The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	内海・内湾地域の水環境改善に関するシステム論的研究
Author(s)	見市, 晃
Citation	大阪大学, 1997, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.11501/3129184
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

内海・内湾地域の水環境改善に関するシステム論的研究

1996年

見　市　晃

目　次

第１章　緒　　論 ―――――――――――――――――――――――― １
1-1　研究の目的と背景 ―――――――――――――――――――――― １
1-2　研究の内容 ―――――――――――――――――――――――― ２
1-3　本論文の構成 ―――――――――――――――――――――――― ４

第２章　内海・内湾のにおける環境負荷の伝播モデル ―――――――――― ６
2-1　緒　　言 ―――――――――――――――――――――――― ６
2-2　環境負荷伝播モデルと潮汐流の解析・再現計算――――――――――― ７
2-3　非保存系作用反応プロセスとしてのボックスモデル――――――――― １５
2-4　作用反応モデルによる水質方程式――――――――――――――― １９
(1) 海域観測データ ―――――――――――――――――――― ２０
(2) 水質方程式による作用反応モデルの定式化 ――――――――――― ２１
(3) 水質再現計算の境界条件・初期条件 ――――――――――――― ２６
(4) 物質移動量によるモデルの検討 ――――――――――――――― ２７
(5) 感度解析法によるパラメータ値の設定 ――――――――――――― ２９
(6) 水質再現計算結果とその評価 ――――――――――――――― ３０
2-5　将来の予測水質と現況水質値との比較 ――――――――――――― ３４
(1) 将来の地形変化とボックス諸系数の同定 ――――――――――― ３５
(2) 現況の水質再現値と将来水質予測値に対する評価 ――――――――― ３８
2-6　結　　言 ―――――――――――――――――――――――― ４０

第３章　陸域における汚濁負荷集計システムの構築と集計結果の評価――― ４２
3-1　緒　　言 ―――――――――――――――――――――――― ４２
3-2　陸域の研究対象領域と汚濁負荷発生源 ――――――――――――― ４３
(1) 陸域の研究対象領域 ――――――――――――――――――― ４３
(2) 汚濁負荷発生源 ―――――――――――――――――――――― ４４
3-3　汚濁負荷の集計モデルと集計手順 ――――――――――――――― ４６
(1) 汚濁負荷集計モデル ―――――――――――――――――――― ４６
(2) 汚濁負荷量の集計手順 ――――――――――――――――――― ４７
3-4　ボックス別の流入負荷量の集計結果の評価 ――――――――――― ５４
(1) 小領域におけ COD、総リン(TP)に対する算定値と同実測値との比較― ５４
(2) 大領域におけ COD、総リン(TP)に対する算定値と同実測値との比較― ５４
3-5　将来流入負荷量の予測とその評価 ――――――――――――――― ５６
(1) 将来流入負荷量の予測 ――――――――――――――――――― ５６
(2) 現況負荷量と将来負荷量の比較――――――――――――――――― ５７

3-6　自動車による道路面への汚濁負荷の測定 ――――――――――――――― 58
(1) 計測の概要と通過交通量・観測データ ――――――――――――― 59
(2) COD 負荷量と通過交通量の関係 ――――――――――――――――― 61
(3) 自動車の排出する路面負荷量の算定 ――――――――――――――― 63
3-7　結　　言 ――――――――――――――――――――――――― 64

第４章　環境負荷の評価と改善施策 ――――――――――――――――――― 66
4-1　緒　　言 ――――――――――――――――――――――――――― 66
4-2　環境基準値と 75%水質の解釈 ――――――――――――――――――― 66
(1) 設定されている公的な環境基準値 ――――――――――――――――― 66
(2) 実測値に基づく COD75%水質代表値の定義 ――――――――――― 68
4-3　水質改善のために海陸に施す施策とその効果の評価 ――――――― 70
(1) 小領域での浚渫・覆土とその効果 ――――――――――――――― 71
(2) 大阪湾全域の流入負荷量の削減施策とその効果 ――――――――― 71
(3) 特定地域(兵庫県，神戸市)における施策とその効果 ――――――― 75
(4) 将来の水質予測に基づく水質改善のための施策 ――――――――― 77
4-4　流入負荷のボックス濃度への寄与と線形計画法による評価 ――――― 79
(1) 流入負荷のボックス濃度への寄与割合――――――――――――― 80
(2) 水質改善施策の線形計画法としての定式化 ――――――――――― 81
4-5　線形計画法の解とそれに基づく水質改善の評価 ――――――――― 84
4-6　結　　言 ――――――――――――――――――――――――― 86

第５章　貨物輸送形態の選択による陸域での負荷と
水域での負荷の競合とその評価 ――――――――――― 88
5-1　緒　　言 ――――――――――――――――――――――――― 88
5-2　我が国における貨物輸送の問題点 ――――――――――――――― 89
5-3　貨物輸送分担率の環境評価モデル ――――――――――――――― 91
(1) 貨物輸送の金銭的側面と非金銭的側面 ――――――――――――― 91
(2) モデルの他の構成要素 ――――――――――――――――――――― 93
5-4　モデルの非線形計画法による定式化と有効な分担率の決定 ――――― 97
(1)　貨物輸送分担率の環境評価モデルの定式化 ――――――――――― 97
(2)　輸送形態別の分担率決定 ――――――――――――――――――― 99
(3)　貨物輸送形態の最適分担率による環境負荷量の削減効果 ――――― 100
5-5　結　　言 ――――――――――――――――――――――――― 101

第６章　排出権売買取引による環境負荷の合理的負荷削減に関する
ゲーム論的アプローチ ――――――――――――――１０３
6-1　緒　　言 ――――――――――――――――――――――― １０３
6-2　排出負荷の受け入れを巡る取引問題のモデル化 ――――――――――― １０５
6-3　ゲーム論的な排出負荷取引モデルの定式化と解析 ――――――――― １０７
(1) 製造業と地方行政機関の利得関数の設定 ――――――――――――― １０７
(2) 製造業の利得関数 $M_1(a,x;y)$ について ――――――――――――――１０８
(3) 行政機関の利得関数 $M_2(a,x;y)$ について ――――――――――――― １１２
(4) 均衡解の概念とその評価 ――――――――――――――――――――― １１４
6-4　数値解析による排出負荷取引モデルの評価 ――――――――――――― １１４
(1) 計算対象地域と計算条件 ――――――――――――――――――――― １１４
(2) 均衡解の感度解析と下水道利用権の性格 ――――――――――――― １１５
(3) 排出負荷取引モデルの瀬戸内海沿岸自治体への適用とその効果 ――― １１６
6-5　結　　言 ――――――――――――――――――――――――――― １１７

第７章　結　　論 ――――――――――――――――――――――――― １１９

参考文献 ――――――――――――――――――――――――――――― １２２
謝　　辞 ――――――――――――――――――――――――――――― １３１
付　　録 ――――――――――――――――――――――――――――― １３２

第1章　緒　論

1－1　研究の目的と背景

人間は、実に世界の隅々にまで住み着いてその地の地勢・気候風土にとけ込むだけではなく、自分達の都合の良いように自然を改変して生きて来ている[1-5]。オークリーによれば中国大陸で30万年前に火を使用した証拠があるという[6]。日本では、害虫や雑草に対しては「蔓延る:はびこる」という用語を用いてきたが、人間自身に対して「蔓延る」という動詞は用いてはいない。新漢語辞典(岩波書店)によると、蔓延るの「蔓:つる」には好ましくないものが広がるという意味があるという。むしろ、自然を常に改変している人間に対してこの言葉がふさわしいのかもしれない。

人間に蔓延ると言われないのは、何らかの自制が働くはずだと考えられているからであろう。最終的には宿主を枯らす蔓の細胞一つ一つには自制という情報は持ち合わせてはいないが、人間一人一人には濃淡の差はあれ自然の利用について何かを感じており、そのうち自制というブレーキが効きだすと指摘されている[7]。右肩上がりの経済成長が望めないという用語はドルショックや石油ショックの頃、しきりに聞いた覚えがあるがバブルがはじけた現在、これ以上の成長は望めないにも拘わらず再び経済成長を望む声が各所で聞かれている。しかしながら、経済の飛躍成長には常に公害問題を伴ってきた。したがって、反省期であるこの時期に公正な立場から、徐々に人間に自制を促して行く必要があると考えられる。

この意味から、本論文は1部、2部、3部に分けて環境改善に関してシステム論的考察を行っている。第1部は、人間が自然に与える影響について考察したものであり、環境汚染という物理的な現象を考察するものである。すなわち、経済的豊かさの享受や環境資源の浪費により汚濁物を作り続ける人間と、その汚濁物を自然がそのまま受け取って海の汚濁を進行させるという、人間が自然に与える影響を数理モデルで表現する。また、数値解析を行うため計算機シミュレーションによって分析・評価することを試みている。

第1部の考察から見えてくるものは、一人一人が汚濁物を排出している行為とは乖離して、独立に存在するかのように汚れた海があり、光化学スモッグが生じ交通公害としての喘息に悩まされるという報道があるといった環境イメージである[5]。この局面を打開するには社会的問題として捉えた行動を起こさなければならない。たとえば汚濁負荷の削減のための環境資源の節約やリサイクルなどがある。また、内藤[8]によれば、地球環境問題が求める社会変革について将来世代、他生物、発展途上国の人々も含めた範囲のものにもなるということである。このような、社会的行動を起こす前に準備しておかねばならない条件として、本論文では水環境に限定して環境改善するには何をなすべきかを考察することにする。

これを第2部において、自然と人間集団という観点から論じる。第1部で述べたように人間が自由に振る舞うのではなく、人間の行動に自然が要求する何らかの制限が加わったと

考えた場合と、さらに意識的に環境に対処しようという積極的な場合[9,10]とについて考察する。前者の場合は自然環境に関して設定された環境基準を達成するため人間の発生する汚濁物の量をどれだけ減らせばよいかについて考察する。後者の場合は、少々の不便は忍んでも何らかの理由があれば人間はそれに協力するという局面を考えている。そのため環境に対する効用を金銭的な側面と非金銭的な側面に分ける。すなわち、純粋な経済活動に加えて次世代のことまで考慮して環境を考えるという進歩的な部分を織りまぜたときの環境改善の結果を検討する。ただし、この考えを単純に提示しただけでは人間に対する拘束力が生じないため現状通りとなるので、行政が環境改善を少々意図的に介入することが必要であるという立場をとる。以上述べたように第１部では、人間の発生する汚濁物により自然環境がどのように損なわれるかについて物理・化学的な変化を作用反応モデルとして捉えて数値的に解析する。第２部では、自然に対する人間の配慮を人間社会の内部で構造化する観点から考察を行っている。これには、第１部で考慮した数学的モデルに従って損なわれた自然環境を改善するために人間の汚濁発生を規制する施策について考察している。

さらに、環境問題を打開する為には局面を社会的問題として捉える必要がある。

本論文の第３部においては、人間集団対人間集団の視点から環境問題を論じることになる。人間社会の問題では登場する主体である人間が意志を持つため、互いに対立的な行動をとったり、時には協力的な行動をとったり相反する動きをすることを考慮に入れなければならない。これにはモルゲンシュタイン[11]の主張するように、数学的特性に加えて社会的、経済的および政治的な要因を取り入れたゲームの理論に基づくアプローチが重要な役割を果たしている。人間集団（＝企業）と人間集団（＝行政）とは、環境を改善するために協力し合う関係にあるが、一方、企業が全面的に利益を放棄するのではなく、少しでも自己にとって有利な場合に水質改善を考えるという問題の理論的な裏付けとして、本論文では、ゲームの理論を用いて検討することにする。企業が、限界に近づいた排水処理効率をさらにあげるための投資を行うより、公共下水道に処理を依頼する方が得策である場合、いわゆる下水道料金を支払って公共下水道に工場排水を流すことになる。他方、行政は、下水道料金を公共事業に投資することが得策であるという状況がある。ただし、両者にとって互いの利益を同時に最大にすることはすぐさま考えることができず、競合する局面と協力的な局面の双方の立場が混在していて、その解決にはゲーム論的な考察が不可欠である。本論文の第６章では、このような排水負荷取引問題を導入した場合の効果について議論し、両者の妥協の成立する条件を明示している。以上のように本論文は、３つの局面とも手法としてすでに提案されているもので、新規の開発ではないが人間環境系の相互作用としての着眼点から問題の所在を探り出し、論理的な研究の枠組みをシステム論的に考察している。

１－２　研究の内容

本論文では、まず第１部として述べた人間集団が自然に与える影響の内海・内湾地域の汚

濁負荷伝播をモデル化し、それに対して数理的定式化を行い計算機シミュレーションとして解析する方法[12]を提案し、得られた結果を評価してモデルの妥当性を確かめている。人間が社会生活を営む際に発生する排水による汚濁負荷が河川を流下する間に、浄化作用を受けたり下水処理場で処理されたりしながら最終的に海に流れ込むが、その様相を計算機で再現するための陸域での汚濁負荷の集計計算システムを構築している。さらに、海に入った汚濁物は、植物プランクトンに取り込まれ光合成により増殖したり、枯死して底泥に沈んで分解されたり潮流で移動したりする等の海中の生物化学的な変化[13]と潮汐流などの物理的な変化[14]を受ける様子を数理モデルとして表現し計算機内でシミュレーションを実施している。すなわち、ここでは汚濁負荷発生から海域での水質変化に至る、自然に対する一方向の流れを計算機上に再現している。さらに、以上の研究を用いて環境改善施策の効果を作用反応モデルとして定式化し評価している。ここでは、施策を提案したり実行する行政担当者に対し、使い勝手を良くする目的から使い慣れたコンピュータのメニュー画面の中から施策を選びだしたり新しい施策を登録する方式を採用している。これにより種々の施策を海陸で執った時の水質改善効果を評価するものである。

以上の成果をふまえて、第２部として、汚濁負荷を発生する人間集団に対して、公正な立場に立つべき主体である行政庁環境担当が、内海・内湾の環境汚染を改善するための施策を検討している。内海・内湾地域の水質を改善する施策として浚渫・覆土が考えられるが、第１部で提案した水質再現計算によると、その効果には限界があり、少なくとも他の施策との組み合わせが必要であり、陸域での汚濁負荷削減を通して人間側の圧力を下げる必要があることを明らかにしている。ところで、環境問題を改善する際に、いきなり不便な生活を強いても抵抗が大きいと判断されるので、行政としては比較的実行容易な下水道設備の普及という公共投資、たとえば、税金の投入という形で環境保全を行う方法を採用することが、まず選択される。しかし同様に若干の不便を我慢して環境を良くして行こうという立場で方策も考えるべきである。貨物輸送を例にとると、現在はダイヤを決めずに満車になり次第出発するトラック輸送の便利さから海運や鉄道に切り替え、その結果利便さは失われても集約化により運賃は安くなり、しかも発生する汚濁負荷を減じるという環境改善の方法とその効果を本論文で検討している。ここでは、汚濁を水だけに限定せず大気にも言及している。

最後の第３部の議論は、製造業が生産時に発生する排水の処理について、排水を自社で処理しないで直接公共下水道管に流す有償の権利の裏返しとして下水道料金の考え方を導入する。工業排水を出す製造業と処理を行う行政との間の汚水処理価格交渉を、ゲームの理論を用いて表現している。この議論は、人間対自然ではなく人間対人間の交渉により環境改善が計られるという立場から環境改善を議論したもので製造業と行政と２つの主体のとるべき最適戦略を求めている。

以上、要するに第１部では人間の自然に与える影響の観点から人的行為による自然現象、すなわち、陸域の汚濁負荷と海域での水質変化を解析している。第２部では自然に対して人間の側のルールの観点から、第１部で議論した自然の摂理によって環境問題解決のため

になすべき人間行為を規制する方法について考察している。第３部として、人間集団と人間集団の間のトレードオフの観点から環境改善のために執るべき行為をゲーム論的に考察したものであって、これら３部の位置づけを図１－１に示す。

１－３　本論文の構成

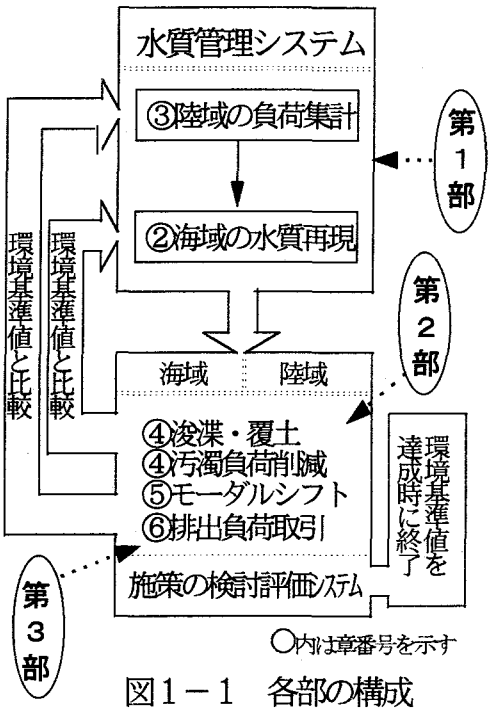


図１－１　各部の構成

第１章は緒論であって、本研究の目的、背景および研究内容、論文の構成を述べている。第２章では大阪湾を例にとって、内海・内湾地域における物質の移動と循環を計算機上に再現させるため数理モデルとして表現し、水中における生物化学現象および物理現象を微分方程式として表すことについて述べている。つぎに、導いた水質方程式をコンピュータ上のプログラムとして記述し、観測データを入力して計算することにより、海域の水質変化を計算機システム上で再現できることを確認している。この種の方法は大型計算機システムとして既に実用化され施策提案[14,15]として用いられているが、経年的に使用ししかも特別な予算化を必要としない水質管理システムとしては、行政庁の担当が日頃個人的に使い慣れたコンピュータを用いるのが適当であるのでその方法を本論文で提案している。

第３章では、内海・内湾地域に汚濁物が流入する際の陸域での汚濁負荷集計システムを提案している。陸域における汚濁負荷集計の方法としては既に解明されている「河川汚濁のモデル解析」の方法[16]を積極的に利用し汚濁発生源を点源と面源に分け、点源では発生源より求められる汚濁データを用い面源では発生原単位法を用いている。発生した汚濁物が流下する途中で受ける浄化作用を考慮しながら、当該地域の負荷集計をプログラム化することにより、汚濁負荷の集計システムを構築して集計を実行している。最後に集計結果を、沿岸で調査された観測値と比較し本論文で提案する集計システムの妥当性を確認している。

第４章では、以上において構築されたシステムを用いて水質改善のための施策の効果を解析し、有効な施策を導いている。水質改善の施策として海域において浚渫と覆土を、また、陸域において汚濁負荷削減を行うこととし、それらの施策効果のあらわれ方について考察している。つぎに、陸域での条件の変化、たとえば下水道工事進捗などによる海域での水質改善の効果に関し水質伝達係数という考え方を提案し、水質伝達係数を基に陸域と海域との水質変化の影響を考慮して、水質改善問題を線形計画問題[18]として捉え簡易な水質解析方法を提案しているが、線形計画法による解法が第２、第３章で与えた厳密な解析方法とほとんど遜色がないことを示している。

第５章は、トラック、鉄道、内航海運の間のモーダルシフト、すなわち輸送形態の転換

について解析したものであり、貨物輸送に伴う汚濁負荷を削減する方法について検討している。ここでは貨物輸送による環境問題を金銭的な面と非金銭的な面に分けて考えるべきであると提案している。前者は経済的な指標として輸送コストなどの直接経費を取り上げるものであり、後者は次世代のために今負うべき環境問題として捉えるものであって、CO_2排出量、石油消費量に着目している。そこで、輸送形態としてトラック、鉄道、内航海運を取り上げ、それらが輸送する貨物総量は与えられたものとし、それぞれが排出する汚濁負荷の削減を金銭的な面だけでなく非金銭的な面から検討して、輸送形態の転換がどのように実施されるかという問題を数理モデルとして捉え非線形計画問題[19,20]として定式化し数理解析を行っている。この解析結果により貨物輸送の主流がトラックから鉄道、内航海運へと転換するということが明らかになり、トラック輸送に対するCO_2負荷量がどれだけ減少できるかを示している。また、同時に COD 負荷量の減少についても定量的に述べている。

第６章では、人間集団対人間集団の観点から汚濁負荷改善問題を考察する。１番目の集団は製造業であり２番目の集団は地方行政機関である。製造業は生産活動に伴い工場排水を放流し環境を悪化させるので排水処理設備を整えるという、多大の義務を課せられている。製造業としては、限界に近づいた排水処理効率をさらに上げるための投資を行うより、処理効率の高い公共下水道に処理を依頼することが得策であるという考え方がある。すなわち製造業者は、有害処理を行ってはいるが排出基準濃度を越える排水を流し下水道料金を地方行政機関に支払う。一方、行政機関は、その売り上げを資金として下水道普及工事に投資するという方策が考えられる。このような状況をモデル化し、排水負荷取引の交渉として数理的定式化しゲームの理論[21-24]により解析し解を求めている。数値解析により排水負荷取引という考えを導入した場合の効果を評価し、排水負荷取引が環境問題解決のための有用な概念であることを明らかにしている。

第７章は、本論文で得られた成果を要約したものである。本論文の第１部では環境に対して一方的に汚濁負荷を与える人間とそれを受容している自然との数学・物理的な関係をモデル化したシステムを提案し、第２部では汚濁を受容しているが甘受しているのではない自然と自然に配慮する人間との関係を第１部で確立した数学・物理的なシステムを用い解析することにより削減目標を算定している。第３部では人間集団と人間集団が協力しながら自然に対して負荷量削減の方向へ誘導する方策をゲーム理論によって論じている。このように本論文は３つの考え方に従ってそれぞれの問題について解析し、環境問題解決のための有効な施策を提案したものである。

第２章　内海･内湾水域における環境負荷の伝播モデル

２－１　緒　　言

近年、高度経済成長期に産業規模が拡大するとともに都市部に対する人口集中が生じ、そこに隣接する内海･内湾地域においては環境汚染が極度に進行し水質の悪化は避け難いものとなった。既存の工業、漁業、観光業だけでなく市民生活にまで悪影響をもたらすに及んで沿岸域から流入する汚濁物の削減を目的とした対策のための調査が行われた。施策の検討が行われる中で比較的費用効果の大きいものから順に実行に移されてきているが目標到達には至っていない。そこで執られるべき施策の評価や効果の予測を行うための水質管理シミュレーション・システムの構築が要請され研究や調査も数多くなされている[1-5,22]。

本論文では内海･内湾地域の例として大阪湾をとりあげ、まずこの海域における汚濁物質によって汚染された水質を再現する環境負荷伝播モデルを構築・定式化し、それに基づいて富栄養化現象のシミュレーションを行い、対象地域の水質改善のための方策とその効果を評価することを目的とする。本論文で構築する環境負荷伝播モデルにより水質をシミュレーションできるようなシステムを行政上の環境改善施策の提案にまで結び付けることができれば、このようにして得られた水質再現・管理システムは一般の内海･内湾地域へも広く活用されるものと考えられる。

このような水質管理シミュレーション・システムは従来、大規模大容量の情報処理装置により構築すべきであると考えられてきたが、最近の電子技術、情報処理技術の目ざましい進展により、このようなシステムをパーソナルユースのコンピュータ上で実現することが可能な時期が到来しており、環境改善施策を日々実行する行政庁の担当が簡易に扱えるようなシステムが要望されている[5-7]。

本論文では、まずコンピュータでは処理しきれない潮汐流の計算を切り離し節を設けて解析する。

図２－１がシステムの全容である。図の最下に本章の水質再現計算部が入る。その上が第３章の陸域の汚濁負荷集計部分で最上に水質改善施策部の第４章が位置している。本章においては、水質管理システムを開発するため潮流計算、実測データの収集や先行研究の調査などの準備を整えた上、モデルの提案を行い定式化することにしている。陸域の汚濁負荷をコンピュータに入力して計算を実行した結果を水質観測値と

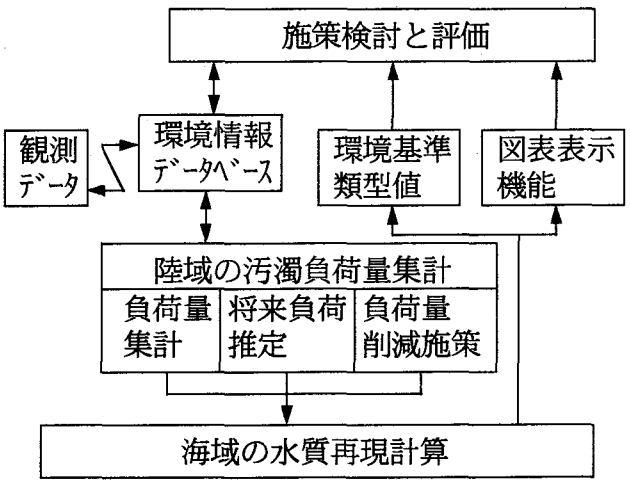


図2-1 水質管理システム

比較検討している。２－２節が水質解析の基礎となるスーパーコンピュータに依る潮汐流の解析に基づく環境負荷伝播モデルを提案し、２－３節では前述の数理的モデルを定式化しコンピュータに陸域の汚濁負荷を入力し水質再現計算を実行している。２－４節において作用反応モデルに基づいた水質方程式により計算された結果を評価した上で、同システムを用いて西暦２０００年の水質予測計算を行い、２－５節で現況再現計算値と将来予測の結果を評価している。２－６節は結論であって本章で得られた研究成果を要約している。

