特集 大槌湾周辺における東北地方太平洋沖地震後の海洋生態系の変化：東北マリンサイエンス拠点形成事業（プロジェクト・メーユ）による取組とその成果

アマモ場における魚類群集構造の津波前後の比較

小 路 淳

広島大学大学院生物圏科学研究科

Comparison of fish community structures in the seagrass beds between the period before and after the tsunami following the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake

JUN SHOJI

Graduate School of Biosphere Science, Hiroshima University, Higashi-hiroshima, Hiroshima 739-8528, Japan

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東北太平洋沖を震源とする地震に伴う津波は、沿岸域の生態系に大きな影響を与えた。生息場環境の劇的な変化は、水産資源を含む生物のコホートや個体群に重大な影響を与えうる。生活史の一部の時期あるいは全てにおいて特定の生息場との結びつきが強い種ではとくにその影響が及びやすいと想定される。地震による地盤沈下や、津波による堆積物の増加が、沿岸海域の地形に直接的な影響を与えるとともに、藻場（アマモ場、ガラモ場等）の植生を変化させることにより、生物群集に多様で複合的な影響を及ぼすことが各地で報告されている。¹⁻⁴⁾

藻場の動物群集のなかで、魚類は個体数や生物量で優占するグループであるとともに、栄養フローおよび生物生産の主要な担い手である。⁵⁻⁷⁾ 藻場における魚類の分布密度や生物量は、植生の繁茂状況の変化にともなって様々な時空間スケールで変動する。⁷⁻⁹⁾ しかしながら、津波のような壊滅的な被害が沿岸域の魚類群集に与える影響に関する知見は、沿岸植生や底生生物群集に比べて^{3,4,10-15)}非常に乏しい。^{16,17)} 魚類は底生生物に比べて高い移動能力を備えるため、定量的調査を実施するために比較的大きな労力を要する。^{18,19)} したがって、発生予測が困難な突発的イベントである津波の前後に長期的なモニタリングが実施されているケースは他の生物群集に比べても乏しい。

生態系が人類にもたらすさまざまな自然の恵みは生態系サービスとよばれ、藻場が生み出す生態系サービスの経済価値は、地球上の様々な生態系のなかでトップレベルであると算出されている。²⁰⁾ 藻場に生息する魚類群集には水産資源として重要な種が多数含まれるため、津波は魚類そのものや魚類の生息場である藻場への影響を通じて、沿岸域の生態系サービスに直接・間接的に影響を

及ぼしうる（図1）。東北太平洋岸において、沿岸域の水産資源を対象とする漁業は最も重要な地域産業の一つである。したがって、東北沿岸地域の経済復興には、沿岸の自然環境の回復や管理が不可欠であり、高い生物生産と生態系サービスの源である沿岸域の自然環境の回復と維持の達成に向け、津波の影響を受けた沿岸域の状況把握と、環境および生物のモニタリングを継続することはきわめて重要と考えられる。

執筆者らは、2009～2013年にアマモ場の魚類群集構造および生産速度を広域比較するための全国スケールでのフィールド調査を実施した。魚類の生息場における環境条件と、魚類群集に関する定量的なデータを、津波の前後の時期で比較することは、生態系に対する強い攪乱の影響の評価とその後の遷移状況の把握のために重要な知見を提供しうる。上記期間中である2011年3月に東北地方太平洋沖地震に伴う津波により、調査サイトのいくつかの影響を受けた。本稿では、2009年より東北太平洋岸の複数のアマモ場（宮古湾、船越湾、大槌湾、万石浦）で実施している魚類群集モニタリングによる成果のうち、アマモ場の植生と魚類群集構造の変化が比較的明瞭であった万石浦における知見¹⁶⁾を紹介する。

2. 方法

調査サイトとした万石浦は、面積約7.4 km²、平均水深3.0 m、最大水深5.3 mの汽水湖で、南部の水路を介して太平洋とつながっている。カキや海藻の養殖が盛んな一方で、浅海域には多くの魚種が出現することが確認されている。^{19,21-23)} 万石浦では、外洋との繋がりが湾口部に限られており、この地形特性ゆえに、沿岸生態系が津波により受けた攪乱の程度は三陸沿岸域（地域によっては最大波高が20 mを越えた）などに比べて小さかったと想定される。²⁴⁾

