

小型 UAV が観測した空中写真による海岸クロマツ林の樹高推定

朝香智仁¹・青山定敬²・岩下圭之³・工藤勝輝³・藤井壽生³

A height measurement method for coastal forests using aerial photos taken with a small Uninhabited Airborne Vehicle

Tomohito Asaka・Sadataka Aoyama・Keishi Iwashita・Katsuteru Kudou and Hisao Fujii

Abstract : Basic information of coastal forests such as the forest stewardship standards is important in promoting the growth and preservation of healthy forests. The purpose of this study is to validate the height measurement method for coastal forests using aerial photos taken with a small Uninhabited Airborne Vehicle (UAV). As a result, the proposed method provides good agreement with ground truth data. Consequently, our results indicate that aerial photos derived from the UAV are available for investigating tree height of coastal forests.

1 はじめに

日本の海岸には海岸林と呼ばれる樹林が見られるが、その構造や樹種構成は多様である(近田, 2001)。クロマツは海岸林として一般的な樹種であるが、その管理手法については全国共通のものではなく、地域により異なっており、体系的な管理手法は十分に確立されていない(樽谷ら, 2009)。そのため、除間伐等の適切な管理がなされない場合には、海岸林は脆弱な林へと変化していつてしまうことから、本数密度管理基準などの基礎資料が必要になる(貞清, 2008)。海岸林の基礎資料としては、胸高直径、樹高、本数密度等があげられるが、これらは互いに相関性が認められている(福地, 1994)。とりわけ、樹高は「形状比」、「枝下高比」および「地位指数曲線」など海岸林の健全性の指標として用いられることがあり、その重要性は極めて大きいと思われる。

著者らは、航空レーザ測量成果を用いることで広域に渡る海岸クロマツ林の樹高を高精度で推定する手法について、現地調査結果との対比から実証している(朝香ら, 2009)。しかしながら、現状では航空レーザ測量を毎年実施することはコスト面から容易くない。また、クロマツ林のような林では、レーザが必ずしも樹冠の頂端にあたらないため、全てのクロマツの樹高が測定できるとは限らない。そこで、本研究では、航空レーザ測量よりも安価に観測ができる小型無人航空機(Uninhabited Airborne Vehicle : UAV)に着目し、小型UAVが観測した空中写真を利用して海岸クロマツ林の樹高を推定する手法について提案するとともに、現地調査結果を通じてその妥当性を検証することを目的とした。



図 1 : 研究対象地域の概況

2 研究対象地域と概況

研究対象地域は、千葉県九十九里海岸林の一部を選定した(図-1)。図中のハッチング部分の約250m×200mは、小型UAVによって空中写真を撮影した地域である。この地域は保安林に指定されたクロマツ林が生育しており、林内には遊歩道も設けられているため、現地調査による毎木調査がしやすいことから研究対象地域として適地であると考えた。

3 研究方法

本研究では、小型UAVが観測した空中写真からクロマツ林の樹高を推定する方法について検証するために、以降に示す方法により研究を進めた。次節では、空中写真測量による地表面高さ推定手法および樹高推定手法、推定結果を検証するための現地調査手法について述べる。

3.1 小型UAVおよび空中写真測量システム

本研究で使用した小型UAVは、GPS連動でシャッターを切れるデジタルカメラを搭載しており、指定したウェイポイントへの移動と撮影を自動で実行できる。また、軽量で垂直離着陸方式のため離着陸場所の制約が少なく、観測地域を選ばないのが特徴である。図-2は小型UAVと無線コントローラーの外観で

¹ 日本大学生産工学部助手, Research Associate, Faculty of College of Industrial Technology, Nihon University, 1-2-1 Izumi, Narashino, Chiba, 275-8575 Japan

² 日本大学生産工学部助教, Assistant Professor, Faculty of College of Industrial Technology, Nihon University, 1-2-1 Izumi, Narashino, Chiba, 275-8575 Japan

³ 日本大学生産工学部教授, Professor, Faculty of College of Industrial Technology, Nihon University, 1-2-1 Izumi, Narashino, Chiba, 275-8575 Japan

