

クウェート湾に創出した干潟の順応的管理と水質浄化力の評価

Adaptive Management and Evaluation of Water Purification Function on the Constructed Tidal Flat in Kuwait Bay

三島京子¹・長坂洋光²・原田洋一¹・小笠原公洋³・

柴垣太郎²・光本育郎¹・吉田和広⁴・佐久間襄⁵

Kyoko MISHIMA, Hiromitsu NAGASAKA, Yoichi HARADA, Koyo OGASAWARA,
Taro SHIBAGAKI, Ikuro MITSUMOTO, Kazuhiro YOSHIDA and Noboru SAKUMA

A lagoon type tidal flat was constructed at the coast of Kuwait Bay to verify its water purification function, since tidal flats in Kuwait Bay seem to play important role on water quality improvement in the bay. Although recruitment of tidal flat organisms was expected to bring water purification function to the constructed tidal flat, unforeseen sludge accumulation degraded their habitat condition. To solve the issue, original design of the tidal flat elevation was modified based on the causal analysis. As a consequence, habitat condition was improved and the effectiveness of adaptive management process was proved. The observed water purification capacity of the constructed tidal flat was maximally corresponded to a waste water facility with a capacity of about 2,000 people, although continuous monitoring survey was required.

1. はじめに

アラビア海奥部に位置するクウェート湾(図-1)は、750 km²の水域面積の約3割にあたる206 km²が干潟となっており、水質浄化をはじめとする様々な干潟の機能が湾内の海洋環境保全に重要な役割を果たしていると考えられる。しかし、クウェート国では近年人口増加や都市の拡大、インフラ整備が急進しており(Ministry of Planning State of Kuwait, 2007; Ministry of Public Works State of Kuwait, 2007)、沿岸域では未処理の下水等の排水が前面の干潟の劣化要因になっているとともに、埋立て等による干潟の消失も懸念される。

こうしたクウェート湾の環境悪化を象徴する出来事として、近年赤潮や魚類の大量斃死が発生し、クウェート国環境庁を中心に海洋環境改善への取り組みが行われている。このような中、2002年に平沼経済産業大臣(当時)は、「日本-クウェート環境・技術移転協力イニシアチブ」(平沼イニシアチブ)を提案し、これに基づいて日本がクウェート湾の環境浄化などの協力事業を実施することとなった。

本稿では、当事業の一環としてクウェート湾岸の埋立地で行った人工干潟(実験干潟)(写真-1)の創出実験

について報告する。この実験干潟は、干潟がもつ水質浄化力の有効性を実証するとともに、今後も開発が進むクウェート湾の干潟を適切に保全するための普及・啓発拠点とすることを目的としている。

干潟創出等の自然再生においては、近年日本国内では自然の不確実性をふまえ、施工後に手直しを行うことをあらかじめシステムに組み込む「順応的管理」が注目されている(古川ら, 2005; 中村ら, 2006; 海の自然再生ワーキンググループ, 2003, 2007)。しかし、人工干潟でそれを実践した例は少なく(中村ら, 2006)、特に、施工後の手直しが当初設定した目標の達成に有効に働いたという報告例は乏しい。本実験では水質浄化という目標のもとに計画・設計を行い、施工後の手直しを経て当初目標に対する一定の成果を得たことから、その過程を報告する。

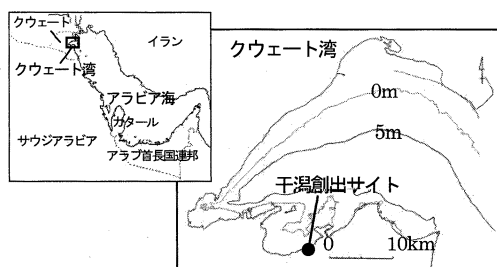


図-1 クウェート湾の地形と実験干潟の創出サイト

- | | |
|---------|--------------------------|
| 1 | いであ株式会社 (現:株式会社 Ides) |
| 2 | いであ株式会社 |
| 3 正 会 員 | 工博 いであ株式会社 |
| 4 | 農修 いであ株式会社 |
| 5 | 工修 いであ株式会社 (現:株式会社 Ides) |

