PPFD at 15 ground measurement points. The dotted line indicates a 1:1 relationship. Error bars indicate the SDs of five measurements.

や Cramer (2006) の研究で、植生表面に比べて人工構造物で DSM の高さ精度がよいのは、地上検証点がピクセルサイズに対して十分に大きいためであろう。

References

- Committee on history of Fujioka town (ed.), 2002: *History of Fujioka*. Fujioka town, Fujioka, 472 pp. (藤岡町史編纂委員会, 2002: 藤岡町史, 藤岡町, 藤岡町, 472pp)
- Cramer, M., 2006: The ADS40 Vaihingen/Enz geometric performance test, *J. Photogram. Remote Sens.*, **60**, 363–374.
- Esseen, P., Jansson, K. U., and Nilsson, M., 2006: Forest edge quantification by line intersect sampling in aerial photographs. *For. Ecol. Manage.*, **230**, 32–42.
- Okada, H., Tachibana, K., and Sasagawa, T.,

- 2004: Making and accuracy verification of true ortho. *Association of precise survey and applied technology*, **87**, 39–42. (岡田宏之・橘 菊生・笹川 正, 2004: トゥルーオルソの作成と精度検証. (財)日本測量調査技術協会 APA, 87, 39–42.)
- Vega, C., and St-Onge, B., 2008: Height growth reconstruction of a boreal forest canopy over a period of 58 years using a combination of photogrammetric and lidar models. *Remote Sens. Environ.*, **112**, 1784–1794.