２－２　環境負荷伝播モデルと潮汐流の解析・再現計算

一般に海域に流入した汚濁物質、あるいはすでに海域に含まれている汚濁物質、たとえばプランクトンや懸濁物質、溶解物質は潮汐流すなわち海水の流れにともなって力学的に運搬されるが、海域においてはこのような物質の移流だけでなく物質の拡散現象も存在している。移流とは時間的空間的に物質が海水の流れによって運ばれる現象であり、拡散とは溶液の中でそれに溶け込んでいる物質の濃度が場所によって違っているため濃度の大きい所から小さい所へと溶質の流れが生じることをいう。ただし、拡散現象としては渦動粘性に基づく物質拡散よりも流れのせん断応力の偏りによる断面内の濃度伝幡、すなわち移流分散の方が大きい。さらに、潮汐流では満ち潮と引き潮を変動成分とし恒流を移流成分とする流体塊の流れ場での混合現象があり、この現象のスケールも瀬戸内海ではさらに卓越すると言われている。しかし、一般には海域における海水の流れに対しては移流は潮汐流のような平均流によって海水が運ばれる現象を意味するのに対して、拡散は流れの平均流からのずれにより運ばれる現象として扱われている。そこで、以下では海水自体の流れである潮汐流を、非圧縮性粘性流体に関するナビア・ストークスの運動方程式と連続方程式に基づいて解析し、拡散は拡散方程式を用いて考察する[8,9]。

１）潮汐による移流

いま、対象としている海域での平均海面の一点を原点としｘ，ｙ両軸をその平均海面上にとり、ｚ軸を鉛直上方向にとった直交座標系を図２－２のように定義する。注目している海水中の一点(x,y,z)における時刻ｔの潮汐流の流速を(u, v, w)とする。ここで、u, v, wはそれぞれ流速のｘ軸成分、ｙ軸成分、ｚ軸成分を表している。

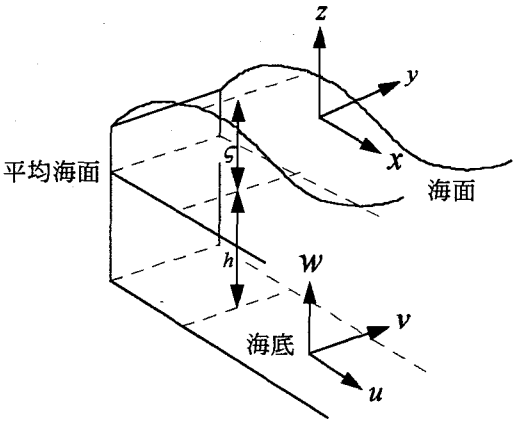


図2-2 潮汐流の座標

環境庁資料「東京湾水域環境予測1988」より

つぎに、点(x,y,z)における微小六面体($\Delta x, \Delta y, \Delta z$)における物質の収支を考えるとき、海水の密度を$\rho = \rho(x,y,z)$とすると、一般に

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial(\rho u)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho v)}{\partial y}+\frac{\partial(\rho w)}{\partial z}=0 \qquad (2-1)$$

が成り立つ。さらに海水は非圧縮性流体であり、内海および内湾の湾口付近を含む広域の流動と物質移動を比較すると、内湾などの奥部で生じている流入水による密度流等の効果を無視し、その密度ρは場所時間を問わず一定とみなされる場合、連続の方程式として

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial w}{\partial z}=0 \qquad (2-2)$$

がえられる。

一方、海水の移流は連続媒質の粘性流とみなされるが、その微小部分の運動はニュートンの第２法則に従うことから、運動方程式として

$$\frac{\partial u}{\partial t}+u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}+w\frac{\partial u}{\partial z}=X-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x}+\upsilon\nabla^2 u$$

$$\frac{\partial v}{\partial t}+u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}+w\frac{\partial v}{\partial z}=Y-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x}+\upsilon\nabla^2 v$$

$$\frac{\partial w}{\partial t}+u\frac{\partial w}{\partial x}+v\frac{\partial w}{\partial y}+w\frac{\partial w}{\partial z}=Z-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x}+\upsilon\nabla^2 w \qquad (2-3)$$

が成り立つ。式（２－３）はナビア・ストークスの方程式と云われている。ただし、上記右辺のX、Y、Zはそれぞれx、y、z方向に働いている外力を表し、p は点(x,y,z)に働く圧力を表している。また、μは粘性係数であって、$\nu=\mu/\rho$は動粘性係数といわれていて式（２－３）のそれぞれの式の第３項は粘性力を表しており、記号∇^2はラプラシアンで、つぎのように定義されている。

$$\nabla^2=\frac{\partial^2}{\partial x^2}+\frac{\partial^2}{\partial y^2}+\frac{\partial^2}{\partial z^2} \qquad (2-4)$$

さて、比較的大きな海域を対象とする場合、水平面に働く外力X、Y、Zとしては地球の自転に伴うコリオリの力を無視することはできない。一方、鉛直方向には地球の重力が作用しており外力として取り扱うが、潮汐を引き起こす月と太陽の引力の影響は後に示すように境界条件として取り入れることにする。このようにすると式（２－３）はつぎのように表される。

x方向

$$\frac{\partial u}{\partial t}+u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}+w\frac{\partial u}{\partial z}$$
$$=fv-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x}+\upsilon_x\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}+\upsilon_y\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}+\upsilon_z\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \qquad (2-5)$$

y方向

$$\frac{\partial v}{\partial t}+u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}+w\frac{\partial v}{\partial z}$$
$$=-fu-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial y}+\upsilon_x\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}+\upsilon_y\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}+\upsilon_z\frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \qquad (2-6)$$

z 方向

$$\frac{\partial w}{\partial t}+u\frac{\partial w}{\partial x}+v\frac{\partial w}{\partial y}+w\frac{\partial w}{\partial z}$$
$$=-g-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial z}+\upsilon_x\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}+\upsilon_y\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}+\upsilon_z\frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \qquad (2-7)$$

ただし、上式において地球自転の影響を表すコリオリ係数 f は、地球自転の角速度を ω、対象海域の緯度を ϕ とするとき、$f=2\omega\sin\phi$ と表せる。また p は静水圧、g は重力加速度で、$\upsilon_x,\upsilon_y,\upsilon_z$ はそれぞれ x、y、z 方向の海水の動粘性係数を表す。さらに上式において、たとえば式（２－５）の左辺は x 方向の加速度を表しており、右辺の第１項は地球自転の x 方向への影響、第２項は水圧、第３、４、５項は粘性力を表している。

ところで、潮汐流などの長周期の現象を対象に解析する場合には、式（２－７）における $\partial w/\partial t,\partial^2 w/\partial x^2,\partial^2 w/\partial y^2,\partial w/\partial z^2$ などの w に関する項は g および $\partial p/\partial z$ に対して無視して静水圧近似することができるとされている。また動粘性係数について水平成分を $\upsilon_H(=\upsilon_x=\upsilon_y)$ と鉛直成分を υ_v と表すことにすると、式（２－５）～（２－７）はつぎのようになる。

$$\frac{\partial u}{\partial t}+u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}+w\frac{\partial u}{\partial z}$$
$$=fv-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x}+\upsilon_H\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right)+\upsilon_v\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \qquad (2-8)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t}+u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}+w\frac{\partial v}{\partial z}$$
$$=-fu-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial y}+\upsilon_H\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right)+\upsilon_v\frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \qquad (2-9)$$

$$0=-g-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial z} \qquad (2-10)$$

以上に示した連続方程式（２－２）、運動方程式（２－８）、（２－９）および（２－１０）が潮汐流解析の基本式となる。

さて、これまでに比較的によく採用されている富栄養化を主体とした水質予測モデルは、鉛直方向の移流は小さいとして無視した二次元モデルであって、つぎのような取扱いがなされている。まず

$$u=U+u',v=V+v',w=W+w'$$

とおくことにする。U、V、Wは、それぞれ x、y、z 方向の平均流速を表しており、u',v',w' は微小項であって

$$\int_{-h}^{\zeta}u'\,dz=0,\int_{-h}^{\zeta}v'\,dz=0,\int_{-h}^{\zeta}w'\,dz=0$$

と考えられ、さらに鉛直方向の流れWの値も一定で小さいものとしている。このことを考慮に入れて式（２－２）と式（２－８）～式（２－１０）をそれぞれｚに関して海底（$z=-h$）から海面（$z=\zeta$）まで積分して流量に関する方程式に改めることにする。

まずu関する積分値をM、vに関するそれをNとすると

$$M=\int_{-h}^{\zeta} u\,dz=(h+\zeta)U,\ N=\int_{-h}^{\zeta} v\,dz=(h+\zeta)V$$

となることに注目する。以上の仮定と記号を用いると、次式がえられる。

$$\frac{\partial M}{\partial t}+U\frac{\partial M}{\partial x}+V\frac{\partial M}{\partial y}+W\left\{(u)_{z=\zeta}-(u)_{z=-h}\right\}$$
$$=fN-gH\frac{\partial \rho}{\partial x}+L\left(\frac{\partial^2 M}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 M}{\partial y^2}\right)+\left(\upsilon_v\frac{\partial u}{\partial z}\right)_{z=\zeta}-\left(\upsilon_v\frac{\partial u}{\partial z}\right)_{z=-h} \qquad (2-11)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t}+U\frac{\partial N}{\partial x}+V\frac{\partial N}{\partial y}+W\left\{(u)_{z=\zeta}-(u)_{z=-h}\right\}$$
$$=fM-gH\frac{\partial \rho}{\partial y}+L\left(\frac{\partial^2 N}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 N}{\partial y^2}\right)+\left(\upsilon_v\frac{\partial v}{\partial z}\right)_{z=\zeta}-\left(\upsilon_v\frac{\partial v}{\partial z}\right)_{z=-h} \qquad (2-12)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t}=-\frac{\partial M}{\partial x}-\frac{\partial N}{\partial y} \qquad (2-13)$$

ここで、

$$H=(\zeta+h),\ U=\frac{M}{H},V=\frac{N}{H},L=\upsilon_H$$

と置いてあるが、Lは水平渦動粘性係数で、$H=\zeta+h$は海面から海底までの水深を意味しており、U、Vはそれぞれx、y方向における平均流速でx、yの関数である。また、式（２－１１）、（２－１２）の右辺の第２項は、それぞれ式（２－１０）より得られ、式（２－１３）は連続の方程式より導かれたものであり、海面に対する潮汐の影響を考慮するため海面の水位は

$$z=\zeta(x,y;t)$$

と表している。

ところで、式（２－１１）、（２－１２）の右辺の第４、５項はそれぞれ海面での風の力、海底における摩擦力を意味しており、海面における風の力のx、y成分をそれぞれW_x,W_yとし、

r_a^2 ：海面摩擦係数、　　r^2 ：海底摩擦係数

とすると、次式が成り立つことが知られている。

$$\left(\upsilon_v\frac{\partial u}{\partial z}\right)_{z=\zeta}=r_a^2W_x\sqrt{W_x^2+W_y^2}$$

$$\left(\upsilon_v \frac{\partial v}{\partial z}\right)_{z=\zeta} = r_a^2 W_y \sqrt{W_x^2 + W_y^2}$$

$$\left(\upsilon_v \frac{\partial u}{\partial z}\right)_{z=-h} = r^2 U \sqrt{U^2 + V^2}$$

$$\left(\upsilon_v \frac{\partial v}{\partial z}\right)_{z=-h} = r^2 V \sqrt{U^2 + V^2} \qquad (2-14)$$

上に誘導した式（２－１１）～（２－１３）はU、V、ζを未知量とする連立偏微分方程式であって、これが潮汐流の基本式である。

この潮汐流基本式（２－１１）～（２－１３）で記述された連立微分方程式の前二式は非線形であるため簡単には解は求められなく、数値計算のためには離散化を行わなければならない。また、潮汐流を求めるためこの連立微分方程式を解く際の初期条件と境界条件を設定しなければならないが、通常の方法にならい、つぎのように設定する。

初期条件：対象海域内のすべての点で潮位および流速をゼロとする。

境界条件：開境界である西部境界（明石海峡のやや西に設定）および南部境界（紀伊水道のやや南に設定）における潮汐による潮位の周期的変動をそれぞれ

$$\zeta = a\cos\left(\frac{2\pi}{T}t - \frac{\pi}{180}\kappa\right) \qquad (2-15)$$

の形で与えることにする。ただし、

ζ：潮位
a：半日周期（１２時間）の潮位の半振幅（ｃｍ）
κ：半日周期の潮位の遅れ角（度）
t：時刻（ｓｅｃ）
T：１周期の時間長（ｓｅｃ）

である。

２）濃度による拡散

海水中に含まれている物質の量による濃度勾配がある場合、濃度平衡に近づくように運動する現象を指し、本節の始めで説明した渦動流による拡散とは異なる。そこで、海水の移流が存在する場合の拡散については、拡散物質の単位体積当たりの質量、すなわち濃度をcとするとき、流速場（u、v、w）における拡散現象は次式で記述される。

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u\frac{\partial(cu)}{\partial x} + v\frac{\partial(cv)}{\partial y} + w\frac{\partial(cw)}{\partial z}$$
$$= \frac{\partial}{\partial x}\left(D_x \frac{\partial c}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(D_y \frac{\partial c}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(D_z \frac{\partial c}{\partial z}\right) + q \qquad (2-16)$$

ここで、D_x, D_y, D_zはそれぞれx、y、z方向の拡散係数であり、qは点x、y、zにおける単位体積当たり発生、または消滅する物質の量を表している。

式（２－１６）の左辺の第２、３、４項は移流項、右辺の第１、２、３項は拡散項、qは物質変化項と呼ばれている。定常拡散の場合は、上式の左辺の時間微分の第１項は消えることになる。

いずれにせよ、河川から海域に流入する淡水は塩分濃度の高い海水と接触して拡散現象が起こる。移流の解析の場合と同様に、式（２－１６）を水深方向に積分して２次元化した式を考察することもよく行われるが、この場合は流れu、vおよび濃度cは、単位底面積をもち高さが海底から海面までの水柱における空間的な平均量となる。

３）二次元二層モデルによる定式化

上に述べた環境負荷伝播モデルで最も簡単なものは、単純に流れを水平方向の二次元だけとし鉛直方向の流れを無視した単層モデルであり、その場合には式（２－１１）および（２－１２）の右辺の第４項は、当然のことながら消えてしまう。実際には、汚濁現象を考察する場合には太陽の輻射熱による水温の上昇が大で光合成による植物プランクトンの増殖が活発に行われる海面に近い上層と比較的その影響の小さい下層に分ける必要があり、さらに水深方向の流速の変化をも考慮しなければならず、二次元二層レベルモデルが導入されている。

そこで、連続の方程式（２－２）、運動の方程式（２－１１）～（２－１３）、拡散の方程式（２－１６）において$M=(h+\zeta)U, N=(h+\zeta)V$を用いて、変数$M,N$を$U,V$に変えることにする。ただし、海面における連続の方程式は潮位の時間的変化を考慮しなければならず、さらに濃度の拡散現象に関しては上層、下層の鉛直方向による海水の移流の効果を導入する必要がある。

ここで、

U_i, V_i　：ｉ層目のx、y方向の平均流速

W　：鉛直方向の流速

w_x, w_y　：x、y方向の風速

K_x, K_i　：水平拡散係数、鉛直混合係数

$h_i\ c_i$　：ｉ層目の厚さ、濃度

c^*は　$w>0$　なら$c^*=c_2, w<0$　なら　$c^*=c_1$

の記号を用いると次式が誘導される。

１）連続の式

上層　$$\frac{\partial\zeta}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}\left[U_1(\zeta+h_1)+U_2h_2\right]+\frac{\partial}{\partial y}\left[V_1(\zeta+h_1)+V_2h_2\right]-W=0$$

下層　$$\frac{\partial(U_2h_2)}{\partial x}+\frac{\partial(V_2h_2)}{\partial y}+W=0 \qquad (２－１７)$$

2）運動方程式

上層

$$\frac{\partial U_1}{\partial t}+U_1\frac{\partial U_1}{\partial x}+V_1\frac{\partial U_1}{\partial y}+W\frac{U_1-U_2}{2(\zeta+h_1)}$$
$$=-fV_1-\frac{1}{\rho_1}\left(\frac{\partial p}{\partial x}\right)_1+L\left(\frac{\partial^2 U_1}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 U_1}{\partial y^2}\right)$$
$$-\frac{r_1^2(U_1-U_2)\sqrt{(U_1-U_2)^2+(V_1-V_2)^2}}{\zeta+h_1}$$
$$+\frac{r_1^2 W_x\sqrt{W_x^2+W_y^2}}{\zeta+h_1}$$

$$\frac{\partial V_1}{\partial t}+U_1\frac{\partial V_1}{\partial x}+V_1\frac{\partial V_1}{\partial y}+W\frac{V_1-V_2}{2(\zeta+h_1)}$$
$$=-fU_1-\frac{1}{\rho_1}\left(\frac{\partial p}{\partial x}\right)_1+L\left(\frac{\partial^2 V_1}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 V_1}{\partial y^2}\right)$$
$$-\frac{r_1^2(V_1-V_2)\sqrt{(U_1-U_2)^2+(V_1-V_2)^2}}{\zeta+h_1}$$
$$+\frac{r_1^2 W_x\sqrt{W_x^2+W_y^2}}{\zeta+h_1}$$

下層

$$\frac{\partial U_1}{\partial t}+U_2\frac{\partial U_2}{\partial x}+V_2\frac{\partial U_2}{\partial y}+W\frac{U_1-U_2}{2\,h_2}$$
$$=-fV_2-\frac{1}{\rho_2}\left(\frac{\partial p}{\partial x}\right)_2+L\left(\frac{\partial^2 U_2}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 U_2}{\partial y^2}\right)$$
$$-\frac{r_2^2(U_1-U_2)\sqrt{(U_1-U_2)^2+(V_1-V_2)^2}}{h_2}$$
$$+\frac{r_2^2 U_2\sqrt{U_2^2+V_2^2}}{h_2}$$

$$\frac{\partial V_2}{\partial t}+U_2\frac{\partial V_2}{\partial x}+V_2\frac{\partial V_2}{\partial y}+W\frac{V_1-V_2}{2h_2}$$
$$=-fU_1-\frac{1}{\rho_1}\left(\frac{\partial p}{\partial x}\right)_1+L\left(\frac{\partial^2 V_1}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 V_1}{\partial y^2}\right)$$
$$-\frac{r_2^2(V_1-V_2)\sqrt{(U_1-U_2)^2+(V_1-V_2)^2}}{h_2}$$
$$+\frac{r_2^2 V_2\sqrt{U_2^2+V_2^2}}{h_2} \qquad (2-18)$$

3）濃度の拡散式

上層
$$\frac{\partial}{\partial t}\left[c_1(\zeta+h_1)\right]+\frac{\partial}{\partial x}\left[U_1(\zeta+h_1)c_1\right]$$
$$+\frac{\partial}{\partial y}\left[V_1(\zeta+h_1)\right]+Wc^*-\frac{\partial}{\partial x}\left[K_x(\zeta+h_1)\frac{\partial c_1}{\partial x}\right]$$
$$+\frac{\partial}{\partial y}\left[K_x(\zeta+h_1)\frac{\partial_1}{\partial y}\right]+K_i(-c_1+c_2)=0$$

下層
$$\frac{\partial}{\partial t}\left[c_2h_2\right]+\frac{\partial}{\partial x}\left[U_2h_2c_2\right]$$
$$+\frac{\partial}{\partial y}\left[V_2h_2c_2\right]+Wc^*-\frac{\partial}{\partial x}\left[K_xh_2\frac{\partial c_2}{\partial x}\right]$$
$$-\frac{\partial}{\partial y}\left[K_xh_2\frac{\partial c_2}{\partial y}\right]+K_i(c_1-c_2)=0 \qquad (2-19)$$

さて、以上の連立微分方程式を解くための基本的考え方としては、差分法に基づいて時間的、空間的に離散化を行い、適当に設定した密度ρの初期値を連続の式（２－１０）および運動方程式（２－１１）に代入して△ｔ後の流速U、V、Wおよび潮位ζの値を求め、これらの値を密度の拡散方程式（２－１２）に代入して新しい濃度cの値を決定し、この更新された密度の値に基づいて連続の式と運動方程式より次の時刻における流速U、V、Wおよび潮位ζの値を求めるというように繰り返し計算して、U、V、W、ζ、cすべての変数が安定した周期解に達するまで計算を実行するのである。これまでに、計算機によって精度よく安定した解を求めるための数値解法について多くの方法[3,4,8,9]が提案されているが、いずれにせよ数値計算のためには大型計算機を用いなければならない。しかも厳密な解をうるためには時間的、空間的に精密な離散化を行わなければならないため莫大な記憶容量が必要であり、計算時間も長くなり計算費用も嵩むことになる。さらに、実際に即した解析を行うためには、より精密なモデルを構築しなければならなく、計算費用の制約はより厳しくなる。以上に指摘したように潮汐流の再現計算は、演算量が膨大であるのでスーパーコンピュータが用いられている。図２－３は、ここで対象としている大阪湾について行われた上･下２層の離散化モデルで、東経１３５度、北緯３４度２０分を基準にして１ km 角に区切った格子（約 3200 点）上に計算結果を表示したもので、計算の一例として夏季における上層の恒流の再現結果が表示されている。矢印の大きさは流速を表しており第五管区海上保安本部水路部の担当者にヒアリングを行い概ね妥当と判断されている。

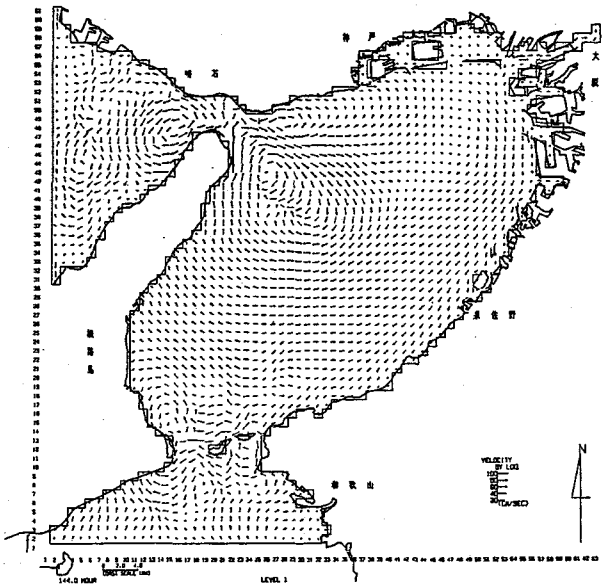


図２－３　潮流再現図（大領域、恒流、夏季、上層）

表２－１　境界条件

開境界	半振幅(cm)	遅角(°)
西部境界	29.0	333.0
南部境界	46.0	185.0

つぎに、潮汐流計算のための境界条件として潮位振動を与える式（２－１５）のデータを表２－１に示す、一方、初期条件としては、対象海域内のすべての格子点で潮位および流速をゼロとしたが、計算の結果は５周期で定常状態に達している。次にコンピュータによる潮汐流計算の考え方を述べる。この節で大型計算機による潮汐流の再現計算結果を示した。大阪湾では上に得られた恒流だけでなく潮汐残差流の方が卓越しているといわれており、より精密なモデルによる計算が必要ではあるが、ここではそのような大型計算機で得られた詳細な結果を利用してコンピュータを用いて比較的簡単で精度の悪くない解が得られるような水質予測、評価、管理システムをコンピュータ上に開発することを目的としている。潮汐流から計算された移流量データや海域で毎月観測されている水質観測データ、陸域からの汚濁物負荷量データによりコンピュータを用いて水質の再現計算を行うのである。

２－３　非保存系作用反応プロセスとしてのボックスモデル

研究対象地域(大阪湾)の水質をコンピュータ上に表現することは水質の変化を把握するため必要である。この水質管理システムを構築するためには大阪湾(海域)での富栄養化現象のモデル化をまず行わなければならない。これまでに、水質を再現・予測するモデルとして各種の方式が提案されており、実水域に適用された多数の報告例がある[11-16]。それを大別すると次のようになる。

① モデルにおける変数の平面的な空間分布の表現方法により、メッシュモデルとボックスモデルに分類できる

② 物質循環過程取扱いにより保存モデルと非保存モデルに分類できる

ここで、①のメッシュモデルとは対象領域を図２－３のような対象を細かな格子状に分割し、各格子交点での水質の状態を表現する方法である。これを解析する方法として有限要素法と差分による方法があるがここでは後者を用いる。後者のボックスモデルとは対象平面空間を平均化し定量化を行うものである。②の物質循環過程を表現する保存モデルとは化学的酸素要求量（ＣＯＤ）のような本来非保存性のものであっても近似的に保存性とみなすものであって、単一の拡散物質の流れによる移流と拡散だけを考慮するモデルである。海域内の諸物質の循環を表すには出来るだけおおまかな仮定をおき簡素に表現する事が望ましい。