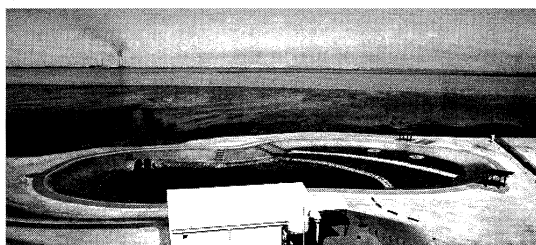


写真-1 実験干潟の全景

2. 実験干潟の計画・設計の考え方

(1) 目標設定と基本方針

本実験干潟の主な目的の一つは、干潟の水質浄化力を立証することにある。水質浄化力は、底生生物をはじめとする様々な生物の活動によってもたらされることから、実験干潟の目標としては、出入りする水の水質から浄化量が定量的に確認できることのほか、水質浄化の担い手となる生物が既存干潟と同等に定着することとした。また、実験サイトはクウェート湾岸の埋立地であり、前面には自然の干潟が広がっている。そのため、計画・設計においては既存干潟を極力改変しないことを基本方針とした。

(2) 干潟形状と導水方法

既存干潟の改変を最小化する観点から、干潟は陸域の掘削により創出可能なラグーン形状を採用した(干潟面積1,740m²)(図-2)。ラグーン形状の干潟では、出入りする水の水質が観測しやすいため、水質浄化力の把握に適していることも利点として考えられた。

ラグーンへの海水の出入りは、直径140cmの2本の導水パイプで確保することとした。海水は導水パイプをとおり、上げ潮、下げ潮に伴ってラグーンに出入りする。1日2回の海水の出入りを平均的に確保するため、導水パイプの先の既存干潟に最小限の掘削を行った。さらに、海水だけでなく、陸域からの排水に対する浄化力についても実証実験ができるよう、隣接する既存の排水口からポンプで排水をくみ上げ、ラグーンへ導水できるようにした。

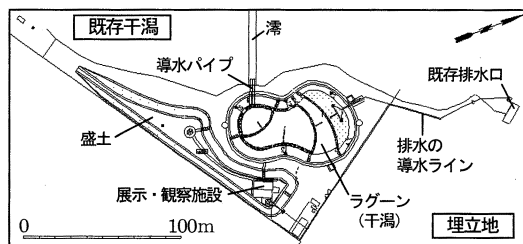


図-2 実験干潟の平面図

(3) 干潟の断面形状

干潟の底生生物は、一般に地盤高に応じて帯状に分布する。そこで、限られた面積の中でできる限り多様な生物の定着を実現するとともに、地盤高の違いによる生物定着の違いを検証し、最適な地盤高を明らかにするため、干潟の底面を4段の階段状の構造とした(図-3)。また、最上段には主に排水に対する浄化力の強化を期待して、ヨシの移植を行った。ラグーン内では導水パイプの高さが最干潮位となる。そこで、各段の地盤高の設定にあたっては、導水パイプの高さ(+2.5m)を基準とし、常時冠水する高さ(+2.3m)、干潮時にもわずかに水が残る高さ(+2.5m)、完全に干出す高さ(+2.9m)を設けた(表-1)。

(4) 干潟の底質

クウェート湾の干潟の大部分は緩勾配の泥質干潟であり、サイト周辺の干潟も泥質である(粒径0.063mm未満のシルト・粘土分90%以上)。実験干潟の底泥には、前面の干潟における掘削で生じた泥を活用し、掘削土砂の域外への移動を避けるとともに、干潟生物の早期定着を期待した。

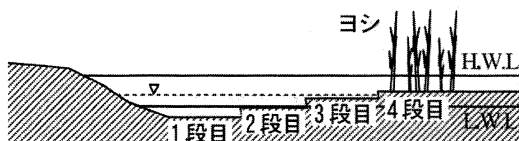


図-3 実験干潟の断面模式図

表-1 各地盤高の設計値と特徴

段	地盤高	特徴
1段目	+2.3m	導水パイプの高さより低く、常に水深20cm以上が確保される地盤高。(ラグーン内の生物には、干潮時の乾燥を避けるため、常時冠水している場所も必要と考えた。)
2段目	+2.5m	導水パイプの高さと同じレベルであり、干潮時には干潟表面にわずかに水が残る地盤高。
3段目	+2.9m	干潮時に完全に干出す地盤高。
4段目	+3.4m	ヨシが生育可能な地盤高。

