気仙沼市舞根地区の津波浸水域における トウホクサンショウウオの卵嚢分布の経年変化

An Annual Variations Survey on the Distribution of Egg Clutches of Tohoku Salamander (*Hynobius lichenatus*) in the Tsunami Inundated Lowland Area of Moune, Kesennuma, Miyagi

板川 暢* 樋口 陽平** 一ノ瀬友博*** 横山 勝英****
Satoru ITAGAWA Yohei HIGUCHI Tomohiro ICHINOSE Katsuhide YOKOYAMA

Abstract : This survey monitored the quantity and distribution of egg clutches of Tohoku salamander (*Hynobius lichenatus*) in the tsunami inundated lowland area from the period 2012 to 2015, looking at the case of Moune district, Kesennuma city, Miyagi prefecture, Japan. After the 2011 Tohoku Earthquake, lowland area almost changed into wetlands by erosion and land subsidence, and seawater ran into a part of the lowland. Lots of egg clutches were found in the whole area in 2012. However several egg clutches deposited in brackish-water were dead. After 2013, the number of egg clutches declined, and the distribution moved inland. The number of egg clutches roughly increased in 2015, indicating the meta-population of Tohoku salamander's resilience against temporary disturbance caused by the tsunami. Models of relations analyzed between the numbers of egg clutches in each year showed larger population had higher resilience and the numbers of dead egg clutches had negative correlation to the total numbers of egg clutches in late years. Results indicated that the environmental changes after the tsunami had more severe impacts on the population's survival. However the population of Tohoku salamander had resilience under the natural state. This resilience may be weakened by man-made induced environmental changes and habitat loss from the tsunami recovery and reconstruction works. Hence, the need for conservation and monitoring was suggested.

Keywords : Great East Japan Earthquake, time-series variation, disturbance, resilience, recovery and reconstruction, habitat loss
キーワード : 東日本大震災, 時系列変化, 攪乱, 復元力, 復旧・復興事業, 生息地減少

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東日本大震災では、大地震に伴う大津波が多くの尊い人命を奪い、東北地方沿岸地域の生活基盤にも多大な被害をもたらした。津波の浸水面積は青森県から千葉県までで561km²にも及び¹⁾、うち都市的土地利用(建物用地・交通用地・その他の用地)が32%、水田などの農地が42%、森林が7%を占めた²⁾。今回の大津波は生態学的な歴史的大規模攪乱であり、沿岸部の農村景観や自然環境は、大津波による海岸林の破壊、浸食や地盤沈下などといった物理的な生息環境の破壊とともに、海水の浸入による化学的な影響により汽水化するなど、低地部にあった従来のハビタット(生物の生息・生育地)は甚大な被害を受けた。例えば、沿岸部のクロマツ林の倒壊³⁾やリター層や林床の低層植生の喪失⁴⁾、塩害によるスギの枯死⁵⁾などが報告されているほか、津波が遡上した河川の底生生物の多様度が低下したとされる⁶⁾。一方で、津波による攪乱後に生物相の回復が進んでいることも報告されており、海浜植物や海岸林内の植生、昆虫類などの事例がある^{7)~9)}。加えて、攪乱による環境の変化に伴い、新たに湿地環境などが形成されたことより、種構成の変化や震災以前には確認できなかった種の生息が確認されるなど今後の動向が注目されている¹⁰⁾。海岸林内の植物の α 多様性及び β 多様性が増加したことや¹¹⁾、津波浸水域の水田と浸水域外の水田ではカ類^{12), 13)}や水域に依存する生物¹⁴⁾の種構成が異なることが報告されている。しかしながら、攪乱に依存する植物や移動性の高い生物については、津波の攪乱からの植生回復や多様性の変化が調査・モニタリングされているものの、移動性が低い小動物や今回の津波によって大きく変化した低地部の環境、特に淡水環境に依存していた生物についての報告事例¹⁴⁾は少数に留まる。また、自然環境や生物相の変化について、震災直後から継続的な

モニタリングが行われている事例はあるものの¹⁰⁾、その蓄積は十分とは言えない。

また、津波浸水域の自然環境とそこに形成される生態系は、津波の攪乱の影響に加えて、復旧・復興事業による破壊の脅威にさらされているとされ、沿岸部の海浜や後背の湿性環境が姿を消しつつある¹⁵⁾。特に、水田や地盤沈下によって形成された湿地環境は、農地復旧や嵩上げ、道路新設などの各種事業による埋め立てが進んでおり、従来の自然環境を含め、陸域の淡水環境に依存する生物相の生息環境が失われつつあり、復旧・復興の進展に伴いさらなる人為的な環境変化が予想される。

こうした状況を踏まえ、本研究では津波の浸水に伴う環境の変化及び復旧・復興事業による人為的な環境の改変が、陸域の生物相に与えた影響を明らかにするために、津波浸水域の低地部の湿地環境を中心に、水域に依存する地上徘徊性の生物であるトウホクサンショウウオ(*Hynobius lichenatus*)の被災後の分布とその経年変化を把握した。

2. 研究方法

(1) 研究対象地

本研究は、宮城県気仙沼市舞根2区(以下、舞根地区)(N38.900, E141.624)を対象に調査を行った(図-1)。舞根地区はリアス地形の湾奥に形成された集落で、東日本大震災に伴う津波で低地部全域が浸水した。最大遡上高が15m、海岸付近では12m付近に痕跡が認められ¹⁶⁾、公開されている津波浸水範囲のさらに奥の谷地まで残留物が確認された。被災前は54世帯が立地し、大きな2つの谷を流れる小河川に沿って水田が形成され、豊富な湧水が水路を経て水田に引かれていた。ヒアリング及び過去の空中写真の判読から、水田は70年代から放棄が進み、2000

* 慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科 ** 慶應義塾大学総合政策学部 *** 慶應義塾大学環境情報学部

**** 首都大学東京都市環境学部

年前後にはほぼ全ての水田が休耕状態にあり、初期に放棄された箇所は低灌木の移入したヨシ原になっていた¹⁷⁾。

津波の浸食と地盤沈下を受け、排水管から満潮時に海水が流入するようになり、一部の休耕地が汽水湿地となった¹⁸⁾ (図-1)。汽水化していない休耕地は、津波によってヨシなどの表層の植生は洗掘され、雨水や滲み出した湧水が溜まる淡水の湿地になっている。また、高台移転地の造成と新設道路の敷設、農地復旧などに伴って埋め立てられた (図-2)。

(2) トウホクサンショウウオの卵嚢・成体調査

トウホクサンショウウオは準絶滅危惧 (NT)¹⁹⁾ に分類される両生類で、東北地域の低山地に分布する。産卵期にあたる3月-4月を中心に、浅い水域や湧水部、緩やかな流れで2房1対のコイル状の半透明な卵嚢を産卵するとされ、当該地域では5月中旬には殆どが孵化する。孵化後の幼生期は水中で過ごし、孵化直後の体長12-14mm程度から、上陸し始める秋頃には40mm程度まで成長する。多くの個体はその年のうちに上陸するが、幼生越冬する個体もいるとされている。上陸後の成体は性成熟までは4-5年を要するとされ、非繁殖期の成体は産卵場付近の湿った環境や林床で生活する^{20), 32)}。近縁のサンショウウオと同様、1個体の成熟雌から1回の繁殖で1対の卵嚢が生まれるとされ、成熟雌のおおよその個体数を推定することができる²⁰⁾。トウホクサンショウウオは、

