熊本港における「なぎさ線の回復」現地実証試験に関する研究

Field Demonstration of “Recovery of Shoreline” in Kumamoto Port

増田龍哉¹・入口 聖²・五十嵐 学³・橋本なつみ⁴・五明美智男⁵・滝川 清⁶・三小田 徹⁷

Tatsuya MASUDA, Takashi IRIGUCHI, Manabu IGARASHI, Natsumi HASHIMOTO
Michio GOMYO, Kiyoshi TAKIKAWA and Toru MIKOTA

Recently, the various environmental problems such as red tide, anoxic water and etc. occurred in Ariake Bay. Tidal flats in Ariake Bay were reclaimed from pre-Edo era to the post-WWII food shortage period for the main purpose of increasing farmland. In the process, the revetments were constructed to protect farmland existing around the supratidal zone (shoreline). In this study, the field demonstration of rehabilitation technologies for Ariake “Bay grecovery of shoreline” was done in Kumamoto Port. As the result, the number of benthos species increased more than those before the shoreline construction.

1. はじめに

有明海は我国の干潟総面積の約40%に及ぶ広大な干潟が発達した大型閉鎖性内湾であるが、近年、貧酸素水塊の発生等の環境悪化に伴う諸現象が慢性化し、悪循環に陥っているものと懸念されている。その原因は地球温暖化や負荷の蓄積等様々な事象が考えられるが、沿岸域の開発や海岸線の人工化等による本来水辺や海岸線に存在する潮上帯から潮下帯までの連続した地形の場所（以下なぎさ線）の減少も原因の一つとして挙げられる。

有明海の干潟は江戸時代以前から戦後食糧難の時代にかけて、主に農地を広げる目的で干拓が行なわれ、海岸線には農地等を防護する目的でコンクリート護岸が構築されることで、生物や塩生植物等の生息・生育場所が失われている。特に、有明海の湾奥から熊本市南部を流れる緑川河口に至る有明海東海岸は、古くから干拓等が行なわれることでなぎさ線が消失しており、海岸堤防の前面には勾配のほとんど無い平坦な干潟が広がっているにすぎない。このような海岸線の人工化は、干潟生態系のバランスを崩壊させ、有明海の疲弊に影響を及ぼしていると考えられる。本来なぎさ線は生物多様性が高い場所で、多種多様な生物や塩生植物等の生息・生育の場となっており、それらの生物活動の下、食物連鎖を通じた物質循環がバランス良く効率的に行なわれることで高い浄

化機能を有している。

著者らは、熊本港においてなぎさ線を人工的に造成し、干潟生態系が有している自己再生機能（浄化機能）を回復（復元）させる「なぎさ線の回復」という現地実証試験を行っている（滝川ら、2006、2009；増田ら、2007、2008）。

本研究では、人工なぎさ線の造成3～4年後までの追跡調査結果から、なぎさ線の回復効果やその持続性を把握するとともに、多種多様な生物が生息できる効果的な地盤高、底質環境の検討を行った。

2. 現地実証試験の概要

現地実証試験地の位置図を図-1、試験地と追跡調査の概要を以下に示す。

(1) 東なぎさ線

東なぎさ線を造成した熊本港東護岸前面は、地盤高が約T.P.±0.00m、中央粒径が約0.06mmの泥質干潟で、対岸の干拓地まで平坦な干潟が広がっている。潮流は上げ潮時は北向き、下げ潮時には南向きへ流れており、波浪

図-1 「なぎさ線の回復」現地実証試験地位置図

1 正会員	博(工)	熊本大学特任助教 大学院先端機構
2 正会員		(株)日本港湾コンサルタント
3 正会員	工修	熊本大学研究員 沿岸域環境科学教育研究センター
4 学生会員		熊本大学大学院 自然科学研究科
5 フェロー	博(工)	熊本大学客員教授 沿岸域環境科学教育研究センター
6 フェロー	工博	熊本大学教授 沿岸域環境科学教育研究センター
7		株式会社ネイチャー

