

航空レーザ測量の利用技術に関する研究

【国土地理院】

G I S に用いられる基盤地図データの迅速な構築と修正に有用な技術として近年注目を集めている航空レーザ測量の精度検証を行うための手法を研究すると同時に、機器を検定するためのキャリブレーションサイトを構築した。

1. 概要

近年、従来のステレオペアの写真を図化するという写真測量に代わる手法として、航空機搭載型のレーザスキャナによる測量技術が注目を浴びている。これは、飛行機、ヘリコプター等に搭載されたレーザ測量機器で空中より地上に向けて照射されたレーザの反射時間を計測し、地上の標高を求めようとするもので、広範囲の標高データを迅速に計測することを可能とする(図59)。この航空レーザ測量は、民間の航測会社で積極的に導入が進められ、一部の公共測量等に利用され始めている。しかし、この技術は、レーザ光線の照射方法やスキャン方法が各メーカーごとに異なり、座標算出の方法がコンピュータによる自動計算のため、そのアルゴリズムもそれぞれに工夫が施されているため技術的に見えない部分も多く、その精度検証の手法も確立されていない。本研究では、この航空レーザ測量の有効性を確かめ、精度検証の方法について検討し、併せて機器検定のためのキャリブレーションサイトを構築した。

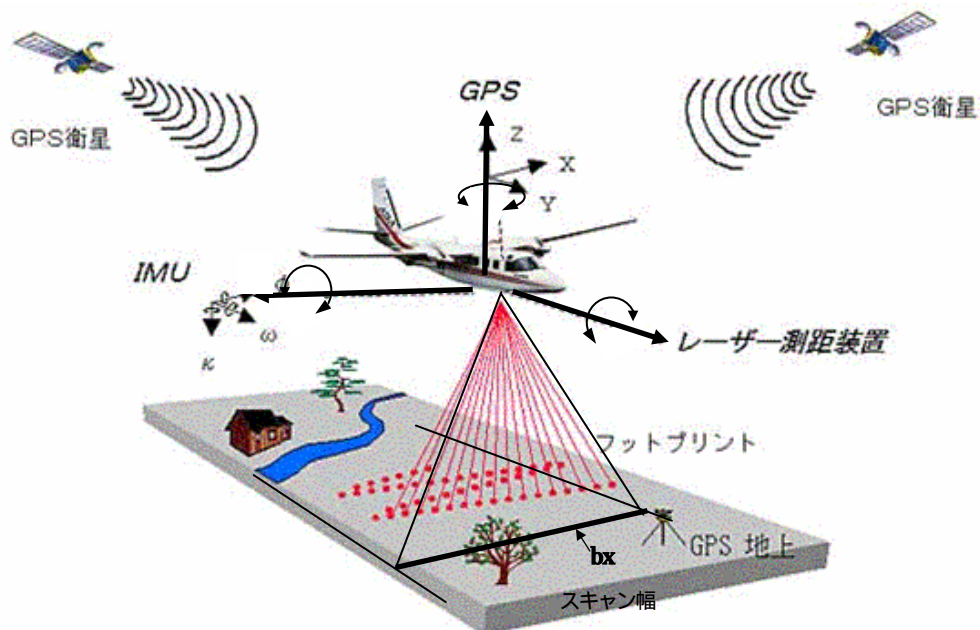


図59 航空レーザ測量の原理

2. キャリブレーションサイトの構築

航空レーザ測量による成果を利用するにあたっては、得られた成果の精度や品質を明らかにすることが必要不可欠である。しかし現在のところ、様々な試みはなされてはいるが、明確な手法が確立されているわけではない。しかし、一般の計測機器と同じように、あらかじめ計測された誤差データを使ったキャリブレーションを行うことにより系統的な誤差を消去し、より高品質の計測データを得ることは可能である。このため、航空レーザ測量用機器の誤差の消去に必要なデータを取得するためのキャリブレーションサイトを茨城県つくば市にある国土交通省国土技術政策総合研究所及び独立行政法人土木研究所（以下「国総研」という。）構内と財団法人シップアンドオーシャン財団（以下「SOF」という。）構内に構築した（図60）。

