

◆ 報 文 ◆

土壌シードバンクを活用した湿地植生の再生： 現状と課題

西廣 淳* 松江正彦**

1. はじめに

河川の氾濫原、浅い湖、干潟、高層・低層湿原などの湿地（ウェットランド）の生態系は、水質の浄化や氾濫の緩和、気象条件の調節などにおいて重要な役割を担っているばかりでなく、特有の動植物相を有し、生物多様性の保全上きわめて重要である。しかし、日本の多くの湿地では、開発、水質の悪化、外来種の移入などの影響により、固有な生物種の地域絶滅や生態系機能の低下が進行している。

一方、劣化した湿地生態系の再生への関心も次第に高まっており、先駆的な事業が開始されている¹⁾。また平成17年度環境白書²⁾には、自然再生推進法の手続きにもとづく自然再生事業として湿地を対象とした計画が10件あることが紹介されている。

湿地の自然を再生させる取り組みでは、多くの場合、変化・消失した植生や植物個体群の回復が、その成否を左右する重要な課題となる。これは、植物の種組成や植被の程度は、湿地の生態系機能や動物の生息環境に大きく影響するからである。また再生事業の初期に成立した植生の種組成は、その後も長期にわたってその場所の植生に影響することも知られている³⁾。したがって、植生回復の方法論—どのような植物をどのような方法で再生させるか—は、再生事業の実施にあたって十分に吟味する必要がある。

本稿では、生物多様性の保全の目的に合う植生再生の手法として、土壌シードバンクを活用する方法について概説し、その手法を活用した植生の再生の事例として霞ヶ浦の湖岸植生帯再生事業を紹介する。最後に、霞ヶ浦の事例を踏まえ、土壌シードバンクを活用した植生再生において留意すべき主要な点について述べる。

2. 自然再生における植物の導入

2.1 導入する植物に求められる課題

多くの自然再生事業では、失われた植物を蘇らせるための積極的な手立て（広義の「導入」）が必要となる。「生物多様性」が、種の多様性だけでなく生態系の多様性や種内の遺伝的多様性をも含意する概念であることを考慮すると、生物多様性の保全の目的に合う再生事業を行うためには、植物の導入に当たって次のような配慮が必要である。

- ①対象とする地域・環境に固有の生態系を再生させるため、その場所の歴史において過去に存在していた植物種の組み合わせを再生させる。
- ②優占種だけではなく、希に出現する種を含めた多様な植物種を再生させる。
- ③対象とする地域の系統を再生させることを目標とし、歴史的にみて遺伝的な交流がほとんど無いと考えられる地域からは導入しない。
- ④地域系統の独自性に配慮する一方、個体群の持続性を確保するため、個体群内には十分な遺伝的多様性を確保する（互いに遺伝子が異なる多くの個体を含むようにする）。

また、実際的な問題として、⑤十分な量の材料を確保することができる方法を採用する、ということも重要である。

上記のような要求性を満たす植物の材料として、土壌シードバンク (soil seed bank) は有望である。土壌シードバンクとは、埋土種子集団ともいい、「土壌中で発芽力を保っている種子の集団」のことである。なお、本稿では土壌中の種子だけではなく、胞子や栄養繁殖子なども含める。これは本来、分散子バンク (propagule bank) というのが適切だが、この呼称は定着していないため、便宜的にシードバンクと呼ぶ。

2.2 土壌シードバンクを活用した植生再生

全ての植物が土壌シードバンクを形成するわけ

ではないが、湿地に生育する植物は土壌シードバンクを形成する性質を持つものが多い。世界の多くの湿地再生の事業において、植物の供給源として土壌シードバンクが活用されている。その手法は大きく3通りに分けることができる。

第一の方法は、再生事業を行う場所の土壌からの植物の再生を妨げている物理的・化学的原因を取り除き、その場所の土壌シードバンクから植物を取り戻す方法である。たとえば、排水工事によって農地に転換された湿地において、排水施設を塞ぎ、地下水位を上昇させることによって湿地を再生させた事例などが相当する⁴⁾。このような手法は、その場所の土壌中に十分な種数・個体数のシードバンクが残存している場合には、生物多様性の保全に資する植生の再生事業となることが期待できる。また、このような「悪化の原因を取り除く」手法は、新たに生態系を攪乱するリスクを回避するという点でも、またコストの面から考えても適切な手法といえる（受動的復元の原則⁵⁾）。ただし、事業地の土壌中に再生の目標とする植物のシードバンクが含まれていなかったり、生物多様性の保全上問題となる外来植物の種子が多く含まれていたりする場合は、単に物理的・化学的な環境条件を回復させるだけでは目的に適った植生を再生させることはできない。