図1 津波による攪乱の影響が異なるアマモ場の繁茂状況と採集された魚類の比較
植生回復がより遅れている船越湾(A)のアマモ場において採集された魚類(B)およびより進行している大槌湾(C)において採集された魚類(D)。2箇所における魚類採集の努力量および写真の縮尺は同じ。

2009～2014年の各年のアマモの繁茂期である6～8月に、魚類採集と環境調査を万石浦の南西水域に位置するアマモ場(38°25'12"N, 141°22'36")において実施した。魚類採集は巻網(高さ2 m, 網目5 mm)²⁵⁾を用いて行った。100 m²(10×10 m)のエリアを巻網で囲む方法で、4回の採集を実施した。採集された魚類は10% 海水ホルマリンで保存して持ち帰った。調査時には水温・塩分の測定も行った。さらに、コドラート(0.5×0.5 m)を用いてアマモ株密度および葉長の測定を、1回の調査につき4箇所以上で実施した。

実験室において、採集された魚類の種同定と全長計測を実施した。1回の採集あたりの魚種数、単位面積(100 m²)あたりの採集個体数と湿重量を算出した。生息場利用パターンや生活史特性にもとづいて魚類を以下の3グループに区分した：浮遊性もしくは回遊性が高いグループP、砂泥底との結びつきが強いグループS、アマモもしくは基質との結びつきが強いグループZ。¹⁶⁾

3. 結果

アマモの平均株密度±標準偏差は、津波の影響を受ける前の2009および2010年には40株/m²以上であったが、2011年には前年の半分以下(24.5±27.3株/m²)に低下した。2012年における平均株密度はさらに低下し21.0±19.1株/m²となった。平均葉長は735.3±153.5 mm(2012年)から963.3±210.0 mm(2011年)の間で変動した。水温は18.9(2009年)から25.3°C(2013年)、塩分は29.7(2009年)から30.6(2011および2012年)の間でそれぞれ変動した。

6年間の調査により、合計1,764個体(18科37種以

上)の魚類が採集された。個体数において優占したグループ(優占した年)はウミタナゴ類(2009年)、スジハゼ類(2010, 2011年)、ヘビハゼ(2012年)、タケギンボ(2013年)、マハゼ(2014年)であった。重量において優占した種群は、シロメバル(2009年)、スジハゼ(2010年)、マハゼ(2011, 2014年)、ウミタナゴ類(2012年)、タケギンボ(2013年)であった。

1回の採集により得られた魚類の平均種数(±SD)は2012年に最小(5.0±2.2)、2013年に最大(10.8±3.8)となった。種数に対する年の影響は有意ではなかった(Kruskal-Wallis test, $p=0.07$)。魚類の平均分布密度は2012年に最低(36.5±31.7 100 m⁻²)、2011年に最高(160.4±19.2 100 m⁻²)となった。2011年における分布密度は、2010, 2012, 2013および2014年に比べて有意に高かった(Kruskal-Wallis test with Steel-Dwass as post-hoc test, $p<0.05$)。魚類の平均湿重量は2012年に最低(95.3±37.5 g 100 m⁻²)、2014年に最高(300.4±163.1 g 100 m⁻²)となり、これら2年の間に統計的に有意な差が認められた($p<0.05$)。

生息場利用パターンや生活史特性にもとづいて区分した魚類のグループ(グループP, SおよびZ)ごとの個体数および重量による割合に対する年の影響は有意であった(G-test, $p<0.0001$)。個体数によるグループSの割合は、津波が発生した2011年を境として、58.8%(2010年)から91.5%(2011年)に増加した。2011年にはマハゼ(57.2%)およびクサフグ(17.8%)の割合が高かったことが特徴的であった。個体数によるグループPの割合は6年間を通じて他の2グループに比べて低く、最大で10.0%(2009年)であった。

これに対し、湿重量による各グループの割合は対照的な変化を示した。津波が発生した年の2011年にはグループSが優占し、69%を占めた(このうちマハゼが全体の33.0%)。2012年にはグループZが89.5%を占めた(このうちウミタナゴ類が全体の51.6%)が、これ以降低下し2014年には26.4%となった。2014年にはグループSが優占し71.0%となった(このうちマハゼが全体の64.7%)。

