

津波浸水予測における航空機搭載型レーザーデータの適応性

村嶋陽一¹・今村文彦²・竹内 仁³・鈴木崇之⁴
吉田健一⁵・山崎正幸⁶・松田健也⁴

航空機に搭載したレーザープロファイラー (LiDAR) のデータを用いて格子間隔 5 m~40 m の地形モデルを作成し、数値解析による津波浸水予測結果を比較した事例を報告する。広域で高密度、高精度な LiDAR の計測データを用いた地形モデルは、数 m の起伏を表現でき、このことが市街地での津波による浸水範囲の予測結果に与える影響が大きいことが確かめられた。また、堤防・盛土などを考慮した津波浸水予測に適した詳細な地形モデルの作成手法と、防潮堤、堤防等の構造物の形状を表現した 5 m 格子の地形モデルを用い、陸地の開閉による浸水範囲への影響を検討した事例について報告する。

1. はじめに

津波等の浸水予測計算は実用的なレベルまで向上している中、地形データの地形近似精度が重要であることは認識されているものの、その精度・格子間隔の詳細な検討はなされてきていない。最近では浸水域だけでなく、浸水深、流速分布なども情報として提供されるようになってきており、用いた地形データでこのような結果が左右されることは大きな問題である。

一方、インド洋大津波にみられたように、人々の津波災害への知識不足が被害拡大の大きな要因となることが認識され、ハザードマップなどの情報の重要性が益々高まっている。ここでは、浸水範囲、津波被害の程度、避難場所・避難経路等の適切な避難行動を促す詳細な情報を提供する必要がある。

内閣府等(2004)が監修した津波・高潮ハザードマップマニュアルでは、12.5 m 程度の格子間隔による地形近似により正確に浸水予測でき、また、浸水予測される地域には、1 m より詳細な精度を確保した標高データ(地形データ)が必要であるとしている。このため、最新の 1/2,500 地形図の利用が示されているが、1/2,500 の地形図は、作成年が古いもの、等高線・標高値の精度、密度が不十分なものがあり、整備されていない自治体も多い。

また、国土地理院の 50 m メッシュ標高データ(以下 50 m メッシュデータ)は、安価で全国的な整備がなされており、津波浸水予測にもよく利用されている。このデータは 1/25,000 地形図をベースに作成され、海岸部のデータは海岸線(標高 0 m)から直線補間されているため、津波による浸水域となりやすい沿岸域では数 m の誤差が含有されている。このため、縮尺 1/10,000 程

度未満の地形図上で表現されるようなハザードマップのための津波浸水予測には適していない。

近年、航空機に搭載したレーザープロファイラー (LiDAR, Light Detection and Ranging) (以下 LiDAR) により、詳細地形モデル作成に十分な精度を持つ広範囲での標高の計測が可能となった。LiDAR は計測密度が高く、従来の地形図では把握できない微細な地形変化を計測できる。最近では、津波浸水予測などについても LiDAR を用いた詳細地形モデルが使用されつつある(今村ら, 2004; 椿ら, 2006; 岩手県, 2004)。

本研究では、津波浸水予測の地形データとして利用する観点から、LiDAR データの特性を整理し、LiDAR データからの地形モデルの作成方法例について述べる。また、岩手県宮古市田老地区の沿岸域において、LiDAR データおよび国土地理院 50 m メッシュデータを用い、格子間隔を 5 m~40 m に変えて行った数値解析による浸水予測結果を比較することにより、地形モデルの地形近似や浸水予測精度の向上についての検討を行い、LiDAR データの適応性と課題について述べる。

2. 航空機搭載型レーザーによる地形計測

LiDAR は、図-1 に示すように固定翼や回転翼などの航空機に搭載したレーザープロファイラーから、地上に向けてレーザーパルスを連続的に照射し、反射光を捕捉してその往復時間から距離を測定するシステムである。

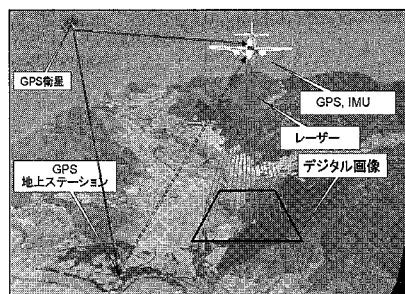


図-1 航空機搭載型レーザー (LiDAR) の計測イメージ

1 正会員 修(水) 国際航業株式会社
2 正会員 工博 東北大学教授 大学院附属災害制御研究センター
3 正会員 修(工) 国際航業株式会社
4 国際航業株式会社
5 正会員 岩手県河川課
6 宮古市危機管理室



