

洞海湾の水質環境改善策と予測シミュレーション

Strategy of Improvement of Water Quality Environment in Dokai Bay and Its Prediction Simulation

小松利光*・朝位孝二**・岡田豊昭***・桃野武幸***・
井戸垣敏****・永野雅巳****・矢野真一郎*****・
劉容伶*****・安達貴浩*****

By Toshimitsu KOMATSU, Koji ASAI, Toyoaki OKADA,
Takeyuki MOMONO, Satoshi IDOGAKI, Masami
NAGANO, Shinichiro YANO, Jungling LIU and
Takahiro ADACHI

A commercial or industrial large city often develops at the hinterland of a deep bay owing to its high defensibility against stormy sea. However, the exchange rate of sea-water between the inside and the outside of the bay is very low, so that the water is much polluted by industrial and domestic waste water in many cases. The Dokai Bay has also the same social problem. In order to solve the problem we propose an idea of improvement of water quality in this paper, which is that clean sea water of Hibiki open sea is introduced into Dokai Bay. Various conditions for water purifications have been attempted by using the diffusion simulations of COD. It has been clear that introduction of clean sea water (3 m³/sec.) into the innerpart of Dokai Bay is very effective for purification.

Keywords: Improvement of water quality, 1-D diffusion simulation,
COD, Tidal current

1. はじめに

湾口が狭く奥深い閉鎖性内湾はその高い防波能力のため、その背後に大規模な商工業都市が発達することが多い。しかしながら、それらの湾においては元々内湾と外海の間の海水交換率が非常に低いのに加え、湾の自浄能力をはるかに越える工場排水や家庭雑排水の流入のため、湾内の水質は著しく低下していることが多い。北九州市という大都市を背後にもつ洞海湾もまた同様な問題を抱えた閉鎖性内湾である。main部の長さは12.5km、平均幅550mの細長い湾で両sideにいくつかの入江を擁している。工業都市北九州市を支える産業港湾としての機能を持ち、一時は産業排水などの公害により”死の海”と化していた。高度成長期時代の痛手からかなり回復した昨今の洞海湾であるが、今後の生態系の保全や真に市民に親しまれるウォーターフロントの開発のために、内湾水の水質を効率よく改善するための技術開発が強く望まれている。著者ら産・学の研究グループは浄化方法の一つとして、図-1に示すように、比較的きれいな響灘の海水を洞海湾最奥部に5kmにわたってトンネル導水し、海水交換を強制的に促進させる方法を提案している。本論文は本研究

-
- | | | | | |
|-------|-----|-------|---------------------------|-----------|
| * | 正会員 | 工博 | 九州大学教授 | 工学部水工土木学科 |
| ** | 正会員 | 工修 | 九州大学助手 | 工学部水工土木学科 |
| **** | 学生員 | 工修 | 九州大学大学院工学研究科博士後期課程水工土木学専攻 | |
| ***** | 学生員 | | 九州大学大学院工学研究科修士課程水工土木学専攻 | |
| | | (〒812 | 福岡市東区箱崎6-10-1) | |
| *** | 正会員 | | (株)奥村組 九州支店 土木部土木設計課 | |
| | | (〒805 | 北九州市八幡東区山王2-19-1) | |
| **** | 正会員 | | 新日本製鐵株式会社 九州支店 水道・土木工事室 | |
| | | (〒812 | 福岡市博多区博多駅前3-2-1) | |

グループの提案する浄化のための具体案を示し、水質シミュレーションにより質的・量的検討を行うとともに、水質環境の改善により初めて可能となる湾奥部の親水空間としての開発を提案するものである。

2. 潮流計算

2. 1 1次元漸変流方程式による潮流計算

図-1に示すように、洞海湾は非常に長細い湾であるので1次元問題として解析を行う。基礎式は次に示す連続の式と1次元漸変流方程式である。

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{2Q}{A} \frac{\partial Q}{\partial x} - \left(\frac{Q}{A} \right)^2 \frac{\partial A}{\partial x} + gA \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{A}{B} - H \right) + gA \frac{n^2 |Q| Q}{R^{4/3} A^2} = 0 \quad (2)$$

