

河川植生域に対するローカルリモート センシング技術の計測精度の比較

COMPARISON OF MEASUREMENT ACCURACY OF LOCAL REMOTE SENSING TECHNIQUES FOR VEGITATED RIVER ZONE

野村匡史¹・藤田一郎²
Tadafumi Nomura¹, Ichiro Fujita²

¹学生会員 神戸大学大学院 工学研究科 (〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町1-1)

²正会員 学術博 神戸大学教授 工学研究科 (〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町1-1)

One of the difficult issues in river management in Japan is the treatment of overgrown vegetation developed especially on flood plain, because the vegetation zone sometimes provides natural environment comfortable for birds or small creatures, which makes it difficult to clear the vegetation for improving the flood flow efficiency. However, it is obvious that leaving the overgrown vegetation cause flooding due to the increase of flow resistance by the trees; therefore, it is required to establish an appropriate vegetation management scheme. In order to estimate the effects of vegetation with a reasonable accuracy by using a numerical simulation model, detailed information on vegetation such as vegetation distribution, density and height of trees, type of vegetation are necessary. In the present study, four types of local remote sensing techniques are used for measuring a river reach downstream of the Ichikawa River, where vegetation zone has developed on the floodplain and compare the accuracy and features of each method.

Key Words: local remote sensing, airborne LIDAR, ground laser, vegetation, helicopter, stereoscopic measurement

1. はじめに

近年、河川整備によって河川の流路が安定し、それによって河道内で安定化した砂州や流れのない場所において植生(樹木群落と草本群集)が発達している河川が多く見られる。河道内の植生群落は、景観や生態系を豊かにする反面、局所的な洪水時の流下能力の低下や、水位上昇を引き起こすことがある。これらの影響を明らかにするためには、河道内の植生群落の分布範囲、樹高、樹種による抗力の違い、密生度など様々なパラメータを得る必要がある。このような植生群落は広範囲にわたって分布するため、衛星画像によるリモートセンシングはマクロ的な情報収集方法として有望だが、詳細な植生分布や河床の微地形、あるいは洪水流などの把握には時間・空間解像度の両面において十分ではない。このような従来のリモセン技術の短所を補うものとして有望なのが、ローカルリモートセンシング技術である。その代表的な手法が航空レーザー(LIDAR)計測¹⁾であり、流域内の地形計測、河道内の微地形や樹木分布等の計測に用いられ

てきた^{2,6)}。その他のローカルリモセン技術として、地上レーザー計測やステレオ画像計測などを挙げることができるが、これらの手法の精度や特徴を同一条件で比較した研究はこれまで例がない。

そこで、本研究では河道内における樹木群の発達が著しい、兵庫県の二級河川、市川の河口付近において4通りのローカルリモートセンシング技術を用いた計測を行い、その精度等の比較を行った。今回実施した計測は、1) 航空レーザー計測、2) 地上レーザー計測、3) ヘリコプターから高解像度ビデオカメラを用いて行うステレオ画像計測、4) デジタルカメラを用いた地上ステレオ計測である。1)と3)では、流路に沿った約3キロメートル区間を対象とし、残りの2)と4)では、そこに含まれる局所的な地上2地点を対象とした。

2. 計測

(1) 市川の概要

市川は流域面積が約506km²、流路延長が78kmの兵庫県内の二級河川である。河床勾配は上流域で約1/100、



図-1 航空レーザー計測の計測範囲

中流域では1/150から1/300, 下流域では約1/400, 河口部では約1/50000である。図-1に航空レーザー計測範囲の航空写真を示した。市川では、洪水時のエネルギー勾配を低下させる目的や、農業用水などの取水目的で多くの堰が作られている。図-1の中央に示した正方領域(300x300m)は地上レーザー計測と地上ステレオ計測の計測範囲である。この領域では堰下流に形成された大きな砂州上に植生域が著しく発達している。この範囲の植生域は鳥類など生物の生息域となっている反面、洪水時の大きな粗度要因となっていることも事実である。河川の植生域の管理においては、このような環境面と流れの安全面をバランスさせた管理手法が求められている。

3. 航空レーザー計測

航空レーザー計測は、図-1に示した約2.7kmの区間に対して2006年と2007年に行った。計測は、Optech社の3Dレーザースキャナ(ALT3100DC)を搭載した航空機、Cessna207により行われた。この機器では毎秒約10万発のレーザを発射し、1m四方の範囲に少なくとも1点という計測密度で三次元座標を得ることができる。2006年の計測では3,815,487点、2007年では10,684,113点の座標値を得た。

