

神戸空港人工海浜の包括的環境影響評価

正員 澤田 高 侑*

正員 大塚 耕 司**

Inclusive Environmental Impact Assessment for Artificial Lagoon in Kobe Airport Island

by Takayuki Sawada, *Member*

Koji Otsuka, *Member*

Summary

Many environmental restoration technologies for enclosed coastal seas have been developed. The environmental restoration functions of these technologies are conventionally assessed by field monitoring or ecosystem modeling. On the contrary, the social functions of these technologies are usually evaluated by some economic analysis methods, such as Contingent Valuation Method (CVM) and Travel Cost Method (TCM). However, there have been very few assessment methods for both environmental and social functions from the viewpoint of sustainability. In this paper, the authors perform an inclusive environmental assessment, which is based on Inclusive Impact Index (Triple I) proposed by The Research Committee on Inclusive Marine Pressure Assessment and Classification Technology (IMPACT Research Committee) in The Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers, for an artificial lagoon in Kobe Airport island in Osaka Bay. The assessment method consists of the ecological footprint accounting for the environmental sustainability and the TCM for the social sustainability. The environmental assessment results show that the artificial lagoon is environmentally sustainable, when the life cycle is assumed to be more than 9 years. However, the ecological footprint of the fundamental reclamation is much larger than that of the lagoon construction and the biocapacity of the lagoon ecosystem. The social assessment results demonstrate that more than 35,000 visitors are required for the socially sustainable system, when the life cycle is assumed to be 50 years.

1. 緒 言

大阪湾のような周辺部に大都市を持つ閉鎖性海域では、自然の水質浄化機能が都市部からの負荷に追いつけず、赤潮や貧酸素水塊の発生など慢性的な水質汚染に悩まされている。このような過栄養状態にある閉鎖性海域の環境修復に関しては、これまでも様々な技術が開発、提案されているが、中でも、海浜、干潟、磯、藻場などの浅場の造成は、生態系が本来持っている物質循環機能を積極的に利用するという点で、生物生産機能の向上も含めた効果が期待されている。

2006年2月に開港した神戸空港は、ポートアイランド南沖に約272haの面積を埋め立てることで造成された。この神戸空港島内にも、生態系の創出による環境修復を目的とした人工海浜が設置されている。このような環境修復技術の環境面での評価については、従来から現地での水質や底質調査を基礎とした環境改善効果評価、生物調査や生態系モデルを用いた数値シミュレーションを基礎とした炭素／栄養塩固定効果評価などが行われている¹⁾。一方社会面での評価とし

ては、生物による炭素や窒素の固定量からそれを処理するための年間下水道費用に換算する方法²⁾、アンケートを利用して、環境が改善されたり悪化したりした状態を回答者に示して、環境改善に対する支払い意思額や環境悪化の受け入れ意思額を聞きだす仮想評価法 (Contingent Valuation Method, CVM)³⁾、公園や娯楽施設などへの訪問者が払う旅行費用の関係から利用価値を評価するトラベルコスト法 (Travel Cost Method, TCM)³⁾など、経済価値に換算するいくつかの手法が提案されている。

しかし、環境修復技術自体も、人間活動の増大にともなう埋立事業と同様に、いわば人工的に自然を改変することから、その環境影響についても併せて議論することが必要で、その際には、地球環境の観点から「持続可能な開発」となっているのかどうかを評価することも重要であると思われる。そこで本研究では、神戸空港人工海浜を対象として、人間活動による資源の消費などを土地面積に換算するエコロジカル・フットプリントを用いて環境面での持続可能性について評価するとともに、社会面での持続可能性についても評価するためTCMによる経済価値に関する解析を行う。またこれらを統合した評価指標を用いて包括的な持続可能性についても考察する。

* 新日鐵エンジニアリング(株)

** 大阪府立大学大学院工学研究科

2. 神戸空港人工海浜の概要

神戸空港は2006年2月に開港した海上空港で、ポートアイランド南沖に約272haの面積を埋め立てることで造成された。神戸空港は環境配慮型空港として様々な環境対策を行っており、その一つとして、空港島西側に造成された人工海浜が挙げられる。

この人工海浜の規模は約2.8ha、平均水際線面積は約1.3haである。構造上の特徴としては、堤体の中央部に1m角の正方断面を持つ通水路が一系列に配置されており海水が外海と自由に行き来できる形状となっていること、堤体に近い部分が大型の被服石で整形された磯場となっており、砂浜の両端にも複数の岩が置かれて磯場に近しい状況となっていることなどが挙げられる (Fig. 1 参照)。期待される主な環境修復機能は、海浜内に創出される生態系による物質循環であるが、副次的な機能として、環境学習やレクリエーションの場としての機能も期待されている。