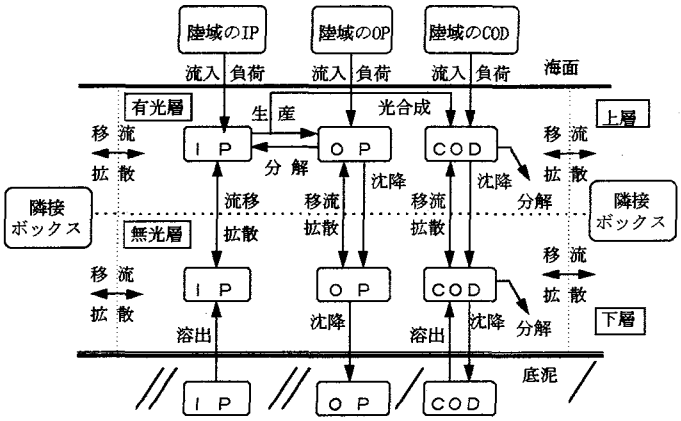


図２－４　物質循環過程

詳しくは後述するが図２－４に示すような、物質循環過程をモデル(作用反応モデル)として考える。ところが、メッシュモデルは詳細な計算が行える利点があるが、スーパーコンピュータを使用しなければならず膨大な計算時間と計算費用がかかる。これに対して、ボックスモデルは一般に空間代表点の数が少なく、水質計算に必要な諸係数や入力データの空間分布の特性の把握、境界条件の処理が簡便であるが、空間平均化による誤差が大きい。

本論文では、大阪湾のような規模の水質測定経験によると微細な現象の追求よりも巨視的な観測データに対する再現を試みるのにはマクロの解析の方が本質を見失わないために重要であると考え、ボックスモデルで作用反応モデルとして充分富栄養化現象を表せることができるため、ボックスモデルを採用する。ただし、海域に対応する垂直空間を２分割して立体モデルとして若干の修正を施している[17]。また、物質の循環として COD とリンによる非保存モデルを採用する。このモデルでは、移流と拡散の他に沈降などの物理的過程、生産・分解・溶出などの生物化学的過程を組み込んで解析する。

１）対象領域のボックス分割と諸係数の決定

ボックスモデルを採用するに当たり、対象領域である大阪湾について述べる。大阪湾は面積 1500k ㎡、容積 42km³、平均水深 17.2m の陥没湾であって、特に、湾奥の沿岸には人口密度の高い地域が広がっている。大阪湾内に注ぐ主要河川も湾奥に集中し武庫川、藻川、神崎川、淀川、大和川等がそれで、これらの河川の後背地としては兵庫県東南部、大阪府、京都市とその近郊があり、さらに奈良市を含む奈良県北部も含まれる。大阪湾全体では、琵琶湖を介して流入する滋賀県全域等を入れると約 10,000k ㎡が流域となっている。

大阪湾は、北西部の明石海峡を経て瀬戸内海の播磨灘と接し、南は紀淡海峡で紀伊水道

とつながり太平洋に通じている。また、河川の多い東北部が水深 20m 以下の浅い部分となっており、全湾流入水量の約 90%（420 トン/s）が湾奥の河川から湾内に流入しており汚濁源となっているが、一方、西南部は水深 90m 前後であり、潮汐によって太平洋の塩分濃度の高い海水と交換が行われている。

さて、大阪湾水質管理システムを具体的に構築するに当たっては、大型計算機の解析で用いられた詳細なメッシュモデルとは異なり的確なボックス分けをする必要がある。ボックス分割は主要なものから次の順に検討を加えることにする。

①潮汐流計算用格子線
②瀬戸内海水質汚濁防止法により設定された水質基準類型の地域分割の線
③クラスター分析による類似水質域
④潮汐流による影響
⑤単位計算時間内に移動する水量とボックス容量の間の比
⑥コンピュータの記憶容量

さらに、ボックスの分割には大領域と小領域の２通りを考える。各上下２層に分け上層と下層の境界は海面から 8m に設定する。図２－６に示す大領域と名付けた区域は、湾内の全域での水質変化の推移を見たり施策効果を検討するため湾全体を対象とするものであって、西は明石海峡、南は友が島水道で囲まれた範囲とし、東西南北に１ km 毎に区切ったメッシュを作り１１個のボックスを設ける。なお、大領域の外側には外界の水質との調整を行うためにダミーボックスをそれぞれ１個設ける。

つぎに、小領域とは大阪湾でも特に汚濁の激しいとされている湾奥を対象として細かい施策効果をみるために導入したものである。具体的には大阪湾沿岸部の神戸港から大阪港、堺港湾域を含む区域を対象とする。小領域としては、大領域の $1km^2$ をさらに 16 等分割して 250m×250m の格子にしている。ただし、この区域は透明度も低く水深も浅いので小領域の上層厚を大領域の８ m から４ m に変更する。さらに対象としている小領域の外側には、５つのボックスを外界との調整のために設定する。これらのボックスの境界条件は、大領域の水質再現計算結果を用いる。以上で得られたボックス分割を図２－７に示す。

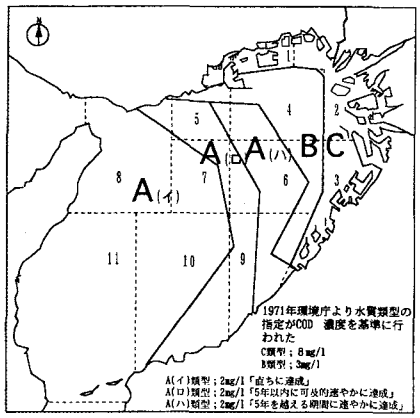


図２－５環境基準類型図

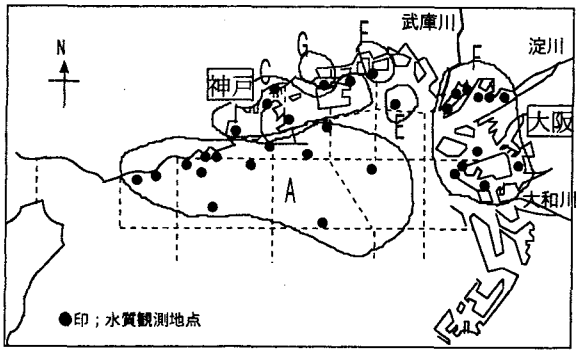


図２－６クラスター分析例（小領域．夏季）

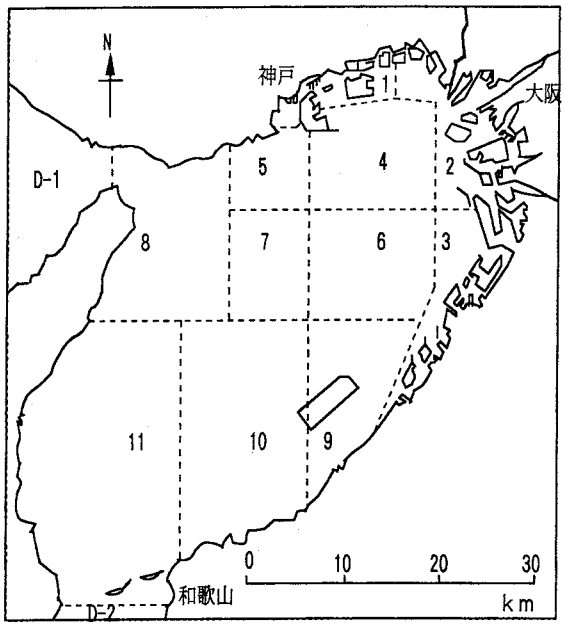


図２－７　ボックス分割(大領域)

表2-2 大領域ボックスの平均深さ・面積・体積

ボックス番号	m 平均深さ	km² 面積	体積km³ 上層	体積km³ 下層
1	11.6	38.0	0.3780	0.0867
2	10.0	69.0	0.6030	0.0821
3	11.8	62.0	0.5710	0.1248
4	16.3	125.0	1.2500	0.9402
5	17.4	55.0	0.5500	0.5303
6	17.8	128.0	1.2800	1.0945
7	37.0	80.0	0.8000	2.1294
8	45.8	177.0	1.7700	5.8267
9	15.0	121.0	1.1870	0.8180
10	27.4	241.0	2.3970	5.0853
11	47.5	339.0	2.9500	11.8270

① 大領域のボックス分割と諸係数

大領域の具体的なボックス分割に当たっては、海図（第 150 号、大阪湾、海上保安庁水路部、 1:80000）を基礎とした。ただし、汎用大型計算機を使って得られた潮流計算を利用するため 1km の格子毎に算出されたデータのうち各ボックスの境界のものだけを取り出しボックスに出入りする移流量としている。図２－７の大領域に示すように播磨灘には D-12 というダミーボックスを設ける。また紀淡海峡の南にも同じく D-13 を設ける。

○ボックス面積と体積

汎用大型計算機による潮流計算結果ファイルにおいて 1km メッシュの数を数えるようにプログラムを組み各ボックスの面積を求めた。また、各メッシュの平均深さをボックス毎に計算して、求めたボックス面積を乗じてボックスの体積を求めた。その結果を表２－２に示す。

○隣接ボックスとの接触面積

各々のボックスの水平接触距離と水深データより断面図を描き計算するという方法で隣接しているボックスとの接触面積を求めた。この結果を付録の付表２－１に示す。以下、付録に記載する図表に付いては前に「付」を付けて示してある。

○ボックスの重心間距離

各ボックスを多角形とみなし、それぞれの重心を求めた。まず最初にその多角形をいくつかの三角形か四角形に分けそれぞれの重心を求める。

そしてその重心を結んでもう一度多角形を作る。以下、同様の操作を繰り返して重心を求めた。さらに各ボックスに関して隣接しているボックスの重心間距離を上層、下層において求めた。これらの結果を付表２－２に示す。また、各ボックスにおける上層、下層間における重心間距離も求めた。これを付表２－３に示す。

2）　小領域のボックス分割と諸係数

前節の大領域のボックス分割と同様の海図を使い潮流計算も 250m の格子上で行っている。海岸線も地図上のものでなく 250m メッシュ線に沿って変形している。

小領域のボックスは図２－８に示すように 14 個で上下２層に分かれている。また小領域の外にある大領域部分に 5 個のダミーボックスを設ける。なお、ボックス番号の左側の数字は大領域の番号を表す。

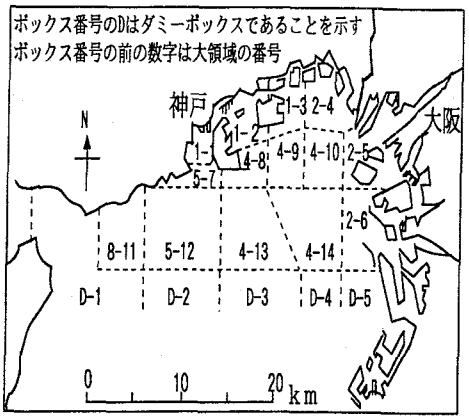


図２－８　ボックス分割(小領域)

○小領域のボックスの平均深さ、面積と体積

大型計算機のよる潮流計算結果ファイルについて 250m メッシュの数を数えるようにプログラムを組み、各小領域ボックスの面積を求めた。また各メッシュの平均深さをボックス毎に計算して、先に求めたボックス面積を乗じてボックスの体積を求めた。これらの結果を表２－３に示す。なお、小領域の上層厚さは、水深と透明度を考慮して 4m とする。

○小領域の隣接ボックス間の接触面積と重心距離

各々のボックスの水平接触距離と水深データより断面図を描き計算するという方法で隣接しているボックス間の接触面積を上下層について求めた。この結果を付表２－４示す。重心間距離は、大領域の場合と同様に各ボックスを多角形とみなし、それぞれの重心を求めた。また、各ボックスに関して隣接しているボックスの重心間距離を上層、下層において求める、計算結果を付表２－５に示す。また、各小領域ボックスの平均深さ、および上層、下層間における重心間距離を付表２－６に示す。

表2-3 小領域ボックスの平均深さ，面積および体積

ボックス番号	m 平均深さ	km² 面積	体積 km³ 上層	体積 km³ 下層
1 - 1	10.3	8.0	0.032	0.050
1 - 2	11.5	10.4	0.042	0.078
1 - 3	11.5	16.0	0.064	0.119
2 - 4	9.2	15.4	0.062	0.080
2 - 5	8.6	38.3	1.153	0.176
2 - 6	10.3	39.3	0.157	0.246
4 - 8	14.3	13.9	0.056	0.143
4 - 9	14.7	17.6	0.071	0.188
4 -10	12.5	11.3	0.045	0.095
4 -13	17.4	42.0	0.168	0.562
4 -14	15.5	36.0	0.144	0.413
5 - 7	13.9	4.8	0.019	0.047
5 -12	18.2	47.7	0.191	0.678
8 -11	26.4	23.8	0.095	0.534

２－４　作用反応モデルによる水質方程式

陸域から海中に流れ込む汚濁物による海域での富栄養化現象、すなわち生化学的な現象や物理的変化を作用反応モデルとして表現する。ただし、作用反応モデルに基づく海域の水質変化を物質の循環過程として表現し、この過程に対して次のような仮定を置き、図２－９(図２－４と同じ)６のような作用反応モデルの簡略化を行うことにする[17-20]。

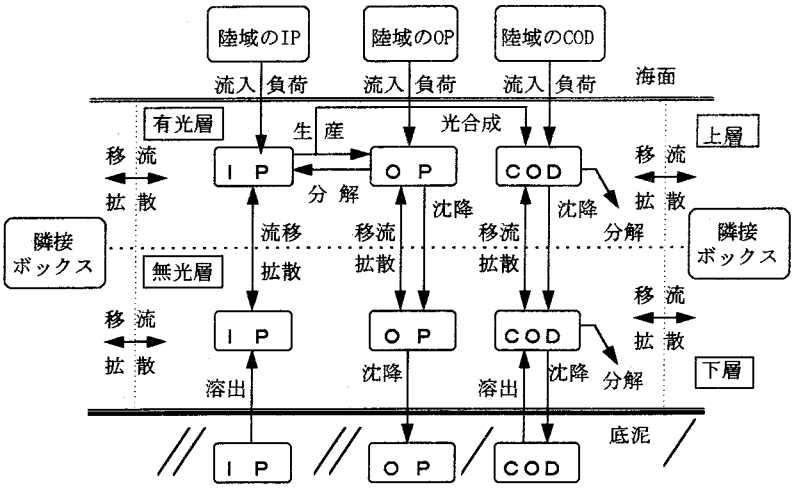


図２－９　物質循環過程

① 物質の循環過程を、栄養塩・植物プランクトンの段階でとどめプランクトンの基礎生産量に応じて有機物量を増減させる。特に、問題となる生産量は一次生産として支配されているとする。物質循環の過程をすべてモデルに組み込むことは不可能であり、必ずしもモデルの精度をあげることにはならない。

② 水質指標は、有機態リン（ＯＰ）と無機態リン（ＩＰ）、および有機汚濁物質の代指標である化学的酸素要求量（ＣＯＤ）を主たるものとする。生態学的なモデルに窒素(N)を反応系として捉え、また近年、指定場所や季節で窒素(N)が律速と言われる研究があるが問題を単純化するため、リンと COD を対象指標とする。

③ 海域を鉛直方向に上層と下層の２層に分割する。上層を有光層とする。

④ 陸域からの有機態リン(IP)の流入負荷は、そのまま植物プランクトンの増殖に使われる。ここでは有機態リン(OP)は海に流入した際、バクテリアにより無機態リン(IP)に分解される。

⑤ 物質循環過程としては、陸からの汚濁の流入負荷量、ボックス間での海水の移流、濃度差による汚濁物質の拡散、植物プランクトンの増殖、海底からの溶出、枯死による分解および沈降の７現象を取りあげる。

⑥ ＯＰ、ＩＰ、ＣＯＤは潮流による移流と拡散の影響を受けて水平および鉛直に拡散するものとする。

⑦ １年を夏冬の２期とし中間のみが続くとする。

（１）　海域観測データ

観測データは 1983 年から 1987 年の５年間に測定されたデータ(参照文献の資料 g,h)を用いる。大領域の観測データは大阪湾全体の海域に設けられた 30 か所の観測地点から求め、小領域の観測データは大阪湾奥部の海域に設られけた３６か所の観測地点から求める。各観測地において、無機態リン（Ｏ－Ｐ）、有機態リン（Ｉ－Ｐ）、化学的酸素要求量（ＣＯＤ）の上層、下層（水深から上層を差し引いた値）の値が観測されている。本論文では

7月、8月、9月のデータを夏季、12月、1月、2月のデータを冬季のデータとして採用した。

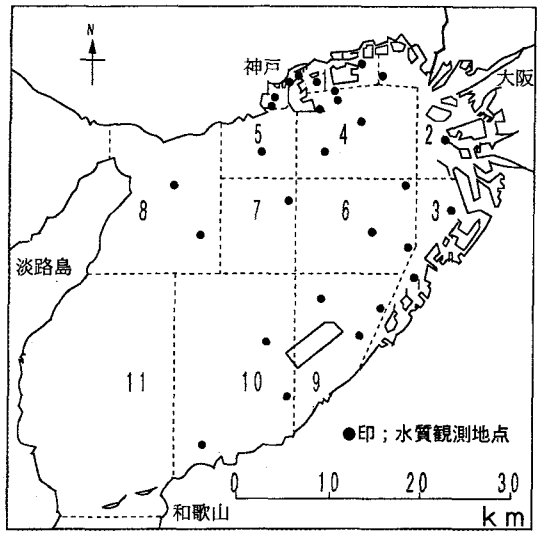


図２－１０　大領域の水質観測地点

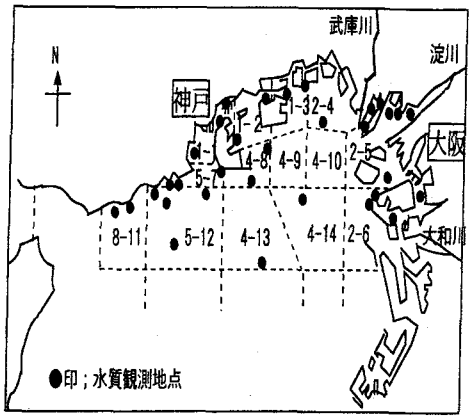


図２－１１　小領域の水質観測地点

具体的には、各観測地点を各ボックスに振り分け、各ボックス毎に上記観測データをまとめ、その最大値と最小値を除き残った観測データの平均値、変動範囲を求め水質再現結果との比較に用いることにする。付表２－７に大領域のボックス番号と地点名称の関係、付表２－８に小領域のボックス番号と地点名称の関係が示されている。また図２－１０に大領域の測定地点、図２－１１に小領域の測定地点が示されている。

（２）　水質方程式による作用反応モデルの定式化

１）ボックス収支

２－３節で提案した作用反応モデル(物質循環過程)の定式化を行い水質方程式と名付ける。すなわち、海域における水質方程式は、２－２節で論じた移流・拡散現象を記述する連続の式（２－－１７）、運動方程式（２－１８）および密度拡散の方程式（２－１９）に基づいてボックス分割による離散化に着目して定式化したものである。図２－８の循環過程に従って２層物質循環モデルの移動量を容量×濃度、すなわち、物質の移動量として捉えると、

［ボックス内の移動量の時間変化］

＝［隣接ボックスとの水平移流量］＋［上下ボックスとの鉛直移流量］
＋［隣接ボックス間の水平拡散量］＋［上下ボックス間の鉛直拡散量］
＋［上層での光合成による生産］＋［枯死による分解］
＋［下ボックスへの沈降］＋［底泥から下層への溶出］
＋［陸域から上層への流入負荷］

が成立することになる[21)]。

この水質方程式をコンピュータによって解くために、分割した各ボックスにおけるＯＰ、

ＩＰ、ＣＯＤの時間変化を以下に示す式（２－２１）～（２－２３）の連立微分方程式に書き換える。ただし、この連立微分方程式の解法は上層、下層それぞれについて定式化されている。連立微分方程式の解法には比較的精度が良いとされている５次ルンゲ・クッタ法を用いることにする。ところが、この連立微分方程式によって具体的に水質再現計算を行うためには、方程式のパラメータ、すなわち水平拡散係数K_h、鉛直拡散係数K_z、生産速度定数G、分解速度定数B、沈降速度定数S、溶出速度定数Rの６つのパラメータの実際の値が必要である。これらの値の設定については、後に述べる感度解析の項で説明する。

２）再生産による汚濁物の増加

いま、ＯＰ生産係数Gについては、次式で示されることが分かっている[16)]。

$$G = 0.463\exp\left\{0.07\left[(T-18)\frac{I}{2100+I}\right]\right\} \qquad (2-20)$$

ただし、Ｔは水温（℃）、Ｉは照度（Lux）である。

一方、式（２－２１）～（２－２３）の係数記号を有機リンを例に説明すると　$OP_{1,i}$の添え字１は上層をｉはボックス番号を表す。また$Q_{1,ik}$は上層ボックスｉからｋへの移流量を意味する。ただし、$Q_{i,k} \geq 0$なら$Q_{k,i} = 0$とする。また、ＩＰからＯＰへの光合成による変化を、生産係数βとしてＣＯＤ発生の度合いを示す。$F_{op,i}$はボックスｉへの陸からの流入量を示す。この約束の元に水質方程式の具体的な形を次に示す。なお、細かい記号説明は水質方程式のあとで示すことにする。

有機態リン（ＯＰ）

上層　$V_{1,i}\dfrac{dOP_{1,i}}{dt} =$

$$\sum_{k=1}^{n} Q_{1,ki}OP_{1,k} - \sum_{k=1}^{n} Q_{1,ik}OP_{1,i} \quad \cdots\cdots \text{水平移流}$$

$$+\overline{Q}_i^{21}OP_{2,i} - \overline{Q}_i^{12}OP_{1,i} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots \text{鉛直移流}$$

$$+\sum_{k=1}^{n} K_h D_{1,ki}\frac{OP_{1,k} - OP_{1,i}}{L_{1,ki}} \quad \cdots\cdots\cdots \text{水平拡散}$$

$$+K_z\overline{A}_i^{12}\frac{OP_{2,i} - OP_{1,i}}{\overline{L}_{z,i}^{12}} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots \text{鉛直拡散}$$

$$+GOP_{1,i}V_{1,i} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \text{生産}$$

$$-B_1^p OP_{1,i}V_{1,i} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \text{分解}$$

$$-S_1^p OP_{1,i}\overline{A}_i^{12} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \text{沈降}$$

$$+F_{OP,i} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \text{流入負荷}$$

下層　$V_{2,i}\dfrac{dOP_{2,i}}{dt}=$

$$\sum_{k=1}^{n}Q_{2,ki}OP_{2,k}-\sum_{k=1}^{n}Q_{2,ik}OP_{2,i}$$ ……水平移流

$$+\overline{Q}_i^{12}OP_{1,i}-\overline{Q}_i^{21}OP_{2,i}$$ ……鉛直移流

$$+\sum_{k=1}^{n}K_hD_{2,ki}\frac{OP_{2,k}-OP_{2,i}}{L_{2,ki}}$$ ……水平拡散

$$+K_z\overline{A}_i^{12}\frac{OP_{1,i}-OP_{2,i}}{\overline{L}_{z,i}^{12}}$$ ……鉛直拡散

$$-B_2^pOP_{2,i}V_{2,i}$$ ……分解

$$+S_1^pOP_{1,i}\overline{A}_i^{12}-S_2^pOP_{2,i}\overline{A}_i^{12}$$ ……沈降　　（２－２１）

無機態リン（ＩＰ）

上層　$V_{1,i}\dfrac{dIP_{1,i}}{dt}=$

$$\sum_{k=1}^{n}Q_{1,ki}IP_{1,k}-\sum_{k=1}^{n}Q_{1,ik}IP_{1,i}$$ ……水平移流

$$+\overline{Q}_i^{21}IP_{2,i}-\overline{Q}_i^{12}IP_{1,i}$$ ……鉛直移流

$$+\sum_{k=1}^{n}K_hD_{1,ki}\frac{IP_{1,k}-IP_{1,i}}{L_{1,ki}}$$ ……水平拡散

$$+K_z\overline{A}_i^{12}\frac{IP_{2,i}-IP_{1,i}}{\overline{L}_{z,i}^{12}}$$ ……鉛直拡散

$$-GOP_{1,i}V_{1,i}$$ ……生産

$$+B_1^pOP_{1,i}V_{1,i}$$ ……分解

$$+F_{IP,i}$$ ……流入負荷

下層　$V_{2,i}\dfrac{dIP_{2,i}}{dt}=$

$$\sum_{k=1}^{n}Q_{2,ki}IP_{2,k}-\sum_{k=1}^{n}Q_{2,ik}IP_{2,i}$$ ……水平移流

$$+\overline{Q}_i^{12}IP_{1,i}-\overline{Q}_i^{21}IP_{2,i}$$ ……鉛直移流

$$+\sum_{k=1}^{n}K_hD_{2,ki}\frac{IP_{2,k}-IP_{2,i}}{L_{2,ki}}$$ ……水平拡散

$$+K_z\overline{A}_i^{12}\frac{IP_{1,i}-IP_{2,i}}{\overline{L}_{z,i}^{12}}$$ ……鉛直拡散

$$+B_2^pOP_{2,i}V_{2,i}$$ ……分解

$$+R_{IP,i}\overline{A}_1^{12}$$ ……溶出　　（２－２２）

COD

上層 $V_{1,i}\dfrac{dCOD_{1,i}}{dt}=$

$$\sum_{k=1}^{n}Q_{1,ki}COD_{1,k}-\sum_{k=1}^{n}Q_{1,ik}COD_{1,i}$$ ‥水平移流

$$+\overline{Q}_i^{21}COD_{2,i}-\overline{Q}_i^{12}COD_{1,i}$$ ……鉛直移流

$$+\sum_{k=1}^{n}K_hD_{1,ki}\frac{COD_{1,k}-COD_{1,i}}{L_{1,ki}}$$ ……水平拡散

$$+K_z\overline{A}_i^{12}\frac{COD_{2,i}-COD_{1,i}}{\overline{L}_{z,i}^{12}}$$ ……鉛直拡散

$$+\beta G_p OP_{1,i}V_{1,i}$$ ……生産

$$-B_1^C COD_{1,i}V_{1,i}$$ ……分解

$$-S_1^C COD_{1,i}\overline{A}_i^{12}$$ ……沈降

$$+F_{COD,i}$$ ……流入負荷

下層 $V_{2,i}\dfrac{dCOD_{2,i}}{dt}=$

$$\sum_{k=1}^{n}Q_{2,ki}COD_{2,k}-\sum_{k=1}^{n}Q_{2,ik}COD_{2,i}$$ ‥‥水平移流

$$+\overline{Q}_i^{12}COD_{1,i}-\overline{Q}_i^{21}COD_{2,i}$$ ……鉛直移流

$$+\sum_{k=1}^{n}K_hD_{2,ki}\frac{COD_{2,k}-COD_{2,i}}{L_{2,ki}}$$ ……水平拡散

$$+K_z\overline{A}_i^{12}\frac{COD_{1,i}-COD_{2,i}}{\overline{L}_{z,i}^{12}}$$ ……鉛直拡散

$$+B_2^C COD_{2,i}V_{2,i}$$ ……分解

$$+S_1^C COD_{1,i}\overline{A}_i^{12}-S_2^C COD_{2,i}\overline{A}_i^{12}$$ ……沈降

$$+R_{COD,i}$$ ……流入負荷 （２－２３）

○記号説明

t	：	時間
$v_{1,i}$	：	Box i の体積（上層）
$v_{2,i}$	：	Box i の体積（下層）
$OP_{1,i}$	：	Box i のＯ－Ｐ濃度（上層）
$OP_{2,i}$	：	Box i のＯ－Ｐ濃度（下層）
$IP_{1,i}$	：	Box i のＩ－Ｐ濃度（上層）
$IP_{2,i}$	：	Box i のＩ－Ｐ濃度（下層）
$COD_{1,i}$	：	Box i のＣＯＤ濃度（上層）
$COD_{2,i}$	：	Box i のＣＯＤ濃度（下層）

