

(62) 閉鎖性海域の水質管理システムに関する研究

STUDY ON THE WATER QUALITY MANAGEMENT IN AN ENCLOSED SEA AREA

内田 唯史*、 浮田 正夫*、 中西 弘*、 河本 靖浩**

Tadashi UCHIDA, Masao UKITA, Hiroshi NAKANISHI and Yasuharu KOUMOTO

ABSTRACT; The carrying capacity and the mechanism of water pollution in Hakata Bay was studied. The pollutant loads of COD and nutrients was estimated from 1965 to the present and a numerical simulation of water quality was conducted, using the Δ COD method. Further more we discussed about eutrophication control systems based on cost analysis for reducing the inflowing nutrient loads. The main results obtained are as follows;

- (1) 65% of all loads flowing into Hakata Bay, such as phosphorus and COD, originated from sewage. The sewerage system has not been effective for eutrophication control as expected.
- (2) The non-linear relationship between the inflowing load and water quality was observed by a numerical simulation model. The improvement of the water quality was hardly attained unless the inflowing load was reduced to the level of what it was before 1965.
- (3) The additional cost of sewerage system development was estimated to be 12 billion yen a year, further 16 billion yen for tertiary treatment, and an additional 7 billion yen for the by-pass discharge of secondary-treated waste water into the respective outsea area.
- (4) An appropriate distribution of population and industries might be needed from now on to keep the bay sound for the various use of the coastal areas.

KEYWORDS; Carrying capacity, Numerical simulation, Eutrophication control, Cost analysis

1. はじめに

大都市を流域にもつ閉鎖性海域では、環境基準の達成率は依然として改善されない状態にあり、環境庁では水質保全対策の一貫として、富栄養化の原因物質である窒素、リン等の栄養塩物質についても水質目標が検討されるなど、今日においても富栄養化問題が水域保全の主要テーマであることに変わりはない。また、1987年来のリゾート法により開発圧力は、ウォーターフロントへも大きなインパクトを与えており、“開発か保全か” ならん判断の規範がないまま経済効果に基づく計画だけが先行し、環境アセスメントも本来の目的を果たすまでには至っていない。さらに、流域においてもゴルフ場等の開発ラッシュで、水源地を有する流域にあっては上流域の地元活性化志向と下流域の水源保全意識がぶつかり、さながら流域内の南北問題の様相を呈している。自然の有限性や過大な人間活動に対する危機感が認識されはじめた今日、新しい規範が求められているといえる。本研究は、博多湾を対象として、流域の汚濁負荷量および湾内水質の経年変化特性から水質汚濁の構造を概観するとともに、負荷量削減方法の費用効果分析を行い、閉鎖性内湾の流域を含めた水質管理の新たな規範について検討を試みたものである。

* 山口大学工学部 Faculty of Engineering Yamaguchi University

**エイトコンサルタント Eight Consultant

2. 流入汚濁負荷量の経年変化

水域にかかる環境ストレスは、流域の人間活動を反映した汚濁負荷量により評価されることが一般的である。ここでは、博多湾流域における汚濁負荷量の経年的動向を把握するため、原単位法を用いて、昭和30年～平成2年まで5年毎に負荷量を積算した。発生源別流入汚濁負荷量の経年変化は、図1に示すとおりであり、COD、T-P、T-Nとも高度成長期の昭和40年代までは増加の一途をたどっているが、昭和50年以降は公害行政の成果、下水道の普及、洗剤無リン化等が効を奏して、COD、T-Pとも横ばい状態を保っている。窒素については、現在のところ下水処理の適切な方法がないため、人口の伸びに比例して増加している。発生源別には、下水を含めて生活系の汚濁負荷量が全体の2/3以上を占める。このように、本流域においては下水道が普及しても、人口増分の負荷を現状レベルに維持するに留まっており、下水道整備のみで水質保全を図ることは非常に困難なのが実状である。

3. 水質シミュレーション

過去から現在に至るまでの経年的な水質の変動状況をみるため、先に求めた流入汚濁負荷量を用いて、数値モデルにより博多湾における水質汚濁物質の拡散シミュレーションを行った。

