津波堆積物に基づく津波波源推定手法の開発

平成２６年３月

関西大学

津波堆積物に基づく津波波源推定手法の開発

目　次

１．序論 ･･ 1-1

　1.1 研究の背景と目的 ･･ 1-1

　1.2 研究内容 ･･･ 1-1

　1.3 研究実施体制 ･･･ 1-3

２．宮城県仙台湾における津波堆積物調査 ･････････････････････････････ 2-1

　2.1　調査概要 ･･ 2-1

　2.2　調査結果 ･･ 2-5

　2.3　分析結果 ･･ 2-18

　参考文献 ･･･ 2-19

３．千葉県銚子市における津波堆積物調査 ･････････････････････････････ 3-1

　3.1　調査概要 ･･ 3-1

　3.2　調査結果 ･･ 3-4

　3.3　年代測定結果 ･･ 3-13

４．気仙沼湾における地形変化と堆積物に関する現地調査 ･･････････････････ 4-1

　4.1　はじめに ･･ 4-1

　4.2　地形変化に関する現地調査 ･････････････････････････････････ 4-1

　4.3　堆積物に関する現地調査 ･･･････････････････････････････････ 4-11

　参考資料 ･･･ 4-18

　参考文献 ･･･ 4-23

５．大分県佐伯市竜宮鼻における陸上堆積物掘削調査 ･････････････････････ 5-1

　5.1　調査概要 ･･ 5-1

　5.2　調査結果 ･･ 5-6

　5.3　分析結果 ･･ 5-8

　参考文献 ･･･ 5-9

６．宮崎県串間市における古津波堆積物の年代測定結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・6-1
6.1　調査概要・・・6-1
6.2　分析結果・・・6-3
参考文献・・6-4

７．高知県須崎市および土佐市宇佐町，愛媛県八幡浜市竜王池における津波堆積物に関する現地調査・・7-1
7.1　須崎市における調査概要・・・7-1
7.2　須崎市における調査結果・・・7-6
7.3　須崎市における分析結果・・・7-8
7.4　土佐市宇佐町における調査概要・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・7-9
7.5　土佐市宇佐町における調査結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・7-13
7.6　土佐市宇佐町における分析結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・7-14
7.7　八幡浜市竜王池における調査概要・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・7-14
7.8　八幡浜市竜王池における調査結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・7-16
7.9　八幡浜市竜王池における分析結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・7-17
7.10　X 線分析装置の利活用可能性と沿岸部調査結果（大分，高知，千葉）・7-19
参考文献・・7-28

８．タイ南西部での津波堆積物の保存率調査・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・8-1
8.1　はじめに・・・8-1
8.2　調査結果・・・8-2
8.3　おわりに・・・8-3

９．遡上に伴う津波堆積物に関する水理実験・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・9-1
9.1　はじめに・・・9-1
9.2　津波堆積物実験水路の製作・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・9-1
9.3　実験条件・・・9-6
9.4　おわりに・・・9-7
参考文献・・9-7

１０．湖沼突入に伴う津波の流況に関する水理実験 ························ 10-1
10.1　はじめに ··· 10-1
10.2　水理実験 ··· 10-3
10.3　水理実験結果 ··· 10-5
10.4　おわりに ··· 10-21
参考文献 ··· 10-21

１１．津波移動床モデルの再現性の検討と改良 ························ 11-1
11.1　はじめに ··· 11-1
11.2　津波移動床モデルの再現性向上のための因子の抽出と改良 ·········· 11-2
11.3　おわりに ··· 11-10
参考文献 ··· 11-10

１２．結論 ··· 12-1

付録１．発表論文リスト ······································· 付 1-1

付録２．土砂移動・堆積コード ································· 付 2-1

１．序論

1.1 研究の背景と目的

原子力発電所を対象とした確率論的津波ハザード評価に必要となる過去の津波発生に係るデータ（津波規模，繰り返し周期）を拡充するために，津波堆積物の情報に基づいて津波波源を推定する手法の開発が必要である．そのために，今年度は，津波堆積物に係る現地調査，津波による土砂移動および土砂堆積に係る水理実験，津波による土砂移動を再現するためのモデルの構築および解析コードの改良を目的とした．

1.2 研究内容

津波堆積物に基づく津波波源推定手法の開発を行うために，以下の研究を実施した．

(1)仙台湾における津波堆積物調査（第２章）
(2)葉県銚子市における津波堆積物調査（第３章）
(3)気仙沼湾における地形変化と堆積物に関する現地調査（第４章）
(4)大分県佐伯市竜宮鼻における陸上堆積物掘削調査（第５章）
(5)宮崎県串間市における古津波堆積物の年代測定結果（第６章）
(6)高知県須崎市および土佐市宇佐町，愛媛県八幡浜市竜王池における津波堆積物に関する現地調査（第７章）
(7)タイ南西部での津波堆積物の保存率調査（第８章）
(8)遡上に伴う津波堆積物に関する水理実験（第９章）
(9)湖沼突入に伴う津波堆積物に関する水理実験（第１０章）
(10)津波移動床モデルの再現性の検討と改良（第１１章）

1.3 研究実施体制

本業務での研究実施体制および役割分担，業務構成を以下に示す．本業務では現地調査，水理実験，数値解析が主な研究手法となるため，それぞれの研究手法でグループを構成している．

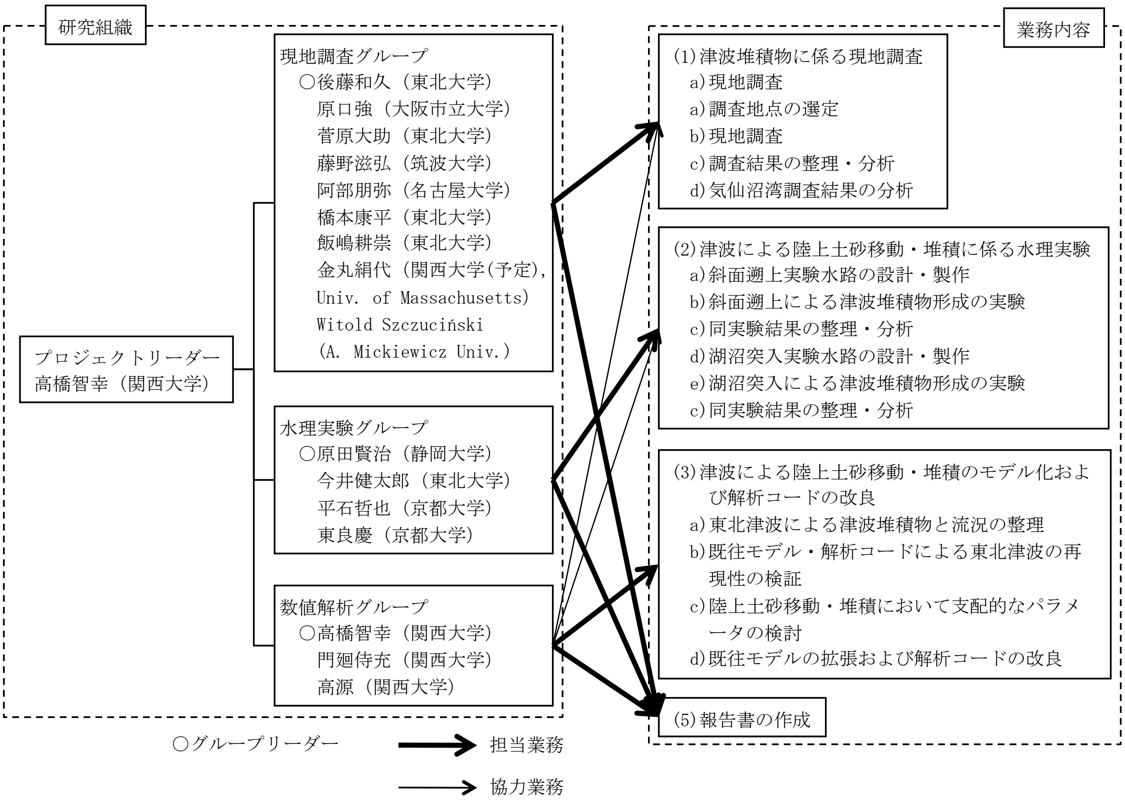


図 1-1　研究組織と担当

表 1-1　研究メンバーと担当

当該業務における担当業務	氏　　名	所属・役職
・プロジェクトリーダー ・津波による陸上土砂移動・堆積のモデル化および解析コードの改良 ・報告書の作成	高橋　智幸	関西大学社会安全学部・教授
・津波堆積物に係る現地調査 ・報告書の作成	後藤　和久	東北大学災害科学国際研究所・准教授
・津波堆積物に係る現地調査	原口　強	大阪市立大学大学院理学研究

・報告書の作成		科・准教授
・津波による陸上土砂移動・堆積に係る水理実験 ・報告書の作成	原田　賢治	静岡大学大学院・准教授
・津波堆積物に係る現地調査 ・報告書の作成	菅原　大助	東北大学災害科学国際研究所・助教
・津波堆積物に係る現地調査 ・報告書の作成	藤野　滋弘	筑波大学大学院生命環境科学研究科・助教
・津波による陸上土砂移動・堆積に係る水理実験 ・報告書の作成	今井　健太郎	東北大学災害科学国際研究所・助教
・津波による陸上土砂移動・堆積に係る水理実験	平石　哲也	京都大学防災研究所・教授
・津波による陸上土砂移動・堆積に係る水理実験	東　良慶	京都大学防災研究所・助教
・津波堆積物に係る現地調査	阿部　朋弥	名古屋大学大学院理学研究科・博士課程（前期課程）２年次
・津波堆積物に係る現地調査	橋本　康平	東北大学大学院工学研究科・博士課程前期２年次
・津波堆積物に係る現地調査	飯嶋　耕崇	東北大学大学院理学研究科・博士課程前期２年次
・津波による陸上土砂移動・堆積のモデル化および解析コードの改良	門廻　侍充	関西大学大学院社会安全研究科・博士課程前期課程２年次
・津波による陸上土砂移動・堆積のモデル化および解析コードの改良	高　源	関西大学大学院社会安全研究科・博士課程前期課程１年次
・津波堆積物に係る現地調査	Witold Szczuciński	Institute of Geology, Adam Mickiewicz University
・津波堆積物に係る現地調査	金丸　絹代	University of Massachusetts, 関西大学特別任用研究員

２．宮城県仙台湾における津波堆積物調査

2.1 調査概要

2011 年東北地方太平洋沖地震津波により，仙台湾沿岸では大規模な土砂の移動に伴う砂浜の浸食や内陸部での砂泥の堆積が生じた．特に仙台湾南部では砂浜の浸食が顕著であり，防潮堤の崩壊により海水と共に土砂が沖側に流出して円弧状の浸食地形を生じるなど，土砂移動の影響が見られた．当海域では津波に前後して継続的な深浅測量が行われており，データの解析により，津波による浸食・堆積を示すと思われる水深の変化が確認されている（有働ほか，2013）．そこで，津波堆積物の有無，存在する場合にはその厚さや性状を確認し，供給源と堆積過程を分析するため，深浅測量データが示す堆積域で柱状採泥を行った．

採泥作業は日本ミクニヤ株式会社に委託し，2013 年 7 月 17 日～18 日に実施した（図 1～5）．掘削地点の位置は表 1 の通りである．作業の詳細は別添の調査報告書に記載されている．

表 1：仙台湾南部浅海域における堆積物調査地点.

地点名	緯度	経度	水深(T.P.)	摘要
St.1	N　37°58’33.420”	E 140°55’ 7.278”	8.9m	採取長 1.15m
St.2	N　37°58’33.940”	E 140°55’11.441”	10.4m	採取長 1.05m
St.3	N　37°58’34.240”	E 140°55’19.392”	14.8m	採取長 1.20m
St.4	N　37°58’ 8.417”	E 140°55’12.800”	11.1m	採取長 0.92m
St.5	N　37°57’43.856”	E 140°55’15.043”	11.0m	採取長 1.01m
St.6	N　37°56’52.632”	E 140°55’22.122”	9.1m	採取長 1.15m
St.7	N　37°55’40.802”	E 140°55’25.251”	7.3m	採取長 1.25m
St.8	N　37°55’42.558”	E 140°55’42.008”	9.3m	採取長 1.20m
St.9	N　37°55’43.658”	E 140°55’52.398”	11.1m	採取長 1.65m
St.10	N　37°55’44.621”	E 140°56’ 2.718”	12.3m	採取長 1.85m

図１：堆積物調査地点の位置.

図２：潜水作業の状況.

図 3：バイブロコアラー・コアチューブ投入作業の状況.

図 4：コアチューブ引き揚げ作業の状況.

図 5：コアチューブに回収された土砂サンプル.