$Q_{1,ki}$: Box k から Box i への水平移流量（上層）
$Q_{2,ki}$: Box k から Box i への水平移流量（下層）
$Q_{1,ik}$: Box i から Box k への水平移流量（上層）
$Q_{2,ik}$: Box i から Box k への水平移流量（下層）
$\overline{Q}_i^{21}$: Box i の下層から上層への鉛直移流量
$\overline{Q}_i^{12}$: Box i の上層から下層への鉛直移流量
K_h : 水平拡散係数
K_z : 鉛直拡散係数
$D_{1,ki}$: Box i と Box k の接触断面積（上層）
$D_{2,ki}$: Box i と Box k の接触断面積（下層）
$\overline{A}_i^{12}$: Box i の表面積
$L_{1,ki}$: Box i と Box k の重心間距離（上層）
$L_{2,ki}$: Box i と Box k の重心間距離（下層）
$\overline{L}_z^{12}$: Box i の上層、下層重心間距離
β : ＣＯＤ換算係数
G_i : Box i の生産速度
B_1^P : Ｏ－Ｐ分解速度（上層）
B_2^P : Ｏ－Ｐ分解速度（下層）
B_1^C : ＣＯＤ分解速度（上層）
B_2^C : ＣＯＤ分解速度（下層）
S_1^P : Ｏ－Ｐ沈降速度（上層）
S_2^P : Ｏ－Ｐ沈降速度（下層）
S_1^C : ＣＯＤ沈降速度（上層）
S_2^C : ＣＯＤ沈降速度（下層）
$R_{IP,i}$: Ｉ－Ｐ溶出速度
$R_{COD,i}$: ＣＯＤ溶出速度
F_{OP} : 流入負荷量（Ｏ－Ｐ）
F_{IP} : 流入負荷量（Ｉ－Ｐ）
F_{COD} : 流入負荷量（ＣＯＤ）

３）　水質方程式の解法の基本的考え方

水質方程式を解くためには、方程式に表れているすべての係数値を定めることと、境界条件と初期条件を与えなければならない。また、夏と冬の季節毎に充分安定した塊とする必要がある。以下では潮汐流の繰り返しの基で発現する定常的な状態を考察するものとする。対象領域の水質は、最初は良い状態から、年々増加する汚染物質が水域に流れ込んだ結果として水質の悪化が進行したのであるが、このような長期にわたる現象を微分方程式により詳細に解析することは甚だ困難である。そこで、比較的に短期間における水質変化

を追従することにすれば、微分方程式の諸係数の値は時間に無関係に一定と考えられることになるが、その値をある特定水域について決定することも難しい問題を含んでいる。これらの係数値は、これまでに公表されている根拠のある値を対象水域に関して修正する必要があると考えられる。

そこで、本論文では、まず、水質方程式の全係数に妥当な値を設定して、1983年～1987年の５年間にわたって実測された水質条件を水質方程式の初期条件と境界条件として採用し、さらに陸域から水域に流入する汚濁物質の現在負荷量が一定であるとして水質方程式の定常解を導出し、その値を水質の実測値と比較する。以下ではこの解き方を水質再現計算ということにする。つぎに、理論値と測定値と差がなくなるように、水質方程式の係数値を修整するのであるが、その方法としては感度解析を用いる。結果的に、本方法では水質方程式のパラメータ値と水質再現計算とが同時に行われることになる。

水質の再現結果の妥当性が確認されると、確定された水質方程式に基づいて、将来、陸域から海域に流入する汚濁負荷量をどの程度削減すれば水質がどのような値に向上するかを解析できることになる。

（３）　水質再現計算の境界条件・初期条件

上に与えた水質方程式は、２層物質循環モデルを定式化したもので、各ボックスにおけるＯＰ、ＩＰ、ＣＯＤの時間的変化を示す連立微分方程式であり、大領域については２層×３水質指標×11ボックス、すなわち66元連立微分方程式、小領域については２層×３水質指標×14ボックス、すなわち84元連立微分方程式となっている。この連立微分方程式の解法には５次のルンゲ・クッタ法を用いた。時間ステップとしては、12時間を１潮汐とし、さらに１潮汐を48ステップ、すなわち15分毎の計算結果のそれぞれの値が 0.1%以内になるまで計算を続ける。

表２－４　境界条件

		夏季 (mg/リットル)			冬季 (mg/リットル)		
		COD	IP	OP	COD	IP	OP
明石海峡	上層	1.6	0.01	0.01	1.4	0.01	0.01
	下層	1.4	0.01	0.01	1.4	0.01	0.01
紀淡海峡	上層	1.4	0.01	0.01	1.4	0.01	0.01
	下層	1.4	0.01	0.01	1.4	0.01	0.01

ところで、この水質計算に必要な水平移流量は、別途汎用計算機で算出された１潮汐、15分毎の潮汐流にボックス間の断面積を乗じボックス間移流量としている。下層ボックス間移流量のタイムステップでの総和が正であれば増加分が下層から上層へ移動し、負であれば減少分が上層から下層へ移動していることを意味し、これを鉛直移流量とする。こ

表２－５　初期条件（大領域／夏季）

ボックス番号	ＩＰ		ＯＰ		ＣＤ	
	上層	下層	上層	下層	上層	下層
1	0.057	0.065	0.055	0.014	4.88	1.83
2	0.056	0.064	0.084	0.020	5.50	2.02
3	0.016	0.055	0.063	0.018	5.40	2.12
4	0.013	0.035	0.058	0.027	5.12	1.92
5	0.017	0.019	0.042	0.020	3.80	1.43
6	0.012	0.031	0.035	0.015	4.90	1.79
7	0.014	0.019	0.036	0.017	2.80	1.05
8	0.014	0.019	0.037	0.017	2.20	0.83
9	0.012	0.017	0.036	0.014	4.37	1.74
10	0.010	0.021	0.029	0.017	3.47	1.69
11	0.010	0.012	0.026	0.015	3.12	1.52

の鉛直移流量と上層のボックス間移流量により各タイムステップごとに上層の水位が変化するため、先に示した上層の容積、上層のボックス間接触面積、上下層間重心距離を使用する。　大阪湾外である明石海峡と紀淡海峡との境界条件は、表２－４に示す。

表2-6 淡水流入量、汚濁負荷量（現況／大領域／冬季）

ボックス番号	淡水流入量 kg/1潮汐	ＩＰ kg/1潮汐	ＯＰ kg/1潮汐	ＣＯＤ kg/1潮汐
1	195338.8	33.3	140.3	2743.0
2	12062680.0	3952.9	2365.4	131123.6
3	3820721.5	524.7	533.2	16596.0
4	0.0	0.0	0.0	0.0
5	132747.4	53.6	34.0	2626.7
6	0.0	0.0	0.0	0.0
7	0.0	0.0	0.0	0.0
8	134936.7	62.9	22.3	1810.0
9	58783.0	36.9	37.4	1521.5
10	2143669.5	58.4	59.4	4537.2
11	94616.0	21.0	8.0	658.8

これは、実測データより求めたものである。初期条件については、３）海域観測データで述べたように1983年～1987年の５ヶ年の観測データの平均値を用いている。これを表２－５に示す。水質計算には境界に位置している各ボックスの淡水流入量、汚濁負荷量が必要であるが、これらの水質観測データは神戸市より1kmメッシュ単位で入手したデータを各ボックス単位で集計して求めた。一例を表２－５に示す。大領域に対する集計結果を夏季については表２－６、冬季については付表２－７に、小領域に対する夏季、および冬季の集計結果を、それぞれ付表２－８、付表２－９示す。

（４）　物質移動量によるモデルの検討

水質方程式の係数であるパラメータの値を決定するに際して現況の水質に合うパラメータの組合せは複数ある。そこで、定めるべきパラメータの値の信頼性を高めるためメッシュモデルでは濃度コンター図を描くが、本論文ではボックスモデルを採用しているため物質移動量（以下、移動量という）を図化することにした。移動量とは、本論文で取り上げた水質指標であるIP,OP,CODが海の中で海水の移流、移流にともなう汚濁物質の移動、植物プランクトンの増殖（つまり生産）、濃度差による拡散、溶出、分解、沈降、によって移り変わる量、すなわち「ボックス容量×汚濁物質濃度」のことで、これを図示したものが図２－１２の移動量図である。これは図２－９に示す作用反応モデル(物質循環)図において汚濁物質の流れを数量として表したものである。ただし、本論文で用いた移動量図は通常のものとは些か異なっている。その第一点は移流量と拡散量を合わせて１つにしたことであり、ここでは移動量と呼ぶことにする。図２－１２～２－１３の中央の箱はボックスを表しており、上の箱が上層で次が下層であり下が低泥を図示している。左右４個のボックスは隣接しているボックスであるが、接するボックスがない場合には値は表示されていない。隣接ボックスとの間には各指標毎に移動量が数値で表示されており上の矢印は上層同士、下の矢印は下層同士のやりとりを表す。移動量は拡散量＋移流量で、そのうち（　）内が移流量を示しており、単位はﾄﾝ/潮汐で移流にともなって拡散量がどの位あるのかも判るようになっている。さらに、左上にはIP,OP,CODについてのボックス内の収支を示してある。これらの収支は１潮汐におけるIP,OP,CODの移り変わりの合計であり、理論的には零になるべきものであるが移流量の収支誤差が零でないことと、収束条件が0.1%であるということを考慮してわずかの誤差は許すことにした。なお、図は一例として

大阪湾全体とボックス７の収支である。

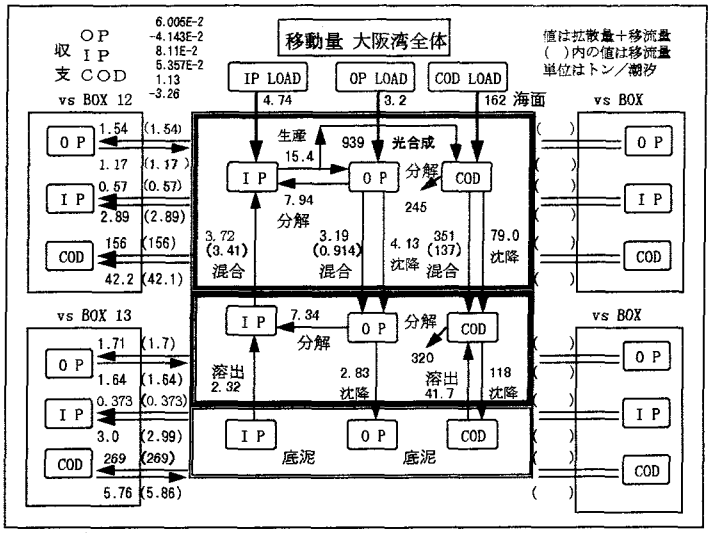


図２－１２　移動量による収支例(大阪湾全体／夏季／現況)

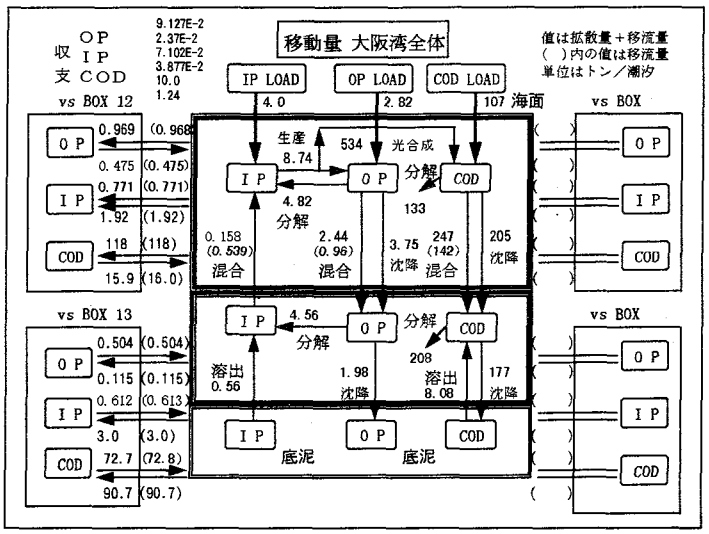


図２－１３　移動量による物質収支(大阪湾全体／冬季／現況)

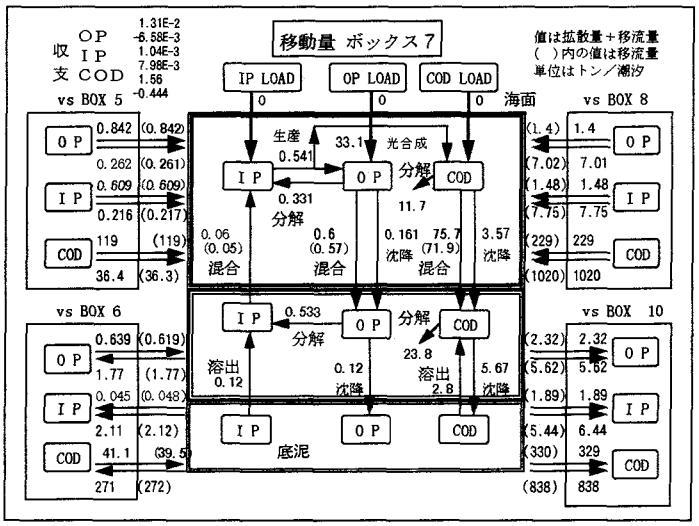


図２－１４　移動量による収支例(ボックス７／夏季／現況)

大領域および小領域の物質の移動図それぞれを詳細に検討した。各ブロックおよび大阪湾全域で①検討対象の対象の置かれている地理的位置②隣接ボックスとのつながり③ボックスの容量④潮流の動きなど、特に、各パラメータの示す値の妥当性に注意をはらった。 傾向としては、IP の溶出から IP の上下層との混合、光合成量、COD の上下層との混合、COD の沈降のラインが全体に対して支配的に動くようであることが判った。値はいずれも妥当な範囲であるといえる。

（5） 感度解析法によるパラメータ値の設定

上述のように水質方程式を解くために必要な方程式に含まれるすべての係数の数値を決定する必要がある。ここでは先行研究[21-d,e)]にパラメータ幅に関する知見が記載されていたので感度解析の手法を用いた。研究対象としている海域のすべてのボックスにおける水平拡散係数、有機態リン（ＯＰ）に対する上層の生産速度、上下層の分解速度と沈降速度、無機態リン（ＩＰ）に対する下層の溶出速度、化学的酸素要求量（ＣＯＤ）に関わる上下層の分解速度と沈降速度、下層の溶出速度の具体的数値を定めるために、まず移動量図に従ってより現実の物質の動きに近い係数を決定する。ここで、ＩＰとＣＯＤの溶出速度については、底泥量が大阪湾奥部から離れるに従い少なくなるのでボックスにより値を変える必要がある。つぎに、変更すべきパラメータについては専門家の意見に従って、実験的に測定された値、あるいは過去の研究結果や発表文献を参考にして範囲を設定する。そこで、ある１つのパラメータを選び、妥当と思われる範囲内でパラメータ値を動かして水質再現計算を行う。この際、他のパラメータは一定とする。ただし、各パラメータの感度は、図２－１５に示すように異なっている。したがって、パラメータを動かす範囲は一定ではない。なお、図右端において上より上層ＯＰ、下層ＯＰと重なるように上層ＣＯＤ、下層ＣＯＤ、下層ＩＰ、上層ＩＰの順になっている。

このような感度解析の手法を適用して、水質を決定的に左右するパラメータ値を選ぶ。つぎに、水質再現方程式の初期値に水質観測値を代入して、ある１つのパラメタをその範囲付近で動かしながら、幾度も水質再現計算を行う。その際、他のパラメータは固定したままとする。これらの計算結果を表に出力して再現性の良いパラメータを選ぶのである。さらに、このようにして決定したパラメータの値を固定して他の１つのパラメータを動かして上と同様の操作をする。この操作をすべてのパラメータについて順次行う。一巡した後はパラメータの範囲を狭くして同様の操作を行い、パラメータ値を決定する。ただし、溶出速度は大領域と小領域との間で整合性をとる必要がある。すなわち小領域の大領域に相当するボックスについては大領域の値を用いることにした。分解速度については、専門家の意見を取り入れて感度解析の範囲を狭くしている。なお、沈降速度(たとえば中西は0.13～1.82:1979、Smayda は 0.26～1.35:1965、U.S.Army は 0～２:1975 などがある[2,16,21-f)])は感度の良いパラメータであるので、他のパラメータよりも細かい解析をする必要がある。また、このようなモデルの微調整を行うときには、沈降速度パラメータで行うのが一般的とされているため、本論文でもこれに従うことにした。得られた結果を表２－７と表２－

８に示す。このようにして決定されたパラメータ値は、概ね妥当であると判断される。

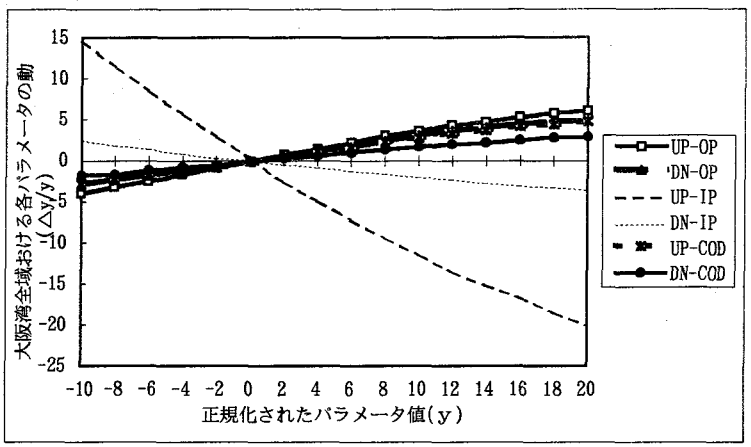


図２－１５　パラメータによる感度の違い

表２－７　決定したパラメタ(大領域／夏冬)

パラメタ	単　位	夏　季	冬　季
水平拡散係数	cm^2/sec	5.00×10^4	5.00×10^4
鉛直拡散係数	cm/sec	0.500	0.500
生産速度定数	1/day	0.350	0.200
分解速度	1/day		
ＣＯＤ上層		0.015	0.010
下層		0.015	0.010
ＯＰ　上層		0.060	0.040
下層		0.050	0.030
沈降速度			
ＣＯＤ上層		0.05	0.15
下層		0.10	0.15
ＯＰ　上層		0.30	0.30
下層		0.30	0.30
溶出速度	$mg/m^2/day$		
ＣＯＤ			
ﾎﾞｯｸｽ 1～3		140	20
ﾎﾞｯｸｽ 4～7,9,10		70	10
ﾎﾞｯｸｽ 8,11		10	10
ＩＰ			
ﾎﾞｯｸｽ 1～3		10	2
ﾎﾞｯｸｽ 4		5	1
ﾎﾞｯｸｽ 5～7		4	1
ﾎﾞｯｸｽ 8,11		3	1
ﾎﾞｯｸｽ 9,10		3	0

表２－８　決定したパラメタ(小領域／夏冬)

パラメタ	単　位	夏　季	冬　季
水平拡散係数	cm^2/sec	5.00×10^4	5.00×10^4
鉛直拡散係数	cm/sec	0.500	0.500
生産速度定数	1/day	0.350	0.200
分解速度	1/day		
ＣＯＤ上層		0.015	0.010
下層		0.015	0.010
ＯＰ　上層		0.060	0.040
下層		0.050	0.030
沈降速度			
ＣＯＤ上層		0.05	0.15
下層		0.10	0.15
ＯＰ　上層		0.30	0.30
下層		0.30	0.30
溶出速度	$mg/m^2/day$		
ＣＯＤ			
ﾎﾞｯｸｽ 1-1～2,3		140	20
ﾎﾞｯｸｽ 2-4,5,6		140	20
ﾎﾞｯｸｽ 5-7,12		140	20
ﾎﾞｯｸｽ 4-8,9,10		70	10
4-13,14		70	10
ﾎﾞｯｸｽ 8-11		10	10
ＩＰ			
ﾎﾞｯｸｽ 1-1,2,3		10	2
ﾎﾞｯｸｽ 2-4,5,6		10	2
ﾎﾞｯｸｽ 4-8,9,10		5	1
4-13,14		5	1
ﾎﾞｯｸｽ 5-7,12		4	1
ﾎﾞｯｸｽ 8-11		3	0

（６）　水質再現計算結果とその評価

前節において大阪湾の水質方程式を決定して、それを解き各ブロックの水質の値を求めたが、大領域と小領域に対し、それぞれ夏季と冬季について得られた計算結果をつぎに示す。大領域に対する計算結果に関しては、夏季については表２－９に、冬季については表２－１０に示す。同様に、小領域に対する計算結果に関しては、夏季については付表２－10、冬季については表２－１１に示す。

表2－9　水質再現結果　大領域／夏季　　単位mg/リットル

ボックス番号	P 上層	P 下層	P 上層	P 下層	COD 上層	COD 下層
1	0.0336	0.0214	0.0122	0.0174	3.64	2.50
2	0.0505	0.0279	0.0312	0.0233	4.44	2.72
3	0.0466	0.0348	0.0198	0.0248	4.31	3.32
4	0.0188	0.0118	0.0110	0.0129	2.42	1.67
5	0.0137	0.0102	0.0102	0.0115	1.94	1.51
6	0.0230	0.0124	0.0122	0.0135	2.72	1.72
7	0.0134	0.0100	0.0105	0.0116	1.90	1.49
8	0.0115	0.0097	0.0101	0.0110	1.72	1.43
9	0.0208	0.0144	0.0119	0.0150	2.58	1.90
10	0.0147	0.0101	0.0105	0.0123	2.04	1.51
11	0.0120	0.0096	0.0099	0.0114	1.72	1.43

表2－10　水質再現結果　大領域／冬季　　単位mg/リットル

ボックス番号	P 上層	P 下層	P 上層	P 下層	COD 上層	COD 下層
1	0.0330	0.0254	0.0159	0.0171	3.03	2.42
2	0.0508	0.0339	0.0392	0.0261	3.75	2.72
3	0.0403	0.0312	0.0231	0.0222	3.18	2.56
4	0.0206	0.0149	0.0144	0.0138	2.20	1.76
5	0.0139	0.0110	0.0117	0.0116	1.72	1.49
6	0.0198	0.0140	0.0138	0.0136	2.12	1.69
7	0.0124	0.0105	0.0110	0.0114	1.61	1.45
8	0.0109	0.0100	0.0105	0.0107	1.49	1.41
9	0.0181	0.0145	0.0132	0.0141	2.03	1.73
10	0.0123	0.0103	0.0110	0.0116	1.62	1.44
11	0.0105	0.0098	0.0103	0.0109	1.46	1.40

以上において大阪湾の水質再現計算値を求めたが、水質の実測値が得られているので、両者を比較してどの程度の再現性があるか検討する。ただし、海水の水質の実測値は統計的に大きなバラツキを示している。図２－１６～２－２１には、大領域の各ブロックで観測された水質の観測値が示されている。この図については後述する。

そこでつぎに、各海域ボックスにおいて測定された水質実測値の内最大のものと最小のものを除いた実測値の平均値と本水質再現モデルによって求められた計算値との相対誤差を数値的に検討してみよう。相対誤差とは代表平均値と計算値の差の絶対値を計算値で割ったものと定義される。さらに各ボックスにおける相対誤差を全海域にわたって平均したものを平均偏差と定義されるが、平均偏差σは次式で与えられる。

$$\sigma = \frac{1}{n}\left(\sum_{i=1}^{n}\frac{|x_i - \bar{x}_i|}{x_i}\right) \qquad (2-24)$$

ただし、　i :ボックス番号

x_i :ボックス i について求められた水質の計算値

$\bar{x}_i$:ボックス i において測定された水質の実測値の平均値

n:ボックス数

である。

大領域、小領域における夏季および冬季の有機リン（ＯＰ）、無機リン（ＩＰ）および化学的酸素要求量（ＣＯＤ）に関する平均偏差の計算結果を以下の表２－１１～２－１４に示す。