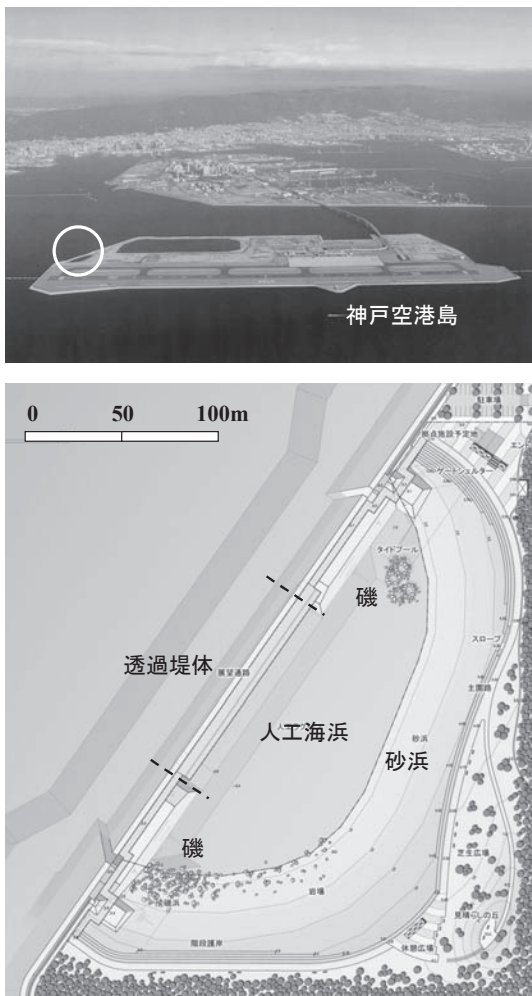


Fig. 1 Location and general arrangement of an artificial lagoon in Kobe Airport island.

3. 包括的環境影響評価指標

3.1 Ecological Footprint

Ecological Footprint (EF) は、1990年代に British Columbia 大学の William Rees 教授と当時博士課程に在籍していた Martis Wackernagel 博士らによって開発された。EF は、経済活動による資源やエネルギーの消費、廃棄物の処理などに必要となる生態系の生産 (処理) 能力を、生物生産力のある土地 (耕作地、牧草地、森林地、生産力のある水域、生産力阻害地に区分される) の面積として換算した値で表される。これらの土地区分ごとに単位面積当たりの生産力が異なるため、土地面積を合計する際には、Table. 1 に示すような等価係数 (Equivalence Factor) を掛けることによって世界平均の生物生産力を基準にした値に標準化する必要がある。この標準化した土地面積の単位には global hectares (gha) が用いられる。実際の地球上に存在する土地や水域の生産 (処理) 力も同じ等価係数を用いて標準化した土地面積として表すことができ、その値は Biocapacity (BC) と呼ばれる⁴⁾。

EF の計算には2つの方法がある。1つは Compound 法と呼ばれる手法で、各国の EF 消費や BC 存在量を計算する際に用いられる。Compound 法では、各国の生物資源消費を国内生産量、輸入量、輸出品などの統計データから計算する。また、エネルギー消費については、国内エネルギー生産に輸入品に内在する消費エネルギーを加えることによって計算する。もう1つは Component 法と呼ばれる方法で、個々の生産活動や経済活動による EF 消費を計算する際に用いられる。個々の生産活動による EF 消費の大部分は CO₂ 排出に伴う森林の消費 (排出した CO₂ を全て吸収するだけの森林面積が必要と考える) で換算されるため、従来から行われている CO₂ 排出量を指標とする Life Cycle Assessment (LCA) の手法が応用できる。

Table. 1 Equivalence factors for ecological footprint accounting.⁴⁾

土地区分	等価係数 (gha/ha)
耕作地	2.10
牧草地	0.48
森林地	1.37
生産性のある海域	0.36
生産力阻害地	2.19

EF は人間活動によってどれだけ生産力のある土地が消費されたかを計算する指標であるので、実際の地球の生産 (処理) 可能容量である BC と比較すれば、人類の持続可能性を測る物差しとして用いることができる。このように、EF は土地面積という非常に単純でわかりやすい指標となっているため、ヨーロッパ連合 (EU) をはじめ、多くの国・自治

体で現在急速に普及しつつある。しかしながら、 EF は基本的に年度ごとの統計データを基礎として計算されるため、将来的な価値や寿命、技術革新などが反映されていないという批判もあり、意思（政策）決定に用いる際には、長期的な観点からの比較評価をどう取り入れるかが課題となっている。

3.2 環境リスク

環境リスクによる評価手法⁵⁾は1990年代に東京大学の中西準子教授（現（独）産業技術総合研究所化学物質リスク研究センター長）により提案されたもので、地球温暖化や化学物質の人体への影響といった広域的で長期的な環境影響問題を評価するのに有効な手段とされている。この手法では、環境影響として現在および未来の経済損失・人の健康への影響・生態系への影響が、資源消費として現在および未来のコストが、ベネフィットとして現在および未来の利益が、それぞれ環境影響評価の際考慮すべき項目として挙げられている。これらは、コスト（ C ）、人の健康リスク（ HR ）、生態リスク（ ER ）に集約され、最終的にベネフィット（ B ）とリスクの比（ $\Delta B/\Delta R$ =見返りとしてもたらされるベネフィット/受忍するリスクの大きさ）で評価される。