図-2 地形モデル作成の流れ

レーザーパルスは航空機の進行方向に対して直角方向に振りながら 15,000~80,000 発/秒が照射される。地

上点での計測密度は平均 0.5~2 点/m²と従来手法に比べ格段に高い。航空機の位置は、GPS とそれを補完する IMU (慣性計測装置) により把握され、反射点はその距離と照射角度から航空機との相対位置による位置データ (x, y, z) を得る。LiDAR により計測された点群データは、計測時の航空機の高度や調整用基準点の状況等により異なるが、水平方向に ± 30 cm, 鉛直方向に ± 15 cm 程度であり、1/1,000 地形図に相当する精度を有する。

3. 地形モデルの作成

津波浸水予測に用いる地形モデルは、LiDAR の計測データから以下に述べる手法で作成した。本研究では LiDAR データの処理から数値解析、浸水予測図、CG の作成までを GIS 上で管理・解析し、これらの位置精度を一貫して保持するように努めた。

(1) DSM (Digital Surface Model) の作成

LiDAR データに含まれる、雲、空気中の塵、ビルでの乱反射などに起因するノイズを削除し、座標変換、精度検証を行う。この段階のデータは、樹木や構造物などの地物の反射点や地表面の高さを計測した DSM となる (図-2(a))。

(2) DEM (Digital Elevation Model) の作成

図-3 に示すように DSM には、建物や樹木などの地物の表層面上のデータが含まれている。LiDAR では 1 回のレーザ照射に対して、樹木や地表面など複数のパルスが得られる (航空レーザ測量ハンドブック, 2004)。また、計測点密度が高いことなどを利用して、データの統計的処理を行うことで、樹木が密生する海岸林などのエリアにおいても、ある程度自動的に樹木での反射点と地表面での反射点を区別し、地表面の高さを抽出できる。

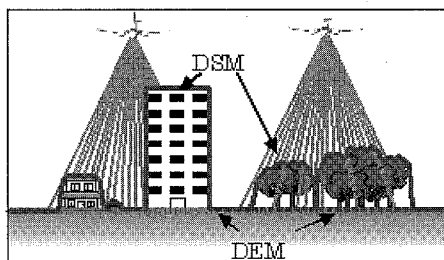


図-3 DSM と DEM

図-2(b)はフィルタリングにより建物・樹木等の地物表面上のデータ除去後のデータ、図-2(c)がフィルタリング後のデータを内挿して地表面の高さを作成したデータ (DEM) である。

図-2(a)では建物、樹木などの地物が確認できるのに対し、図-2(c)では地物の凹凸部がなくなり、地表面を

表しているデータとなっている。

このフィルタリング処理では、堤防や盛土なども削除される。

(3) 堤防・盛土の抽出、メッシュ化

堤防などの津波減災施設や盛土などの連続した地物は、津波氾濫の挙動への影響が大きい。これらの地物については、統計的処理のみでは区別できないため、本調査では写真画像、都市計画図等をGISで平面投影し、マニュアル処理によって、その部分のデータを再抽出した(図-2(d))。

メッシュ化はDEMと再抽出した堤防・盛土等のデータを合わせ(図-2(e)), TIN (Triangulated Irregular Network) を作成し、三角形平面から内挿してメッシュ中央点の値を求めた。

4. 津波浸水予測

地形モデルの違いによる浸水範囲の影響を比較するため、以下の条件の数値解析による津波浸水予測を行った。

波源は岩手県(2004)による明治三陸地震津波のパラメータを用い、非線形長波方程式を基礎式として、スタッガード格子を用いた leap-frog 差分法を用い、越流計算は本間公式(水理公式集, 1999)を用いた。

波源から遡上域までの計算領域を接続させ、計算格子間隔は波源から沿岸にかけて 3,240 m, 1,080 m, 360 m, 120 m, 40 m とした。

陸域部は、国土地理院 50m メッシュ標高データから作成した 40 m 格子地形モデルと、LiDAR データから作成した 40 m, 20 m, 10 m, 5 m 格子の地形モデルをそれぞれ最小格子間隔とした。

なお、本研究では、どのケースにおいても防潮堤の効果と同様に見込むため、天端高(T.P. = 10.0 m)をブレイクラインデータとしてモデルに組み入れた(図-5(a))。

計算時間間隔は最小格子が 40 m, 20 m の場合は 0.2 秒, 10 m の場合は 0.1 秒, 5 m の場合は 0.05 秒と差分スキームの安定条件を満足するよう行い、計算時間は第1波が到達し、第2波の到達する前までの地震発生時から 40 分間とした。