の影響を受けにくい場所である。ここにH.W.L.から現地盤のT.P.±0.00mまで、幅100m×奥行100mの範囲で、潜堤をカタナリー曲線形に設定し、ちどり状に配置するという工夫を施した。中央粒径が約0.79mmの有明海産の海砂で覆砂を施し、中央部勾配は約1/30で、護岸の前面には潮上帯付近の覆砂の流出を防ぐための突堤が2本、中央部には生物の生息環境に多様性を持たせるための島堤が3箇所配置されており、2005年10月に造成が完了した。

(2) 北なぎさ線

北なぎさ線を造成した熊本港北護岸前面は、地盤高が約T.P.-2.00m、中央粒径が約0.04mmの泥質干潟で、100mほど沖に離岸堤が設置されている。潮流は上げ潮時は東向き、下げ潮時には西向きへ流れており、波浪や季節風の影響を受けやすい場所である。ここに、H.W.L.から現地盤のT.P.-2.00mまで、土砂流失を防ぐための長さ50mの突堤を40m間隔で2本配置した。そこに、中央粒径が約0.02mmの熊本港近郊の航路浚渫土砂を下層（現地盤からT.P.-1.50mまで）、浚渫土と中央粒径約0.18mmの海砂を50%ずつ混合した土砂を中層、海砂のみを表層（厚さ0.5m）に使用した3層構造になっている。勾配は約1/12で、軟弱な浚渫土砂の流出を防ぐため、護岸から約40m沖に中仕切堤が設置されており、2006年9月に造成が完了した。

(3) 追跡調査の概要

東なぎさ線及び北なぎさ線において、造成前から現在まで地形、底質、底生生物について定期的に追跡調査を行っている。調査地点の位置を図-2、各調査の方法を以下に示す。

a) 地形調査

大潮から中潮の干潮時にセオドライト・光波測距儀等を使用して、東なぎさ線では東西方向に110m、南北方向に130mを10mメッシュ、北なぎさ線では東西方向に80m、南北方向に95mを5mメッシュで地盤高の測定を行った。

b) 底質調査

東なぎさ線48地点、北なぎさ線48地点で表層5cmの底泥を干潮時に採取し、保冷して試験室に持ち帰った後、粒度組成、COD_{sed}、全炭素、全窒素、硫化物、含水率を分析した。

c) 底生生物調査

底生生物調査は定性調査、定量調査を行った。定性調査は石積み周辺や滞筋等、局所的な環境を中心に目視観察を行い、なぎさ線に生息する生物の種数を把握した。定量調査は造成当初から造成半年から1年半後までは代表地点の5地点で行っていたが、生物の定着分布が拡大したため調査方法を変更した。変更後の定量調査は、東なぎさ線において千鳥状に配置された潜堤内の83地点で25cm×25cm（2回/地点）のコドラートをを用いて底泥を採取し、その後4mm目の篩にかけ、篩上に残った底生生物の種類の同定と個体数の計測を行った。北なぎさ線でも同様に、48地点で25cm×25cm（2回/地点）のコドラートをを用いて底泥を採取し、その後4mm目の篩にかけ、篩上に残った底生生物の種類の同定と個体数の計測を行った。

3. 追跡調査結果と考察

(1) 地形調査結果

東なぎさ線は造成半年後から造成1年後までに台風の影響で大きく浸食されたものの、造成4年後までは大きな地形変化はみられなかった（図-3）。北なぎさ線は造成1ヶ月後までに常時の潮流や波浪によって、T. P. ±0.00mよりも高い場所で大きく浸食された。この浸食された場所は、離岸堤よりも地盤が高い場所で、そこよりも地盤が低い場所では目立った浸食がみられていないことから、離岸堤が北なぎさ線の地形変化に影響しているといえる。その後、造成3年後までは目立った地形変化はみられなかった（図-4）。また、北なぎさ線では、一部に泥質の浚渫土砂を使用しているため、地盤沈下や泥分

図-2 調査地点位置図

の流出が懸念されたが、造成3年後も地盤沈下等は見られなかった。

山口ら(2008)によっても、北なぎさ線における地盤の内部構造は安定していることが確認されており、なぎさ線の回復に浚渫土が有効活用できることが示された。

なぎさ線を回復しようとする場所の立地条件によって程度は異なるが、施工当初の地形はそのまま維持されるのではなく、造成後約1年で波浪等の外力条件によってその場に应じた標高・勾配に変化することが明らかとなった。また、台風等のイベント時には地形が大きく変化することが予想されるため、離岸堤を設置して外力の影響を意図的に少なくするといった工夫や、必要に応じて再度土砂を投入するといった維持管理が必要になる。