第二の方法は、再生の対象とする場所に、別の湿地からシードバンクを含む表土を輸送し、撒きだす方法である。この方法は、破壊された湿地の近傍に良好な湿地が残存している場合に有効である⁴⁾。この方法はドナー・シードバンク法と呼ばれる。また類似した方法として、地上の植物と土壌をそのまま切り出して運び出し、再生事業地に設置する植生・表土移植手法 (sod transplanting) も行われている。これらの手法の有効性は多くの事例で示されているが、土壌の供給源となる湿地を攪乱することによる影響や、土壌の供給源と再生対象地の関係によっては地域的な遺伝的固有性の喪失などの問題を引き起こすおそれがあることに注意すべきである。後者の問題については、水系の異なる場所の湿地間では土壌や植物の移動は行わないことや、なるべく近傍の湿地を供給源として選択するという配慮が有効である。

第三の方法は、再生させる湿地において過去に生産された種子が堆積している場所の土壌を活用

する手法である。この方法は、目標とする種子が堆積している場所を見つけることに困難さがあるが、その場所の地域系統を再生させることができ、かつ条件によっては土壌採取場所の攪乱の問題などを回避することができるという点で優れている。次に紹介する霞ヶ浦の湖岸植生帯再生事業は、この手法を活用している。

3. 霞ヶ浦の湖岸植生帯再生

3.1 湖岸植生帯の再生手法

霞ヶ浦には、かつてはササバモなどの沈水植物、ヨシやマコモなどの抽水植物から構成される広大な植生帯が存在した。しかし、コンクリート堤防の築造、水質の悪化、水位変動パターンの改変などの要因のため、過去30年程度の間湖岸の植生帯が大幅に失われた⁶⁾。また、1996年に水位を高く維持する管理が開始されて以来、霞ヶ浦を国内最大の自生地としていた絶滅危惧植物アサザの個体群が急速に衰退した⁷⁾。

これらの状況を受け、国土交通省（当時は建設省）は霞ヶ浦の湖岸植生帯の保全と再生のための緊急対策事業を開始した。この事業（2000年～2002年に計画検討、2002年に工事完成）は、自然再生推進法の施行（2003年1月）前に開始された事業だが、順応的管理の手法—科学的予測に基づいて計画を立案し、事業のモニタリング結果に基づき事業の改善を進める手法—で進めることを計画に明記するなど、法の精神を一部先取りした計画で進められている⁸⁾。

この事業では、堤防の築造で失われた湖岸植生帯を再生させる工事が以下の手順で行われた⁹⁾（図-1）。

- ①過去の植生図や地形図を参考に、過去20から30年の間に失われた植生帯の範囲を検討し、既存の堤防の湖側に植生帯の基盤となる地形を砂

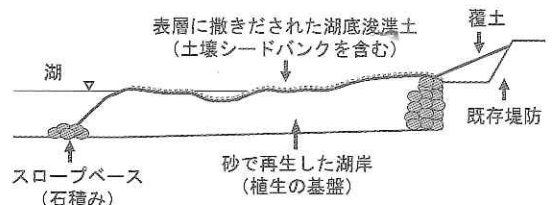


図-1 再生された湖岸の構造の例。場所の条件に応じて、湖側や汀線沿いに粗朶や石を用いた消波構造物が設置された場所もある。

で造成した。この人工湖岸の地盤高は、目標とする植物の発芽・生育条件を考慮して、浅い水域、地表面が湿潤条件を維持する高さの場所、比較的乾燥する場所などを含むように設計された。

- ②造成した人工湖岸の表面に、約10cmの厚さで湖岸付近の湖底から浚渫した底泥を撒きだした。この事業では霞ヶ浦湖岸の漁港や樋門の近傍で航行と通水を助けるために実施している浚渫事業で発生した土砂を活用した。これは、これらの浚渫土砂には霞ヶ浦の植生からは消失していた多様な植物の種子が含まれるという調査結果¹⁰⁾にもとづいて計画された。
- ③波による攪乱を制御するため、木製（霞ヶ浦流域で生産された粗朶を活用）あるいは石製の消波構造物を設置した。