Corresponding author: asaka.tomohito @ nihon-u.ac.jp

あり、仕様については表-1に示すとおりである。図中のIMUは、慣性計測装置 (Inertial Measurement Unit) のことである。

空中写真測量の処理ソフトウェアは、複数のデジタル写真と撮影時の位置情報を用いて内部標定・外部標定を行い、数値表層モデル (Digital Surface Model : DSM) およびオルソモザイク画像が生成できる。DSMは地理座標系のグリッドを標高に換算した地表面高さを格納したデータであり、その作成原理は(1)式による (日本測量協会, 2009)。

$$\Delta H = \frac{H_a(1 - \Delta H/H_a)}{Bf} \cdot dP \quad (1)$$

ここで、 ΔH は比高、 H_a は撮影対置高度、 B は撮影基線長、 f は焦点距離、 dP はオーバーラップ部分の視差差である。撮影基準面は回転楕円体とした。

よって、空中写真は重複部分が必要になり、本処理システムではオーバーラップ率60%以上、サイドラップ率30%以上の観測が条件となる。

本研究では、対地高度100mで空中写真を撮影することにした。この場合、一回で撮影できる範囲は144m×108mであり、地上分解能は約0.03mとなるため、得られるDSMおよびオルソモザイク画像も同程度の地上分解能となる。

3.2 空中写真による樹高推定

小型UAVの空中写真から得られるDSMは、回転楕円体から地表面までの高さであるため、そのままの情報では樹高を推定できない。しかしながら、DSMの地上分解能に近い面的な地盤高がわかれば、その差分から樹高を推定することも可能になる。そこで本研究では、国土地理院が「海岸における3D電子地図」の整備作業で取得した、地上分解能2.0mのDEMを利用することにした。航空レーザ測量成果自体は、2005年に国土地理院が実施したものであるが、地盤高に関しては経年変化による変動が微小であると本研究では仮定している。

樹高推定は、以下の(2)式を用いて算定した。

$$DFM = DSM - DEM \quad (2)$$

ここで、DFMは数値地物モデル (Digital Feature Model : DFM)、DSMは空中写真測量成果、DEMは航空レーザ測量成果である。なお、DFMは樹高に相当する数値を示すものであり、名称については本研究において便宜的に定めている。また、DSMは空中写真測量を実施した直後は楕円体高であるため、ジオイド高さを差し引いて標高に換算したデータを用いる。ジオイドモデルは、国土地理院発行のジオイド2000 (Ver.4.0) を使用することにした。

3.3 現地調査によるクロマツの毎木調査

小型UAVによって観測した地域において、無作為に抽出したクロマツを対象に、クロマツの位置と樹高を測定した。調査対象木の位置は、地理座標系が既知な基準点を原点とする基準線からの座標としてトータルステーション (Nikon NST-305c) を用いて求

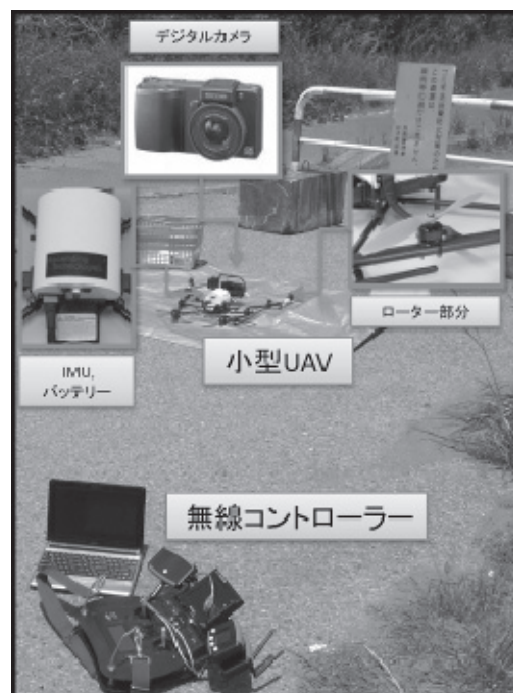


図 2 小型 UAV の外観

表 1 : 小型 UAV の仕様

重量	1.8 k g
サイズ	0.85m×0.85m×0.15m
最大ペイロード	500g
飛行高度	150~250m (航法に基づく)
飛行時間	15分
推奨飛行距離	半径300m
耐風	10m/s
搭載センサー	デジタルカメラ (Ricoh GX200)