表２－１１　平均偏差（夏季）大領域

	ＩＰ	ＯＰ	ＣＯＤ
上　層	0.597	0.247	0.371
下　層	0.654	0.316	0.539

表２－１２　平均偏差（夏季）小領域

	ＩＰ	ＯＰ	ＣＯＤ
上　層	0.528	0.873	0.485
下　層	0.628	0.879	0.447

表２－１３　平均偏差（冬季）大領域

	ＩＰ	ＯＰ	ＣＯＤ
上　層	0.591	0.616	0.357
下　層	0.357	0.497	0.245

表２－１４　平均偏差（冬季）小領域

	ＩＰ	ＯＰ	ＣＯＤ
上　層	0.462	0.261	0.575
下　層	0.693	0.396	0.341

この結果では平均値と計算値との乖離が大きいようにみえる。そこで、計算値を水質観測の全データに関して詳細に調べるため再び図２－１６～２－１９と回帰による検討を図２－２２～２－２３により行う。検討結果は次図の下で述べる。

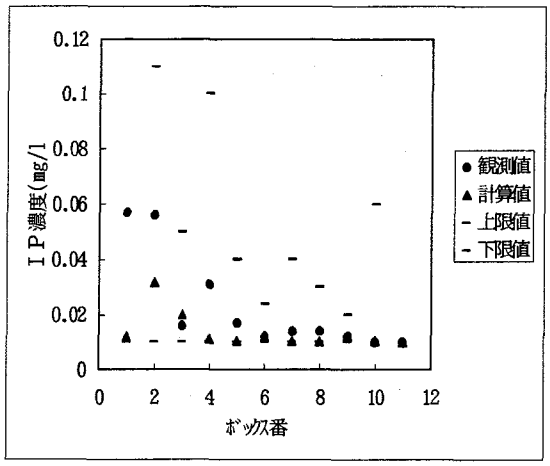


図2－16　水質再現計算結果(大領域／ＩＰ／夏季／上層)

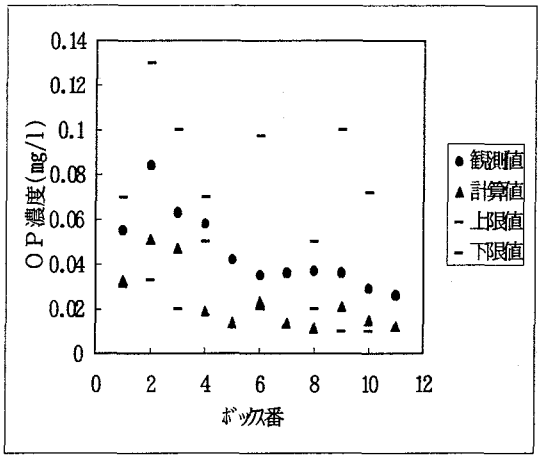


図2－17　水質再現計算結果(大領域／OP／夏季／上層)

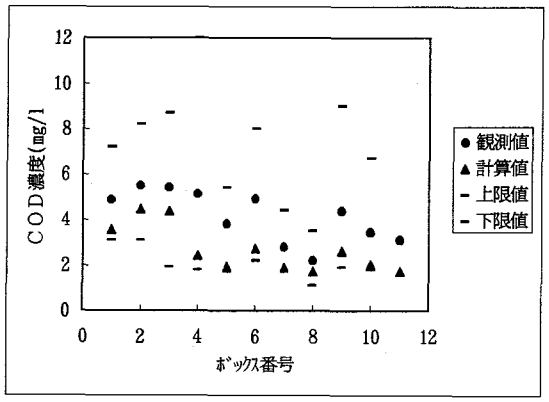


図2－18　水質再現計算結果(大領域／ＣＯＤ／夏季／上層)

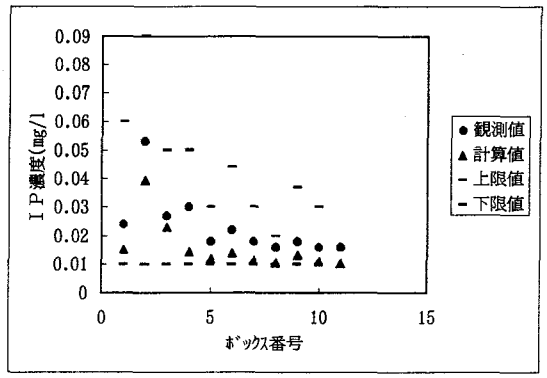


図2－19　水質再現計算結果(大領域／ＩＰ／冬季／上層)

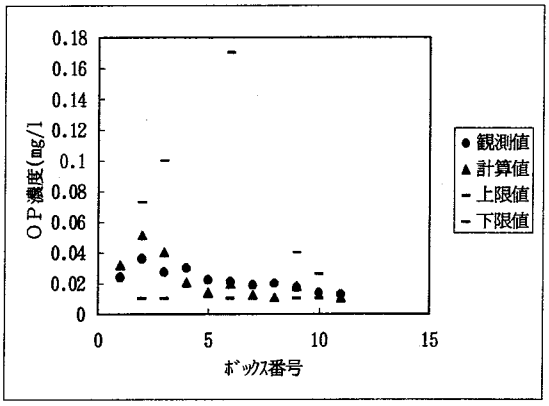


図２－２０　水質再現計算結果(大領域／ＯＰ／冬季／上層)

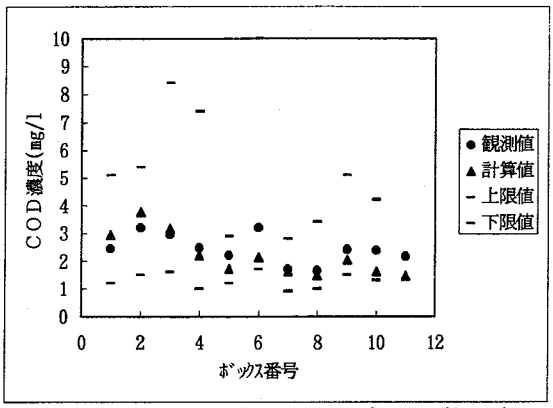


図２－２１　水質再現計算結果(大領域／ＣＯＤ／冬季／上層

図２－１６～２－２１の上下の横線は 1982 年～1987 年の水質観測結果の内、最大値と最小値を除いた幅を表している。これらの図中の●印は実測値の平均値で▲印は再現計算でえられた値である。計算値は観測幅の中に収まっており、妥当な計算結果だといえる。なお、環境庁で行われている同種のシステムによる結果 [21-c]を取り寄せ比較を行ったが本システムの方が再現性はより良いと判断された。

なお、代表観測値と計算値の間に相関性があることを確かめた。夏季については図２－２２に、冬季については図２－２３に示す。環境庁では、比較対象となる水質指標を COD のみにしているので図は COD 値を表示している。グラフは、横軸に各ボックスの観測平均値、縦軸に水質再現結果の値をプロットし、回帰分析により得られた回帰直線の式、相関係数 R^2 の値も示した。

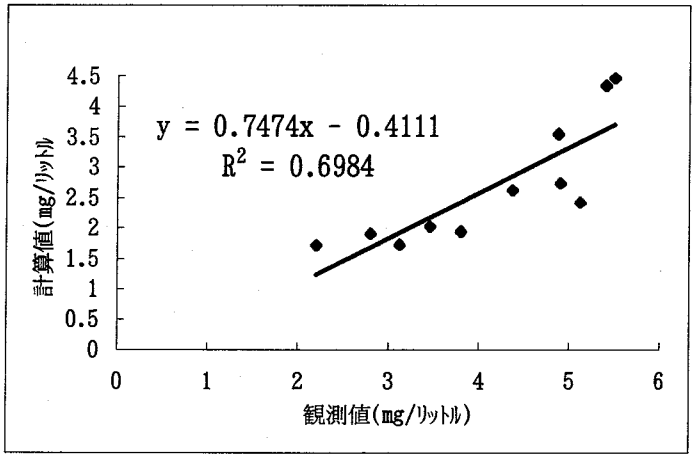


図２－２２　代表観測値と計算値の関係
(大領域／ＣＯＤ／夏季／上層)

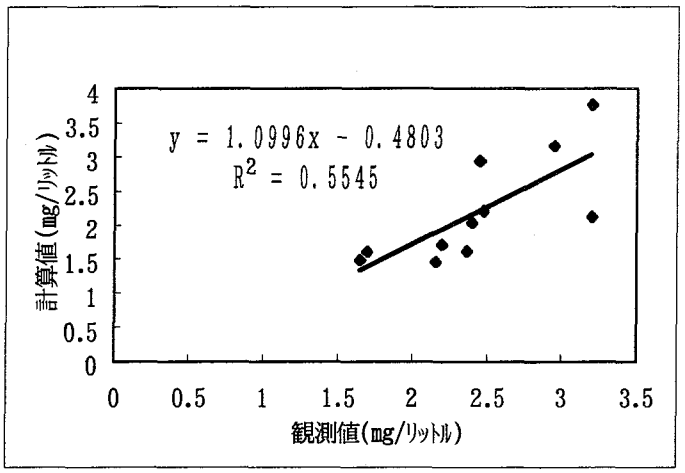


図２－２３　代表観測値と計算値の関係
（大領域／ＣＯＤ／冬季／上層）

同様に、小領域の計算結果についても付録に付図２－１～２－２として表示した。

以上の２つの考察から大領域、小領域ともに本水質再現計算の再現性があることがを確認できた。日頃パーソナルユースとして使い慣れたコンピュータでも充分水質再現計算を実行することが可能であると判断された。

２－５　将来の予測水質と現況水質値との比較

本節では、西暦 2000 年における大阪湾の水質を予測してみよう。西暦 2000 年までには大阪湾周辺には色々な工事が予定されている。たとえば、関西国際空港の１期工事、りんくうタウンの建設および神戸沖のポートアイランドの２期工事などにより大阪湾の地形は相当に変化すると予想される。そこで、公的な機関による西暦 2000 年までの埋め立ておよび沖出し計画に基づき種々の検討を加えて 2000 年における海岸線を推定することにした。本章において展開してきた大阪湾の水質解析では西暦 1986 年の大阪湾の地形を海図（第 150 号、大阪湾、海上保安庁水路部、 1:80000）を基礎としてボックス分割を行ったが、西暦 2000 年における大阪湾の地形変化を推定して求めた海岸線に基づいて大型計算機を使って潮流計算を行った結果により新しいボックスの諸係数を計算しなければならない。もちろん海岸線は地図上に引かれた線でなく 1 km メッシュ線に変更している。ただし、神戸沖の新空港建設計画などなお未確定な要素があるため、神戸沖を中心とした詳細な小領域のボックス分割は意味がないので、水質の予測は大領域ボックス分割に限定するにとどめた。将来の水質を予測するためには本章の２－６節で得られた水質方程式を用いるが、大局的な観点からは大阪湾自体には大きな変化はないので、各ボックスの溶出係数や湾全体の水平拡散係数、鉛直拡散係数、生産係数、分解係数、沈降係数などのパラメタは２－４節と同じものを使用しても良いと考えられる。ただし、流入汚濁負荷量は相当変化するものと予想されるため変更しなければならない。上述したように海岸線が変化するのにし

たがって潮流の予測計算も行う必要がある。まず、以下に、ボックス諸係数に関する計算結果だけを示す。

（1）　将来の地形変化とボックス諸係数の同定

1）ボックス諸係数

○ボックスの平均深さ、面積、体積

将来における大阪湾の境界条件の変更は下記のようになる。潮流計算結果ファイルの1kmメッシュの数値を累和して、ボックスの面積を求めた。また各メッシュの平均深さをボックス毎に計算して、ボックス面積を乗じボックス体積を求めた。大領域のの結果を表２－１５に示す。

○隣接ボックスとの接触面積

各ボックスの接触面距離と水深データより断面図を描き計算するという方法で隣接しているボックスごとの接触面積を求めた。その計算結果を付表２－１２に示す。

○ボックスの重心間距離

現況と同様に各ボックスを多角形とみなし、それぞれの重心を求めた。これを付表２－１３に示す。また各ボックスにおける上層、下層間における重心間距離も求めた。これを付表２－１４に示す。

表2-15　各ボックスの面積･体積

ボックス番号	km² 面積	体積km³ 上層	体積km³ 下層
1	37	0.370	0.083
2	66	0.579	0.076
3	54	0.507	0.094
4	122	1.226	0.915
5	54	0.542	0.521
6	128	1.280	1.095
7	80	0.800	2.129
8	177	1.770	5.827
9	111	1.107	0.748
10	241	2.397	5.085
11	338	2.942	11.788

2）　淡水流入量、汚濁負荷量

西暦 2000 年における水質計算には境界条件として淡水流入量および汚濁負荷量の予測値が必要であるが、これらの値は３章の陸域の汚濁負荷予測結果をボックス単位で集計して求めた。大領域についての結果を夏季については表２－１６、冬季については付表２－１５に示す。淡水流入量は、現況とは大きな変化はないが、汚濁負荷量はCODで約14%、リンで約18%減少している。

表2-16　淡水流入量、汚濁負荷量（夏季）

ボックス番号	淡水流入量 kg/1潮汐	IP kg/1潮汐	OP kg/1潮汐	COD kg/1潮汐
1	195774	106	67	2628
2	18111045	2904	1992	106209
3	3927211	478	486	15754
4	0	0	0	0
5	158629	63	78	2397
6	0	0	0	0
7	0	0	0	0
8	149140	52	52	1525
9	97994	65	66	1839
10	2144482	60	60	4438
11	94116	24	9	666

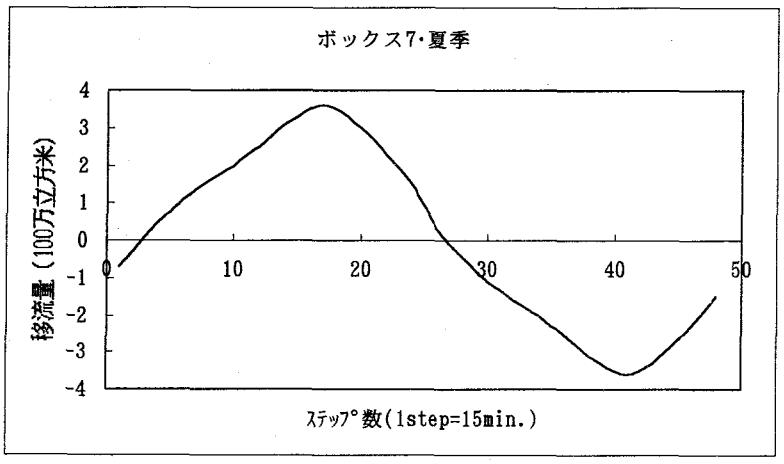
3）　移流量の計算

ところで、将来の水質予測計算を行うためにはボックス単位の移流量が必要である。このボックス間移流量は大型汎用計算機によって１ km メッシュ単位で計算されたものにボックス断面積を乗じてボックス毎に集計することによって求めた。もちろん、大型汎用計算機で計算された潮汐流は西暦 2000 年の大阪湾の地形の変化を考慮したものである。

ボックス間移流量の計算に当たっては隣接ボックスから流入する場合をプラスとしている。同様にして、下層のボックス間移流量で各計算タイムステップでの総和がプラスであれば下層から上層へ移流するとして、総和がマイナスであれば上層から下層へ移流するとして、これを鉛直移流量とした。ボックス間移流量と鉛直移流量を加えた移流量の収支についてボックス７のものを例として夏季について図２－２４に示す。

ところで、ボックス間移流量と鉛直移流量によって各ステップ毎の水位は変化するのでボックス間接触距離に水位の変化を乗じて、上層の接触面積に加えたものを各ボックスの断面積とした。またボックスの体積と重心間距離も水位の変化に応じて変わるように取り扱っている。

図２－２４　ボックス７の移流量の収支（夏季）



４）　将来の水質予測計算とその結果

①水質予測計算

西暦 2000 年における水質計算は、現況の水質再現に用いた作用反応モデルの式（水質再現計算システム）に表２－９の境界条件と対象領域外の２つのダミーボックスの濃度を表２－１７で与え、さらにボックス諸条件、流入負荷量を代入して計算を実行した。

表２－１７　境界条件

		夏季（mg/ﾘｯﾄﾙ）			冬季（mg/ﾘｯﾄﾙ）		
		COD	IP	OP	COD	IP	OP
明石海峡	上層	1.6	0.01	0.01	1.4	0.01	0.01
	下層	1.4	0.01	0.01	1.4	0.01	0.01
紀淡海峡	上層	1.4	0.01	0.01	1.4	0.01	0.01
	下層	1.4	0.01	0.01	1.4	0.01	0.01

物質循環過程を示す移動量図については例として夏季についての大阪湾全体とボックス７を取り上げたが、図２－２５に大阪湾全体を、図２－２６にボックス７を示す。他のボックスに関する移動量計算しているが、割愛する。

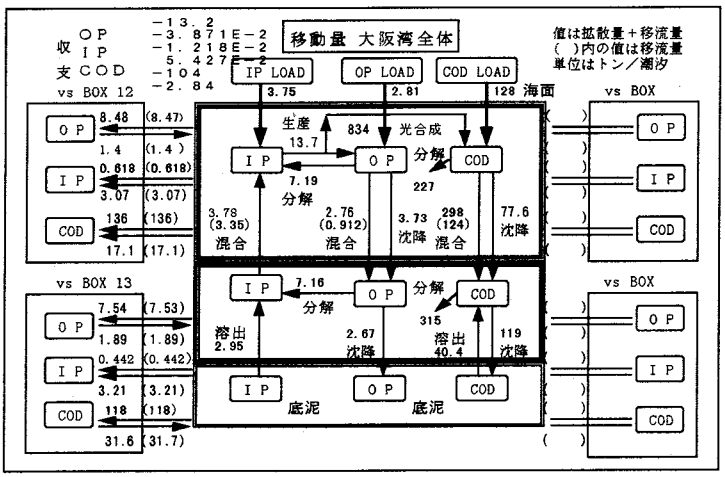


図２－２５　移動量による収支例(大阪湾全体／夏季／将来)

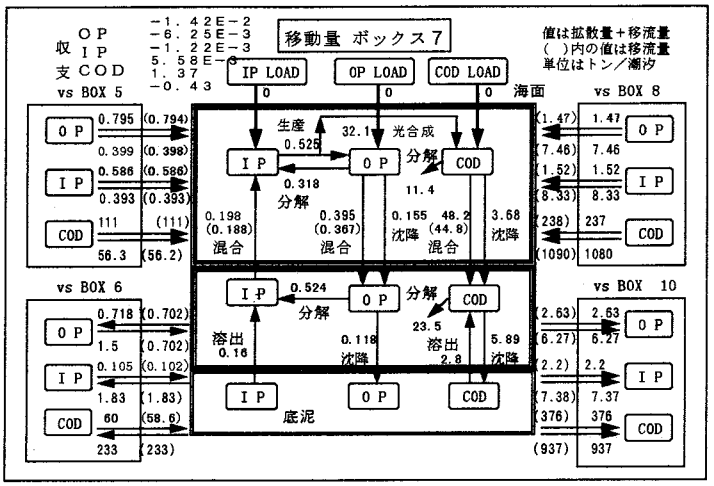


図２－２６　移動量による収支例(ボックス７／夏季／将来)

図２－２５～２－２６を見ると大阪湾全体では、陸域からの汚濁負荷量が減少した分がそのまま図に現れており光合成による生産量が少くなっている。ボックス７では、北に位置する神戸港より流入量が下がり、逆に播磨灘から流れ込みが多くなっている。

②将来水質の予測結果

水質予測計算を行った結果を夏季について表２－１８に、冬季については表２－１９に示す。たとえば、CODの上層について表２－９と比較してみると濃度が低下している。最も汚れの激しい湾奥のボックス１～３では約 10%下がり、その影響を受けるボックス4,5では変化していないが湾口に近いボックス６～８で数%下がっている。

表２－１８ 将来計算結果　大領域／夏季　　単位:mg/ﾘｯﾄﾙ

ボックス番号	P 上層	P 下層	P 上層	P 下層	COD 上層	COD 下層
1	0.0128	0.0179	0.0235	0.0193	3.29	2.38
2	0.0277	0.0230	0.0453	0.0264	4.01	2.62
3	0.0188	0.0243	0.0415	0.0325	3.92	3.16
4	0.0112	0.0134	0.0188	0.0121	2.42	1.72
5	0.0104	0.0117	0.0136	0.0101	1.92	1.50
6	0.0122	0.0141	0.0209	0.0122	2.54	1.71
7	0.0106	0.0118	0.0129	0.0099	1.84	1.47
8	0.0102	0.0111	0.0112	0.0097	1.69	1.42
9	0.0121	0.0156	0.0192	0.0140	2.43	1.87
10	0.0106	0.0124	0.0136	0.0098	1.93	1.48
11	0.0100	0.0114	0.0115	0.0096	1.68	1.42

（２） 現況の水質再現値と将来水質予測値に対する評価

現況と将来における水質計算の条件的な違いは潮汐流、汚濁負荷、境界条件である。以下ではこのような潮汐流の変化と汚濁負荷の変化によって将来の水質が現況と比較してどのように変化するのかを考察する。

表２－１９ 将来計算結果　大領域／冬季　　単位:mg/ﾘｯﾄﾙ

ボックス番号	P 上層	P 下層	P 上層	P 下層	COD 上層	COD 下層
1	0.0159	0.0165	0.0274	0.0220	2.94	2.25
2	0.0342	0.0243	0.0485	0.0331	3.77	2.69
3	0.0214	0.0210	0.0404	0.0317	3.17	2.59
4	0.0137	0.0136	0.0192	0.0145	2.20	1.73
5	0.0116	0.0116	0.0138	0.0108	1.72	1.47
6	0.0130	0.0133	0.0182	0.0135	2.12	1.66
7	0.0110	0.0113	0.0119	0.0103	1.61	1.44
8	0.0104	0.0107	0.0107	0.0099	1.49	1.40
9	0.0126	0.0134	0.0167	0.0137	2.03	1.67
10	0.0108	0.0114	0.0117	0.0101	1.62	1.43
11	0.0102	0.0109	0.0103	0.0098	1.46	1.40

１） 現況の汚濁負荷と将来の汚濁負荷の比較

まず、現況の汚濁負荷データと将来の汚濁負荷データとの比較を夏季を例に付表２－17～表２－19に示す。これらの結果は将来の汚濁負荷の増減率がいずれも合計して負であって、将来における下水道の普及、下水道の処理能力の向上、および浄化槽の普及などにより大阪湾全体に流入する汚濁負荷量が減少することが海岸線の埋め立てが進み沿岸での流れは若干悪くなった分を上回って効果があることが判る。また、水質予測値と水質再現値を比較したものを夏季を例として図２－２７～図２－３２に示す。

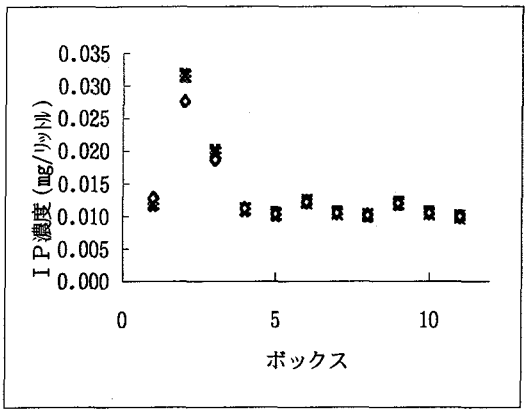


図 2-27 水質予測結果(IP/夏季の上層)■:現況,◇:将来

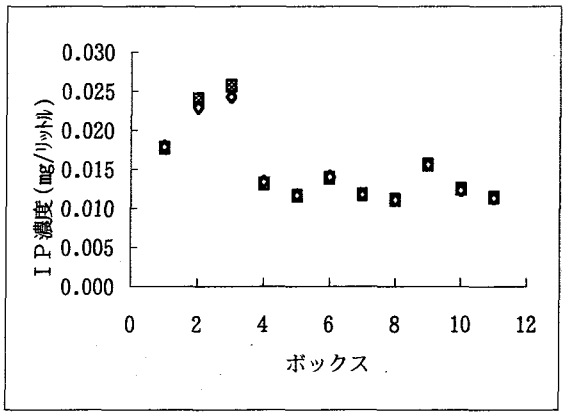


図 2-28 水質予測結果(IP/夏季の下層)■:現況,◇:将来

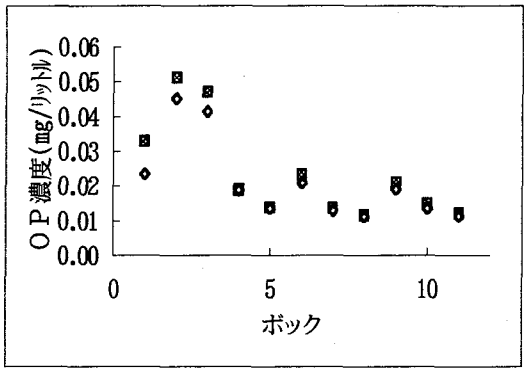


図 2-29水質予測結果(OP/夏季の上層)■:現況,◇:将来

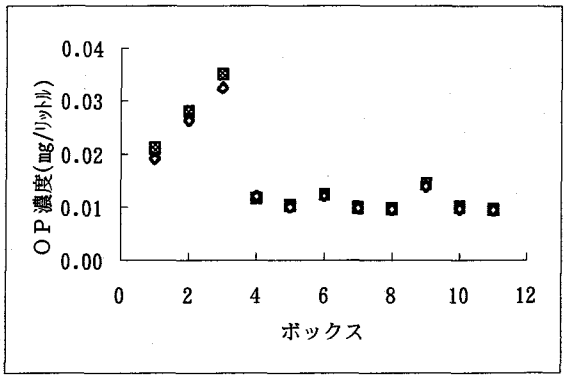


図 2-30 水質予測結果(OP/夏季の下層)■:現況,◇:将来

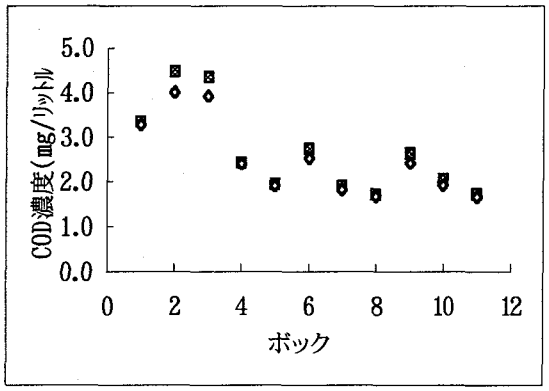


図 2-31水質予測結果(COD/夏季の上層)■:現況,◇:将来

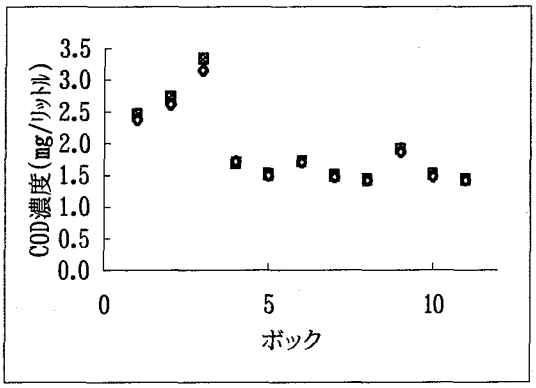


図 2-32水質予測結果(COD/夏季の下層)■:現況,◇:将来

2）再現値と予測値の偏差の検討

大阪湾の現況の水質の再現値と西暦 2000 年における水質の将来予測値の差異の程度について検討してみよう。そのために式（２－２４'）にならって、下の(２－２４)'式で計算する。ただし、この値が正のときは水質が悪化していること、逆に負のときは水質が改善されたことを意味している。比較指標σは次式で表される。

$$\sigma = \frac{1}{n}\left(\sum_{i=1}^{n}\frac{x_i - x_i'}{x_i'}\right) \qquad (2-24')$$

