

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 5 日現在

機関番号：22604

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25249068

研究課題名(和文) 巨大地震により生じた湾奥部汽水域の環境再生機構の解明と環境価値の評価

研究課題名(英文) Restoration Process of an Estuarine Environment and Evaluation of an Environmental Value in a Salt Marsh and a Tidal Flat Formed by Tsunami Disaster

研究代表者

横山 勝英 (YOKOYAMA, KATSUhide)

首都大学東京・都市環境科学研究科・准教授

研究者番号：10347271

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 34,500,000円

研究成果の概要(和文)：東日本大震災の津波で破壊された宮城県気仙沼・舞根湾と流域を対象として、流域圏の物質循環が沿岸生態系におよぼす影響を研究した。フルボ酸様物質は広葉樹林と耕作地が負荷源として重要であり、降雨時に増大した。河口付近の海域表層では降水量と全鉄濃度の相関がみられ、外洋の影響を受ける測点と挙動が異なった。魚類の個体数と種数は2年目までに急激に増加し、以後は安定した。津波による攪乱が大きかった湾奥では回復が遅かった。震災で出現した塩性湿地では、1年後には独特の仔稚魚相が形成された。震災干潟には水産有用種であるアサリの他に希少種の貝類も出現し、生育環境として標高と地盤材料が重要であることが示された。

研究成果の概要(英文)：Restoration process of an estuarine environment in a salt-marsh and a tidal flat formed by tsunami disaster of 2011 were investigated in the Kesenuma Bay and Moune Bay. Dissolved organic matter derived from humic substances was related to the ratio of broad-leaved deciduous forest area and agricultural land area, and the concentration increased during rainfall. Total iron concentration in the surface layer of the sea was related to precipitation around a river mouth. Both total fish abundance and species richness increased from the first to the second year after the tsunami. Bimonthly survey of larval fishes revealed that unique larval fish community had been established in the newly formed salt-marsh. 21 species of mollusk including the Manila clam were founded in the newly formed tidal flat. This suggests that the restored tidal flat has high potential as fishing ground of the Manila clam if its physical environments get back to a more natural condition.

研究分野：環境水理学

キーワード：溶存態有機物 鉄 汽水域 震災湿地 震災干潟 魚類 ベントス

1. 研究開始当初の背景

流域圏の総合的な環境管理は 2000 年頃からその重要性が認識され、様々な研究プロジェクトが実施されてきているが、森・川・海物質輸送が生態系におよぼす影響を定量的に解明できた例はほとんど無い。

陸-海物質輸送が海の一次生産に貢献していることを解明した数少ない事例として、アムール・オホーツクプロジェクト(2004~2010)がある。流域湿地に由来する溶存鉄がアムール川から海に供給され、オホーツク中層水循環によって輸送され、それが親潮生態系の一次生産に利用されるメカニズムが提唱された。地球スケールでありながら現象解明に成功したのは、生物の多様性が限定される亜寒帯であり比較的単純な物質循環モデルであったためとも考えられる。一方で、温帯の日本沿岸は水文・地形地質・生態系の多様性が世界的にも高く、このモデルを単純に適用できるかどうかは今後の課題である。

森・川・海のつながりを考える際、その鍵となるのは河口汽水域である。陸と海の両方のメリットを享受して生物生産性が高く、仔稚魚の初期成育場になっている。一方で、埋立て等の土地改変を受けやすく、境界領域であるために管理者が河川・海岸・港湾・農林に分散しており、統一的な環境管理が行われていない。そのため、流域圏の中でも特に河口汽水域に焦点を当てて物質循環と各種サービスを評価し、環境管理に反映させることが急務である。

2. 研究の目的

東日本大震災後の 2011 年 5 月から、気仙沼・舞根湾のカキ・ホタテガイなどの養殖漁業の復興を支援する目的で、定期的な生物環境調査が行われてきた。水質・底質環境、動植物プランクトン、魚類などの総合的なモニタリングが実施された。

この調査を通じて、津波によって破壊された物質循環や生態系の回復過程を調査研究することで、流域圏における物質輸送と生態系の連環を解き明かすことが可能になると考えられた。特に、震災によって湾奥の河口域には干潟・塩性湿地が出現したため、陸と海の結節点としての干潟・湿地の機能を評価することができると考えられた。

