

生息場適性指標 (HSI) による沿岸域の 統合的環境評価の試行

AN ATTEMPT OF INTEGRATED ENVIRONMENTAL ASSESSMENT BASED ON
MULTIPLE HABITAT SUITABILITY ANALYSIS

古川恵太¹・Stephanie WALLACE²
Keita FURUKAWA and Stephanie WALLACE

¹正会員 工博 国土技術政策総合研究所 海洋環境研究室 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

²Ph. D. 元国土技術政策総合研究所 交流研究員

An integrated environmental assessment of a coastal wetland will be presented using Awase wetland (N 26° 18.47, E 127° 58.12, Subtropics) as a case study site. Environmental indicators are selected, and the current environmental status for the indicator species (groups) are described by the Habitat Suitability Index (HSI) methodology. Based on the standing stock biomass and its fraction of each species (groups) are used as an indicator of the assessment. Subsequently the impact of a future large-scale landfill development on the wetland was evaluated. Large losses in optimal habitat (> 20%) are recorded in large seagrass area, benthic zones IV (Gastropod dominant) and VI (Annelid dominant), and Kubiremidoro (green algae), with significant losses (>10%) in benthic zone V (Annelid and Arthropod dominant). The relative proportion of optimal area for the each species (groups) doesn't change except for a special type of benthic zone IV. This attempt of assessment gives a guideline for integrated coastal ecosystem management of the area.

Key Words : Adaptive management, habitat suitability index, integrated coastal zone management, benthos habitat, tidal flat, seagrass meadow, coral reef, mangrove forest

1. はじめに

干潟や藻場、サンゴ礁など沿岸域の生態系には、多様かつ多くの生物が生息し、様々な機能を発揮している¹⁾。そうした沿岸域において、「環境の改変を伴う開発や利用」と「自然環境の保全・再生・創出」の調和を目指し、沿岸域の賢い利用 (Wise Use) を進めるためには、包括的な計画立案や順応的な管理を実現していくことが有効であると言われている^{2,3)}。沿岸域の統合的な環境評価技術を開発することは、そうした計画・管理の実現のために必要かつ重要なステップである⁴⁾。

沿岸生態系の評価については、「生物群集における機能と構造評価」と「生息環境評価」、「環境機能評価」と「生物機能評価」、「全体 (構造的) 指標」と「部分指標」など、様々な視点に立脚した手法が提案、整理されてきた^{5,6,7,8)}。本研究においては、その構成要素である生物群の群集構造で「全体」を表し、多様な生物が生息するという「生物機能」を、非生物環境で制限される「生息環境」を評価することで、沿岸域の統合的な環境

評価を行う方法を提案、試行することを目的とした。

具体的には、環境沿岸生態系の特徴の一つである生物の多様性を評価軸として、代表生物種群毎に生息環境の評価関数 (Habitat Suitability Index: HSI) を作成し、代表的な生物種群の構成割合を求めることで、総合的な環境影響評価を試行することとした。

2. 観測場所

研究対象とした場合は、沖縄県中城湾の泡瀬地区 (N 26° 18.47, E 127° 58.12) を中心とする約265 haの干潟を含む約1100 haのサンゴ礁に囲まれたラグーンである (図-1a, b)。底質は主に粗砂および細砂 (部分的にシルト・粘土分をおおく含む領域もある)、サンゴ砂からなっている。