め、後日、座標を地理座標系に変換して求めることにした。作業手順は、まず原点にトータルステーションを据え付け、盛り替え点を設けながら測定できる範囲のクロマツを測定する。測定の際は、調査対象木の根元に水準器付きのプリズムスタッフを据えて測量することとした。なお、トータルステーションは、既知点と未地点との相対的な位置関係 (距離と角度) により座標を計算する。また、距離の測定は、測量を行いたい地点に反射板 (プリズム) を設置し、それに向かって光を反射させて返ってきた光の位相差を利用して計測している。

樹高は、伸縮式の樹高計によって測定した調査対象木に選定したクロマツの根元から樹冠の頂端 (頂芽の先端) までの高さとした。測定の際は、頂端に樹高計の先端が到達しているかを、測定補助者がある程度離れた場所から判定することとした。

4 研究結果と考察

4.1 小型UAVの空中写真測量成果

図-3は、2010年5月18日に小型UAVが撮影した空中写真のオリジナルデータである。地上分解能は0.03m

であり、クロマツの葉色や形状が詳細に判読できる。また、中心投影法で撮影されたオリジナルデータであるため、中心から外側に向かって樹木が倒れ込んでいるのがわかる。本研究では、研究対象地域上空を40シーンに渡って撮影した空中写真からDSMを作成することにした。なお、小型UAVの耐風速度は10m/sであるが、当該日は瞬間的に風速が強くなることもあり、機体が規定のウェイポイントより流されてしまうことが数回あった。研究対象地域から最も近い気象庁茂原観測所の10分間風速を確認したところ、観測中であった午前10時から12時までの間では6.9-9.5m/sの風速が毎時間観測されていた。

図-4は40シーンの空中写真から作成したDSMであり、図-5はDSMを利用して空中写真を正射投影したオルソモザイク画像である。また、図-6は、DSMとオルソモザイク画像を利用して作成した鳥瞰図である。図-4は地表面高さをグレースケールで表したもので、黒色から白色になるに従って高さが高くなるように、最小値から最大値までを線形表示している。図-5は、正射投影されたモザイク画像であるため、オリジナルデータと違って樹木の倒れ込みが補正されており、それにより、図-6のような3次元表示が可能となる。図-6は、高度650m、俯角55度、視野角30度および方位角0度（磁北）に設定した鳥瞰図であるが、物体の描写が非常に鮮明で、クロマツの形状や建物の様子なども空中から人間が観測したように表示できることがわかった。しかしながら、小型UAV観測時における風の影響があり、空中写真測量の計算ができないポイントが、画像中に約2%存在した。また、空中写真測量の計算ができて、風の影響によりクロマツが風になびいた状態で撮影されており、クロマツの形状が判読できない部分も存在した。

4.2 クロマツの毎木調査結果

表-2は、小型UAVの観測翌日（2010年5月19日）に実施した毎木調査結果である。表中の「No.1」から「No.40」と付してあるものは、無作為で決定した調査対象木のクロマツである。また、「BM」は測量で用いた座標原点、「TP1」から「TP3」は、トータルステーションを据え付けた盛り替え点である。表中の平面直角座標は、トータルステーションによって測量したクロマツの位置を、平面直角座標9系に変換した地理座標（m単位）である。なお、図-7は、実際にNo.5を測量している様子であり、左図の中央がプリズムスタッフ、右図の測量器機が本研究で使用したトータルステーションである。

4.3 空中写真による樹高推定の精度検証

表-2に示したクロマツの毎木調査地点を図-5に重ね合わせて、オルソモザイク画像の検証をしたところ、40地点ある調査地点の内、合計15地点のクロマツが、画像中では風による影響を受けており、その樹冠形状が不鮮明であることがわかった。よって、これら15地点を除く25地点分のデータをのみ（2）式から樹高を推定し、精度検証を実施することにした。

図-8は、オルソモザイク画像に、トータルステーションを据え付けた地点および樹高推定の精度検証を行う調査対象木の地点を示したものであり、図中矢印の先にある不整合なポリゴンは、クロマツの樹