2.2 調査結果

採取した柱状試料を実験室内で肉眼により観察し，堆積物の厚さと構造の記載を行った．以下，深度は海底面と推定される採取試料最上部からの値である．

St.1（図 6）

深度 0－34cm は，平行または斜交葉理を示す中粒～粗粒砂からなる．深度 34－50cm は，わずかに平行葉理を示す塊状の中～粗粒砂からなる．深度 50－85cm は，平行葉理を示し，基底部は粗粒砂で上位に向かって細粒化する．深度 85cm 以下は塊状の極細粒砂であり，上位の粗粒砂層との境界は明瞭であった．

St.2（図 7）

深度 0－10cm は塊状の極細粒砂層であった．深度 10－30cm は中粒～細粒砂層であり，下位から上位に向かって細粒化していた．上位 10cm には斜交葉理が見られた．深度 30－87cm は粗粒砂からなり，上位 10－20cm は極粗粒砂への上方粗粒化が認められ，また貝殻片が大量に含まれていた．最下部の 3cm 程は，細粒～中粒砂との互層となっていた．深度 87cm 以下は塊状の極細粒砂層で，上位の粗粒砂層との境界は明瞭であった．

St.3（図 8）

深度 0－13cm は塊状の極細粒砂層であった．深度 13－24cm は塊状の中粒砂層であった．深度 24cm 以下は塊状の極細粒砂であり，上位の粗粒砂層との境界は明瞭であった．

St.4（図 9）

深度 0－4cm は生物擾乱が認められる極細粒砂層，深度 4－6cm は極粗粒砂の薄層，であった．深度 6－20cm は平行葉理が発達する細粒砂層，20－28cm は塊状の粗粒砂層であり，上方細粒化が認められる．深度 28－35cm は細粒～極細粒砂層，深度 35－53cm は中粒砂層であり，上方細粒化が認められる．深度 53cm 以下は塊状の極細粒砂層であり，上位の粗粒砂層との境界は明瞭であった．

St.5（図 10）

深度 0－10cm は塊状の極細粒砂層である．深度 10－14cm は粗粒砂層で，基部に斜交葉理が認められた．深度 14－21cm は平行葉理を示す中粒～粗粒砂層であった．深度 21－53cm は塊状の中粒～粗粒砂層であり，下位から上位に向かって粗粒化していた．また，上部に直径 4cm ほどの円礫が含まれていた．深度 53－66cm は塊状の粗粒砂であった．深度 66－93cm は塊状の中粒砂であり，77－80cm に暗灰色の細粒～極細粒砂の薄層を挟む．深度 93cm 以下は上位の粗粒砂層との間に明瞭な境界を示す塊状の極細粒砂層であった．

St.6（図 11）

深度 0－25cm は暗灰色の極細粒砂層で葉理等の堆積構造は認められなかった．深度 25－40cm は極細粒砂層で，円礫や貝殻片を大量に含んでいた．深度 40－48cm は平行葉理を示す極細粒砂層，深度 48－90cm は貝殻片を大量に含む粗粒～極粗粒砂層であった．深度 90cm 以下は塊状の極細粒砂層であり，上位の粗粒砂層との境界は明瞭であった．

St.7（図 12）

深度 0－42cm は塊状の極細粒砂層である．深度 30cm にやや粗粒な砂の薄層が見られる．試料採取直後は，深度 30－42cm は暗灰色を呈しており，またその基部に植物片の濃集が見られた．深度 42－92cm は塊状の砂層であり，基部は粒径 6cm 程度の円礫を含む極粗粒砂で，上位に向かって細粒化し，最上部は細～中粒砂である．層内には貝殻片が大量に含まれていた．深度 92cm 以下は極細粒砂層であり，上位の粗粒砂層との境界は明瞭であった．深度 110cm 付近には貝殻片の密集層が見られた．

St.8（図 13）

深度 0－13cm は塊状の極細粒砂層であった．深度 13－16cm は細粒～中粒砂層で，生物擾乱によるとみられる堆積構造の乱れが観察された．深度 16－38cm は貝殻片を大量に含む塊状の粗粒～極粗粒砂であった．深度 38－42cm に平行葉理が発達する極細粒砂と中粒砂の互層をはさみ，深度 42－53cm は塊状の細粒～中粒砂であった．深度 53cm 以下は塊状の極細粒砂層であり，上位の粗粒砂層との境界は明瞭であった．

St.9（図 14）

深度 0－11cm は暗灰色の極細粒砂層であった．深度 11－15cm には白色の細粒～極細粒砂層が見られた．深度 11cm 以下は，上位の粗粒砂層との間に明瞭な境界を示す塊状の極細粒砂層であったが，深度 75cm 以下には中粒砂による平行葉理が認められた．

St.10（図 15）

深度 0－36cm は塊状で暗灰色を呈する極細粒砂層であった．深度 33－36cm の層準は斜交葉理を示す．深度 36－46cm は泥質分の多い塊状の中粒砂層であった．深度 46cm 以下は平行葉理の発達する極細粒砂層で，所々にパッチ状の貝殻片密集層（厚さ 2cm 程度）が見られた．

採取試料に共通する特徴として，コアの下部には極細粒砂層があり，それと明瞭な境界を有する形で，粗粒～中粒の砂層が存在すること，コア上部には下部と同様の極細粒砂層が見られることである．コア下部の極細粒砂は塊状か，もしくは平行葉理が発達し，貝殻片の密集層も認められる．粗粒～中粒砂層には，貝殻片や円礫が大量に含まれていること

が多く，平行あるいは斜交葉理も認められる．コアの最上部には下部と同様の極細粒砂層が見られ，生物擾乱と思われる堆積構造も確認された．

図６　St. 1 コアの半割表面写真（全体像，左）と部分拡大写真（右）.

図 7　St. 2 コアの半割表面写真（全体像，左）と部分拡大写真（右）.

図 8　St. 3 コアの半割表面写真（全体像，左）と部分拡大写真（右）.

図 9　St. 4 コアの半割表面写真（全体像，左）と部分拡大写真（右）.

図 10　St. 5 コアの半割表面写真（全体像，左）と部分拡大写真（右）.

図 11　St. 6 コアの半割表面写真（全体像，左）と部分拡大写真（右）.

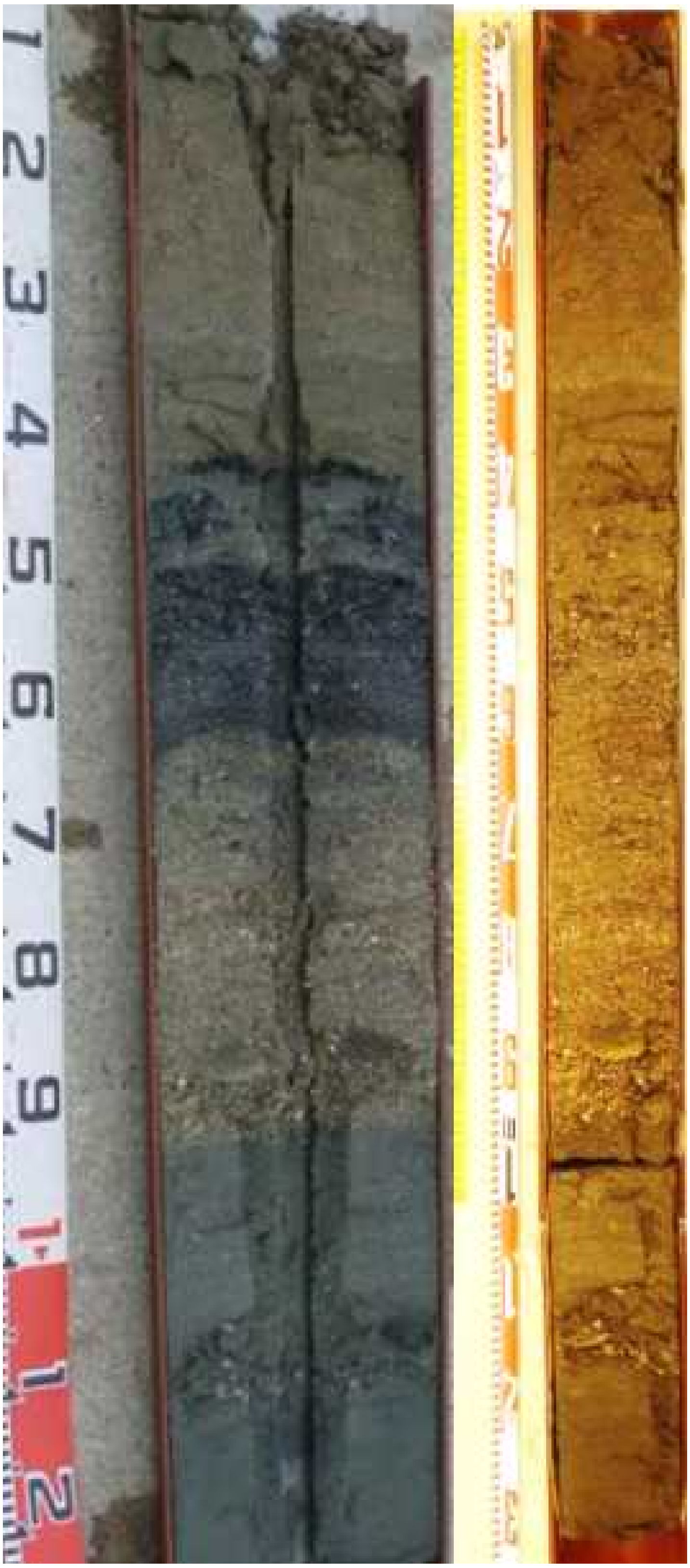


図 12　St. 7 コアの半割表面写真（全体像，左）と部分拡大写真（右）.

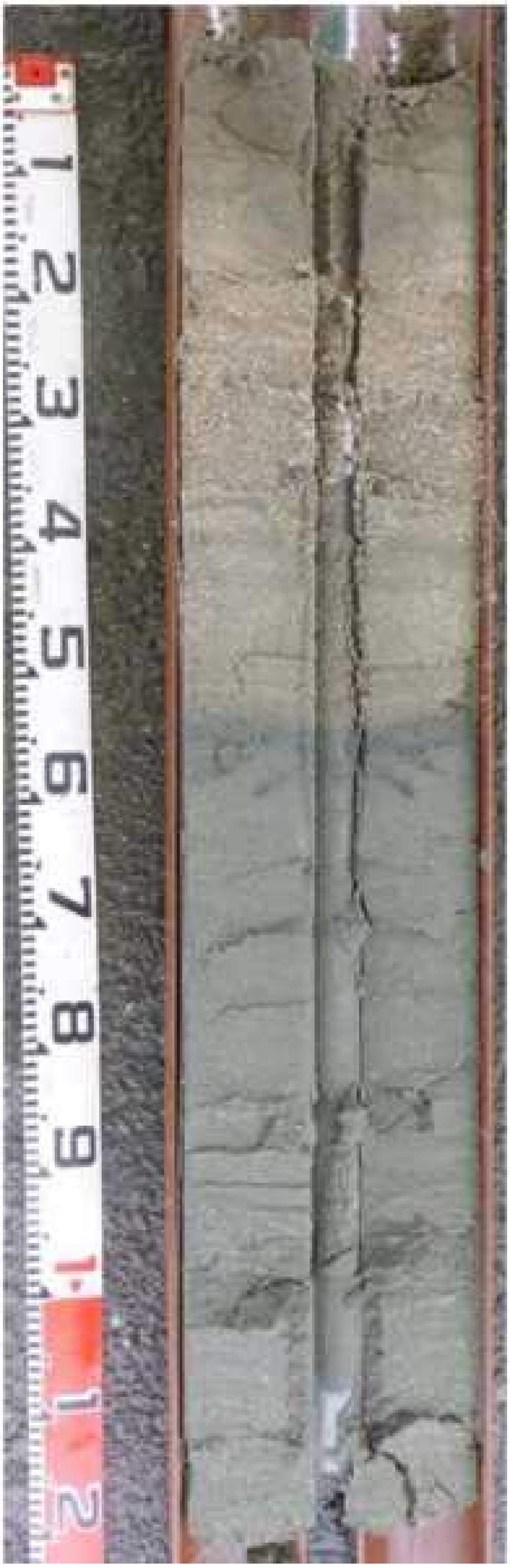


図 13　St. 8 コアの半割表面写真（全体像，左）と部分拡大写真（右）.

図 14　St. 9 コアの半割表面写真（全体像，左）と部分拡大写真（右）.

図 15　St. 10 コアの半割表面写真（全体像，左）と部分拡大写真（右）．

2.3 分析結果

本研究では，炭素同位体比分析，蛍光 X 線分析，セシウム 137 濃度の測定を実施した．炭素同位体比分析の結果，粗粒堆積物中では全体的に負にシフトしているトレンドが見られた（図 16）．これは，津波による陸源物質の混入に伴う変化の可能性が考えられる．一方，Si/Al 比は，主に砂質粒子（Si）と粘土鉱物などの細粒物質（Al）の比に相当すると考えられ，Na/Ti は，海成由来の物質（Na）と陸源物質（Ti）の比に相当すると考えられる．分析の結果，どちらも上位に向けて値が大きくなり，約 40cm 程度から値が小さくなることが分かった．

セシウム 137 は，例えば St. 2 コアでは 39-41cm より下の層準，St. 4 コアでは，29-31cm より下位の層準では未検出であった．一方，それ以上の層準では，0.05－0.22dpm/g の範囲であった（表 2）．

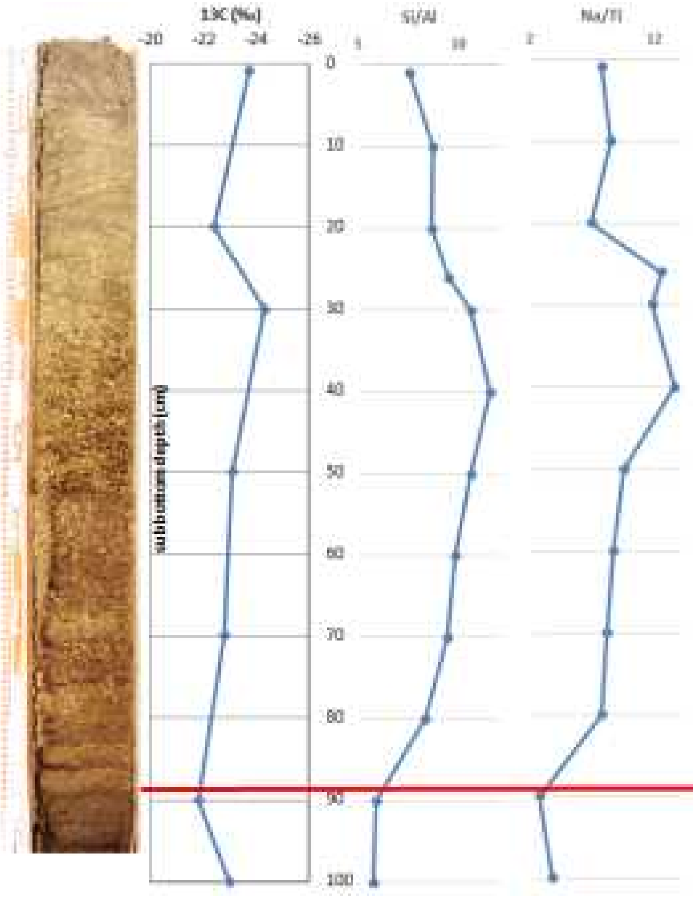


図 16　炭素同位体比（左）および Si/Al 比（中央）と Na/Ti 比（右）．

表 2　鉛 210 およびセシウム 134，137 の測定結果.