(2) 底質調査

東なぎさ線の潜堤内側における造成直後の底質は、含泥率が30%以下、含水率が概ね25%以下、CODsedが0.5mg/gdry前後、T-Sが0.05mg/gdry以下であった。含泥率は造成1年後に護岸から90mの地点で表層1.0cmに泥分の堆積が確認され、その後は造成4年後までに地盤高がT.P.+0.5m以下の外側干潟との境界を中心に泥分が堆積している。東なぎさ線を造成した場所は、造成前は泥質干潟であったため、地盤高の低い場所で徐々に泥分が堆積したものと考えられる。CODsedは含泥率と正の相関があり、含泥率が高い場所で高い傾向を示したが、東なぎさ線内では硫化物の増加は見られず、好気的な環境が維持されていた。これは、東なぎさ線に堆積した有機物が好気的な環境下で分解され、干出時にはカニ等の底生生物、冠水時には魚類やエビ類といった生物の摂餌によって物質循環が効率的に行われているためと考えられる。

北なぎさ線における造成直後の底質は含泥率が30%以下、含水率が概ね30%以下、CODsedが3.0mg/gdry以下、T-Sが0.05mg/gdry以下であった。含泥率は造成1年後に地盤高の低い場所と、護岸から15~20mの西側で含泥率が増加している。造成3年後は全体的に含泥率が増加していた。これは、東なぎさ線と同様、造成前は泥質干潟であったため、泥分が堆積したものと考えられる。また、地盤の高い場所では地形の浸食によって、浚渫土と海砂の混合層が露出したため含泥率が増加している。東なぎさ線と同様に、CODsedは含泥率と正の相関があり、含泥率が高い場所で高い傾向を示した。北なぎさ線では、ホトギスガイがマット化している場所で部分的に硫化物の増加がみられるものの、全体的に好気的な環境は維持されていた。

このように、なぎさ線を回復しようとする場所周辺の底質にもよるが、標高が低い周辺干潟との境界で徐々に泥分が堆積したり、ホトギスガイのマット化により底質環境が嫌氣的になることが明らかとなった。今回造成

図-3 東なぎさ線におけるセンターラインの横断変化

図-4 北なぎさ線におけるセンターラインの横断変化

したなぎさ線では、底質の泥化や嫌気化によって大きな障害は見られていないが、必要に応じて覆砂や耕耘、ホトギスガイの駆除といった維持管理が必要になる。

(3) 底生生物調査

東なぎさ線造成前の2005年8月の調査ではアラムシロガイ、ヤマトオサガニ、トビハゼ等6種が確認された。造成半年後の2006年4月の調査では、確認種数が9種で造成前の種数を上回り、その後は造成1年後の2006年10月まで13種程度で推移した。造成1年半後の2007年5月の調査からは定性調査に加えて定量調査を追加することで、クチバガイやウネナシトマヤガイ等の二枚貝綱といった内在性の種を新たに多数確認でき、造成2年後の2007年10月の調査では東なぎさ線内で25種とこれまでの調査で最も多くの種が確認された。2008年1月の調査では冬季による生物活動の低下に伴い東なぎさ線内外ともに確認種数は減少したが、2008年5月の調査では、種数は2007年10月と同程度に戻った。造成4年後の2009年10月の調査では、東なぎさ線内で29種と全調査中最も多くの種が確認された(図-5)。

東なぎさ線の造成から4年後までの調査で、アサリやハマグリ等の二枚貝綱、ウミナヤタマキビ等の腹足綱、コメツキガニやテッポウエビ等の軟甲綱等に加え、種の同定が困難なため図には反映させていない環形動物のうち同定ができている種を合わせると計89種の生物が確認されている。その中には、環境省や熊本県のレッドデータブックに記載されているイチョウシラトリやハクセンシオマネキ等の希少種も20種確認された。

北なぎさ線においても東なぎさ線同様徐々に種数が増加し、造成から3年後までの調査で計80種の生物が確認

され、環境省や熊本県のレッドデータブックに記載されているマルテンスマツムシやサキグロタマツメタ等の希少種も11種確認された(図-6)。また、北なぎさ線では東なぎさ線よりも造成場所の現地盤標高が2.0mほど低いいため、アサリやホトトギスガイ等の二枚貝が優占している。さらに、リシケタイラギのような有用水産生物種も確認されている。