4. 考察

2009年以降継続してきた万石浦における調査の結果から、2011年に発生した津波によるアマモ場の植生と魚類群集への影響を評価することができた。タイ国アンダマン海では、地震とこれにともなう津波により生じた地盤沈下と堆積物の影響により、7種の熱帯性アマモ類(*Halophila ovalis*, *Enhalus acoroides*, *Syringodium isoetifolium*, *Halodule uninervis*, *Halodule pinifolia*, *Cymodocea rotundata* および *Cymodocea serrulata*)により構成されるアマモ場の被度が低下したと考えられている。³⁾ 万石

浦においては、アマモの平均株密度の低下は2010年から2011年にかけて顕著であったことから、アンダマン海の場合と同様に津波による海底攪乱と堆積による影響が生じていたものと推測される。2012年には平均株密度はさらに低下し、調査を実施した6年間を通じて最低となった。万石浦周辺では地震による地盤沈下が0.8 m程度生じたと報告されている（環境省、閉鎖性海域ネット http://www.env.go.jp/water/heisa/heisa_net/waters/mangokuura.html, 2017年3月30日；環日本海海洋環境ウォッチ-環境省・NPEC/CEARAC-, <http://ocean.nowpap3.go.jp>, 2017年3月30日）。さらに、アマモ場周辺水域における水中の透明度が津波以前（2.4–3.6 m：1993–2009年）に比べて2012年には極端に低く、1.0 m以下であったと見積もられている。¹⁶⁾ これらの複合要因の結果として海底付近の照度が低下し、2012年にアマモ株密度および葉長が最低値となった可能性が高い。2014年には水中の透明度が上昇し、アマモ株密度が2012年の2倍程度に増加するとともに標準偏差が小さくなった。これらの結果は、アマモの繁茂状況がパッチ状から、より密生した状態へと推移したことを裏付けている。

アマモ場において採集された魚類の種構成が津波の前後の時期で異なったことは、アマモ場の植生の変化が魚類群集構造に影響を及ぼしたことを示している。津波後の期間（2011–2014年）における優占魚種の組成の年間差は、魚類群集構造が不安定で推移が続いていたことを示すものであろう。具体的にみると、グループSに属する魚類の2012年における個体数割合（全魚類の91.5%）が、津波前の時期（2009–2010）の43.0–58.8%に比べて高く、なかでもマハゼ（全魚類の57.2%）およびクサフグ（全魚類の17.8%）の割合が高かった。これらグループSに属する魚類の分布密度については、2010年に比べて2011年に有意に高かったが、その要因として、パッチ状に分布するアマモ場をとまなう砂泥底エリア面積が津波後の時期に増大したことが考えられる。²⁶⁾ しかしながら、グループSに属する魚類の分布密度と個体数割合は2011年以降減少し、津波以前の時期の値に近づいた。津波後の時期にはアマモ場の植生回復も進行したため、グループSに属する魚類の生息場としては好適ではなくなった可能性が高い。その一方で、2014年にはグループSに属する魚類が重量による優占種となり、とりわけマハゼの湿重量割合（全魚類の67.4%）が大きかった。マハゼ成魚は万石浦における漁業および遊漁の対象として重要な種であり、アマモ場周辺の砂泥域に生息する。万石浦および周辺海域では、津波以降の時期に漁業および遊漁による努力量の低下にともない、マハゼの漁獲・採捕量が低下していたと推測される。²⁷⁾ さらに、グループZに属する魚類の割合が

2011年（全魚類の30.2%）から2012年（89.5%）へ増加した一方で、湿重量の顕著な増加は認められなかった（2011年に136.1 g 100 m⁻²；2012年に95.3 g 100 m⁻²）。グループZに属する魚類が2012年に優占した要因として、大型のウミタナゴ類が大量に採集されたことが挙げられる。ウミタナゴ類も万石浦および周辺海域において水産業上重要な種であり、津波により周辺海域の漁船の89%（漁船登録されているもの）が消失したことに伴い漁獲努力量が大幅に低下していたと推測される。²⁷⁾ 漁業や遊漁などの人間活動が万石浦のアマモ場における魚類群集構造に影響を及ぼした可能性が高い。