Sample	Count wt. (grams)	Pb-210(total) (dpm/g)	Pb-214 (dpm/g)	Bi-214 (dpm/g)	CS-134 (dpm/g)	Cs-137 (dpm/g)
St-2 0-2	2.70	0.71 +/- 0.02	0.47 +/- 0.03	0.68 +/- 0.06	ND	0.06 +/- 0.01
St-2 9-11	3.19	0.48 +/- 0.02	0.41 +/- 0.02	0.57 +/- 0.52	ND	0.15 +/- 0.01
St-2 19-21	3.39	0.16 +/- 0.01	0.43 +/- 0.03	0.60 +/- 0.07	ND	0.22 +/- 0.02
St-2 25-27	3.59	0.27 +/- 0.01	0.43 +/- 0.03	0.44 +/- 0.05	ND	0.13 +/- 0.01
St-2 29-31	3.26	0.79 +/- 0.04	0.41 +/- 0.02	0.49 +/- 0.06	ND	0.14 +/- 0.01
St-2 39-41	4.21	1.46 +/- 0.06	0.53 +/- 0.03	0.34 +/- 0.04	ND	ND
St-2 49-51	2.52	0.49 +/- 0.02	0.75 +/- 0.04	0.63 +/- 0.08	ND	ND
St-2 59-61	3.86	0.46 +/- 0.02	0.40 +/- 0.02	0.44 +/- 0.09	ND	ND
St-2 69-71	2.70	0.56 +/- 0.02	0.59 +/- 0.04	0.47 +/- 0.06	ND	ND
St-2 79-81	3.33	0.50 +/- 0.02	0.55 +/- 0.03	0.57 +/- 0.11	ND	ND
St-2 89-91	2.80	0.94 +/- 0.03	0.66 +/- 0.04	0.97 +/- 0.12	ND	ND
St-2 99-101	1.48	1.27 +/- 0.05	0.91 +/- 0.05	1.22 +/- 0.15	ND	ND
St-4 9-11	2.65	0.89 +/- 0.04	0.64 +/- 0.03	0.75 +/- 0.09	ND	0.15 +/- 0.01
St-4 29-31	3.51	1.26 +/- 0.05	0.94 +/- 0.03	0.92 +/- 0.11	ND	ND
St-4 49-51	1.99	1.81 +/- 0.07	1.49 +/- 0.03	1.36 +/- 0.16	ND	ND
St-4 69-71	2.69	2.15 +/- 0.09	0.81 +/- 0.05	0.84 +/- 0.10	ND	ND

参考文献

有働恵子・武田百合子・田中仁・真野明，2013，東北地方太平洋沖地震津波による宮城県仙台湾南部海岸の海浜変形特性．土木学会論文集 B（海岸工学），69，I1391- I1395，

３．千葉県銚子市における津波堆積物調査

3.1 調査概要

銚子市をはじめとした房総半島沿岸部は，西暦 1677 年（延宝五年）延宝房総沖地震津波により被害を受けたことが古文書等により知られている．この津波の痕跡高は，千人塚で 4.1m，小畑池で 13.5m および 12.4m とされている（都司ら 2012）．古文書玄蕃先代集によれば，「高上村大池迄浪上り浜通御林松壱万本余折レ，小木ハしない折レ不申候，其砌大池之鯉堺吉右衛門御運上ニ請漁仕候ニ付，池端ニ小屋を立五，六人居申候，其夜浪ニて小屋共ニ池へ打込漸人は助り候」とある．津波が高上村大池まで打ちあがり，海岸の松林が 1 万本折れたこと，池のそばにあった小屋が流失して中にいた人が助かったことが述べられている．高上村大池は銚子市東部に位置しており，現在は小畑池と呼ばれている（図 1，図 2）．都司ら（2012）では，この地点で浸水深 1m を推定している．

小畑池は大きな河川の出入りがない小規模な池であるため，津波により流入した土砂は，長期間地層中に保存されていることが期待できる．津波堆積物を発掘して古文書の記述の検証を行うとともに，波源特性の推定に資する情報を得るため，池内で堆積物掘削調査を行った．調査の概要は以下の通りである．

- 調査場所 : 小畑池（千葉県銚子市高神東町地内）緯度 35°42'34.71", 経度 140°51'31.48"
- 調査日程 : 2013 年 8 月 27 日～31 日
- 調査方法 : ロシア式サンプラー（試料採取部長さ 1.1m）による手掘り

小畑池は農業用の溜池として利用されている．北側および西側の直線状湖岸にはフェンスが設置されていて，機材の搬出入は不可能である（図 3）．東側および西側は植生により湖岸へのアクセスは非常に困難である（図 4）．南西側の屈曲部に小型の艀が設置されており，そこから池内への出入りを行った．

なお，調査結果の X 線分析装置による解析結果は 7.7 節において，他地域の調査結果と合わせて説明する．

図１：小畑池の位置

図２：小畑池の形状.

図 3：小畑池西側湖岸のフェンス設置状況.

図 4：小畑池東側湖岸の植生状況.

3.2 調査結果

周辺環境から推定される堆積速度を考慮すると，湖底から 2m の深さまでに，1677 年頃の堆積物が存在すると考えられる. 池内の 20 か所で掘削を行い, 堆積物試料を採取した（図5）. OBT-1 から OBT-8 までの地点では深度 2m までの連続試料となるようにサンプルを採取し，OBT-9 から OBT-20 までの地点では，目的とする砂層が存在する深度のみサンプル採取を行った.

湖底の堆積物は，主に，上位は腐植質シルト，下位は未分解の腐植質シルトからなる（図6）. 未分解の腐植質シルトは，湖底面からの深度が 1.1m よりも深い位置に存在していた. 調査地点のうち 11 地点では, 上位の腐植質シルト層中に泥質の細～中粒砂層が確認された. 地点 OBT-7 における堆積物状況の例を図 7，8，9，10，11 に示す. 各地点での砂層の厚さは 1～17cm であった. また, 堆積物中には木片や葉などの植物遺体が稀に確認されたため, 炭素同位体年代測定用の試料として採取した（図 6）.

表１：小畑池における堆積物調査結果.

調査地点	GPS 番号	コア名	緯度	経度	水深（cm）	砂層の厚さ（cm）	砂層上面の湖底からの深度（cm）
1	423	OBT-1	N35 42 34.9	E140 51 30.9	50	10	35
2	508	OBT-2	N35 42 35.9	E140 51 32.8	40	17	65
3	510	KBT-3-1	N35 42 33.6	E140 51 31.9			
4	511	KBT-3-2	N35 42 33.6	E140 51 32.0			
5	512	OBT-4	N35 42 35.6	E140 51 30.3	40	6	112
6	513	OBT-5	N35 42 34.0	E140 51 30.2	50		
7	514	OBT-6	N35 42 34.2	E140 51 32.1	50		
8	515	OBT-7-1	N35 42 35.6	E140 51 31.2	50	17	70
9	517	OBT-8	N35 42 34.4	E140 51 30.2	50		
10	518		N35 42 35.2	E140 51 30.3	50		
11	519	OBT-9	N35 42 35.4	E140 51 30.3	50		
12	520		N35 42 35.8	E140 51 29.7	50		
13	521		N35 42 35.0	E140 51 30.5	50		
14	522	OBT-10	N35 42 35.2	E140 51 30.8	50		
15	523	OBT-11	N35 42 36.7	E140 51 33.6	50		
16	524	OBT-12	N35 42 35.7	E140 51 32.3	40	16	120
17	525	OBT-13	N35 42 35.0	E140 51 32.2	50	3	61
18	526	OBT-14	N35 42 35.1	E140 51 32.9	50		
19	1	OBT-15	N35 42 34.5	E140 51 31.4	50	3	39
20	2	OBT-16	N35 42 34.0	E140 51 31.3	50	2	62
21	3	OBT-17	N35 42 35.3	E140 51 31.3	50	5	74
22	4	OBT-18	N35 42 35.6	E140 51 32.8	50	20	108
23	5	OBT-19	N35 42 35.3	E140 51 31.9	40	14	79
24	6		N35 42 34.8	E140 51 30.1	40		
25	7		N35 42 34.6	E140 51 32.1	50		
26	8		N35 42 35.2	E140 51 29.8	50		
27	9	OBT-20	N35 42 34.9	E140 51 31.4	40		
28	J		N35 42 34.2	E140 51 31.5			
29	K		N35 42 34.5	E140 51 30.7			
30	L		N35 42 34.8	E140 51 30.4			
31	10	OBT-21	N35 42 34.6	E140 51 31.6	50		

図 5：掘削作業の状況.

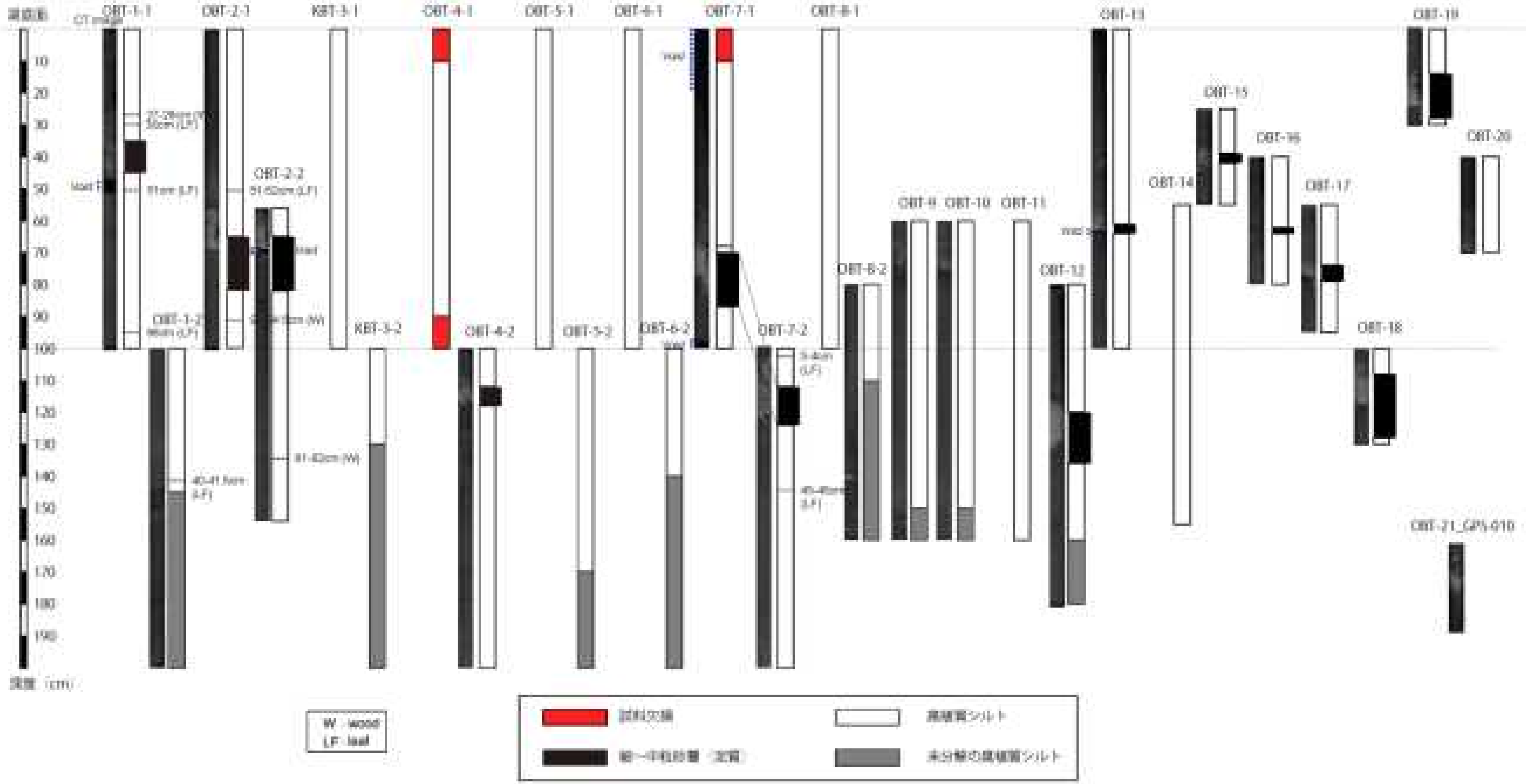


図 6：小畑池の地質柱状図.