生活史の中で陸域と水域を使い分け、繁殖に浅い水域を好むこと、そして東日本大震災の発災直後の時期が繁殖期にあたるという特性から、本研究の津波による攪乱と環境の変化の影響を検証するという目的に適した生物種である。

トウホクサンショウウオの卵嚢及び成体の確認調査を、2012年から2015年までの4ヶ年行った。従来は休耕地だった湿地や水路、池跡、湧水箇所などの低地部の湿性環境 (図-1) を主な調査対象とし、2012年度は後背の山林部の沢や湧水箇所を含めた津波浸水範囲を網羅的に調査した。繁殖期の終期を調査時期と定め、2012年は計3回 (4/8-9, 4/21-23, 5/13-15), 2013年から2015年は4月中旬に1回ずつの調査を行った。分布調査は卵嚢の有無によって判断し、確認した卵嚢数と位置情報を記録した。同時に卵嚢の内部の個々の卵を目視で確認し、卵の形状が崩れて水溶化しているものや完全に白色化しているものなどを、死亡している卵であると判断した。その上で、卵嚢内にある卵の8割程度以上が死亡しているものや、卵嚢自体の形状が崩壊しているものを死亡した卵嚢 (以下、死卵嚢) とした。また、成熟していると思われる成体が確認された場合には、個体数と位置情報を記録した。

(3) 分析方法

各調査年度の浸水域内のトウホクサンショウウオの卵嚢の分布

図-1 津波浸水・汽水化範囲と調査対象の湿性環境(2012年時点) 汽水範囲は横山 (2013)¹⁸⁾ を参考に、ヒアリング・現地調査の結果を踏まえて作成。湿性環境の履歴は過去の空中写真及びヒアリング調査を基に作成。浸水域は原口 (日本情報地質学会)²¹⁾ のデータを使用。

図-2 2015年時点の低地環境の状態と調査区域 UAVで撮影 (2015年6月19日) した空中写真を使用。アルファベットA-Hは分析対象の調査区域。(※中央上部の造成地は舞根地区の高台移転地。一部を除いて、多くの湿地が埋め立てられた。)

状況と湿地・水田などの生息環境との対応を把握するために、GISで確認地点を地図上にプロットした。また、低地部の湿地環境で確認された卵囊群を16箇所の調査区域に分類した。これらは地形や集水域、構造物や汽水・海水による分断を考慮し、同一の調査区域のハビタットに依存している個体のグループであると判断した。ベースとなる地図には、国土地理院発行の災害復興計画基図及びUAVを用いて筆者らが2015年6月19日に撮影した空中写真を使用した。また、被災前後及び過去の水田などの生息環境の判読には、米軍（1948年）、国土地理院（1966年、1977年、1981年）及びNTT空間情報（株）（2010年）が撮影した空中写真を用いた。水田の利用履歴や過去の実環境の状況については、地域住民によるヒアリングを併せて行った。汽水環境の範囲は既往文献¹⁸⁾及び研究者・地元住民らへのヒアリングを参考にするとともに、海水・汽水環境もしくは淡水環境下に生息する生物を

確認し、おおよその汽水環境（海水が浸入する範囲）を判別した。GISはESRI社のArcMap 10.2、空中写真を撮影したUAVはsenseFly社製のeBee、カメラはCanon社製のPowerShot ELPH110HSを使用した。また、汽水湿地の1箇所（図-2）で定期的に計測した塩分濃度及び水位（水面標高）を使用した。塩分濃度は10-15分間隔で2012年2月29日から2015年10月31日まで（不定期の交換時期を除く）、水位は10分間隔で2012年度の繁殖期前半にあたる2月29日から4月19日まで、及び2015年度の幼生期にあたる5月24日から10月22日まで記録されている。

卵囊数・死卵囊数の各調査年度間の関係を把握するために、4年間継続して調査データが得られている8箇所の調査区域（A-H）を対象に、時系列自己相関・偏自己相関の確認、及びポアソン回帰モデルによる分析を行った。まず、対象年度（2013年、2014年、2015年）の総卵囊数を目的変数、前年度以前の総卵囊数・生存（発生が進んでいる）卵囊数・死卵囊数を説明変数に設定し、それぞれの関係を確認した。次に、時系列的な卵囊数の関

表-1 2012年度に行った調査で確認した卵囊数

左列の英字は卵囊を確認した調査区域を示す（図-2参照；Pは図外N 38.8885、E141.6145付近）。（※生存：生存卵囊，死卵：死卵囊）

調査湿地 (個体群)		2012年								
		1回目 4/8-4/9			2回目 4/21-4/23			3回目 5/13-5/15		
		生存	死卵	合計	生存	死卵	合計	生存	死卵	合計
分析対象	A	76	0	76	331	15	346	188	80	268
	B	49	0	49	86	37	123	14	21	35
	C	0	0	0	0	0	0	2	67	69
	D	36	0	36	52	20	72	19	9	28
	E	0	0	0	0	0	0	1	0	1
	F	33	0	33	43	0	43	17	8	25
	G	0	0	0	48	0	48	10	3	13
	H	14	0	14	41	4	45	0	8	8
(分析対象外)	I	0	0	0	0	0	0	1	0	1
	J	12	0	12	15	0	15	3	0	3
	K	1	0	1	9	0	9	6	0	6
	L	16	0	16	23	0	23	0	0	0
	M	2	0	2	10	0	10	13	0	13
	N	0	0	0	0	0	0	2	0	2
	O	20	0	20	0	0	0	7	1	8
	P	2	0	2	1	0	1	1	0	1
合計		261	0	261	659	76	735	284	197	481

図-3 2012年1回目の卵囊・成体の分布

図中英字は調査区域（図-2・表-1と対応）を示す（※図-4～8も同様）

図-4 2012年2回目の卵囊・成体の分布

図-5 2012年3回目の卵囊の分布

表－2 分析対象とした調査区域の卵囊数（2012年-2015年の4箇年）
 2012年の卵囊数は、3回の調査のうち（表－1）各調査区域の合計卵囊数が最大の回の値を採用した。合計差は、前後の年度の合計卵囊数の差を示す。（※生存：生存卵囊、死卵：死卵囊）

調査区域 (湿性環境)		2012年			'12-'13 合計差	2013年			'13-'14 合計差	2014年			'14-'15 合計差	2015年		
		生存	死卵	合計		生存	死卵	合計		生存	死卵	合計		生存	死卵	合計
分析対象	A	331	15	346	▲ 265	72	9	81	▲ 68	11	2	13	30	40	3	43
	B	86	37	123	▲ 92	31	0	31	4	35	0	35	43	71	7	78
	C	2	67	69	▲ 69	0	0	0	5	3	2	5	12	14	3	17
	D	52	20	72	▲ 65	4	3	7	6	13	0	13	9	20	2	22
	E	1	0	1	▲ 1	0	0	0	29	23	6	29	▲ 5	22	2	24
	F	43	0	43	▲ 43	0	0	0	19	8	11	19	11	29	1	30
	G	48	0	48	▲ 36	12	0	12	▲ 5	6	1	7	20	27	0	27
	H	41	4	45	▲ 45	0	0	0	22	22	0	22	▲ 22	0	0	0
合計		604	143	747	▲ 616	119	12	131	12	121	22	143	98	223	18	241