泡瀬地区には、マングローブ林、干潟、藻場、サンゴ礁といった多様な生態系が存在する (図-2)。泡瀬の干潟は特に甲殻類や貝類⁹⁾ が豊富であり、主に軟体動物、

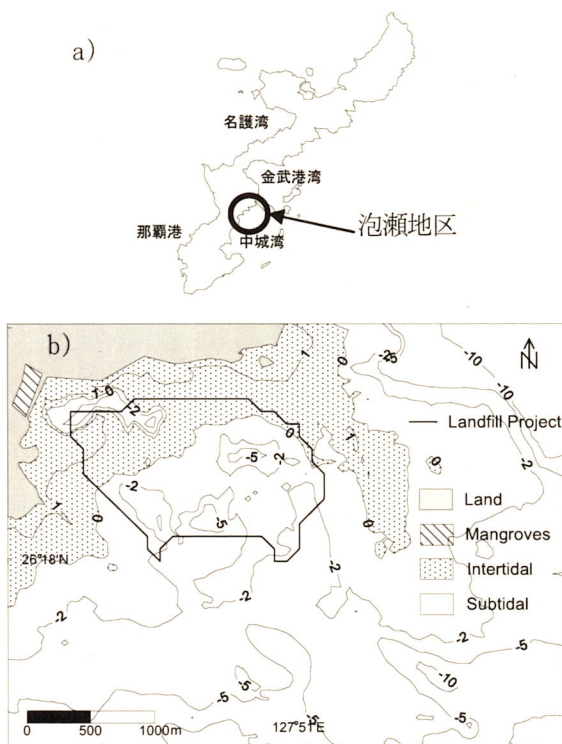


Figure 1. Map of Okinawa showing Awase location (a) and wetland features and bathymetry for analyzed area (b).

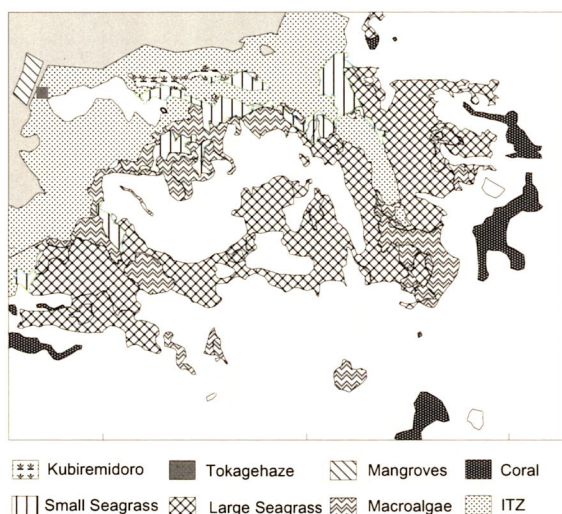


Figure 2. Biota and habitat elements. ITZ refers to intertidal zone.

環形動物、節足動物等が底生の無脊椎動物群を構成している。また、絶滅危惧種や貴重種であるクビレミドロやトカゲハゼ、渡り鳥が生息するとともに、地域の人々にとっては、潮干狩りや漁業の場として活用されている。

干潟域には、点源の負荷として、3つの水路から淡水が直接供給されている。

現在、東部海浜開発計画として、海岸線より200m沖合いに187haの埋立地による国際交流リゾート拠点（マリンシティ）が位置づけられており、沖縄本島中部圏東海

岸の活性化、隣接する新港地区から発生する浚渫土砂の有効利用という意義と目的の下、2014年竣工を目指して、2004年から埋立て事業が着手されている。

3. 使用したデータセット

図-1bに示される対象範囲の環境情報をUTM座標系 (Zone 52) 上の100 m x 100 mのグリッド上に整理し、時間的変化、生物分布との関連、相互相関性などを確認しながら代表となる環境指標を抽出した。グリッドへのデータの割付は、Surfer (Golden Software製) を用い、最近値法およびKriging法¹⁰⁾により補間することで行った。疎なデータをグリッドへ補間して割り付けることにより、GIS(地理情報システム)のように地形情報、現地観測データ、航空写真、数値計算結果など多様なデータを重ね合わせて解析することができる。

解析に利用したデータは、海底地形、底質の中央粒径 (D_{50})、底質のシルト・粘土含有率、海底面のせん断力、波浪に対する暴露の度合い、水質、生物生息状況 (クビレミドロ、トカゲハゼ、マクロベントス群、サンゴ、マングローブ、海草、藻類) である。それぞれは、表-1に示すように、ランク分けして評価した。

Table 1. Ranking criteria for grid dataset.

* denotes intertidal region only, and Δ means increment.