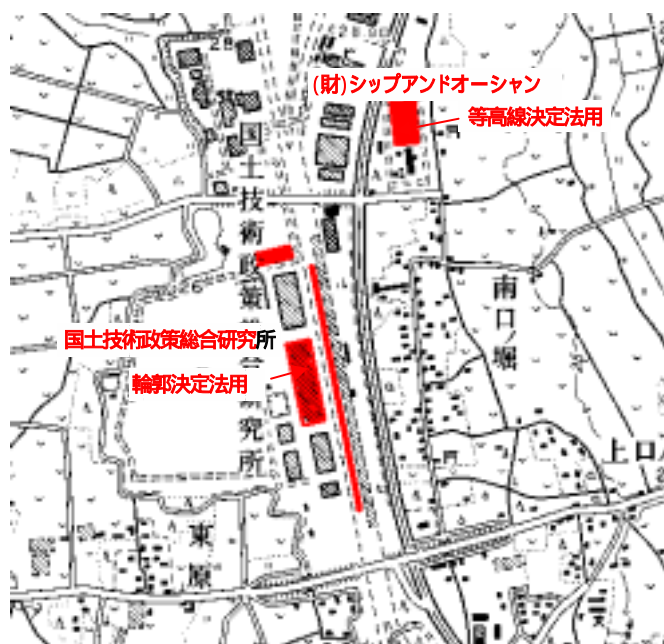


図60 キャリブレーションサイト

キャリブレーションサイトの構築にあたっては、「輪郭決定法」及び「等高線決定法」の二つの方法によるキャリブレーションデータが得られることを考慮した。「輪郭決定法」とは、大型建築物の輪郭の座標（座標とレーザ計測で得られた座標の差から誤差を求める方法である。この方法はヘリコプターなど比較的低速で飛行高度が低い場合には有効であるが、飛行高度が高く高速で移動する飛行機の場合、得られる計測点密度がまばらになり、建物の輪郭をヒットする確率が低くなるため、計測データとの誤差が大きくなり、キャリブレーションサイトとしては不適切となる。このため、フラットで大きな斜面を計測して得られた等高線から補正データを得る「等高線決定法」のサイトも併せて構築した（図61）。

「輪郭決定法」用として、国総研構内の屋根が平坦な建物を、「等高線決定法」としてSOF構内の切妻屋根の建物を選定し、それぞれの建物を構成する頂点の3次元座標を計測し、合計10点を基準点として構築した。また、国総研内のテニスコート及び構内の直線道路に、合計15点の補助基準点を構築した。