ここで、x_i ： 将来予測値

x_i' ： 現況再現値

n ： ボックス数

である。

夏季および冬季の比較指標σの値をそれぞれ表２－２０と表２－２１に示す。

表 2-20 σの値（夏季）

	ＩＰ	ＯＰ	ＣＯＤ
上　層	-0.0105	-0.0686	-0.0536
下　層	-0.0063	-0.0306	-0.0172

表 2-21 σの値（冬季）

	ＩＰ	ＯＰ	ＣＯＤ
上　層	-0.0345	-0.0257	-0.0269
下　層	-0.0195	-0.0279	-0.0135

以上の結果より水質は現況より将来の方が少し良くなると言える。より詳細について考察すると、将来のＯＰ（有機リン）夏季では表２－１３と表２－３３より流入汚濁負荷量は 14%減少していると予想しているが、平均水質では上層で 6.9%同様に下層では 3.1%水質改善がなされたにすぎない。冬季では表２－１４と表２－３４より 15%の流入負荷減に対し水質は上層で 2.6%下層で 2.8%と改善幅が小さい。ＣＯＤの夏季では同様に表２－１３と表２－３３より１９%負荷量減少、冬季では表２－１４と表２－３４より２３%の負荷流入量が減少しているのに対し、水質予測では夏季上層で 5.4%下層で 1.7%であり冬季の上層で 2.7%下層で 1.4%改善されるにすぎないことがわかる。

将来は関西国際空港開港による泉南地域への人口移動を除き大規模な人口増加も少ないため、下水処理区域を拡大すれば湾全体に流入する汚濁負荷は減少すると予測されたが、さらに積極的な汚濁負荷削減が行われなければ水質を改善することはできないと考えられる。将来の水質改善策については本論文の第４章で考察することにする。

２－６　結　　言

内海･内湾水域の水環境改善のために簡便な操作によるパーソナルユースのコンピュータによる水質再現シミュレーションモデルの開発を行った。本章においてはシミュレーションの中心となる海域での富栄養化現象に関して環境負荷伝播モデルを提案した。このモデルでは、海域における①生態学的な営みをリンと COD により表現し、②物理的な潮汐流を大型計算機により再現し、③作用反応モデルとして非保存系のボックスモデルを用いているめ、海域を上下２層に分けていて、④植物プランクトンは、上層(有光層)のみで光合成が行うものとしている。

本章の狙いは、日常的に簡便に使える水質再現シミュレーションの開発にあったので、スーパーコンピュータによらないと実行されない計算部分、すなわち、潮汐流計算の部分についてのみ大型機を利用した。これが２－２節で評価した潮汐計算である。また、環境

負荷伝播モデルに従い水域のボックス分割を行い、各ボックスに与えられた容積や潮流による移流量など計算した。これが２－２節に当たる。つぎに、後の章で必要となる陸域での汚濁負荷集計システム(３章)や施策検討システム(４章)を意識しつつ、海域における富栄養化現象を作用反応モデルとして表し、微分方程式として定式化し水質方程式を得た。これと並行して作用反応モデルとして必要となるパラメータ(拡散係数、生産係数、沈降速度、溶出速度、分解速度)を先行研究から定めた。海域での 1983 年～1987 年の観測データを得て各ボックスに振り分けでボックスの代表値を設定した。これらの準備の上で水質計算を行い感度解析による各パラメータの値を探りながら水質再現の精度を高めた。これが２－４節に当たる。

２－５節では決定された各パラメータの基で水質計算の再現状態が妥当であることを確認した上で、つぎの段階である将来(西暦 2000 年)の水質予測を行った。すなわち、公的に承認されている海岸線の埋め立て計画を基に将来の潮流予測計算をスーパーコンピュータで行う一方、ボックス諸係数の再計算や陸域での汚濁負荷量の変化を予測して、現況の水質再現計算とパラメータを用いて将来の水質を予測した。なお、２－５節では、現況の水質再現値と将来の水質予測値の比較を行い、若干の水質改善が見られるものの、なお、努力が必要であることが判明している。

以上に述べたように、本章では水質再現のためのコンピュータ・シミュレーション・システムを開発し、この水質再現方法による計算結果が観測データと比較的よく適合することを示し、水質管理システムとして有用であることを検証した。本システムにより内海・内湾水域に対する水質改善の施策によって水質がどのように変化するかを判断することが可能となった。しかし研究は、大阪湾北奥部の水質改善に主眼をおいているためボックス分割が必ずしも適切とは言い難い箇所も見られる。これについては潮汐流計算結果が環境データベースに格納されているので、ボックス分割線に対応して水量フラックス等を算定し直すことは可能であり、その点からシステム運用上の工夫により改善することができる。

第３章　陸域における汚濁負荷量集計システムの構築と集計結果の評価

３－１　緒　　言

前章においては内海・内湾水域に流入する汚濁負荷がどのように水質を悪化させるかを記述する環境負荷伝播モデルに基づき水質を表現するコンピュータシステムを構築した。このシステムによって内海・内湾の水質管理を行うためには汚濁負荷を発生している陸域について分析することが必要となる。そこで本章では、陸域において発生する汚濁負荷量を集計するようなシステムの構築について考察する。

本論文で対象としている大阪湾の流域は、大阪府と滋賀県の全域に加えて兵庫県、京都府、奈良県の一部を入れると約１万平方キロメートルにおよぶ。この地域（ここでは陸域と呼ぶ）に居住する人口は約1500万人にのぼる。1960年代後半から始まった産業の振興は沿岸都市域への人口集中を促し、急速に大阪湾の水質が悪化していったことは前章で述べたとおりである。やがて公害が重要な社会問題となるにつれ 1971 年に環境庁が発足したが翌 1972 年には瀬戸内海において大規模赤潮による漁業被害が発生し水質汚濁防止法の改正が行われ、いわゆる「無過失賠償責任の導入」という新しい考えが盛り込まれた。その後、河川や湖沼、海の水質に対する基準が定められたが水質は悪化し一向に赤潮被害は減らなかった。1979年には「東京湾、伊勢湾および瀬戸内海における総量規制」が定められ実施された。また、1984年には湖沼水質保全特別措置法が制定された[1,2]。

水質汚濁防止法に基づく工場や事業所排水の監視や水質自動監視測定機器の設置、下水道整備五カ年計画の推進など汚濁負荷源に関しても努力が払われてきた。ところが、大阪湾に流入する1986年総汚濁負荷量のうち産業系排水は41%で生活系排水は49%となっており、降雨時には生活排水の60%が未処理のまま流入しているとも報告されている[3-9]。

ところで、内海・内湾に流入する汚濁荷量に関して陸域における汚濁負荷集計過程としては、汚濁発生源から流出する排水の流出経路、経路途中における浄化作用および下水処理の能力などについて、それぞれモデル化する必要がある。これらについては、それぞれ先行研究[11-17]がなされており、それに従って実態調査[21]が行われている。本章ではこれらの成果を取り入れて、汚濁負荷を集計するシステムを開発[19,20]することを目的とし、大阪湾に流入する汚濁負荷を例にしたケーススタディを実施する。

ところで、水の汚濁とは、村岡ら[10]によれば、雨水に森林や土壌から溶け込んだ物質や人間活動により排出される物質によって水質が悪化することをいい、汚染ともいっている。これらの水を細菌や毒性物質の側から見た場合汚染ということが多く、窒素・リンなどの有機無機の栄養塩が過剰に流入することによる水質悪化を汚濁と呼び区別している。本論文において取り扱う汚濁物質とは後者に属する物質群であって、その中から化学的酸素要求量（ＣＯＤ）、有機態リン（ＯＰ）と無機態リン（ＩＰ）を取り上げて汚濁レベルの評

価を行っている。負荷量集計システムは次の項を付加すれば本格的なシステムに拡張される機能を持つことができる。すなわち、

①行政より入手したデータを入力するメニューを付加して、海域に流入する汚濁負荷量として集計され環境データとして西暦名付きで所定のディレクトリィとして格納されるような形の算定方式を組む。

②陸域の下水処理地域の拡大や大きな負荷発生源の新設、消滅に対処できるような形にしておく。

③広域下水道のように行政域を越えて汚濁処理水が発生する場合に対応できる。

④沿岸域の埋め立てのように海域部との調整を必要とする場合を考慮する。

⑤将来の汚濁負荷予測の精度を現在の方式と同等のものとする。

以下の３－２節では、本章における研究対象地域を特定した上で汚濁発生源を点源と面源に分ける方針を述べている。３－３節では負荷集計モデルに従った具体的な集計手順について説明している。３－４節では得られた集計結果（算定値と呼ぶ）と沿岸で観測された実測値の比較評価を行っている。３－５節において将来の負荷量を予測し評価している。３－６節は５章で使用する自動車の路面負荷原単位を調査検討している。３－７節は本章の結論であって、本章で提案した汚濁負荷集計方法について評価している。

３－２　陸域の研究対象領域と汚濁負荷発生源

（１）　陸域の研究対象領域

大阪湾水質管理システムの陸域部には図３－１に示すように、大阪湾の全流域のうち兵庫県南部、奈良県北部、大阪府全域と京都府乙訓郡大山崎町先の三河川合流（桂川・宇治川・木津川）より下流が含まれている。本章ではこの地域のうち図３－２に示される地域に限定して議論を進める。この地域で大阪湾に流入する汚濁負荷量に対し直接および間接に関与している市町を挙げると兵庫県の１８市町である。

神戸市、尼崎市、明石市、西宮市、洲本市
芦屋市、伊丹市、宝塚市、三田市、稲美町
播磨町、篠山町、丹南町、津名町、淡路町
北淡町、東浦町、緑町

データは1986年のものを現況として用い将来を2000年とする。

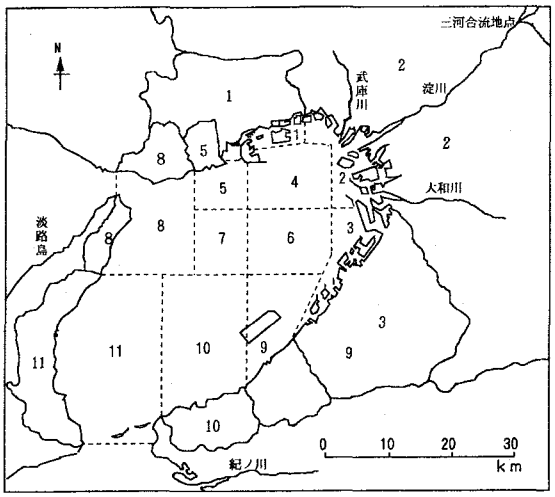


図３－１　陸域ブロック図

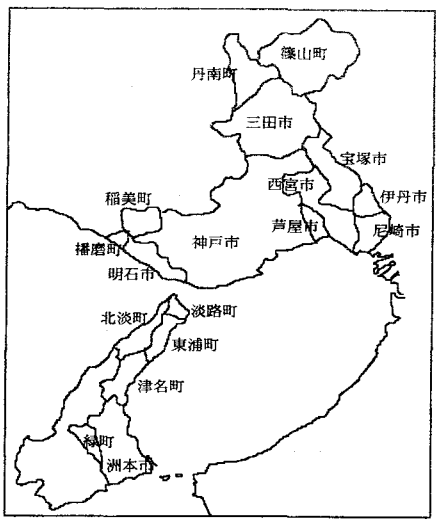


図３－２　関係する市町村

ところで、第２章の海域における環境負荷伝播モデルでは、性質の似た領域をボックスとして大領域と小領域それぞれモデル化しているのに従い、ここでは、各ボックスに汚濁物を流し込む陸での区域をブロックとして定義している。図３－１のブロック番号は、海域の大領域ボックス８には陸域ブロック８のように同番号で対応させている。ただし、大領域のボックス 1,2,4,5,8 が小領域のボックスに分割されている。

（２）　汚濁負荷発生源

汚濁物質は山林・田畑・地下水からも出てくるが、産業や生活などの人為的排出源からの量も多い。すなわち、陸上に存在するものは全て汚濁発生源として取り扱うべきである。これらの領域の研究は近年著しく進歩し観測データも多い。

陸上汚濁負荷発生源には、工場や下水処理場のように個別の発生源ごとに排水量と排水水質を特定できるものと、下水道未普及地域の生活雑排水や山林・田畑のように排水量と排水水質を特定できないものに大別されるが、前者は点状発生源（点源）、後者は面状発生源（面源）と呼ばれている。そこで、陸域汚濁負荷を集計するためには、汚濁負荷発生源として次のものを取り上げることにする。

１）　点状発生源（点源）生活・下水系と産業系に大別する。

①　生活・下水系

家庭排水は、し尿とその他の雑排水に分けられるが、下水道普及地域では両方とも下水処理場で処理され排出される。下水道未普及地域ではし尿は処理方式により排出量、排出点が異なる。そのうちくみ取り式の場合、し尿はし尿処理場で処理され排出される。

処理人員５０１人以上のし尿処理は、大規模合併浄化槽で行なわれるが、コミュニティプラントとも呼ばれ下水道の普及していない住宅団地に設けられることが多い。さらに、このタイプの浄化槽には２種類あり、し尿と雑排水を処理できる合併浄化槽とし尿のみを処理する単独浄化槽がある。そこで、生活・下水系の点源としては、つぎの３種類を考え

ることにする。

・下水処理場

・し尿処理場

・大規模合併浄化槽（処理人員５０１人以上）

② 産業系

事業所からの排水は業種、規模によって汚濁負荷発生量が異なり、また同一業種であっても稼働率や生産工程などが変化すると発生量も変わる。届出排水量が５０m^3/日以上のものを大規模事業所、５０m^3/日未満のものを小規模事業所とする。

・大規模事業所（排水量５０m^3/日以上）

・小規模事業所（排水量５０m^3/日未満）

２） 面状発生源（面源）

① 生活・下水系

人口密度が小さい地域では、生活・下水系の発生源は、個々にある範囲に分布している。

このような地域においては処理人員５０１人以上の大規模単独浄化槽はほとんど存在しないので、ここでは処理人員５００人以下の小規模合併浄化槽あるいは単独浄化槽を対象とする。なお、過疎地あるいは下水道未普及地域においては、何らかの処理を受けずに公共用水域に直接排出されるし尿以外の家庭雑排水がある。

・小規模合併浄化槽（処理人員５００人以下）

・単独浄化槽

・雑排水

② 畜産系

通常、畜産が行なわれている辺りでは農家も点在しており、面源となっている。家畜としては牛、馬、豚を取り上げることにした。畜産農家では糞と尿の分離を行い、糞はそのままあるいは堆肥化して農地還元し、尿は処理して放流するか農地に散布するのが一般的である。

・牛

・馬

・豚

③ 土地系

土地系には、自然土地と人工的地面が有るが本章では土地を山林、水田、畑、その他の地域に大別して、そこから発生する汚濁負荷量を平均的に捕らえることとする。

・山林

・水田

・畑

・その他

３－３　汚濁負荷量の集計モデルと集計手順

（１）　汚濁負荷集計モデル

前節において述べた各種の発生源から排出される汚濁負荷は、海域へ流入するまでに種々の変化を受ける。ここでは、陸域において発生する汚濁負荷量の集計モデルとして、次の３段階に大別して、それぞれの負荷量を算定しそれらを集計することにする。

a）発生汚濁負荷量（発生負荷量）

b）陸域流出汚濁負荷量（流出負荷量）

c）海域流入汚濁負荷量（流入負荷量）

a）の発生汚濁負荷量としては、前節で議論した点源すなわち下水処理場、し尿処理場などの各排水処理施設から排出される排水が有する負荷量を実測値あるいは届出値基づいて算出する。面源において生活・下水系発生源の各人口、家畜の各頭数、土地系の各面積などの規模を表すフレーム(対象地域の諸元)値に発生原単位を乗じた値から除去される分を差し引いて負荷量を算出する。

b）の流出汚濁負荷量としては、発生源から出た発生負荷量は、一般に、凝集沈澱・活性汚泥処理などの処理(除去率)を受けて河川・水路・下水道管渠等の公共用水域へ放流され、負荷量に変化する。この負荷量は流出負荷量と定義されている。ただし、点源については処理後の排水に含まれる負荷量を発生負荷量としているため、ここでは発生負荷量を即流出負荷量とする。なお、公共下水道の合流式と分流式の区別があるが、それぞれについて集計計算を行う。

c）の流入汚濁負荷量については、b)で述べたように通常公共用水域に放流された流出負荷量は、①河川を経由して海域に流入する場合と②直接海域に流入する場合に２分され、それぞれの場合について流入負荷量を算出する。

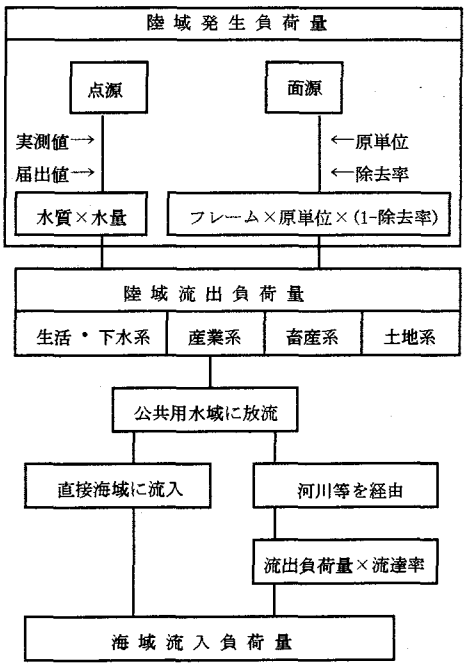


図3-3 汚濁負荷量集計モデル

①河川を経由して海域に流入する場合

河川に放流された汚濁負荷は希釈作用、生物作用、沈澱（沈降）、地下浸透などよる変化、いわゆる浄化（自浄）作用を受けて海域へ流入する。そのため流入負荷量は流出負荷量に河川における浄化を考慮した一定の係数（流達率）を乗じて算出することにする。

②沿岸部から海域に直接流入する場合

この場合には、流路が短いことから流出負荷量は浄化作用を受けずに直接海域に流入する。よって、流入負荷量は流出負荷量と等しい。これら汚濁負荷の算定フローを汚濁負荷集計モデルとして図３－３に示す。

（2）　汚濁負荷量の集計手順

つぎに、陸域において発生した諸種の汚濁負荷量を集計して海域に流入する負荷量を具体的に集計する方法を提案する。

1）汚濁負荷量の集計のためのブロックの設定

流出負荷量の算出のために研究対象地域を河川ブロックと沿岸ブロックに分け、ブロック別に行うこととする。図３－４にブロック分けの概念を図３－５にブロック分けの例を示す。ここで採用したブロック名および関係市町村表を次頁の表３－１に示す。

河川ブロックの設定は、河川ごとに感潮域でない最下流の水質測定点を河川基準点とし、これより上流を１ブロックとする。沿岸ブロックの設定は、隣り合う河川ブロック間の地域と河川基準点より下流の沿岸地域を基本とし、これに沿岸部の地域特性（分水嶺、行政区分等）を勘案して沿岸市町村の集合体を設定し、１ブロックとする。

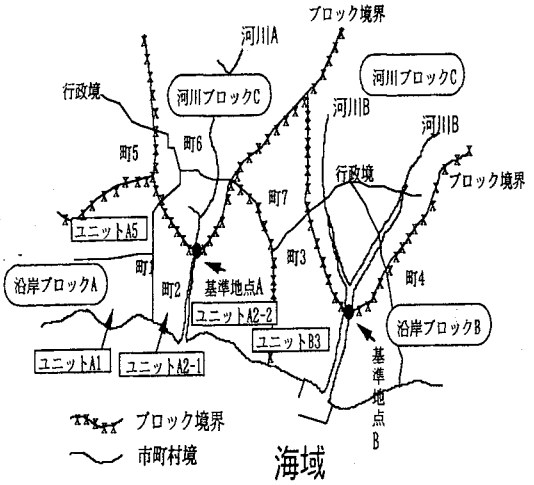


図３－４　ブロック分割モデル

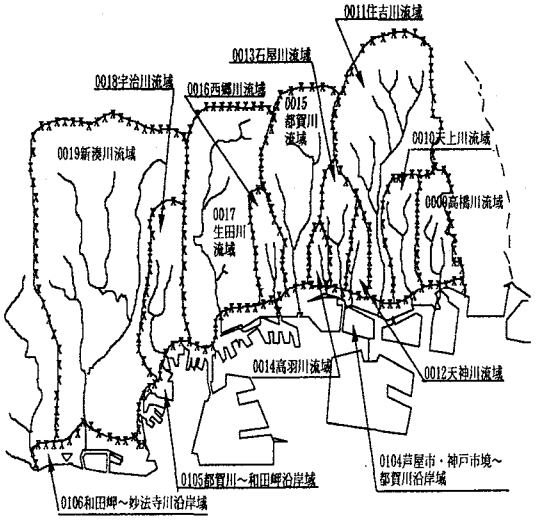


図３－５　ブロック分けの例

なお、ブロックの設定においては市町村を基本単位とするが、市町村が２つ以上のブロックに分割される場合は、所属ブロック数に応じて市町村を図３－４に示すようにユニットに分割する。　ただし、神戸市については小河川にまで及んでブロック分けを行ったので流域の大部分を流域ブロックで捕らえることができ、そのため沿岸ブロックについてはデータより発生源を下水処理場や工場などの点源のみとすることにする。

表３－１　河川および沿岸ブロックとブロックに含まれる関係市町村名

ﾌﾞﾛｯｸ番号	ﾌﾞﾛｯｸ名	河川名	基準点名	関係市町村
0001	蓬川流域	蓬川	南豊池橋	尼崎市
0002	武庫川流域	武庫川	甲武橋	神戸市・尼崎市 西宮市・伊丹市 宝塚市・三田市 篠山町・丹南町
0003	新川流域	新川	中津橋	西宮市
0004	東川流域	東川	住江橋	西宮市
0005	夙川流域	夙川	夙川橋	西宮市・芦屋市
0006	堀切川流域	堀切川	阪神電鉄鉄鉄橋下	西宮市
0007	宮川流域	宮川	宮川橋	芦屋市
0008	芦屋川流域	芦屋川	業平橋	芦屋市
0009	高橋川流域	高橋川	流末	神戸市
0010	天上川流域	天上川	天上川橋	神戸市
0011	住吉川流域	住吉川	住吉川橋	神戸市
0012	天神川流域	天神川	天神川橋	神戸市
0013	石屋川流域	石屋川	石屋川橋	神戸市
0014	高羽川流域	高羽川	玉利橋	神戸市
0015	都賀川流域	都賀川	昌平橋	神戸市
0016	西郷川流域	西郷川	流末	神戸市
0017	生田川流域	生田川	小野柄橋	神戸市
0018	宇治川流域	宇治川	流末	神戸市
0019	新湊川流域	新湊川	南所橋	神戸市
0020	妙法寺川流域	妙法寺川	若宮橋	神戸市
0021	千森川流域	千森川	流末	神戸市
0022	一の谷川流域	一の谷川	流末	神戸市
0023	塩屋谷川流域	塩屋谷川	流末	神戸市
0024	福田川流域	福田川	福田橋	神戸市
0025	山田川流域	山田川	山田橋	神戸市
0026	朝霧川流域	朝霧川	流末	神戸市
0027	志筑川流域	志筑川	志筑蓮	津名町
0028	洲本川流域	洲本川	潮橋	洲本市・緑町

