

## C, N量及びC, N安定同位体比の比較から推定された東北地方太平洋沖地震の津波による仙台湾の海底表層土の挙動

雁部総明\*<sup>1</sup>・太田裕達\*<sup>1</sup>・鈴木矩晃\*<sup>2</sup>・伊藤絹子\*<sup>3</sup>・佐々木浩一\*<sup>3</sup>・猪股恭平\*<sup>3</sup>・中川遼太郎\*<sup>3</sup>

Presumption of Sediment Movement in Sendai Bay caused by Pacific coast of Tohoku Earthquake Tsunami,  
according to Comparison of C,NQuantity and Stable Isotope Ratio

Somei GAMBE\*<sup>1</sup>, Hiroto OOTA\*<sup>1</sup>, Noriaki SUZUKI\*<sup>2</sup>, Kinuko ITO\*<sup>3</sup>, Koichi SASAKI\*<sup>3</sup>,  
Kyohei INOMATA\*<sup>3</sup> and Ryotaro NAKAGAWA\*<sup>3</sup>

キーワード：仙台湾，海底表層土，津波，C量，N量，C/N比，安定同位体比

平成23年3月11日の東北地方太平洋沖地震での津波は、仙台湾沿岸域の環境に大きな影響を与えた。宮城県水産技術総合センターでは、この津波による仙台湾への影響、とりわけ海底における底質等の変化を明確にするために、震災後の平成24年に仙台湾における海底の表層土についての粒度組成調査を行い、震災前の平成21年の粒度組成調査結果との比較を行っている。これによれば、仙台湾南部の浅海域ではシルト域が拡大していたほか、その他の海域でも部分的な動きがみられているが、湾全体としては大きな変化は見られていない(図1)。

一方、海岸近辺の干潟や藻場などでは津波による環境変化が報告されているほか、仙台湾の海底表層土中の麻痺性貝毒原因プランクトンである*Alexandrium* 属のシストの密度が著しく増加した原因が、海底土の津波による攪乱、沈降過程での表面への集積によるものとの推定がなされている(Kamiyama et al.<sup>1)</sup>)など、津波による海底土の拡散や攪乱が、仙台湾の海底表層土に粒度組成だけでは把握できない質的な変化をもたらした可能性がある。また、西ら<sup>2) 3)</sup>は、高精度の広域津波シミュレーションから東北地方太平洋沖地震での津波による仙台湾などでの海底堆積物の移動推定を試み、津波による強流速域や

底質がシルト質の海域で移動が大きくなる可能性や、仙台湾については広域で底質が移動した可能性があることを指摘している。さらに、東京海洋大学の東日本大震災被災地復興プロジェクト研究<sup>4)</sup>では、衛星情報の解析から海底に堆積したヘドロなどによる懸濁物質の仙台湾周辺への輸送を確認しており、発生当初から7日までの間に沿岸から10km程度の拡がりがあったこと、その後半月ほどの間に仙台湾内で沈降したことが示唆されるとしている。池原<sup>5)</sup>は今回の津波による仙台湾陸棚域の表層堆積物の調査を行い、いくつかの調査点で表面への泥の堆積を確認しており、今回の津波による可能性が高いとしている。

著者らがもつ震災前の仙台湾の底質関連データとしては、前述の粒度組成のほか平成21年に宮城県水産技術総合センターと東北大学大学院農学部水産資源生態学分野が連携して行った仙台湾全域での海底表層土のC, N量(C量は全有機炭素量, N量は全窒素量である。以下同じ。)調査データが存在する。さらに、粒度組成で変化の見られた仙台湾南部の浅海域については、同じく震災前の平成20年に宮城県水産技術総合センターと東北大学大学院農学部水産資源生態学分野が連携して行った海底

\*<sup>1</sup>水産技術総合センター, \*<sup>2</sup>東部地方振興事務所水産漁政部, \*<sup>3</sup>東北大学大学院農学研究科水産資源生態学分野

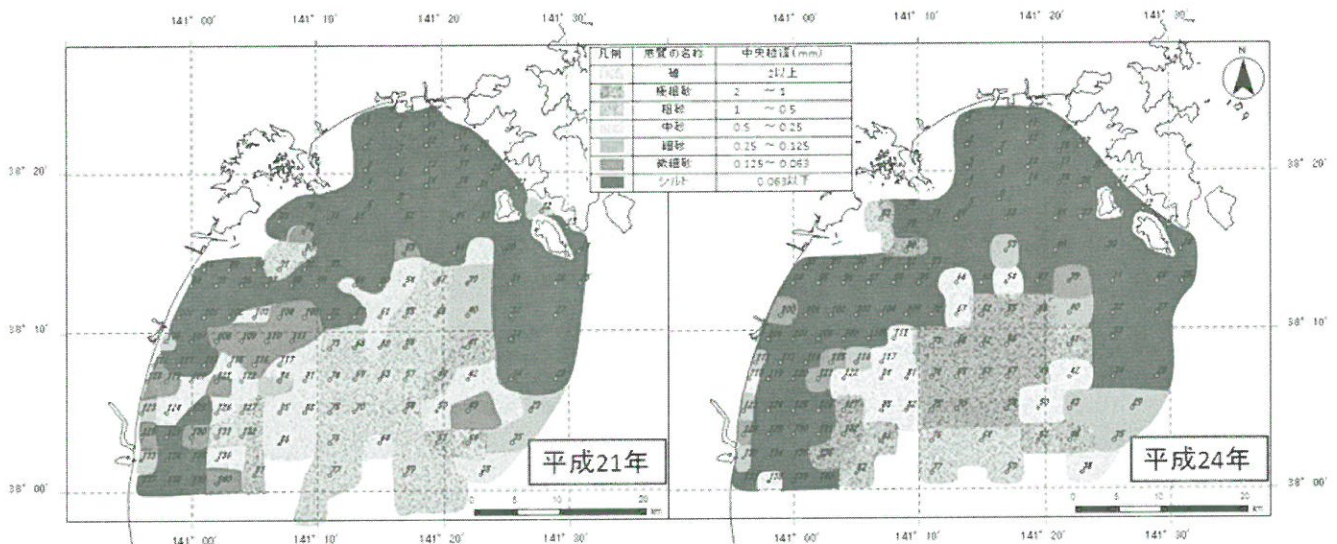


図1 平成21年と平成24年の仙台湾底質分布

土のC, N安定同位体比調査データが存在する。

そこで、震災後の平成24年にこれらと同一地点で海底表層土のC, N量と、C, N安定同位体比の測定を行い、震災前後でのデータの比較から、津波による海底表層土の挙動について推定を試みたので報告する。