3.1 潮流の計算

潮流の計算は、ナビエストークスの方程式および連続方程式を水深方向に平均化した二次元単層の差分法モデルによった。本モデルは、境界条件として、開境界に潮汐振動を与え、潮位勾配によって発生する流れを順次計算したものである。格子幅は、図2に示すとおり、湾の西半分を600m、東半分を300mとした。

また、水質汚濁物質の拡散計算には、各格子断面における1潮汐間の流量を正負それぞれの方向毎に合計した断面流量を用いた。

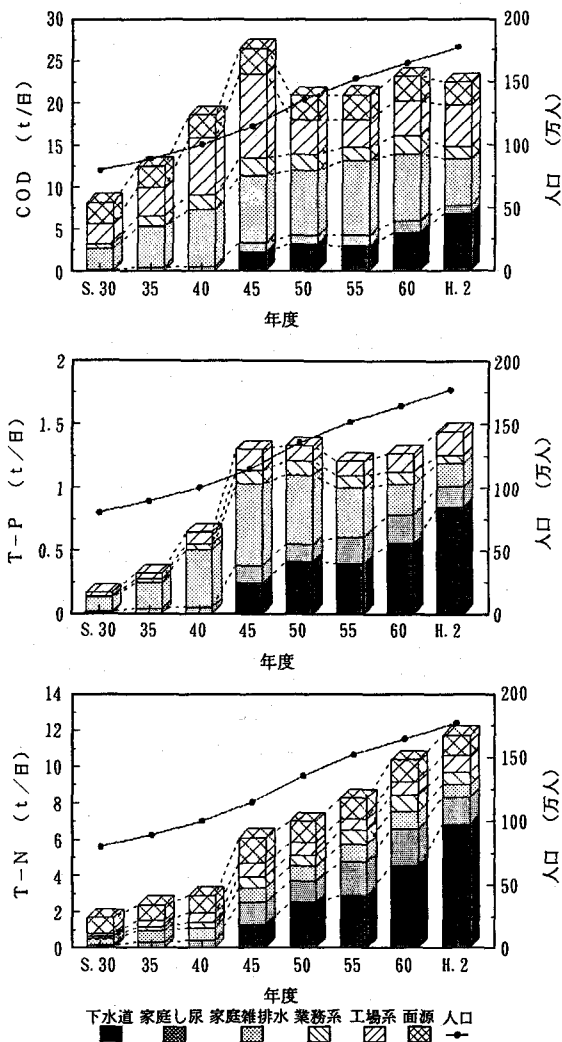


図1 発生源別流入負荷の経年変化

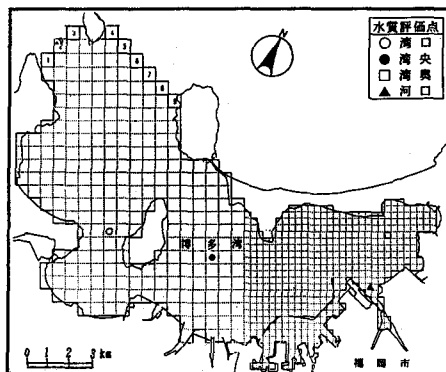


図2 メッシュ区分図

3.2 汚濁物質の拡散計算

拡散計算は、二次元単層の定常解モデルであり、CODは栄養塩からの内部生産を考慮した ΔCOD モデルを用いた¹⁾ (式1)。ここで、変換率 α_p は、実測値より博多湾の制限因子であるリン濃度と図3に示す関係がみられ、リン濃度の増加とともに α_p は大きくなるが、更にリン濃度が増加すると逆に減少するという傾向を示している。本計算においては、この α_p をリン濃度の関数として計算を行った。本モデルによる計算結果と水質データが存在する昭和50～平成2年までの実測値との関係は図4に示すとおりであり、モデルの再現性は良好である。

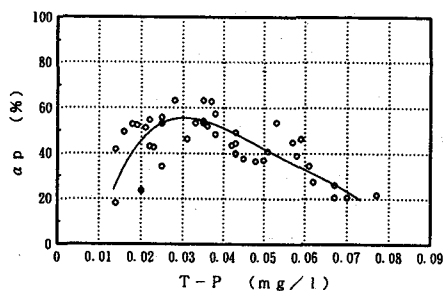


図3 α_p とT-Pの関係

2年までの実測値との関係は図4に示すとおりであり、モデルの再現性は良好である。

$$COD = COD_{min} + \Delta COD \quad \dots (1)$$

$$\Delta COD = \alpha_p \times COD_p$$

ただし、

COD : 海域内でのCOD濃度の年平均値

COD_{min} : 一次COD濃度 (陸域由来のCOD流入負荷の拡散値)