係を検証するために、連続する年度（2012年-2013年、2013年-2014年、2014年-2015年）の後年度の総卵囊数を目的変数、前

年度の総卵囊数・生存卵囊数・死卵囊数のそれぞれを説明変数に設定したモデルを作成した。また、死卵囊数を説明変数にしたモデルに、総卵囊数と死卵囊数の交互作用項を加えたモデルも作成し、総卵囊数に対する相対的な死卵囊数の影響を検証した。加えて、1年間隔の年度間（2012年-2014年、2013年-2015年）でも同様に後年度の総卵囊数と前々年度の卵囊数の関係を検証した。2012年度については、前後の調査で重複して確認した卵囊も存在するため、3回の調査のうち各調査区域における総卵囊数が最大の回の数値を、2012年度の各調査区域の卵囊数として採用した。統計ソフト R 3.2.3 GUI 1.66 Mavericks build を使用し、R パッケージ MCMCpack version 1.3-3 を用いて、マルコフ連鎖モンテカルロ（MCMC）によるベイズ推定を行った。ベイズ推定の MCMC 回数を 500,000 回とし、稼働検査期間とする最初の 400,000 回をサンプリングから除外し、続く 100,000 回の MCMC から抽出した 10,000 サンプルを用いて、説明変数の事後分布を推定した

3. 結果

（1）震災1年後のトウホクサンショウウオの分布状況

調査の結果、2012年の4月上旬に行った1回目の調査では、津波浸水域内で卵囊 261 対、成体 3 個体を確認した（表－1・図－3）。2012年は例年に比べて4月の平均気温が1℃程度低く、卵の状態は産卵直後から発生初期にあり、死卵囊は確認されなかつ

図－6 2013年の卵囊の分布

図－7 2014年の卵囊の分布

図－8 2015年の卵囊の分布

た。成体は3個体とも水中で確認され、繁殖・産卵に訪れている成熟個体であると思われる。2回目の調査では合計735対の卵囊（生存卵囊659対、死卵囊76対）と4個体の成体（図-4）、3回目の調査では合計481対（生存卵囊284対、死卵囊197対）の卵囊を確認した（図-5）。

2012年の3回の調査を通して、前述の8箇所の調査区域を含む、16箇所の調査区域で産卵が認められた（表-1）。津波が浸水した低地部の湿地でも、低地縁辺に残存している素掘りの水路跡や谷地付近の湧水箇所などの周辺に多くの卵囊が確認された（調査区域A）。しかし、繁殖終期の調査（3回目）では多くが死亡していることが確認された。特に、広範囲に海水が浸入している湿性環境（調査区域C・D）では半数以上の卵囊が死亡していた。一方で、津波浸水域でも湧水や井戸跡、谷奥部の沢などの水供給が豊富な箇所では死卵囊は少なく、発生が進んでいた（表-1・図-5）。卵囊の分布は全体的に西舞根川の集水域に集中しており、東舞根川の右岸側の崖下の水路や水田跡では確認されなかった（図-2）。また、コンクリート水路では卵囊が確認されず、コンクリート水路で隔てられた樹林側の水域での分布はごく少数に限られた。

（2）2013年-2015年の卵囊分布状況

震災から2年後にあたる2013年の調査では、浸水域全域で確認された卵囊は合計205対（生存卵囊184対、死卵囊21対）だった。同様に、2014年度は合計166対（生存卵囊137対、死卵囊29対）、2015年は合計249対（生存卵囊230対、死卵囊19対）が確認された。2013年以降は死卵囊の割合が大幅に減少した。

表-2は、分析対象とした調査区域の2012年-2015年の4年間の卵囊数の変化を示す。2012年から2013年に掛けて全調査区域の卵囊の確認数は減少した。特に調査区域A・B・Dは著しく減少し、調査区域Cを含む4箇所では卵囊の存在を確認できなかった。2014年には調査区域Aで個体数の減少が目立つものの、一方で調査区域Eは大きく増加した。概ね緩やかな増加傾向にあり、2013年と同程度以上の卵囊が確認された。2015年には全体的に増加しており、調査区域Bは2012年と同程度まで増加した。一方で、調査区域Hは2015年に卵囊は確認されなかった。

2013年及び2014年の死卵囊の分布は汽水範囲に集中し、それ以外では概ね発生が進んでいた。汽水範囲に分布する卵囊数自体が減少し、おおよそ海水の浸入域に沿って分布域が後退していた（図-6・図-7）。2015年には、前年度の秋以降に進められた農地復旧により、調査区域A・B・Cの湿地は埋め立てられたものの、残された素掘りの水路などで多数の卵囊が確認された（図-2）。地形が変わったものの、死卵囊の分布は当初の汽水範囲とおおよそ重なった（図-8）。この水路は図-2の調査区域B側の一部が再度掘削して復元されているものの、それ以外は従来のまま残されており、地標高は震災後のままになっているため、現在も満潮時には西舞根川の排水管から海水が逆流してくる。

（3）年度間の卵囊数の関係

分析の結果、調査対象域全体及び各調査区域における総卵囊数には時系列自己相関・偏自己相関は見受けられなかった。ポアソン回帰の8つのモデルの結果を表-3に示す。表内の数値は回帰係数の平均値を示し、95%信用区間（2.5%値-97.5%値の区間）が0を跨いでいないものは、有意な相関があると判断した。

連続する単一の年度間（表-3；1-a）では、2012年（説明変数）-2013年（目的変数）及び2014年-2015年の間で、前年度の総卵囊数及び生存卵囊数が、次年度の総卵囊数に有意に関係していることが分かった。生存卵囊数と死卵囊数の両方を説明変数に採用したモデルでは、2012年-2013の組み合わせで生存卵囊と死卵囊数のどちらもが有意な正の関係があり、2013年-2014年では生存卵囊数が正に、死卵囊数が負に有意な関係があることが分かった。2014年-2015年の組み合わせでは、生存卵囊数だけ

表-3 モデル結果一覧

表内数字は回帰係数の平均値（有効数字3桁）、95%信用区間（2.5%値-97.5%値の区間）が0を跨がなかった要因にはアスタリスク（*）を付記した。（※N：各モデルのサンプル数、総数：総卵囊数、生存：生存卵囊数、死卵：死卵囊数；回帰係数黒字：平均値>0（正の相関）、赤字：<0（負の相関））