3.3 Inclusive Impact Index (Triple I)

EF は単純で分かりやすい指標であるため近年、世界中の多くの国で普及しつつある。しかし、 EF は年度ごとのデータを基に計算されるため、将来もたらされる価値などを評価に含めることができないという弱点がある。一方、環境リスクは将来を含めた長期的な環境評価をすることができるので、 EF にその考えをうまく取り入れると、その弱点を補える可能性がある。

日本船舶海洋工学会、海洋の大規模利用に対する包括的環境影響評価研究委員会（通称：IMPACT 研究委員会）は、Inclusive Impact Index (Triple I) という包括的環境影響評価指標を提案している。リスクを含めた将来的な生態系の価値を生物生産量の価値として考えれば、 EF として換算することが可能となる。すなわち ER を EF に統合するという考え方である。一方環境リスク論において HR は C に統合される。したがって、 ER と統合した EF と、 HR を統合した C の換算が可能であれば、包括的指標を作ることができる。そこで Triple I (III) の計算では、次式のように、対象となる海洋利用技術の適用が想定される国あるいは地域の EF と GDP の比 EF_{region}/GDP_{region} （ただし、二酸化炭素海洋隔離など外洋を対象とする技術については世界の総 EF と総 GDP の比 $\Sigma EF_{region}/\Sigma GDP_{region}$ を用いる）が換算係数として導入された⁶⁾。

$$III = [(EF - BC) + \alpha ER] + \frac{EF_{region}}{GDP_{region}} [\beta HR + (C - B)] \quad (1)$$

ここで、 α は ER の EF への換算係数、 β は HR の C への換算係数である。なお、環境リスク論では HR は人間の健康へのリスク（Health Risk）として扱われているが、Triple I では、災害による経済損失などの社会リスクも含めた人間リスク（Human Risk）として扱っている。

4. 神戸空港人工海浜の評価方法

4.1 評価項目

本研究では、(1)式で示した Triple I の各項のうち、計算方法がまだ確立されておらず、基礎となるデータベースについても研究開発段階である ER と HR は取り扱わないこととした。また人工海浜はすでに建設された神戸空港島内に付加的に造成されたものであるため、基本的な持続可能性評価については、養浜に要した CO_2 排出量や建設コストに対して、養浜によって創出された生態系や経済価値を比較することによって行った。ただし、環境面での持続可能性については、参考として新たに埋立を行ったとした場合の評価も行った。なおこれらの評価を統合する換算係数については、対象となる場所が国内であることから、2003年における日本の EF (= 562 Mgha)⁷⁾と GDP (= 517 兆円)⁸⁾の比 ($EF_{JP}/GDP_{JP} = 1.09 \times 10^{-6}$ gha/円) を用いることとした。

4.2 人工海浜造成に伴う EF 増加量

EF 増加量の要因としては、神戸空港島内に付加的に人工海浜を造成した時に排出される CO_2 排出量を考える。具体的には、養浜工事の間に排出される CO_2 排出量を、「直接エネルギー」（作業船舶、建設機械の運転に使用される燃料のエネルギー）、「間接エネルギー（建設機械製造）」（作業船舶・建設機械の製造に投入されるエネルギー）、「間接エネルギー（建設資材製造）」（建設工事で使用される鋼材やコンクリートなどの建設資材の製造によって誘発されるエネルギー消費）の3つに分類し、ライフサイクルアセスメント (LCA) の手法⁹⁾を基本として、事業の間に発生する CO_2 排出量を推定した。なお、今回の事例が公園に近い事業であることから、管理/運用段階の CO_2 排出量は建設段階に対して無視できるほど小さく、またエネルギー投入による廃棄は行わないとした。

ここで、年間に単位 CO_2 を吸収する森林面積が $A_{forest} = 0.19$ ha/t- CO_2 /年、森林地の等価係数が $f_{forest} = 1.37$ gha/ha で与えられるので⁴⁾、人工海浜のライフサイクルを n (年) とすれば、次式で EF_E (gha) が計算できる。

$$EF_E = f_{forest} A_{forest} \left(\frac{E_1 + E_2 + E_3}{n} \right) \quad (2)$$

ただし E_1 (t-CO₂)、 E_2 (t-CO₂)、 E_3 (t-CO₂) は、それぞれ直接エネルギー、間接エネルギー（建設機械製造）、間接エネルギー（建設資材製造）の CO₂ 排出量である。以下、各エネルギーの算出方法の詳細について述べる。

(1) 直接エネルギー

作業船舶、建設機械の運転に使用される燃料の CO₂ 排出量で、次式のように表される。

$$E_1 = \sum e_{1i} C_{1i} \quad (3)$$

ここで、 C_{1i} ：各機関の燃料消費量 (l)、 e_{1i} ：燃料の CO₂ 排出原単位 (t-CO₂/l) であり、作業船舶に関しては A 重油が、建設機械に関しては軽油が燃料として用いられている。なお燃料消費量は神戸市みなと総局へのヒアリング調査から得たデータ (Table. 3) を、燃料の CO₂ 排出原単位は 1995 年度の環境負荷原単位表¹⁰⁾の値を用いた。

