仙台湾岸の砂丘と海岸林 グリーンインフラに向けた「再生」の可能性

東邦大学理学部准教授 西廣 淳

1. グリーンインフラによる海岸防災

防災・減災を目的とした公共事業と生物多様性・生態系の保全に向けた活動は、どちらも「人間のための取り組み」という点では共通している。しかし現実には、海岸における防波堤・防潮堤の建設や河川におけるダムや堤防の建設といった防災・減災を目的としたインフラの整備は、生物多様性を脅かす大きな要因となってきた。

有事における防災と、平常時において多様な生態系サービスを供給する生物多様性の保全とを、両立させる選択肢はあるのだろうか。グリーンインフラ(Green infrastructure)の考え方は、この両立を実現する可能性をもっている。グリーンインフラとは、地形や生物などの自然を積極的に活かした社会資本整備や土地利用計画を指し、1990年代から欧米で盛んに用いられるようになった用語である。米国においては、持続可能な開発に関する大統領諮問委員会が1999年にまとめたレポートで、持続可能な地域開発のための包括的な戦略の一つとして、グリーンインフラを位置づけている(The President's council on Sustainable Development 1999)。ヨーロッパにおいては、欧州経済社会委員会・欧州地域委員会が、グリーンインフラの推進を「質の高い生活の提供」「生物多様性の保全」「気候変動への適応」を満たすための重要なアプローチとして位置づけている(European Union 2013)。

グリーンインフラの主要な長所の一つに「多機能性」が挙げられる。沿岸の防災において考えてみよう。沿岸における砂丘、海岸植生(Bayas ほか2011)、湿地(Möller ほか2014)、サンゴ礁(Ferrario ほか2014)、カキ礁

(Rodriguez ほか 2014) は、高潮や津波の被害を緩和する機能をもつことが知られている。同時にこれらは、平常時には水質浄化、生物多様性保全、水産物供給、炭素蓄積、風景の保全などの生態系サービスをもたらす(Sutton-Grier ほか 2015)。このようなグリーンインフラと、コンクリートなどによる人工的なインフラ、あるいはそれらを複合したインフラ(ハイブリッド型インフラ)には、それぞれ異なる長所と短所がある(表 1)。グリーンインフラには、多機能性に加え、攪乱により損傷しても自律的に回復しうる、すなわちレジリエンス(攪乱を受けたシステムが自ら元の状態に戻る能力)が高いという長所がある一方、機能の評価研究が不十分であることや、広い面積が必要な場合が多いという短所がある。

表1に挙げたようなグリーンインフラの長所は、単に「グリーン」すなわ ち植物に覆われているだけで発揮されるものではない。ではその長所を発揮

表 1 海岸防災のための人工インフラ、グリーンインフラ、ハイブリッド型(人工と自然 の複合型)インフラの長所と短所 Sutton-Grier ほか 2015 を簡略化して翻訳した。

	長所	短所
人工インフラ	-計画・設計論が確立している。 -効果の大きさが既知である。 -完成後、すぐに効果を発揮する。	一海面変動などの状況変化に対応できない。一時間とともに劣化する。一生態系サービスのバランスを損なう。一危険性を認識しにくくなる。一有事には機能するが平常時は役に立たない。
グリーン インフラ	- 多様な機能(魚類の生息、水質改善、炭素蓄積、観光資源等)を発揮する。 - 時間とともに機能が強化される。 - 損傷しても自律的に回復できる。 - 海面変動などの状況変化に対応できる。 - 建設コストが安価である。	- 実例が少なく計画・設計論が確立されていない。 - 機能の評価が困難である。 - 自然再生によって整備する場合、機能発揮までに時間を要する。 - 広い面積が必要な場合が多い。 - 費用-便益評価に必要なデータが不足している。
ハイブリッド型 インフラ	一人工とグリーンの両方の長所を持ちうる。一革新的なデザインが期待できる。一さまざまな要求を両立させうる。一自然のみに頼るよりも信頼性が高い。一自然のみに頼るよりも使う空間が節約できる。	 研究が不足しており、効果についての実証的なデータが少ない。 一設計論が確立されておらず、活用する場面の設定についても不明なことが多い。 一自然生態系と同等のサービスまでは発揮されない。 一人工的な部分は自然に対して何らかの負の影響をもたらしうる。 一費用-便益評価が困難である。