図-2には、樹木や建物など地物の標高値を2006年と2007年で比較している。これは、図-1に示す四角の範囲における航空レーザー計測結果の数値標高モデル(DSM: digital surface model)から、数値地形モデル(DEM: digital elevation model)を差し引いたものである。DSMは、計測によって3次元座標が得られた点群を1mメッシュに格子化したもので、DEMは樹木等の地上遮蔽物を除いてから、1mメッシュに格子化したデータである。計測した季節が違うので、単純に個々のデータを比較することは

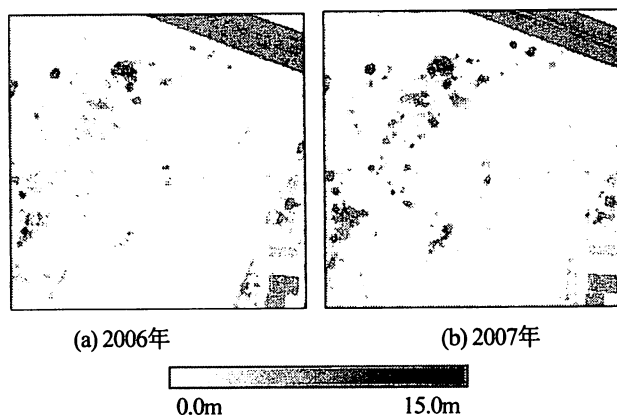


図-2 DSM-DEM (範囲は300m×300m)

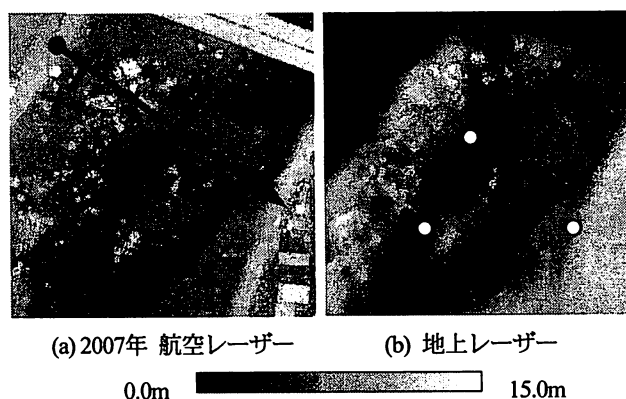


図-3 両レーザー計測の比較

できないが、植生域の分布範囲が2007年ではより広くなり、樹高も高くなっていることがわかる。これは2006年の計測が、春先のあまり葉のついていない時期に行われたことが原因と考えられるが、航空レーザー計測で季節による明確な差を確認できた点は重要である。

4. 地上レーザー計測

地上レーザー計測は、2007年11月17日にLeica社のScan Stationを用いて行った。Scan Stationのレーザの最大到達距離は約300mで、毎秒約4000発の発射が可能である。この機器を、図-3 (b) に白丸で示す地上3地点に順次設置し、結果を合成することで図-2と同じ範囲の三次元座標を得た。全データ数は6,127,849点である。図-3 (a) には比較のために2007年の航空レーザー計測のDSMを示している。これらを比較すると、全体的に同じような分布が得られているが、地上レーザー計測では樹木や堤防などの地上遮蔽物の影響でレーザが届かず、標高値が誤って得られている範囲を確認できた。

さらにより精密な比較を行うために、図-3 (a) に示す黒い矢印に沿った標高値の比較を図-4に示した。年度毎の航空レーザー計測の比較においては、2006年と2007年で樹木以外の範囲においてもわずかに値が異なっている。