流域圏の物質循環について、栄養塩、溶存有機態、全鉄・溶存鉄が流域・河川・湿地・海域へと輸送される過程と、それが海域の一次生産に及ぼす影響を調べる。塩性湿地では、地形の形成過程と水収支および栄養塩収支を詳細に検討する。

生態系については、津波の攪乱度合いが異なる地点で魚類群集を比較することにより、攪乱に対する生物群集の変遷過程を明らかにする。また、震災によって新たに形成された塩性湿地において、仔稚魚の加入・利用の変遷を明らかにする。

干潟の保全価値として、ベントス、特に貝

類群集の遷移過程をモニタリングし、再生干潟がもたらしうる生態系サービスのうち最も評価しやすい供給サービスに焦点をあてて、アサリ漁場としての利用可能性を探る。

3. 研究の方法

(1) 研究対象地

研究対象地は宮城県北部の気仙沼湾とその流域である。気仙沼湾は東西に約 8km、南北に約 10km の大きさである。湾の中央部には大島があり、東湾(水深 25m)、西湾(水深 10m)、大島瀬戸(水深 40m)、気仙沼港(湾奥、水深 8m)から構成されている。

河川として、大川、鹿折川、西舞根川、東舞根川を対象とした。大川は流路長約 29km、流域面積約 168km²の河川である。途中、二十一川、八瀬川など複数の支流と合流する。鹿折川は流路長約 12km、西舞根川は約 3km、東舞根川は約 2km の河川である。

西舞根川の河口域には、震災による地盤沈下と津波の影響で塩性湿地(面積 15,000m²)と干潟(面積 1,200km²)が出現した。塩性湿地は西舞根川と接続しており、干潟は破壊された海岸道路の内陸側に形成された。

(2) 流域圏全体の物質動態として、溶存態有機物(DOM)、栄養塩と鉄に着目して研究を行った。流域の採水は 18 地点(湿地 1 点)で行い、ろ過した後に、溶存態有機炭素(DOC)濃度と三次元励起蛍光(EEM)を測定した。蛍光強度は 10ppb の硫酸キニーネ溶液で補正し、硫酸キニーネ単位(QSU)で表記した。本研究では、励起/蛍光波長が 280/340nm 及び 320/425nm における蛍光強度値を、それぞれタンパク様の相対蛍光強度(P)とフルボ酸様の相対蛍光強度(F)とした。また、流域における針葉樹、広葉樹、市街地、耕作地、水田、草地の面積率と DOC 濃度・蛍光強度の関係を調べた。

海域では Stn. 1~Stn. 15 の 15 測点において、多項目水質計で水温、塩分、濁度、クロロフィル a (Chl-a)、溶存酸素(DO)の鉛直分布を毎月観測した(図 1)。また、採水器を用いて、Stn. 3, 8, 11, 15 の 4 測点において、表層、中層、底層(Stn. 15 は表層、底層のみ)の海水を 1~2 カ月ごとにサンプリングした。採水した試料は、全鉄(T-Fe)、溶存鉄(D-Fe)、窒素(TN, TDN, NO₃⁻+NO₂⁻, NH₄⁺)、リン(TP, TDP, PO₄³⁻)、Chl-a の分析を行った。そして、降水量や各項目間の関係性を検討した。

(3) 湿地・干潟の地形形成過程と物質循環では、西舞根川河口域を対象として、過去の空中写真の解析と現状の地形測量から土地利用の変遷と震災の影響を調べた。また、河川・湿地・河口の 3 地点で水位・塩分濃度を 10 分間隔で観測した。そして水位-容積曲線を作成し、湿地の水収支を求めた。

水質分析に関しては、潮汐を考慮して 1 時間間隔の 26 時間連続採水を河川・湿地・河

口の 3 地点で行った。分析項目は窒素 (TN, TDN, $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$, NH_4^+), リン (TP, TDP, PO_4^{3-}), D-Fe, Chl-a, DOC である。なお, PN, DON, PP, DOP は計算により求めた。