ΔCOD : 海域内で生産されたCOD濃度の年平均値

COD_p : リンより内部生産可能なCODの理論的最大濃度 $(= (143 \times p) / 2.26)$

p : リン濃度の年平均値

α_p : 変換率 (実際に内部生産されるCOD濃度の COD_p に対する割合)

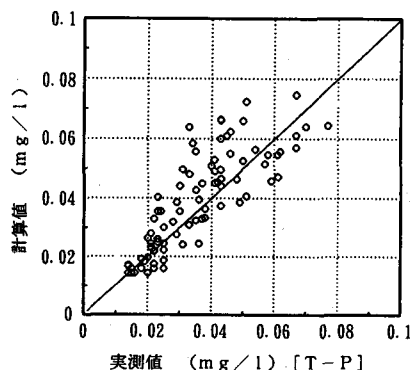
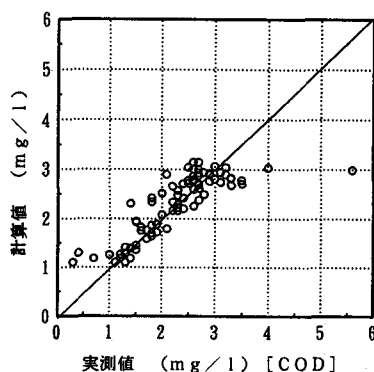


図4 実測値と計算値の関係

3.3 計算結果

リン並びにCODの拡散計算結果は図5に示すとおりであり、海域毎の水質評価点における水質の変動は概ね流入負荷量に対応している (図2)。したがって、これらの関係より汚濁負荷諸元、あるいは流入負荷量が推定できれば、水質の濃度レベルはいずれの海域においても推定できる。しかしながら、負荷量と水質の関係をより詳細にみると、負荷近傍の海域においては、流入負荷量の増大とともにリン濃度は比例的に増加しているが、COD濃度は横ばい状態となっているのが特徴である (図6)。すなわち、ある範囲では、負荷量の変化に対して水質は緩衝性を示し、負荷量の削減に対して期待するほど水質が改善されない場合があることを示している。

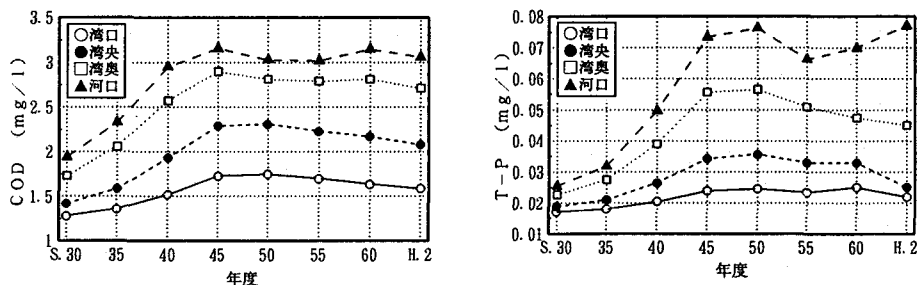


図5 地点別水質の拡散計算結果

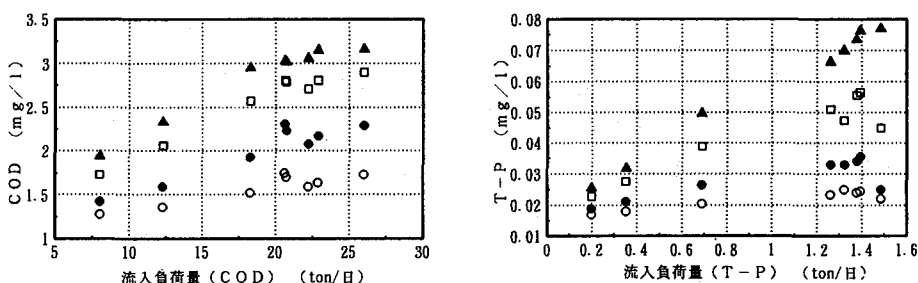


図6 負荷量と水質の関係

4. 水質保全対策とコスト

4.1 海域の水質保全対策

数値モデルにより、現在考えられる水質保全の方法とその効果についてシミュレーションを行うとともに、その保全費用について検討する。次の各検討ケースの設定にあたっては、開発等地形変化による影響を判断するため、非現実的な過程に基づく計算も実施した（ケース⑥）。