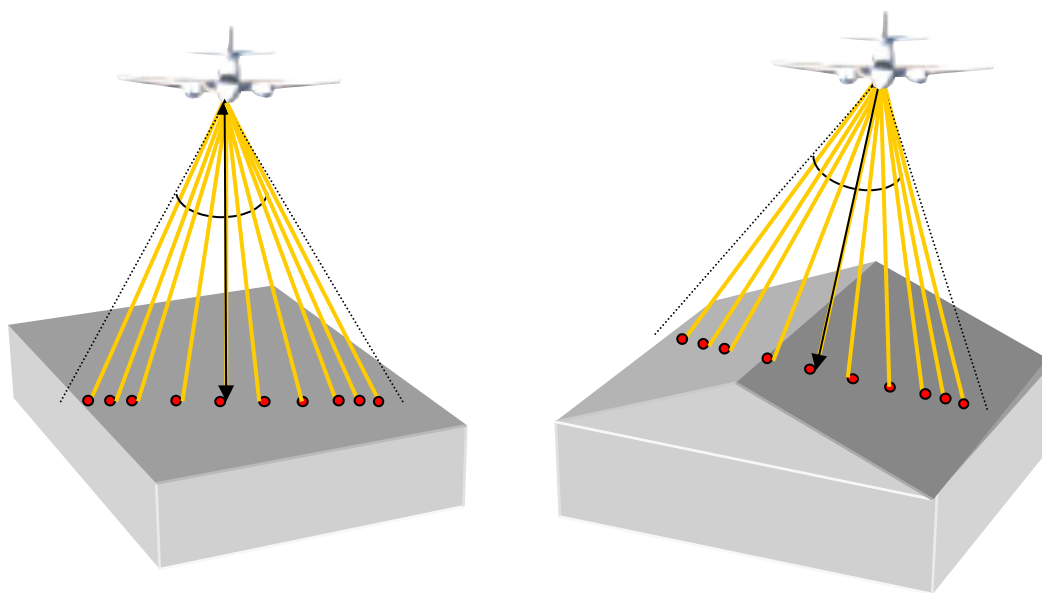


図6-1 キャリブレーションサイトに利用する建物の形状（左「輪郭決定法」、右「等高線決定法」）

3. ガイドラインの作成

航空機搭載型レーザスキャナのプラットフォーム（飛行機やヘリコプター）の位置や姿勢に対する補正はGPSやIMU等の誤差に起因するのでここでは取り扱わない。

今回構築したキャリブレーションサイトは、機器の微妙な傾き、すなわち機器が持っている3軸（ x 、 y 、 z ）の系統的な誤差を消去するためのものである。写真測量の標定要素の3軸の方向を示すのと同じように、機首が上下に振れる揺れ（ピッチング）の傾きを α 、機首が左右に振れる揺れ（ヘディングまたはヨーイング）の傾きを β 、機体が左右に揺れる（ローリング）方向の傾きを γ とし、その誤差を補正することとした。そのほかに、飛行方向と垂直に交わる方向、すなわちスキャン方向に発生する横縮尺の誤差 b_x の補正も行うこととした。

なお、キャリブレーションサイトの利用手順や方法を示した「キャリブレーションサイト利用のためのガイドライン」を作成した。

4. 航空レーザ機器のキャリブレーション

構築したキャリブレーションサイトを利用し、実際の航空レーザ機器のキャリブレーションを行う実証実験を平成13年11月11日及び13日に行った。GPS基準局として国土地理院の電子基準点のデータを使用し、また、IMUのデータを補正情報として使用した。計測の諸元を表3-2に示す。キャリブレーション項目は、ローリング、ピッチング、ヘディング及び横縮尺である。なお、計測結果については、輪郭決定法によるピッチングの補正と等高線決定法によるピッチングの補正を紹介する。

表3 2 航空レーザ測量キャリブレーションの計測の諸元

	輪郭決定法 (回転翼)				等高決定法 (固定翼想定)			
	ロール	ピッチ	ヘディング	横縮尺	ロール	ピッチ	ヘディング	横縮尺
パルス数	25000Hz	25000Hz	25000Hz	25000Hz	25000Hz	25000Hz	25000Hz	25000Hz
飛行高度	500m	500m	500m	500m	900m	900m	900m	900m
飛行速度	90km/h	90km/h	90km/h	90km/h	200km/h	200km/h	200km/h	200km/h
ビーム幅	0.2mrad	0.2mrad	0.2mrad	0.2mrad	0.2mrad	0.2mrad	0.2mrad	0.2mrad
スキャン角度	20°	10°	20°	30°	20°	10°	16°	20°
スキャン回数	50Hz	50Hz	10Hz	35Hz	50Hz	50Hz	50Hz	50Hz

(1) 輪郭決定法によるピッチングの補正

輪郭決定法によるピッチの補正をするために国総研構内の屋根が平坦な建物を図6 2のとおり計測した。建物の中央上空を飛行し、往復計測における建物のエッジでのずれの量を求める。

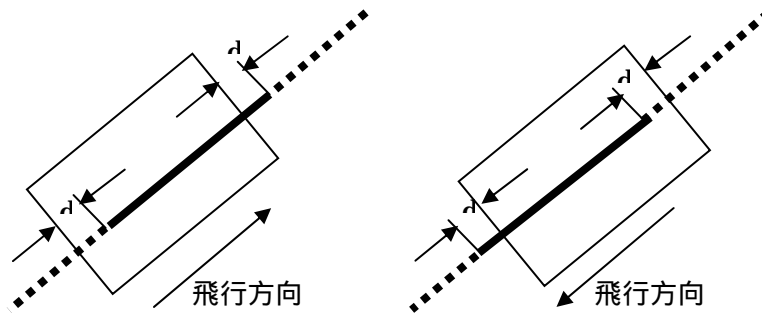


図6 2 輪郭決定法によるピッチの補正量算出

建物のエッジでのずれの量を算出する場合、スキャンの中心付近のデータを用いて計算する。これはスキャンの中心から外側に離れるにつれて横縮尺の影響を受けるためである。実測により求められた建物の角の座標を用いて、建物形状をポリゴン化し、建物のエッジでのデータの分布を図6 3に示す。