なお、津波による仙台湾の海底土の挙動に関する調査事例の多くは推定段階のものであり、確定的な情報は少ないことから、ここでは西ら<sup>2) 3)</sup>の推定した底質移動海域や東京海洋大学<sup>4)</sup>の推定した懸濁物の沈降過程を前提条件として、考察することとした。

今回用いたC量は水や土に含まれる有機物量を反映し一般には環境指標として使われる。N量は無機及び有機窒素の総量であり同様に環境指標として使われる。これらの重量比であるC/N比は有機物の起源の指標としても使用される。安定同位体比は、自然界の物質循環を解析するための指標として、生態学、海洋学、陸水学などの研究で利用されている。特に、 $\delta^{13}\text{C}$ と $\delta^{15}\text{N}$ （それぞれ炭素と窒素の安定同位体比）は、大気、海洋、地殻などのシステム間あるいはシステム内部での物質の挙動を地球化学的に解析するための指標としてだけでなく、生物の捕食-被食関係を介しての食物網内の物質輸送を解析するための指標として広く活用されている。動物の体の安定同位体比は食物の値を反映し、栄養段階がひとつ上がると窒素安定同位体比（ $\delta^{15}\text{N}$ ）は約3.3‰上昇することが分かっている。そのため栄養段階の指標に用いられ

ている。一方、炭素安定同位体比（ $\delta^{13}\text{C}$ ）は捕食による濃縮がほとんどおこらないこと、陸上植物と植物プランクトンの $\delta^{13}\text{C}$ には大きな差異があることから、食物連鎖の起点の推定に利用されている。

また、 $\delta^{15}\text{N}$ については、水質環境の指標として適用されることも多い。水域の富栄養化に伴い、 $\delta^{15}\text{N}$ が上昇するという現象が一般的であるが、過度の富栄養状態では著しく低い $\delta^{15}\text{N}$ を示すことがあり、扱いには注意が必要である。

本研究では堆積有機物の由来を推定するために炭素安定同位体比を活用する。堆積物中には陸域から流入したもの、植物プランクトン沈降物、動物のフン粒など様々な有機物が混在していると考えられるが、 $\delta^{13}\text{C}$ により陸由来有機物の寄与が高いのか、海産植物プランクトンの寄与が高いのかを判別できる。また、窒素安定同位体比は堆積有機物が生成された水質環境の指標として活用する。

## 材料と方法

C, N量の分析に用いたサンプルは、平成24年8月から9月にかけて宮城県水産技術総合センターが東北大学の調査船「翠皓」により、図2に示す仙台湾全域140点でミス・マッキンタイヤ型採泥器を用いて海底土を採取し、表面から概ね2~3cmの深さまでの500g程度をポリカ

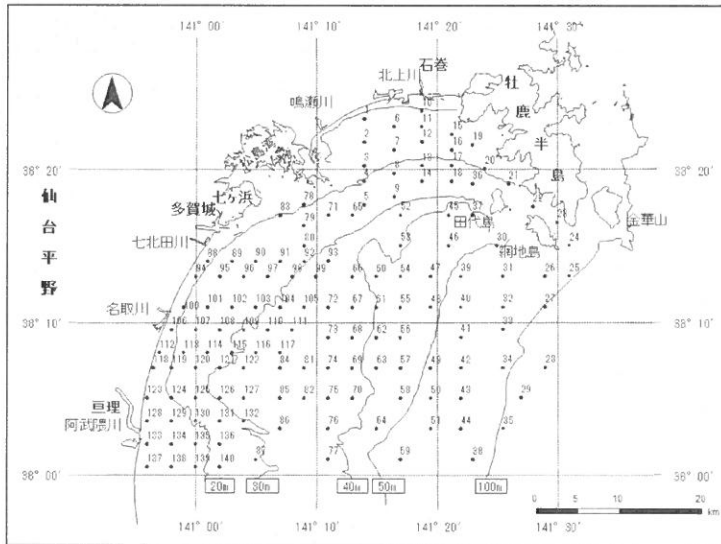


図2 平成24年仙台湾底質調査点図（平成21年と同一地点）

一ボネート瓶に取り、均一に攪拌し冷凍保存したものであり、このサンプルを東北大学において、1Nの塩酸により処理後、元素分析装置(Thermo Fisher Scientific社製FLASH 2000)で測定した。

この測定結果と平成21年に同一調査点で同様にサンプルを採取し、同一の機器で測定したC, N量とを比較して、震災前後での海底の表層土の変化を推定した。

結果の比較にあたっては、海洋データ解析プログラムOceanDataView<sup>6)</sup>を用いて各年のC量(mg C/g 乾泥)・N量(mg N/g 乾泥)とこれらの増減量およびC量とN量の重量比によるC/N比のコンター図を作成した(図の緯度経度表示は解析プログラムによるため、調査点図の表記方法とは異なる)。また、C, N安定同位体比の分析に用いたサンプルは、平成24年10月に図3に示す仙台湾南部の七北田川河口付近から阿武隈川河口付近の浅海域の8点で、宮城県水産技術総合センターが漁業調査船「拓洋丸」などにより、エクマンバージ採泥器で海底表面土を採取し、表面から概ね2~3cmの深さまでの500g程度をポリカーボネート瓶に取り、均一に攪拌し冷凍保存したものであり、このサンプルを東北大学において1Nの塩酸により処理後、同位体比質量分析計(FinniganMat社製DELTA plus)で安定同位体比 $\delta^{13}\text{C}$ と $\delta^{15}\text{N}$ を測定した。この測定結果から底土の起源を推定したほか、平成20年に同一調査点で同様にサンプルを採取し同一の機器で測定された結果との比較から、この海域での海底の表層土

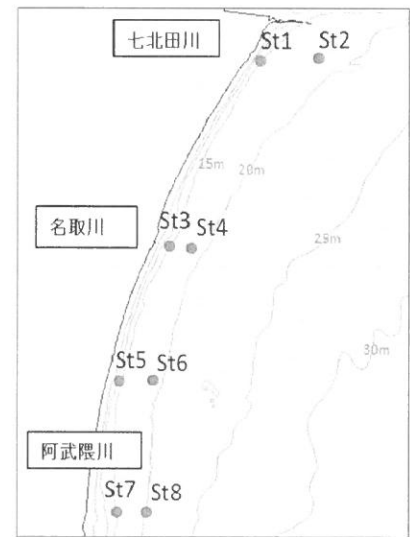


図3 仙台湾南部浅海域での安定同位体比調査点

の動きを推定した。

## 結果

### 1 C, N量

平成24年と平成21年の調査点ごとのC, N量測定結果は表1に示したとおりであった。なお、測定値については小数点第3位を四捨五入して第2位までで示してある。

#### 1) C量の分布と平成21年に対する平成24年の増減

平成24年のC量は0.20~53.15mg C/g 乾泥であり、平成21年の0.25~42.28mg C/g 乾泥と比べ最大値が25%程度増加したものの、全体的には大きな差はみられなかった。