- ① 現況
- ② 現況の下水処理場からの放流水を湾外放流した場合。
- ③ 博多湾流域の将来の下水道計画に基づき、下水道が整備され、下水道区域外世帯が合併浄化槽を設置した場合。
- ④ ③において、下水の三次処理が行われた場合。
- ⑤ ③において、下水処理場からの放流水を湾外放流した場合。
- ⑥ 現況の流入負荷量を昭和30年の地形条件で水質計算を行った場合。

これら各ケースの流入負荷量及び水質は図7、8のとおりとなる。諸水質改善対策により、富栄養化の主要原因物質である栄養塩のリンは、対策に応じて水質の改善効果がみられるが、CODについては内部生産が栄養塩量に対して非線形であることから、栄養塩を単純に削減すればよいというものではなく、先に示した負荷量の経年変化にみられるように負荷近傍の海域では昭和40年以前の負荷量まで削減しなければ、水質改善効果は表れてこない。

また、ケース⑥の結果にみられるように、水質濃度を支配しているのは流入負荷量であって、博多湾の場合、埋立等による地形変化の影響はほとんどみられない（図8）。開発における埋立等の是非については、海岸形状並びに生物生息環境の多様性等を基本とすべきであろう。

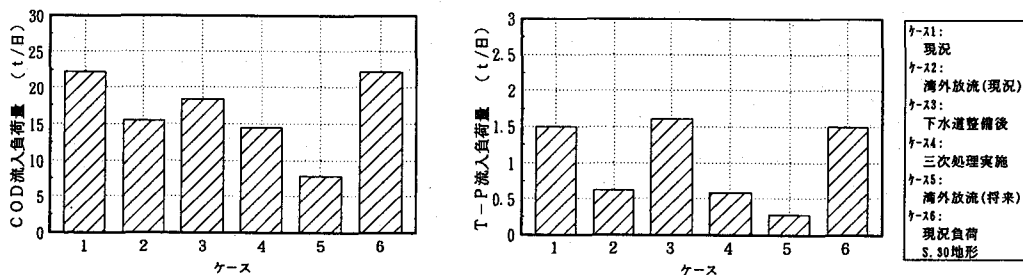


図7 水質保全対策による負荷量の変化

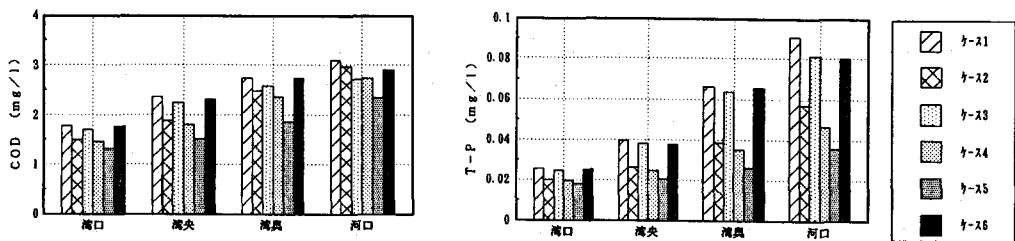


図8 水質保全対策による水質シミュレーション結果

4.2 水質保全コスト

水域の保全にあたっては、一定の規範を達成するために、それなりのコストを負担しなければならないが、この水質保全コストと水質の規範とはトレードオフの関係にあり、流域に居住する人々は水域の管理規範に応じて応分のコスト負担が必要となる。水質保全対策のケーススタディで示した各ケースの保全費用を求め、これに資本回収係数を乗じた年あたりのコストは表1に示すとおりである。コストの算定にあたっては流域別下水道整備総合計画調査²⁾および既報³⁾を参考にした。下水道が計画どおり整備された場合で550億円/年（追加的に120億円）、さらに3次処理を施せば約160億円/年の費用が必要となる。また、湾外に放流先を求めた場合では、約80億円/年と3次処理を行うよりコストは安く、湾内水質も良好な水質レベルが得られる（図9）。経済性を考えることは、ある意味で環境にやさしいことに通じるものであり、今後の環境行政においては、このような費用効果の分析が要求されるものと考えられる。