図 7：OBT-7 における堆積物試料の状況（上：深度 0－30cm，下：100－130cm）.

図 8：OBT-7 における堆積物試料の状況（上：深度 10－50cm，下：110－150cm）.

図 9：OBT-7 における堆積物試料の状況（上：深度 30－70cm，下：130－170cm）．

図 10：OBT-7 における堆積物試料の状況（上：深度 50－90cm，下：深度 150－190cm）．この地点では，深度 70－83cm に泥質砂層が確認された．

図 11：OBT-7 における堆積物試料の状況（深度 70－100cm，170－200cm）．この地点では，深度 70－83cm に泥質砂層が確認された．

3.3 年代測定結果

抽出した木片や葉を用いて，放射性炭素年代測定を（株）地球科学研究所に依頼し実施した．結果を以下の表 2 に示す．これらの年代から，観察された砂層の年代が 1667 年延宝津波によると考えても矛盾はしない．ただし，砂層下位が侵食されている可能性もあり，火山灰等の別の年代指標も加えて，詳細な検討が必要である．

表 2　年代測定結果

試料名	conventional 14C age	暦年代
OBT2-2_21-22cm-leaf	1000±30	Cal AD 990 to 1040 (Cal BP 960 to 910),Cal AD 1100 to 1120 (Cal BP 850 to 830),Cal AD 1140 to 1150 (Cal BP 810 to 800)
OBT2-2_21-22cm-wood	Modern	N/A
OBT2-2_57cm	1170 ±30	Cal AD 780 to 900 (Cal BP 1170 to 1050),Cal AD 920 to 970 (Cal BP 1030 to 980)
OBT1-1_27-28cm	110±30	Cal AD 1680 to 1760 (Cal BP 270 to 190),Cal AD 1770 to 1780 (Cal BP 180 to 170),Cal AD 1800 to 1940 (Cal BP 150 to 10),Cal AD Post 1950
OBT1-1_96cm	1400±30	Cal AD 600 to 660 (Cal BP 1350 to 1290)
OBT2-2_81-82cm	1030±30	Cal AD 970 to 1030 (Cal BP 980 to 920)
OBT7-2_3-4cm	240±40	Cal AD 1520 to 1570 (Cal BP 430 to 380),Cal AD 1590 to 1590 (Cal BP 360 to 360),Cal AD 1630 to 1680 (Cal BP 320 to 270),Cal AD 1760 to 1770 (Cal BP 190 to 180),Cal AD 1780 to 1800 (Cal BP 170 to 150),Cal AD 1940 to post 1950 (Cal BP 10 to post 1950)
OBT7-2_45-46cm	1010±40	Cal AD 970 to 1050 (Cal BP 980 to 900),Cal AD 1090 to 1120 (Cal BP 860 to 830),Cal AD 1140 to 1150 (Cal BP 810 to 800)

４．気仙沼湾における地形変化と堆積物に関する現地調査

4.1 はじめに

津波堆積物に係る現地調査に関連し, 平成 24 年度に実施した宮城県気仙沼湾における深浅測量および掘削調査結果の分析を行った. ここでは, その方法と結果について述べる.

4.2 地形変化に関する現地調査

(1) 調査位置

調査範囲は図 4-1 に示す気仙沼港内である.

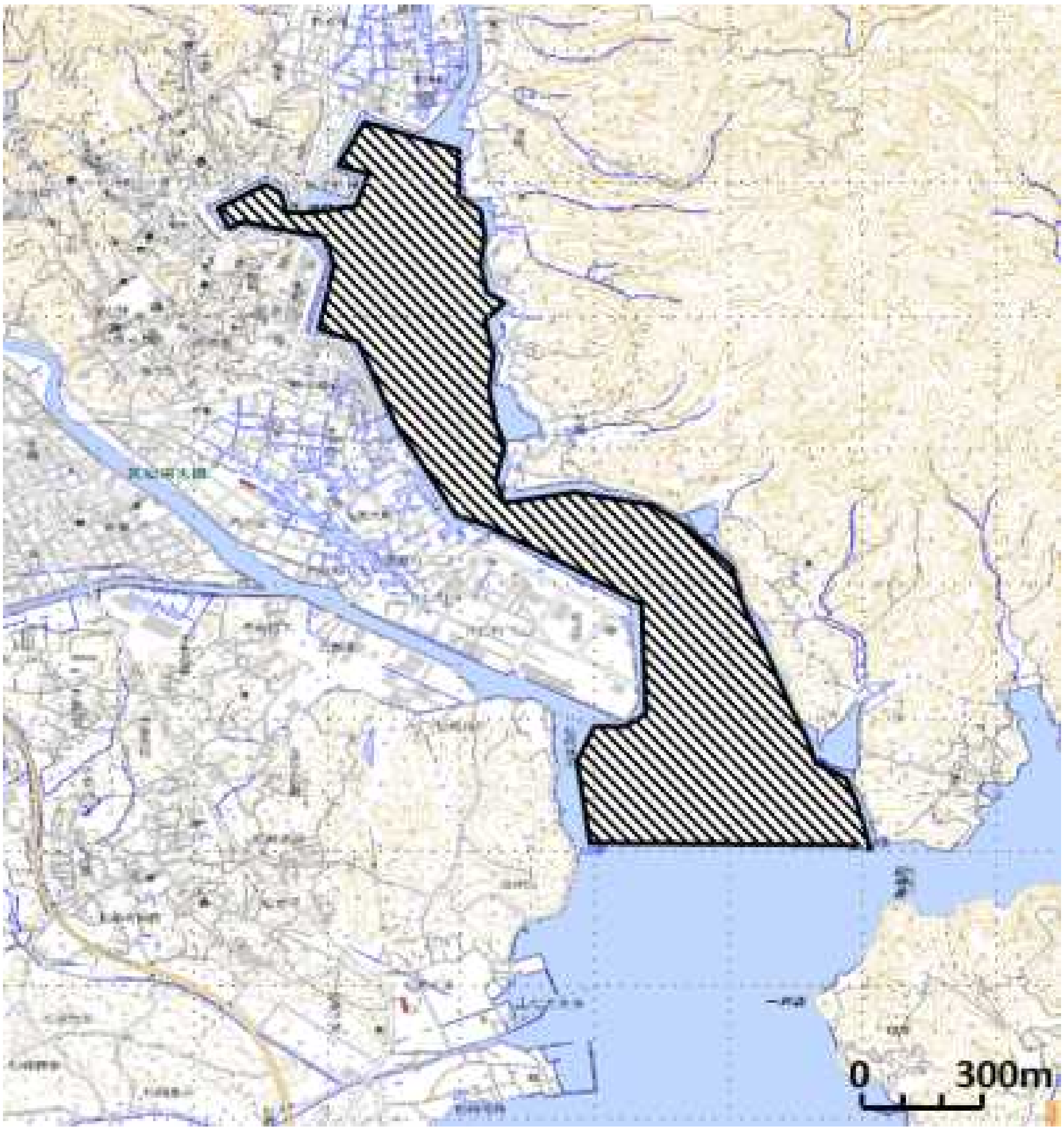


図 4-1　調査範囲

(2)調査方法

海底地形状況調査は，調査船に米国 BENTHOS 社製 3 次元サイドスキャンソナー（C3D 型）を搭載し，D-GPS の誘導により行った．調査船の動揺･方位の補正には仏国 IXSEA 社製慣性航法装置(PHINS)を使用し，測位は米国ヘミスフィア GPS 社製 GPS（A100）を使用した．取得した測深記録はパッチテストで得たデータ，AML-SVPS を用いて取得した音速データにより補正値を付加したのち解析を行った．

現地作業の流れを図 4-2 に示す．

図 4-2　現地作業のフロー図

以下に使用機器の仕様等を示す．

【C3D 型測深器の仕様（図 4-3)】

測深周波数	:	200KHz
計測レンジ	:	水深の約 10 倍
前後ビーム幅	:	1.0 度
測深点数	:	最大 2000 点
水平方向分解能	:	5.5cm(レンジに依存する)
高さ方向分解能	:	1 cm
測深範囲	:	300 m

C3D は，海底反射波の位相差により測深を行うインターフェロメトリ方式のスワス音響測深機であり，水深に対し約 10 倍のスワス幅での計測が可能であり，従来の測深機よりも広範囲を面的に計測できる．また，測深データと同時にサイドスキャンデータの取得も可能である点に特徴がある．

C3D の測深精度は，国際水路機関（International Hydrographic Organization，IHO）の「IHO　Standards for Hydrographic Surveys，5th Edition，February 2008，Special Publication No. 44」における「Special Order」に適合しており，日本国内においては「海上保安庁告示 102 号」の「特級」水域における使用が認定されたスワス音響測深機である．

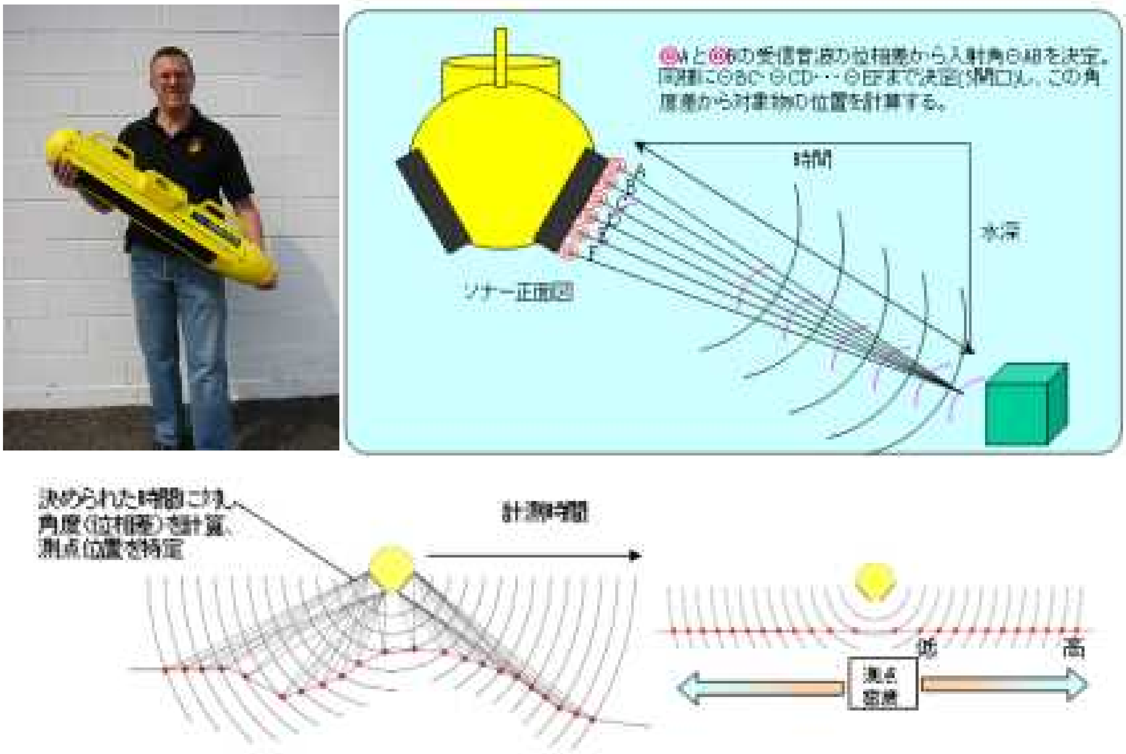


図 4-3　C3D とインターフェロメトリ方式

【PHINS の仕様】

ヒーブ：5cm または計測時の 5%のいずれか大きい値

ロール：±0.01°

ピッチ：±0.01°

方位：0.01°

【データ出力】

総合測量ソフト Hypack-Max に測位データを出力した．

【出力データ】

出力データはＮＭＥＡ０１８３プロトコル群の中のＧＧＡプロトコルとＶＴＧプロトコルを用いた．ＧＧＡプロトコルは調査船の位置特定に使用し，ＶＴＧプロトコルは船首の方位特定に使用した．

各々のセンテンスの詳細を表 4-1 に示した．

表 4-1　GPS 出力データ詳細

GPS出力データ詳細		
	センテンス	明細
GGA プロトコル	$GPGGA	プロトコル種別
	51230.00	測位時刻（UTC）
	3517.2406384N	緯度（北緯）
	13942.4004081E	経度（東経）
	4	GPS クオリティ（RTK-GPS は「4」）
	8	受信衛星数
	0.9	HDOP
	-0.67M	平均海水面からのアンテナ高度（m）
	39.71M	WGS-84 楕円体から平均海水面の高度差（m）
	2.8	GPS データのエイジ（秒）
	0686*6C	GPS 基準局の ID とチェックサム
出力間隔		10Hz
	センテンス	明細
VTG プロトコル	$GPVTG	プロトコル種別
	177.1T	真北に対する進行方向（度）
	M	磁北に対する進行方向 （度）
	0.75N	対地速度（ノット）
	1.39K	対地速度（km/h）
	*59	チェックサム
出力間隔		5Hz

(3)　調査概要と結果

本調査地区では海底地形計測を 2008 年に開始し, その後 2010 年チリ津波直後, 2011 年東日本太平洋沖地震津波直後に同様の計測を実施している.