地盤高は海図基準。導水パイプの地盤高は+2.5m。

3. 施工後の設計見直しと改修(順応的管理)

(1) 施工後に生じた課題

実験干潟の基本形状は2006年10月に概成し、施設全体の工事は同11月に終了した。生物の定着及び水質浄化の検証を目的とするモニタリングは、2006年10月に初回調査、同11月に2回目調査を行って、工事終了直後の状態を把握した。しかしその後、2007年1月に干潟に浮泥が著しく堆積し、生息環境が悪化している状況が確認された(写真-2)。浮泥は硫化素臭を放つヘドロ状のもので、堆積厚は最大20cm近くに達していた。

本実験サイトはクウェート湾岸のなかでも特に開発が

進んだ都市部のはずれに位置し、近傍には排水口があって未処理の下水等が流入している。ラグーンに堆積した浮泥は、排水によってもたらされた物質が海水とともにラグーンの外側から流入し、堆積したと考えられた。

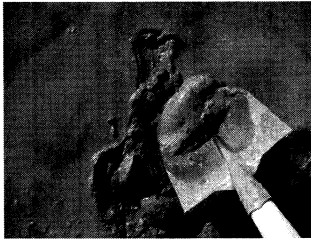


写真-2 実験干潟における浮泥の堆積状況（2007年1月）

(2) 課題の分析

ラグーン内の状況を観察したところ、浮泥の堆積は1段目と2段目に集中しており、地盤が低い場所ほど多く堆積している状況がみられた。浮泥は上げ潮によってラグーン内に流入し、下げ潮時の流れと地盤高のバランスでラグーン内に蓄積されると考えられたことから、地盤高と浮泥堆積厚の関係について詳細なデータを得るため、1段目と2段目を対象に、底面の地盤高とその上に堆積した浮泥厚を2m 格子間隔で測定した。その結果、導水パイプの高さ（+2.5m）より低く、常時冠水する高さに設計した1段目では、底面の地盤高に係わらず全般に堆積厚が厚かった。また、導水パイプと同じ高さに設計した2段目では、施工上、設計値を挟み±10cmの範囲で地盤が高い場所と低い場所ができており、そのうち地盤が高い場所ほど浮泥の堆積は少なかった（図-4）。特に、導水パイプより5cm以上高く、干潮時に完全に排水される地盤高の場所では、浮泥はほとんど堆積していなかった。このことから、浮泥の堆積を防ぐには、地盤高は導水パイプよりも高く、干潮時に完全に排水される高さであることが重要との結論を得た。

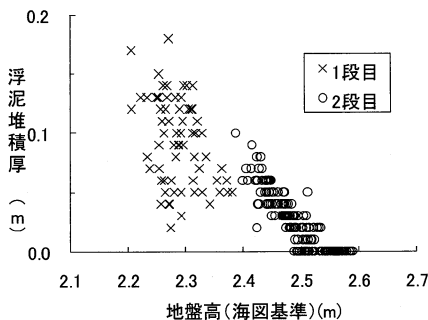


図-4 地盤高と浮泥堆積厚の関係

(3) 設計の見直しと改修

上記の分析に基づき、浮泥の堆積を防ぐとともに生物定着に適した条件を確保するため、1段目と2段目の地盤

高の設計を見直し、高上げ改修工事を行うこととした。

新しい地盤高の設計値は、導水パイプの高さ（+2.5m）より10cm高い+2.6m以上とし（表-2）、さらに、底泥表面の水がいわゆる排水されやすい勾配をつけるとともに、干潟表面に小規模な滞筋を造成することとした（図-5）。

改修工事は最初の竣工から3カ月後の2007年2月に実施し、前面の干潟の泥を追加投入した。また、今後のモニタリングにおいて浮泥の堆積厚を監視しやすくするため、干潟の数か所に目盛り付き杭を設置した。