ここで、Aは断面積、Qは流量、Hは時間平均水深、Bは海面幅、Rは径深、nはマンニングの粗度係数、qは単位長さ当たりの淡水流入量である。

図-2に示すような1次元格子に分割し、先ずmain部のみを対象として潮流計算を行った。計算条件は表-1に示すとおりである。湾奥に近いx=10、20の点および湾口に近いx=45の点における潮位変動の時間系列の計算結果を図-3に示す。潮位変動に関しては湾全域にわたって位相と潮位の変化にほとんど差が認められないことが分かる。このことから、簡単のため近似的に全地点で潮位変動が同じであると仮定し、連続の式だけを用いてsubの入江の部分も含めた潮流及び恒流の流速を求めることにする。

2. 2 恒流と最大潮流流速の計算

(a) 洞海湾の恒流流速

定常状態の連続の式をxに関してx=x₁からx=x_iまで積分し整理すると次式が得られる。

$$U(x_i) = \frac{1}{B_i H_i} \left\{ Q_{x_1} + \int_{x_1}^{x_i} q(x) dx \right\} \quad (3)$$

ここでU(x_i)はx_i断面における恒流流速、B_iおよびH_iはそれぞれx_i断面における海面幅、平均水深であり、Q_{x₁}はx₁断面を通過する平均流量である。(3)式を用いて各断面の恒流流速を求めた。

(b) 洞海湾の最大潮流流速

後述するように分散係数の推定には最大潮流流速が必要である。連続の式から最大潮流流速を以下の方法にしたがって求める。

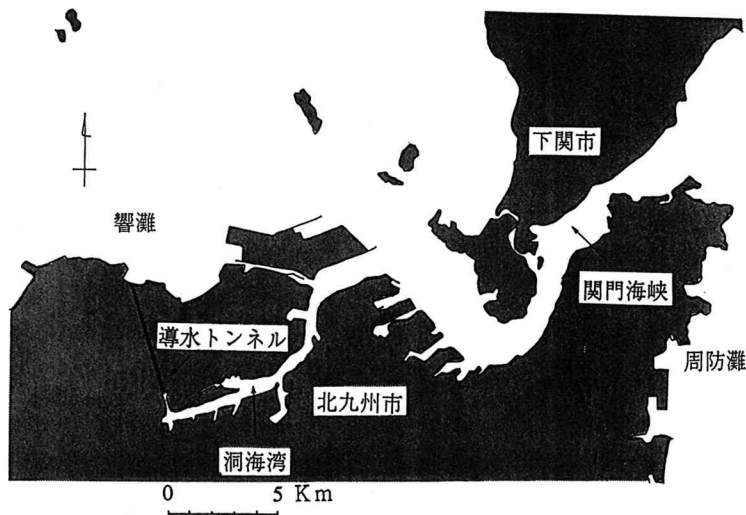


図-1 洞海湾の水質改善計画案

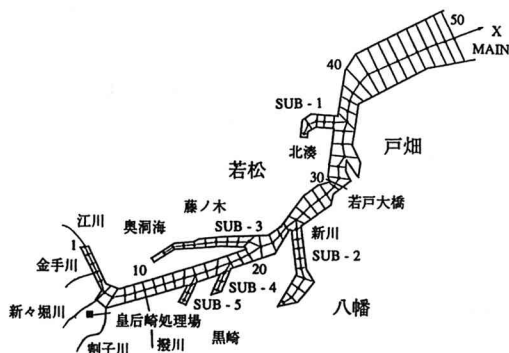


図-2 計算座標

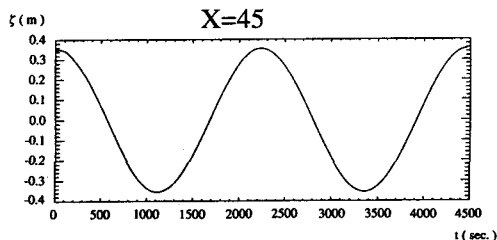
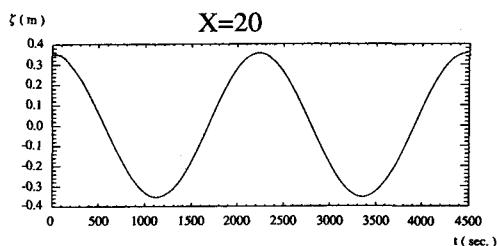
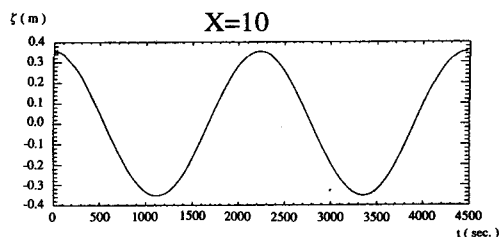