3.2 植生再生の成果

霞ヶ浦の湖岸植生帯再生のための工事は2002年に完了し、現在はモニタリング調査が行われている。その結果、霞ヶ浦の湖底の土壌シードバンクは失われた植生の再生に有用な材料となること、物理的な生育基盤さえ整えれば、多くの植物が再生可能であることが示されつつある。すなわち、事業を開始した当年のうちに、全国版のレッドデータブックに掲載されている絶滅危惧種6種、霞ヶ浦からはほぼ完全に姿を消していた在来の沈水植物12種を含む、180種の植物の再生が確認された¹¹⁾。この事業により、約65,200m²の湖岸植生帯が再生された（図-2）。

一方、事業が開始された当初は出現したものの、2007年までの5年間に消失あるいは大幅に減少した種もある。これらのうち保全上重要な種としては、カンエンガヤツリやウスゲチョウジタデといっ

た攪乱依存種としての生活史特性を有すると考えられる絶滅危惧植物と、コウガイモ、リュウノヒゲモ、シャジクモといった沈水植物とが挙げられる。攪乱依存種が消失したのは、事業を実施した当初は、強い攪乱が加わった状況と同様に被陰する大型植物が存在しなかったが、植生の発達に伴って光利用性が低下したことが原因と考えられる。一方、沈水植物種が消失したのは、霞ヶ浦の水質は依然として改善されていないため、沈水植物は水深が浅い場所でしか生育できず、そのような場所にはヒメガマなどの高茎の抽水植物が侵入したため、競争を通して排除された可能性が考えられる。

4. 土壌シードバンク活用の留意点

4.1 土壌シードバンクの事前調査

霞ヶ浦の湖岸植生帯再生事業では、表層に撒きだす土砂の採取場所によって、事業の初期に成立する植生の種組成が明瞭に異なることが認められた¹¹⁾。このことは、同一の湖沼の底泥でも採取する場所によって土壌シードバンクの種組成が異なることを示唆している。したがってシードバンクを植生再生の材料として活用し、目標に合った植生を再生させるためには、撒きだす土壌中の種子の種組成を事前に調査することが重要である。海外では、再生の目標とする種が十分にシードバンクに含まれていないことから、播種などの措置との組み合わせが推奨された事例もある^{12), 13)}。

土壌シードバンクの種組成や密度を調査する方法としては、一般に、直接計数法と実生発生法の二つが知られている。直接計数法とは対象とする土壌から肉眼あるいは実体顕微鏡などを用いて種子を直接拾い出して計数する方法であり、実生発

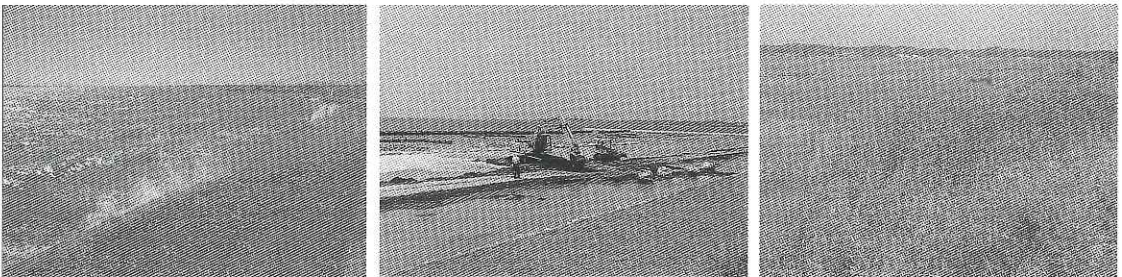


図-2 霞ヶ浦の湖岸植生帯再生事業の様子。左：事業を実施していない湖岸、中央：土壌シードバンクを含む浚渫土を撒きだしている様子、右：事業実施後1年が経過した事業地。