東なぎさ線や北なぎさ線を造成した場所は、砂～砂泥質の干潟であったが、泥化の進行により砂～砂泥質干潟を好む生物は姿を消しつつある。しかし、なぎさ線を造成することで、それらの生物の生息場が復元できることが実証され、生物種の多様な場が外側の干潟を含めて空間的に回復されている。また、北なぎさ線は利用されていない港湾の石積み護岸前面における、希少種・有用水産生物種の保全の場としての利用の可能性が示唆された。

4. 効果的な構造の検討

前章までに述べたように、「なぎさ線の回復」が生物種の多様な場を復元する手法として有効であることが確認されているが、「なぎさ線の回復技術」を有明海の様々な場所で適用していく場合、事前にその効果や維持管理のタイミング等を予測・評価する必要がある。そのため、これまでになぎさ線を回復することによる生息生物種及び生物量の予測手法をHSI (Habit Suitability Index) モデルにより構築し、検証を行ってきた(増田ら, 2009)。しかし、どのような構造のなぎさ線を造成すれば多種多様な生物が生息できるのかといった検討は行われていない。

そこで、なぎさ線の仮想計画地を設定し、これまでに構築した生物生息予測モデルを用いて、多種多様な生物が生息できる効果的な地盤高、底質環境の検討を行った。

図-5 東なぎさ線における種数の経時変化

図-6 北なぎさ線における種数の経時変化

(1) 仮想計画地の位置となぎさ線の形状

なぎさ線の仮想計画地として、東なぎさ線が造成され、造成前の地形、生物、底質等のデータがそろっている熊本港の東側の南東隅から400mを選定した(図-1)。初期の設計案はこれまでの現地実証試験結果から、画一的に同一断面形状で造成するのではなく、場に多様性を持たせるために東なぎさ線と同様の形状を4つに並べる形状とした。(図-7)。

(2) 生物生息予測モデル

生物生息予測モデルは、有明海においてなぎさ線が残っている自然干潟を調査し、出現頻度の高かった生物を対象として構築されたHSI (Habitat Suitability Index) モデルである。なお、評価対象生物はヤマトオサガニ、チゴガニ、コメツキガニ、ハクセンシオマネキ、クチバガイ、テリザクラガイ、ソトオリガイの7種である。モデルの構築に用いられた環境要因には、多くの底生生物に共通して生息条件となる地盤高、含泥率、含水率、CODsedの4つを選定し、SI (Suitability Index) モデルの構築を行った。SIの結合には「最も適性の低い環境要因が制限的に影響を与える」という考えから式(1)の限定要因法を用いた。

$$HSI = \min(SI \text{ 地盤高}, SI \text{ 含泥率}, SI \text{ 含水率}, SICODsed) \dots\dots\dots (1)$$

(3) 地盤高及び底質環境の検討

東なぎさ線の造成直後の構造を初期設計案(以下、初期案)とし、初期案に対して地盤高を下げた勾配のみを改良した場合と含泥率のみを改良した場合とその両方を改良設計した場合について、評価対象生物が最も多く生息できる条件を検討した。評価対象生物の環境を支配する環境要因のうち、CODsedと含水率に関しては直接の設計ができない項目であるが、これらの2つの項目は周辺海域の水質、干出時間および底質の粒度組成に大きく依存するため、流入負荷が同程度の狭い範囲では地盤高と含泥率から推定することが可能であると考えられる。そこで、東なぎさ線の2008年5月の調査結果を基に重回帰分析を行い、式(2)、(3)の回帰式からCODsedと含水率を推定した。推定の精度を示す重相関係数はCODsedが0.86、含水率が0.93である。

$$CODsed = \text{含泥率} \times 0.247 + \text{地盤高} \times (-0.657) - 4.498 \dots\dots\dots (2)$$

$$\text{含水率} = \text{含泥率} \times 0.392 + \text{地盤高} \times (-5.148) + 9.438 \dots\dots\dots (3)$$

