航空レーザ測量を用いた東北地方太平洋沖地震 津波による地形変化の実態

諏訪 義雄¹・二階堂 竜司²・浜口 耕平¹・原野 崇¹・
渡辺 国広³・中園 大介²・原 文宏²・青木 伸一⁴

¹正会員 国土技術政策総合研究所 河川研究部 海岸研究室 (〒305-0804茨城県つくば市旭一番地)

E-mail : suwa-y22aa@nilim.go.jp, hamaguchi-k92ta@nilim.go.jp, harano-t92ta@nilim.go.jp

²正会員 (株)建設技術研究所 東京本社河川部海岸海洋室 (〒330-0071 埼玉県さいたま市浦和区上木崎1-14-6)

E-mail : nikaidou@ctie.co.jp, d-nakazono@ctie.co.jp, f-hara@ctie.co.jp

³正会員 国土技術政策総合研究所 企画部 企画課 (〒305-0804茨城県つくば市旭一番地)

E-mail : watanabe-k92tc@nilim.go.jp

⁴フェロー会員 大阪大学大学院教授 工学研究科 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

E-mail : aoki@civil.eng.osaka-u.ac.jp

本研究は、航空レーザ測量、空中写真等を用いて、2011年の東北地方太平洋沖地震津波による砂丘、盛土、丘および地盤等の侵食実態を分析したものである。対象地域は、青森県から千葉県津波浸水範囲内であり、各地点の地形変化状況を取りまとめることにより、地形の侵食量と津波外力の相関関係を算定した。また、特異な侵食が生じていた千葉県旭市の盛土を対象に、航空レーザ測量と空中写真による実態分析と津波シミュレーションによる侵食量の試算を行い、局所的な侵食の発生状況およびその要因の考察を行った。

Key Words : *topographic change, The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake Tsunami, aviation laser survey, numerical simulation*

1. はじめに

2011年の東北地方太平洋沖地震津波（以降では、2011年東北津波とする）では、東北地方の太平洋側を中心に甚大な被害が生じたなかで、砂丘・盛土は背後地の浸水深や家屋被害の低減、高台等の地物は緊急避難場所としての減災効果が確認された（例えば、二階堂ら¹⁾）。

しかし、津波の越流・浸水に伴い砂丘、盛土、丘および地盤等が侵食した地点もある。これらの地物を津波防災地域づくり等に役立てるためには、津波による地形の侵食実態を調査・把握したうえで事業を進める必要がある。

2011年東北津波による地形変化実態を調べた既往研究事例として、例えば、加藤ら²⁾はLPデータ・深浅測量から岩手県の高田海岸、越喜来海岸、両石漁港海岸、金浜海岸、大槌川河口の地形変化を調査した。しかし、これらはある地域に焦点を当てた調査であり、2011年東北津波の浸水地域を広域的に調査した事例はほとんどない。

本研究は、2011年東北津波で被害があった青森県から千葉県の広域を対象に、航空レーザ測量（LPデータ）、空中写真等を用いて、津波による砂丘、盛土、丘および

地盤等の地形変化を把握するとともに、外力との関係性を分析する。また、これらの事例のうち、特異な地形変化が生じた千葉県旭市の盛土について、航空レーザ測量等による実態把握と津波シミュレーションから地形変化に関する考察を行うものである。

2. 航空レーザ測量・空中写真による地形変化

2011年東北津波前後の航空レーザ測量と空中写真を用いて、津波による地形変化の把握を行うとともに、地形変化量と津波外力を対応させ、その関係性を分析する。

(1) 震災前後の地形変化

a) 対象地点

対象範囲は、2011年東北津波による影響を受けたと考えられる青森県から千葉県の沿岸とした。対象地点は、表-1のとおりであり、浸水区域内に含まれる砂丘、盛土・丘、樹林帯の地盤を対象とし、コンクリート等の人工物で被覆されていない計74地点を選定した。

表-1 対象地点の一覧 (計74 地点)