図4に示すC量のコンター図を比較すると、沿岸域では平成21年にみられた田代島と網地島間の25~40mg C/g 乾泥の高い値の円状分布は平成24年には10~20mg C/g 乾泥程度に大きく低下していたほか、鳴瀬川の東から牡鹿半島の先端にかけての海岸地先では、平成21年の20mg C/g 乾泥程度から平成24年には5~15mg C/g 乾泥程度に低下し、特に牡鹿半島の付け根より西側で大きく低下していた。

また、七ヶ浜地先では平成21年の20mg C/g 乾泥程度から平成24年には概ね5mg C/g 乾泥未満に大きく低下していたほか、平成21年にみられた名取川河口の北側の海岸地先の25~40mg C/g 乾泥程度の高い値の半円状分布は



表1 仙台湾海底表層度分析結果

平成21年測定結果				平成24年測定結果											
調査点	C量 (mgC/gDW)	N量 (mgN/gDW)	C/N Ratio	調査点	C量 (mgC/gDW)	N量 (mgN/gDW)	C/N Ratio	調査点	C量 (mgC/gDW)	N量 (mgN/gDW)	C/N Ratio	調査点	C量 (mgC/gDW)	N量 (mgN/gDW)	C/N Ratio
St.1	13.15	1.23	10.68	St.71	8.60	0.87	9.93	St.1	5.06	0.38	13.31	St.71	20.13	2.26	8.91
St.2	13.70	1.34	10.23	St.72	5.53	0.64	8.62	St.2	20.80	1.86	11.16	St.72	4.78	0.58	8.21
St.3	9.04	0.94	9.57	St.73	0.44	0.08	5.42	St.3	20.43	1.87	10.92	St.73	0.40	0.07	5.63
St.4	8.03	0.75	10.73	St.74	1.31	0.10	13.19	St.4	17.31	1.60	10.79	St.74	0.59	0.07	9.01
St.5	11.18	1.12	9.95	St.75	0.45	0.09	5.05	St.5	21.18	2.14	9.90	St.75	0.85	0.10	8.87
St.6	24.60	2.21	11.15	St.76	1.26	0.11	11.70	St.6	14.64	1.13	12.95	St.76	0.53	0.07	7.80
St.7	15.22	1.34	11.32	St.77	0.49	0.10	5.14	St.7	12.78	1.00	12.74	St.77	0.78	0.09	8.21
St.8	22.25	2.05	10.83	St.78	21.05	1.90	11.09	St.8	26.05	2.22	11.72	St.78	28.98	3.12	9.30
St.9	21.35	2.03	10.53	St.79	8.85	0.70	12.74	St.9	16.91	1.42	11.93	St.79	22.62	2.20	10.30
St.10	23.65	2.14	11.06	St.80	5.14	0.10	50.29	St.10	11.89	0.97	12.30	St.80	0.58	0.06	9.38
St.11	18.05	1.71	10.54	St.81	0.69	0.06	12.40	St.11	12.42	1.02	12.23	St.81	3.22	0.38	8.59
St.12	17.57	1.60	10.95	St.82	1.03	0.12	8.93	St.12	17.41	1.41	12.33	St.82	0.87	0.09	9.70
St.13	22.03	2.06	10.67	St.83	23.85	1.90	12.56	St.13	30.49	2.70	11.31	St.83	0.50	0.05	10.07
St.14	22.77	1.98	11.52	St.84	3.36	0.29	11.69	St.14	23.94	1.95	12.30	St.84	1.58	0.15	10.62
St.15	22.96	2.22	10.36	St.85	0.99	0.07	13.29	St.15	16.19	1.27	12.72	St.85	1.05	0.11	9.27
St.16	25.35	2.46	10.31	St.86	1.92	0.10	18.55	St.16	19.44	1.62	12.03	St.86	0.94	0.11	8.96
St.17	22.82	2.29	9.98	St.87	0.41	0.05	7.55	St.17	22.30	2.11	10.57	St.87	0.41	0.04	9.88
St.18	23.67	2.29	10.34	St.88	27.59	3.01	9.17	St.18	19.11	1.67	11.47	St.88	17.31	1.60	10.82
St.19	21.44	1.98	10.84	St.89	9.77	1.15	8.50	St.19	14.48	1.23	11.78	St.89	19.75	1.91	10.35
St.20	19.82	1.73	11.45	St.90	9.93	1.02	9.74	St.20	14.92	1.35	11.08	St.90	21.50	2.17	9.93
St.21	21.83	1.99	10.96	St.91	0.25	0.06	4.17	St.21	16.49	1.45	11.34	St.91	17.09	1.69	10.12
St.22	39.92	1.15	34.75	St.92	10.42	1.25	8.34	St.22	15.79	1.45	10.86	St.92	12.04	1.28	9.44
St.23	27.48	1.67	16.50	St.93	7.01	0.81	8.65	St.23	16.58	1.47	11.31	St.93	11.79	1.22	9.64
St.24	24.68	1.99	12.42	St.94	42.28	4.60	9.19	St.24	17.12	1.53	11.19	St.94	26.22	2.61	10.04
St.25	26.39	3.04	8.67	St.95	6.26	0.74	8.46	St.25	18.24	1.84	9.91	St.95	20.36	1.97	10.35
St.26	23.00	2.18	10.57	St.96	5.82	0.74	7.86	St.26	18.88	1.88	10.06	St.96	24.24	2.32	10.46
St.27	20.60	1.84	11.17	St.97	4.73	0.64	7.39	St.27	22.01	2.24	9.84	St.97	20.88	1.96	10.66
St.28	10.26	1.05	9.75	St.98	5.13	0.70	7.33	St.28	17.43	1.63	10.69	St.98	22.04	2.12	10.41
St.29	6.78	0.70	9.65	St.99	11.49	1.17	9.82	St.29	6.54	0.62	10.52	St.99	8.92	0.94	9.51
St.30	25.24	1.69	14.90	St.100	6.06	0.64	9.47	St.30	15.83	1.49	10.64	St.100	3.89	0.32	11.98
St.31	15.08	1.33	11.34	St.101	2.93	0.37	7.92	St.31	14.40	1.31	11.00	St.101	14.94	1.32	11.32
St.32	18.61	1.87	9.95	St.102	4.19	0.60	6.98	St.32	17.90	1.74	10.31	St.102	19.97	1.84	10.84
St.33	21.08	1.89	11.13	St.103	0.53	0.12	4.42	St.33	13.30	1.35	9.89	St.103	17.34	1.49	11.67