生法とは対象とする土壌を種子が発芽しやすい条件に撒き出し、出現する実生を同定・計数する方法である¹⁴⁾。植生再生の事業の事前調査として適切なのは後者である。その主な理由としては、より大量の土壌を対象に調査することができることが挙げられる。ただし、実生発生法は直接計数法と比較して、次の原因から過小評価になりがちであることに注意が必要である。①すべての種の発芽最適条件を実現することは困難であるため「生存しているのに発芽しなかった種」が評価できない。②ある程度のサイズまで成長した実生が計数されるため、全ての発芽種子ではなく、そのサイズまで生存した個体の数しか評価できない。

実生発生法によるシードバンク調査にあたっては、なるべく多様な種が発芽できるように土壌を撒きだす条件を設定する必要がある。水生植物の場合、地表面の冠水の有無や水分条件が発芽可能性を大きく左右する。そのため、湿地の土壌シードバンクを分析する際には、少なくとも地表面が常に湿潤になる条件と、常に冠水している条件の二通りが設定されることが普通である¹⁵⁾。水分条件・水位を維持するためには、毎日灌水してもよいが、荒木らが提案したマリOTTサイフンの原理を利用した装置¹⁶⁾の活用が、簡便かつ正確である。

実生発生法による調査では、対象とする土壌を撒きだす面積も重要である。シードバンクに含まれる種数を網羅するために必要な撒きだし面積については、横軸に撒きだし面積、縦軸に出現種数の累積値をプロットした、「種数-面積曲線」を描き、曲線が飽和する撒きだし面積を求めることが適切である。霞ヶ浦の湖岸植生再生事業地において、事業地を大規模な実生発生実験とみなし、種数-面積関係を検討したところ、約12m²で飽和した(図-3)¹¹⁾。この結果は、今後、霞ヶ浦において同様な事業を行う事前調査として土壌シードバンクの調査を行う際に有用となるだろう。もちろん、土壌中の種子密度は条件によって異なるため、この数値は他の湿地に当てはまる保証はないので注意が必要である。

4.2 土壌を撒きだす環境

湿地の植物の種毎の生育可能性は、水質、攪乱の強さなど多様な環境条件に影響を受けるが、特に土壌の水分条件と水深に大きく規定される。そ

のため、湿地の植生を再生させる際には、地盤の微地形や水文学的条件を十分に検討する必要がある。

霞ヶ浦の再生事業地では、ウキヤガラなどのカヤツリグサ科ホタルイ属植物、コウガイゼキショウやイなどのイグサ科イグサ属植物など、湿地生植物や抽水植物の多くが湖水位からの地盤の高さが0から0.1mの場所に集中して確認された。また、エビモやセキショウモなどの沈水植物は水深0.4m以内の場所で確認された。一方、侵略的外来種であるセイタカアワダチソウは、湖水位からの地盤の高さが0.2から0.5mの場所で特に高密度で確認された¹¹⁾。同じ土壌を利用した場合でも、撒きだす場所の環境、特に地盤の比高によって成立する植生が異なる。目的にあった植生を再生させるためには、植物の発芽・定着特性の研究成果などを活用して、地盤の比高を慎重に設計する必要がある。

また土壌シードバンクから植物を再生させる上では、土壌シードバンクの「浪費」に注意する必要がある。シードバンクの浪費は、植物が発芽しても新たな種子を生産することなく死亡してしまうことによって生じる。再生させる環境は、対象とする植物が発芽するだけでなく、成長し、開花し、種子生産ができる条件を整える必要がある。

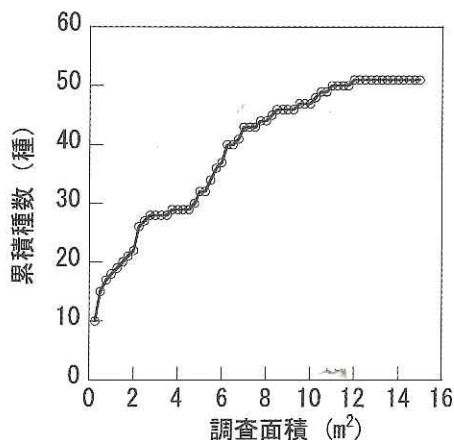


図-3 霞ヶ浦の湖岸植生帯再生事業地における撒きだし面積と確認種数の関係。土壌を撒きだした事業地に0.1m²の方形区をおき、出現種を記録した。方形区の数が増えると累積確認種数は増加するが、この関係は環境が均質であればやがて飽和する。11)より改図。