本報告では, 東北地方太平洋沖地震津波から約 2 年後にあたる 2013 年 2 月下旬に新たに取得した地形データを用いてこれらのデータと比較した. 特に東日本太平洋沖地震津波後の経時的な地形変化を把握し, 通常波浪に伴う変化を明らかにすることを目的とした. なお, 港内は津波後の復旧護岸工事や防波堤工事に伴う航行禁止区域や, 津波後に密集して設置された養殖施設があり, 探査船が航行できない区域が一部存在した.

【測深データの解析方法】

測深データの解析には COG 社製水路測量解析ソフトウェア「Hypack-Max」を使用し, エラーデータ (水中のゴミ, 気泡, 魚群等によるスパイク状のエラー, 機械的ノイズ等) を除去してから, 2.0m の 3 次元メッシュデータ (DEM) の作成を行った.

航跡図は, CAD に座標データを読み込んで編集してから作図する. C3D による測深データのフローを図 4-5 に示す.

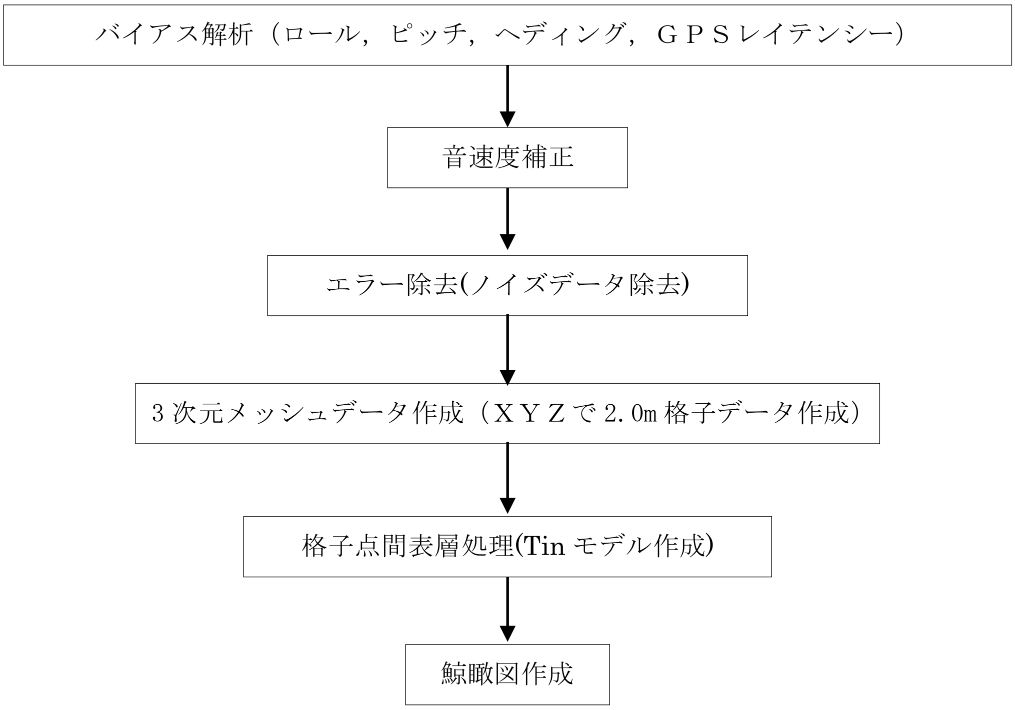


図 4-5　測深データ解析フロー図

【比較方法】

解析作業では，気仙沼港内全域において 3 次元サイドスキャンソナーC3D で取得したデータより等深線図（図 4-6）等を作成した.

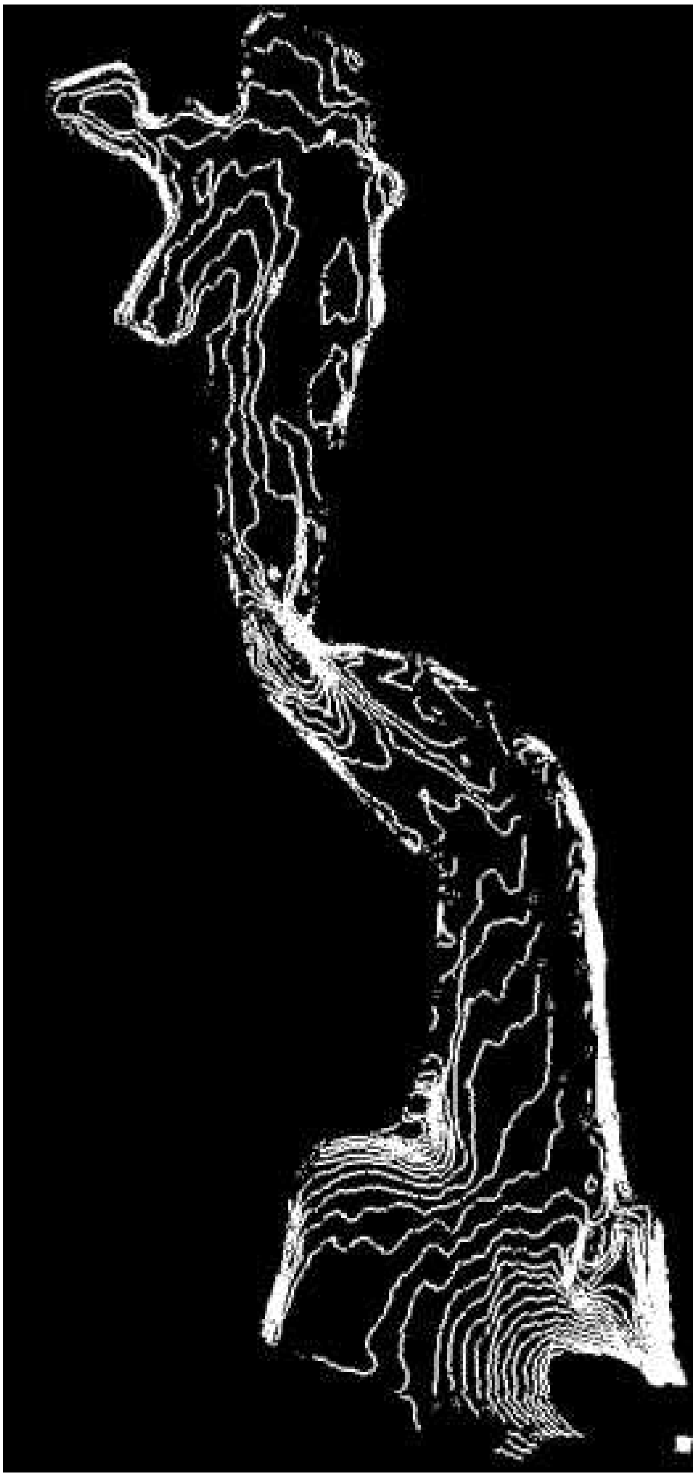


図 4-6　等深線図

気仙沼港の港内から気仙沼湾の間には，蜂ヶ崎に特徴的な狭窄地形が見られるため，本調査においては，「①狭窄部の港内側」，「②狭窄部付近」，「③狭窄部の港外側」の 3 地区（図 4-7）に分けて比較を行った．