(2) 間接エネルギー（建設機械製造）

作業船舶・建設機械の製造に投入されるエネルギーを対象とし、次式で表される。

$$E_{2i} = \sum e_{2i} C_{2i} \quad (4)$$

ここで、 C_{2i} ：各機械の損料 (百万円)、 e_{2i} ：各機械の損料ベースの CO₂ 排出原単位 (t-CO₂/百万円) である。(4)式は建設工事当たりのエネルギー消費量を機械損料に置き換えて得られる原単位から算出されるエネルギーであり、これは、建設機械が繰り返し使用されるため、損料に比例して減価償却されることを考慮に入れた式である。なお造成に使用された機械の損料は神戸市みなと総局へのヒアリング調査により得られたデータ (Table. 4) を、損料ベースの CO₂ 排出原単位は中嶋ら⁹⁾の値を参考に計算した。

(3) 間接エネルギー（建設資材製造）

建設工事で使用される鋼材やコンクリートなどの建設資材の製造によって誘発されるエネルギー消費を対象とし、次式で表される。

$$E_{3i} = \sum e_{3i} C_{3i} \quad (5)$$

ここで、 C_{3i} ：各資材の使用量 (m³)、 e_{3i} ：各資材製造にかかる CO₂ 排出原単位 (t-CO₂/m³) である。なお資材使用量は神戸市みなと総局へのヒアリング調査から得られたデータ (Table. 5) を、CO₂ 排出原単位は中嶋ら⁹⁾の値を参考に計算した。

4.3 埋立に伴う EF 増加量

4.1 節に示したように、今回の評価は、基本的にはすでに埋め立てられた土地に人工海浜を付加的に造成した場合について行うが、環境面の評価については人工海浜の基盤となる埋立工事による環境負荷についても参考値として計算することとした。この場合、EF の増加要素としては、埋立工事の環境影響と、人工海浜の海面占有が挙げられる。前者については、4.2 節に示した養浜工事による EF 増加量と同じ手順で求めることができる。また後者については、単純に人工海浜の面積 (2.8 ha) に生産力のある海域の等価係数 (0.36 gha/ha) を掛け合わせることで求めた。

4.4 生態系創出に伴う BC 増加量

BC 増加量の要因として、人工海浜の造成によって創出される生態系の炭素固定効果を考える。神戸空港人工海浜では、年 4 回 (四季) 生物調査¹¹⁾を実施している。Fig. 2~4 に、海藻、付着動物、底生動物それぞれの人工海浜全域の湿重量推定結果を示す。海藻と付着動物は人工海浜造成直後に単種が加入して湿重量が一気に増え、その後他の種の加入や捕食生物の増加によって湿重量が減少した後、ある程度のレベルで落ち着く傾向がみられる。これに比べ底生動物の加入は遅く、造成 2 年目で湿重量が一気に増加する傾向が見られた。ただし、底生動物の湿重量については、海藻ならびに付着動物に比べて一桁小さい値となっている。

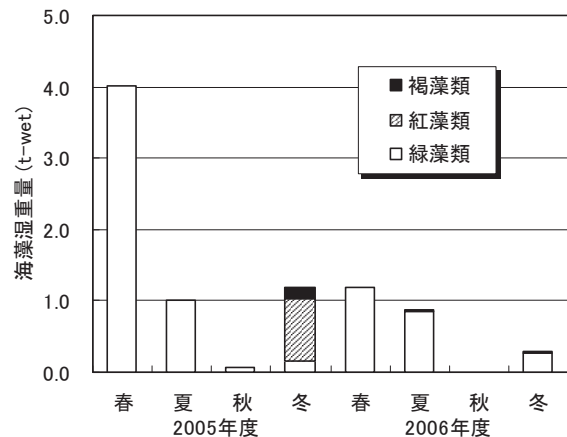


Fig. 2 Seasonal variation of estimated wet weight of seaweed¹¹⁾.

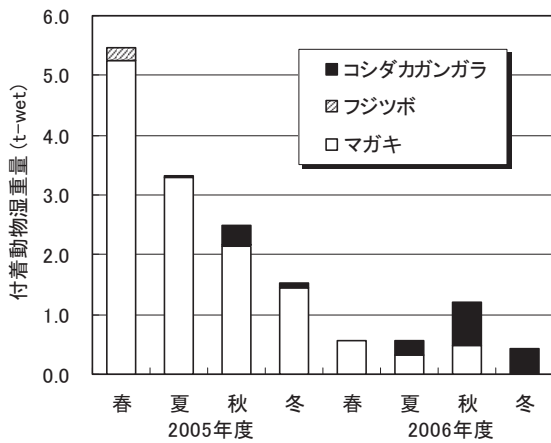


Fig. 3 Seasonal variation of estimated wet weight of sessile animal¹¹⁾.