表1 博多湾流域における水質保全費用〔億円/年〕

区分	資本費	維持費	計	累加費用
現況	—	—	428*	428
下水道計画	—	—	552*	552
放流	98	59	157	709
現況	51	3	54	482
将来計画	71	6	77	629

*下水道処理人口と1人あたりの処理費用より算定

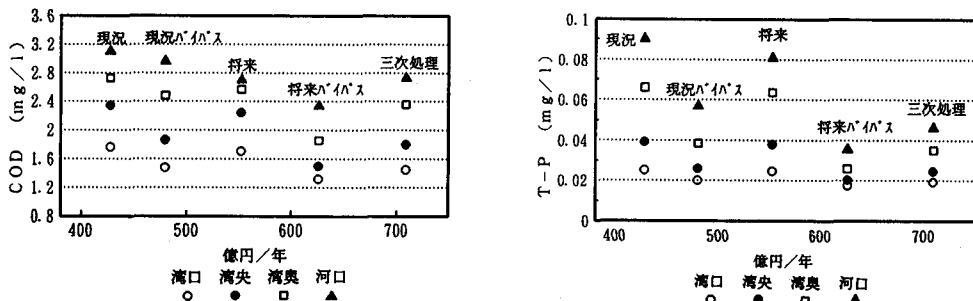


図9 水質保全費用と水質の関係

5. 流域の水質管理システム

5.1 環境基準の考え方

一般に、閉鎖性海域の水質管理は、図10に示した環境容量の概念が受け入れられており、内藤は人間活動を適正に配分するための基礎を与えるものとして、第一種環境容量⁴⁾を定義している。この場合の外的規範としては、環境基準が行政的にも広く受け入れられており、海域等の水質管理に適用さ

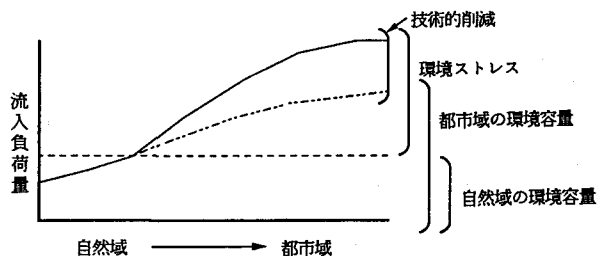


図10 環境容量の概念

れている。著者らは環境基準の基本的考え方は、現実性や経済性を考慮して、ある種の合理性をもつものと考えている。しかし、背後流域の土地利用状況や海域利用を検討しつつして設定されたものではないため、必ずしも十分に人間活動を律する規範とはなり得ていない。このあたりで、それぞれの水域において環境基準の設定を見直してみることは意義のあることと考えられる。

5.2 アメニティ・水産面からみた水質目標

都市化の進んだ水域における実際的な管理規範を考える上では、都市域、緩衝域、自然域それぞれについて、親水空間としてのアメニティ性、さらに貴重なたんぱく源となる水産資源環境を考慮する必要がある⁵⁾。ウォーターフロントにおけるアメニティ空間の規範となるべきものは、人の水に対する感じ方について問うた既報のアンケート調査結果⁶⁾にみることができる。図11、12は、アンケート調査によって得られた景観に対する好感度と実際の水質の関係を表したものである。COD濃度と好感度との間には高い相関がみられ、自然域において海水浴等に利用されている海域ではCOD1.5mg/l以下、透明度5m以上で、都市域の親水空間（レジャー型海岸）ではCOD3mg/l前後、透明度2m前後でそれぞれ一定の満足が得られている。人のみた目の感覚は実際の水域利用用途により水質レベルが異なることが判る。

また、沿岸域の漁業資源の維持管理の立場から、図13に示した博多湾並びに瀬戸内海の主要海域におけるCOD濃度とたんぱく及び窒素の水揚げ量^{7) 8) 9)}の関係をみると、濃度が増加するにつれて水揚げ量も増えるものの、平均的なCODで約2~2.5mg/l以上になると、水揚げ量は横ばいまたは減少傾向を示すようである。これは、水産業にはほどよい富栄養度があることを示している。