St.34	17.33	1.67	10.35	St.104	4.82	0.61	7.90	St.34	5.74	0.53	10.88	St.104	6.99	0.65	10.80
St.35	4.21	0.43	9.80	St.105	2.49	0.38	6.55	St.35	20.39	1.83	11.13	St.105	5.76	0.59	9.70
St.36	23.33	2.23	10.46	St.106	1.16	0.20	5.80	St.36	15.64	1.33	11.78	St.106	18.72	1.67	11.20
St.37	18.93	1.68	11.24	St.107	7.14	0.85	8.40	St.37	4.39	0.38	11.60	St.107	27.95	2.27	12.31
St.38	5.29	0.50	10.58	St.108	2.50	0.38	6.58	St.38	8.70	0.71	12.24	St.108	15.91	1.32	12.09
St.39	4.12	0.45	9.19	St.109				St.39	4.40	0.36	12.39	St.109	18.00	1.54	11.70
St.40	5.05	0.52	9.71	St.110	2.64	0.40	6.60	St.40	9.03	0.56	16.23	St.110	3.52	0.33	10.78
St.41	8.93	0.91	9.81	St.111	3.12	0.32	9.75	St.41	3.15	0.37	8.46	St.111	0.51	0.04	12.76
St.42	3.71	0.39	9.61	St.112	3.04	0.38	8.00	St.42	2.82	0.27	10.46	St.112	1.73	0.16	10.94
St.43	4.81	0.54	8.84	St.113	13.21	1.37	9.64	St.43	4.96	0.53	9.34	St.113	19.99	1.65	12.13
St.44	9.99	0.68	14.78	St.114	19.37	1.85	10.47	St.44	2.12	0.25	8.51	St.114	28.38	2.36	12.04
St.45	19.57	1.99	9.82	St.115	1.60	0.24	6.67	St.45	21.19	2.23	9.49	St.115	5.72	0.49	11.72
St.46	19.92	1.87	10.67	St.116	4.46	0.60	7.43	St.46	22.41	2.34	9.59	St.116	1.26	0.12	10.63
St.47	0.89	0.12	7.17	St.117	2.67	0.37	7.22	St.47	17.33	1.89	9.16	St.117	1.01	0.09	11.53
St.48	1.37	0.14	10.00	St.118	3.41	0.41	8.32	St.48	0.51	0.05	10.10	St.118	0.20	0.01	15.04
St.49				St.119	8.26	0.82	10.07	St.49	1.16	0.20	5.79	St.119	8.95	0.72	12.36
St.50	0.79	0.10	8.11	St.120	0.76	0.10	7.60	St.50	0.54	0.10	5.50	St.120	8.97	0.72	12.48
St.51	9.27	0.43	21.42	St.121	2.13	0.30	7.10	St.51	0.91	0.14	6.33	St.121	4.49	0.50	9.06
St.52	22.70	2.19	10.34	St.122	0.31	0.06	5.17	St.52	23.68	2.61	9.07	St.122	1.91	0.17	11.03
St.53	9.98	1.03	9.65	St.123	1.73	0.22	7.86	St.53	8.26	0.88	9.39	St.123	1.18	0.11	10.87
St.54	0.58	0.11	5.12	St.124	5.37	0.57	9.42	St.54	0.92	0.11	8.54	St.124	9.23	0.72	12.78
St.55	0.65	0.12	5.56	St.125	6.77	0.74	9.15	St.55	0.90	0.14	6.62	St.125	53.15	3.95	13.44
St.56	0.42	0.11	3.77	St.126	0.47	0.08	5.88	St.56	0.44	0.07	6.29	St.126	0.87	0.10	8.77
St.57	0.73	0.15	4.84	St.127	0.38	0.08	4.75	St.57	0.51	0.09	5.96	St.127	1.24	0.11	11.46
St.58	0.81	0.13	6.41	St.128	1.85	0.27	6.85	St.58	0.43	0.06	7.01	St.128	2.04	0.14	14.23
St.59	0.46	0.06	7.25	St.129	10.78	1.03	10.47	St.59	0.33	0.05	6.24	St.129	15.75	1.20	13.12
St.60	22.25	2.11	10.54	St.130	7.03	0.79	8.90	St.60	19.97	2.15	9.29	St.130	15.58	1.17	13.28
St.61	0.74	0.12	6.31	St.131	0.26	0.06	4.33	St.61	0.50	0.06	8.49	St.131	0.95	0.09	11.01
St.62	0.71	0.12	5.71	St.132	0.35	0.07	5.00	St.62	0.41	0.05	7.66	St.132	0.44	0.04	12.01
St.63	1.52	0.11	13.38	St.133	0.46	0.08	5.75	St.63	0.53	0.06	8.36	St.133	4.60	0.31	14.82
St.64	0.47	0.11	4.23	St.134	20.92	2.04	10.25	St.64	0.42	0.06	7.56	St.134	15.27	1.25	12.26
St.65	13.82	1.33	10.42	St.135	8.87	0.90	9.86	St.65	17.60	2.01	8.76	St.135	9.17	0.77	11.93
St.66	2.52	0.33	7.71	St.136	0.32	0.05	6.40	St.66	1.78	0.19	9.14	St.136	0.78	0.08	10.45
St.67	7.70	0.84	9.16	St.137	10.23	1.31	7.81	St.67	4.08	0.46	8.89	St.137	22.81	2.32	9.81
St.68	0.42	0.09	4.81	St.138	10.13	1.21	8.37	St.68	1.13	0.13	8.59	St.138	2.08	0.14	14.55
St.69	0.37	0.09	4.17	St.139	9.36	1.08	8.67	St.69	0.84	0.11	7.89	St.139	14.12	1.33	10.58
St.70	0.49	0.09	5.56	St.140	5.82	0.81	7.19	St.70	0.48	0.06	7.73	St.140	8.99	0.79	11.42

\* St.49, 109は欠測

平成24年には20mg C/g乾泥程度に低下していた。

一方、38° Nの福島県境地先では、平成21年の10mg C/g乾泥以下から平成24年には20mg C/g乾泥程度まで上昇していた。海岸地先よりやや沖側の海域では、阿武隈川河口沖の141° E付近に平成21年にはみられなかった15