潮位は朔望平均満潮位とし、Manning の粗度係数 n は写真画像から 40 m 格子毎の土地利用を読み取り、小

表-1 Manning の粗度係数 n の設定

土地利用状況	n
海域・河川域	0.025
田畑域(荒地含む)	0.020
森林域(果樹園・防潮林を含む)	0.030
低密度居住区(建物密度 20%未満)	0.040
中密度居住区(建物密度 20~50%)	0.060
高密度居住区(建物密度 50%以上)	0.080

谷ら(1998)を参考に、表-1 のように設定した。

各計算結果による最小格子間隔の計算範囲内での津波水位変化を図-4 に示す。第1波の到達からほぼピークが終わるまではどのケースも同一の波形となっており、この間の陸域部での浸水範囲を比較する上で、ほぼ同一の条件であることが確かめられる。

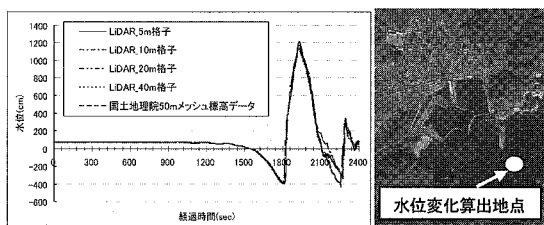


図-4 津波数値解析による水位変化

5. 結果

(1) 格子サイズによる地形近似度の変化

図-5(a)~(e)より、格子サイズの違いによる地形近似度の程度が分かる。40 m の格子モデルでも本領域の全体の傾向が表現できているように見られるが、堤防や盛土を表すためには 10 m 程度以下が必要である。この点は海域での防波堤に関しても言える。

格子サイズの違いによる地形近似度を定量的に調べるために、図-6 に示すように、代表的な断面を選んで比較した。図-6 の地形モデル断面図から、より明確な地形データの変化がわかる。まず、LiDAR データによる地形モデルと国土地理院 50 m メッシュデータの地形モデルを比較すると、標高値で数 m 以上の差があるエリアが広がり、国土地理院 50 m メッシュデータでは数 m の高さの凹凸も表現できていない。従って、浸水予測結果に大きな影響があることが容易に想像される。

次に、LiDAR データにおける格子サイズ変化による違いを見ると、防潮堤や高さ 1~2 m の微細な凹凸地形は大きく格子サイズに影響される。25~100 m 幅でみられる凹凸や山すその低地の地形近似は、格子サイズを 20 m 以上にすると再現性が低くなる傾向が読み取れる。

(2) 浸水予測結果

図-5(a)~(e)に示した浸水予測結果を比較する。国土地理院 50 m メッシュデータによる地形モデルでは、LiDAR による地形モデルと比べ浸水エリアが広く、市街地での浸水地域が異なることが分かる。標高値の精度上、微地形の凹凸の地形近似の再現性が浸水範囲の違いとなって現れている。このように浸水範囲の差異の大きなエリアでは、適切な津波来襲時の避難場所や避難路の検討は困難であり、また、ハザードマップとして公表する場合、危険性を誤って認識する可能性があるため留意