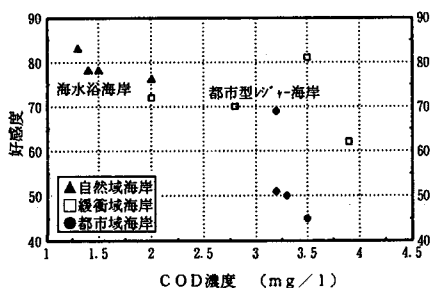


図11 好感度とCODの関係

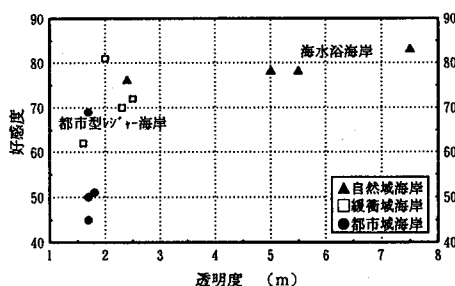


図12 好感度と透明度の関係

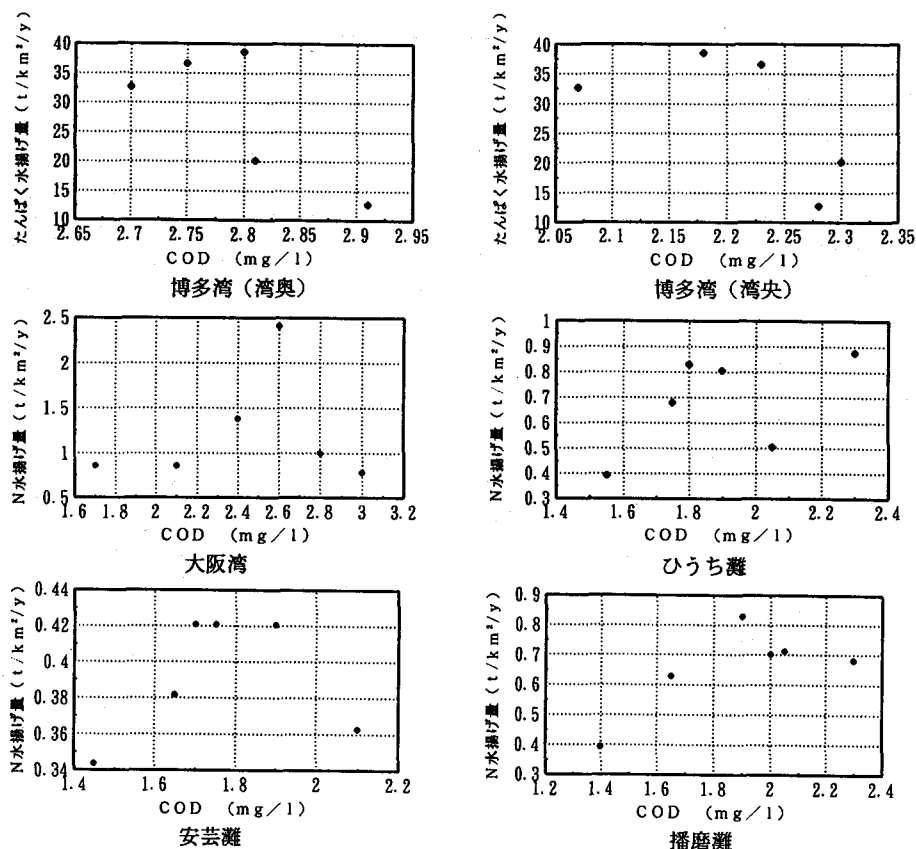


図13 CODと水揚げ量の関係

5.3 水質管理の考え方

このように、実際の水域管理を行う場合、海域の背景、利用状況を考慮して、自然域では自然浄化能力を損なうことなく、海水浴等の親水空間としての機能を維持することが重要である。このときの水質は、図1.1に示したアンケート結果からもみられるとおり、アメニティを損なうことのない水質レベルとして概ねCOD 1.5 mg/l以下が要求される。都市域では、ある程度の人為性は受け入れざるを得ず、アンケート調査にもみられるように工学的景観形成によるアメニティの創出により親水空間としての機能を確保することによって、人の満足は得られるものと考えられる。このときの水質規範は、快適性及び水産資源維持に必要な濃度レベルとしてCOD 3 mg/l程度であればよく、海水浴のできる水質までにしようすると、コスト負担は膨大となる。また、自然域と都市域の間には、緩衝域として水産の場を想定すればよい。