4.3 外来植物の管理

在来種の生育を脅かす外来種（侵略的外来種 *invasive alien species*）の種子が、撒きだす土壤中に含まれていると、それらの優占が在来種の回復を妨げることが予測される。外来種の種子は土壤中に多く含まれている。安島は、日本における土壤シードバンクの研究をレビューした結果を踏まえ、都市化された地域を集水域にもつ河川や湖沼では土壤シードバンク中に多くの外来植物の種子が含まれる可能性が高いことを指摘している¹⁷⁾。

また、撒きだす土壤中の外来種の種子の含有が少ない場合でも、現在では様々な場所ですでに侵略的外来植物が優占する群落が形成されているため、そのような場所から種子が散布され、侵入される可能性が考えられる。特に、土壤シードバンクから植生を再生させる場合には、植物体そのものを植えつける手法などと比較して、一般に、初期の植被率が低い。一方、侵略的外来種には、裸地的環境にすばやく侵入して優占する攪乱依存種的な性質をもつ種が多い。そのため、土壤シードバンクを用いた再生事業地は外来植物が侵入するリスクが特に高いと予測される。

したがって、撒きだす土壤の事前調査に加え、周辺における外来植物の種子供給源の存在なども把握しておき、侵入が予測される場合には防除対策を計画しておくことが望まれる。

霞ヶ浦の湖岸植生帯再生事業においても、セイタカアワダチソウやオオフサモなどの侵略的外来種の侵入が認められた。セイタカアワダチソウは霞ヶ浦周辺の道端などにも極めて普通に分布し、巨大な種子供給源が存在する。オオフサモは日本には雌株しか帰化していないため切れ藻などによる栄養繁殖でしか増えないが、霞ヶ浦では「水質浄化」を目的とした公園施設に導入され、現在では堤防の堤脚水路などに広く分布している。これらの供給源から、再生事業地に分布を拡大したと考えられる。

外来種の管理は、適切な植生再生の手法を確立する上で極めて重要な課題である。霞ヶ浦の湖岸植生帯再生事業では、「事業初期の段階で、侵入した外来種を選択的に抜き取るにより、在来種が優占する植生を回復させることができる」という仮説をたて、順応的管理の一環として、2004年以來、事業地内のセイタカアワダチソウを選択

的に抜き取る活動を行っている¹⁸⁾。この活動は東京大学農学生命科学研究科保全生態学研究室と、霞ヶ浦とその流域で自然再生に関わる活動を展開しているNPO法人アサザ基金が主催し、国土交通省霞ヶ浦河川事務所が協力団体として参加して開催している。セイタカアワダチソウの抜き取りは一般に参加者を募って実施しており、3年間で約81名が参加している。

セイタカアワダチソウの選択的抜き取りを行っている場所と、行わなかった場所を比較した結果、作業3年目の2006年では地上茎の密度が1/4に減少するなど、密度抑制効果が明瞭に認められている¹⁸⁾。しかし、セイタカアワダチソウの抜き取りだけでは、在来種の回復は十分ではないことも示唆されている。

これらの結果を受け、2006年からはセイタカアワダチソウを抜き取った場所にオギを植える試験的な管理を、順応的管理における新たなステップとして開始した。この管理は、再生事業地においてセイタカアワダチソウが高密度で出現している湖水位からの地盤の高さが0.2から0.5mの場所は、自然の植生帯ではオギが優占する場所であること、および今回の再生事業地では放置するだけではオギの移入はほとんど認められないことを根拠としている。今後、植えつけたオギの成長や、その後のセイタカアワダチソウの侵入程度をモニタリングし、この活動の効果を評価する必要がある。なお、これら一連の植生管理の内容や成果は、著者のウェブページ (<http://www.coneco.es.a.u-tokyo.ac.jp/jn/>) で公開され、関心のある市民の参加を得ながら進められている。