改修前後の干潟の状況は写真-3のとおりであり、改修前は干潮時にも干潟の広い範囲に水が残っていたのに対し、改修後は全体が干出するようになり、景観的にも変化した。

(4) 改修後の状況

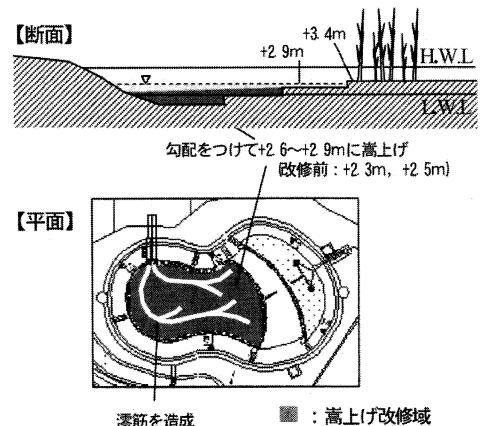
2007年2月に改修工事を行った後、5月、8月にモニタリング調査を行った。

設置した目盛り付き杭で観測された地盤高の変化をみると（図-6）、1段目の導水パイプ周辺などでやや堆積傾向にあることを示していたが、当初のようなヘドロ状の浮泥の極端な堆積は確認されていない。また、5月の調査時には、干潟全体で100個体をこえるトビハゼの定着が確認され、設計値の見直しと改修が適切であったことを裏付けた。

表-2 地盤高の当初設計値と改修値

段	当初設計値	改修値
1 段目	+2.3m	+2.6m～+2.9m
2 段目	+2.5m	(勾配つき)
3 段目	+2.9m	+2.9m (改修なし)
4 段目	+3.4m	+3.4m (改修なし)

地盤高は海図基準。導水パイプの地盤高は+2.5m。



滞筋を造成 ■：高上げ改修域

図-5 実験干潟の改修模式図

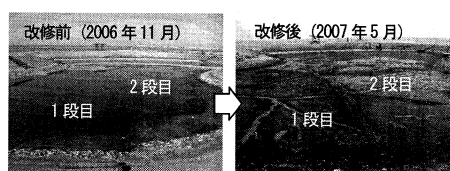


写真-3 改修前後の実験干潟

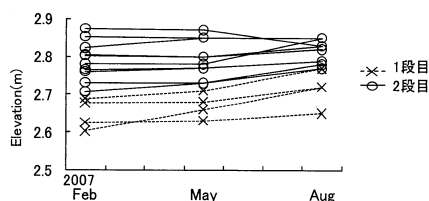


図-6 目盛り付き杭で観測した改修後の地盤高の変化

4. 水質浄化力の評価

(1) 方法

水質のモニタリングは、干潟形状概成後の2006年10月7日、竣工直後の2006年11月20~21日、改修工事後の2007年5月20日と2007年8月27日の計4回実施した。このうち2006年11月は、昼間の満潮位が低く、ラグーンにほとんど海水が流入しなかったため、夜間に調査を行った。

調査では、上げ潮によるラグーンへの海水流入が始まってから下げ潮による流出が終わるまでの最大5時間半の間、30分から2時間間隔で採水し、栄養塩、懸濁物質等の濃度を分析した。採水層は、10月、11月調査時には中層(1/2水深)とし、5月、8月調査時には、採水地点の水深が50cmを超えた場合は上層と下層の2層から採水してそれぞれ試料とした。また、電磁流速計を用いて10分から30分間隔で流速を測定し、導水パイプの通水面積を乗じて流量を算定するとともに、水質分析で得られた物質濃度を乗じ、一潮汐間の流入・流出物質量を算出した。

(2) 結果

各調査におけるラグーン内の最大水位(満潮位)は図-7のとおりであり、10月、11月、8月調査時には水位は干潟の4段目の高さには達せず、3段目までが冠水した。これに対し、5月調査時には満潮位が高く、4段目までが冠水し、ラグーンに最も多くの水量が流入した。

流入水と流出水の水質分析結果のうち、窒素の例を図-8に示す。夜間に調査した11月を除き、全体に流入水より流出水の方が低濃度になっていることがわかる。

物質濃度に流量を乗じて一潮汐間に流入・流出した物質量を算定すると(図-9)、11月を除いて流出量は流入量を下回り、ラグーン内で海水中的物質が除去すなわち浄化されたことを示した。浄化量(流入量-流出量)は流入水量が多かった5月に最大であり、単位面積あたり