No	地域	緯度(°)	経度(°)	地形形状	越流	越流水深(m) ・浸水深(T.P.m)	植生	備考
1	青森県	40.84304	141.39798	盛土	有	0.17	樹木	
2		40.70863	141.42352	盛土	有	2.24	樹木	
3		40.62430	141.45331	盛土	有	0.22	樹木	
4		40.68154	141.47240	平坦	有	3.22	樹木	
5	岩手県	40.01336	141.89602	平坦	有	10.85	樹木	
6		39.94627	141.94119	平坦	有	10.09	樹木	
7		39.43874	141.97577	平坦	有	9.32	樹木	
8		39.14680	141.83607	平坦	有	14.66	樹木	
9	宮城県	39.03514	141.76876	平坦	有	10.74	樹木	
10		39.03212	141.73865	平坦	有	3.13	樹木	尾崎神社
11		39.9830	141.71490	平坦	有	9.70	樹木	
12		39.01177	141.64646	盛土	無	17.20	樹木	八坂神社
13	宮城県	39.00451	141.62992	平坦	有	9.25	樹木	高田松原
14		38.87015	141.58939	盛土	無	9.18	樹木	尾崎神社
15		38.84027	141.58711	盛土	無	7.02	樹木	熊野神社
16		38.83043	141.60090	盛土	無	10.95	樹木	琴平神社
17	宮城県	38.82898	141.58682	盛土	有	0.86	草本	
18		38.82442	141.57965	平坦	有	10.28	樹木	
19		38.81292	141.57145	盛土	無	14.28	樹木	
20		38.58104	141.46215	平坦	有	12.73	樹木	白浜海岸
21	宮城県	38.41524	141.35297	盛土	有	3.69	樹木	
22		38.41593	141.32965	平坦	有	4.01	樹木	街路樹
23		38.42251	141.30770	盛土	無	5.32	樹木	日和山公園
24		38.40317	141.23375	盛土	有	4.52	樹木	
25	宮城県	38.39495	141.21007	盛土	有	3.92	樹木	
26		38.38867	141.18680	盛土	有	2.80	樹木	
27		38.38457	141.17629	盛土	有	3.67	樹木	石上神社
28		38.37464	141.16513	盛土	無	8.50	樹木	
29	宮城県	38.36877	141.16110	平坦	有	6.06	樹木	
30		38.29105	141.08596	平坦	有	5.39	樹木	長須賀海岸
31		38.29031	141.02964	盛土	無	4.02	草本	
32		38.26151	141.01911	盛土	無	8.76	草本	
33	宮城県	38.24771	141.00127	盛土	有	3.54	草本	
34		38.24565	140.99175	平坦	有	2.85	樹木	屋敷林
35		38.21377	140.98067	平坦	有	5.26	樹木	
36		38.20334	140.97023	盛土	無	9.54	草本	冒険広場
37	宮城県	38.19960	140.96701	盛土	有	3.11	樹木	
38	宮城県	38.19665	140.96491	平坦	有	5.71	樹木	
39		38.18907	140.95880	平坦	有	3.84	樹木	
40		38.18622	140.95987	盛土	有	6.19	樹木	
41		38.17245	140.95385	盛土	有	1.37	草本	
42	宮城県	38.16814	140.95880	盛土	有	3.64	なし	
43		38.15902	140.95289	盛土	有	8.50	なし	
44		38.15637	140.95135	盛土	有	8.39	なし	
45		38.14792	140.94727	盛土	有	6.73	なし	
46	宮城県	38.13990	140.94388	盛土	有	7.97	なし	
47		38.12327	140.92618	平坦	有	3.06	樹木	
48		38.12025	140.92585	盛土	有	0.66	草本	
49		38.11710	140.93164	盛土	無	10.50	草本	
50	宮城県	38.10583	140.92281	盛土	無	5.60	草本	岩沼海浜緑地
51		38.08444	140.92391	盛土	有	2.86	樹木	
52		38.03306	140.89670	盛土	有	0.03	樹木	栗切公園
53		37.95685	140.91016	平坦	有	3.10	樹木	八重垣神社
54	宮城県	37.90804	140.92373	平坦	有	7.48	樹木	
55		37.89500	140.93032	盛土	有	1.49	樹木	
56		37.83518	140.95362	盛土	有	1.72	草本	相馬港新地緑地
57		37.80703	140.97234	盛土	無	10.00	樹木	塩釜神社
58	福島県	37.78807	140.96145	平坦	有	1.79	樹木	大塚福荷神社
59		37.05413	140.97338	盛土	有	5.09	なし	
60		37.05177	140.97286	平坦	有	4.57	樹木	
61		37.03996	140.97079	盛土	有	0.80	樹木	
62	福島県	36.91367	140.80515	盛土	無	2.88	樹木	八幡神社
63		36.35903	140.61743	平坦	有	0.05	樹木	
64		35.70226	140.71629	盛土	無	6.94	樹木	三峰神社
65		35.70255	140.70429	盛土	有	0.24	樹木	金比羅神社
66	千葉県	35.70117	140.69653	盛土	無	5.67	樹木	
67		35.69656	140.67992	盛土	有	0.87	樹木	
68		35.69057	140.65991	盛土	無	5.73	樹木	
69		35.68885	140.65454	盛土	無	6.10	草本	
70	千葉県	35.68238	140.63945	盛土	無	6.10	樹木	
71		35.68100	140.63866	平坦	有	2.08	草本	
72		35.67830	140.63289	盛土	無	6.10	樹木	
73		35.63549	140.56900	盛土	無	3.89	なし	
74	千葉県	35.58644	140.49531	平坦	有	1.42	樹木	三峯神社