1 時間間隔の水質データを 10 分間隔で線形補間し, 湿地の水収支と掛け合わせて, 栄養塩の収支を求めた。

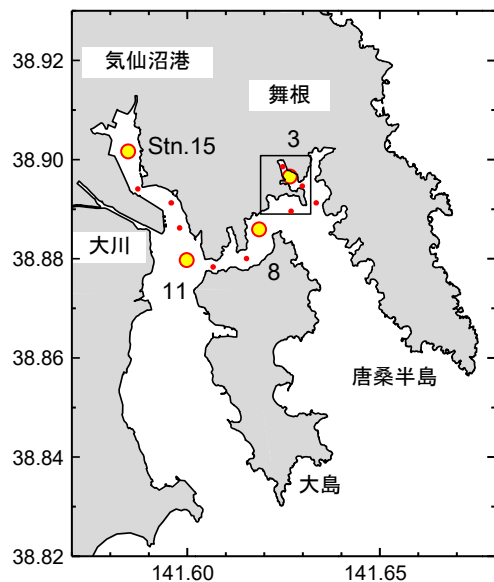


図 1 気仙沼湾の水質観測地点

(4) 生態系構造とその時間変化では, 舞根湾内外の 4 地点において (図 2), 2 ヶ月毎に潜水調査を行い, 津波により壊滅的な攪乱を受けた浅海域の生物群集の回復過程を記録した。調査に際しては, 各定点において長さ 50m × 幅 2m の調査測線を 10 本設定し, 調査範囲に出現する魚類および主要な無脊椎動物の種, 体サイズおよび個体数を記録した。

また, 小型底生魚類群集の調査として, 舞根湾の湾外 1 地点, 湾内 3 地点の計 4 地点において, 2 ヶ月毎に小型桁網 (網口幅 1m, 網口高 20cm, 目合 3mm) を用いて船曳による採集を行った。採集物は冷凍保存し, 種同定, 計数, 体長計測を行った。

舞根湾奥に再形成された塩性湿地の仔稚魚による利用状況を調べるため, 湿地, 西舞根川河口, 東舞根川河口の 3 地点において, 2 ヶ月毎に仔稚魚用小型曳き網 (網口幅 2.3m, 網口高 1m, 目合 2-1mm) を用い, 人力による曳網を行った。採集物は 99%エタノールに保存し, 種同定, 計数, 体長計測を行った。

(5) 干潟の生態系サービスとして, 約 90 日間隔で再生干潟においてベントスの定量採集を行った。また水温, 干出時間, 底質等の物理環境についても調査した。採集した種ごとの個体数から種多様性を評価し, 物理環境との関係を調べた。

アサリに関しては殻長組成頻度からコホート分離を行い, 年齢推定および成長速度を推測した。さらに現地でのアサリ加入状況を明らかにするため幼生の採集も行った。

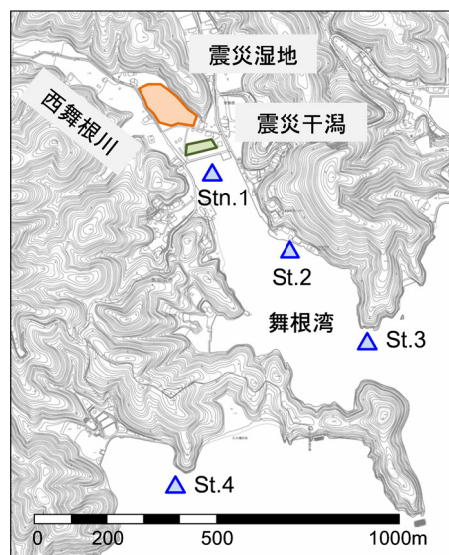


図 2 舞根湾の生態系調査地点

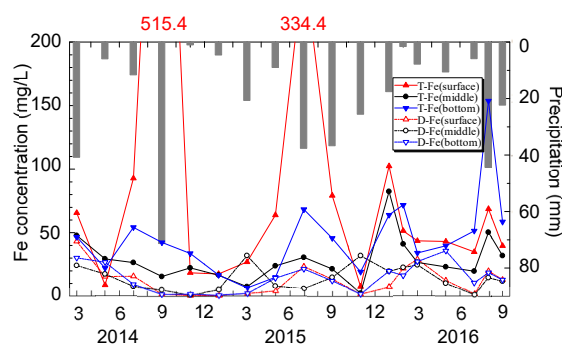


図 3 鉄濃度の変化 (Stn. 11)