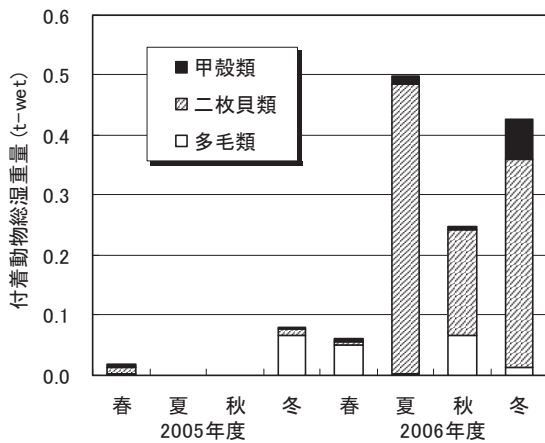


Fig. 4 Seasonal variation of estimated wet weight of benthos¹¹⁾.

炭素固定量は現存量法によって得られた生物生産量を基に求めた。すなわち次式で表されるように各年度の最大現存量(ここではFig. 2~4で示される湿重量)からP/B_{max}比(生産量/最大現存量)を用いて算出された生物生産量に、各生物の炭素含有率を掛けたものとして算出した。

$$P_i = B_{\max i} r_{PBi} r_{Ci} \quad (4)$$

ここで、 P_i は海藻、付着動物、底生動物それぞれの年間生産量(t-wet/年)、 $B_{\max i}$ は海藻、付着動物、底生動物それぞれの年最大湿重量(t-wet)、 r_{PBi} はP/B_{max}比(ここでは海藻:3、付着動物:1.7、底生動物:1.7と仮定)¹²⁾、 r_{Ci} は炭素/湿重量比(ここでは海藻:0.06、付着動物:0.1、底生動物:0.1と仮定)¹²⁾である。

Table. 2 Marine production efficiencies for ocean, coastal and upwelling areas¹³⁾.

	外洋	沿岸域	湧昇域
面積(百万km ²)	332.0	26.6	0.4
一次生産効率(t-C/ha/年)	0.50	1.00	3.00
平均栄養段階	5	3	1.5
生態効率	0.10	0.15	0.20
魚類生産効率(kg-C/ha/年)	0.0050	3.38	268

BC増加量に関しては、(4)式で求めた炭素固定量から、生産性のある海域の平均的な一次生産効率 Y_{P0} (= 1.03 t-C/ha/年、Table. 2に示した沿岸域と湧昇域の平均値)を用いて等価な一次生産量が得られる海域面積を求め、それに海域の等価係数 f_{sea} (= 0.36 gha/ha)を掛けることによって次式で算出した。

$$BC_i = f_{sea} \frac{P_i}{k^{TL} Y_{P0}} \quad (5)$$

ここで、 k は生態効率(ここでは、沿岸域の平均的な値として付着動物:0.15、底生動物:0.15と仮定)、 TL は栄養段階(ここでは、プランクトン食性種が優占していることから付着動物:1.5、底生動物:1.5と仮定)である。なお海藻は一次生産者であるので $TL=0$ となる。

4.5 人工海浜造成に伴うコストおよび経済価値

神戸市みなと総局へのヒアリング調査からは人工海浜造成単独のコストのデータが得られなかったため、ここでは同規模の人工海浜であるりんくう公園内海(関西国際空港の対岸に造成されている)の事例を参考に10億円と仮定した。なお、年間の償却費への換算は、長期的な経済状況の変化を予測することが難しいのでインフレを考慮せず、単純に建設コストをライフサイクル n 年で割ることによって求めた。

人工海浜の経済価値については、2007年8月19日に人工海浜で開催された環境学習イベント「ウミガメ・エコツーリズム」に参加した一般市民に対し、旅行費用(トラベルコスト)に関するアンケート調査を行った結果から求めた。具体的な算出方法について以下に述べる。

イベント参加者約120名全員に対して、以下の8項目に関するアンケートを依頼し、そのうち105名の回答を得た。なおアンケートは家族の代表1人に回答をしてもらい、家族内で意見は同じであると考えた。

- ① 人工海浜の認知の有無
- ② 同伴者の内訳
- ③ 出発地

- ④ 人工海浜までの交通手段
- ⑤ 人工海浜までの所要時間
- ⑥ 人工海浜までの所要費用
- ⑦ イベントがないとした場合の年間訪問希望回数
- ⑧ イベントがあるとした場合の年間訪問希望回数

アンケート結果から得られた、イベントがあるとした場合の年間訪問希望回数と、1人1回当たりに必要な旅行費用の関係について Fig. 5 に示す。一般的には1回当たりの費用が少ないほど希望回数が増える傾向を示すものと考えられるが、今回の結果からはその関係式を導くことは困難と判断し、単純にこれらを平均することによって1人1回当たりに必要な旅行費用 TC_0 (円/人・回) を求め、年間訪問者数 (延べ人数) Q (人・回) を掛けることによって経済価値を算出した。

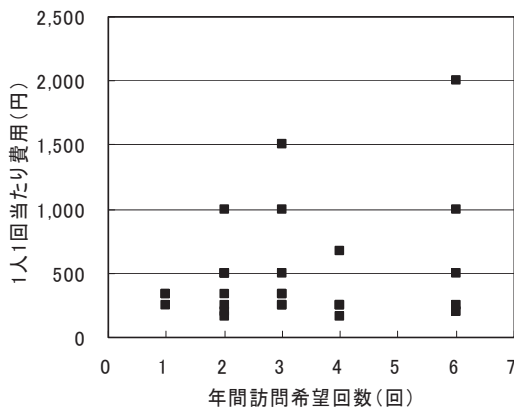


Fig. 5 Relationship between annual visit demand and travel cost per person.