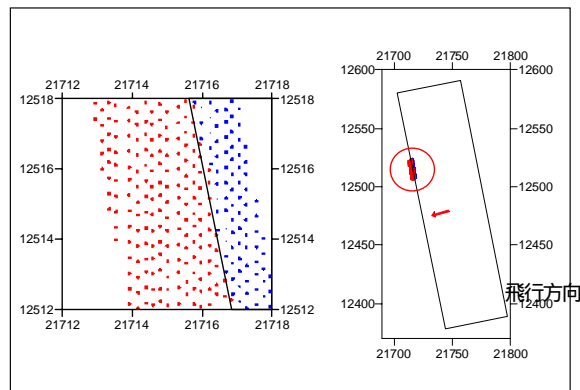


図6 3 ピッチング補正のための輪郭決定法での計測結果

図6 3の左側のデータプロット図は標高差により色分けをしている。地面に近いデータを赤色で表示し、建物の上面のデータは青色で表示した。建物エッジのポリゴンとレーザデータから想定されるエッジの較差は約10cmであった。同様に、コースC5に対するその他の3回分の計測に対して較差を求めたところ同程度であった。対地高度500m前後からの計測によるずれの較差から求められる補正量はわずかである。航空レーザ測量システムの水平精度が対地高度500mの場合 $\pm 0.25\text{m}$ であることから、結果は良好と言える。

(2) 等高線決定法によるピッチングの補正

等高線決定法によるピッチの補正をするために、SOF構内の切妻屋根の建物を図6 4のとおり計測した。建物の中央上空を飛行し、往復計測における建物のエッジでのずれの量を求めた。

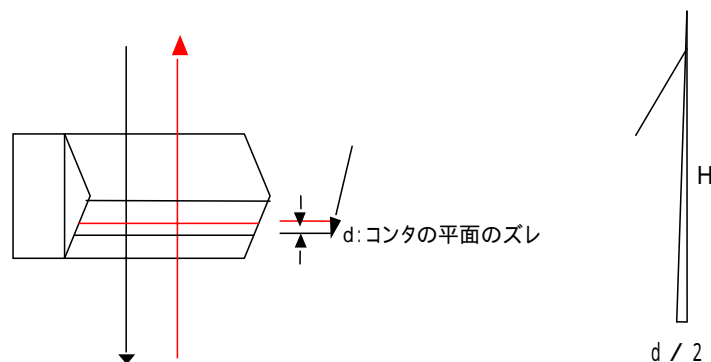


図6 4 等高線法によるピッチの補正

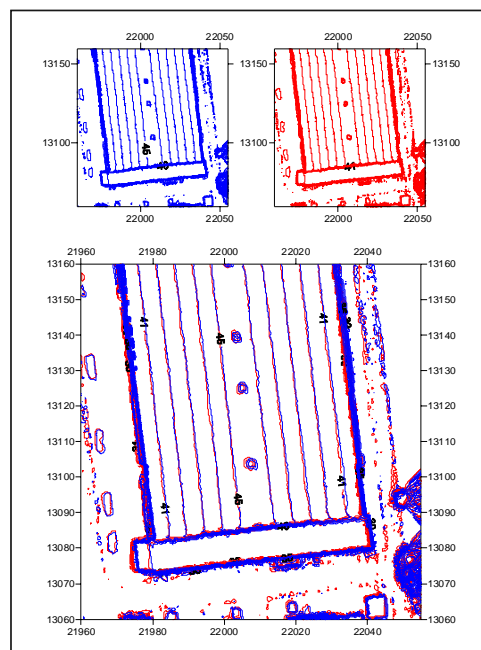


図6 5 ピッチング補正のための等高線法による計測結果

ビッチングの補正のため、キャリブレーションサイトの建物を計測した結果を図65に示した。左上側の等高線図が西から東に向かって計測した結果で、右側の等高線図が東から西に向かって計測した結果である。重ね合せた結果、東西方向に等高線のずれが見られないことがわかり、ビッチング方向の機器のひずみがわずかであるという結果を得られた。

5. 3次元データの作成と精度検証

平成13年11月、岐阜県大垣市の市街地を対象に航空レーザ測量による計測と精度検証を行った。計測方向は南北方向、計測範囲は大垣城跡周辺、約1.5km²の範囲(図66)である。計測した結果は、事前につくばのキャリブレーションサイトを計測して得られたパラメータを用いて補正を行った。



図66 航空レーザ測量計測範囲(大垣市街)