図 3：小型 UAV が観測した空中写真

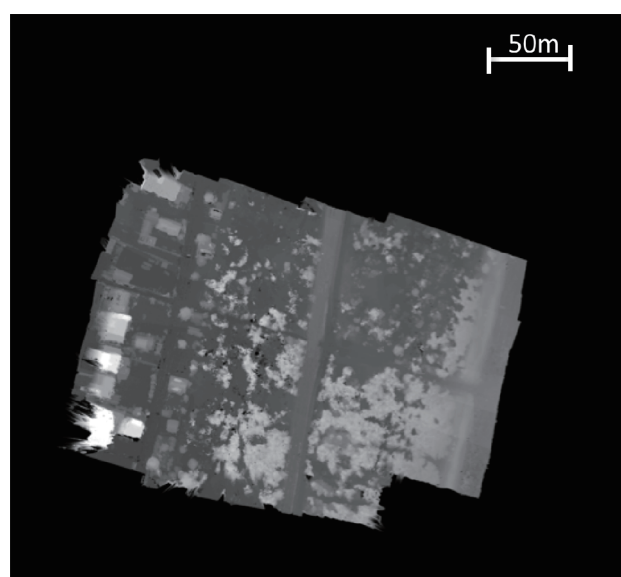


図 4：40シーンの空中写真から作成したDSM



図 5：DSM を利用したオルソモザイク画像

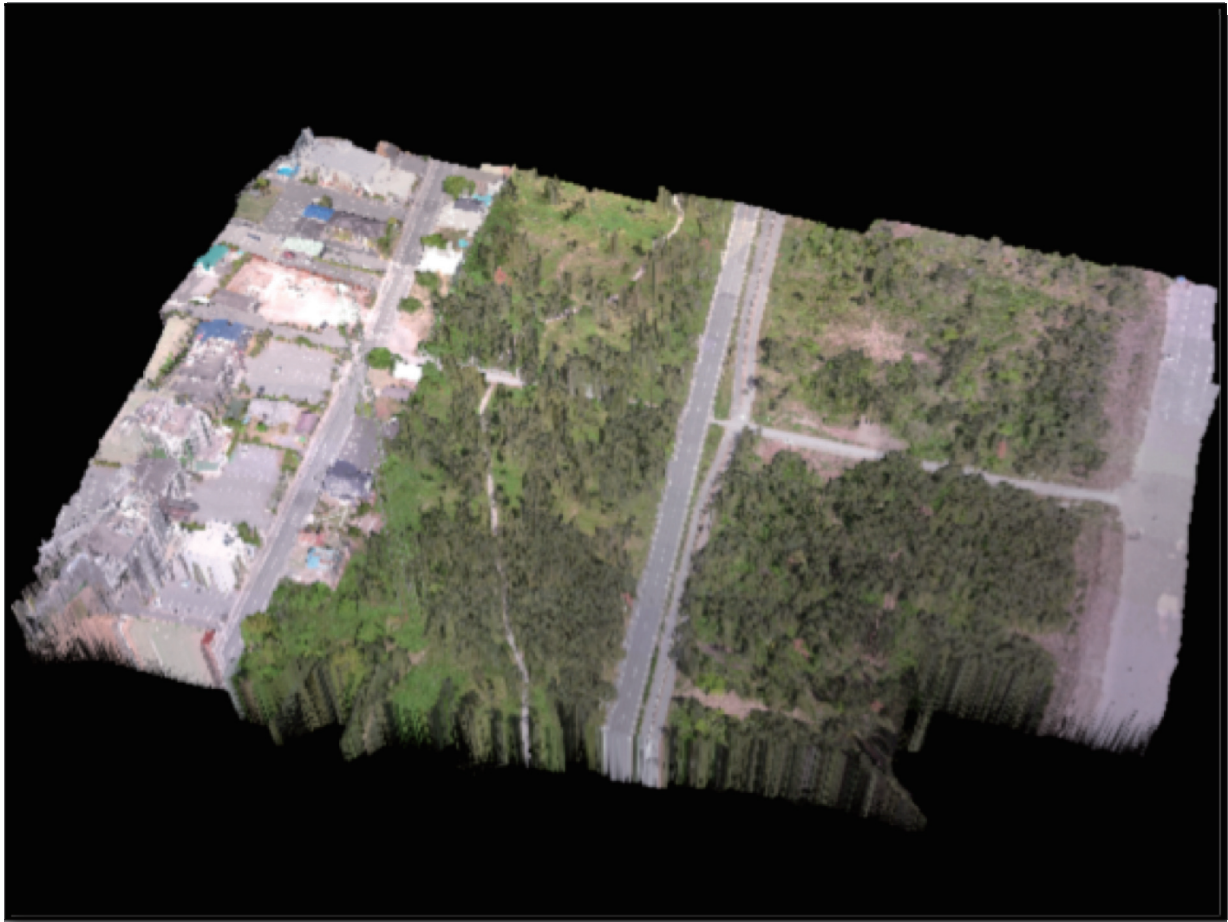


図 6 : DSM とオルソモザイク画像を利用した鳥瞰図

表 2 : 毎木調査結果一覧

測点番号	平面直角座標 X	平面直角座標 Y	胸高直径(cm)	樹高(m)	測点番号	平面直角座標 X	平面直角座標 Y	胸高直径(cm)	樹高(m)
BM	-63143.959	51206.865	-	-	No.20	-63081.416	51151.026	31.035	16.180
TP1	-63126.389	51129.276	-	-	No.21	-63083.593	51143.064	22.027	13.590
No.1	-63140.970	51143.078	19.099	18.690	No.22	-63076.364	51138.155	23.587	13.450
No.2	-63143.061	51148.932	29.921	17.738	No.23	-63069.589	51138.732	22.377	10.250
No.3	-63155.801	51123.754	32.372	16.832	No.24	-63066.524	51140.664	25.592	15.020
No.4	-63149.712	51105.868	29.285	15.603	No.25	-63079.767	51129.230	27.343	16.020
No.5	-63160.485	51101.479	21.677	12.915	No.26	-63070.033	51124.521	30.558	15.580
No.6	-63173.599	51116.291	16.870	13.620	TP3	-63071.774	51171.068	-	-
No.7	-63169.615	51124.809	23.969	11.500	No.27	-63079.027	51181.062	23.459	14.520
No.8	-63108.301	51130.987	20.690	14.565	No.28	-63077.361	51185.639	15.534	12.000
No.9	-63105.714	51122.869	22.282	15.184	No.29	-63076.056	51186.207	14.642	10.290
No.10	-63101.359	51115.468	33.104	17.080	No.30	-63074.934	51188.506	15.152	13.010