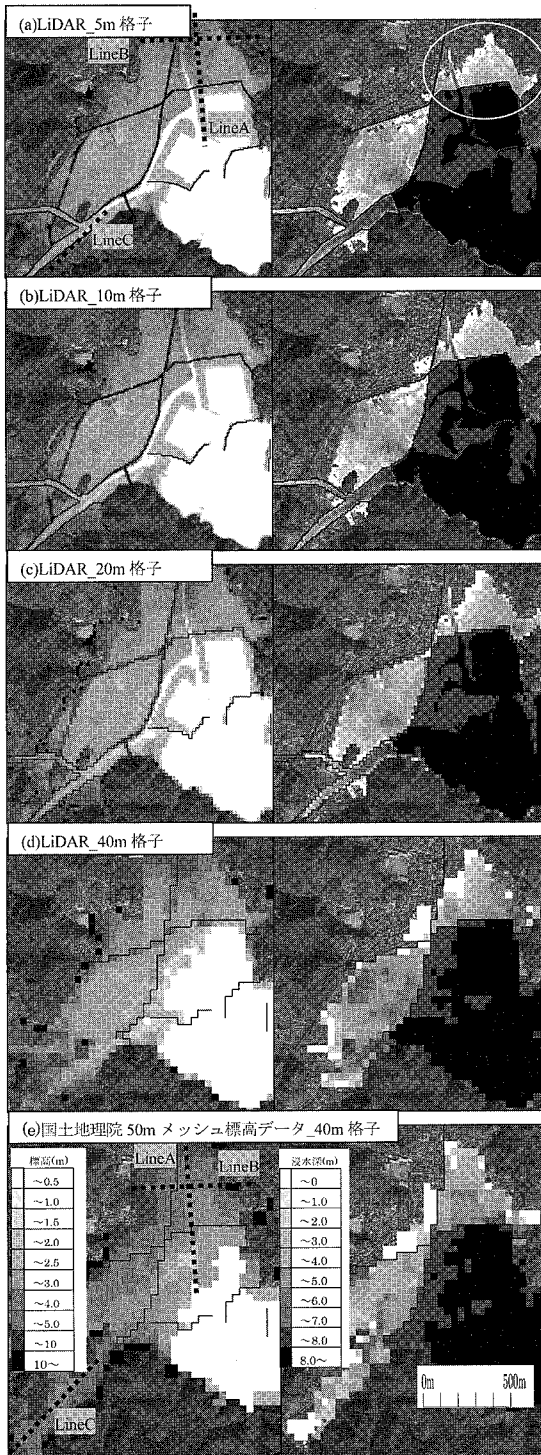


図-5 地形モデル(左)と数値解析による津波浸水分布(右)

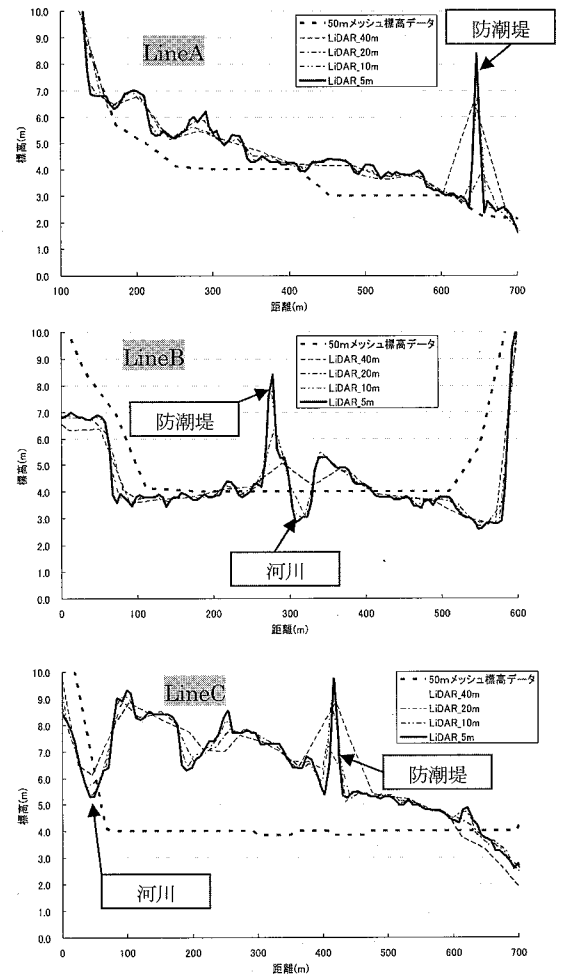
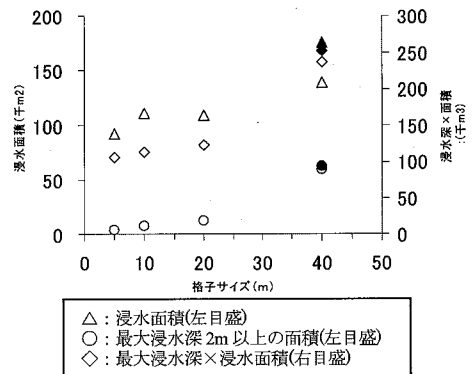


図-6 地形モデル断面図



注) 図-5(a)右図に示す範囲内での浸水面積・浸水深
(黒色は50mメッシュ標高データの地形モデルによる結果)

図-7 格子サイズによる浸水範囲の比較結果

が必要である。

次に、図-7において地形モデルによる防潮堤背後の市街地での浸水予測結果の比較を行った。格子サイズを小さくするにつれて、浸水面積も小さくなる傾向がある。比較を行った防潮堤背後の市街地では浸水深も小さくなり、最大浸水深が2m以上のエリアが浸水範囲全体に占める割合も30% (40m格子) から4% (5m格子) に大きく減少する (図-7)。これは、詳細な地形モデルほど、微細な凹凸により津波遡上が阻害され、氾濫水が窪地に早めに集積することなどによる。一方、大きな格子サイズでは津波遡上を阻害する凹凸が少なく、浸水範囲、最大浸水深が大きくなる傾向が見られる。