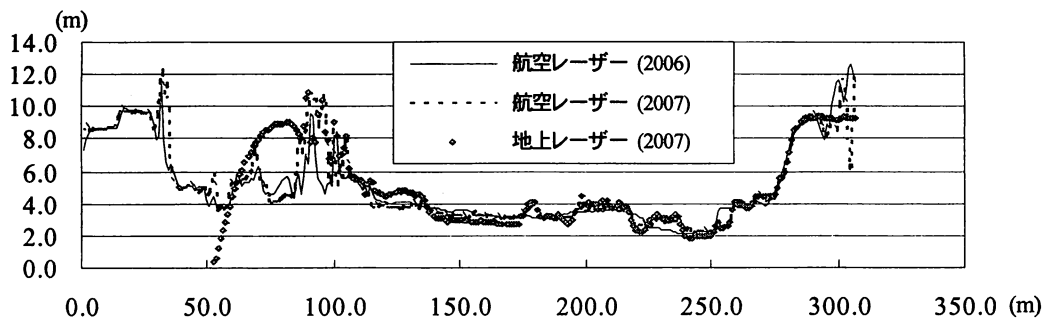


図-4 各レーザー計測の図-3中の矢印に沿った断面比較

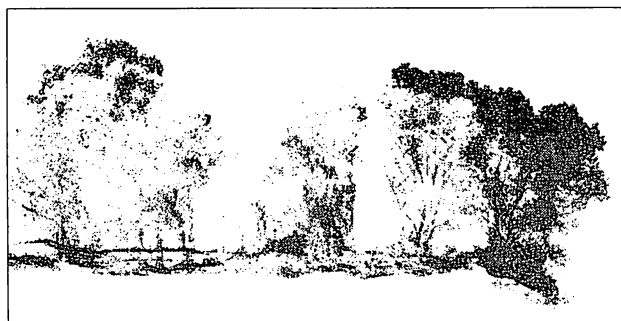


図-5 地上レーザー計測から得た樹木のデータ

これは植生の繁茂の違いあるいは水面反射の違いによる影響と考えられる。ちなみに堤防道路の路面高には変化がなく一定している。

一方、2007年の地上レーザー計測では、 $x=100\sim300\text{m}$ の範囲で航空レーザー計測と同様の結果が得られている。この範囲は、砂礫河床($x=150\sim300\text{m}$)や植生域($x=90\sim150\text{m}$)を含んでいる。ただ、水面のある範囲では0.5m程度の誤差が見られる。これは、比較している300m四方の範囲において、地上レーザー計測の結果が、航空レーザー計測の10倍近く座標を得ていることから、レーザーの発射角度や、局所的な平均値を得る際の測点密度の違いによるものと考えられる。

計測範囲の広さにおいて優れる航空レーザー計測に対して、地上レーザー計測の利点は、空間的に極めて高密度な座標データが得られる点である。図-5は地上レーザーの反射で得られた座標の一部を三次元プロットし水平方向に眺めた図で、これからは、容易に樹木の幹や葉のデータを抽出することができる。この様な利点を活かして、図-3と同じ範囲における標高値のデータを、4段階に分けてプロットしたものが図-6である。ここで、樹木の範囲に一致する部分がいくつか見受けられるが、標高が低くなるほど点数が増加し、最終的には地表面を捉えて図-6(d)のような分布図となる。つまり、地上レーザー計測では、高さ方向に植生内部のデータが得られる。これは上空からレーザーを照射する航空レーザー計測にはない特長である。そこで、ここでは地上型レーザー計測で得られたランダムなデータ個数の空間密度が植生密度に比例すると仮定する。すなわち、地面より上の空間