（1）各年度間の卵囊数の関係

（1-a）1年間

モデル（N=8）		回帰係数		定数項
目的変数	説明変数	総数	生存	死卵
2013年	2012年	9.21E-03 *		1.27 *
			8.95E-03 *	1.48 *
				2.20E-03
2014年	2013年	9.43E-03 *		1.09 *
				2.89 *
			8.27E-05	2.88 *
2015年	2014年	-5.75E-04		2.95 *
			0.0163 *	-0.0567
				-0.160 *
2015年	2014年	0.0335 *		2.84 *
			0.0317 *	2.75 *
				0.0151
2015年	2014年			2.87 *
				3.44 *
			0.0336 *	2.79 *

（1-b）2年間

モデル（N=8）		回帰係数		定数項
目的変数	説明変数	総数	生存	死卵
2014年	2012年	-8.97E-04		2.96 *
			-6.16E-04	2.92 *
				-6.20E-03
2015年	2013年	-6.49E-04		2.98 *
				-6.12E-03
		0.0113 *		3.02 *
2015年	2013年		0.0134 *	3.16 *
				0.0368
			0.0398 *	3.14 *
2015年	2013年			3.34 *
				-0.227 *
				3.00 *

（1-c）3年間

モデル（N=8）		回帰係数		定数項
目的変数	説明変数	総数	生存	死卵
2015年	2012年	2.39E-03 *		3.14 *
			3.02E-03 *	3.17 *
				7.03E-03 *
2015年	2012年			3.19 *
				2.81E-03 *
				9.76E-04
2015年	2012年			3.15 *

（2）時系列的な卵囊数の関係

（2-a）連続年（1年前の影響）

モデル（N=24）		回帰係数		定数項
目的変数	説明変数	総数	生存	死卵
対象年度	前年度	4.24E-03 *		2.82 *
2013年-2012年			5.80E-03 *	2.81 *
2014年-2013年				0.0106 *
2015年-2014年	を統合		0.0132 *	-0.0245 *
2015年-2014年	を統合			2.79 *

（2-b）1年間隔（2年前の影響）

モデル（N=16）		回帰係数		定数項
目的変数	説明変数	総数	生存	死卵
対象年度	前々年度	-1.08E-03		3.23 *
2014年-2012年			-4.11E-04	3.19 *
2015年-2013年	を統合			-0.0108 *
2015年-2013年	を統合			3.31 *
2015年-2013年	を統合		7.96E-03 *	-0.0295 *
2015年-2013年	を統合			3.20 *

が有意な正の相関が見られた。2年間隔の年度間の卵囊数の関係を対象としたモデル（表-3；1-b）では、2012年-2014年の間には有意な関係は認められなかった。2015年-2013年の間では総卵囊数及び生存卵囊数が正に関係しており、生存卵囊数と死卵囊数の両方を説明変数に採用したモデルでは生存卵囊数が正に、死卵囊数が負に関係していた。2012年-2015年の3年間（表-3；1-c）では、説明変数とした2012年の総卵囊数・生存卵囊数及び死卵囊数が、2015年の総卵囊数に有意な正の相関を示し、

表－4 総卵囊数と死卵囊数の交互作用項を加えたモデル結果
表内数字は回帰係数の平均値（有効数字3桁）、95%信用区間（2.5%値 - 97.5%値の区間）が0を跨がなかった要因にはアスタリスク（*）を付記した。（※1 N：サンプル数，死卵：死卵囊数，交互作用項：総卵囊数と死卵囊数の交互作用；（多群）：卵囊数の多い調査区域（※2），（少群）：卵囊数の少ない調査区域（※2）；回帰係数黒字：平均値>0（正の相関），赤字：<0（負の相関））

※2 多群＝総卵囊数－（総卵囊数の平均＋総卵囊数の標準偏差）
少群＝総卵囊数－（総卵囊数の平均－総卵囊数の標準偏差）

（3）総卵囊数に対する相対的な死卵囊数の影響を加味

（3-a）連続年（1年前の影響）

3年度間（2013年-2012年・2014年-2013年・2015年-2014年）を統合

モデル（N=24）		回帰係数		定数項
目的変数	説明変数	死卵	交互作用項	
対象年度	前年度	-0.0334 *	1.45E-04 *	3.07 *
		-0.0168 *	1.45E-04 *	3.07 *
		-0.0375 *	1.45E-04 *	3.07 *

（3-b）1年間隔（2年前の影響）

2年度間（2014年-2012年・2015年-2013年）を統合

モデル（N=16）		回帰係数		定数項
目的変数	説明変数	死卵	交互作用項	
対象年度	前々年度	-1.61E-02 *	2.30E-05	3.32 *

生存卵囊数・死卵囊数を説明変数に加えたモデルでは、生存卵囊数のみが正の相関を示した。

時系列的な卵囊数の関係については、連続する年の卵囊数との関係（1年前の卵囊数の影響）を対象としたモデル（表－3；2-a）では、前年度の総卵囊数・生存卵囊数及び死卵囊数が、次年度の総卵囊数に有意に正の相関を示し、生存卵囊数と死卵囊数の両方を説明変数に採用した場合では、生存卵囊数が正に、死卵囊数が負に関係していた。目的変数とする対象年度の2年前の卵囊数を説明変数としたモデル（1年間隔）では、死卵囊数のみのモデルでは負の相関を示し、生存卵囊数と死卵囊数の両方を説明変数に採用したモデルでは、前々年度の生存卵囊数が正の、死卵囊数が負の有意な相関を示した（表－3；2-b）。

また、総卵囊数と死卵囊数の交互作用項を加えて相対的な死卵

囊数の影響の度合いを検証したモデルでは、1年後の総卵囊数に対して、死卵囊数及び交互作用項とも有意な相関を示した。特に、総卵囊数が多い調査区域（多群）に比べ、より総卵囊数が少ない調査区域（少群）では次年度の総卵囊数に対する死卵囊数の負の影響が強まった（表－4；3-a）。一方で、2年後への影響を加味したモデルでは、死卵囊数のみが有意な相関を示し、総卵囊数と死卵囊数の交互作用項は有意な相関は示さなかった（表－4；3-b）。

4. 議論

（1）震災1年後の卵囊の分布・死亡状況

調査の結果、震災から1年後の時点では、卵囊の分布箇所は湿性環境の全域に広がり、1回の調査で最多735対もの卵囊が確認され、汽水化した湿地でも多数の卵囊が確認された。本研究の調査では、産卵のために水域に集まっていたと考えられる5個体の成体も確認されたことも踏まえると、低地部及びその縁辺部の樹林地への津波の浸水被害後も、舞根地区のトウホクサンショウウオは一定の個体群が維持されていたことが明らかになった。津波で浸水した水田の地上徘徊性及び水域だけに依存する小動物は、非浸水水田に比べて確認種数・個体数が少ないことが報告されているが、水域以外を一時的な休息地とする種では有意な差がなかったとされている¹⁴⁾。トウホクサンショウウオは地上徘徊性ではあるが、非繁殖期に樹林を利用するという生態的特性により、成体自体は一過的な津波浸水を耐えることができたことが分かる。しかしながら、汽水化範囲の縁辺部に死卵囊が集中しており、特に塩分濃度が高い水域ではほぼ全ての卵囊が死亡していた。この結果は、津波浸水という一過的な攪乱の影響以上に、津波による浸食や地盤沈下に伴って、汽水化や海水の流入が起こるようになったという環境の変化の影響が大きいことを示唆している。