ﾌﾞﾛｯｸ番号	ﾌﾞﾛｯｸ名	主要河川名	関係市町村
0101	尼崎市沿岸	蓬川	尼崎市
0102	西宮市沿岸	武庫川・東川 夙川	西宮市
0103	芦屋市沿岸	堀切川・宮川 芦屋川	芦屋市
0104	芦屋市・神戸市境 ～都賀川沿岸	高橋川・天上川 住吉川・天神川 石屋川・高羽川 都賀川	神戸市
0105	都賀川～和田岬沿岸	都賀川・西郷川 生田川・宇治川	神戸市
0106	和田岬 ～妙法寺川沿岸	新湊川 妙法寺川	神戸市
0107	妙法寺川～ 神戸市・明石市境沿岸	千森川・一の谷川 塩屋谷川 福田川・山田川	神戸市
0108	神戸市・明石市境 ～朝霧川沿岸	朝霧川	神戸市 明石市
0109	朝霧川 ～林崎漁港沿岸	朝霧川	神戸市 明石市
0110	洲本市・南淡町境 ～点川沿岸		洲本市
0111	天川～洲本市・ 津名町境沿岸	洲本川	洲本市 津名町 緑町
0112	洲本市・津名町境 ～志筑川沿岸	志筑川	津名町
0113	志筑川沿岸 ～津名町・東浦町沿岸	志筑川	津名町
0114	東浦町沿岸		東浦町
0115	淡路町沿岸		淡路町

２）集計計算に必要な諸パラメータの設定

①　発生原単位

汚濁負荷量の算定において、本来ならば各汚濁発生源ごとの排水測定に基づいて実測値より算定を行うべきであるが、家庭排水や山林、畑などから排出される汚濁負荷量を常時観測することは現実的ではない。そこで、このような汚濁発生に対しては、人間一人当り、家畜一頭当り、畑などの単位面積当りの汚濁負荷発生量に各ブロックの人口、頭数、面積をそれぞれ乗じて算定を行う方法が妥当であると考えられる。このような方法は原単位法といわれ、単位当りに発生する汚濁負荷量は発生原単位と呼ばれている。

表３－２　設定した発生原単位

汚濁発生源区分		COD(%)	TP(%)
生活系	小規模合併浄化槽(500人以下)	29.3g/人日	1.23g/人日
	単独浄化槽	10.1g/人日	0.77g/人日
	生活雑排水	19.2g/人日	0.46g/人日
土地系	山林	2.5g/ha日	0.50g/ha日
	水田	17.5g/ha日	1.00g/ha日
	畑	10.0g/ha日	1.00g/ha日
	その他	10.0g/ha日	0.50g/ha日
畜産系	牛	530.0g/頭日	50.00g/頭日
	馬	530.0g/頭日	40.00g/頭日
	豚	130.0g/頭日	25.00g/頭日
根　　拠		総量削減計画設定値	リン削減指導方針設定値

本研究で使用する発生原単位としては、各種の資料・文献[10,18]を参考に設定することにする。設定した発生原単位を表３－２に示す。

② 除去率

前節において算定した各発生源からの発生負荷量は、一般に対応する排水処理施設において活性汚濁処理、凝集沈澱などの処理を受けて汚濁負荷の一部は除去されることになる。この除去の割合は除去率と呼んでいるが、面状発生源については算定方法から除去率を設定することにする。なお、家庭から排出された雑排水は小河川、排水路、農業用水路などを経て公共用水域に流入するまでの間に、水路における自浄作用や地面への吸収などにより一部が除去されると考えられるが、その除去率はその地域の水路状態、地勢、地質の地域特性などに大きく影響される。したがって、本来ならこれらを考慮して除去率を設定すべきであるが、これらには未確定な要素が多すぎるため、本算定においては、そのような考慮は対象外として一律に除去率を０として扱うことにする。また、土地系からの汚濁負荷量も同様の理由から除去率を０に設定することにする。その他の汚染物質に関する除去率に対しては各種文献[10,18]から設定した値を表３－３に示す。

表３－３　除去率

汚濁発生源区分		COD(%)	TP(%)
生活系	小規模合併浄化槽(500人以下)	77	35
	単独浄化槽	50	15
	生活雑排水	0	0
土地系	山林	0	0
	水田	0	0
	畑	0	0
	その他	0	0
畜産系	牛	90	97
	馬	90	97
	豚	85	47
根　拠		総量削減計画設定値	リン削減指導方針設定値

③ 流達率

つぎに、河川に流入した汚濁負荷量は流下の過程において希釈作用、生物作用、沈澱あるいは沈降、地下浸透などによる量的・質的な変化、いわゆる浄化（自浄）作用を受ける。この浄化を考慮して設定される係数は流達率といわれる。

流入負荷量の算定において、本来ならば対象水域に流入する負荷量を実測し、実測値に基づいて流達率を設定するべきであるが、本論文では表３－４に示す文献値を参考にして河川の流れる地域を市街地中心部、市街地周辺部、農村部の３群に分けて表の最高値に設定することにした。ただし、市街地中心部ではいささかの自然浄化作用が残っていることを考えて決定した流達率の値を表３－５示す。

表３－4 流達率参考値

地域	流達率
市街地中心部	0.6～1.0
市街地周辺部	0.1～0.6
農村部	0.0～0.2

文献10)より転載

表３－5　流達率の決定値

河川名	流達率	河川名	流達率
蓬川	0.6	都賀川	0.9
武庫川	0.6	西郷川	0.9
新川	0.6	生田川	0.9
東川	0.6	宇治川	0.9
夙川	0.6	新湊川	0.9
堀切川	0.6	妙法寺川	0.9
宮川	0.9	千森川	0.9
芦屋川	0.9	一の谷川	0.9
高橋川	0.9	塩屋谷川	0.9
天上川	0.9	福田川	0.9
天神川	0.9	山田川	0.6
石屋川	0.9	朝霧川	0.6
住吉川	0.9	志筑川	0.2
高羽川	0.9	洲本川	0.2

3）　汚濁負荷量算定方法[10,18]

汚濁負荷量の算定の流れについては表３－６の示しているが、表中のフレームとは算定対象地での人口、家畜の飼育頭数、山林・水田・畑などの面積の規模を表すものでる。

①発生負荷量算定方法

現況の各発生源ごとの発生負荷量算定方法をそれぞれ表３－２に示す。汚濁物を排出する水量とその濃度を特定できる下水処理場や企業の排水処理設備など点源からの発生汚濁負荷量は排水量に濃度を乗ずることによって

発生負荷量（点源）＝排出量×濃濃　　（３－１）

として求められる。

一方、図３－３に示すように、家庭排水、牧場、山林や畑などの面源から排出される汚濁負荷量は、後述する発生原単位を人口、頭数、面積に乗じて

表３－６　現況発生負荷量の算定方法

発生源区分		発生源名	算定方法	使用データ
			COD	T－P
生活・下水系	点源	下水処理場	水質測定値 × 現況排水 ※1	
	点源	大規模合併浄化槽(処理人員501人以上	総量規制報告	水質測定値 × 現況排水量
	面源	小規模浄化槽(処理人員500人以下の合併・単独浄化槽)	処理人口 × 発生原単	
	面源	雑排水		
産業系	点源	大規模事業所(届出排水量50m^3/日以上)	総量規制報告	水質測定値 × 現況排水量
	点源	小規模事業所(届出排水量50m^3/日未満)	水質原単位(業種別) × 現況排水量 ※2	
畜産系	面源	牛	飼育頭数 × 発生原単	
	面源	馬		
	面源	豚		
土地系	面源	山林	面積×発生原単位	
	面源	水田		
	面源	畑		
	面源	その他		

註　※１下水道管理年報(1985～87年の3ヵ年の平均)
※２産業中分類の水質原単位(平均排水濃度)よ

発生負荷量（面源）＝発生原単位×数量　　（３－２）

として求める。すなわち、面源の汚濁発生負荷量の算定には原単位法を用いるが、単位当たり発生する汚濁負荷量である発生原単位の値を表３－３に示す。

②流出負荷量算定方法

上で計算した発生汚濁負荷量は、単なる汚濁物質を意味しているのではなく、当然のとながら水に含まれて域外に放出される。その際に、面源については、発生由来が生活系あるいは畜産系のものは、一般に各戸あるいは牧場の廃水処理施設において汚濁物を除去した上で域外に排出される。ここで、処理形態別の汚濁物の除去割合は除去率といわれている。

一方、家庭から排出された洗濯や風呂の排水などの雑排水は、排水溝、排水路、小川などを経て公共用水域に流入するまでの間に自浄作用などにより一部が除去されると考えられるが、次項において流達率として考慮されるので、ここでは一律に除去率は０として扱うことにする。このように、発生負荷量と表３－４の除去率を用いて、流出負荷量が次式で算出している。

流出負荷量（面源）＝発生負荷量×（１－除去率）　　（３－３）

ただし、点状発生源については前述した通り発生負荷量をもって流出負荷量とする。

流出負荷量（点源）＝発生負荷量　　（３－４）

③流入負荷量

前項で説明したような各発生源から流出した排水は、河川や下水幹線を流下して最終的には海域に流れ込むことになる。各河川ブロックから河川を経由して海域に流入する汚濁負荷量は河川の流下過程において種々の自浄作用を受ける。この浄化される割合を流達率という。その値は、式（３－１）と同じ先行研究により表３－５のように与えられている。

流達率を用いた各海域への流入負荷量を

流入負荷量＝流出負荷量×流達率　　（３－５）

によって算定する。

ただし、沿岸から直接海域に流入する汚濁負荷量、すなわち沿岸ブロックからの汚濁負荷量は、途中浄化作用を受けないため流達率を１であるとして流出負荷量をもって流入負荷量としている。

４）　流入汚濁負荷量のボックス配分

水質の再現計算は水質方程式によって行なわれるが、それを解くためには境界条件として海域に流入する汚濁負荷量を設定しなければならない。すなわち、上述したように陸域汚濁負荷に基づいて算定した流入負荷量が、海域の水質再現計算のインプット・データとして使用されるが、水質方程式がボックス・モデルとして定式化されているために流入汚濁負荷量を各ボックスへ配分しなければならない。先に述べたように水質再現計算を行うためのボックス分割では、コンピュータのメモリ容量の制約から、大阪湾全体を１１の大領域のボックスに分割し、さらに湾奥部の水面利用が錯綜することによる汚れのひどい部分については１４の小領域のボックスに分割してある。これらの大領域のボックス分割図と小領域のボックス分割図についは２章の図２－６～２－７に掲げてある。なお、小領域のボックス番号の前の数字は大領域の番号を、後ろの数字は小領域の通し番号を示す。

①ボックスへ配分の指針

１．河川ブロックから河川を通じて海域に流入する汚濁負荷量は、その河川の河口部分が属する海域のボックスに配分する。

２．沿岸ブロックから直接海域に流入する汚濁負荷量についても河川ブロックと同様に、その沿岸部分が属するボックスに配分されるが、１つの沿岸ブロックが２つ以上のボックスに属する場合については次のように配分する。

・面源からの負荷量については、ボックスによって沿岸部分が分割される割合に基づいて配分する。

・点源からの負荷量について　は、下水処理場や大工場などの大規模発生源の位置を地図上で詳細に調べて適切なボックスへ配分する。

以上の方法により海域の大領域および小領域の各ボックスに流入する汚濁負荷量を配分するべき陸域ブロックを割り当てた結果の一部を表３－７に示す。

表３－７　各ブロックのボックス配分

大領域ﾎﾞｯｸｽ	小領域ﾎﾞｯｸｽ	ブロック名
1	1－1	西郷川流域 生田川流域 宇治川流域 都賀川～和田岬沿岸
	1－2	住吉川流域 天神川流域 石屋川流域 高羽川流域 都賀川流域 芦屋市・神戸市境 ～都賀川沿岸
	1－3	宮川流域 芦屋川流域 高橋川流域 天上川流域 芦屋市沿岸 芦屋市・神戸市境 ～都賀川沿岸
2	2－4	武庫川流域 新川流域 東川流域 夙川流域 堀切川流域 西宮市沿岸 芦屋市沿岸
	2－5	蓬川 尼崎沿岸
5	5－7	新湊川流域 都賀川～和田岬沿岸 和田岬～妙法寺川沿岸
	5－12	妙法寺川流域
8	8－11	千森川流域 一の谷川流域 塩屋谷川流域 福田川流域 妙法寺川～ 神戸市・明石市境沿岸
	D (ﾀﾞﾐｰﾎﾞｯｸｽ)	山田川流域 朝霧川流域 妙法寺川～ 神戸市・明石市境沿岸 神戸市・明石市境 ～朝霧川沿岸 朝霧川～林崎漁港沿岸 東浦町沿岸 淡路町沿岸
11	D (ﾀﾞﾐｰﾎﾞｯｸｽ)	志筑川流域 洲本川流域 洲本市・南淡町境 ～天川沿岸 天川～ 洲本市・津名町境沿岸 洲本市・津名町境 ～志筑川沿岸 志筑川～東浦町沿岸

②計算機利用のための各種コード

汚濁負荷量の算定では取り扱うデータが膨大であって、実測値、フレームをインプットデータとしてコンピュータで用いて汚濁負荷量の算定を行なうため、ボックス別、流域・沿岸別、市町村別に汚濁負荷量を算定する必要性から、流域・沿岸および市町村にコード番号付けを行っている。

③負荷量算定結果

以上の準備のもとに、点源およぶ面状発生源別に陸上において発生する汚濁負荷量を算定した。点源、たとえば下水系、産業系大規模事業場、産業系小規模事業場、生活系大規模合併浄化槽について、例として神戸市環境局が調査した点源・面源に関するデータを用いて集計した結果を表３－８に示す。一方、面状発生源、すなわち小規模合併浄化槽、単独浄化槽、雑排水の生活系、および牛、馬、豚などの畜産系、山林、水田、畑などの土地系についてフレーム値に原単位を乗じて集計したが、使用したフレーム値は神戸市の各種統計データに基づいており、その数値を河川流域別に付録の付表３－１に示してある。つぎに、これらの集計結果から、陸域において発生する汚濁負荷量を各河川別、沿岸別に振り分ける必要がある。その結果を付録の付表３－２に示す。以上で、陸域において発生する流出汚濁負荷量が算定されたが、この量がそのまま海域に流入するとは限らない。すなわち、河川を流れる汚濁負荷はなんらかの浄化作用によって一部は除去される可能性がある。

表３－８　点源負荷量　　単位:kg/日

河川・沿岸名	ＣＯＤ発生負荷				ＴＰ発生負荷量			
	下水道	事業所総量規制	事業所(水濁法・公害防)	浄化槽大型	下水道	事業所総量規制	事業所(水濁法・公害防)	浄化槽大型
高橋川	0.0	0.0	1.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
天上川	0.0	0.0	3.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0
住吉川	0.0	0.0	3.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0
高羽川	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
石屋川	0.0	0.0	9.3	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0
天神川	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
都賀川	0.0	3.6	31.5	0.0	0.0	0.6	0.9	0.0
西郷川	0.0	1.7	9.7	0.0	0.0	0.4	0.3	0.0
生田川	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0
宇治川	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
新湊川	409.0	0.0	74.8	0.0	32.6	0.0	4.5	0.0
妙法寺川	0.0	10.0	13.0	0.0	0.0	0.5	0.5	0.0
千森川	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
一の谷川	0.0	0.0	3.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0
塩屋谷川	0.0	5.1	10.9	5.1	0.0	0.7	0.4	0.7
福田川	304.1	2.7	28.6	0.0	21.7	0.1	0.8	0.0
山田川	0.0	0.0	19.5	0.0	0.0	0.0	0.6	0.0
朝霧川	0.0	1.3	0.0	4.9	0.0	0.1	0.0	1.4
芦屋・神戸市境～都賀川沿岸	3904.2	473.9	7.2	0.0	253.9	36.3	0.1	0.0
都賀川～和田岬沿岸	1342.5	63.7	44.2	0.0	60.1	24.6	1.0	0.0
和田岬～妙法寺川沿岸	2161.2	33.5	21.1	0.0	132.4	1.1	1.5	0.0
妙法寺川～神戸・明石市境	1044.5	0.0	11.2	0.0	76.6	0.0	0.2	0.0

そこで、河川ブロックに対しては、それらの流出負荷量に各河川の流達率を乗ずる必要があるが、沿岸ブロックについてはそのまま直接海域に流入するとみなし、陸域からの流出負荷を海域への流入負荷とした。算定結果を付表３－３に示す。最後に、河川ブロックからの流入負荷量と、沿岸ブロックからの流入負荷量を海域ボックス毎に配分しなければならない。まず小領域ボックスについての計算結果を表３－９に示す。なお、河川ブロック、沿岸ブロック共に海域の小領域ボックスよりも細かい分割であるので、地図上の位置よりコンピュータが自動的に各ボックスに配分して行く。リンは無機リンと有機リン毎に算定しているが本章ではこれを合計して総リン(TP)として取り扱っている。

表 3-9 小領域ボックス負荷量算定値

ボックス番号	ＣＯＤ負荷量	ＴＰ負荷量
1-1	139.6	27.7
1-2	438.2	24.5
1-3	4256.1	270.9
2-4	10642.8	635.4
2-5	114347.0	9008.4
2-6	81977.5	1435.7
5-7	4047.7	231.3
8-11	411.2	28.4
5-12	42.9	1.9

表 3-10 小領域ボックス負荷量実測値

ボックス番号	ＣＯＤ負荷量	ＴＰ負荷量
1-1	233.2	4.1
1-2	491.7	71.3
1-3	4640.8	270.1
2-4	12015.4	817.5
2-5	135191.8	6707.4
2-6	95256.2	1206.5
5-7	5099.7	171.0
8-11	569.7	24.6
5-12	105.5	2.6

３－４　ボックス別流入負荷量の集計結果の評価

（１）　小領域におけるCOD、総リン(TP)に対する算定値と同実測値との比較

小領域ボックス別一日当たりの流入汚濁負荷算定量を表３－９に、小領域ボックス別の流入負荷量の実測値を表３－１０に示す。これより、ＣＯＤおよびＴ－Ｐ負荷量について算定値と実測値を比較したものをそれぞれ図３－６と図３－７に示す。算定値と実測値とは概ね良好な一致性を示すといえるが、計算値と実測値の違いは、モデルで仮定した発生－流出－流達のプロセスが簡単なものであり、必ずしも現実の状況を正確に反映していないためである。たとえば、実際の河川においては流達率がときとして 1.0 を越える場合があるし、面状発生源における汚濁負荷量の算定において原単位を一律に与えたことや、点源についても限られた測定結果に基づいて排出量を計算したことなど、モデルの設定がいささか簡単であったためと考えられる。

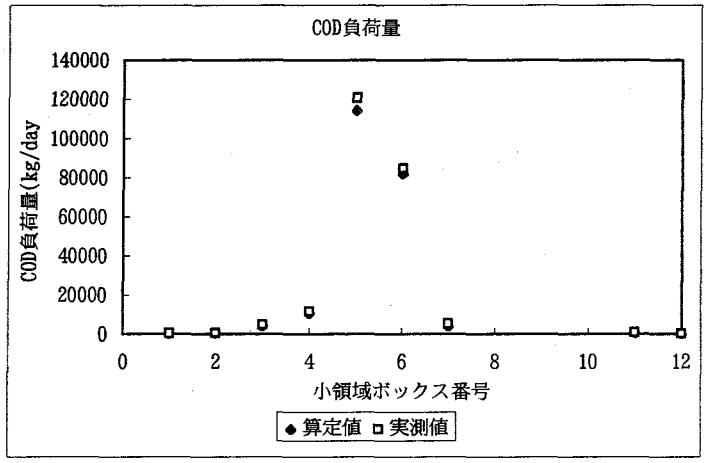


図３－６　COD負荷量の算定値と実測値の比較

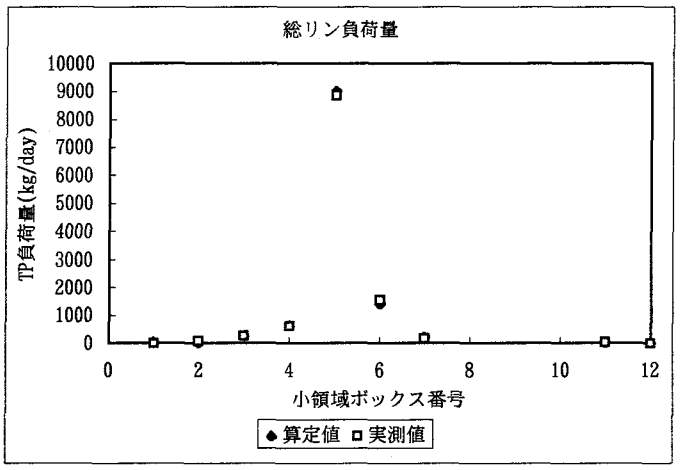


図３－７　総リン負荷量の算定値と実測値の比較

（２）　大領域におけるCOD、総リン(TP)に対する算定値と同実測値との比較

小領域に流入する汚濁負荷量の算定は若干の誤差を含むものの、許容される範囲であると判断されるので大領域についても同様の手法で汚濁負荷の集計計算を行った。対象領域

が拡大するため、手法は前述のものを踏襲したが、ブロック内でのユニット分割は若干粗くなっている。各ブロック分割の状況を表３－１１に示す。汚濁負荷量の算定結果を一日当たりの負荷量(kg)として付録の付表３－４に掲げる。また、沿岸での実測値と算定値の比較を図３－８と図３－９に示す。

表 3-11　大領域の河川ブロックと沿岸ブロックの関係市町村名

ﾌﾞﾛｯｸ	ﾌﾞﾛｯｸ名	河川名	基準点名	関係市町村名
001	武庫川流域	武庫川	甲武橋	神戸市・伊丹市 宝塚市・三田市 丹南町・西宮市 西宮市
002	神崎川流域	神崎川	中園橋	大阪市・豊中市 池田市・吹田市 高槻市・茨木市 箕面市・摂津市 豊能町・能勢町 尼崎市・伊丹市 宝塚市・川西市 猪名川町
003	淀川流域	淀川	枚方大橋	高槻市・島本町 枚方市・四条畷市 交野市
004	寝屋川流域	寝屋川	京橋	大阪市・守口市 枚方市・八尾市 寝屋川市・大東市 柏原市・門真市 東大阪市・四条畷市 交野市・藤井寺市
005	大和川流域	大和川	浅香 旧取水点	大阪市・柏原市 堺市・松原市 富田林市・太子町 河内長野市・羽曳野市 藤井寺市・河南町 狭山市・千早赤阪村 美原町
006	石津川流域	石津川	石津川橋	堺市・和泉市・狭山町
007	大津川流域	大津川	大津橋	泉大津市・和泉市 忠岡町・岸和田市
008	春木川	春木川	春木橋	岸和田市
009	津田川流域	津田川	照代橋	岸和田市・貝塚市
010	近木川流域	近木川	近木川橋	貝塚市
011	見出川流域	見出川	見出川橋	貝塚市・泉佐野市 熊取町
012	佐野川	佐野川	昭平橋	泉佐野市・熊取町
013	樫井川流域	樫井川	樫井大橋	泉佐野市・泉南町 田尻町
014	男里川流域	男里川	男里橋	泉南市・阪南町

ﾌﾞﾛｯｸ	ﾌﾞﾛｯｸ名	主要河川名	関係市町村名
101	神戸市沿岸	山田・福田川 塩谷・新川 東・一の谷川 千森・妙法寺川 宮・洗戎川 新湊・芦屋川 宇治。生田川 西郷・那賀川 高羽・石屋川 天神・夙川 住吉・天上川 高橋川	神戸市・明石市 西宮市・芦屋市
102	西宮市沿岸域 尼崎市沿岸域	蓬・庄下川	尼崎市・伊丹市
103	淡路島東沿岸	志筑・洲本川	洲本市・津名町 淡路町・北淡町 東浦町・緑町
104	大阪市沿岸域	正蓮寺川・安治川 住吉川・木津川	
105	堺市沿岸域		堺市
106	堺市沿岸域 泉大津沿岸域	王子川・新川	堺市・泉大津市 和泉市・高石市
107	和泉:泉大津～ 春木川沿岸域		忠岡町・岸和田市
108	和泉:春木川～ 津田川沿岸域		岸和田市・貝塚市
109	和泉:津田川～ 近木川沿岸域		貝塚市
110	和泉:佐野川～ 樫井川沿岸域		泉佐野市・田尻町
111	和泉:樫井川～ 男里川沿岸域	大里川	泉南市
112	和泉:男里川 南部沿岸域	茶屋川・番川 大川・東川	岬町・阪南町