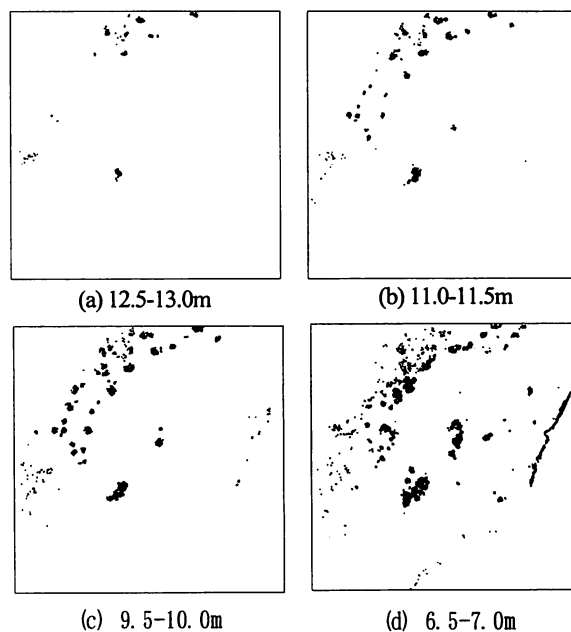


図-6 高さで段階分けした植生分布

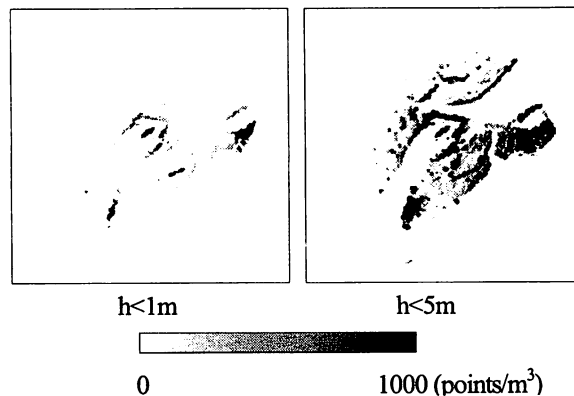


図-7 植生空間密度パラメータ λ の分布

における単位体積当たりのデータ密度を一つの植生空間密度パラメータ λ として考える。図-6に対応する λ の分布の例を図-7に示すが、同じ地点においても冠水深 h に応じて λ の値が変化していることがわかる。実際の抵抗係数や樹種との関係については今後の検討が必要だが、少なくとも地上レーザー計測の精密な実測値をそのまま利用できるため、高精度な植生抵抗モデルとして流れのシミュレーションに反映できる可能性が高い。

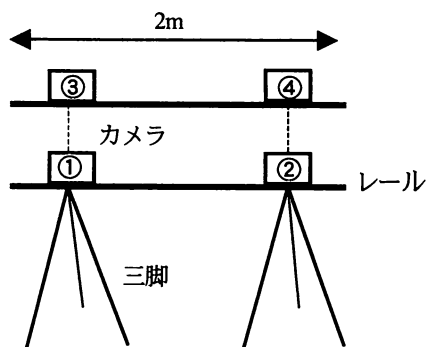


図-8 カメラの設置状況

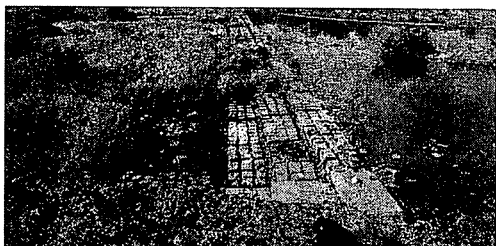
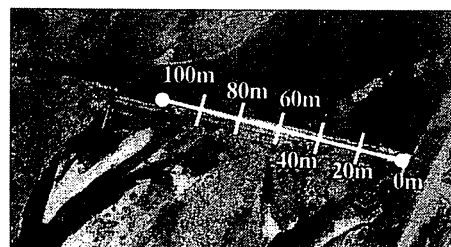


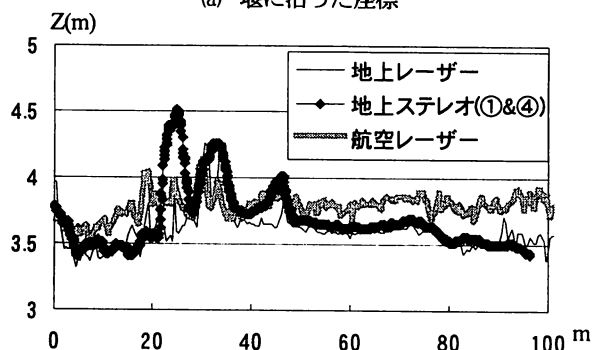
図-9 撮影画像のペア

5. デジタルカメラによる地上ステレオ計測

デジタルカメラを用いたステレオ計測は、地上レーザー計測と同じ2007年11月17日に、図-2や図-3に示す範囲で行った。この計測では、図-8に示すように2mのレールを2基の三脚に設置し、その上でデジタルカメラをスライドさせて画像ペアの撮影を行った。撮影には解像度3008×2000ピクセルのデジタル一眼レフカメラ(Nikon D70)を用い、図-3(a)の矢印の範囲を含むように右岸の堤防の上から見下ろすような角度で撮影した。また、カメラ間隔や高さを変化をさせて撮影することで処理結果の比較も行った。図-9は画像ペアの一例である。このようにして取得した画像ペアの処理には、Leica Geosystems Geospatial Imaging社の画像解析ソフト、Erdas Imagineを使用した。このソフトでは画像ペアの重複領域に座標が既知である基準点(GCP: Ground Control Point)を入力し、カメラと実座標の関係を結びつけることができる。図-10は地上レーザー計測と航空レーザー計測および地上ステレオ計測の結果を堰に沿った断面で比較したものである。ここでは、測点密度、レーザーの発射距離あるいは機器の精度情報から、地上レーザー計測が最も正確な値と考える。地上ステレオ計測では、図-10に