卵囊の塩分濃度への耐性については、道路除氷剤から溶出する塩分が両生類の卵塊に及ぼす影響を検証した研究において、他属の種（*Ambystoma maculatum*）では産卵環境の水域の塩分濃度が上がると卵塊内の胚の生存率が低下し、奇形率も上昇することが報告されている²²⁾。また、塩分濃度の高い水域内では卵塊

図－9 2012年-2015年の繁殖期における汽水湿地の塩分濃度変動
汽水湿地の1箇所でもローガーを用いて計測した（図－2参照）。（※N：計測回数，Mean：塩分濃度平均値（%））

の体積が減少し、その後真水に卵塊を移動させても体積が戻らないことが示されている²³⁾。今回の卵囊の分布は林縁部でも海水の移入口付近などでは確認されなかったことから、塩分濃度のより高い水域を忌避していることが分かった。また、2012年時点では汽水化した見られる範囲の奥側の湧水地点や沢といった淡水が豊富な場所でも死亡した卵囊が多数あった。2012年の繁殖期の汽水域の塩分濃度は平均2.5%~3.0%程度(図-9)で、卵囊に影響が出るとされる濃度(145mg/L)を大きく上回っていた^{22), 23)}。記録が得られている2012年度の繁殖期前半の汽水湿地の標高水面は、最大でTP0.565mまで上昇していた(図-10; 中央値0.055m, 平均0.079m)。地盤沈下によって地形が変化しており、当時の正確な海水の浸入している範囲や塩分濃度の分布は把握し得ないものの、汽水湿地化した低地部の標高はTP-0.8mから0.2m程度、卵囊が継続的に確認された箇所でもTP0.4mから1.2m程度である²⁴⁾。水路や水が溜まっている窪地ではさらに標高が低いことから、繁殖・産卵が行われている期間中の一時的な潮位変動により産卵水域に海水が流入し、塩分濃度の高くなったことが分かる。降雨などによって産卵水域の塩分濃度が低下しても、一度受けた塩分による卵塊への悪影響は回避できないことが言及されていることから²³⁾、湿地には湧水や降雨由来の淡水が供給されているものの、同様に一時的な浸水や残留した塩分などの影響があったと考えられる。

また、同属近縁種のトウキョウサンショウウオ(*Hynobius tokyoensis*)では水温が卵の死亡に関与するとされ、より低温の環境下では孵化までの時間が長くなり、死亡率が高まるとされている²⁵⁾。2012年の3月から4月の中旬までは平均気温を下回っていたため²⁶⁾、繁殖期前半にあたる時期に例年よりも水温が低かったことが、繁殖や卵囊の発生に影響していた可能性があるが、今回は水温に関する検証をしていないものの、より水温が低いと推

察される沢や水路で確認された卵囊では死亡卵が少なかったことから、単純に一致するものではない。また、産卵期の遅い時期に産み付けられたものほど、雄との遭遇率や雄の疲弊から未受精卵が増え、死亡率が上昇するとされ^{25), 27)}、今回の結果でも同様の傾向が見られた。一方で、後期に確認された卵囊でもおおよそで発生が進んでいたことや(例えば、調査区域O)、そして新たに産み付けられた卵囊数が多いにも関わらず、その殆どが死亡しており(調査区域C)、卵囊の死亡率にも調査区域によって差があった。

(2) 震災2年後以降の卵囊の減少・分布変化

2012年に比べ、2013年・2014年の総卵囊数は大幅に減少し、おおよそ分布範囲が後退した。一方で、死卵囊数も減少した。死卵囊の分布は汽水環境に集中して見られ、2012年時点で死卵囊が確認された汽水域外の箇所を含め、それ以外の調査区域では死卵囊はほとんど確認されなかった。2012年から大幅に卵囊数が減少した理由として、トウホクサンショウウオの成体の産卵・生育環境、繁殖行動の観点から以下の二点が考えられる。

一点目は、産卵環境の塩分濃度の影響を受け、成熟個体及び孵化後の幼生が死亡・減少した可能性が挙げられる。他属のサンショウウオ(*Salamandra salamandra*)の成体の塩分濃度への耐性を検証した研究では、ある程度の耐性はあるものの、一定の濃度以上になると浸透圧による体重変化が起き、死亡率が上がるとされ、死亡直前には30%程度の体重が減少することが報告されている²⁸⁾。また、他属のハコネサンショウウオ(*Onychodactylus japonicus*)では塩分濃度1%の水中で死亡するとされる²⁹⁾。今回の結果を鑑みると、繁殖のために集まっていた成体と多数の卵囊が汽水環境下でも確認されたことから、トウホクサンショウウオも成体自体は塩分濃度に対して、一時的にはある程度の耐性があることが分かった。しかし、近縁種のトウキョウサンショウウ

図-10 2012年の繁殖期前半(2/29-4/19)における汽水湿地の水面標高変動
汽水湿地の1箇所ではロガーを用いて計測した(図-2参照)。(※TP m: TPを基準にした水面標高, 10分間隔に計測)(図-10・図-11共通)
(計測回数: 7198回, 中央値: TP0.055m, 平均: 0.079m, 最大値: TP0.565m)

図-11 2015年の幼生期(5/24-10/22)における汽水湿地の水面標高変動
(計測回数: 216861回, 中央値: TP0.066m, 平均: 0.088m, 最大値: TP1.158m)

オの雄は10～20日程度の期間を水中に留まるとされる²⁶⁾。今回は死亡個体が確認されなかったものの、塩分濃度の高い水域内に長期間とどまっていたことが、その後の生存率に影響したことが考えられる。

同様に、塩分濃度が高い水に曝されたことで、上陸までの幼生期間に個体数が減少したと考えられる。2012年から2014年までの幼生期の水位変動データは得られていないものの、2015年の幼生期にあたる時期には汽水湿地の標高水面が最大でTP1.158mまで上昇しており、定期的にTP0.5m程度まで上昇している(図-11; 中央値0.066m, 平均0.088m)。恒常的な汽水環境下でなくとも、海水の浸入に伴って一時的に高い塩分濃度に曝されることは、成体と同様に死亡率が高まると考えられる。こうした点から、一時的にでも海水が浸入するような環境は、繁殖期と幼生期などの水中に依存する期間のトウホクサンショウウオにとってシンク(消失地)となっていると言える。

二点目には、攪乱後の環境条件の変化がある。調査区域A・Cはヨシをはじめとする植物が移入・繁茂したことで湿性環境の乾燥化が進んだことで、産卵場所となる環境が減少したことが考えられる。調査区域Hは2013年・2015年に卵囊自体が確認されず、変動が著しかった。砂浜の後背地にある休耕田であるため、砂浜の後退などによって地形が変化し、海水の流入状況や水深が変化していたことが影響していると考えられる。調査区域E・Fは、現在は復旧事業の堰き止められたものの、地盤沈下によって一時的に満潮時には全面的に海水が浸入する状態にあった。また、調査区域K・M・Nは2013年から開始した道路などの復旧事業の影響を受け、生息環境そのものが消失・減少した。調査区域A-Eに隣接した樹林は、津波の浸水による塩害で一部が枯死したため2012年に伐採され、低地と樹林の境界部分の環境が大きく変わった。非繁殖期のトウホクサンショウウオの成熟個体は繁殖水域の周辺で過ごす²⁰⁾、開放的な環境になったことによる地表部の乾燥や伐採時の人為的圧力による影響を受けたことも考えられる。こうした攪乱後の環境の変化により、繁殖・生息に適さない状況が生まれ、個体数の減少や利用の忌避があったと推察できる。