その一方で、当調査域と同様に東北太平洋岸に位置する岩手県大槌湾と船越湾においては、津波によるアマモ場の攪乱の程度が強く、アマモ場の植生被度が極めて低い状況のもと、魚類の種数、分布密度、湿重量の低下が2011年以降、より顕著に認められている（小路、未発表）。万石浦では、これらの海域に比べて、アマモ場の植生の回復と魚類群集の推移がより早く進行してきたと考えられる。しかしながら、魚類群集の推移過程について長期的な傾向を理解するためには、さらにモニタリングを継続する必要があるだろう。これまでのところ、上記以外の海域では、津波による強い攪乱を受けたアマモ場における魚類群集の遷移過程に関する報告事例は非常に乏しい状況にある。

5. まとめ

万石浦のアマモ場の植生と魚類群集構造は、2011年3月11日に発生した東北太平洋沖地震に伴う津波による攪乱の影響を受けた。アマモ場の一部が砂泥域へと変化したことが、アマモ場との結びつきが強い魚類から砂泥との結びつきが強い魚類へと優占魚種を変化させた。さらに、周辺海域における漁業や遊漁といった人間活動もまた、津波後の時期における魚類群集構造の時間変化に影響を及ぼした要因であると考えられた。

謝 辞

本研究を実施するに際し、フィールド調査を支援頂いた宮城県水産高等学校の森本充教諭、畠山智宏教諭、広島大学大学院生物圏科学研究科の中野 光氏、福田温史氏、木下 光氏、上村泰洋氏、東北水産研究所の高見秀輝氏、東北大学大学院農学研究科の片山知史氏に御礼申し上げる。本研究の一部は、環境省環境研究総合推進費 RF-0907「藻場の生態系サービスの経済的価値評価：魚類生産の「原単位」から「日本一」をさぐる」および4E-1102「藻場の資源供給サービスの定量・経済評価と時空間変動解析による沿岸管理方策の提案」、東北マリンサイエンス拠点形成事業—海洋生態系の調査研究—、総合地球環境学研究所プロジェクト「アジア環太平洋地