TP2	-63091.227	51145.508	-	-	No.31	-63071.980	51187.626	15.534	11.590
No.11	-63100.652	51152.546	28.966	16.370	No.32	-63069.759	51191.397	19.099	12.960
No.12	-63113.192	51149.947	25.847	16.613	No.33	-63068.707	51188.526	21.581	15.020
No.13	-63114.455	51156.308	22.855	16.877	No.34	-63067.401	51184.233	21.709	13.460
No.14	-63115.179	51159.680	18.869	15.304	No.35	-63066.012	51180.242	31.926	14.890
No.15	-63099.618	51163.823	20.054	16.046	No.36	-63059.791	51181.196	26.993	15.000
No.16	-63110.939	51180.254	28.839	16.443	No.37	-63051.322	51181.319	20.595	14.680
No.17	-63101.606	51180.984	18.653	15.129	No.38	-63058.833	51176.493	31.449	16.520
No.18	-63092.036	51163.917	25.656	14.930	No.39	-63058.364	51167.504	28.871	16.280
No.19	-63083.582	51147.775	27.470	13.875	No.40	-63056.625	51156.953	15.152	10.730



図 7：トータルステーションによる毎木調査地点の位置測量 (T.P. 1 から No. 5 を視準)



図 8：毎木調査地点およびトータルステーション据え付け位置 (No.：毎木調査地点, B.M.：座標原点, T.P.：盛り替え点)

冠を縁取ったものである。なお、各地点の名称は表-2と同期している。図-9は、 x 軸に空中写真から推定した樹高、 y 軸に現地調査によって測定した樹高をプロットした散布図である。なお、相関解析の際には、クロマツの樹冠ポリゴン内におけるDFMの最大値を採用している。これは、樹冠の頂端の位置が、風により移動してしまっていることを考慮しているためである。相関解析の結果、相関係数は $R=0.742$ であり、風の影響を受けている空中写真にも関わら