(3) 詳細地形モデルの津波減災施設の評価への活用

岩手県宮古市田老地区において、水門・陸開の閉鎖状況による効果を比較検証するため、数値解析を行った結果を図-8に示す。対象とした水門・陸開の幅は数m~10m程度であるので、5mメッシュ地形モデルを用い、水門・陸開部の開放条件を地盤高に戻すことにより表現した。この結果、陸開が開放されている場合には、閉められている場合 (図-5参照) に比べ、防潮堤背後の市街地の浸水範囲が2倍以上となる結果が得られ、水門閉鎖の重要性が示された。

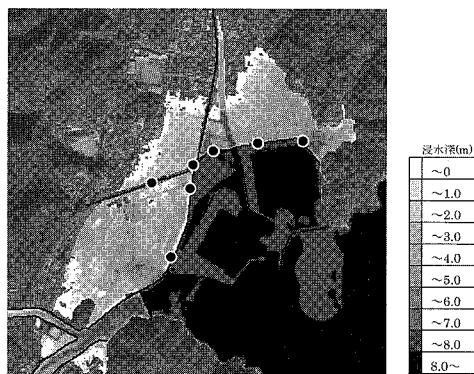


図-8 水門・陸開が開条件での津波浸水分布 (丸印は開放条件とした陸開箇所)

6. ま と め

(1) LiDAR データの地形モデルへの適応性

津波浸水予測に用いる地形モデルを作成する上で、LiDARによる計測データを使用することによる利点は、以下のようにまとめられる。

- ① 津波の浸水範囲・浸水深に影響の大きい微細地形を表現できる精度・計測密度を有する。
- ② 高密度な計測点から、樹木下の地形 (DEM) を抽

出することができる。

一方で、LiDAR計測データから津波浸水予測や津波対策施設の評価などの目的にあわせ、必要な格子サイズ、精度を持った地形モデルを作成する手法が重要となる。

また、LiDARは、

- ③ 広範囲な計測が短時間に実施できる (高い同時性)
- ④ 各計測点データが数値化されたGISデータであり、機械処理・可視化が容易 (大量データ処理)

といった特徴も有しており、精度よい地形モデルを効率的に作成することが可能である。

(2) LiDAR データを用いた数値解析

LiDARデータにより、対象地について詳細メッシュを用い、数mの起伏までを近似した地形モデルが作成できた。このLiDARデータを用いた5mメッシュ程度での津波数値解析は、市街地の起伏、堤防、盛土の効果を表現でき、浸水範囲の予測や危険箇所の把握、適切な避難場所の検討において有効であることが確かめられた。

また、水門・陸開などの津波減災施設の効果検証にも、LiDARデータを用いた詳細地形モデルを用いることで、対象施設を地形モデルに組み込んだ数値解析により比較検討することができ、その有効性が確かめられた。

7. お わ り に

謝辞：本研究の実施には、日本大学首藤伸夫教授および国際航業株式会社西岡陽一氏、小栗秀果氏に有益なご助言をいただいた。また、本研究は岩手県および宮古市 (旧田老町) での調査業務の検討結果を参考に、また、調査データの提供を受け実施しています。ここに記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 今村文彦・藤原誠・進藤一弥・市村強 (2004)：臨海都市域に襲来する津波の統合シミュレーション開発，海岸工学論文集，第51巻，pp. 291-295
- 岩手県 (2004)：岩手県地震・津波シミュレーション及び被害想定調査に関する報告書 (概要版)，164p
- 小谷美佐・今村文彦・首藤伸夫 (1998)：GISを利用した津波遡上計算と被害推定法，海岸工学論文集，第45巻，pp. 356-360
- 航空レーザ測量WG・(株)コクサイクリエティブセンター (2004)：航空レーザ測量ハンドブック，(財)日本測量調査技術協会，119p
- 椿涼太・藤田一郎・岡部健士 (2006)：航空レーザ測量を用いた高解像度非構造格子の自動生成と氾濫解析，土木学会論文集B, Vol.62, No.1, pp. 41-52
- 土木学会編 (1999)：水理公式集，p133
- 内閣府 (防災担当)・農林水産省農村振興局・農林水産省水産庁・国土交通省河川局・国土交通省道路局 (2004)：津波・高潮ハザードマップマニュアル，128p