5. 神戸空港人工海浜の評価結果

5.1 人工海浜造成および埋立に伴う CO₂ 排出量

Fig. 6 に、養浜工事ならびに埋立に伴う資材輸送および工事(神戸空港全体の埋立工事のデータから人工海浜部の面積比を掛けて算出)の CO₂ 排出量の計算結果を示す。なお直接エネルギー、間接エネルギー(建設機械製造)、間接エネルギー(建設資材製造)の各段階における CO₂ 排出量の内訳については、Table. 3~5 にそれぞれ示している。

養浜工事に伴う CO₂ 排出量は約 75 t-CO₂ という計算結果となった。このうち、直接エネルギーが約 40 t-CO₂ であり (Table. 3 参照) 半分以上を占めている。つまり、養浜工事に関しては工事中の機械の燃料消費が大きいといえる。

埋立に伴う資材輸送および工事の CO₂ 排出量を考慮すると、工事の資材製造に関する間接エネルギーが卓越している。この資材の内訳を見ると (Table. 5 参照)、公共土砂の製造が圧倒的に大きい。また資材輸送の直接エネルギーも大きく、その内訳を見ると (Table. 3 参照)、主な原因が土砂運搬用

の押船使用によることわかる。これは、神戸空港島が平均水深約 16m の海域に建設されており、埋立には大量の土砂が必要であったことが背景にある。

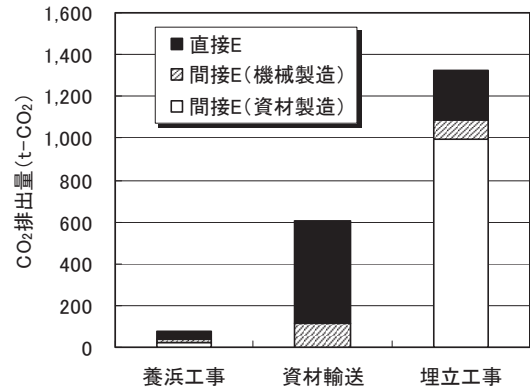


Fig. 6 Estimated CO₂ emission for lagoon construction, material transportation and reclamation.

Table. 3 Estimated CO₂ emissions for direct energy.

	機械種類	燃料消費量 (l)	CO ₂ 排出原単位 (kg-CO ₂ /l)	CO ₂ 排出量 (t-CO ₂)
養浜工事	バージアンローダー	12,400	2.59	32.1
	ブルドーザ	3,072	2.72	8.4
資材輸送	押船(底開式)	102,400	2.59	265.2
	押船(箱型式)	23,520	2.59	60.9
	クレーン付台船	1,260	2.59	3.3
	ガット船(雑石用)	34,272	2.59	88.8
	ガット船(砂浜用)	29,376	2.59	76.1
埋立工事	揚土船	55,224	2.59	143.0
	トラクタショベル	6,930	2.72	18.8
	ダンプトラック	14,152	2.72	38.5
	ブルドーザ	11,376	2.72	30.9
	タイヤローラー	1,569	2.72	4.3

Table. 4 Estimated CO₂ emissions for indirect energy (machine production).

	機械種類	損料 (百万円)	CO ₂ 排出原単位 (t-CO ₂ /百万円)	CO ₂ 排出量 (t-CO ₂)
養浜工事	バージアンローダー	2.51	4.78	12.0
	ブルドーザ	0.59	3.94	2.3
資材輸送	押船(底開式)	10.08	4.78	48.2
	押船(箱型式)	1.51	4.78	7.2
	クレーン付台船	3.41	4.78	16.3
	ガット船(雑石用)	4.69	4.78	22.4
	ガット船(砂浜用)	4.02	4.78	19.2
埋立工事	揚土船	13.68	4.78	65.4
	トラクタショベル	3.05	3.94	12.0
	ダンプトラック	1.86	3.94	7.3
	ブルドーザ	2.13	3.94	8.4
	タイヤローラー	0.29	3.94	1.1

Table. 5 Estimated CO₂ emissions for indirect energy (material production).

	資材	使用量 (m ³)	CO ₂ 排出原単位 (kg-CO ₂ /m ³)	CO ₂ 排出量 (t-CO ₂)
養浜工事	砂浜用土砂	10,000	2.06	20.6
埋立工事	公共土砂	460,000	2.06	947.6
	石材(捨石)	9,200	2.35	21.6
	石材(雑石)	11,400	2.35	26.8

Table. 6 Estimated annual production and biocapacity of seaweed, sessile animal and benthos.