～40mg C/g乾泥程度の高い値の円状分布が、平成24年には新たにみられた。

また、鳴瀬川河口の沖側から松島湾の外海東側にかけでは、平成21年の10mg C/g乾泥未満から平成24年には20mg C/g乾泥程度に上昇していた。



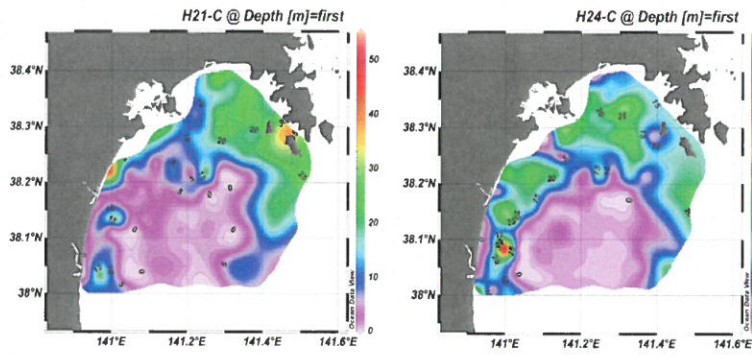


図4 平成21年(左図)と平成24年(右図)のC量(mgC/g 乾泥)分布

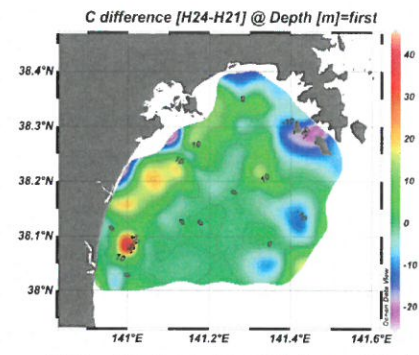


図5 平成24年の平成21年に対するC量(mgC/g 乾泥)の増減

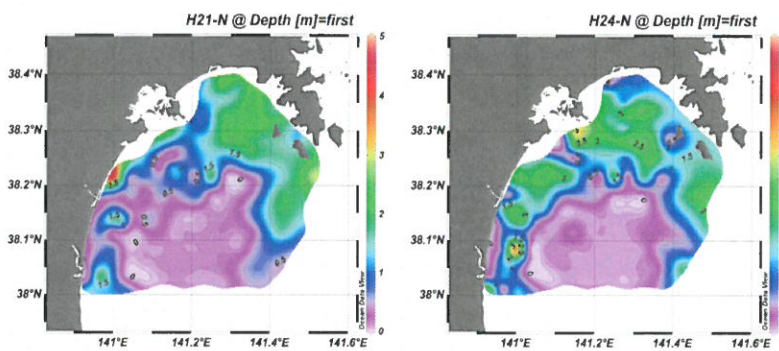


図6 平成21年(左図)と平成24年(右図)のN量(mgN/g 乾泥)分布

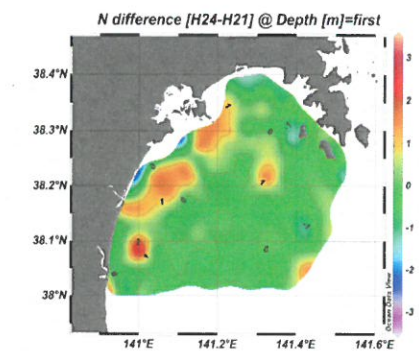


図7 平成24年の平成21年に対するN量(mgN/g 乾泥)の増減

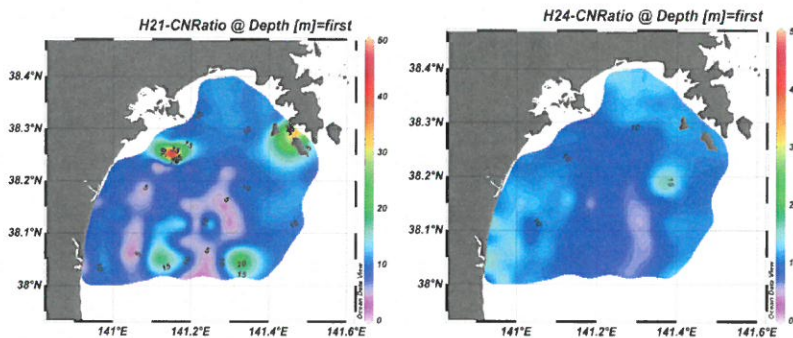


図8 平成21年(左図)と平成24年(右図)のC/N比の分布

表2 安定同位体比測定結果

	平成20年		平成24年	
	$\delta^{13}\text{C}(\text{‰})$	$\delta^{15}\text{N}(\text{‰})$	$\delta^{13}\text{C}(\text{‰})$	$\delta^{15}\text{N}(\text{‰})$
St 1	-25.78	-0.63	-23.05	7.84
St 2	-23.84	6.27	-24.76	4.91
St 3	-23.35	5.62	-23.24	5.61
St 4			-24.10	4.08
St 5	-23.20	3.06	-24.09	5.66
St 6	-23.38	4.45	-24.30	5.22
St 7			-24.57	5.87
St 8	-26.77	5.58	-26.09	3.98

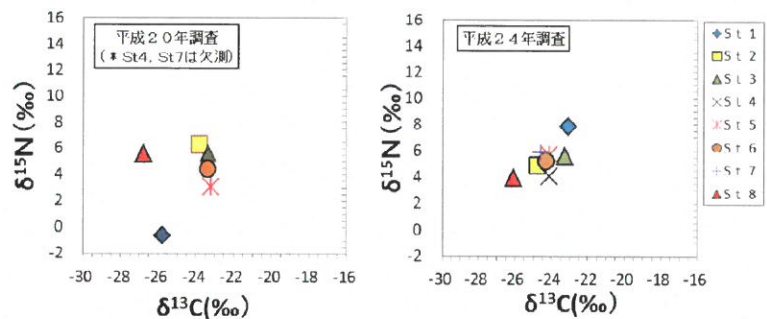


図9 平成20年と平成24年のC, N安定同位体比



さらに、名取川河口北側から阿武隈川河口にかけて沖側海域には、平成21年にはみられなかった南北に連なる20mgC/g 乾泥以上の分布が平成24年には出現していた。

これらよりさらに沖側の海域については、仙台湾中央部は平成21年と平成24年で概ね5mgC/g 乾泥以下でC量も分布域も大きな変化はみられなかったが、田代島の真南の沖合38° N付近では平成21年には5mgC/g 乾泥以下であったものが20mgC/g乾泥程度まで上昇していた。こうした変化は両年の同一地点での値の増減から作成したコンター図で一層明瞭となっている(図5)。