表-1 計算条件

(1) 潮流計算	
計算格子間隔	$\Delta x = 250.0(\text{m})$
時間格子間隔	$\Delta t = 10.0(\text{sec.})$
境界条件 (湾口)	$\zeta = 0.35 \cos(2\pi t/T)(\text{m})$
周期	$T = 12\text{hr.}25\text{min.}$
(湾奥)	$Q = 0.0(\text{m}^3/\text{sec.})$
(2) 水質予測シミュレーション	
時間格子間隔	$\Delta t = 5.0(\text{min.})$
境界条件 (湾口)	$C = 1.3(\text{mg/l})$
(湾奥)	COD濃度 Flux=0

図-3 潮流計算より得られた潮位変動

(1) 式を x に関して $x = x_1$ から $x = x_i$ まで積分し、更に時間に関して $t - \Delta t/2$ から $t + \Delta t/2$ まで積分して整理すると次式が得られる。

$$\int_{t-\Delta t/2}^{t+\Delta t/2} \left[\int_{x_1}^{x_i} A dx \right] dt + \int_{t-\Delta t/2}^{t+\Delta t/2} [Q_{x_i} - Q_{x_1}] dt = \int_{t-\Delta t/2}^{t+\Delta t/2} \int_{x_1}^{x_i} q dx dt \quad (4)$$

湾奥での通過流量 Q_{x_1} は 0 であり、また Δt 間の淡水供給量は湾内の潮流量に比べて非常に小さいので右辺の項を無視すると (4) 式は簡略化され次のようになる。

$$U(x_i) = \frac{Q_{x_i}}{B_i H_i} = - \frac{1}{B_i H_i} \frac{\left[\int_{x_1}^{x_i} A dx \right]_{t+\Delta t/2} - \left[\int_{x_1}^{x_i} A dx \right]_{t-\Delta t/2}}{\Delta t} = - \frac{1}{B_i H_i} \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (5)$$

ここで $U(x_i)$ は x_i 断面における潮流流速である。 ΔV は Δt 間に $x_1 \sim x_i$ 区間に溜まる体積を表している。 Δt の間に潮位が $\Delta \zeta$ だけ上昇したとすれば ΔV は $\Delta \zeta \int_{x_1}^{x_i} B dx$ で表される。最大潮流流速 U_m は下げ潮最盛期 (および上げ潮最盛期) に生じると考えられるので、下げ潮最盛時を中心に前後 0.5 秒の潮位変動 $\Delta \zeta (= -8.59 \times 10^{-7} \text{m})$ 、および $\Delta t (= 1 \text{sec})$ を用いて各点の U_m を計算した。

3. 水質予測シミュレーション

3.1 基礎式と移流分散係数の評価

次の 1 次元移流分散方程式を用いて水質予測シミュレーションを行う。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left(A D_L \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{q'}{A} - \frac{Cq}{A} \quad (6)$$

ここで C は拡散物質の濃度、 U は恒流流速、 D_L は潮流による分散効果を含んだ移流分散係数、 q' は単位長さ当たりの負荷量である。

信頼性の高い予測を行うためには移流分散係数を精度よく推定する必要がある。小松ら¹⁾は内湾における 1 次元の移流分散係数は場所毎の代表長さ $\times$ 代表流速の積に比例するものとして、代表長さとして湾の幅もしくは tidal excursion の内いずれか小さい方を、代表流速として潮流最大流速を採用することを提案している。洞海湾の場合は、ほとんどの断面において tidal excursion よりも湾の幅の方が小さいので代表長さ $\times$ 湾の幅を用いて場所毎の移流分散係数を次式のように表す。

$$D_L(x_i) = \beta U_m(x_i) B(x_i) \quad (7)$$

ここで β は洞海湾固有の比例定数である。簡単のためCODを近似的に保存物質として取り扱うことにし、水質シミュレーションより求めた現況のCOD分布の計算結果を実測値にfittingさせることにより比例定数 β の値を決定した。水質シミュレーションの計算条件も表-1に併せて示している。計算結果を図-4に示す。図中の○印が実測値(平成元年度調査)であり、 $\beta = 0.4$ でほぼ現況を再現しているものと思われる。