2005年度			
	海藻	付着動物	底生動物
最大湿重量(t-wet)	4.01	5.46	0.02
炭素/湿重量比(t-C/t-wet)	0.06	0.10	0.10
P/Bmax	3.0	1.7	1.7
年間生産量(t-C/年)	0.722	0.928	0.003
BC (gha)	0.252	5.586	0.020
計 (gha)	5.859		
2006年度			
	海藻	付着動物	底生動物
最大湿重量(t-wet)	1.19	1.20	0.50
炭素/湿重量比(t-C/t-wet)	0.06	0.10	0.10
P/Bmax	3.0	1.7	1.7
年間生産量(t-C/年)	0.214	0.204	0.085
BC (gha)	0.075	1.228	0.510
計 (gha)	1.812		

5.2 生態系創出に伴う BC 増加量

Table. 6 に、2005 年度および 2006 年度の海藻、付着動物、底生動物の年間生産量および BC 増加量を示す。この表から、一次生産者である海藻の BC 増加量に比べて、生産量がほとんどなかった 2005 年度の底生動物を除いて、消費者である付着動物や底生動物の BC 増加量が非常に大きいことがわかる。これは、BC は一次生産量を基準として評価されるため、消費者の場合に生態効率と栄養段階を考慮して計算されることによる。つまり、高次の動物バイオマスの多い生態系を作り出すことで、効果的に BC を増やすことができることを示している。

5.3 環境面での持続可能性

ライフサイクルをパラメタとした EF-BC の計算結果を Fig. 7 に示す。なお BC については、人工海浜造成直後の炭素固定量の増加傾向も考慮するため、ライフサイクルが 1 年の場合は初年度の BC を、2 年以上の場合は初年度に 2 年目の BC を残りの年数分加えて平均することによって求めた。計算結果を見ると、ライフサイクルが 9 年以上であれば、人工海浜造成による環境負荷よりも創出される生態系の生産効果が上回ることがわかる。

しかし、Fig. 8 に示した埋立工事を考慮した結果を見ると、環境負荷量が生態系の創出効果を大きく上回ることがわかる。このことから、人工海浜の基盤となる埋立工事による環境負荷は非常に大きく、それを軽減させるためには、埋立資材の現地調達や化石燃料に代わる新たなエネルギー利用などが必要であるといえる。

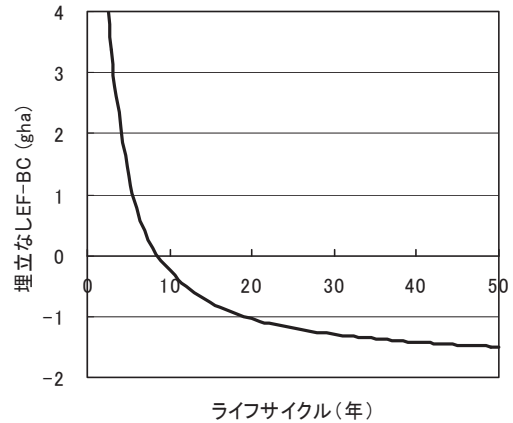


Fig. 7 Estimated EF-BC related to life cycle without considering reclamation.

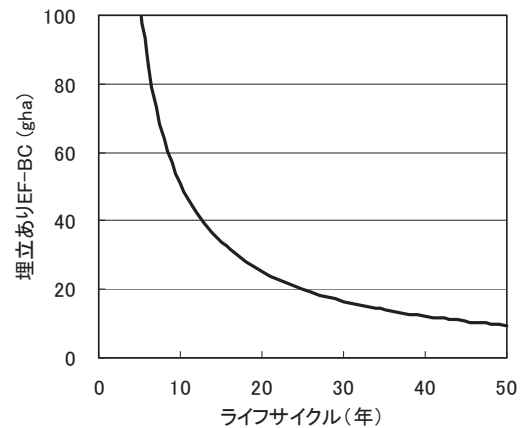


Fig. 8 Estimated EF-BC related to life cycle with considering reclamation.

5.4 社会面での持続可能性

Fig. 9 に、ライフサイクルをパラメタとした年間必要訪問者数の計算結果を示す。この結果を見ると、人工海浜の造成にかかる建設コストに匹敵する経済価値があると見なすためには、ライフサイクルを 30 年とした場合で年間約 6 万人の訪問者が、同じく 50 年とした場合で年間約 3 万 5 千人の訪問者が必要であることがわかる。アンケート調査から、定期的なイベントを実施した場合には、イベントを行わない場合の 4.5 倍程度訪問者数が増えるという結果を得ており、社会面で持続可能な施設とするためには、環境学習などのイベントを定期的実施することが重要であるといえる。

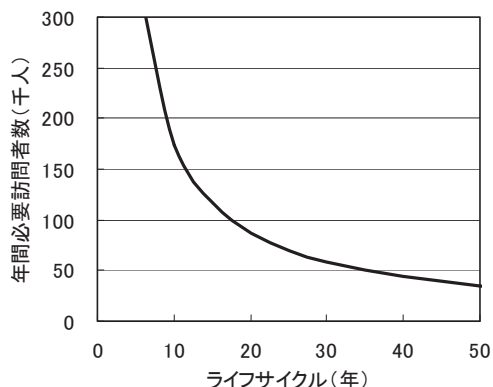


Fig. 9 Estimated annual visitor demand related to life cycle.