一方、これら規範を維持するための技術的対策としては、先に示したとおり下水道整備のみでは支えきれず、3次処理も必要ではあるがコストの負担は重くなる。水質管理の方法として、適正な監視のもとに、自然域の受容容量の範囲において、放流水の排出先を湾外に求めるバイパス放流もコスト的にみて考慮されてよい^{10) 11)}。

技術対応の手詰まりと環境ストレスの増え続ける社会構造にあって、すでに発生した負荷を技術的に軽減することを考えるばかりでなく、もう一度流域圏を基本として、流域の汚濁負荷発生諸元の増大を抑えることを考える必要がある。すなわち、流域内の人口の適正化である。近年、都市圏では、上水の需要計画を無視し、スプロール化により流域の人口が増大しているが、他流域に水源を求めなければならないような都市の構造は見直されなければならないと考えられる。

6. まとめ

都市部の閉鎖性海域では、従来型の水域管理の概念は人間活動の是非を律するものとはなっておらず、技術的対応にも限界がみられる。流域を含めた環境管理のあり方が問われている現在、自然域、緩衝域、都市域、それぞれの水域の利用目的に応じた規範を考えるため、基礎的研究を行い次のような知見を得た。

- (1) 近年、水域に流入する負荷量の2/3は生活系のもので、下水道が普及しても人口増分の負荷を現状レベルに維持するにとどまっている。
- (2) 流入負荷量が推定できれば、海域の水質濃度を推定でき、流域の負荷削減量の効果が水質にどの程度反映されるかを示した。負荷近傍の地点では、流入負荷に対する水質濃度の非線型性により、少々の負荷削減では水質改善効果がみられず、下水道の整備は水質保全の決め手とはいえない。
- (3) 下水道の整備によるコストは今後追加的に約120億円/年、さらに3次処理を行う場合で約160億円/年、湾外放流で約80億円/年となった。
- (4) 流域の水質管理においては、負荷量の大部分を占める人口の適正化、並びに自然域、緩衝域、都市域それぞれの水域利用を考慮した水質規範を設定していくことが重要な要素である。また、水質保全の技術的対応として、毒物ではない窒素、リンなどの栄養塩類は、自然域の受容容量の範囲において、系外水域へ適正配分することも重要な制御手段となり得るものと考えられる。

今後は、海域のみならず河川をも含めた流域全体の保全の規範について考えていきたい。

参考文献

- 1) 内田唯史、浮田正夫、中西弘：内湾におけるCODの予測手法に関する研究、水質汚濁研究、Vol. 6、No. 6、pp. 427-437、1983
- 2) 流域別下水道整備総合計画調査 指針と解説 日本下水道協会（平成2年）
- 3) 浮田正夫、中西弘：底密度地域の生活排水処理方式の選択に関する考察、環境システム研究、Vol. 20、p. 9～12、1992
- 4) 内藤正明：環境容量論、環境情報科学、16(3)、pp. 49-54、1987
- 5) 内田唯史、浮田正夫、中西弘：アンケート調査による海岸7メニティ資源の経済評価に関する考察、環境システム研究、Vol. 20、PP. 310～317、1992
- 6) 内田唯史、浮田正夫、中西弘：海岸の環境7メニティ資源と住民意識、資源環境対策、緑の読本26、pp. 113～124、1993
- 7) 福岡市統計書、福岡市、昭和45年～平成2年
- 8) 浮田正夫、中西弘：瀬戸内海への栄養塩の流入負荷解析と対策、瀬戸内海研究フォーラムin広島、pp. 13-15、1992
- 9) 瀬戸内海漁場適正栄養レベル検討事業報告書、(社)日本水産資源保護協会、pp. 73-82、1990
- 10) 中西弘：海域の富栄養化に関する研究、財団法人 鉄鋼業環境保全技術開発基金、1990
- 11) 中西弘、浮田正夫：環境における窒素、リンの収支、および水域の受容能力と対策、日本河川年鑑 1982 (社)日本河川協会編