に換算すると、11月を除き窒素では $1.05 \sim 4.71 \text{ g/m}^2$ 、リンでは $0.32 \sim 1.12 \text{ g/m}^2$ と算定された(表-3)。

5月に観測された一潮汐における干潟全体での最大浄化量 8.2 kg を一日あたりの最大浄化量とみなし、下水処理場(標準活性汚泥)の浄化力と比較した。その結果、実験干潟の浄化力は、最大2,258人規模の下水処理場に相当するとの結果が得られた(一人あたりの日窒素排出量を 11 g とし、その30%を除去する場合の下水処理場の窒素除去量と比較)。

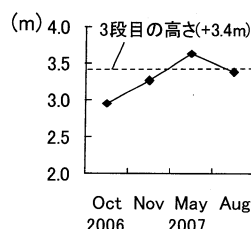


図-7 調査時のラグーン内の最高水位(海図基準)

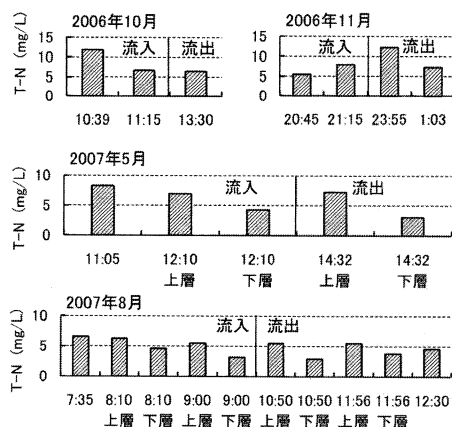


図-8 流入・流出水の水質(窒素)

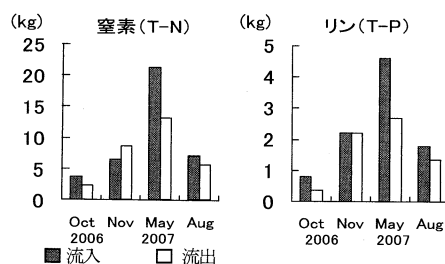


図-9 一潮汐での流入・流出物質量

表-3 実験干潟の一潮汐間の水質浄化量

調査時期	浄化量 (g/m^2)	
	全窒素	全リン
2006年10月(昼間)	1.05	0.32
2006年11月(夜間)	-1.54	0.01
2007年5月(昼間)	4.71	1.12
2007年8月(昼間)	1.05	0.32

(3) 浄化量観測結果の考察

4回の調査のうち、11月を除く3回の調査では浄化量（流入量－流出量）はプラスの値であり、干潟が窒素やリンに対しシンクとなっていることを示した。一方、11月の浄化量は窒素でマイナス、リンで0に近い値であり、これは夜間調査のため、底生藻類による栄養塩吸収が起らなかったためと考えられる。

5月に浄化量が大きかった理由としては、流入水量が多かったことのほか、底泥中のクロロフィル-a（図-10）に示される底生藻類の現存量が多かったことから、藻類による栄養塩吸収が活発に行われた可能性が考えられる。

日本国内のラグーン状の干潟で浄化量（窒素）を観測したこれまでの例としては、大阪南港野鳥園北池で58～263 mg/m²/day（3,7,10,12月）（矢持ら,2005）、独立行政法人港湾空港技術研究所の干潟実験施設で-7.1 mg/m²/day（6月夜間）、115.3 mg/m²/day（7月昼間）（細川ら,1996）などがあり、東京港野鳥公園では2潮汐におけるNH₄-NとPO₄-Pの収支を観測した結果、流出の方が多く浄化量はマイナスになったことが報告されている（秦野ら,2007）。本調査で観測された窒素浄化量1,050～4,710 mg/m²は昼間の一潮汐での収支であるため一概に比較はできないものの、これらに比べて非常に大きな値であり、実験干潟の水質浄化力は、造成後の初期段階の評価として高いものであることが確認された。これは、当地の高い藻類生産力に起因するほか、沿岸に排水されている下水等の影響で、流入水の濃度が日本の例よりも高いことが関係していると考えられる。また、干潟が造成されて間もないため、底泥中に物質が吸収、蓄積されやすくなっている可能性も考えられる。本調査期間は干潟造成後1年未満と短期であったため、今後はクウェート国側が調査を継続し、浄化量や生物の変化を確認するとともに、長期的な評価を行っていくことが望まれる。