させるには、どのような生態系が望ましいのだろうか。この問いに答えることは容易ではないが、「その地域において進化的な時間スケールを通じて存続してきた在来の生物から構成される生態系が重要」という仮説は有望である。特に、自律的な回復能力すなわちレジリエンスの高さという長所が発揮されるためには、過去に生じたさまざまな自然攪乱を経験し、その環境に適応してきた生物が生物間相互作用のネットワークを構築している生態系が望ましいと考えられる。これは、生物多様性保全にとって望ましい生態系の特徴と一致する。すなわち生物多様性は、グリーンインフラによって守られる対象であると同時に、質の高いグリーンインフラを実現するための材料でもある。

それでは、東北地方太平洋沖地震に伴う津波を受けた沿岸地域における復興事業は、グリーンインフラという視点から見るとどのように評価できるだろうか。さらに今後の管理において、少しでもグリーンインフラやハイブリッド型インフラの長所を取り込んでいくには、何が必要だろうか。筆者らが研究フィールドとしている仙台湾南部海岸を例に議論する。

2. 仙台湾岸の植生と津波の影響

大津波以前の仙台湾内部海岸は、汀線には主に砂浜が発達し、その陸側には少なくとも藩政時代から防風・飛砂防止を目的として植林されたクロマツ林が広がっていた(大柳ほか 2002)。この海岸林は、クロマツに混在して多数の常緑・落葉樹が生育し、さらに後背湿地も点在する、きわめて種数の多い場所であった(杉山ほか 2011)。2008 年から 2010 年に行われた植物相調査では、仙台市の海岸林には市内全体の植物の 38% に相当する 796 種が記録されている(杉山ほか 2011)。また海岸林を含むエリアは、その豊かな生物相から、環境庁自然環境保全基礎調査に基づく「特定植物群落」に挙げられるとともに、宮城県の自然環境保全地域、仙台海浜鳥獣保護区、環境省による日本の重要湿地 500 にも指定されていた。

津波を受け、海岸林の様相は大きく変化した。汀線に近い若齢クロマツ林はほぼすべての個体が傾倒・倒木した(富田ほか 2014)。内陸側の高木クロマツ林においても倒木が認められた。しかし、その程度は空間的に不均質で、樹木が消失した場所とほとんど損傷のない場所が、幅数十mの帯として交



写真 1 津波後の仙台湾岸の海岸林。倒木した場所の両脇に樹林が残っている (2013 年 4 月)



写真 2 倒木した場所で実生から更新して成長したクロマツ。左奥には植林のための盛土地が見える(2015 年 9 月)

互に並び、汀線に対して垂直な縞模様の植生が形成された(趙ほか 2013、 写真 1)。そして林冠が失われた場所では、津波の翌年から多様な海浜植物 とともにクロマツの実生が多数出現し、ギャップ更新による樹林の回復の兆 候が認められるようになった(岡・平吹 2014、写真 2)。また津波によって ほとんど消失したかのように思われたハマエンドウ、ハマボウフウ、ウンラ ン、コウボウムギなどの海浜植物の種子や地下茎の断片からの再生も、若齢 クロマツ林と高木クロマツ林の両方を含む広範囲で認められた。このように、 攪乱からの自律的な回復に向かう植生の変化は津波の翌年から確認すること ができた。

さらに、津波が生物多様性に正の効果をもたらす側面も認められた。筆者らの研究室で2013年に行った植生調査では、津波以前には均質とみなせる状態であった林分でも、倒木が生じた場所と生じなかった場所では津波後の植生の種組成は大きく異なり、津波以前から存在した後背湿地の独特な種組成とあいまって、全体として多様性が高い植生が確認された(遠座ほか2014)。また高木の根返りによって形成された小さな窪地が、イヌセンブリやタコノアシなどの絶滅危惧種にとって主要な生育場所となっていることも確認された(遠座ほか2014)。