(3) 個体群の回復と過去の卵囊数との関係

2014年・2015年には、卵囊数は全体的に増加した。これは、地盤沈下や浸水による攪乱からの回復や、復旧事業などによる環境変化が落ち着き、安定した状態になったことが考えられる。2013年の夏以降は草本や低木が移入で林縁部の植生が回復しつつあるほか、復旧工事などにより一部が堰き止められて淡水部分が増えた。トウホクサンショウウオにとってシンクとなる汽水環境が形成されたことにより、従前のハビタットが大幅に減少したものの、その後安定した環境へ分布域が後退したことで、個体群は維持・回復に向かっていることが分かる。また、2014年・2015年の繁殖期前半の汽水環境の塩分濃度は前年度までに比べて低く、塩分濃度による影響は少なかったと言える(図-9)。

過去の卵囊数との関係については、目的変数とする年度の総卵囊数は、その前の年の総個体数及び生存卵囊数とおおよそ正に関係していた。また、2013年-2012年の単年度間、及び連続する年の組み合わせたモデルでは、説明変数を死卵囊数のみをとした場合、死卵囊数も正の相関を示した(表-3; 1-a・2-a)。これは、同一の個体群の大きさを表していると考えられる。前年度の卵囊数は、個体群の中の産卵が可能な成熟個体の数を示すものであり、汽水化などの環境の変化の影響を受けて個体数が減少、もしくは一部が別の繁殖場所に移動していることは考えられるものの、ある程度の個体が次年度も継続して同じ調査区域のハビタットで繁殖していることが示唆される。総卵囊数については、他の年度間の組み合わせでもおおよそ正の相関を示しており、特に2015年

-2012年の卵囊数の関係を示すモデルでは(表-3; 1-c)、総卵囊数・生存卵囊数・死卵囊数が全ての組み合わせで正に相関している。初期の個体群の大きさが、以後の個体数の維持に寄与していることが指摘されており、近縁のトウキョウサンショウウオで試行された個体群存続可能性分析(PVA)の結果では、初期のメスの個体数が多い個体群ほど50年後の絶滅率が低く、かつ個体群サイズが大きくなるという予測が出ている²⁷⁾。本研究は、短期間のデータかつ近接した小面積の調査区域を対象とした検証ではあるが、状態に関わらず卵囊数の多い調査区域ほど、以後の卵囊数が多いという結果は、産卵可能な成熟個体をより多く擁する調査区域、即ちハビタットを同じくする個体グループのサイズが大きいくほど、個体数の維持がなされ、かつ高い復元力(レジリエンス)を有していることを示すものである。

また、卵囊の状態を考慮した場合、生存卵囊数はおおよそ後年の卵囊数と正の相関を示し、特に生存卵囊数と死卵囊数の両方を説明変数に採用した場合では、6通りの年度間の組み合わせ、および統合したモデルの全てで、総じて正に相関していた(表-3)。一方で死卵囊数は、生存卵囊数と死卵囊数の両方を説明変数に採用した場合に一部で負の相関を示したほか(表-3; 1-a・1-b・2-b)、2年後の卵囊数との関係を検証したモデルでは単独でも有意に負の相関を示した(表-3; 2-b)。特に、死卵囊数が2年後の総卵囊数に有意な負の影響を示し(表-3; 2-b)、総卵囊数との交互作用に関係なかった(表-4; 3-b)。1年後ではなく、2年後の卵囊数に影響するという点を鑑みると、成熟個体や卵囊への直接的かつ短期的な影響よりも、幼生や未成熟個体に与えた中長期的な影響の方が大きく、さらにその影響は特定の範囲に留まらず全域に共通していることを示している。トウホクサンショウウオや近縁種では成熟までに3-7年を要するとされることから^{19), 20), 27)}、単純に卵囊の死亡によって後年の成熟個体の数が減少したことが影響しているとは考え難い。従って、上陸前の幼生や水辺に残っていた未成熟個体への影響の方が大きかったことが推察される。

加えて、死卵囊数単独では次年度の総卵囊数に対して負の相関を示さなかったものの(表-3; 2-a)、総卵囊数との交互作用を加味した場合では、死卵囊数は1年後の総卵囊数に負に作用し、特に少群における影響が相対的に強まった(表-4; 3-a)。これは、卵の死亡が発生する環境の占める割合が大きい調査区域では、個体の流出や成体の死亡などに起因した個体数の減少が起きていることを示している。従って、死卵囊数は環境の変化による負の影響を受けた個体の多さを示すものであり、逆に生存卵囊数は良質なハビタットを選択し、環境の変化による影響を受けなかった個体の多さを示すものである。すなわち、生存卵囊数や死卵囊数は環境の状態を代替的に説明していることが考えられる。生存卵囊数は各調査区域においてソース(供給源)となる良質なハビタットが維持された割合を示し、死卵囊数は海水の浸入などによるシンク化や生息地の減少(ハビタットロス)などの環境の改変の割合を示していることが示唆される。

(4) 人為的な環境改変によるハビタット減少と保全策の検討

2015年には、全体の卵囊数は増加し、概ね各調査区域の卵囊数も回復傾向にあった(表-2)。2014年から2015年にかけて実施された農地復旧による湿性環境の埋立てで、調査区域A・B・C(図-2)を中心にさらなるハビタットの減少があったものの、保全された湿地(図-2; 調査区域D)や素掘りの状態で残された水路(図-2)に多数の卵囊が確認され、繁殖環境として機能していた。しかしながら、この水路・湿地の周辺では、少数ではあるが再び死卵囊数が増加し、死卵囊の分布は2012年時点の海水浸入範囲とおおよそ一致していた。地形が変わったことで狭小な湿地や水路に、定期的な海水面の上昇(図-10・図-11)に伴っ

て塩分濃度が高いまま海水が浸入することに加え、埋立てによって良質なハビタットが減少したことで、再びシンクとなる環境下に再度移入し、繁殖・産卵が行われていることが分かる。