b) 航空レーザ測定の使用データ

検討に使用した航空レーザ測定の格子間隔と取得時期は表-2 のとおりである。震災前の航空レーザ測量は国土地理院が取得した 3D 電子地図であり、震災後は国土地理院および各都道府県が取得したものである。また、これらの航空レーザ測量の高さの解像度は 0.1 m である。

c) 空中写真の使用データ

航空レーザ測量時(表-2)に取得された空中写真および Google earth の空中写真・衛星写真から、対象地点の震災前後の概況を把握するとともに、画像から植生の状況を樹木、草本、植生なしに判読・分類した。

d) 東北地方太平洋沖地震による広域地盤変動

震災後の航空レーザ測量は、東北地方太平洋沖地震による広域地盤変動を含んでいる。極力、津波による地形変化のみを把握するため、震災後の航空レーザ測量に国土地理院が示している東北地方太平洋沖地震の鉛直方向および水平方向の広域地盤変動を差し引いた。鉛直方向の地盤変動量は対象地点近傍の基準点の東北地方太平洋沖地震の変動量³⁾、水平方向の地盤変動量は対象地点近傍の電子基準点の変動量⁴⁾を用いた。対象地点(表-1)における鉛直方向の変動量は-0.77~0.00 m、水平方向の変動量は0.27~4.89 m の範囲であった。

表-2 使用した航空レーザ測定の格子間隔と取得時期

	震災前		震災後	
	格子間隔	取得時期	格子間隔	取得時期
青森県	2 m	2005	5 m	2012 年
岩手県	2 m	~2006 年	5 m	2011 年
宮城県	2 m	2005 年	2 m	2011 年
福島県	2 m	2005 年	2 m	2011 年
茨城県	2 m	2005 年	5 m	2011 年
千葉県	2 m	2005 年	5 m	2011 年

e) 地形変化

各地点の地形変化は、航空レーザ測量から震災前後の断面形状(震災後は地震による広域地盤変動を差し引く)を比較することで把握した。断面の測線の向きは、海岸線と概ね直角になるように設定した。図-1 に表-1 の No.13 (平坦形状)、表-1 の No.45 (盛土形状の越流あり)、表-1 の No.57 (盛土形状の越流なし) を例として、震災前後の空中写真および断面地形を示す。