精度検証の方法について、水平位置は、航空写真測量で得られたデジタルマッピングデータ(DMデータ)の建物データの外形と今回計測したレーザ測量データから算出された家屋の外形とを比較した。高さ方向については、大垣市下水道台帳に記載されている直接水準測量による標高と今回計測したレーザ測量データから得られた標高を比較した(表33、表34、図67)。

この結果、水平位置精度については、DMデータとほぼ同じ家屋形状を得られたが、レーザデータの間隔が平均で50cmだったこともあり、微細な形状の再現はできていなかった。また、レーザ測量のDMデータに対するずれが常に東側方向であった。これは航空機に搭載したGPS/IMUの位置精度による誤差が現れたものではないかと推測される。また、高さ方向の精度については、概ね20cm前後の誤差であり、製品仕様の誤差とほぼ同レベルの誤差であったが、キャリブレーションを行ったにも関わらず、誤差が小さくならなかったのは、これもGPS/IMUの誤差に起因するものと思われる。

表 3 3 精度検証結果 (水平方向/一部の点)

	No. 5		No. 6		No. 7	
	X(m)	Y(m)	X(m)	Y(m)	X(m)	Y(m)
DM	-49933.50	-70910.28	-49929.68	-71145.68	-49751.88	-71178.22
レーザ	-49933.05	-70909.76	-49929.45	-71145.07	-49751.43	-71177.71
較差	0.45	0.52	0.23	0.61	0.45	0.51
大きさ	0.69		0.65		0.68	

表 3 4 精度検証結果 (鉛直方向/一部の点)

	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5
データ数(点)	25	29	29	32	29
最大値(m)	6.31	6.23	5.86	5.85	5.82
最小値(m)	6.08	6.09	5.66	5.61	5.60
平均(m)	6.18	6.16	5.77	5.72	5.69
水準・標高(m)	6.019	5.720	5.394	5.523	5.530
較差(m)	0.16	0.44	0.37	0.20	0.16

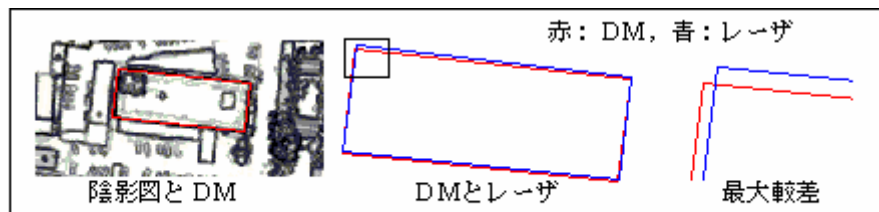


図 6 7 DMデータとレーザ測量の比較 (大垣市街)

6.3 3次元モデルの作成

今回、岐阜県大垣市において計測した航空機搭載型レーザスキャナの標高データ(3次元データ)を表示したのが図68で、地表面の緻密な標高データを取得し迅速に可視化することが可能である。また、得られた標高データとDMデータを組み合わせて、大垣市街の3次元空間モデルを作成したものが図69である。このように航空レーザ測量は、地図作成のための新しい測量技術として、また、3次元空間モデルの構築等、様々な応用分野への可能性が期待できる。