5. おわりに

湿地の植生を再生させる手法として、土壤シードバンクの活用は世界的には一般的なものとなっている。日本でも、今後この手法を活用する計画が増えることが予想される。具体的な手法は個別に詳細な検討を行い、かつ事業は順応的に改善しながら進める必要があるが、本稿で示した留意点、すなわち①再生の目標とする種/問題となる種の種子が含まれている可能性を事前に調査すること、②土壤を撒きだす環境条件に配慮し、発芽・定着だけでなく繁殖が可能な条件を整えること、③外来種の管理が必要になる場合が多いので管理対策

を検討しておくこと、は多くの事業に共通するものと思われる。

参考文献

- 1) Nakamura, K., Tockner, K., Amano, K. (2006) River and wetland restoration: Lessons from Japan. *BioScience*, 56, 419-429.
- 2) 環境省 (編) : 平成17年度版環境白書, 2005.
- 3) Bissels S, Holzel N, Donath TW, Otte A. (2004) Evaluation of restoration success in alluvial grasslands under contrasting flooding regimes, *Biological Conservation*, 118, 641-650.
- 4) Middleton, B. (1999) *Wetland Restoration, Flood Pulsing, and Disturbance Dynamics*. John Wiley & Sons, New York.
- 5) 中村太士・中村隆俊・渡辺 修・山田浩之・仲川泰則・金子正美・吉村暢彦・渡辺綱雄. 釧路湿原の現状と自然再生事業の概要. *保全生態学研究*, 8, 129-143.
- 6) 宮脇成生・西廣 淳・中村圭吾・藤原宣夫. (2004) 霞ヶ浦湖岸植生帯の衰退とその地点間変動要因. *保全生態学研究*, 9, 45-56.
- 7) 西廣 淳・川口浩範・飯島 博・藤原宣夫・鷺谷いづみ (2001) 霞ヶ浦におけるアサザ個体群の衰退と種子による繁殖の現状. *応用生態工学*, 4, 39-48.
- 8) 西廣 淳・鷺谷いづみ. (2003) 自然再生事業を支える科学. 鷺谷いづみ・草刈秀紀編, *自然再生事業: 生物多様性の回復をめざして*. 築地書館, p.166-186.
- 9) 中村圭吾・島谷幸宏. (2004) 湖沼沿岸帯の復元にむけて. *地質と調査*, 12-17.
- 10) 西廣 淳・高川晋一・宮脇成生・安島美穂 (2003) 霞ヶ浦沿岸域の湖底土砂に含まれる沈水植物の散布体バンク. *保全生態学研究*, 8, 113-118.
- 11) Nishihiro, J., Nishihiro, M.A., Washitani, I. (2006) Assessing the potential for recovery of lakeshore vegetation: species richness of sediment propagule banks. *Ecological Research*, 21, 436-445.
- 12) McDonald, A.W. (1993) The role of seed bank and sown seeds in the restoration of an English flood-meadow. *Journal of Vegetation Science* 4, 395-400.
- 13) Smith, S.M., McCormick, P.V., Leeds, J.A., Garrett, P.B. (2002) Constraints of seed bank species composition and water depth for restoring vegetation in the Florida Everglades, U.S.A.. *Restoration Ecology*, 10, 138-145.
- 14) Simpson, R.L., Leck, M.A., Parker, V.T. (1989) Seed banks: general concepts and methodological issues. In M.A. Leck, V.T. Parker, R.L. Simpson (eds.) *Ecology of Soil Seed Banks*, 3-8. Academic Press, San Diego.
- 15) Ter Heerdt, G.N.J., Schutter, A., Bakker, J.P. (1999) The effect of water supply on seed-bank analysis using the seedling-emergence method. *Functional Ecology*, 13, 428-430.
- 16) 荒木佐智子・鷺谷いづみ. (1997) 土壌シードバンク

をみるために開発した「種子の箱舟」. *保全生態学研究*, 89-101.

- 17) 安島美穂. (2001) 埋土種子集団への外来種子の蓄積. *保全生態学研究*, 155-177.
- 18) 西廣 淳ウェブページ <http://www.coneco.es.t.u-tokyo.ac.jp/jn/collab-projects/kasumi-management-1-seika.htm>

西廣 淳*



東京大学農学生命科学研究科助手, 理博 (前 国土交通省国土技術政策総合研究所環境研究部緑化生態研究室招聘研究員)
Jun NISHIHIRO

松江正彦**



国土交通省国土技術政策総合研究所環境研究部緑化生態研究室長
Masahiko MATSUE