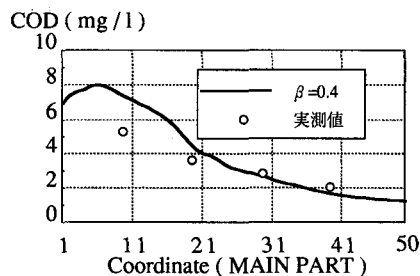


図-4 現況のCOD分布の再現

3. 2 浄化予測

導入水の流量と放出位置を種々変えて水質改善の予測シミュレーションを行い、最適な流量及び放出位置の決定を行った。導入水のCOD濃度は外海水と同じなので 1.0mg/l とし、流量は $1\text{m}^3/\text{sec}$ 、 $3\text{m}^3/\text{sec}$ 、 $5\text{m}^3/\text{sec}$ の3通り、放出位置は $x=1$ 、 4 、 7 の3カ所を考えた。図-5に計算結果を示す。導入水の流量が多くなればなるほど水質改善が促進されるのは当然であるが、流量の増大に伴うコストの増加や湾内の底質の巻き上げなどへの影響を考慮し、またCODの最大濃度を半減させることを一応の目安と考えて、 $x=1$ の点から $3\text{m}^3/\text{sec}$ の流量を放出するのが最も適当であると判断した。

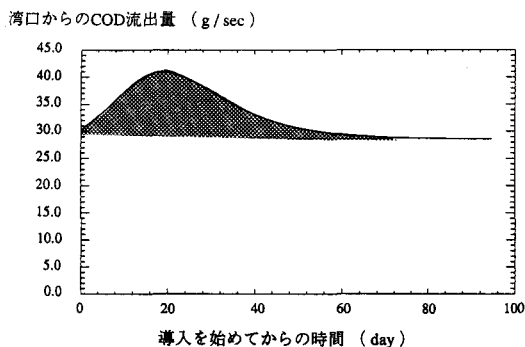
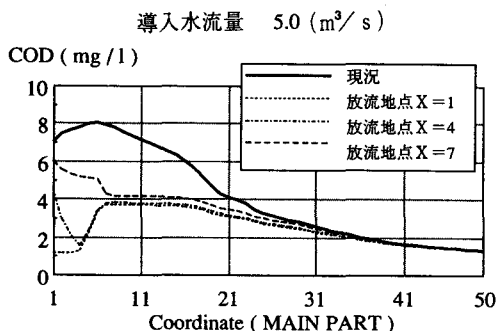
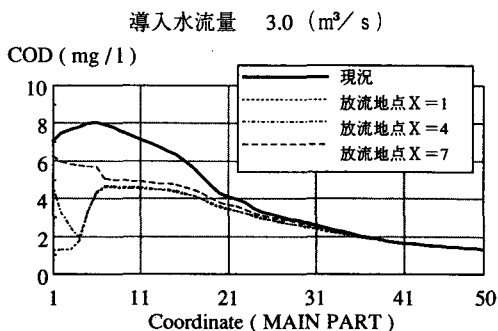
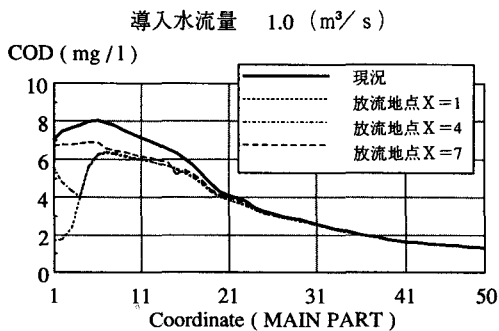