## 2) N量の分布と平成21年に対する平成24年の増減

N量は平成24年が0.01~3.95mgN/g乾泥であり、平成21年が0.05~4.60mgN/g乾泥とN量は最小値、最大値ともに平成24年のほうが小さかったが、全体的には大きな差はみられなかった。図6に示すN量のコンター図を比較すると、沿岸域では田代島周辺で平成21年には1.5~2mgN/g乾泥程度だったものが、平成24年には1mgN/g乾泥未満の円形状の低い値となっていたほか、鳴瀬川河口の東から牡鹿半島の先端にかけての海岸地先では、平成21年の1.5~2mgN/g乾泥程度から平成24年には概ね1mgN/g乾泥以下に低下し、特に牡鹿半島の付け根より西側で大きく低下していた。また、七ヶ浜地先では平成21年の2mgN/g乾泥程度から平成24年には0.5mgN/g乾泥未満に大きく低下していたほか、平成21年にみられた名取川河口北側の海岸地先の2~5mgN/g乾泥程度の高い値の半円状分布は平成24年には概ね2mgN/g乾泥に低下していた。

一方、38° Nの福島県境地先では、平成21年の1.5mgN/g乾泥程度から平成24年には2~2.5mgN/g乾泥程度まで上昇していた。海岸地先よりやや沖側の海域では、阿武隈川河口沖の141° E付近には平成21年にはみられなかった2~3mgN/g乾泥程度の高い値の円状分布が平成24年には新たにみられた。

また、鳴瀬川河口の沖合から松島湾の外海東側にかけは、平成21年の1~1.5mgN/g乾泥程度から平成24年には2~3mgN/g乾泥程度に上昇していた。

さらに、名取川河口北側から阿武隈川河口にかけてのやや沖側海域には、平成21年にはみられなかった南北に連なる1~2mgN/g乾泥程度の分布が平成24年には新たにみられた。これらより沖側の海域については、仙台湾中央部は平成21年と平成24年で概ね0.5mgN/g乾泥以下で

N量も分布域も大きな変化はみられなかったが、田代島の南西沖合で平成21年に1mgN/g乾泥程度から平成24年には2mgN/g乾泥程度に上昇しており、また、田代島の真南の沖合38° N付近では平成21年には概ね0.5mgN/g乾泥以下であったものが1~2mgN/g乾泥程度まで上昇していた。これらのN量の分布の変化は、両年の同一地点での値の増減から作成したコンター図で一層明瞭となっていた(図7)。また、N量の分布の変化はC量の分布の変化とほとんど一致していた。

## 3) C/N比の分布

C, N量のデータからC/N比(重量比:以下同)を求めると、平成21年には、3.77~50.29だったものが、平成24年には5.50~16.23となっており、全体的にC/N比は低下し、仙台湾全体では震災後に幅の小さい分布へと変化していた。コンター図(図8)を比較すると、平成21年にみられた田代島と網地島の間と七ヶ浜沖の円形状の高い値の分布や仙台湾中央の南側にあった円形状のやや高い値の分布は、平成24年には消滅しており、仙台湾全体では震災前に比べて均一化していた。さらに、10~15程度の比較的高い値は沿岸沿いに、5~10の比較的低い値は湾中央部に分布していた。

## 2 仙台湾南部浅海域でのC, N安定同位体比

平成24年の8調査点と平成20年の6調査点の測定結果は表2に示したとおりであり、安定同位体比 $\delta^{13}\text{C}$ と $\delta^{15}\text{N}$ の関係を図9に示した。平成20年には特に $\delta^{15}\text{N}$ の値が-0.6~6.3‰程度と広い幅を示していた。St.1では $\delta^{15}\text{N}$ が著しく低く、他の定点の値から大きく外れていた。これは、この定点付近が過度な富栄養状態にあった可能性を示唆している。七北田川河口域に位置しており、都市排水の影響の可能性も考えられた。調査点ごとの $\delta^{13}\text{C}$ 値は-23~-27‰の範囲であり、陸域由来有機物の寄与が高いと判断された。一方、平成24年には、 $\delta^{15}\text{N}$ は4.0~7.8‰と、著しく低い値はなくなり、中緯度の一般的な海域の値を示していた。 $\delta^{13}\text{C}$ の値は-23~-26‰の範囲にあり、平成20年と同様、陸域由来有機物の寄与が高いと考えられた。

海産の植物やプランクトンの $\delta^{13}\text{C}$ は、海水温が15~25℃では-19~-21‰を示すとされ、一方、陸上のC3型植物では-24~-34‰を示すとされている(和田ら<sup>7)</sup>)。平成20年、平成24年の各調査点の底土の数値は、底土に

含まれる有機炭素の起源は多くが陸上植物由来であることを示しており、この海域（仙台湾に流入する河川の前面海域）では、陸上植物由来の有機物の影響が大きいことを示唆する結果となっていた。

## 考 察

仙台湾での粒度組成による底質分布とC量やN量の分布をみると、砂礫ではC量、N量は値が小さく、泥分が増すにつれて値は増大しシルトで最も大きな値を示している。一方、今回の結果からは津波の前後で同じ底質であってもC量、N量の変化している場所がみられる。こうした変化は津波による底土の移動や拡散あるいは底土の攪乱とその後の沈降などによって生じたことが考えられる。

津波による底土の動きやすさについては、西ら<sup>2) 3)</sup>はシルズ数（底質移動の活発さ）の空間分布から強流速域の仙台湾西部やシルト域の仙台湾北部、仙台湾陸棚縁辺部で底質移動が大きくなる可能性があることを示し、仙台湾の海域では津波により礫帯と水深150m以深の一部を除いた広域で底質移動が生じたと推定している。また、東京海洋大学の研究報告<sup>4)</sup>では、津波により発生した懸濁物は金華山から福島県にかけての沿岸域において最大幅約10 kmで発生したこと、牡鹿半島周辺では発生後仙台湾の南西方向・南東沖合方向、牡鹿半島東側を北上の3方向に拡がったとしている。10~17日後に減少したことから外洋への流出より仙台湾内での沈降の方が卓越していたとしており、沈降は特に石巻から多賀城の地先海域で多かったとしている。これらの懸濁物の発生や移動海域は、西ら<sup>2) 3)</sup>の推定した海域と良く一致している。

さらに、池原<sup>5)</sup>は2012年(平成24年)に仙台湾陸棚域の表層堆積物について調査し、1985年の同一調査点でのデータと比較をしている。その結果、仙台湾陸棚域において大規模な底質変化はなかったが、金華山西方沖や仙台湾中部陸棚域の数地点で表面に明らかな泥の堆積を認めたとしている。この泥の堆積については、より沖合の仙台湾外側陸棚域での同様な変化についての放射性物質による確認結果から、今回の津波によるものである可能性が高いとしている。