津波による攪乱からの回復過程にある当該地域のトウホクサンショウウオであるが、復旧・復興事業に伴う人為的な環境改変によって、繁殖・産卵環境となるハビタットが消失（調査区域K・M・N）、もしくは大幅に縮小した（調査区域A・B・Cなど；図－2）。こうした不可逆的な改変を受け、今後再び数を減らすことも十分に考えられる。近縁種のトウキョウサンショウウオで推計された最小存続可能個体数（MVP）では、60個体以上の個体群で50年後、100個体以上で100年後まで存続する可能性が高いことが示されている²⁷⁾。2013年以降は個体数が大幅に減少し、ほぼ全ての調査区域がこのMVPを下回っている。同様にトウキョウサンショウウオでは、樹林から繁殖・産卵場所となる水域までの推定移動距離は50-100m程度とされている³⁰⁾。従前の個体数が多かった調査区域（例えば調査区域A・B；図－2）などについては、残存している個体群の大きさや背後の山林でハビタットが連続していること、繁殖・産卵場所となる細流があることを考慮すると、個体群の存続が可能であると考えられる。しかしながら、2015年度の卵嚢数は埋立てが行われた直後の結果であり、人為的な環境改変によってハビタット自体が消失・縮小してしまった影響は時間差で顕れる可能性が高いため、現時点では十分な検証は出来ていない。加えて、調査区域D（図－2）は、休耕田跡の湿地が保全されることになったものの、背後の山林が高台移転地などの造成やそれに伴う樹木の伐採、斜面の掘削によって一部消失したため、非繁殖期のハビタットが劣化したことが懸念される。また、造成に伴う湧水量の減少、ヨシなどの繁茂、枯死体の堆積によって、従前に比べて湿地内の淡水部の水面の減少と乾燥化が進んでいる。さらに、隣接する調査区域とはコンクリート護岸されている小河川や新たに敷設された道路などで分断されているため、調査区域間の移動・交流が困難になっている。

また、細流におけるトウキョウサンショウウオの卵嚢の流失についての研究では³¹⁾、従来から止水環境が無い沢での卵嚢の流失率は低いものの、降水時の増水が著しい水路などで流失率が高いことが示されている。併せて、トウキョウサンショウウオの流水環境下での産卵は止水環境の欠如による代償の行動であるとし、創出した止水環境は卵嚢数が顕著に多く、保全への効果を示唆している。今回の結果では、山林部の沢でのトウホクサンショウウオの産卵が継続的に確認されており、卵嚢の死亡も少なかったものの、低地部の休耕田跡の湿地や水路などに卵嚢の分布が顕著に集中していた。トウホクサンショウウオは流水環境を繁殖・産卵場所として選好することが既往の知見で示されているが²⁰⁾、沢などの流水環境以外にも優良な止水環境があれば本種も積極的に利用することが明らかになった。加えて、多くの卵嚢はスギなどの枯れ枝や落ち葉などの非固定の基質に定着されているものが多く、増水時などに流失した卵嚢があることを確認していることから、同様に流失によるリスクが高いことが分かる。特に、調査区域A・B・Cでは残存している水路以外のハビタットは殆ど残されておらず、その流下先は汽水環境となっているため（図－2）、流失時にはシンクに流れ込むことになる。

当該地域では人為的な環境改変によってハビタットが急速に失われたこと、残存している止水環境は限られていること、そして農地復旧に際して保全された湿地や水路の流下先が汽水環境となっていることなど、トウホクサンショウウオの個体群の存続における負荷は高まっていると言える。加えて、基本的には個体数がより多い調査区域ほど後年の個体数の維持・回復が見込まれるものの、死卵嚢数が負に寄与し、そして影響は時間差で顕れることや個体数の少ない調査区域ほど負の影響が大きくなることが分析か

ら示された。こうした点を鑑みると、人為的な環境改変などによる影響が著しい箇所や孤立した小規模のハビタット、卵嚢の死亡がより多く発生している調査区域に対しては、ソースとなる良質なハビタットの創出・保全する、シンクへの移入を回避するような緩衝帯を設けるなど、中・長期的な保全策を講じる必要があるだろう。復旧・復興事業などの人為的な環境改変に際して、ハビタットとなる環境を保全し、かつ負荷を低減させることは欠かせない。加えて、海水が浸入せず、繁殖・産卵と卵嚢から上陸までの幼生期を安定して過ごすための止水環境を保全・創出することや、汽水環境に直接卵嚢が流出することを避けるような一時的な溜まりを水路に設けるといった対策が考えられる。

以上より、津波による攪乱後の変化についてはもちろん、人為的な環境改変の影響についても今後も継続的なモニタリングを要すること、そしてトウホクサンショウウオの存続に向けて事前の保全策を検討していく必要があることを提示したい。

5. 総括

当該地域の低地部は、全域が津波により大きな被害を受けたものの、希少種であるトウホクサンショウウオは広く分布し、個体群が存続していること、そして回復傾向にあることが明らかになった。大津波による大規模攪乱に対して、生態系はレジリエンスを見せていることはこれまでも報告されているが、後背の淡水環境下での事例は少なく、今後の生物多様性保全に向けて重要な情報を蓄積することができた。また、得られた4カ年のデータでは時系列自己相関は見られず、個体群動態の長期的な予測は出来なかったものの、調査区域単位における短期的なトレンドを検証することができた。

トウホクサンショウウオの個体群存続には、一過的な津波浸水よりも、攪乱及びその後の環境の変化、特に人為的な環境改変の影響が大きいたことが明らかになった。津波の攪乱後の植生変化や地盤沈下による汽水化によって、卵の死亡や分布域の後退が起きていたものの、卵嚢数は回復傾向にあることが分かった。今回の結果は、津波という生態学的な大規模攪乱とその後の環境の変化によって一時的なインパクトを受けるものの、自然状態であれば個体群を存続・回復させるというレジリエンスを有することを示している。一方で、復旧・復興事業に伴う不可逆的な環境の改変により、ハビタットそのものが減少したことで、今後も個体数や分布域が減少することも懸念された。ハビタットの質の低下や消失を引き起こす人為的な環境改変は、本来有しているはずのレジリエンスを低下させる、もしくは無くしてしまう可能性も示している。

トウホクサンショウウオの止水環境の利用や水温などの既往の知見とは一概に合致しない点があったものの、形状・基質などの水域の状態や樹林からの距離など、繁殖・産卵や非繁殖期のハビタットの質に関する環境要因については検証できていない。汽水環境下での卵嚢の死亡の発生についても、得られたデータが不足していたこともあり、具体的な要因などについての議論はできなかった。将来的な保全策や継続的なモニタリングの必要性が示されたことから、トウホクサンショウウオの選好するハビタットの条件・環境要因などの生態的知見の蓄積や保全策の実践的な効果検証、長期的な個体群動態の予測など、今後のさらなる研究が求められる。

謝辞

舞根地区防災集団移転促進事業期成同盟会、NPO法人森は海の恋人をはじめ、多くの舞根地区の皆様にご協力頂いた。また、慶應義塾大学SFCの学生と協働して進めてきた。本研究は、三井物産環境基金東日本大震災復興助成（活動助成）「震災で激変し

た自然環境の再生と環境教育フィールドの構築—気仙沼市舞根地区のチャレンジ—, 独立行政法人環境再生保全機構・地球環境基金「リアスの浜における湿地・干潟保全活動に基づく地域再生」(共に、代表者 NPO 法人森は海の恋人), 科研費・基盤研究 (A) (24248039) (研究代表者岩手大学広田純一), 科研費・基盤研究 (C) (24580053) (以降は代表者一ノ瀬友博), 環境省環境研究総合推進費 (課題番号 4-1505), 前川報恩会地域振興助成, 慶應義塾学事振興基金研究補助, SFC 研究所プロジェクト補助の成果の一部である。