(a) 堰に沿った座標



(b) 堰上の高さ分布

図-10 レーザー計測との比較

も示すように図-8の①と④のカメラ位置の画像ペアにおいて、最も地上レーザーに近い値を得ることができ、奥行き100m程度の範囲であれば非常に高い精度で結果が得られることがわかった。

一方、航空レーザー計測の結果は、地上レーザー計測に対して平均約20cmの誤差が生じていた。これは、堰の上流側には水面が広がっているため、堰直上からの反射データだけではなく水面からの不確実なデータも含めて平均化したためと考えられる。したがって、オリジナルデータであるランダム反射データの色情報や反射強度を利用すれば、航空レーザー計測の精度はさらに改善されるものと思われる。

ただ、今回の地上ステレオ計測は堤防からの撮影であったため、植生域をほぼ水平に見るアングルとなり、その結果、植生分布などについては精度の良い結果が得られなかった。計測精度の改善のためにはさらに高所からの撮影が不可欠となるが、それが実現できても標定板の設置やそれらの測量作業を考えると計測できる範囲は限られてくる。したがって、地上ステレオ計測は断面を固定した経年的な植生繁茂状況や、その周辺の河床形状のモニタリング等に適しているといえる。

6. ヘリコプターからの航空ステレオ計測

最後にヘリコプターからの撮影画像を用いたステレオ計測結果について説明する。この計測は、植生状況が地上レーザー、地上ステレオの両計測とほぼ同じ時期である2007年10月31日に行った。撮影には、解像度1440×1080ピクセルのハイビジョン・ビデオカメラを用い、ヘ

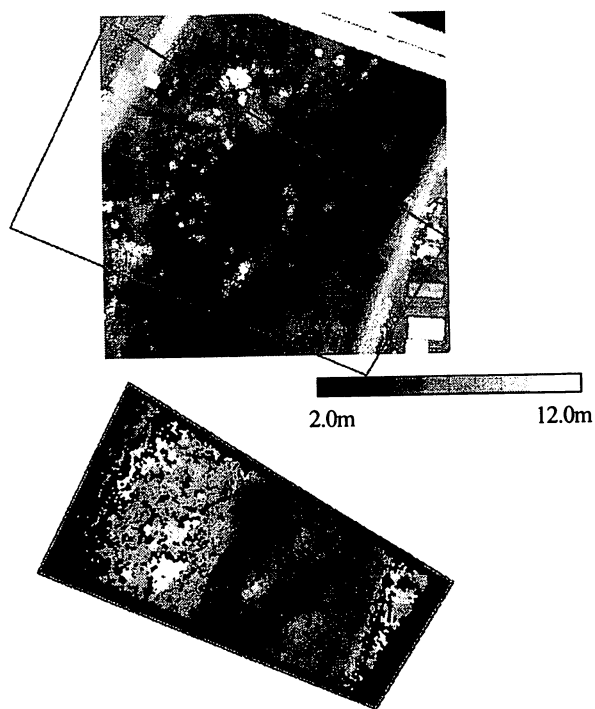


図-11 航空レーザー (上) と航空ステレオ (下) のDSM比較

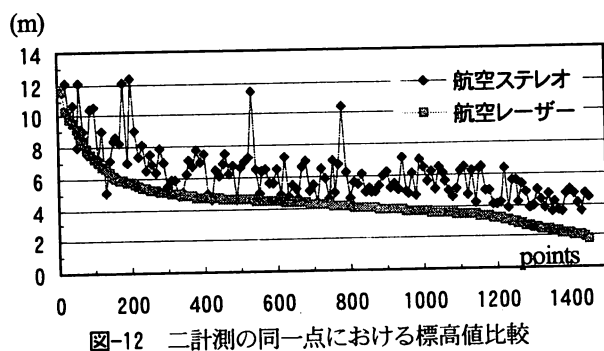


図-12 二計測の同一点における標高値比較

リコプターで平均高度約305m, 平均時速約96.2kmで上流方向に飛行しながら撮影を行った。撮影区間は河口から上流に向かって、航空レーザー計測区間を含む約33kmであるが、ここでは、図-2や図-3の範囲に領域を限定して比較を行う。ハイビジョンビデオ画像の処理は、対象範囲が映っている動画部分を適当な時間間隔でキャプチャして2枚のステレオ画像ペアとした後、Erdas Imagineにより解析処理を行った。