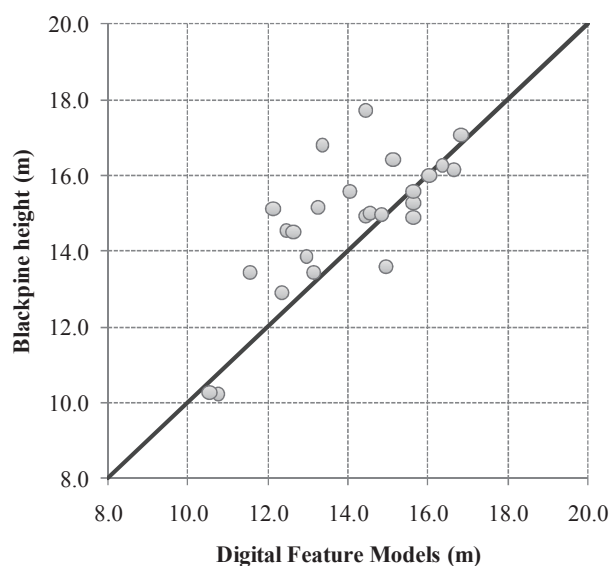


図 9：推定した樹高と毎木調査結果との比較

ず良好な相関関係が認められた。結果として、本研究で使用した小型UAVが観測した空中写真からは、少なくとも150m四方にわたる海岸クロマツ林の樹高を精度よく推定できることがわかった。

5 おわりに

本研究では、小型UAVが観測した空中写真を利用して海岸クロマツ林の樹高を推定する手法について、その妥当性を定量的に示すことができた。得られた成果は、以下のようにまとめられる。

- 1) 九十九里海岸林を研究対象地域として、小型UAVによる空中写真の撮影および空中写真測量システムによる画像処理を実施し、空間分解能

0.03mのDSMおよびオルソモザイク画像が得られた。風に機体が煽られることもあったが、およそ2時間の観測時間で約250m×200mの範囲を観測できることがわかった。非常に空間分解能が高く、また写真測量ではあるが対地高度が約100mのため、被雲による観測制限が無いなど海岸クロマツ林のリモートセンシングによる調査方法として有用であることが示された。本研究で使用したUAVにはデジタルカメラのみを搭載したが、近赤外カメラを搭載することもできるため、今後、植生の定量的な生育調査にも応用できる。

- 2) 図6に示したとおり、小型UAVが観測した空中写真からは、非常に鮮明な鳥瞰図が作成できることがわかった。DSMの作成にあたっては風による影響や陰影によって欠損値が生じた地点もあったが、全体的にはDSMとオルソモザイク画像の位置が一致しているため樹冠の形状が判読できるような鳥瞰図となっている。よって、海岸林の景観評価（工藤ら，2009）など、高さ情報のみの利用だけでなく応用的な利用が可能であると考えられる。
- 3) 本研究では、小型UAVから作成したDSMと航空レーザ測量成果DEMの差分によって樹高を推定し、相関分析によってその推定精度が良好であることが示された。これは、DSMの推定精度もさることながら、レーザ測量成果によって作成されたDEMの精度が非常に高いために実現できた結果である。従って、空中写真測量とレーザ測量双方の利点を併用できれば、本研究で提案したようなこれまで実施されてこなかった手法

によって広域にわたる樹高を推定することができると結論付けられる。

謝辞：本研究で使用した航空機レーザ測量成果は、国土地理院地理調査部社会地理課から提供を受けました。また、小型UAVの観測に関しては、BIZWORKS株式会社の吉田貴樹様、株式会社情報科学テクノシステムの渡部靖之にご協力いただきました。ここに記して、感謝の意を表します。

引用文献

- [1] 朝香智仁，西川 肇，藤井壽生，近藤 勉，近田文弘，大木正喜(2009)： 航空レーザ測量成果を利用した海岸林の樹高測定，平成21年度日本海岸林学会研究発表会，pp.17-18.
- [2] 工藤勝輝，西川 肇，藤井壽生，近田文弘，朝香智仁(2009)： 3次元衛星画像を用いた海岸林の景観評価，海岸林学会誌，Vol.8（1），pp.25-30.
- [3] 近田文弘(2001)：日本の海岸林の現状と機能，海岸林学会誌，Vol.1, No.1, pp.1-4.
- [4] 貞清秀男(2008)：海岸クロマツ林の本数密度管理に関する調査，九州森林研究，No.61，pp.86-87.
- [5] 樽谷宜彦，岩崎 健(2009)： 効率的な松林保全再生手法の提案，平成21年度九州国土交通研究会，II部門『暮らし・環境・景観』，No.7.
- [6] （社）日本測量協会(2009)：-公共測量-作業規定の準則解説と運用，日本印刷株式会社，東京，pp.282-308.
- [7] 福地 稔(1994)：クロマツ海岸林の密度管理を考える，北海道立総合研究機構林業試験場，光珠内季報，No.94，pp.11-13.

〔受付 平成22年8月18日， 受理 平成22年11月15日〕