No.13 は岩手県陸前高田市の高田松原である。津波により地盤が水面下まで侵食している場所も多く、水面上に残されている場所でも 3 m 程度の侵食が生じている。古川沼の背後の地形変化は、高田松原と比べると軽微である。No.45 は宮城県名取市の浜堤である。津波の越流水深は 6 m 程度であり、約 TP.+5 m の堤体は堤内地盤高相当(TP.+3 m 程度)まで侵食した。浜堤の裏法側の深掘は、越流後すぐに破堤には至らず越流が一定時間経過したことにより生じた可能性を示唆している。No.57 は、福島県相馬市の自然丘(高台)である。津波の越流は生じていないため、堤体法面の侵食に着目したところ、地形変化量はほとんど生じていなかった。津波の越流が生じなければ、堤体はほとんど侵食しなかった一例であるが、土質条件や植生等が影響し、侵食が軽微であった可能性もある。

(2) 2011 年東北津波の外力

対象地点の津波外力は、対象地点近傍にある東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ⁵⁾の浸水深(信頼度 A)を基本として用いた。越流水深は「津波水位-震災前の航空レーザ測量による天端高+地震による地盤変動量」、浸水深は「津波水位-震災前の航空レーザ測量によ

(a) 対象地点の震災前後の空中写真

(b) 対象地点の震災前後の地形断面

図-1 震災前後の空中写真と地形断面

る地盤高+地震による地盤変動量」より算定した。

(3) 地形変化と津波外力の関係

各地点の地形変化量と津波外力の関係は、図-2 のとおりであり、地形が平坦形状の場合は「浸水深」と「地盤の侵食高」の関係把握した。一方、地形が盛土形状においては、越流が生じた場合は「越流水深」と「堤体の侵食高」、越流が生じていない場合は「堤体が浸水した高さの比（浸水深÷堤体高）」と「堤体表側の平均侵食幅（表側の侵食断面積÷堤体高）」の関係を把握した。

これらの地形別・外力別の関係を図-3 に示す。なお、表-1 の地点における震災前後の航空レーザ測定の比較

では、土地の改変、がれき等の堆積、航空レーザ測定の精度などの影響により、地形が震災後に堆積となっている場合や異常値と思われる場合があったため、これらは津波による有意な地形変化を把握できないと判断し、図-3 から除外した。

図-3(a)の平坦形状および図-3(b)の盛土形状で越流が生じた場合では、浸水深・越流水深が大きくなるにつれ侵食量が増加する。盛土形状は越流に伴う高流速・負圧の発生等の影響で、平坦形状に比べ同様の越流水深・浸水深でも大きな侵食量となる。図-3(a)では浸水深が 10 m 程度、図-3(b)では越流水深が 7 m 程度を超えると急激に侵食量が増加する場合があった。図-3(b)の越流水深 8 m 程度において、侵食高にばらつきが生じる要因は詳細に把握できていないが、堤体幅、土質条件などの影響を受けている可能性がある。また、千葉県旭市の盛土は越流水深が小さいにも関わらず侵食量が多い特異な地点であったため、以降の 3. で侵食要因を分析する。

植生を有する地形は津波に対する耐侵食性を有すると考えられるため、植生ありと樹木の事例数が比較的多い図-3(b)について、最小二乗法（線形で地形変化が生じると仮定）による傾向の比較を行った。この結果、樹木の場合は植生なしの場合よりも侵食量が小さくなった。ただし、樹木の場合は越流水深が 7 m 程度を上回る地点が得られていないなど植生なしと同条件の比較ではないため、厳密な評価には至っておらず、植生の耐侵食性の評価は今後の課題といえる。なお、草本の場合は越流水深が大きい事例がないため最小二乗法による比較を行っていない。