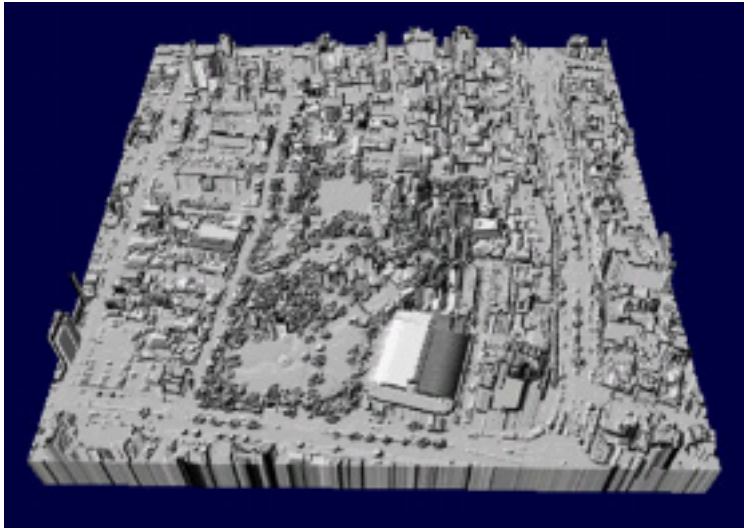


図6 8 航空レーザ測量結果の表示（大垣市街）

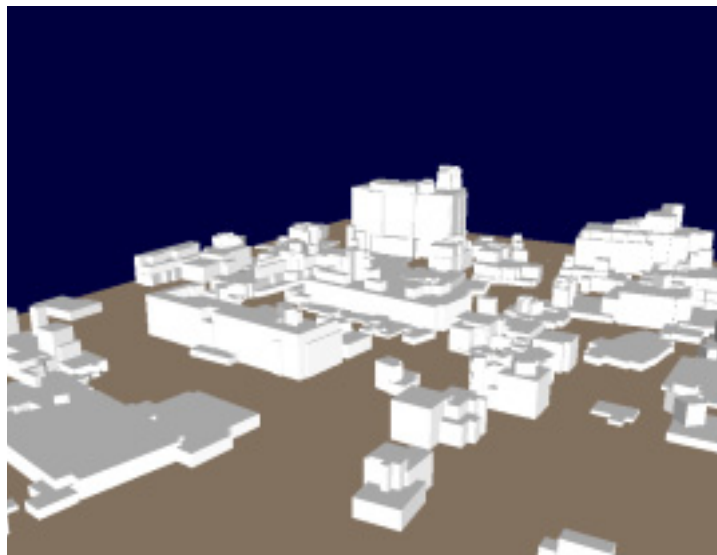


図6 9 3次元モデルの生成（大垣市街）

7．河川氾濫シミュレーション

大垣市は岐阜県西部に位置し、揖斐川が市の東側を流れ、市内には多くの中小河川・水路が張り巡らされた海拔3～4mの低地となっており、たびたびの水害に悩まされている。従って、水害に対する対策が行政の大きな役割のひとつとなっている。このため、実際の行政への適用を想定し、航空レーザ測量で得られたデータの利用例を示すということで、航空レーザ測量による3次元データの成果から、市街地における洪水状況を視覚化するシミュレーションを行った(図70)。洪水の水位を任意に設定することで、氾濫域や氾濫状況を推測することができ、水防計画や災害時の避難勧告等、防災関連の行政に役立つと言える。また、任意の視点からの鳥瞰により、より現実的なイメージで洪水の状況を捉えることができるので、より綿密な防災計画や災害対応の立案等、防災行政の高度化に寄与するものと期待できる。