これらのことを考え合わせると、底土の移動は津波の攪乱により海岸から10km以内で発生した懸濁物が、短期間のうちに仙台湾の海岸地先あるいは輸送された海域で沈降したと推定するのが合理的であると考えられる。

今回の調査結果でC, N量の変化が大きい海域と東京海洋大学の報告にある懸濁物の高い海域や池原が堆積を認めた地点、西らの示した海域はほぼ一致しており、また、C/N比でみられた震災後の均一化は、特に水深の浅いところで顕著であり、この海域での懸濁物の発生とその移動・沈降といった底土の動きがあったことを支持するものと考えられる。この底土の攪乱と沈殿過程については、震災後の仙台湾沿岸域の底土表層では麻痺性貝毒原因プランクトン*Alexandrium*属のシストの密度が震災以前に比べて最大で10倍となった原因について、津波による底土の攪拌とその後の移動・沈降過程で比重の軽いシストがゆっくりと表面に集積されたと推定していること(Kamiyama et al.<sup>1)</sup>)とも整合している。ここでは以上の理由からC, N量の変化が津波による海底表層土の攪乱とその後の移動や沈降といったメカニズムのもとに起こった海底表層土の挙動を反映しているものとして推定する。

推定にあたってはC/N比の分布も併せて検討する。C/N比については有機物の起源によって値が異なり、陸上高等植物起源の有機物のC/N比は高く12超(碓井<sup>8)</sup>)であり、植物プランクトン由来のC/N比は3.6~7.7であるとされていること(和田ら<sup>7)</sup>)から、これを基準としてC/N比の大きいほど陸上起源土の影響が強いと判断することとする。

初めに、C, N量の変化の大きかった陸地に近い沿岸の地先海域について検討する。

名取川河口北側から阿武隈川河口にかけてのやや沖側にみられた震災後のC, N量の高い値の分布については、平成21年には隣接海域にはシルト域が少なかったこと、また、海岸線に沿って存在した海岸堤防が津波によって破壊され陸土の流出があったことから、懸濁物の発生は陸土や河川の底土の流入によっても生じた可能性が考えられる。この海域でのC/N比をみると12以上の広がりが見られており、陸土や河川の底土の流入の影響があったと思われる。

また、安定同位体比の結果は、この海域に陸域の影響



の強い土が新たに流入してきて、均一化する大きな変化があったものと思われる。これらのことから、この海域の底土は陸上起源の底土の影響を受けたことが推察される。池原<sup>5)</sup>は亘理地先の調査点で見られた新たな泥の堆積物について、仙台湾北部の泥分布域からの距離や中間の調査点に新たな泥の堆積場所が認められないことから、阿武隈川河口地先から供給された可能性があるとして推定している。これらのことから類推すると、発生した懸濁物の中には少なからず陸土や河川の底土の入り込みがあったものと考えられる。

牡鹿半島西側でのC、N量の分布の比較からは、震災前の分布が一体となっていたものが、震災後に田代島を境にして南東方向の分布と北西方向の分布に分かれていることが判る。東京海洋大学の報告<sup>4)</sup>では、懸濁物の松島湾側への流れは確認されていないことから、全体としては牡鹿半島の南東沖合方向への底土の移動があったものと考えられる。

震災後に田代島と網地島周辺でみられた極端なC、N量の減少については、懸濁物の移動方向の一つにこの海域から仙台湾方向へ移動したものがあったとしていることから、このC、N量の減少は底土が懸濁物となって流失したことによるものと推定される。C/N比の分布からは、震災前の田代島と網地島周辺の極めて陸上起源土の影響が強いと考えられる円形状の分布が震災後の南西沖の15程度の陸上起源土の影響を示すと考えられる円形状の分布の新たな出現がみられており、懸濁物の南西方向への移動を裏付けるものと思われる。池原<sup>5)</sup>も田代島と網地島の西側の調査点でも新たな泥の堆積を確認しており、懸濁物の一部はこの近辺に沈降した可能性があると思われる。

次に、平成24年に両島の南東方向に広がるC、N量の高い分布について検討する。東京海洋大学<sup>4)</sup>の報告では、懸濁物の拡がり、牡鹿半島南東沖合方向と牡鹿半島東側を北上方向があったとしている。このことから、震災後のC、N量の分布は南東沖合方向に流れた懸濁物が沈降した可能性が高いものと推定される。一方、牡鹿半島東側を北上した懸濁物の影響は不明である。いずれにしても、牡鹿半島西側のシルトの底土の一部は、仙台湾の外側沖合南東方向へ移動した可能性が高いと考えられる。

鳴瀬川河口から田代島にかけてみられる震災後のC、

N量の高い分布は、東京海洋大学の報告<sup>4)</sup>で石巻～多賀城の海域で懸濁物濃度の低下が著しかったことによるものと考えられる。一方、津波で発生した懸濁物は海底土の巻き上げのほかに、北上川や鳴瀬川、松島湾からの底土や石巻～鳴瀬川河口の陸土の流入も考えられるので、この点について検討してみる。C、N量の増減分布をみると、鳴瀬川河口から松島湾外海にかけては楕円形のはっきりとした増加域が認められ、C/N比の分布では、この楕円形分布の西側の値は震災前後とも7程度で変化がなく海底土起源、つまり、松島湾の底土流出物も含む海底土起源の懸濁物が沈降した可能性が考えられる。

一方、C、N量の高い分布のうち東側の部分は、平成24年のC/N比の分布図で石巻地先から広がる10以上の分布に重なる部分と7程度の分布と重なる部分がある。また、石巻地先では平成24年には明らかなC、N量の減少がみられる。こうしたことから、陸土や河川の底土あるいは海底土を起源とした入り組んだ沈降過程があったものと考えられる。

七ヶ浜地先では沖側に底土の流出があったものと考えられる。特に田代島から網地島近辺や七ヶ浜地先から松島外海にかけては、仙台湾の中でも海岸線が複雑な地形であることから、津波による強い流れが生じて海底土が流出したのかもしれない。

次に、地先より沖合の海域では田代島の真南の沖合38°N付近にみられたC、N値の高い値の分布は、牡鹿半島西側の底土の懸濁物が流れて沈降して生じたものか、または、湾内で生じた他の底土の懸濁物があらたに沈降したものと推定される。Kamiyama et al.<sup>1)</sup>は*Alexandrium*属のシストの調査点での増大には、水平方向の移動過程があったと推定している。また、このC、N値の高い分布付近でも調査を行っているが、津波の前にみられなかった大量のシストが確認されたとしている。これらのことから、仙台湾のシルト帯の底土が懸濁移動して沈降したことがあったと推察される。西ら<sup>2) 3)</sup>の推定した底質移動の推定、東京海洋大学の確認した懸濁物の拡がりや沈降、さらには、池原<sup>5)</sup>の調査ではこの海域の内湾側に隣接する調査点での泥の堆積が確認されていないことから、牡鹿半島西部の底土の懸濁物の可能性が高いと推定される。