また、図-3(c)の地形が盛土形状で越流が生じていない場合は、浸水深が堤体高に近くなるまで大きくなれば、平均的な表法面の侵食幅が大きくなる傾向にある。なお、これらの地点は植生で被覆されている地点である。最大で 2.5 m 程度の平均侵食幅となっている地点があるが、図-3(c)の黒色の破線部分は、浸水範囲外においても地形変化が生じているなど誤差を含んでいる可能性が高いと判断した地点である。例えば、図-4 の例では天端で 0.5 m 程度の地形変化量の誤差が確認できたため、他の地点においても数十 cm 程度の誤差は生じる恐れがあると考えられる。したがって、図-3(c)の黒色の破線地点を除外すると、全体として数 cm 程度の侵食幅であり、軽微な侵食になっている地点が多い。誤差の可能性があると判断した黒色の破線部分を含めた場合でも、最大で 2.5 m 程度の平均侵食幅である。このことから、津波は堤体の越流が生じなければ侵食量が軽微である可能性が示唆された。

ここで示した堤体の侵食高は堤体背後への越流量低減の観点から重要であり、堤体幅は越流が生じなかった場合にどの程度の法面侵食の生じる恐れがあるのかを把

図-2 地形・津波外力別の評価する侵食量

図-3 地形および津波外力別の侵食量

握する観点から重要と考えられる。なお、地形の侵食量は、最大値を示す考え方もあるが、本検討では平均値として整理を行っている。本検討は、堤体の詳細な植生状況、砂の締固まり状況、盛土の表側・裏側の水位差に伴う圧力差、堤体内の津波の浸透による影響等を考慮でき

図-4 震災前後の断面地形によるLPデータの誤差

ていない。加えて、選定した地点の代表性、津波以外の影響やデータの精度に伴う誤差等の影響があることを勘案すれば、本検討で示す侵食量は、最大値ではなく平均値とした方が適切と判断したためである。

本調査は航空レーザ測量を用いて広域の地形変化を把握したものであるが、個別の地点での詳細検討には至っていない。したがって、ここでの調査結果は2011年津波による被災地域において、その全体像の概略を把握するための検討として位置付けられる。

3. 千葉県旭市の盛土の地形変化

ここでは、2.において、特異な地形変化が確認された千葉県旭市の盛土を対象に、航空レーザ測量と空中写真からその侵食実態の詳細を把握するとともに、津波シミュレーションからその地形変化に関する考察を行う。

(1) 盛土の侵食実態

図-5は対象とする千葉県旭市の現地写真であり、海岸堤防の岸側に自転車道と植生で被覆された盛土があり、海岸には侵食対策として整備されたヘッドランドと小突堤(平面配置は図-6～図-8)が存在する。

図-6は2011年東北津波前後の空中写真であり、各地点で津波越流による盛土の侵食が確認できた。盛土の侵食形態は2通りであり、越流に伴い裏法側から侵食が生じた場合(図-6の左側の3地点)、盛土の開口部(アクセス路)を通過する津波により開口部の拡大が生じた場合(図-6の右側の1地点)があった。

なお、当地域近傍の津波水位は、東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ⁵⁾の浸水高(信頼度A)より、T.P.+4.8～8.7 m程度であった。盛土の天端高はT.P.+6 m程度であるため、最大で越流水深が2～3 m程度となる。

図-7は航空レーザ測量による震災前後の盛土の天端高および津波による侵食高である。空中写真(図-7)から顕著な侵食が確認された箇所は、最大で2 m程度の侵食高が生じていた。

(2) 津波シミュレーションによる侵食量の試算と考察

津波シミュレーションから盛土の侵食量の試算を行

図-5 対象地域および盛土の現地写真

図-6 空中写真による盛土の侵食状況

図-7 地盤高の平面分布(震災前)および震災前後の盛土の天端高・侵食高の沿岸方向分布

うとともに、その結果から当地域で生じた盛土の局所的な侵食要因の考察を行う。

a) 計算手法

津波の流動は平面二次元非線形長波理論、海域の砂の移動は高橋ら⁹⁾による方法を用いた。ただし、当地域の盛土は植生で被覆されているため、数式(1)の土木研究所⁷⁾の河川堤防の侵食深算定手法を津波に適用し、植生の耐侵食性を考慮した侵食深の算定を行った。この方法は、植生による根の耐侵食性が期待できる侵食深(以降では、侵食限界とする)までは、数式(1)の手法で侵食深を算定し、侵食深が侵食限界より大きくなると数式(2)による粘性土の侵食深の算定手法(土木研究所⁷⁾を参考に設定)で地形変化量を算定するものである。