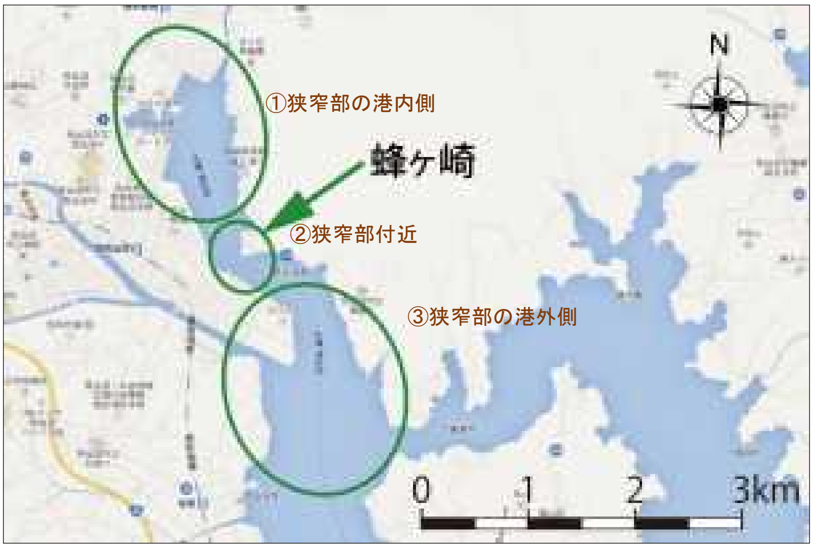


図 4-7　気仙沼港内の比較地点（Google Map をもとに加筆）

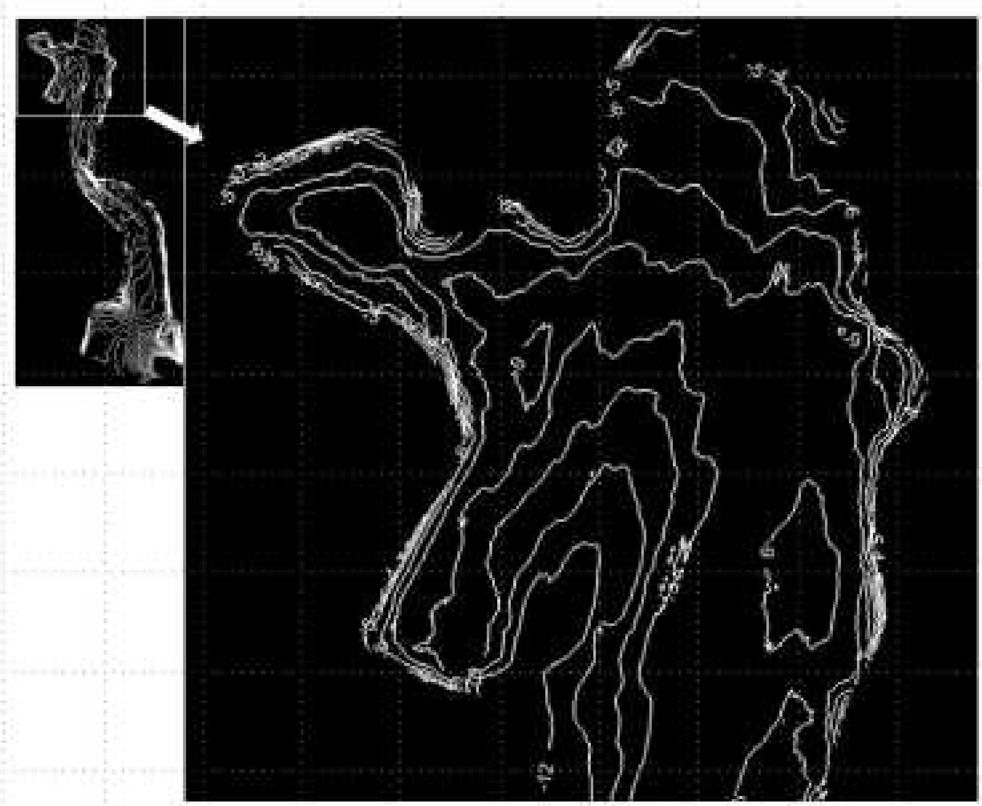


図 4-8 ①狭窄部の港内側等深線図

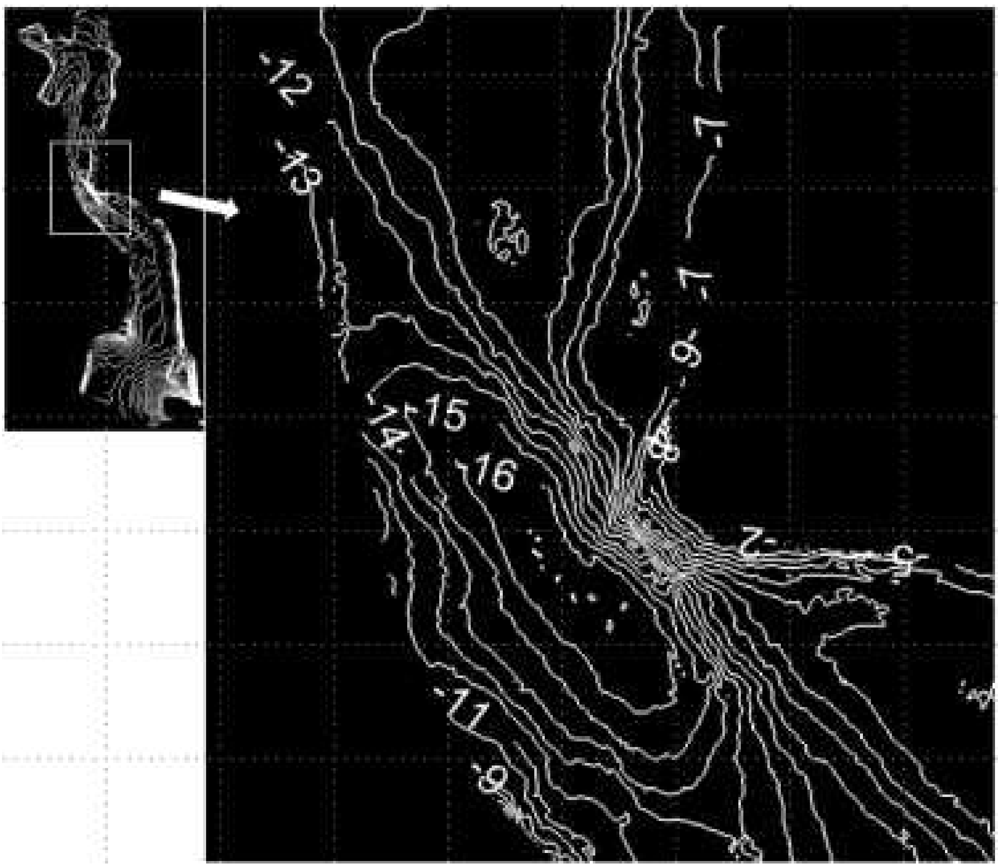


図 4-9 ②狭窄部付近等深線図

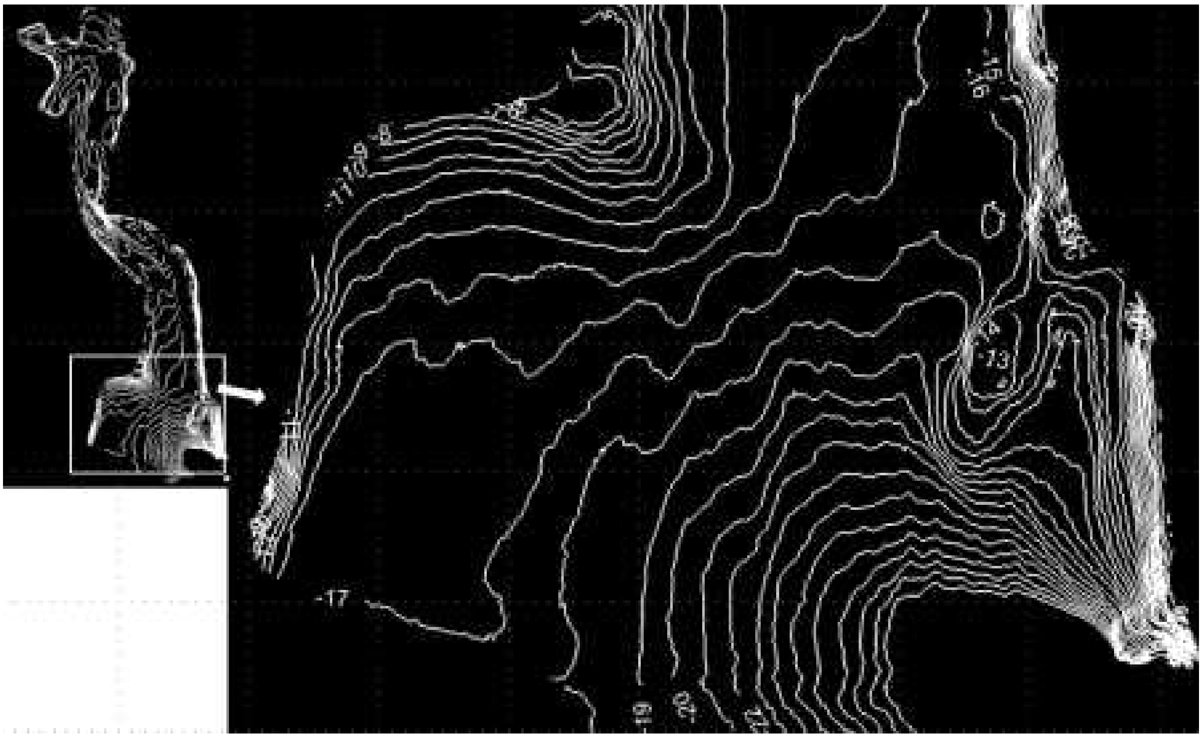


図 4-10 ③狭窄部の港外側等深線図

【比較結果（差分図】

東北地方太平洋沖地震津波直後と2013年2月の地形から差分図（図4-11）を作成し，海底地形と比較した．

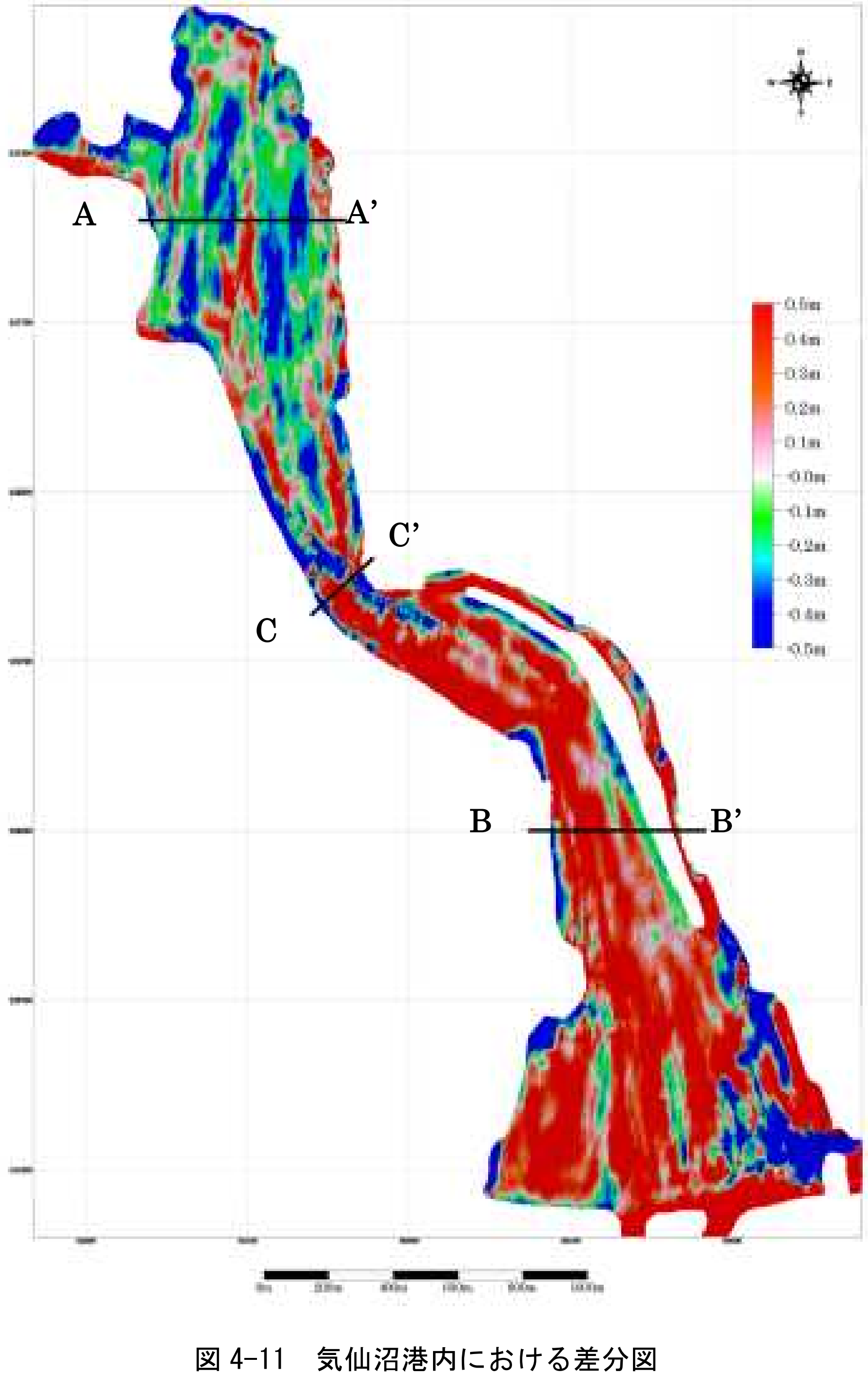


図4-11　気仙沼港内における差分図
（2011年3月を基本にした場合の2013年2月の地形の差分）

【比較結果（断面図】

図 4-11 において, 断面図(A-A’:図 4-12, B-B’:図 4-13, C-C’:図 4-14)を作成し, 2008 年, 2010 年, 2011 年, 2013 年の地形と比較した.

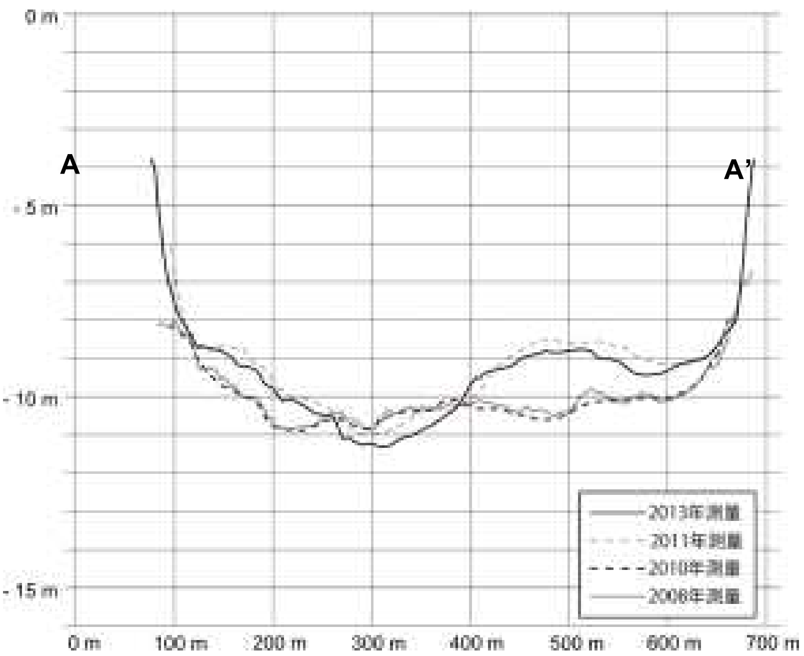


図 4-12　気仙沼港内における断面図（A-A’断面）

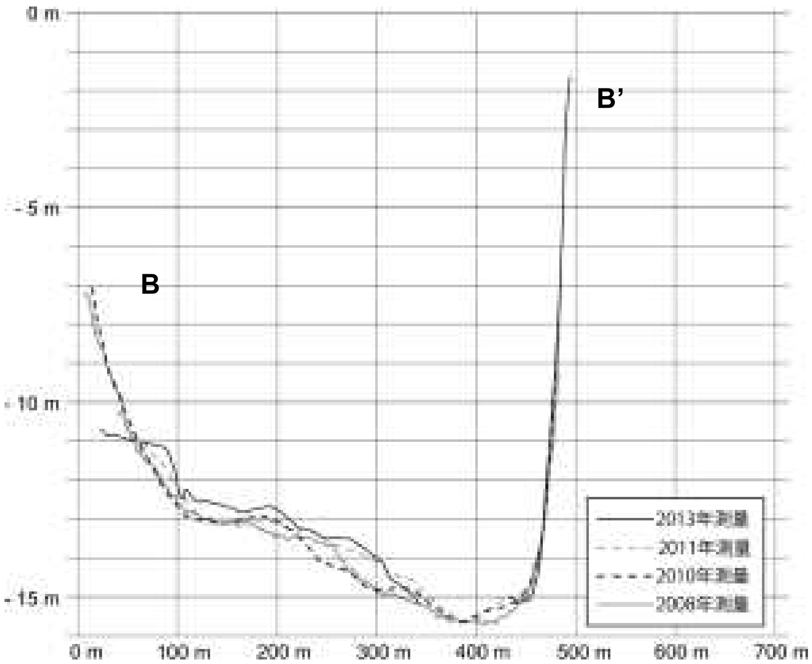


図 4-13　気仙沼港内における断面図（B-B’断面）

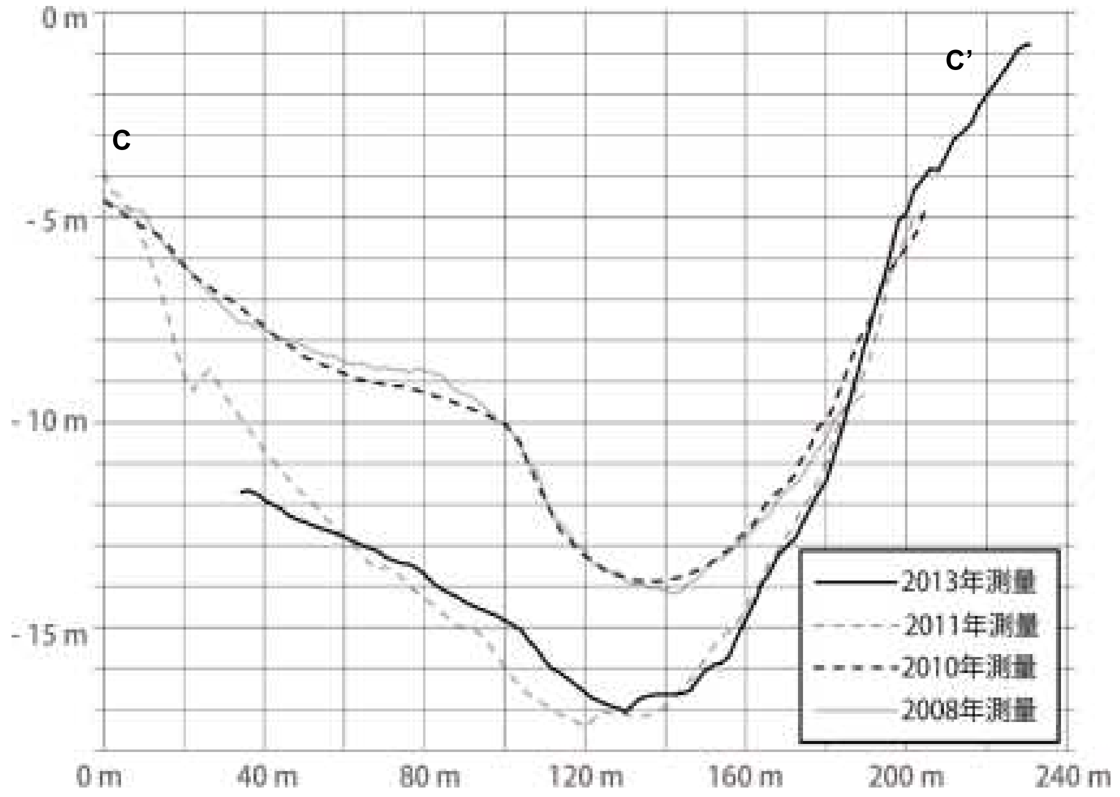


図 4-14　気仙沼港内における断面図（C-C' 断面）

【まとめ】

本調査では，C3D を使用した港内全域の深浅測量を行い，断面図及び詳細地形図等の比較から，2011 年 3 月と 2013 年 2 月の地形変化を検討した．

その結果，図 4-11 の①及び③の地点では，2011 年津波の影響で浸食又は堆積した箇所においては，通常波浪によって徐々に平滑化されている状況が明らかになった．さらに共にわずかではあるが，狭窄部より港内側で全体として浸食傾向，港外側で堆積傾向がみられた．