図-5 水質改善シミュレーション

図-6 外海へのCOD流出量

3. 3 外海への影響

浄化を開始して定常になるまでの時間とその間に湾口から外海へ流出するCOD量を計算した。図-6は湾口から外海へ流出するCOD量の経時変化を示しているが、およそ2カ月で定常状態に達することが分かる。図-6中のハッチで囲んだ部分がこの間に流出する過剰COD量であり、その量は $3.363 \times 10^7\text{g}$ である。現在1日に外海に流出するCOD量は $0.247 \times 10^7\text{g}$ であるので、現在のCOD流出量の約1.4日分が2カ月かかって上乘せされた形で湾外へ出ていくことになる。しかし、これは一時的なものであるので外海への影響は小さいものと思

われる。

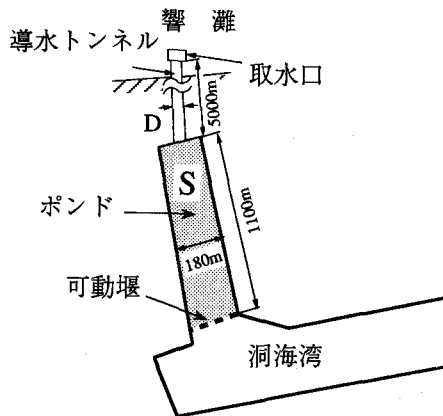


図-7 導水ポンドの概略図

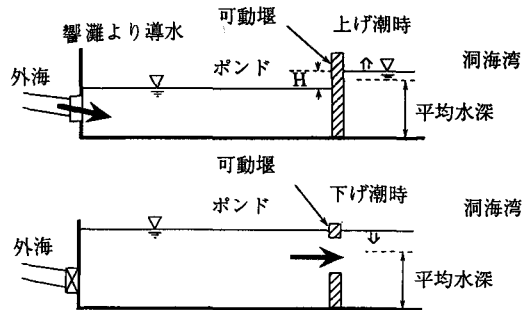


図-8 干満を利用した導水

4. 外海水の導入方法

4. 1 潮の干満を利用した導入方法

洞海湾の浄化のためには嚮灘から $3\text{m}^3/\text{sec}$ の外海水を導入する必要があることが分かった。できるだけ自然エネルギーを使って外海水を導入するために、潮の干満を利用したポンド方式を検討した。図-7に示すように、洞海湾の奥部の一部を導水ポンドとして利用するために可動堰を設ける。図-8に示すようにバルブ及び可動堰の操作により、上げ潮時には嚮灘よりポンドへ導水し、下げ潮時にはポンドから洞海湾へ流出させる。導水トンネルの径を決定するために、嚮灘（洞海湾）とポンド内の水位変動のシミュレーションを行い、可能な外海水の導入流量を求めた。可動堰が閉じている時間帯のポンドの水位は次式の連続の式によって規定される。

$$\frac{dH}{dt} = \frac{q}{S}, \quad q = Av = \frac{\pi D^2}{4} \sqrt{\frac{2gD\Delta H}{fL}}, \quad f = \frac{124.5n^2}{D^{1/3}} \quad (8)$$

H は洞海湾の平均水位を基準としたポンド内の水位、 q は嚮灘からの導水量、 S はポンドの面積、 v は導水トンネル内における流速、 A は導水トンネルの断面積、 D は導水トンネルの径、 L は導水トンネルの長さ、 f は摩擦損失係数、 n はマンニングの粗度係数、 ΔH は嚮灘とポンドの水位差である。一方、可動堰が開いて