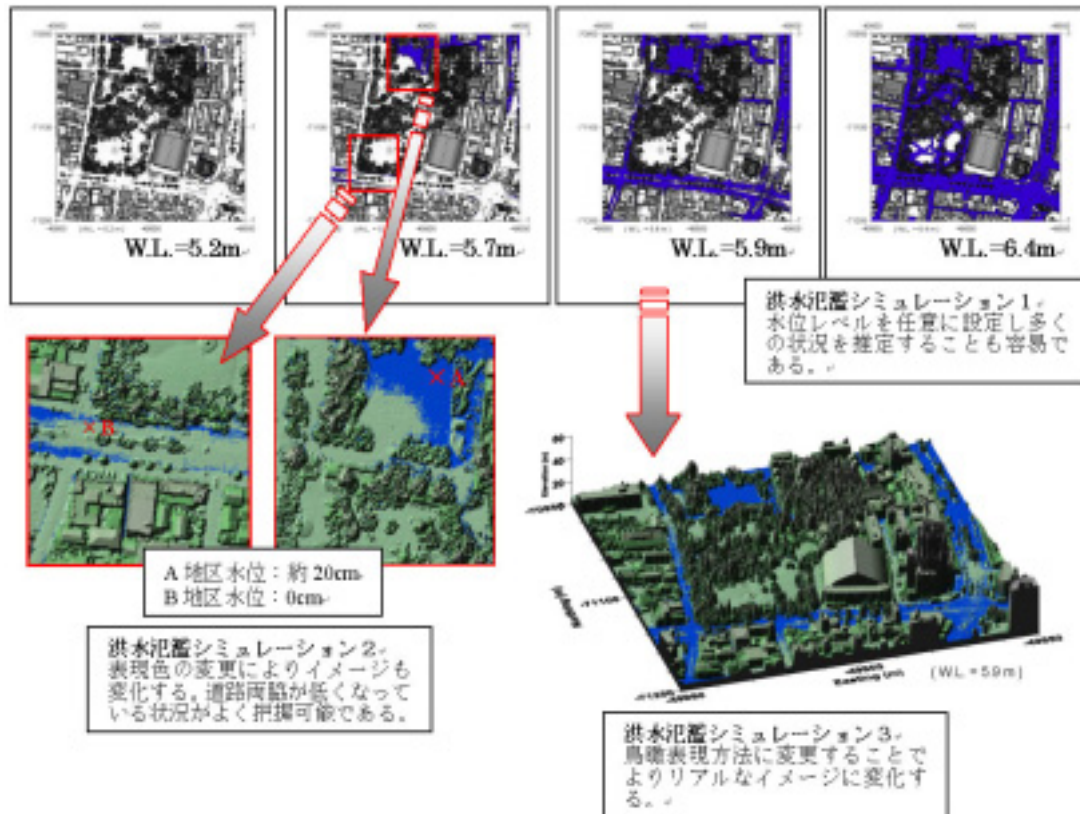


図70 河川氾濫シミュレーション（大垣市街）

8. 三次元地図データの品質に関する研究

計測時の各設定と現地の被覆などの条件及びデータの作成方法を記載することで後から成果の評定を行うことができるようにすることが望まれる。また利用者がどのような状況で作業が行われたか追跡し評価ができるようにしている。品質表示のラベルは直接関係する項目と間接的に関係する項目の2つのラベルを検討した（図71）。

<p>(表示ラベル1)</p> <p>品質表示例(直接関係する)</p> <p>発射周波数: PHz; 25000</p> <p>スキャン周波数 : SHz; 25</p> <p>スキャン角度 : SD; ±20°</p> <p>対地高度 : H; 1000m</p> <p>対地速度 : V; 230km/h</p> <p>拡散度 : r; 0.2mrad</p> <p>座標精度 : S; ±0.50m</p> <p>スキャン形状 : SS; パラレル、ジグザグ、サインカーブ</p> <p>ビードアップ : PD; 1, 2, 3, 4</p> <p>パルスモード : PM; F, 2, 3, 4, 5, L</p> <p>サイドラップ : SDL; 50% (100%)</p>	<p>(表示ラベル2)</p> <p>品質表示例(間接的に関係する)</p> <p>計測時期 : YMDT; 2003/03/14 12:00</p> <p>対象形状 : SHP; 都市域、平地、中山間、山地、急峻地、荒野</p> <p>基準局距離 : BMD; 22.2km</p> <p>オーバーラップ : OVL; 200% (100% = 1回)</p> <p>データの補完法 : Tin, Grid, Poly line, (他)</p> <p>データ密度(成果): 0.5・1・2・3・4・5・6・7・8・9・10m格子 (他)</p> <p>地名 : 岐阜県大垣地区</p> <p>場所 : Longitude、latitude or 測地成果2000 (XYH)</p> <p>(系, Max; 12345, -5432, Min; 10000, -6000)</p> <p>面積 : 10.00 km²</p> <p>発注機関 : 国土地理院 地図情報課</p> <p>受注機関 : 朝日航洋株式会社</p> <p>目的 : 三次元データ取得実験</p>
---	--

図71 品質表示ラベルの案

表示ラベル1は、機器及び設定値を記載したもので、基本的な機器の性能と計測時の設定条件を記すことで、記録された生データが持つ品質が推定可能となる。そうすることで、生データまで戻って必要な解析処理を行うことで別の手法による再利用などが行えるようになるものと考えている。(例；2mのデータを作成したが、生データは1m間隔であったので必要な部分を1mで作成する)

表示ラベル2はいつ・どこを・だれが・何のために・どのように・どうした、が分かるように記載したもので、これにより、作成されたデータの目的や範囲、性質がわかり実際の利用方法と、そのために必要な品質を評価することが可能となる。さらにラベル1と2により目的に応じた計測・解析はどの設定で行うべきかが明瞭化し、無駄なく作業が履行される。

9.まとめ

レーザ航空測量は、緻密な地表面の3次元空間データの取得に有効な手段であり、今後の測量分野での活用が期待される。また、得られた3次元情報を用いることにより、効率的に平面図や断面図さらに鳥瞰図や変化(量)図まで作成可能であり、建設行政業務の多くの分野で充分利活用が可能である。今回の機器のキャリブレーションサイトとキャリブレーション手法の構築、精度検証の結果から、新しい技術として極めて有効であると期待できる。