4. 研究成果

(1) 流域における溶存態有機物の輸送過程

腐植物質由来の DOM は広葉樹林と耕作地が, タンパク様 DOM は耕作地が負荷源として重要であり, その負荷は降雨時に増大することが明らかとなった。また, 市街地は DOM 中のタンパク様物質の割合が上昇する要因であった。震災後に創出した湿地では腐植様・タンパク様 DOM の溶出が示唆され, 震災によって沿岸域に輸送される DOC 濃度および DOM の質が変化したと考えられた。

(2) 鉄の輸送過程

Stn. 11 における水深別の T-Fe, D-Fe の濃度変化と調査前 10 日間の降水量の時系列データ (図 3) から, それぞれの相関を調べると, 降水量と表層 T-Fe 濃度の相関が最も高かった ($r=0.76$)。同様に Stn. 3 においても表層 T-Fe は降水量と高い相関 ($r=0.71$) を示した。さらに, 塩分や濁度とも相関がみられた。一方で, Stn. 8 と Stn. 15 では降水量との相関は低かった。

各地点の特徴は, Stn. 11 は大川河口, Stn. 3 は西舞根川河口に位置し, Stn. 8 は大島瀬戸, Stn. 15 は気仙沼港に位置していることから, 湾内表層の T-Fe 濃度は河川流入 (流量) の

影響を強く受けていると考えられた。つまり、気仙沼・舞根湾における鉄濃度の挙動は、陸域からの鉄供給や海域の環境特性（外洋との距離や港の存在など）と関係があることが示唆された。

(3) 栄養塩・DO濃度と湾内の一次生産

気仙沼湾では震災後に $PO_4^{3-}P$ の濃度が低下した。湾奥底層の DO 濃度に関して、震災前は夏季にしばしば貧酸素化していたものが、震災以降は貧酸素化が認められなかった。津波に伴う海底攪乱と海水交換による底質の改善が、底質からの $PO_4^{3-}P$ 溶出を減少させたと推察された（図4）。

2011年津波の2年後に麻痺性貝毒原因渦鞭毛藻 *Alexandrium fundyense* が大量発生し、マガキやホタテガイの出荷規制値を超える高毒化が24年ぶりに確認された。このとき、湾内では NH_4^+-N 濃度の上昇、 $PO_4^{3-}P$ 濃度の低下によって無機態窒素/無機態リンの比 (DIN/DIP) が上昇した。高 DIN/DIP は、珪藻類よりも渦鞭毛藻類のブルームに好適な水質環境であり、*Alexandrium* 属の強毒化を招くことが指摘されている。以上より、震災後は流入河川や海域の環境が変化し、*A. fundyense* の大規模な発生を招く一因となった可能性が考えられた。

(4) 湾内の小型底生魚類群集の震災後変化

地震発生1年目には種数・個体数ともに低かったが、2年目には大きく増加し、3年目以降もほぼ安定傾向にあった（図5）。種数・個体数については、津波の直接的影響から短期間で回復したと考えられる。

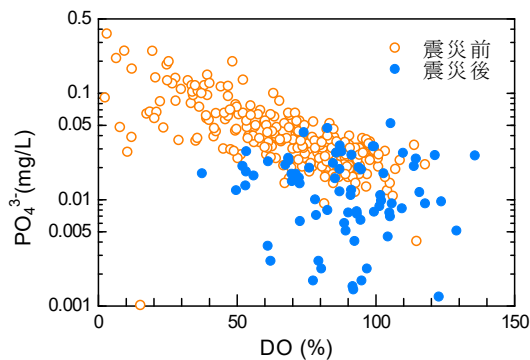


図4 気仙沼湾奥の底層 DO と PO_4^{3-} の関係

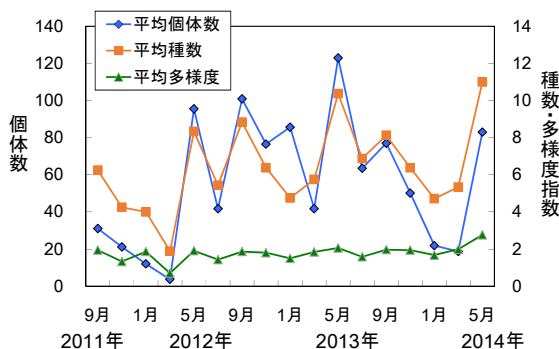


図5 舞根湾の小型底生魚類群集種数・個体数・多様度指数の経年変化

1年目においても、津波の引き波の影響が弱かった支湾部分では他地点より多くの種・個体数が観察されており、その支湾が避難場所として機能したことで早期の回復につながったと推定される。しかし、湾奥の定点では津波前に存在したアマモ群落はまだ回復しておらず、アマモ場に特有の魚類群集も観察されていない。底質・水深が変化したことによりアマモ場が回復せず、魚類への影響も長期に及んでいると考えられる。