また、土木研究所の侵食深の算定式は、平坦な水路を用いた実験から算定されたものであるが、現地地形のよ

うに起伏による影響は含まれていない。地形変化は、藤澤ら⁸⁾のように、地盤高が凸型となっている場合は角が取れるように侵食が進行し、凹型の場合は侵食が抑制されると考えられる。藤澤ら⁸⁾は、この現象の力学的な説明を行っていないが、負圧などによって侵食が進行する現象を表していると解釈される。本検討では、数式(3)のように侵食深を地形の曲率で補正することで、局所的な侵食を表現することとした。

$$\frac{dz}{dt} = \frac{cu_*}{\ln 10} \exp\left(-\frac{\ln 10}{cu_*} z\right) \quad (1)$$

$$\frac{dz}{dt} = \gamma u_* \quad (2)$$

$$z_\beta = z \cdot \left\{ \exp\left(-\beta \cdot \frac{\partial^2 h}{\partial x^2}\right) + \exp\left(-\beta \cdot \frac{\partial^2 h}{\partial y^2}\right) \right\} \times 0.5 \quad (3)$$

ここで、 t :時間(min), x, y :水平の計算軸, z :曲率による補正前の侵食深(cm), z_β :曲率による補正後の侵食深(cm), u_* :摩擦速度(m/s), α :植生の耐侵食性を表す係数(-50 $\sigma_0 + 9 = -0.18F + 14.5$), σ_0 :平均根毛量(gf/cm³), F :細粒分の割合(%), β :曲率に関する補正係数, h :地盤高, γ :粘性土の耐侵食性を表す係数である。

b) 計算条件

シミュレーションの検討条件を表-3に示す。計算ケースは、数式(3)の曲率による補正を考慮する場合($\beta=25$)・しない場合($\beta=0$)の2通りを検討した。

c) 計算結果

盛土の震災後の天端高と天端の侵食高について、航空レーザ測量による実測と計算結果の比較を図-8に示す。曲率による補正を考慮した場合の計算は、実測の侵食高の傾向が概ね一致している。細部の再現性には課題があるものの、局所的な侵食高を表現する1つの手法として、本検討で用いた曲率による補正が有効である可能性を示唆できた。本計算結果を踏まえ、現地で生じた盛土の局所的な侵食の1つの要因として、場所により盛土形状の違い(計算では曲率により表現)が影響した可能性があると考えられた。

ただし、本計算は堤体の植生・土質条件を仮定してい

表-3 計算条件一覧

項目	設定	備考
対象津波	2011年東北津波(内閣府モデルのすべり量1.3倍)	相田 ⁹⁾ の幾何平均 $K=1.03$, 幾何標準偏差 $\kappa=1.37$
潮位	T.P.-0.19 m	最大波到達時の銚子の天文潮位
格子間隔	2700~5 m までの7領域	ネスティング
時間間隔	0.1 s	CFL条件より設定
粗度係数	土地利用に応じて設定	
侵食限界	2 cm	土木研究所 ⁷⁾ を参考
係数 α	15 (現地盛土の細粒分 F が約 4% のため, $-0.18F+14.5 \approx 15$ と仮定)	土木研究所 ⁷⁾ の細粒分 40% 以上の場合を拡大適用
係数 γ	20	試行計算より侵食量を再現できる係数とした
係数 β	25	
粒径	0.17 mm (中央粒径)	2015年の底質調査結果
砂の密度	2600 kg/m ³	想定値
構造物	破壊しない