Parameter	Criteria	Rank
Bathymetry (m)	$\Delta=0.5$	intertidal
	$\Delta=2.0$	subtidal
Median Grain Size (mm)	≤ 0.063	silt-clay
	0.063-0.25	fine sand
	0.25-0.50	medium sand
	0.50-1.0	coarse sand
	1.0-2.0	very coarse sand
	>2.0	gravel
Shear Stress (dyn/cm^2)	0-20	1
	20-40	2
	>40	3
Wave Exposure*	$< \text{SE}, > \text{S}$	1
	SE, S	2
	SSE	3
Water Quality	poor	1
	fair	2
	good	3
Benthic zones, Kubiremidoro, Tokagehaze, Coral, Mangrove, Seagrass	Absent	0
	Present	1

水質のランクは2005年10月3-5日に実施した現地観測の結果から、干潟に注ぎ込む排水口近傍から沖合いに向けて良くなっていく水質の勾配が観測されたことを反映して、主に空間的な位置関係から推定した。

波浪への暴露の度合いのランクについては、中城湾の卓越波向きがSSE（年間60%以上）であることを参考に、SSEからの波向きを最高ランクに割り当てた方向別の3つのランクを設定した。ただし、波浪への暴露度合いのランクは干潟域のみに適用している。

マクロベントス群は、正規多変量解析（nMDS）とクラスター解析により決定した（表-2）。用いたデータは、干潟域を中心とする10地点、2000～2003年の経年的・季節的変動を含むマクロベントスの定量調査から得られたものである。表-2には、分離された3つの群(Group)とその優先分類群（dominant taxa）2種を示している。

干潟域のマクロベントス群および、植生などを改めてnMDSにより分類すると図-3に示されるような6つの底生生物分布領域が抽出された。

Table 2. Two most abundant taxa in each group (where n = number of sites), together with Sl. M for Mollusca, A for Annelida, and Ar for Arthropoda.

Group	Dominant Taxa	Phylum Class
I (n=5)	<i>Batillaria zonalis</i>	M. Gastropoda
	<i>Cerithdeopsisilla cingulata</i>	M. Gastropoda
II (n=3)	<i>Mictyris brevidactylus</i>	Ar. Crustacea
	<i>Malacoceros</i> sp.	A. Polychaeta
III (n=1)	<i>Syllinae</i>	A. Polychaeta
	<i>Armandia</i> sp.	A. Polychaeta
Sl (n=1)	<i>CAPITELLIDAE</i>	A. Polychaeta
	<i>Hediste</i> sp.	A. Polychaeta

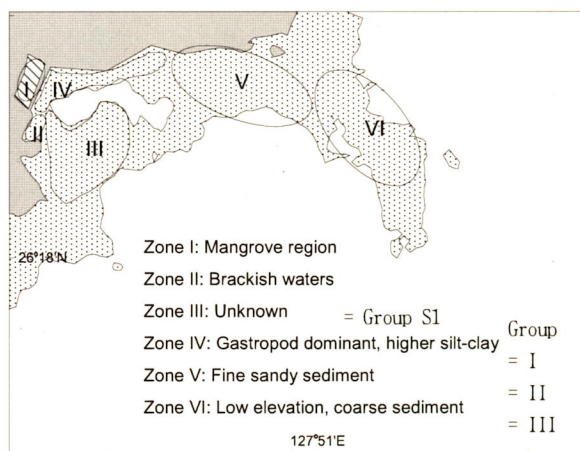


Figure 3. Tidal flat delineated macrobenthos benthic zones I-VI obtained by nMDS analysis using the grouping shown in Table 2.

4. 指標の抽出

対象干潟の環境変化をモニタリングし、環境の変化（埋立てによる環境変化等）を抽出するために利用可能なデータなどを参考に、表-3に示す11の生物および非生物の環境指標を抽出した。環境指標は、希少種の存在、生息場の面積、質、物理パラメータなどであり、対象干潟の環境変化に敏感に応答することが期待される指標である。なお、波浪への暴露条件に関しては、埋立て等により襲来波浪が変化するわけではないが、環境の大きな支配要因であるので環境指標としている。

Table 3. Environmental indicators for Awase wetland.