(5) 湾内の生物群集の震災後変化

魚の種類数・個体数とも、1年目よりも2年目が多く、以後はおおむね安定していた（図6）。比較的寿命の短いハゼ科魚類は津波の直後に数を増やし、長寿な魚類は3年目以降に多くなった。また、アイナメの体長は6年目に最大値を記録した。魚種ごとの体長からバイオマスを推定したところ、6年目が調査期間中で最大となった。魚種数・個体数・バイオマスとも、湾奥の St. 1 で最も低い値となった。

魚種ごとのバイオマスから、各地点・調査年における魚類群集の類似度を求め、多変量解析を行った。その結果、湾奥は他の3地点の群集と著しく異なること、また湾奥以外の3地点では2年目までに急激な変化は完了しているのに対し、湾奥では津波から6年後にも変遷を続けていることが明らかとなった（図7）。

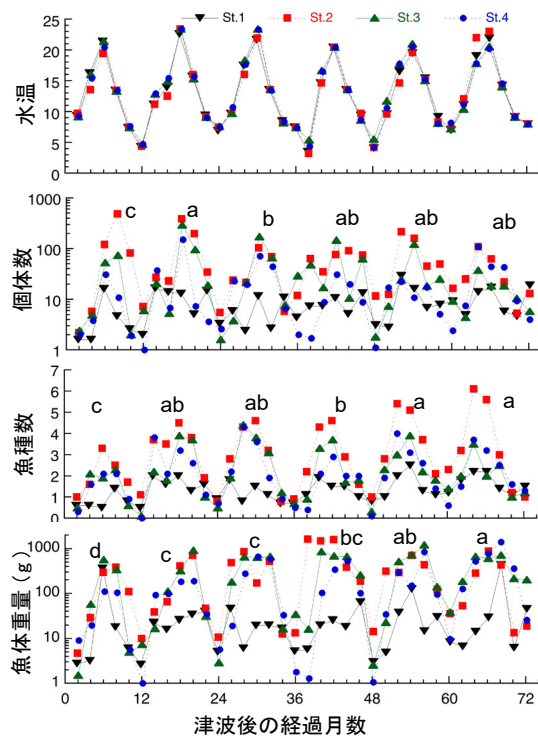


図6 各調査地点における水温、魚類の個体数、魚類の種数、および体長と個体数から算出された推定魚体総重量(バイオマス)の経時変化。異なるアルファベットは年度間で有意に異なる (Holm's pairwise test)。

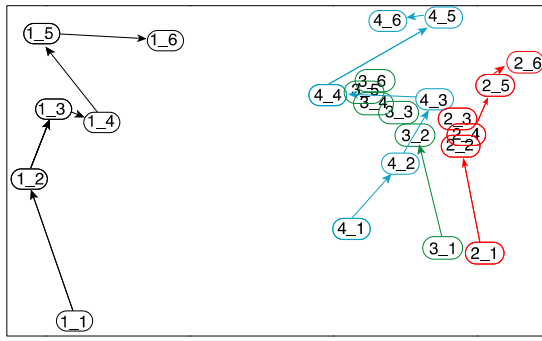


図7 各地点における魚類群集をBray-Curtisの類似度指数により比較し、多次元尺度構成法(nMDS)で表示した。ここで2_1とはSt. 2の津波から1年目の魚類群集を表す。