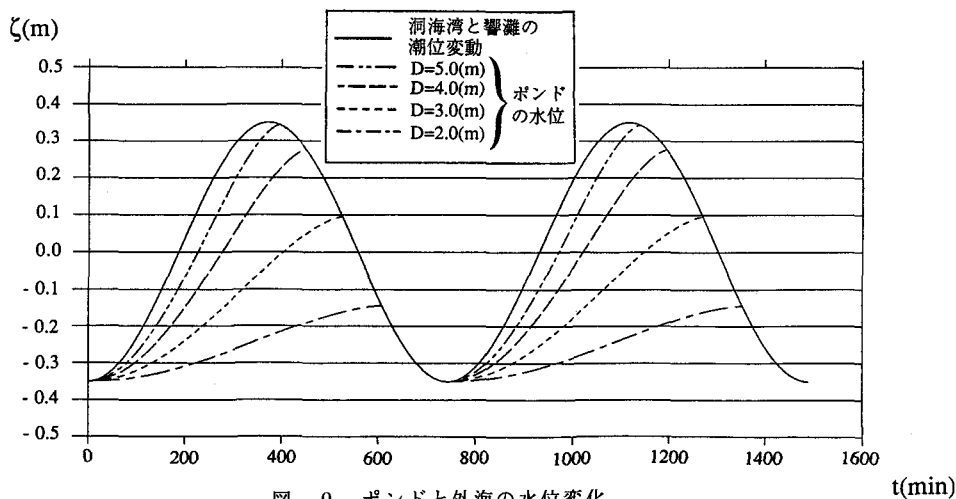


図-9 ポンドと外海の水位変化

いるときのポンド内の水位は洞海湾の水位と同じ挙動を示す。

響灘と洞海湾の潮位変動は等しいものとして計算を行った。図-9において実線は外海の水位で破線等はポンドの水位を示す。この計算結果より得られたトンネルの径Dと可能導水量の関係を表-2に示す。潮の干満だけで導入水 $3.0\text{m}^3/\text{sec}$ を確保するためには導水トンネルの径を5.0m程度にする必要があることが分かった。

4. 2 ポンプの併用

施工の容易さや経費の面から導水トンネルの径は最大で3.0m程度が妥当だと思われる。トンネルの径を3.0mにすると、可能導水量が $1.87\text{m}^3/\text{sec}$ であることから不足分の約 $1.0\text{m}^3/\text{sec}$ をポンプによって補う必要がある。

図-10に示すように響灘側にもポンプ取水のための可動堰を持った施設を設ける。ポンド内水位が響灘（洞海湾）の水位よりも低いときはポンプを停止し潮位差を利用してポンド内に外海水を導入する。下げ潮時でポンド内水位が洞海湾の水位よりも高いときはポンプ側の可動堰を閉じ、ポンド側の可動堰を開けてポンド内の水を洞海湾に放出するとともにポンプによって外海水を送水する。潮の干満とポンプの併用による導水量の計算を行った。ポンプの揚水能力を $4.0\text{m}^3/\text{sec}$ としたときの計算結果を表-3に示す。ポンプの利用により $3.0\text{m}^3/\text{sec}$ の導水が確保できるだけでなく、ポンプの稼働時間を調整することにより干満差が小さくなる小潮の時期にも導水量の調整が可能となる。

表-2 可能導水量

D(m)	可能導水量 (m^3/sec)
2.0	0.84
3.0	1.87
4.0	2.70
5.0	3.05

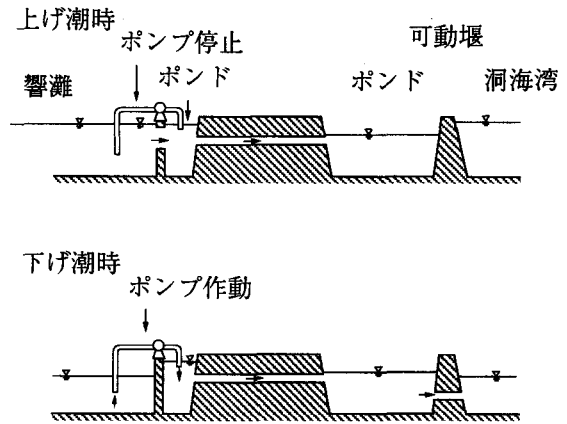


図-10 ポンプを併用した導水

表-3 $4\text{m}^3/\text{s}$ の揚水能力を持つポンプを使用したときのポンプ稼働時間と可能導水量

ポンプ稼働時間	可能導水量 ($\text{m}^3/\text{sec.}$)
干潮4時間前～干潮	3.22
干潮5時間前～干潮	3.34
干潮6時間前～干潮	3.38
干潮4時間前～干潮1時間後	3.40
干潮5時間前～干潮1時間後	3.52
干潮6時間前～干潮1時間後	3.58