図-11は、航空ステレオ計測の結果と、航空レーザー計測の結果を比較したものである。図の航空ステレオ計測結果は、時間間隔が3秒、撮影位置が約85.7m離れた画像ペアを処理した結果である。また、処理の際に必要なGCPは、画像ペアから特徴的な点を選定し、航空レーザー計測の結果を用いて座標値を与えた。Erdas Imagineで画像の重複領域から抽出できた特徴点の数は、今回の処理では8574点であった。したがって、情報量はレーザー計測よりは格段に少ない。

航空ステレオ計測の結果は、多少の標高誤差はみられるが、全体的な植生域の分布状況は、航空レーザー計測

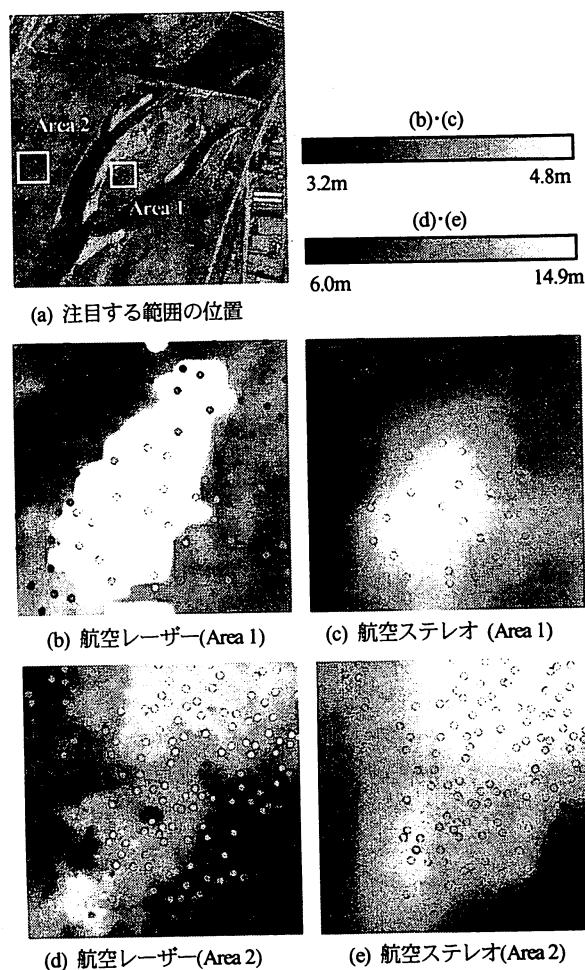


図-13 局所的な標高値の比較

の結果とよく一致している。定量的な比較を行うために、各計測においてほぼ同じ位置で得られたデータの標高値の比較を行ったのが図-12である。ここでは、航空レーザーによる標高値を大きい順に並べ、ほぼ同じ地点のステレオ計測の結果を同じ横座標にプロットして比較した。これを見ると、全体的に航空ステレオ計測の結果が航空レーザー計測の結果を上回っていることがわかる。このケースの平均誤差は1.8m, 標準偏差は1.2mであった。これはレーザー光が植生の内部まで届くのに対し、画像では上空から表面的に見えている樹冠部分の高さを移動平均的に計測しているためと思われる。この点を勘案すると両計測結果の傾向はほぼ一致していると言える。

さらに詳しく比較をするために、図-13に示した2つの局所的な領域、すなわち中央に一本の樹木(樹高10m以上)が生えている範囲(Area 1, 20m×20m)と全体的に植生の発達した範囲(Area 2, 30m×30m)で比較を行った。各範囲の位置は図-13(a)に示している。図中の丸印の色の濃淡は航空ステレオ計測に対するものであり、航空レーザーと結果が同じであれば背景と丸印の濃淡が一致するはずであるが、場所によってはずれが生じていることがわかる。

各エリアに対する結果を比較すると、まず、Area 1に対する航空レーザー計測(図-13 (b))では明瞭に樹木を捉えているのに対し、航空ステレオ計測(図-13 (c))では樹木はわずかな盛り上がり程度にしか捉えられなかった。しかしながら、図-12と同じ方法でプロットした図-14 (a) から分かるように、地表の標高値は精度よく計測できた。一方、全体的に植生の発達しているArea 2に対しては、航空ステレオ計測(図-13 (e))では全体的に滑らかな分布結果であるのに対し、航空レーザー計測(図-13 (d))では、まだらな標高値の分布図が得られた。これは、前述のように、航空ステレオ計測が植生の全体像を捉える傾向があるのに対し、航空レーザー計測ではレーザーが樹木を突き抜けて、地表面まで達したことによる影響と考えられる。これは、図-14 (b) において、標高値が高い部分でのみ、両計測の値が一致していることから明らかである。