図-8 盛土における侵食高・天端高の実測・計算の比較

るうえ、侵食深の予測手法の妥当性に関して課題が残る。したがって、ここでの計算は、盛土の局所的な侵食を試算するために実施した概略の計算であり、今後の知見から計算手法の妥当性の検証および改良が望まれる。

4. おわりに

本研究では、青森県から千葉県の広域を対象として、航空レーザ測量等から 2011 年東北津波による地形変化実態を把握した。また、特異な地形変化が生じていた千葉県旭市の盛土について、その詳細を調べるため、航空レーザ測量・空中写真による地形変化量を算定するとともに、数値シミュレーションによる侵食高の試算を行った。以下に主な結論を示す。

- (1) 青森県から千葉県の広域の地形変化分析では、津波外力と地形変化量の関係より、浸水深・越流水深の増大に伴い、侵食量が増大する傾向にあることを定量的に示した。また、堤体は越流が生じなければ、表表面の侵食は軽微な事例が多く見られた。
- (2) 千葉県旭市の盛土は、航空レーザ測量、空中写真より

盛土の局所的な侵食の発生を把握した。また、数値シミュレーションでは、地形の曲率を考慮した侵食深算定手法とすることで、現地地形変化の再現性が向上した。

謝辞：本研究を実施するにあたり、国土地理院から航空レーザ測量および空中写真を提供頂いた。また、千葉県からは津波シミュレーションに関する基礎データを提供頂いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 二階堂竜司, 渡辺国広, 伊藤幸義, 諏訪義雄, 青木伸一：津波減災効果を期待できる自然・地域インフラの分類と事例分析, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.71, No.2, I_659-I_664, 2015.
- 2) 加藤史訓, 野口賢二, 諏訪義雄, 坂上敏彦, 佐藤祥昭：津波による地形変化に関する現地調査, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.68, No.2, I_174-I_179, 2012.
- 3) 国土地理院：地理院地図, 東北地方太平洋沖地震の地殻変動量, 参照 2014-11-18.
<http://www.gsi.go.jp/chibankansi/chikakukansi40005.html>
- 4) 国土地理院：GPS 連続観測から得られた電子基準点の地殻変動, 参照 2014-11-18.
<http://www.gsi.go.jp/chibankansi/chikakukansi40005.html>
- 5) 東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ,
<http://www.coastal.jp/tjtj/>, 参照 2014-11-5.
- 6) 高橋智幸, 黒川貴博, 藤田将孝, 島田広昭：津波による土砂移動の粒径依存性に関する水理実験, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.67, No.2, I_231-I_235, 2011.
- 7) 建設省土木研究所河川部河川研究室：洪水流を受けた時の多自然型河岸防御工・粘性土・植生の挙動—洪水に対する安定性・耐侵食性を判断するために—, 土木研究所資料第 3489 号, pp.101-111,142-158,175,176, 1997.
- 8) 藤澤和謙, 村上章, 西村伸一：越流によるため池侵食に関する安定化数値解析, 農業農村工学会誌, 第 79 巻, 第 8 号, pp.23-26, 2011.
- 9) 相田勇：三陸沖の古い津波のシミュレーション, 地震研究所彙報, Vol.52, pp.71-101, 1977.

(2016.2.4 受付)

ANALYSIS OF TOPOGRAPHIC CHANGE USING AVIATION LASER SURVEY DUE TO THE 2011 TOHOKU TSUNAMI

Yoshio SUWA, Ryuji NIKAIIDO, Kohei HAMAGUCHI, Takashi HARANO, Kunihiro WATANABE, Daisuke NAKAZONO, Fumihiro HARA and Shin-ichi AOKI

This study analyzed topographic change using aviation laser survey and aerial photography due to the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake Tsunami. The study area was from Aomori to Chiba prefectures in the tsunami inundation zone. The results suggested the relationship between the amount of erosion and tsunami height. Besides, the fill in Asahi city, Chiba prefecture, was eroded locally by the tsunami. The factor was investigated by topographic analysis using aviation laser survey, aerial photography and numerical simulation.