Indicator	Class
Kubiremidoro	Endangered Species
Tokagehaze	Endangered Species
Benthic Community Assemblage (or Index)	Habitat Quality
Mangrove area	Habitat Extent
Seagrass area	Habitat Extent
Coral Area	Habitat Extent
Seagrass specie	Habitat Quality
Sediment Properties (Grain size, TOC, TN)	Sediment Quality
Water Quality (DO, Salinity)	Water Quality
Freshwater discharge and quality (Nutrients, DO, COD)	Hydraulics, Water Quality
Wave height, period and direction	Hydraulics

5. 生息場適正度指標（HSI）

生息場適正度指数（Habitat Suitability Index: HSI）は、特定の種に対する生息場としての収容力を数値化したものである¹¹⁾。HSIは0 から1.0 の値を持ち、1.0は最大の収容力を示し、0 に向かうに従って、生息場として不適格となるように、できるだけ線形に割り振られる。そして、HSIは、個別の環境条件から計算される適正度指数（Suitability Index: SI）の総体として定義されている。

対象とした生物種は、クビレミドロ、トカゲハゼ、マクロベントスII群-VI群（マングローブ林の内部の群であるI群は、マクロベントスデータが入手できなかったために対象からはずした）、マングローブ、大型海草、

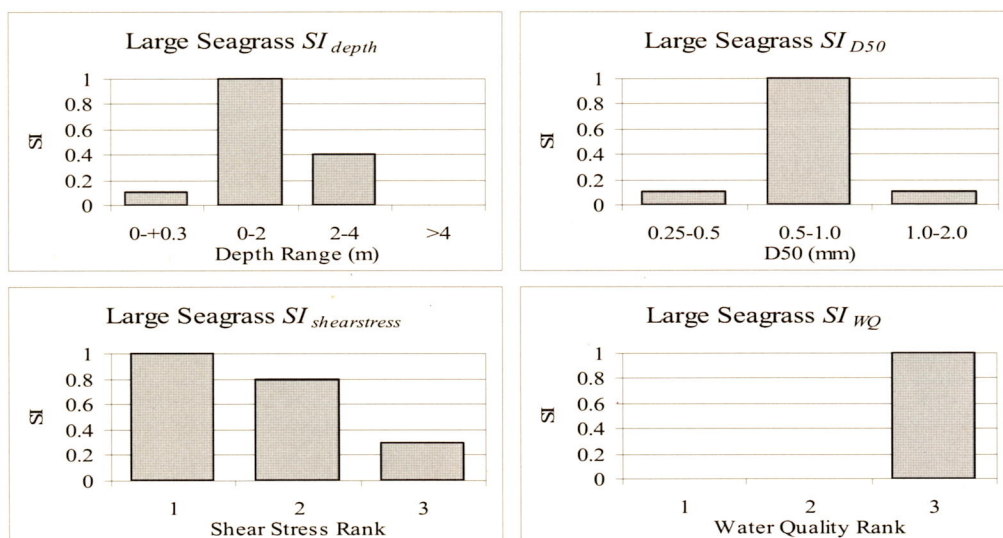


Figure 4. Suitability Index Plots for large seagrass area.



Figure 5. Contour map of HSI values for large seagrass with landfill area shown.

サンゴとした。これは、前節で示された環境指標の内、生物関連指標を網羅している。

これら対象種に対して、非生物関連指標である、水深、中央粒径、底面せん断力、水質、シルト粘土含有率をSIとして設定した。SIの選定においても、また、SIの評価関数の設定に関しても、データが入手できるかどうかを優先して検討し、入手したデータの精度や信頼度に応じたSIの設定方法とした。例えば、信頼性の低いSI項目の評価関数は、定性的な値の数値化（例：適当=1.0、普通=0.5、不適=0.0）により対応した。大型海草について、

こうして設定されたSIの関数系を例として図-4に示す。

HSIは、式(1)により3つのSIグループの総体として評価した。すなわち、水深(SI_{depth})、底質($SI_{substrate}$)、水質(SI_{WQ})の3つのSIグループである。これらは、等価的に生物生息に作用すると考えたからである。

$$HSI = \sqrt[3]{SI_{depth} * SI_{substrate} * SI_{WQ}} \quad (1)$$

ここに、 $SI_{substrate}$ は、中央粒径SI (SI_{D50}) と底面せん

断力SI ($SI_{shearstress}$) の平均として定義され、一部、トカゲハゼの生息分布のようにシルト粘土含有率が支配的なパラメータとなると考えられる領域においては、シルト粘土含有率SI ($SI_{siltclay}$) を併用した。HSIは、グリッドシステムで用意した各100m毎の正方グリッドに対して計算され、図化された。図-5には、大型海草に対するHSIの計算例を示す。