7. 結論

本研究では、ほぼ同時期に4種類のローカルリモートセンシング技術を用いて、市川の同じ植生域を計測し、各計測法の比較を行った。一般的に、ステレオ画像計測とレーザー計測では得られるデータ数に大きな差があるため、単純な比較は困難であった。レーザー計測は極めて高密度のデータが高精度に得られる点で非常に優れていたが、計測コストが非常に高価であるため、頻繁に計測を行うことは困難である。一方、ステレオ画像計測は、非常に安価に実施できる反面、レーザー計測に比べてデータ数がかなり少ない欠点がある。ただし、高精細な撮影システムと撮影方法の工夫により、計測精度をさらに改善できる余地は残っている。その点で、いわゆるphotogrammetryである航空ステレオ計測の河川流域に対する今後の利用価値はさらに高まるものと思われる。今後の河川域の計測は、本研究で明らかにしたような各計測法の特徴を把握した上で効率よく行っていくべきであると考えられる。

謝辞：今回の計測に際しては、復建調査設計株式会社、アジア航測株式会社に多大なる協力を頂いた。また、兵庫県姫路土木事務所の関係者の方々からは快く情報を提供して頂いた。本研究は、平成19年度関西エネルギー・リサイクル科学研究振興財団の資金援助によって行われた(No:2006R151)。ここに記して謝意を表する。

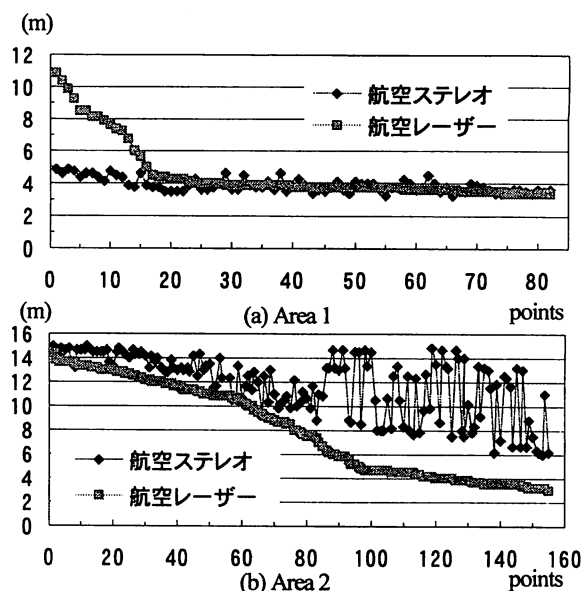


図-14 二計測の同一点における標高値比較

参考文献

- 1) Adams, J.C., and Chandler J.H.: Evaluation of lidar and medium scale photogrammetry for detecting soft-cliff coastal change, *Photogrammetric Record*, 17(99), pp.405-418, 2002.
- 2) H-E, Reutebuch, S., Schreuder, G.: Bayesian object recognition for the analysis of complex forest scenes in airborne laser scanner data. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol 34, part 3A, pp.35-41, 2002.
- 3) Hodgson, M.E., Jensen, J.R., Schmidt, L., Schill, S., Davis, B.: An evaluation of LIDAR- and IFSAR- derived digital elevation models in leaf-on conditions with USGS Level 1 and Level 2 DEMs. *Remote Sensing of Environment* 84, pp. 295-308, 2003.
- 4) Holmgren, J., Persson, Å.: Identifying species of individual trees using airborne laser scanning. *Remote Sensing of Environment* 90, pp.415-423, 2004.
- 5) Leckie, D., Gougeon, F., Hill, D., Quinn, R., Armstrong, L., Shreenan, R.: Combined high-density lidar and multispectral imagery for individual tree crown analysis, *Canadian Journal of Remote Sensing* 29, No. 5, pp.633-649, 2003.
- 6) Raber, G.T., Jensen, J.R. Schill, S.R. and Schuckman, K.: Creation of digital terrain models using an adaptive lidar vegetation point removal process, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 68(12), pp.1307-1315, 2002.

(2009.4.9受付)