一方，②の狭窄部地点では，津波により最大で約 7.0m 浸食されていたが，2013 年においては津波直後よりも西側斜面部で約 1.0m の堆積状況が見られた(図 4-14)．

4.3 堆積物に関する現地調査

気仙沼湾内での津波による土砂移動の実態の把握を目的として，海底堆積物の柱状コア採取を VCS（バイブレーションコアサンプラー）により実施した．コアの採取地点の決定においては，4.2 にて既述した地形変化を参考にし，確実に堆積場として認められる地点においてコアを採取した．

(1) コアの採取方法と調査位置

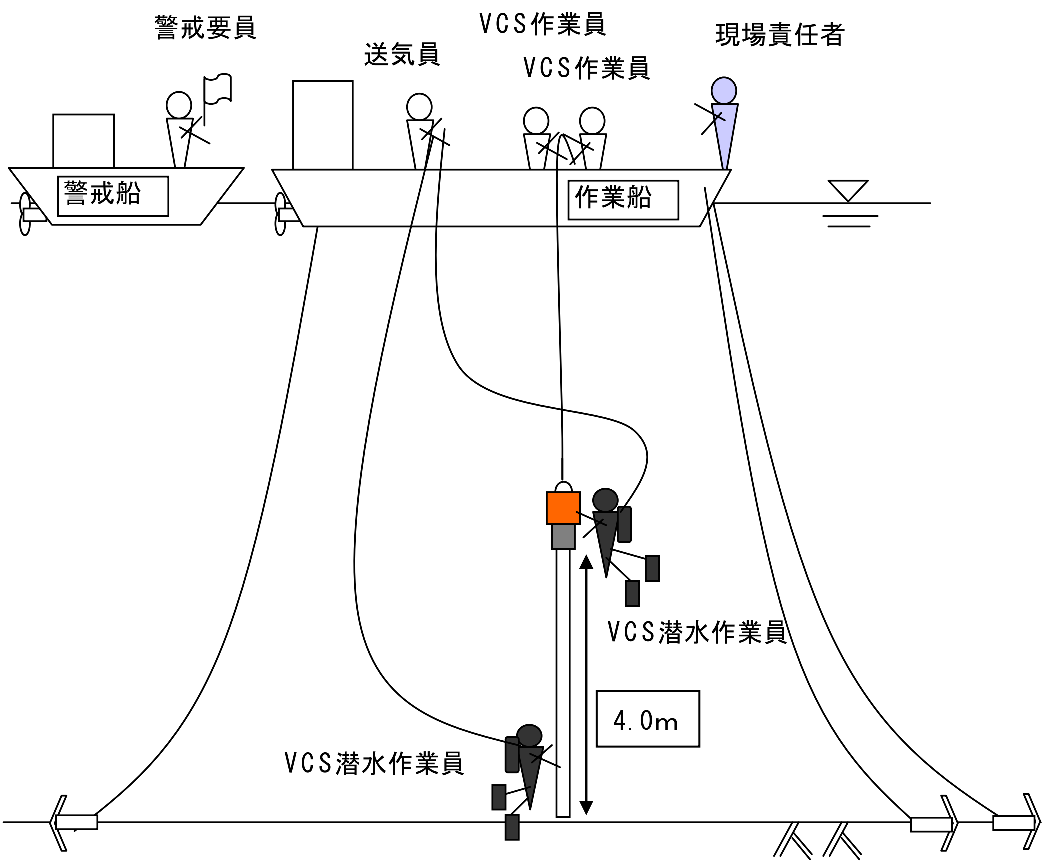
東北地方太平洋沖地震津波来襲直後から約2年後の2013年2月末に，湾内の3地点(図4-15)においてコアを採取した．コアはVCS（バイブレーションコアサンプラー：図4-16）方式で採取した．VCS方式によるコア採取方法は，全長4.0mのコアパイプ上部に圧縮空気で作動する振動機を取り付け，作業船より圧縮空気を送ることで，コアパイプが振動させなら海底にコアパイプを押し込み，柱状コアを採取する方式である．

試料の採取位置の詳細な座標と水深を表4-2に示す．

図 4-15　コア採取地点

表 4-2 採取位置の座標

地点名	X座標	Y座標	水深(m)	摘要
KSN13-1	-123795.56	86007.34	13.2	
KSN13-2	-121657.93	65217.43	9.1	VCSパイプが2m程度の貫入で停止してしまった為、地点を少し移動して実施。2本採取。
KSN13-3	-121599.93	65179.02	9.3	1回目貫入ができなかったことから、地点を少し移動して実施。



仕様	
振動機：	一軸振動方式
振動数：	1600v.p.m
振動力：	265kgf
重量：	30kg（100φ）

図 4-16　柱状採泥概要図

(2) コアの分析

採取したコアは高知コアセンターにて分析を行った．分析はX線CTによる非破壊撮影後，コアを半割した．その後，コア連続画像撮影装置による写真撮影，1.0cm の分解能でのマルチセンサーコアロガーによる密度および帯磁率の測定，同様のピッチでの分光測色計による明度（L*），色度（a*，b*）を計測した．X線CT画像上での明暗は，GIS ソフト「GRASS GIS」を用いて約 0.1cm の分解能，グレースケール 256 段階で数値化した．さらに含砂率を 1.0cm 間隔で求めた．

(2) コアの分析結果

【KSN1301（図 4-17)】

コア採取長は 350.0cm,32.0cm 付近に明瞭な浸食跡があり,以深は泥質となる.32.0cm より上部に水平構造を持つ砂層がみられる.津波前後の地形変化から想定される堆積量は約 60.0cm 程度である.

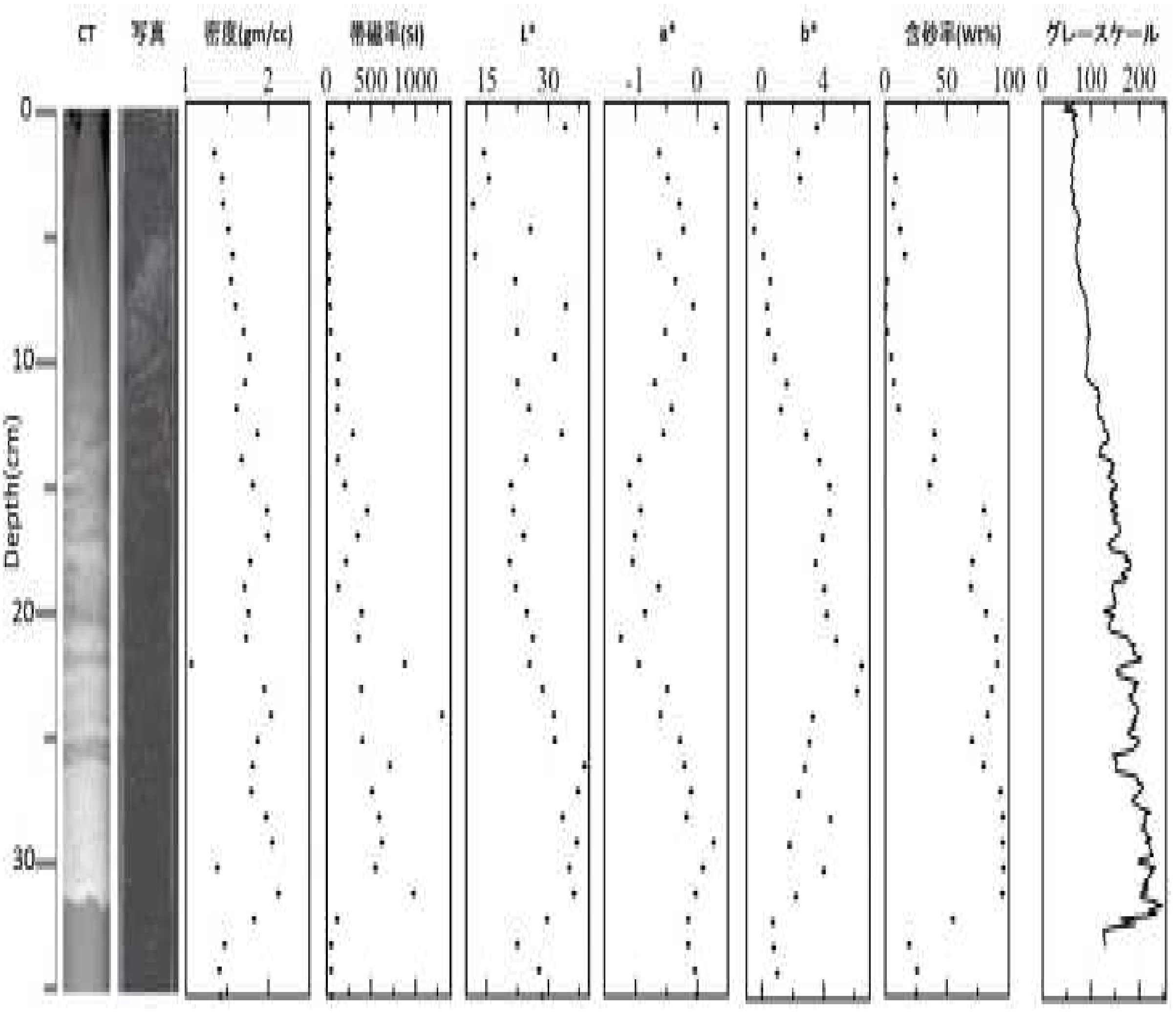


図 4-17　KSN1301 における分析結果

表層 12.0cm は緩い泥質層で津波後大川からの供給された津波後の堆積物と判断され,採取から分析までの運搬中に乱れ流動化した部分も含まれる.

この結果, 12.0～32.0cm が東北地方太平洋沖地震津波による堆積物である. 堆積物の内部構造をみると CT 画像でみる堆積構造とこれに対応するグレースケール, 含砂率の変動パターンが少なくとも 4 回繰り返す. この変動は津波の動的変動に対応すると考えられる.

【KSN1302-1（図 4-18)，KSN1302-2（図 4-19），KSN1303（図 4-20)】

KSN1302，KSN1303 は地形変化から 2.0m 以上の津波堆積物の分布が想定された．しかし全地点で 2.0m までの貫入ができなかった．それぞれの地点から半径 10.0m 程度複数箇所で場所を変えて同様の作業を実施したが，採取できたのは KSN1302-1：1.35m，KSN1302-2：1.75m，KSN1303：1.05m で，最長 1.75m であった．