5. 導水ポンドの親水空間としての開発利用

図-7に示された洞海湾最奥部に位置する導水ポンド予定地は幅およそ180m、長さ約1100mの長方形の入江となっている。現在は水深も1～7mで浅く、水質は湾内でも最も悪く(COD5～8mg/l)、海底にはヘドロが厚く蓄積し異臭を放っている。しかし、本浄化計画の実施に際し、可動堰を設けて導水ポンドとして利用されることになると、この水域には洞海湾の水は一切入らず、響灘から導水された外海水のみで満たされることになる。したがって、水質は外海の響灘とほぼ同程度となることが期待できる。水質汚濁とヘドロで有名な洞海湾の最奥部でしかも人口100万の工業都市北九州市の市街地にCODで1～1.5mg/l程度の清浄な水域が実現するわけである。しかもその水は一方通行で響灘から導入され、洞海湾に放出されるため常時入れ替わっている。この導水ポンド内のヘドロを浚渫し、新たに砂を敷いて人工海浜を作り、レストランやコーヒーショップ等いくつかの憩いの施設を作れば、身近に遊泳も可能なウォーターフロントが出現することになり、市民にとっては他には得がたい親水空間として蘇ることになる。水域の規模が小さいことから、生じる波浪は

非常に弱いと思われるので、人工海浜の砂浜の維持も容易である。周辺の緑の整備も含めたウォーターフロント開発の一例のイメージ図を図-11、12に示す。

6. 結語

洞海湾は北九州市民にとって身近な水際であるにもかかわらず、かつての汚染や悪臭、工業地帯特有の殺伐とした景観から多くの市民にとって縁遠い存在となっていた。著者らの産・学の研究グループは2年間にわたり、洞海湾の蘇生を目指して自然エネルギーを利用した水質改善策（名付けて「マリーンブルー夢作戦～洞海湾も真っ青～」）を検討してきた。得られた結論を要約すると以下のようになる。

(1) 洞海湾の水質汚濁を現在の半分程度まで改善するために、響灘から導入した外海水を毎秒 3m^3 程度洞海湾最奥部から放出する。

(2) 導水には径 3m の導水トンネルを用いる。大部分は潮の干満を利用して導水し、不足分についてはポンプを用いる。トンネルの径が大きいため、 $4\text{m}^3/\text{s}$ のポンプ送水でも 0.5m 程度の揚程しか必要とせず、そのため必要電力もそれほど大きくはないので、太陽光発電などの自然エネルギーの利用で十分賄えるものと思われる。

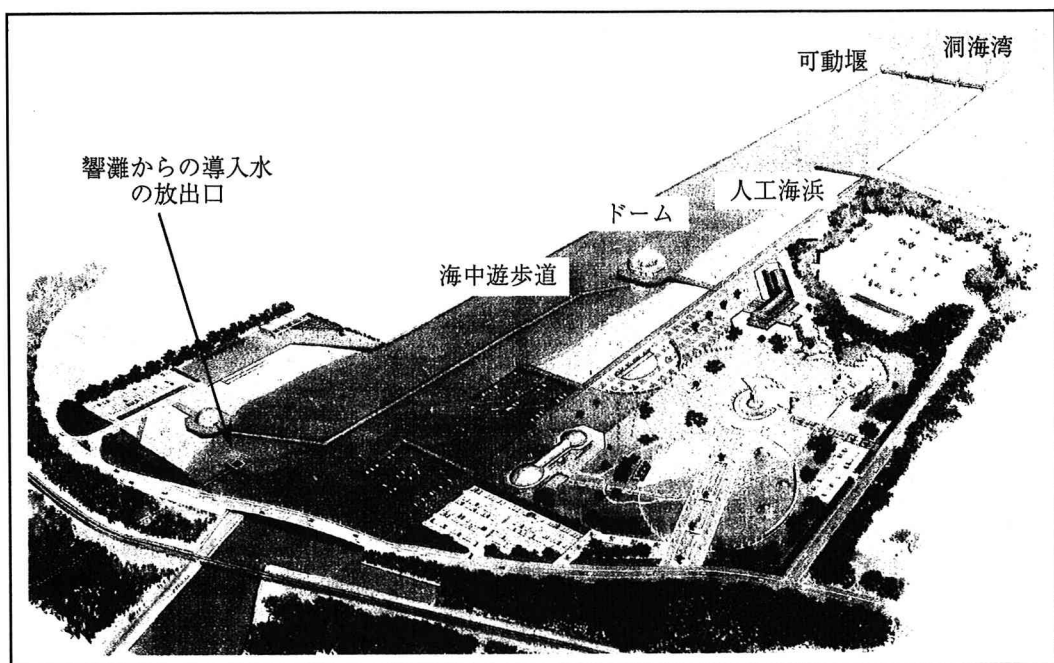
(3) 潮の干満を利用した導水を行うため、洞海湾最奥部の入江に可動堰を設けて導水ポンドとする。このポンドはその水質と立地の良さの故に、北九州市民にとって他には代え難い親水空間として開発される可能性を秘めている。