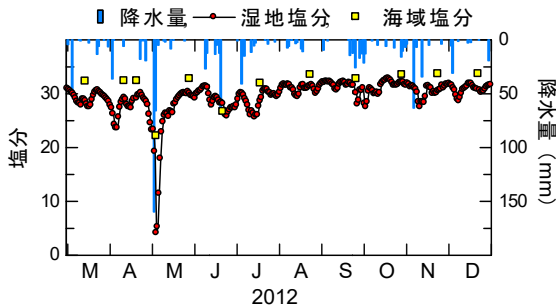


図8 震災湿地の塩分変化

(6) 震災湿地の形成と水環境

西舞根川河口域に形成された震災湿地は、過去に自然湿地を埋め立てて宅地や耕作地として利用していた場所が、地盤沈下によって海水が浸入し、形成されたことが分かった。

震災後、2012～2015年までに湿地底面標高が約180mm上昇し、その約72%が地盤隆起、残りが河川から供給された土砂の堆積に起因すると推定された。

湿地の水位変動は舞根湾の潮汐の影響を受け、塩分は28～31であったことから(図8)、河川水の影響度が1割程度、海水の影響度が9割程度であることが分かった。

(7) 震災湿地の仔稚魚による利用状況

再形成塩性湿地では、地震の1年後に既に汽水性のピリングやチチブなどの仔稚魚が採集された。2年目以降も、個体数変動は大きいが続的に採集された。

西舞根川河口および東舞根川河口ではニクハゼやアサヒアナハゼ等の海産魚が主体であり、両河口と塩性湿地の間では群集構造が大きく異なっていた(図9)。塩性湿地は再形成されて1年後で既に汽水性仔稚魚の成育場・生息場として機能しており、近隣河口からの単なる流入ではない独自の仔稚魚相を形成するようになったと考えられる。

(8) 震災干潟における貝類の時間変化

調査地で最も多かったベントスは貝類であり、移動性の乏しさから干潟環境を評価するうえで最適な動物群であると判断した。

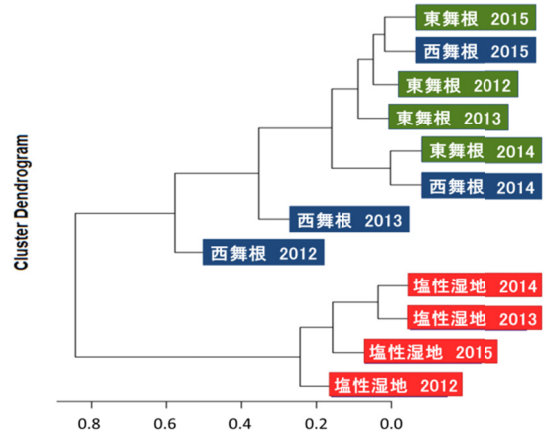


図9 各地点・年度ごとの仔稚魚種組成によるクラスター分析結果

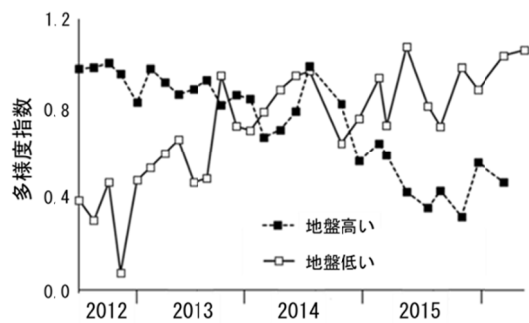


図10 Shannon-Wienerの種多様性指数の変化

合計で21種の貝類が出現し、アサリとホソウミナ(巻貝)が全体の90%以上を占めていた。その他の貝類には準絶滅危惧種等の希少種も含まれており、種組成および種多様性は干潟内でも大きく異なっていた。海岸道路の内陸側に出現した地盤の高い干潟では、時間と共に種多様性は低下したが、海側の地盤の低い斜面では逆に上昇した(図10)。

水産有用種であるアサリ密度は一時的に4,700個体/m²を超えており、年齢構成から震災直後(2011年)に大量に加入した群であると推測された。アサリ密度は時間経過とともに徐々に減少したが、その要因は地盤高が自然干潟よりも高すぎることで、残存した道路構造物により海水交換が悪く、泥分が増加したことにあると推測された。

しかし、アサリ幼生の発生および稚貝の加入は毎年確認されており、この干潟に定期的な自然加入があることを意味している。本研究の結果から、干潟の物理環境次第で貝類相が豊かになり、かつアサリ漁場としても利用できることが推察された。

(9) まとめ

以上より、気仙沼・舞根湾において流域圏の物質移動と生物群集を調べた結果、震災・津波からの回復過程に着目することで、相互の連環や応答関係を示すことが出来た。

さらに、河口域に形成された震災湿地・干

潟への生物加入状況を明らかにし、今後の管理方策次第で湿地・干潟の生態系サービスより大きなものにできる可能性を示した。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 19 件)