地盤高のみを下げ、評価対象生物にとっての最適地盤高を検討した結果、ほぼ全ての評価対象生物で勾配が緩やかになるにつれてTHU (Total Habitat Unit) 値が増加し、勾

配約 1/270 をピークに微減しつつほぼ一様となった (図-8)。これは、標高が高い部分で干出時間が長くなり、評価対象生物の生息に適さなかったためと考えられる。含泥率のみを 10% 毎に高くし、評価対象生物にとっての最適含泥率を検討した結果、含泥率 30% で設計した場合に最大値を示し、どの生物も一様に生息し最も生物が多く生息できることがわかった (図-9)。地盤高と含泥率の両方を改良して検討を行った結果、最も THU 値が高くなったのは、勾配約 1/170 かつ含泥率 30% で改良した場合であった。

今回はなぎさ線が残っている自然干潟を調査し、出現頻度の高かった生物を対象としたが、実際の海域でなぎさ線を回復する場合、事前にどのような生物の生息場、生態系を回復したいのかといった目標を設定し、その目標に応じた評価種を選定する必要がある。

5. おわりに

本研究により、なぎさ線を回復することによって種が多様化し、絶滅危惧種や希少種も多数確認されるなど、生物多様性を復元する手法として有効であることが示された。また、別途検討が進められている生態系モデル (有明海モデル) によるシミュレーション結果からも「なぎさ線の回復」が貧酸素化の解消や赤潮発生の抑制に一定の効果があると予測されており、「なぎさ線の回復」が海域全体の再生に大きく寄与するものと期待されている。

さらに、構築した生物生息予測モデルにより、多種多様な生物が生息できる効果的な地盤高、底質環境の事前検討や維持管理を行うための基準の設定が可能となり、なぎさ線の回復を実際の海域で適応するためのツールが確立された。「なぎさ線の回復」を適用しようとする場所の立地条件にもよるが、追跡調査の結果から、「造成初期や台風等のイベント時の地形の浸食」や「泥分の堆積」等の不確実性を多く含んだ「場の変化」が予想されるため、目標を達成していくためにモニタリングを継続し、モニタリング結果を維持管理等に反映させるといった順応的管理をしていくことが望まれる。今回は、3~4 年の追跡調査結果から、「なぎさ線の回復」効果を検証したが、今後も定期的に追跡調査を継続しながら、長期的な視点での「なぎさ線の回復」効果の把握や維持管理のあり方等を検討する予定である。

謝辞：本研究は、文部科学省科学技術振興調整費重要課題解決型研究等の推進「有明海生物生息環境の俯瞰型再生と実証試験」の補助によるものであり、記して謝意を表します。

図-7 初期設計案の平面図

図-8 初期設計案の平面図

図-9 初期設計案の平面図

参考文献

- 滝川 清・増田龍哉・森本剣太郎・松本安弥・大久保貴仁 (2006)：有明海における干潟海域環境の回復・維持に向けた対策工法の実証試験，海岸工学論文集，第53巻，pp.1206-1210。
- 滝川 清・増田龍哉・五十嵐 学・五明美智男・森本剣太郎 (2009)：有明海沿岸干潟域における生物生息場の「回復」・「創生」・「工夫」による自然再生へ向けた取り組み，海洋開発論文集，Vol.25，pp.317-322。
- 増田龍哉・滝川 清・森本剣太郎・前田恭子・柏原裕彦・島田康光 (2007)：有明海熊本港周辺における「なぎさ線の回復」現地試験による生態系構築過程に関する研究，海洋開発論文集，Vol.23，pp.525-530。
- 増田龍哉・滝川 清・森本剣太郎・畑田紀和・新井雅士 (2008)：熊本港に造成された「なぎさ線」における生物生息環境の空間分布特性，海洋開発論文集，Vol.24，pp.717-722。
- 増田龍哉・倉原義之介・五十嵐 学・五明美智男・滝川 清・森本剣太郎 (2009)：有明海における「なぎさ線の回復」効果の予測手法に関する研究，土木学会論文集B2 (海岸工学)，Vol.B2-65，No.1，pp.1206-1210。
- 山口知之・三枝弘幸・増田龍哉・森本剣太郎・五明美智男・滝川 清 (2008)：浚渫土を利用した人工なぎさ線地盤の内部構造動態モニタリング，海洋開発論文集，Vol.24，pp.693-698。