我々の周辺の水環境を改善していくためには、まず地域の人々に水辺を身近なものに感じてもらう必要がある。水をきれいにし、泳いだり、遊んだり、憩い散策する場を提供することはそのための第一歩であると思われる。”洞海湾で安心して泳げる・楽しめる”という事実は市民の意識を大きく変革し得るものであると思われる。一日も早い事業化が望まれる。

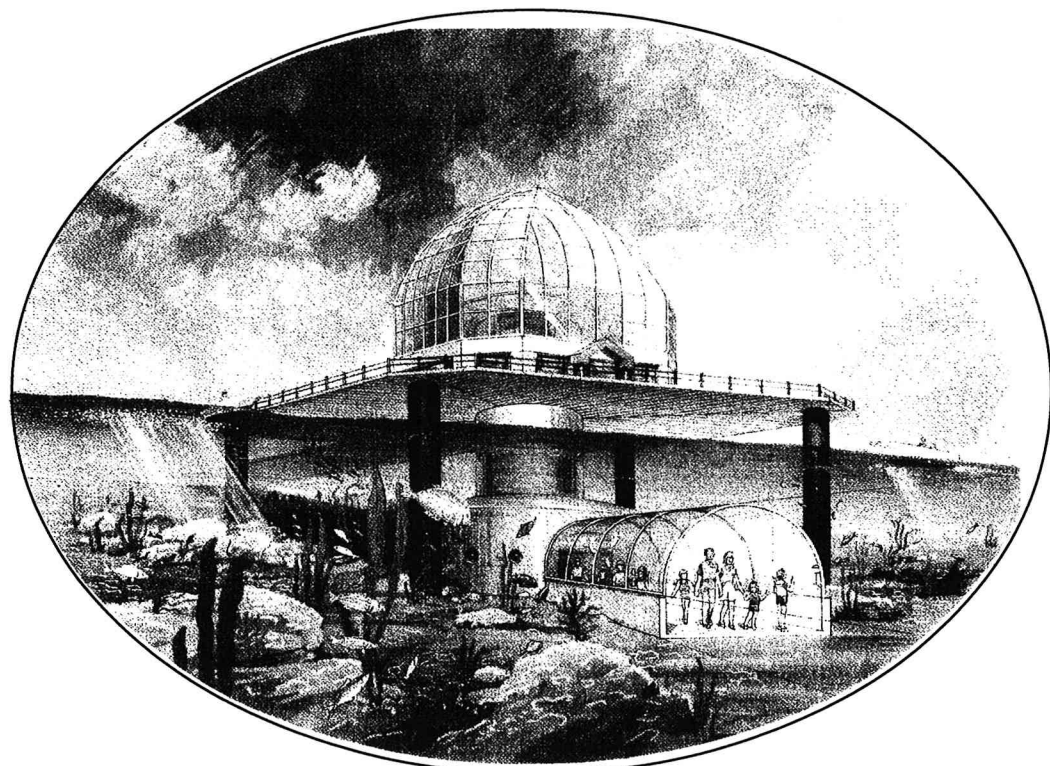
最後に本研究の遂行にあたり御助力をいただいた元4年生の松永康孝君（現パシフィックコンサルタンツ（株））、九州大学工学部技官藤田和夫氏ならびに柴田敏彦氏に深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 1) 小松利光・相良誠・朝位孝二・大串浩一郎：瀬戸内海における物質の拡散係数の評価，海岸工学論文集，第36巻，PP. 804～808，1989.



図－１１ 導水ボンドにおけるウォーターフロント開発のイメージ図



図－１２ 海中遊歩道の入口のドームの拡大図