攪乱によって形成された地形、攪乱後に残された生物遺体、あるいは種子などの散布体は、一括して生物学的遺産(biological legacy)と呼ばれ、攪乱を受けた生態系の自律的な再生の過程できわめて重要な役割を果たすことが指摘されている(Franklin ほか 2000)。すべてを押し流したかのように思われた大津波は、実際には、種子を含む表土や凹凸のある地形などのさまざまな生物学的遺産をのこし、沿岸の生態系はこれらの遺産を元手に回復し始めていた。この回復過程の研究は、生態系の動態についての理解を深め、グリーンインフラとして砂丘や樹林を活用していく上で重要な知見をもたらす。仙台湾岸では、海岸から樹林と後背湿地を含むように「南蒲生/砂浜海岸エコトーンモニタリングサイト」が長期観測サイトとして設定され、東北学院大学の平吹喜彦教授を中心とする複数の研究者によって生態系の回復過程のモニタリングが開始された。しかし、このモニタリングサイトを含め、回復過程にあった仙台湾岸の生態系は、復興事業により大きく改変されることになった。

3. 復興事業による自律的回復の阻害

仙台湾沿岸では津波災害からの復旧・復興事業として海岸林の造成と防潮 堤の建設が進められており、いずれの事業も回復過程にあった生態系に大きな影響をもたらしている(西廣ほか 2014)。海岸林の造成では、上記したクロマツの実生や多様な草本植物が存在する場所において、山砂や瓦礫粉砕物を用いて幅約 200m、高さ $2 \sim 3m$ の盛土地を造成し、その上面を枯死木のチップで被覆し、スギ間伐材でつくられた防風柵が並べられ、そしてクロマツの苗木が一定間隔で植えられている(写真 3)。この大規模な盛土・植林事業は、宮城県の七ヶ浜町から福島県の山元町付近までに至る約 40km にわたって実施されつつある。

この盛土は、地震の際に地盤が沈下したため、クロマツが十分に根を張れ



写真3 盛土して植林した場所

る地下水位よりも十分高い場所を確保するために必要になったものと説明されている。しかしこの盛土は二つの点で問題がある。まずクロマツの生育環境として適していない可能性がある。現地では、津波跡地で自然に更新したクロマツとは対照的に、盛土上に植えたクロマツの成長が少なくとも現時点では良くない。固く締まった盛土の水はけの悪さや、土壌の菌相の発達が不十分であることが影響している可能性がある。もう一つの問題は、クロマツ以外の生物の保全への配慮の不足である。絶滅危惧植物が生育する後背湿地の一部など局所的に盛土が回避された場所はあるものの、大部分の場所では、津波による攪乱後に迅速な回復の過程にあった多様な生物や生物学的遺産が土に埋められることになった。生態系の自律的な回復過程を阻害し、そこからの学びの機会を人間が自ら損なってしまったともいえる。森林の回復という100年スケールで取り組む事業は、これまで存続してきた生態系や先人の知恵をもとに慎重な試行錯誤を重ねつつ進めることがふさわしく、大規模な盛土のような不可逆な自然の改変は避けるべきだっただろう。

また防潮堤は海抜 7.2m の高さ、底部の幅およそ 6.2m の連続するコンクリート堤防を建設する事業である。国土交通省が 2012 年 8 月に設立した「仙台湾南部海岸環境対策検討会」等での議論により、今後の生態系回復のコアとなる場所では堤防の位置を陸側にずらすことにより損失を回避したり、工事の方法を工夫して仮設道路による生息地破壊を最小化したりといった措置が実現した。しかし巨大なコンクリート堤防の建設は、建設された場所の生物の生育・生息場所を損なうだけでなく、海と陸の生物の移動の障壁となるとともに、風による砂の移動を大きく制限することが予測される。また堤防の位置が見直された場所も、砂浜の幅が減少したためレジリエンスが低下し、高潮等の中小規模の攪乱によって残された生息地が失われるリスクがある。海岸防災の最前線に位置する堤防の工事が急がれていたという事情はあった。しかし、もし内陸での居住地の設定など都市計画とあわせて議論することができれば、より柔軟な計画ができたのではないだろうか。