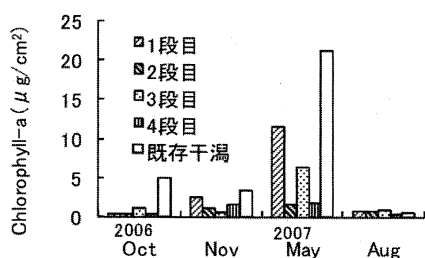


図-10 底泥中のクロロフィル-a

5. まとめ

中村ら（2006）は、干潟造成における順応的管理のプロセスを①目標設定と設計・施工、②モニタリング・結果の評価、③問題点の検討、④フィードバックの4つに分けて整理している。本研究での実施内容をこのプロセ

スに照らしてみると、目標としては干潟の水質浄化量が定量的に確認されること、及び浄化を担う生物が定着することを掲げ、生物定着の多様化を期待して4つの異なる地盤高をもつ干潟を設計、施工した（①）。次に、施工後のモニタリングを行い、そのなかで浮泥の予想外の堆積を確認し、そのままでは目標の一つである生物の定着が達成困難と判断した（②）。そこで問題点を検討したところ、地盤高の設計次第で問題解決できる可能性が明らかになり（③）、地盤高の設計見直しというフィードバックにより改修工事を行った（④）。その結果、トビハゼに代表される生物が既存干潟と同等に定着するとともに、高い水質浄化力が定量的に確認され、当初の目標は達成されたといえる。また、改修工事の際に目盛り付き杭を設置し、浮泥の堆積を簡易に観測できるようにした点も、順応的管理におけるモニタリングと評価のプロセスを効果的に行うための有用な工夫であった。

前述のように、本調査期間は干潟造成後1年未満と短期であり、長期的な評価にはモニタリングの継続を必要とする。しかしながら、日本国内でも順応的管理の実践例がまだ少ない中、フィードバックとその評価に至るまでのプロセスの実践によって当初の目標を達成できた点は貴重であり、自然再生における順応的管理の重要性を裏付ける事例になったと考える。

謝辞：本研究は、独立行政法人日本貿易振興機構からの委託業務で実施した。また、干潟の実施設計と施工は、共同受注した五洋建設株式会社にご担当いただいた。関係諸氏に深謝する。

参 考 文 献

- 海の自然再生ワーキンググループ（2003）：海の自然再生ハンドブック－その計画・技術・実践－第1巻総論編，国土交通省港湾局監修，ぎょうせい，107 p.
- 海の自然再生ワーキンググループ（2007）：順応的管理による海辺の自然再生，国土交通省港湾局監修，294 p.
- 中村由行・村上晴通・細川真也（2006）：尼崎港に造成された人工干潟における順応的管理手法の適用性に関する研究，港湾空港技術研究所資料，No.1127，32p.
- 秦野拓見・村上和男・中瀬浩太・金山進・葉山政治（2007）：人工潟湖干潟が水質変化に及ぼす影響，海洋開発論文集，第23巻，pp.745-750.
- 古川恵太・小島治幸・加藤史訓（2005）：海洋環境施策における順応的管理の考え方，海洋開発論文集，第21巻，pp.67-72.
- 細川恭史・桑江朝比呂・三好英一・室善一郎・木部英治（1996）：干潟実験施設を用いた物質収支観測，港湾技研資料，No.832，22p.
- 矢持進・柳川竜一・平井研・藤原俊介（2005）：生態系の変動を考慮した順応的管理－物質収支からみて－，海洋開発論文集，第21巻，pp.77-82.
- Ministry of Planning Statistics and Census Sector, State of Kuwait（2007）：Annual Statistical Abstract 2006, 525p.
- Ministry of Public Works, State of Kuwait（2007）：1st Conference on Public Works.