引用文献

- 1) 内閣府：平成 23 年度版防災白書：<<http://www.bousai.go.jp/kaigirep/hakusho/h23/index.htm>>, 2015.9.1 参照
- 2) 小荒井衛・岡谷隆基・中埜貴元・神谷泉 (2011)：東日本大震災における津波浸水域の地理的特徴：国土地理院時報 122, 97-111
- 3) 富田瑞樹・平吹喜彦・菅野洋・原慶太郎 (2014)：低頻度大規模攪乱としての巨大津波が海岸林の樹木群集に与えた影響：保全生態学研究 19(2), 63-176
- 4) 小野賢二・中村克典・田中永晴・古澤仁美・平井敬三 (2013)：東北地方太平洋沖地震による大津波の襲来を受けた東北太平洋沿岸の海岸マツ林の土壤環境—津波浸漬 7 ヶ月後の現地調査から—：森林総合研究所研究報告 12(1), 49-66
- 5) 小野賢二・平井敬三 (2013)：東北地方太平洋沖地震による大津波を受けた三陸沿岸のスギ林土壌における塩害とその後の土壤環境の変化—降雨に伴う自然排水がもたらす除塩の効果—：森林総合研究所研究報告 12(1), 41-47
- 6) Watanabe K, Yaegashi S, Tomozawa H, Koshimura S, Omura T (2014): Effects on river macroinvertebrate communities of tsunami propagation after the 2011 Great East Japan Earthquake: Freshwater biology 59(7), 1474-1483
- 7) 岡浩平・平吹喜彦 (2014)：2011 年大津波を受けた仙台湾南蒲生の海浜植物の再生状況：保全生態学研究 19(2), 89-199
- 8) 菅野洋・平吹喜彦・杉山多喜子・富田瑞樹・原慶太郎 (2014)：巨大津波直後の海岸林に生じた多様な立地の植生の変化—3 年間の記録—：保全生態学研究 19(2), 201-220
- 9) 五十嵐由里・斎藤勝雄・高橋雄一 (2013)：よみがえった昆虫たち—南蒲生 / 砂浜海岸エコトーンモニタリングサイトの 800 日—：自然環境復元研究 6(1), 61-67
- 10) 環境省自然環境局生物多様性センター (2013)：平成 24 年度東北地方太平洋沿岸地域自然環境調査等業務報告書：<http://www.shiokaze.biodic.go.jp/24sokuhou_h24report.html>, 2016.3.16 参照
- 11) 遠座なつみ・石田糸絵・富田瑞樹・原慶太郎・平吹喜彦・西廣淳 (2014)：津波を受けた海岸林における環境不均質性と植物の種多様性：保全生態学研究 19(2), 77-188
- 12) Tsuda Y, Haseyama M, Ishida K, Niizuma J, Kim KD, Yanagi D, Watanabe N, Kobayashi M (2012): After-effects of Tsunami on distribution and abundance of mosquitoes in rice-field areas in Miyagi Prefecture, Japan in 2011：衛生動物 63(1), 21-30
- 13) 津田良夫・石田恵一・山内繁・新妻淳・助廣那由・梅澤昌弘・柳大樹・岡本徳子・沢辺京子 (2013)：東日本大震災の津波が蚊の分布と発生数に与えた影響—宮城県南部水田地帯と福島県沿岸部における 2012 年の調査結果—：衛生動物 64(3), 75-181
- 14) Mukai Y, Suzuki T, Makino W, Iwabuchi T, So M, Urabe J (2014): Ecological impacts of the 2011 Tohoku Earthquake Tsunami on aquatic animals in rice paddies: Limnology 15(3), 201-211
- 15) 西廣淳・原慶太郎・平吹喜彦 (2014)：大規模災害からの復興事業と生物多様性保全：仙台湾南部海岸域の教訓：保全生態学研究 19(2), 221-226
- 16) 横山勝英・新谷哲也・鈴鴨若菜 (2012)：気仙沼市舞根地区における津波被害状況とがれきの輸送特性：土木学会論文集 B2 (海岸工学) 68(2), 1_1391-1_1395
- 17) 一ノ瀬友博・板川暢・矢ヶ崎太洋・有賀淳・清水拓海 (2016)：もうね語り部帖第三号：慶應義塾大学湘南藤沢キャンパス気仙沼復興プロジェクトオーラルヒストリーグループ, 36pp
- 18) 横山勝英 (2013)：津波の海と共に生きる—気仙沼舞根湾での取り組みから見えてきたこと—：ACADEMIA 140(6), -19
- 19) 環境省 (2014)：レッドデータブック 2014：3 爬虫類・両生類—日本の絶滅のおそれのある野生生物—：ぎょうせい, 53pp
- 20) 内山りゅう・沼田研児・前田憲男・関慎一郎 (2002)：決定版日本の両生爬虫類：平凡社, 335pp
- 21) 原口強 (日本情報地質学会)：東日本大震災津波被害現地調査報告：<<http://www.jsgi-map.org/tsunami/>>, 2014.8.31 更新, 2015.10.1 参照
- 22) Karraker NE, Ruthig GR (2009): Effect of road deicing salt on the susceptibility of amphibian embryos to infection by water molds: Environmental Research 109(1), 40-45
- 23) Karraker NE, Gibbs JP (2011): Road deicing salt irreversibly disrupts osmoregulation of salamander egg clutches: Environmental Pollution 159(3), 833-835
- 24) 横山勝英 (2013)：三陸被災地における河口域低平地の土地利用ゾーニングと湿地・干潟環境の創出方策, 河川整備基金助成事業成果報告書, 29pp
- 25) Kusano T (1980): Breeding and egg survival of a population of a salamander, *Hynobius nebulosus tokyoensis* Tago: Researches on Population Ecology 21(2), 181-196.
- 26) 気象庁 (2013)：2012 年 (平成 24 年) の日本の天候：報道発表資料, 7pp
- 27) 草野保・川上洋一 (1999)：トウキョウサンショウウオは生き残れるか？：トウキョウサンショウウオ研究会, 70pp
- 28) Degani G (1981): Salinity tolerance and osmoregulation in *Salamandra salamandra* (L.) from different populations: Journal of comparative physiology 145(1), 133-137
- 29) 岩沢久彰 (1976)：松枝岐におけるハコネサンショウウオの漁法と煙製：爬虫両棲類学雑誌 6(4), 05-109
- 30) 大澤啓志・勝野武彦 (2006)：樹林性両生類の繁殖期における非樹林地への移動距離の推定—棚田地域におけるトウキョウサンショウウオの事例から—：農村計画論文集 25, 287-292
- 31) 天白牧夫・金田正人・大澤啓志・勝野武彦 (2011)：流水域におけるトウキョウサンショウウオの卵囊分布状況およびその流失割合：ランドスケープ研究 74(5), 497-500
- 32) 日高敏隆 (1996)：日本動物大百科 5 両生類・爬虫類・軟骨魚類：平凡社, 89pp

(2016.4.9 受付, 2017.2.9 受理)