5.5 評価の統合

環境面での持続可能性評価と社会面での持続可能性評価を統合するため、ライフサイクルを50年とした場合の、年間訪問者数をパラメタとした Triple I を求めた。その結果を Fig. 10 に示す。この図を見ると、年間訪問者数が3万5千人を超えると Triple I の値が負となり、統合評価として持続可能であると判断される。なお、Fig. 7 よりライフサイクルが50年の場合の $EF-BC$ はおよそ -1.5 gha であることから、今回の評価では、Triple I の値は経済指標項に大きく依存することがわかる。この理由として、神戸空港人工海浜は比較的規模が小さく、建設コストや旅行費用を基準とした経済価値が環境指標項の値に対して相対的に大きくなることが考えられる。

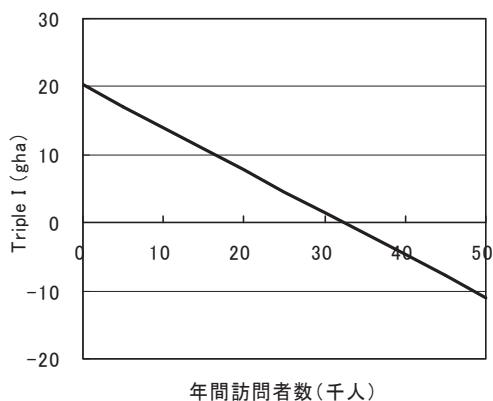


Fig. 10 Estimated Triple I related to annual visitor number when life cycle is 50 years.

6. 結 言

神戸空港人工海浜を対象として、環境面および社会面の持続可能性評価、ならびにそれらの統合評価を行った結果、以下の結論を得た。

- ・ 養浜工事に伴う CO_2 排出量については、工事中の機械

運用による燃料消費の割合が大きい。ただし、埋立に伴う CO_2 排出量はそれよりはるかに大きく、特に大量の土砂の使用が大幅な CO_2 排出量増加をまねく。

- ・ 人工海浜造成直後は海藻と付着動物の生産量が大きい。また高次の動物バイオマスの多い生態系を作り出すことで、効果的に Biocapacity を増やすことができる。
- ・ ライフサイクルが9年以上であれば、人工海浜造成による環境負荷よりも創出される生態系の生産効果が上回る。ただし埋立を考慮すると環境負荷のほうがはるかに大きくなる。
- ・ 人工海浜の造成にかかる建設コストに匹敵する経済価値があると見なすためには、ライフサイクルを50年とした場合で年間約3万5千人の訪問者が必要となる。
- ・ 神戸空港人工海浜のように比較的規模が小さい施設に対して Triple I による評価の統合を行った場合、建設コストや旅行費用を基準とした経済価値が環境指標項の値に対して相対的に大きくなる。

参 考 文 献

- 1) 中谷直樹、大塚耕司、奥野武俊：生態系モデルを用いた環境修復技術の機能評価ーりんくう公園内海の事例ー、土木学会論文集、No.755/□-30、2004、pp.12-28.
- 2) 水産庁：沿岸漁場整備開発事業費用対効果分析の手引き、2000.
- 3) 国土交通省国土技術政策総合研究所：外部経済評価の解説、2004.
- 4) M. Wackernagel, C. Monfreda, D. Moran, S. Goldfinger, D. Deumling and M. Murray : National Footprint and Biocapacity Accounts 2004: The underlying calculation method, *Report of Global Footprint Network*, Oakland, 2004.
- 5) 中西準子：環境リスク論、岩波書店、1995.
- 6) 大塚耕司：海洋の大規模利用に対する包括的環境影響評価指標の一提案、*Proc. Techno-Ocean 2006 / 19th Ocean Eng. Symp.* (CD-ROM)、2006.
- 7) WWF : *Living Planet Report 2006*, WWF International, 2006.
- 8) IMF : *World Economic Outlook Database*, <http://www.imf.org>.
- 9) 中嶋芳紀、河野幸次、松本亨、井村秀文：港湾整備事業のライフサイクルアセスメントに関する研究：福岡市アイランドシティのケーススタディ、土木学会論文集 No. 566/VII-3、1997、PP.35-47.
- 10) 国立環境研究所地球環境センター：産業連関表による環

境負荷原単位データブック、1995.

- 11) 澤田高侑:環境修復技術の包括的環境影響評価－神戸空港人工海浜の事例－、大阪府立大学大学院工学研究科平成19年度修士論文、2004.
 - 12) K. Otsuka, K. Tanaka and C. Li : Investigation of Sessile Organisms on a Box-Type Structure of Iron Slag Concrete, *Proc. of Oceans'08 / Techno-Ocean'08 Int. Conf.* (CD-Rom), 2008.
 - 13) J. Ryther : Photosynthesis and Fish Production in the Sea, *Science*, Vol.166, 1969, pp.72-76.
-