なお、対象生物の生息に適する場（適性生息場面積）を、HSI得点で0.9以上の場の総面積として定義することとした。そうすることで、対象領域内の適する場をスカラー量として評価することができ、次節の生物群集の検討を単純化させることができると考えたからである。ただし、HSIの分布の最大値が1.0にならない場合、HSIの最大値を0.9倍した値を閾値とした（例えば、トカゲハゼとマクロベントスII群については、それぞれ、閾値を0.8, 0.7とした）。また、マングローブについては、現在の対象干潟内に適する場が存在せず、マングローブの再生・創出を図る場合には、環境改善が不可欠であることが示唆された。

6. 地形改変による生息生物群集の変化の予測

埋立て等による地形改変がどのように生息生物群集構造に影響を及ぼすのかを評価するために、前節で計算された各対象生物に対する適性生息場面積の比を用いた。

現在の地形条件で、適性生息場面積 ($Area_{pre-landfill}$) を算出し、地形改変後の条件で計算される適性生息場面積 ($Area_{post-landfill}$) を算出する。その差を取ることで、対象生物に対する正味の損失 ($Area_{net} = Area_{pre-landfill} - Area_{post-landfill}$) を計算し、どの生物群が影響を受けるの

Table 4. HSI optimal areas pre and post landfill development for indicators (all areas given in hectares).

Indicator	Optimal Area ha (pre-landfill)	Optimal Area ha (post-landfill)	% Loss Optimal Area
Kubiremidoro	17.1	13.2	23.0
Tokagehaze	1.6	1.6	0
Benthic zone II	0.9	0.9	0
Benthic zone III	58.5	53.0	9.4
Benthic zone IV	58.5	22.1	62.1
Benthic zone V	23.1	20.6	10.6
Benthic zone VI	48.4	37.9	21.7
Mangrove area	0	0	0
Large Seagrass area	180.3	142.7	20.9
Coral area	58.3	57.1	2.1

かを明らかにしようという試みである。

表-4に各対象生物に対する計算結果を示す。適性生息場面積の生物群毎の分布を見ると、この場が大型海草やマクロベントスが卓越する場であることが示されている。また、最大の正味の損失(> 20%)が計算されたのは、大

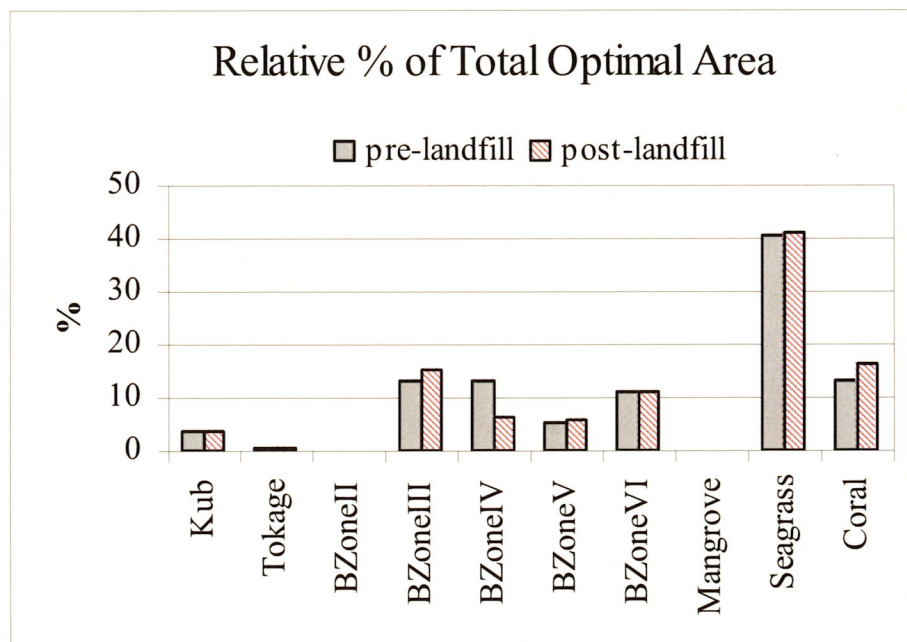


Figure 6. Relative percent of each component against total optimal area for pre and post landfill development.