- ① 益田玲爾, 魚類の潜水目視調査による環境評価と生態系管理への展望, 温暖化, 発電所温排水および津波, 水路新技術講演集 30, 査読無し, 2017, 38-48.
- ② 福島慶太郎, 富田遼平, 横山勝英, 気仙沼湾に流入する河川水中の溶存態有機物の規定要因, 土木学会論文集 G (環境), 査読有, 72 (5), 2016, I_165-I_172.
- ③ 橋本和磨, 福島慶太郎, 横山勝英, 東日本大震災による塩性湿地の形成過程に関する研究—気仙沼舞根地区の事例—, 土木学会論文集 G (環境), 査読有, 72(5), 2016, I_179-I_186.
- ④ 横山勝英, 夏池真史, 若生優紀, 大野敦生, 気仙沼湾の狭水道部における流動とクロロフィル輸送に関する調査研究, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 査読有, 72(2), 2016, I_1387-I_1392.
- ⑤ Masuda R, Hatakeyama M, Yokoyama K, Tanaka M (2016). Recovery of coastal fauna after the 2011 tsunami in Japan as determined by bimonthly underwater visual censuses conducted over five years. PLOS ONE 11(12): e0168261., 査読有
- ⑥ 山本光夫, 劉丹, 長坂翔子, 横山勝英, 気仙沼舞根湾海域における水質の推移, 海洋と生物, 査読無し, 209, 2013, 547-553.
- ⑦ 中山耕至, 熊谷洋一郎, 田中克, 震災後の気仙沼舞根湾における小型底生魚類群集の回復過程, 海洋と生物, 査読無し, 209, 2013, 582-586.

[学会発表] (計 31 件)

- ① 山本光夫, 劉丹, 福島慶太郎, 横山勝英, 「気仙沼湾の環境特性と鉄の挙動の関係性」平成 29 年度日本水産学会春季大会, 東京海洋大学 (東京都港区), 2017 年 3 月 28 日
- ② 山田雄志, 中山耕至, 熊谷洋一郎, 畠山信・田中克, 東北地方太平洋沖地震により再形成された塩性湿地の仔稚魚による利用状況, 日本魚類学会年会, 岐阜大学 (岐阜県岐阜市), 2016 年 9 月 23 日~26 日
- ③ 千葉晋, 清水克樹, 榎田希海, 園田武, 夏池真史, 畠山信, 横山勝英, 浜口昌巳, 東日本大震災で再生した干潟における貝類群集の動態とアサリ漁場としての利用可能性, 2016 年日本ベントス学会・日本プランクトン学会合同大会, 熊本県立大学 (熊本県熊本市), 2016 年 9 月 8~10 日

[図書] (計 2 件)

- ① Chiba S, Sonoda S, Hatakeyama M, Yokoyama K, Springer, Contribution to utilization of tidal

flat that was restored in Moun Bay, Miyagi Prefecture, Japan, after the Great East Japan Earthquake. In: Monma, T., Goto, I., Hayashi, T., Tachiya, H., Ohsawa, K. (Eds.) “Agricultural and Forestry Reconstruction after the Great East Japan Earthquake”, 2015, pp.264 (113-119), ISBN 978-4-431-55558-2.

[産業財産権]

- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)

[その他]

6. 研究組織

(1) 研究代表者

横山 勝英 (YOKOYAMA, Katsuhide)
首都大学東京・都市環境科学研究科・准教授
研究者番号: 10347271

(2) 研究分担者

千葉 晋 (CHIBA, Susumu)
東京農業大学・生物産業学部・教授
研究者番号: 00385501

山本 光夫 (YAMAMOTO, Mitsuo)
東京大学・海洋アライアンス・特任准教授
研究者番号: 30361512

吉永 郁生 (YOSHINAGA, Ikuo)
公立鳥取環境大学・環境学部・教授
研究者番号: 40230776

中山 耕至 (NAKAYAMA, Kouji)
京都大学・農学研究科・助教
研究者番号: 50324661

益田 玲爾 (MASUDA, Reiji)
京都大学・フィールド科学教育研究センター・准教授
研究者番号: 60324662

福島 慶太郎 (FUKUSHIMA, Keitaro)
首都大学東京・都市基盤環境科学研究科・特任助教
研究者番号: 60549426

河野 益近 (KOUNO, Masuchika)
(元) 京都大学・工学研究科・教務職員
研究者番号: 70332723