4. 海岸の生態系「再生」に向けて

仙台湾岸において豊かな生物相に支えられ、グリーンインフラあるいはハイブリッド型インフラとしての潜在的な価値をもつ生態系を回復させるためには、津波による攪乱からの回復ではなく、短期間のうちに進められてしまった復興事業によるインパクトからの「再生」を考えるべき段階にある。その再生の材料になる要素は、復興事業によるさまざまな改変を受けた今でも残されている。

海岸林造成が進む周辺で辛うじて埋め立てを免れた表土は多様な植物の種子などを含むと考えられ、個体群回復の資源として活用できるだろう(写真4)。埋土種子の調査や現地で発生している実生を手がかりに、樹林の林床植物や海浜植物の種子を含む表土を見出し、その場所を保全することや、適切



写真 4 現時点でまだ植林地造成で埋められていない場所に残存する海浜植物のウンラン (2015 年 9 月)。

な場所に撒きだして活用することが考えられる。

2014年6月に海岸法が改正され、堤防と一体となった樹林が海岸保全施設として認められるようになった。いわゆる「緑の防潮堤」である。これは堤防を越えてきた高潮等による災害を植物の働きを活用して軽減することを目標としているという点で、グリーンインフラ的な理念に基づいている。しかし、現在行われている緑の防潮堤の試験では、元来そこに自生していなかった植物種を導入していることから、長期的な存続性の点で問題があり、グリーンインフラとしての長所が発揮されない可能性がある。植林という手法にとらわれることなく、自然な種子分散等による植生の自律的な回復を人間が補助・促進する手法も検討できるのではないだろうか。現在でもコンクリート堤防の表面の凹凸に砂が溜まり、場所によってはそこからハマエンドウなどの海浜植物が発芽している様子が観察できる。表面構造の工夫などにより堆砂を促進する工夫ができれば、砂浜や砂丘の植生の自律的な再生を促進できるかもしれない。堤防上で砂丘植生が回復すれば、堤防工事のミチゲーション(代償措置)にもなりうる。さらに、密度の高い海岸植生やハマナスなどの低木群落が回復すれば、防災効果も期待できるだろう。

復興事業が急速に進む中で残された貴重な自然をうまく活用し、すでに建設された人工インフラをハイブリッド型インフラに近づけていくことは、生態系サービスのバランスと持続性を確保するために重要な課題といえるだろう。

5. グリーンインフラの実現に向けて

東日本大震災後の海岸林について、防災機能のみならず、生物多様性の保全と多面的な機能を求める声は少なくない(林田 2012)。また、震災後にあたる2014年6月に閣議決定された国土強靭化基本計画には、「海岸林、湿地等の自然生態系が有する非常時(防災・減災)及び平時の機能を評価し、各地域の特性に応じて、自然生態系を積極的に活用した防災・減災対策を推進する」ことが述べられている(http://www.cas.go.jp/jp/seisaku/kokudo_kyoujinka/pdf/kk-honbun-h240603.pdf)。東北地方の復興においても、また今後の全国的な防災事業の展開においても、生態系の活用は重要なテーマと

なっている。

さらに、2015 年 8 月に閣議決定された国土形成計画(全国)では、「社会資本整備や土地利用等のハード・ソフト両面において、自然環境が有する多様な機能(生物の生息・生育の場の提供、良好な景観形成、気温上昇の抑制等)を活用し、持続可能で魅力ある国土づくりや地域づくりを進めるグリーンインフラに関する取組を推進する」ことが述べられており(http://www.mlit.go.jp/common/001100233.pdf)、今後は防災以外のインフラ整備や、土地利用計画の策定において、グリーンインフラについての議論が盛んになることが予測される。日本においてグリーンインフラが重視される背景には、過去に建設してきた人エインフラが寿命を迎え、2030 年には維持・更新費用が現在の約 2 倍近くにまで増加する見込みであることも挙げられる(国土審議会政策部会長期展望委員会 2011)。今後人口減少が進むことは確実であるため、人工インフラのみに頼ることには費用負担の面でも限界があるのだ。