域の人間環境安全保障—水・エネルギー・食料連環」により実施された。

文 献

- 1) Department of Marine and Coastal Resources. Rapid Assessment of the Tsunami Impact on Marine Resources in the Andaman Sea, Thailand. Phuket Marine Biological Center, Phuket. 2005.
- 2) Nakaoka M, Tanaka Y, Mukai H, Suzuki T, Aryuthata C. Tsunami impacts on biodiversity of seagrass communities in the Andaman Sea, Thailand: (1) Seagrass abundance and diversity. *The Nagisa World Congress* 2006; **8**: 49–56.
- 3) Whanpetch N, Nakaoka M, Mukai H, Suzuki T, Nojima S, Kawai T, Aryuthata C. Temporal changes in benthic communities of seagrass beds impacted by a tsunami in the Andaman Sea, Thailand. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 2010; **87**: 246–252.
- 4) Lomovasky BJ, Firstater FN, Salazar AG, Mendo J, Iribarne OO. Macro benthic community assemblage before and after the 2007 tsunami and earthquake at Paracas Bay, Peru. *J. Sea Res.* 2011; **65**: 205–212.
- 5) Adams SM. The ecology of eelgrass, *Zostera marina* (L.), fish communities. I. Structural analysis. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 1976; **22**: 269–291.
- 6) Heck Jr. KL, Hays G, Orth RJ. Critical evaluation of the nursery role hypothesis for seagrass meadows. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 2003; **253**: 123–136.
- 7) Larkum AWD, Orth RJ, Duarte CM. *Seagrasses: Biology, Ecology and Conservation*. Springer, Dordrecht, 2006.
- 8) Sogard SM. Variability in growth rates of juvenile fishes in different estuarine habitats. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 1992; **85**: 35–53.
- 9) Hori M, Suzuki T, Monthum Y, Srisombat T, Tanaka Y, Nakaoka M, Mukai H. High seagrass diversity and canopy-height increase associated fish diversity and abundance. *Mar. Biol.* 2009; **156**: 1447–1458.
- 10) 玉置 仁, 村岡大祐. 地震とそれに伴い発生した津波が藻場・干潟生態系に及ぼした影響. 水環境学会誌 2011; **34**: 400–404.
- 11) Takami H, Won NI, Kawamura T. Impacts of the 2011 mega-earthquake and tsunami on abalone *Haliotis discus hannai* and sea urchin *Strongylocentrotus nudus* populations at Oshika Peninsula, Miyagi, Japan. *Fish. Oceanogr.* 2013; **22**: 113–120.
- 12) Urabe J, Suzuki T, Nishita T, Makino W. Immediate ecological impacts of the 2011 Tohoku earthquake tsunami on intertidal flat communities. *PLoS ONE* 2013; **8**: e62779, doi:10.1371/journal.pone.0062779.
- 13) Kawamura T, Takami H, Hayakawa J, Won NI, Muraoka D, Kurita Y. Changes in abalone and sea urchin populations in rocky reef ecosystems on the Sanriku coast damaged by the massive tsunami and other environmental changes associated with the Great East Japan Earthquake in 2011. *Global Env. Res.* 2014; **18**: 47–56.
- 14) Nomaki H, Mochizuki T, Kitahashi T, Nunoura T, Arai K, Toyofuku T, Tanaka G, Shigeno S, Tatsumi E, Fujikura K, Watanabe S. Effects of mass sedimentation event after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake on benthic prokaryotes and meiofauna inhabiting the upper bathyal sediments. *J. Oceanogr.* 2016; **72**: 113–128.
- 15) Seike K, Shirai K, Kogure Y. Disturbance of Shallow Marine Soft-Bottom Environments and Megabenthos Assemblages by a Huge Tsunami Induced by the 2011 M9.0 Tohoku-Oki Earthquake. *PLoS One* 2013; **8**: e65417.
- 16) Shoji J, Morimoto M. Changes in fish community in seagrass beds in Mangoku-ura Bay from 2009 to 2014, the period before and after the tsunami following the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake. *J. Oceanogr.* 2016; **72**: 91–98.
- 17) Noda T, Hamaguchi M, Fujinami Y, Shimizu D, Aono H, Nagakura Y, Fukuta A, Nakano H, Kamimura Y, Shoji J. Impact of the Tsunami caused by the Great East Japan Earthquake on seagrass beds and fish communities in Miyako Bay, Japan. *Coast. Ecosys.* (in press).
- 18) Masuda R, Hatakeyama M, Yokoyama K, Tanaka M. Recovery of Coastal Fauna after the 2011 Tsunami in Japan as Determined by Bimonthly Underwater Visual Censuses Conducted over Five Years. *PLoS ONE* 2016; **11**: e0168261.
- 19) Fukuta A, Kamimura Y, Hori M, Nakaoka M, Noda T, Yamashita Y, Otake T, Shoji J. Offshore currents explain the discontinuity of fish community in seagrass bed along the Japanese archipelago. *Fish. Oceanogr.* 2016; **25**: 65–68.
- 20) Costanza R, d'Arge R, de Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, O'Neill RV, Paruelo J, Raskin RG, Sutton P, van den Belt M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature* 1997; **387**: 253–260.
- 21) 高橋清孝, 星合愿一, 阿部洋士. 石巻湾および万石浦におけるマコガレイ浮遊期仔魚の分布と移動. 水産増殖 1986; **34**: 1–8.
- 22) 児玉純一. 万石浦ニシンの長期変動に関する一考察: 特に金華山近海域の気象 海況および生物群集との関係. 宮城県水産研究開発センター研究報告 1995; **14**: 17–36.
- 23) 座間 彰. 万石浦に出現する魚類の生態学的研究. 博士論文, 東京水産大学, 東京. 1998.
- 24) 水産総合研究センター. 藻場への影響～アモモ場が減少. *Fisheries Research Agency News* 2012; **30**: 10–11.
- 25) Kamimura Y, Kasai A, Shoji J. Production and prey source of juvenile black rockfish *Sebastes cheni* in a mixed vegetation area of seagrass and macroalgae off Aba Island, central Seto Inland Sea, Japan: an estimation of the economic value of a fish nursery. *Aquat. Ecol.* 2011; **45**: 367–376.
- 26) Horinouchi M. Distribution patterns of benthic juvenile gobies in and around seagrass habitats: effectiveness of seagrass shelter against predators. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 2007; **72**: 657–664.
- 27) 酒井敬一. 宮城県における水産業の被害状況と復興への取組. 日本水産学会誌 2012; **78**: 285–287.