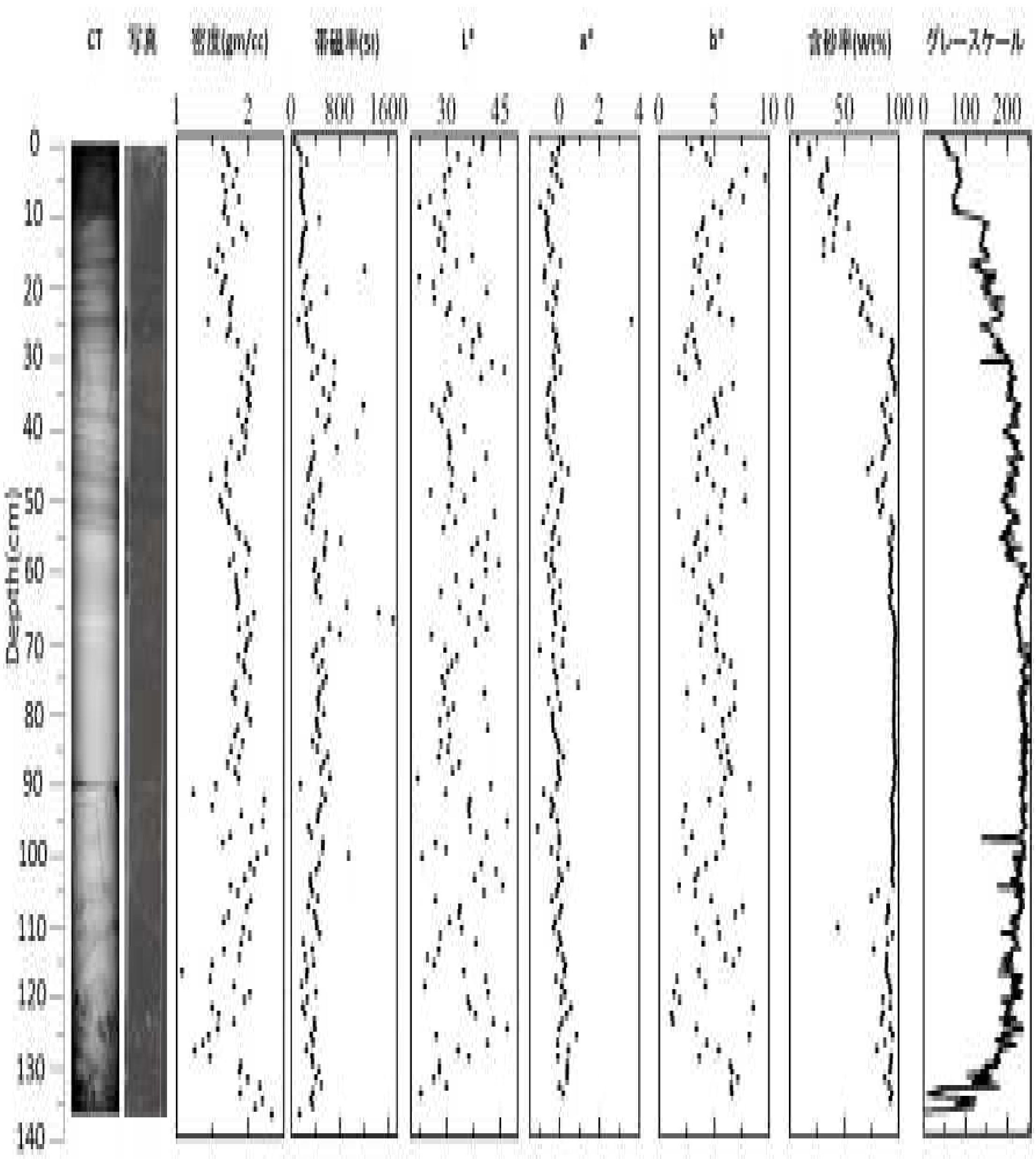


図 4-17　KSN1302-1 における分析結果

実作業にあたった潜水夫によると，「貫入が停止した先端部は硬いものに当たったのではなく，感触としては柔らかいものがあって貫入できない」とのことであった．港内

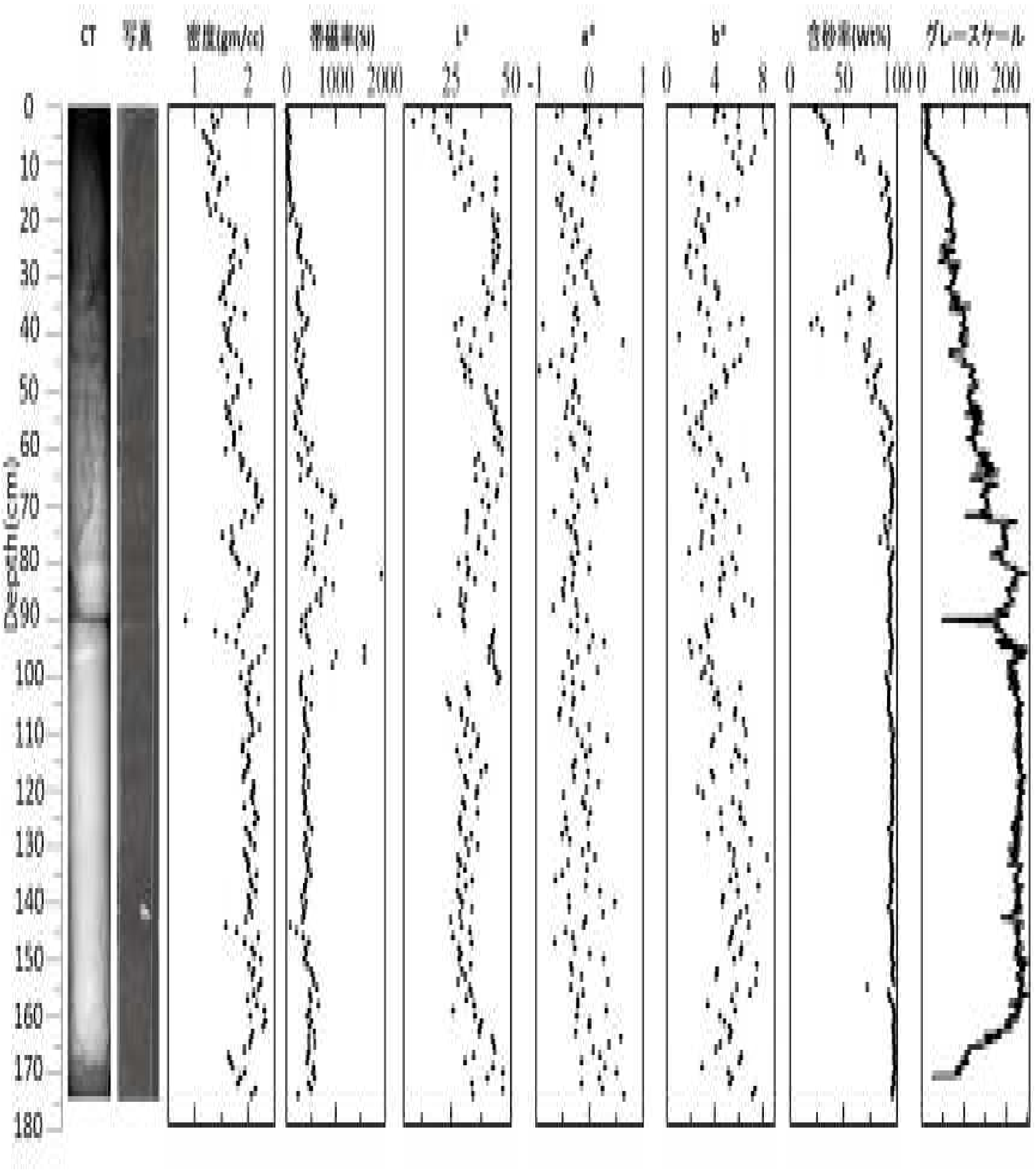


図 4-18　KSN1302-2 における分析結果

には津波時に多量の瓦礫が流れ込んだことから，港内に流れ込んだ板材等が特定の層準に水平方向に広がりをもってサンドイッチ状に挟まって分布するために，これが障害となり貫入できなかった可能性が高い．

一方，採取コアの３地点すべてが類似の堆積構造を示す．まず，共通して表層部に津波後の通常堆積物である泥質層が分布する．その下位 50.0cm 程度には厚さ数 cm～10.0cm 程度の明瞭な水平なラミナが繰り返し，堆積構造が不明瞭な砂層へと続く．津波前にはこれらの地点には泥が堆積していたため，東北地方太平洋沖地震津波によって少なくとも表層 1.0m 以上が砂層に置換されていることが確認された．

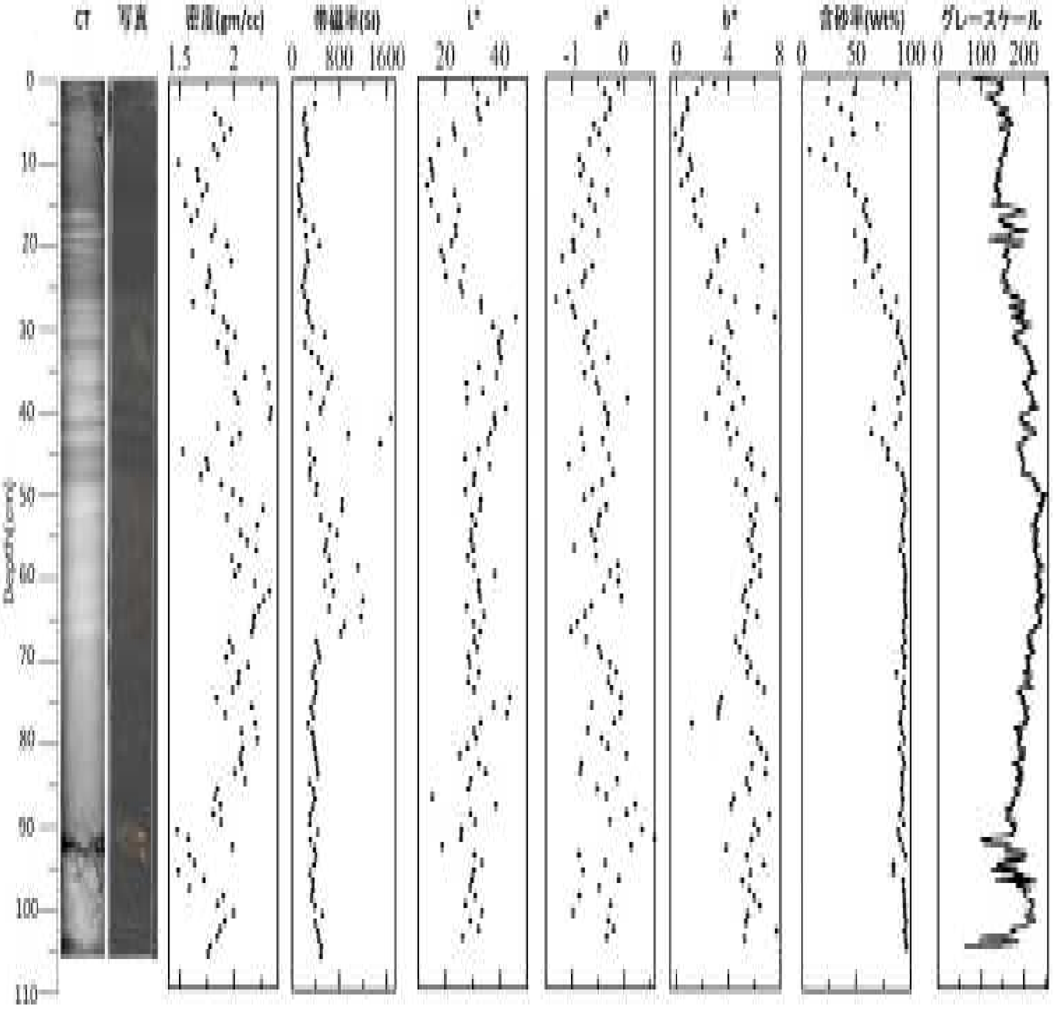


図 4-19　KSN1303 における分析結果

【まとめ】

気仙沼湾で採取した 2011 東北津波による内湾津波堆積物の分析を行った．その結果，津波前の底質が泥から砂に置換され，さらに堆積物には津波の挙動を反映した堆積構造が確認された．今後津波の動態と堆積構造との関係についてさらに検討する予定である．

参考資料　現地調査作業状況写真

<u>使用船舶</u>

<u>測量船全景</u>

<u>使用機器</u>

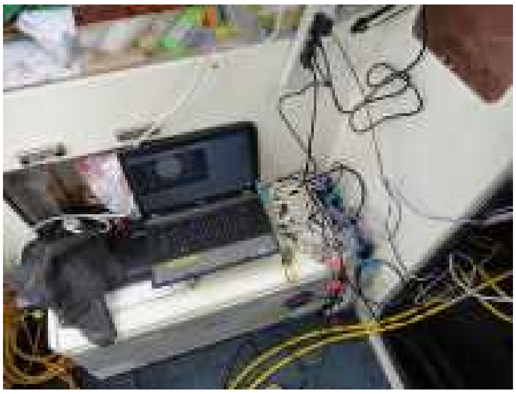
<u>C3D ソナー艤装状況</u>

<u>使用機器</u>

<u>測深システムの設置状況</u>

<u>使用機器</u>

<u>PHINS（慣性航法装置）</u>



使用機器

PHINS 用モニタリング PC

使用機器

D-GPS　A100 アンテナ

使用機器

D-GPS　A100

艤装状況

全景

使用機器
収録 PC

使用機器
C3D ソナー

堆積物に関する現地調査

使用船舶
潜水士船

使用船舶

警戒船

コア採取位置

ブイの投入

調査風景

コア採取作業

調査風景

コア採取作業

調査風景
コア採取作業

調査風景
コア採取作業

KSN12 地点
採取礫

調査風景
採取コア（計 4 本）

参考文献

1) 原口 強，高橋 智幸，久松 力人，森下 祐，佐々木いたる（2012）：2010 年チリ中部地震津波および 2011 年東北地方太平洋沖地震津波による気仙沼湾での地形変化に関する現地調査，土木学会論文集 B2(海岸工学)，Vol. 68，No. 2，pp. 231-235.

2) 高橋 智幸，原口 強，佐々木 いたる，佐藤 正孝，柳瀬 洋輝（2012）：気仙沼災害海底地形計測，海洋調査，No. 109，pp. 27-30.

3) 原口 強，菅原大助，2011 東北津波を巨大化させた沿岸沈水地形,平成 25 年度日本応用地質学会研究発表会，名古屋大学，2013 年 10 月 25 日

4) 川崎千晴，原口 強，渡邊康司・佐藤正孝，高橋智幸：2011 年東北地方太平洋沖地震津波後 2 年間の気仙沼港内における地形変化，平成 25 年度日本応用地質学会研究発表会，名古屋大学，2013 年 10 月 25 日

5) 佐藤正孝，原口 強，渡邊康司・川崎千晴，高橋智幸：2011 年東北地方太平洋沖地震津波で形成された気仙沼西湾口部デューンの経時変化，平成 25 年度日本応用地質学会研究発表会，名古屋大学，2013 年 10 月 25 日

6) 木村圭吾・原口 強，日高公広，高橋智幸，松崎琢也・村山雅史：2011 東北津波に伴う気仙沼内湾津波堆積物の内部構造，平成 25 年度日本応用地質学会研究発表会，名古屋大学，2013 年 10 月 25 日