仙台湾岸は、短期集中的な復興事業のためグリーンインフラの根本的な資源である生物多様性が大幅に損なわれた。しかし、上記のようにまだ辛うじて残されている自然を活かし、順応的管理を通した「グリーンインフラ化」の可能性はまだ残されている。仙台湾岸におけるグリーンインフラ化への挑戦は、この地域での持続的でバランスの取れた復興の実現だけでなく、これまでのさまざまな人間活動によって改変された生態系を対象にした、「自然再生としてのグリーンインフラ整備」についての理念や技術の深化に大きく貢献するだろう。

〔引用文献〕

Bayas JCL, Marohn C, Dercon G, Dewi S, Piepho HP, Joshi L, van Noordwijk M, Cadisch G (2011) Influence of coastal vegetation on the 2004 tsunami wave impact in west Aceh. Proc. Natl. Acad. Sci. USA 108: 18612-18617.

European Union (2013) Building a Green Infrastructure for Europe. http://ecosystemsknowledge.net/sites/default/files/wp-content/uploads/2014/2/green infrastructure broc.pdf

Ferrario F, Beck MW, Storlazzi CD, Micheli F, Shepard CC, Airoldi L (2014) The effectiveness of coral reefs for coastal hazard risk reduction and adaptation. Nat. Commun. 5: 1-9.

Franklin JF, Lindenmayer D, MacMahon JA, Mckee A, Magnuson J, Perry DA, Waide R, Foster D (2000) Threads of continuity. Conservation in Practice 1: 8-17.

Möller I, Kudella M, Rupprecht F, Spencer T, Paul M, van Wesenbeeck B, Wolters G, Jensen K, Bouma TJ, Miranda-Lange M, Schimmels S (2014) Wave attenuation over coastal salt marshes

under storm surge conditions, Nat. Geosci. 7: 727-731.

- The President's council on Sustainable Development (1999) Towards a Sustainable America: Advancing Prosperity, Opportunity, and a Healthy Environment for the 21st Century. http://clinton2.nara.gov/PCSD/Publications/tsa.pdf
- Rodriguez AB, Fodrie FJ, Ridge JT, Lindquist NL, Theuerkauf EJ, Coleman SE, Grabowski JH, Brodeur MC, Gittman RK, Keller DA, Kenworthy MD (2014) Oyster reefs can outpace sea-level rise. Nat. Clim. Change 4: 493-497.
- Sutton-Grier AE, Wowk K, Bamford H (2015) Future of our coast: The potential for natural and hybrid infrastructure to enhance the resilience of our coastal communities, economies and ecosystems. Environmental Science & Policy 51: 137-148.
- 大柳雄彦·平吹喜彦·庄子邦光 (2002) 仙台湾海浜県自然環境保全地域の植物相. 仙台湾海浜県自然環境保全地域学術調査報告書. pp.3-42. 宮城県環境生活部自然保護課, 仙台市.
- 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: 189-199.
- 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: 177-188.
- 国土審議会政策部会長期展望委員会 (2011) 「国土の長期展望」中間とりまとめ概要. 国土交通省国土計画局. http://www.mlit.go.jp/common/000135841.pdf
- 杉山多喜子・惠美泰子・葛西英明 (2011) 宮城県仙台市海岸林の植物相,東北植物研究 16:59-68.
- 趙憶・富田瑞樹・原慶太郎 (2013) SPOT 衛星データを用いた仙台沿岸域における震災前後の景観変化 の解析、自然環境復元研究 6: 43-49.
- 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: 163-176.
- 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: 221-226.
- 日本学術会議 (2014) 復興・国土強靭化における生態系インフラストラクチャー活用のすすめ. 日本学 術会議 統合生物学委員会・環境学委員会合同 自然環境保全再生分科会. http://www.scj.go.jp/ja/ info/kohyo/pdf/kohyo-22-t199-2.pdf
- 林田光祐 (2012) 津波被害から松原、地域を再生する (10) 被災地石巻で生まれた日本海岸林学会からの 声明. グリーン・エージ 39(2): 28-31.



西廣淳(にしひろ・じゅん)

東邦大学理学部生命圏環境科学科准教授。筑波大学生物科学研究科修了、博士(理学)。建設省土木研究所研究員、国土交通省国土技術政策総合研究所研究員、東京大学農学生命科学研究科助教を経て現職。専門は植物生態学、保全生態学。日本生態学会大島賞受賞。1971年生まれ。