一方、仙台湾中央部は大きな変化はみられなかった。



これは海岸地先ほど底土の影響がなかったものと推定される。東京海洋大学の報告<sup>4)</sup>では、この海域での懸濁物の沈降は少ないと思われること、C/N比の変化をみると平成24年には平成21年に比べて東側では変化が少ないことから、その可能性が大きいものと思われる。

これらの結果と仙台湾での底質の変化を考え合わせると、海岸地先では津波の攪乱により、表層底土が懸濁物となり移動や流出したところと河川や陸域からも陸土が混入したところがあったと考えられる。海岸地先の地形が複雑な島の間や岬の周辺部などでは強い流れが生じてより多くの海底土が動いたものと考えられる。一方、仙台湾中央部では変化が少なかったことから、陸域からの流入や海底土の移動の量は、湾の底質全体を一変させるほど多くはなかったものと考えられる。C, N量の変化が大きかったのは、仙台湾の海岸から水深20~30m程度までの海域であったことから、海岸地先で押し波や引き波による底土の移動や攪乱が強く起こり、引き波の過程では海岸のごく近辺からは海底土が流出し、多くの海底土が20~30mの水深帯に沈降、堆積したものと考えられる。

一方、田代島の真南の沖合38° N付近でのC, N量の増加は、これが移動によるものだとすると牡鹿半島西側で引き波による沖側への流れが強かった可能性を示しているとも考えられる。こうした差は仙台平野の前面にあるなだらかな海岸線の遠浅な仙台湾南部海域と水深がより深く牡鹿半島の複雑な海岸線に接する仙台湾北部海域の地形的な特徴によりもたらされたものと推定され、西ら<sup>2)</sup>の津波シミュレーションによる最大流速の分布図において牡鹿半島周辺で流速が大きいことが示されていることと一致する。

海底の表層土では、津波による移動とともに攪乱後の沈殿による底土の均一化も起こっていたと推定される。

また、名取川河口北側から阿武隈川河口にかけての地先からやや沖合にかけては、C/N比が平成21年の5程度から平成24年には15程度と増加しており、湾内でも高い値を示していることから、やはりC, N量で推定した河川の底土や陸土の流入が推定される。

今回の推定は一定の仮定をおいて、仮定のもととなった複数の他の知見などとの整合性をみながら実施した。その結果は、互いにほとんど矛盾がなく説明できる関係にあった。従って、C量やN量等の経時変化の把握は、津

波などによる底土の挙動推定の有用な手段になると思われる。

## 要 約

津波による仙台湾の海底表層土の変化を把握するため、津波発生前後での140調査点でのC量, N量, C/N比の測定結果や8調査点でのC, N安定同位体比を比較した。津波の前後でデータには変化がみられ、津波による海底表層土の攪乱による懸濁物の発生と沈降・堆積過程を伴う移動や流出が推定された。また、海域によっては懸濁物には河川の底土や陸土の混入も生じたものと考えられた。これらの結果は、仙台湾での津波シミュレーションによる底質移動の推定、衛星情報解析による懸濁物の発生・移動、堆積物構造に関する研究報告の内容とも良く整合するものであった。

陸地に近い沿岸の地先海域の牡鹿半島西側、鳴瀬川河口地先から松島湾外海、七ヶ浜地先では移動や流出、名取川北側から阿武隈川河口にかけてのやや沖側では併せて河川の底土や陸土の混入が推定された。また、沖合の海域では田代島の真南の沖合38° N付近に牡鹿半島西側の底土が起源と推定される分布がみられたが、仙台湾中央部は大きな変化はなく海岸地先ほどの影響はなかったものと推定された。

津波による底土の強い攪乱後の移動に伴う底土の沈降・堆積は、水深20~30mの近辺を中心にみられ。C/N比の分布からは、津波による海底表層土の攪乱と沈殿による底土の均一化が起こったと推定された。

## 謝 辞

独立行政法人水産総合研究センター東北区水産研究所特任部長神山孝史博士、主任研究員奥村裕博士から文献や解析プログラムについて助言をいただいたことに感謝申し上げます。また、平成24年に仙台湾での140点という多くの底土採取ができたのは、宮城県水産技術総合センターの当時の漁業調査船スタッフである本郷政敏、高松秀樹、近江克哉、玉川 敏、伊妻英貴の各氏による献身的な作業によるところが大きかったことを記して感謝申し上げます。

## 参考文献

- 1) Kamiyama, T., Yamauchi H., Nagai S., Yamaguchi M., February 2014. Differences in abundance and distribution of *Alexandrium* cysts in Sendai Bay ,northern Japan,before and after the tsunami caused by the Great East Japan Earthquake ,Springer(Published online:18 February 2014) DOI 10.1007/s10872-014-0221-0
- 2) 西 敬浩・八木 宏・杉松宏一・中山哲殿・林健太郎(2012) 東北地方太平洋沖地震の津波による広域海底堆積物の移動推定, 土木学会論文集B2(海岸工学) vol. 68, No. 2, 2012, 226-230
- 3) 独立行政法人水産総合研究センター水産工学研究所(2012) 東北地方太平洋沖地震の津波による広域海底堆積物の移動推定の試み(水産土木工学部), 研究の葉 2012-03
- 4) 東京海洋大学(2012), 「東日本大震災被災地復興プロジェクト研究」-津波による輸送物が沿岸漁場環境と生態系に及ぼす影響-, <http://www.kaiyodai.ac.jp/project/r1/10/hokoku11/2.pdf>
- 5) 池原 研(2013) 仙台湾陸棚域の表層堆積物: 2011年東北地方太平洋沖地震/津波の浅海域海底環境への影響, 独立行政法人産業技術総合研究所, 地質調査総合センター速報 No.63, 253-257
- 6) Schlitzer, R., OceanDataView, <http://odv.awi.de>, 2011
- 7) 和田秀樹・中井信之(1981) 堆積物中の有機物の炭素同位体組成とC/N比-駿河湾表層泥について-, 静岡大学地球科学研究報告 6, 73-81
- 8) 碓井敏広(2004) 陸圏排出物質の近海への影響: 北海道河川から北太平洋-炭素・窒素安定同位体比を用いた十勝沖表層堆積物中の有機物の起源に関する研究-, 北海道大学大学院地球環境科学研究科COE成果報告書