型海草、マクロベントスIV群、VI群、そして、クビレミドロであった。それに続いて、顕著な損失(>10%)が計算されたのは、マクロベントス群Vであった。ただし、この指標群には、潮間帯下部・潮下帯上部に多くの分布を持つ藻類や小型海草などが含まれていないこと(図-2参照)に注意されたい。

この適性生息場面積の生物群毎の構成割合について検討するために、全体の海底面積(埋立てにより減少している)で規格化し、相対的な構成割合を図示したものが、図-6である。

相対的な適性生息場面積の生物群毎の構成割合については、地形改変の前後においては、マクロベントスIV群を除いて、大きな変動がないことが示されている。このことは、埋立てにより海域を失っても、この海域を特徴付ける多くの生物群の群集構造を大きく改変しないということを示している。巨視的に見た場合、生態系としての食物網や物質循環の系が維持される可能性が高いと推察することができる。

しかし、一方で、均等に影響が出ているという視点でデータを見るならば、埋立てにより失った海域には、この海域を特徴付ける多くの生物群が生息していたということである。微視的な視点に立てば、生息生物の減少や消滅という影響が考えられるということが示されている。

7. おわりに

本論文で示された評価手法は、限られたデータを最大限活用し、比較的簡易な手順により生態系全体への影響評価・検討を可能とするものである。埋立てによる地形改変の影響を、生態系の生物群構成という巨視的な指標及び、正味の損失量という微視的な指標で示すことができた。

こうした総合的な環境影響評価が可能になれば、海域の生態系の保全・再生・創出の計画立案、モニタリング計画の立案などの段階で、より包括的・戦略的に計画を検討することが可能となると推察される。また、施工時・施工後の影響評価、モニタリングにおいては、本手法であらかじめ影響を予測することで、生物群の実データ取得(モニタリング)の成果の評価基準が与えられ、順応的な管理のための評価指標にもなり得ると考える。

当該海域の事業者は、現在、埋立てにあたって、外部評価システムを導入した環境監視、環境保全への努力を行っている。本手法が、こうした努力で蓄積されていくデータの活用の一助となることを期待する。

謝辞: 本研究で使用了データの一部は、沖縄総合事務局が東部海浜開発計画策定のために行った調査結果、および事業実施時の環境監視結果である。調査結果の提供、現地調査の実施にご協力いただいた沖縄総合事務局にあつくお礼申し上げます。

参考文献

- 1) Colijn, F., and de Jonge, V.N: Primary production of microphytobenthos in the Ems-Dollard estuary. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 14: 185-196, 1984.
- 2) Ramsar Convention on wetlands: Ramsar handbooks for the wise use of wetlands, Ramsar Convention Bureau, Gland, Switzerland, 2000.
- 3) International Navigation Association: Ecological and engineering guidelines for wetlands restoration in relation to the development, operation and maintenance of navigation infrastructures, International Navigation Association, Brussels, Belgium, 2003.
- 4) 古川恵太・小島治幸・加藤史訓: 海洋環境瀬策における順応的管理の考え方, 海洋開発論文集, 21: 67-72, 2005.
- 5) 土木学会海岸工学委員会地球環境問題研究小委員会: 沿岸域における広域環境問題の取り組み, 土木学会, 2000.
- 6) 中村義治編: 生態系における構造と機能の評価方法に関するレビュー, 水産工学研究集録, 第8号, 2000.
- 7) 国立環境研究所: 干潟等湿地生態系の管理に関する国際共同研究, 国立環境研究所特別研究報告, SR-51-2003, 2003.
- 8) Bartoldus, Candy C.: A comprehensive review of wetland assessment procedures, Environmental Concern Inc., MD, USA, 1999.
- 9) 環境省: 日本の重要湿地500, インターネット自然研究所, <http://www.sizenken.biodic.go.jp/wetland/>, 2006.
- 10) Abramowitz, M. and Stegun, I.: Handbook of Mathematical Functions, Dover Publications, New York, 1972.
- 11) U.S. Fish and Wildlife Service: Ecological Services Manual, Standards for the development of Habitat Suitability Index models, U.S. Fish and Wildlife Service, 103 ESM, 144p., 1981.