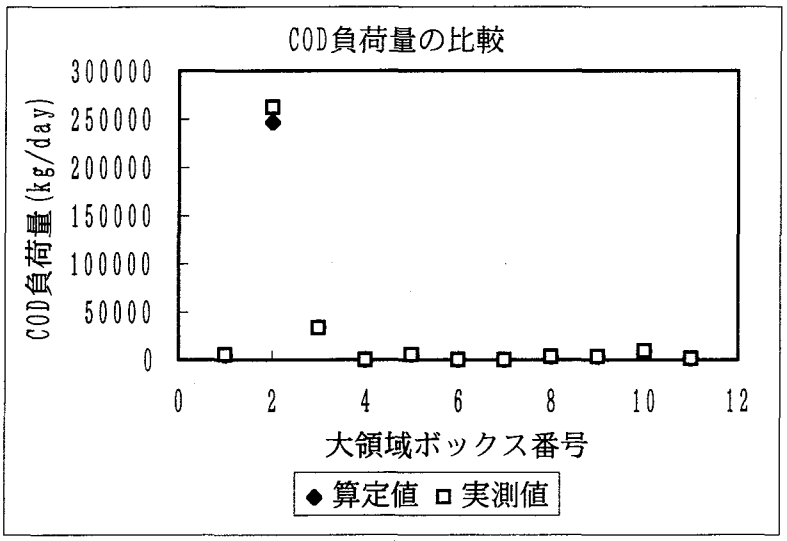


図３－８　COD負荷量の算定値と実測値の比較

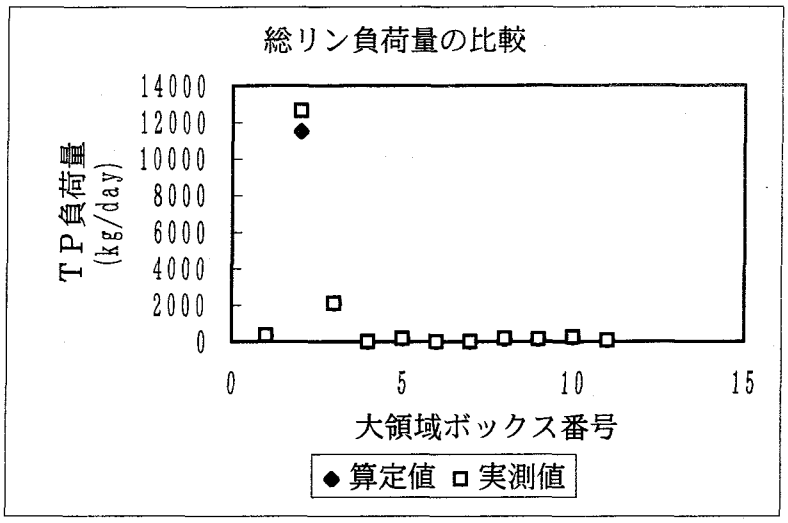


図３－９　総リン負荷量の算定値と実測値の比較

COD の汚濁負荷量は小領域、大領域ともに算定値が５％少なく集計され、総リン(TP)では大領域は７％少なく、小領域ではほぼ合致している。この検討結果より、本システムでは算定値をそのまま使用できると判断した。

３－５　将来流入負荷量の予測とその評価

（１）将来流入負荷量の予測

本節では、西暦 2000 年を将来とした場合の水質がどのように変化するのかを予測する。それには、大阪湾の小領域、大領域に流入する汚濁負荷量を算定しなければならない。そこで、本章で論じてきた図３－３の汚濁負荷量算定モデルに基づいた発生汚濁負荷量の算定方法を以下のように修正して適用することにする。

①陸域流出負荷量

流出負荷量については人口の伸び率を考慮し算定した。個人水消費量は現況の値を用いている。産業の変化として

表３－１２　将来発生汚濁負荷量の算定方法

発生源区分		発生源名	算定方法	使用データ
			ＣＯＤ	Ｔ－Ｐ
生活・下水系	点源	下水処理場	現況水質 × ※１	将来排水量 ※３
	点源	大規模合併浄化槽(処理人員 501 人以上)	排水基準※４ × 将来排水量	水質測定値 × 将来排水量
	面源	小規模浄化槽(処理人員 500 人以下の合併・単独浄化槽)	処理人口 × 発生原単位(現況値)	
	面源	雑排水		
産業系	点源	大規模事業所(届出排水量 50m³/日以上)	現況水質×将来排水量	
	点源	小規模事業所(届出排水量 50m³/日未満)	水質原単位(業種別,現況 × 現況排水量	
畜産系	面源	牛	飼育頭数 × 発生原単 ※５ (現況値	
	面源	馬		
	面源	豚		
土地系	面源	山林	面積×発生原単位 (現況値	
	面源	水田		
	面源	畑		
	面源	その他		

註　※３神戸社会経済ｼﾐｭﾚｰｼｮﾝﾓﾃﾞﾙ(1986 年３月市長総局
※４神戸市浄化槽指導要綱に定める排水基準に準拠
※５第３次神戸市農漁業基本計画(案)よ

は沿岸での埋め立て地と進出する産業、たとえばポートアイランド、りんくうたうんや、関西国際空港などを考慮して、産業の発生負荷量を修正した。ただし、産業の業種毎の水需要については現況のものと同じにした。これらに従った将来の算定方法を表３－１２に示す。

②陸域流入負荷量

海域へ流入する汚濁負荷量の計算は、現況の計算と同様に河川ブロックと沿岸ブロックにわけて集計をおこなった。河川ブロックで流入負荷量の算定に用いる流達率は、現況のものを使用している。

③ボックス別流入負荷量

現況の計算と同様、河川ブロックと沿岸ブロックからの流入負荷量を集計し海域ボックスへ振り分けるプログラムにより自動的に振り分けている。　小領域の１日当たりの海域流入汚濁負荷量(kg)の予想値を表３－１３に、大領域のそれを表３－１４に示す。

表３－１３　小領域の負荷将来予測

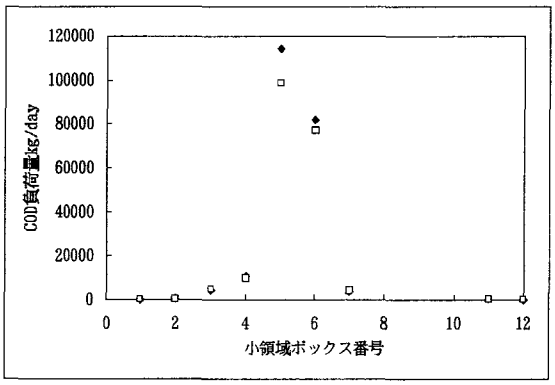
ﾎﾞｯｸｽ番号	ＣＯＤ負荷量	ＴＰ負荷量
1-1	138.9	27.7
1-2	436.8	12.1
1-3	4730.8	313.2
2-4	10952.4	663.2
2-5	118560.3	9108.9
2-6	81357.2	1523.8
5-7	4260.4	261.3
8-11	347.4	24.9
5-12	27.3	1.3
合計	220811.5	11936.4

表３－１４　大領域の負荷将来予測

ﾎﾞｯｸｽ番号	ＣＯＤ負荷量	ＴＰ負荷量
1	5196.4	344.7
2	162128.1	8815.5
3	32320.0	1953.3
4	0.0	0.0
5	4755.2	280.5
6	0.0	0.0
7	0.0	0.0
8	2995.0	203.3
9	3846.5	276.3
10	8869.5	239.3
11	1332.6	66.4
合計	221443.3	12179.3

（２）　現況負荷量と将来負荷量の比較

現況負荷量と将来負荷量の比較をＣＯＤについては図３－１０に、総リン(TP)については図３－１１に掲げる。図は武庫川、淀川、大和川流域の将来汚濁負荷量が減少していることを示している。



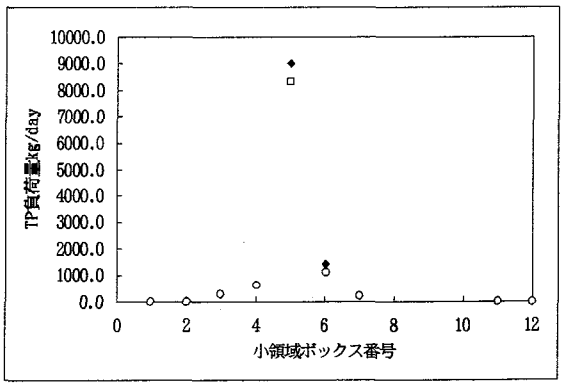


図 3-１０　小領域ボックスの COD 負荷量(左と総リン(右)現況◆と将来□，単位は kg/日

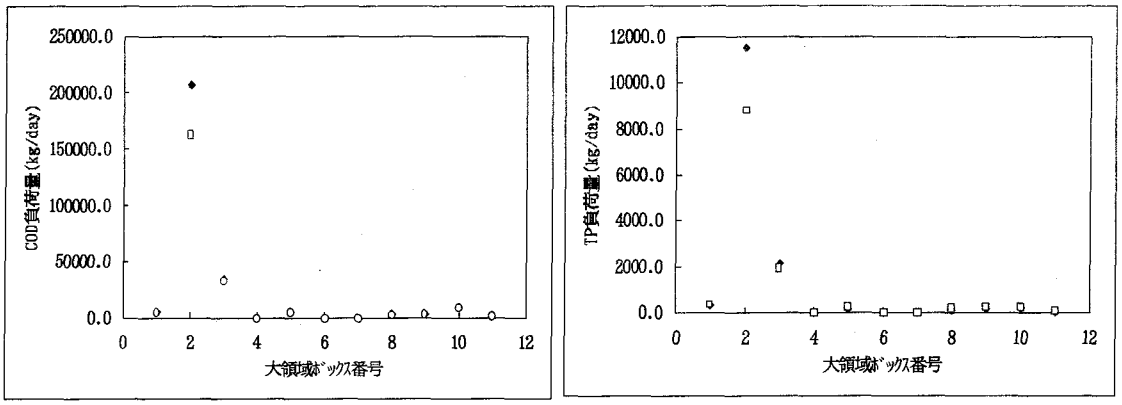


図 3-11 大領域ボックスの COD 負荷量(左)と総リン(右)現況◆と将来予測値□

単位は kg/日

小領域ボックス 1-3 と 5-7 において流入負荷量が少し増加するのは、陸域のブロックでいえば東灘、中部、西部、ポートアイランドならびに六甲アイアランドに相当する。この地域を中心に新規産業の開発、人口の伸びや生活系の汚濁負荷の増加が表れたと考えられる。大領域では、第 2 章で触れたように COD 負荷量が約 17%減少している。

3－6　自動車による道路面への汚濁負荷の測定

後段で述べる物流に連動して増加する環境負荷については排出面積ではなく走行する自動車の原単位に係わると考えられるので本節で自動車による道路面への汚濁負荷について考察することにする。自動車による環境への一般的な影響については、環境白書(1991,92 年版)にまとめられているし、たとえばエネルギー面から見たもの[21]などがある。しかし、自動車の走行による路面への汚濁負荷に関する研究は少ない。本節では自動車による環境への影響に関して、自動車が直接路面に残す汚濁物に着目し、それが雨天時に汚濁負荷として流出して環境水質に悪影響を与えている過程、とくにＣＯＤについて着目する。これらの研究はすでに和田、三浦[23-25]が市街地道路の雨水桝の堆積物から出る環境への負荷を測定し報告しているが、測定地点が市街地であるためこの方法では自動車のみによる負荷だけでなく人為的な汚

図３－１２　測定地点付近の概略図

れも付加されていることになる。

いずれにせよ将来輸送量が増加すれば、当然のことながら排出汚濁量も増加し汚染が進行する。本節では排出汚濁としてCOD負荷に着目する。環境白書（1990年版）によると瀬戸内海に流入するCOD負荷の内、生活と産業によるものを除いたCOD負荷量は82トン／日とされている。このうち自動車輸送に由来するCOD量を推定しなければならないが、神戸市営六甲北有料道路において自動車を発生源とするCODを含む汚濁負荷原単位を1994年6月から同年12月にかけて文部省科学研究補助(1994年度一般研究C）を受け測定し解析を行っている。この解析結果に基き自動車によるCODの負荷量を推定する。

（1）計測の概要と通過交通量・観測データ

神戸市営六甲北有料道路は、中国自動車道の神戸三田インターチェンジから六甲山トンネル、新神戸トンネルを経て神戸市街へ通じるバイパスで、神戸市道路公社が管理しており、自動車のみが有料の道路である。したがってこの道路は、一般の道路と高速道路の性格を併せ持っている。図３－１２に自動車を発生源とする汚濁負荷の測定地点付近の略図を示す。測定地点としては、道路高架部を選定し幾つかの雨樋が一つの橋脚に集まった２箇所を測定点に選んだ。これらの測定点を、ＡポイントとＢポイントと名付けた。測定は、天気情報により降雨が予想される度に前もって現地に赴き降雨を待って採水を行った。道路には前回の降雨から今回の測定降雨の間に、道路上に蓄積したタイヤの削りかす、排気ガスから道路に落ちる汚濁物、自動車から直接落とされるゴミなどが降雨により雨樋から排出されると考えられる。ただし、降雨と降雨の間に風で吹き飛ばされたり、あるいは均等に流出しないことも考えられるが、1994年6月予備試験開始より同年12月までの6カ月を測定期間として長期間の平均的な状況を捉えるよう配慮した。採水は、18ﾘｯﾄﾙの広口ビンを樋に直接連結し５分毎に採水ビンを代え試料を取り出し、研究室に持ち帰り固形物の分離を行った後、化学分析を行なった。化学分析はSS（固形物g/ﾘｯﾄﾙ）、総リン(mg／ﾘｯﾄﾙ)、総窒素(mg／ﾘｯﾄﾙ)、COD(mg／ﾘｯﾄﾙ)、pHについて行ったが、以下ではCODについてのみ述べる。

表３－１５　通過交通量

日付	時間	南行 本線 大型	南行 本線 小型	南行 測道 大型	南行 測道 小型	北行 本線 大型	北行 本線 小型	北行 測道 大型	北行 測道 小型
10月17	5:00～	486	2971	29	131	442	2953	23	119
10月18									
		2158	12986	110	685	2013	12729	89	574
10月20									
10月21	～9:00	78	326	2	27	91	558	0	6
10月21	16:00～	150	1629	3	28	121	1058	11	77
10月22									
		2792	21832	290	1771	2630	20405	234	1485
10月27									
10月28	～15:00	325	1381	37	107	347	2088	17	41
10月28	18:00～	90	1332	0	40	74	794	1	46
10月29									
		1620	14312	201	1558	1520	13348	160	1386
11月 1									
11月 2	～20:00	504	3058	27	196	506	2806	36	164
11月 6	15:00～	93	2326	11	106	76	1473	35	312

1）通過交通量と降水量の把握

採水期間中の通過交通量は、神戸市道路公社道路管理事務所の計算機に時間毎に収録されている料金データから求めている。このデータは自動車を発生源とする汚濁負荷原単位の測定地点の南約2.5ｋｍにある大沢料金

所における全通過車両に対し料金の徴収の際自動的に記録されるものである。例として10月21日～11月6日の通過交通量のデータを表３－１５に掲げる。ただし、料金体系は大型車と小型車の２種類のみとなっている。

降水量としては、は神戸海洋気象台のアメダスデータより三田局（三田市天神、採水地点より約 3.5km 東北東）の時間当たりの降雨記録を入手して用いた。例として 10 月 17 日～11 月 6 日までの三田局の毎時降雨量の日報データを表３－１６に示す。なお、降雨に関しては採水地点より約 2km 東にある神戸市北区役所道場出張所の雨量計の記録も参考

表３－１６　アメダス記録の例
地域気象観測毎時降水量（mm）　日報　（三田）　横軸：時刻

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
10月17日	1	4	2	1																				
10月21日											1	6	6	8	1									
10月28日																	1							
11月2日																					1		1	2
11月6日						1		1	3	1	1			1										

にし降雨日が10月17日、21日、28日、11月2日、6日であることを確認した。

表５－９より、たとえば10月21日の11時に降り始め16時に止んだことが示されている。10月21の降雨時のデータをグループ１と呼ぶ。同様にして10月28日の測定をグループ２、11月2日の測定をグループ３、11月6日のそれをグループ４と呼ぶ。これに従って通過交通量のデータを表５－１０に示すように10月17日5時か24時までに加えて10月18日から20日、さらに10月21日の10時までに通過した交通量をもってグループ１のデータとした。10月17日5時から10月21日10時までの通過交通量に対応する汚濁負荷が採水ビンにより10月21日の15時に回収されていることが分かる。

２）化学分析結果の考察

以上述べたように、雨は間欠的に降っており前日までに道路に蓄積した汚濁物が降雨によって集められ側道を流下し水質を悪化させる。ここではCODについて着目する。採水地点はA,Bの２つのポイントであるが両ポイントにおける採水データには図３－１３に示すようにほとんど差がないことを確認している。

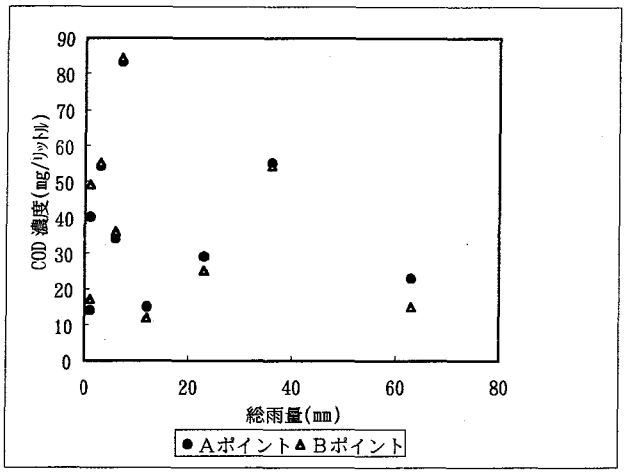


図３－１３　ＡポイントとＢポイントの濃度差

図３－１９には、降雨のあった日別ごとに採水された水に含まれている COD 濃度に関するデータを示している。この図の横軸は経過時間を示しており、縦軸は各時間帯での採水された水に含まれている COD 濃度をとっている。これにより初期流出濃度が高く漸次減少し、約 95 分後にはほぼゼロになることが確認された。また、排水には時系列的に行われているが、図３－１４に示されるように COD の濃度は、時系列的に減少しておりそのパターンは各降雨ごとに同様の振る舞いをしている。もともと、COD の流出に関しては、河[26]の報告にあるように初期の流出濃度は大きいが 20 分弱後の濃度は半分に減少するとされている。

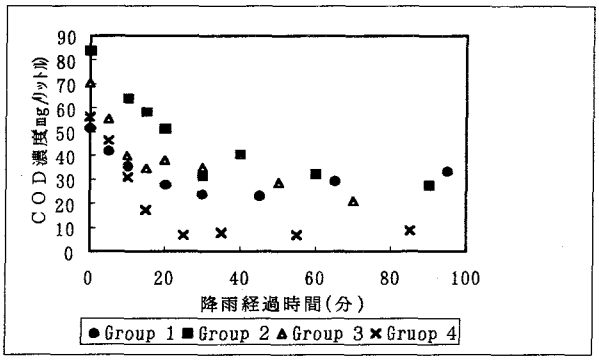


図 3-14 降雨経過時間とＣＯＤ最大値の関係

（2）ＣＯＤ負荷量と通過交通量の関係

上述のように、ＣＯＤの汚染原因は前回の降雨終了時から今回の降雨開始までに通過した自動車によるものである。通過交通量のデータは表３－１５に示されているが、自動車の通過台数は一定ではない。というのは降雨と降雨の間隔は一定ではないからである。

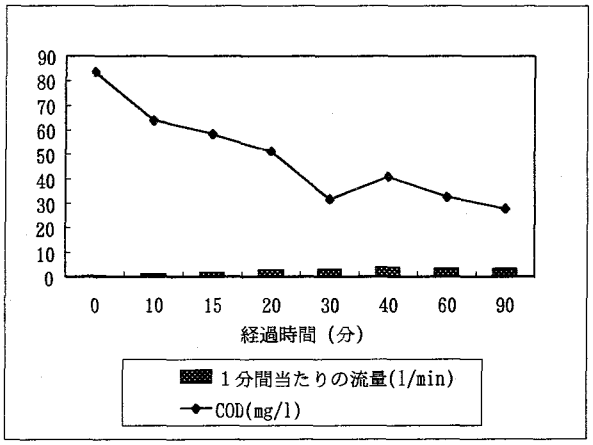


図３－１５　グループ２の流量と COD 濃度の関係

総通過台数とＣＯＤ濃度最大値のデータについて、前者を横軸に後者を縦軸にプロットしたものを図３－１５に示す。これによると、ＣＯＤ濃度の最大値は通過自動車台数と、10 万台あたりまでは正の相関があるものと推定されるが、ＣＯＤ濃度の最大値を被説明変数ｙ、通過台数を説明変数ｘとしたときの回帰直線ｙ＝βｘが図３－１６に示されている。当然のことながらこの直線は原点を通らなくてはならない。この回帰分析の相関計数Ｒは 0.886 で適合度は良好である。ただし、このβの値は、大型車と小型車との両方の影響を加味したものであり、本来は、大型車と小型車とでは異なる値を取るものと考えられ、その決め方は第５章で詳述することにする。

1）ＣＯＤ負荷の推定

図３－１４の降雨経過時間によるＣＯＤの変化で示されるように、降雨開始直後に採水されたときのＣＯＤ濃度は高く、時間が経過するに従って濃度は減少しており、採水時間は９５分で打ち切ってよい。これら一連の測定において、たとえば、グループ２では、■印で示されているように最初の採水では１リットルあたり 82 ｍｇのＣＯＤ濃度が観測され、10 分後には 62 ｍｇのＣＯＤ濃度が測定され、以下同様にして８回の測定が行われている。例として、グループ２の測定の様相を図３－１６に示す。

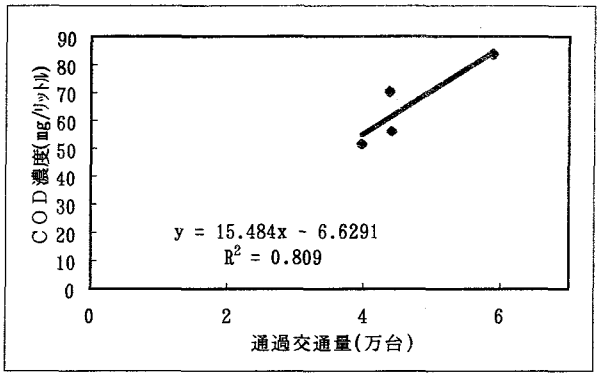


図 3-16 ＣＯＤ濃度と通過交通量の関係

そこで、グループ j の測定データについて、この期間中のＣＯＤの総負荷量 C_j は、

$$C_j = \sum_{t=1}^{8} \{COD値(mg/ﾘｯﾄﾙ) \times 流量L(ﾘｯﾄﾙ)\}$$

で求められる。この結果を表３－１７の総ＣＯＤ負荷量Ｃの欄に示す。

表３－１７　総負荷量と平均交通量

	総負荷量 C	日別の平均交通量	
	COD(mg)	小型車	大型車
ｸﾞﾙｰﾌﾟ 1	5577.37	34065	5521
ｸﾞﾙｰﾌﾟ 2	13060.59	51902	6957
ｸﾞﾙｰﾌﾟ 3	8858.42	39040	4739
ｸﾞﾙｰﾌﾟ 4	8770.24	87581	12307

2）車種別のＣＯＤ負荷量の算出

先に、指摘したように、小型車と大型車とでは、ＣＯＤ負荷排出量の寄与度は当然異なってしかるべきである。ところで、表３－１５には、大型車と小型車のそれぞれの通過台数が示されている。そこで、測定グループ j に対する小型車の通過交通量を X_j、大型車の通過交通量を Y_j とする。X_j と Y_j の値は表３－１５から求まるが、その結果を表３－１７に示す。たとえば、グループ１では、17 日 5 時から 21 日の 9 時までの大型車の総通過台数は、表３－１５の南行、本線、大型の欄の 486 台＋2158 台＋78 台と南行、側道、大型の 29 台＋110 台+2 台、および北行、本線、大型の 442 台＋2013 台+91 台と北行、側道、大型の 23 台＋89 台＋0 台、総計 5521 台が表５－１２の大型車(Y_1)の値として記入されており、以下同様である。

そこで、小型車１台当たりが排出するＣＯＤ負荷量を γ (mg/ﾘｯﾄﾙ)、大型車１台当たりが排出するＣＯＤ負荷量を δ (mg/ﾘｯﾄﾙ) とするとき、前項で求めた測定グループ j の１連の測定によるＣＯＤ総負荷量 C_j (mg/ﾘｯﾄﾙ) は

$$C_j = \gamma \times j + \delta \times j$$

と与えられる。

表３－１５のデータにもっともよく適合するγ、δの値として、

$$\gamma = 0.971\ (\mathrm{mg/台}) \qquad \delta = 6.599\ (\mathrm{mg/台})$$

が得られた。

求められたγ，δを単位距離(1km)当たりに換算する。測定地点の道路にある雨水桝の間隔と道路幅より道路面積が分かる。一方、車線幅は全国の主要道路で一定と考えれば雨水桝間隔当たりのγ，δに換算され、さらに単位距離当たりのCOD負荷量として計算できる。

$$\bar{\gamma} = 22\ (\mathrm{mg/km}) \qquad \bar{\delta} = 160\ (\mathrm{mg/km})$$

となる。

（３）　自動車の排出する路面負荷量の算定

ここでは試算として阪神地域を中心にして東海地域、北九州、京浜葉、西北海道地域を代表とする全国規模の自動車による汚濁負荷を考える。各地域への主要４高速道路の1994年全線日平均交通量をまとめたものを表３－１８に示す。

表３－１８　高速道路の車種別平均交通量と延長距離

		小型車		大型車				高速道路	延長距離
		軽自動車	普通車	中型車	大型車	特大車	計	通行台数	km
東名	全線日平均交通量	1,878	41,374	11,408	19,686	2,304	76,650	418,027	346.7
	構成比（%）	2.5	53.9	14.9	25.7	3.0	100.0		
名神	全線日平均交通量	2,319	39,145	9,726	18,729	2,099	72,018	257,715	189.3
	構成比（%）	3.2	54.4	13.5	26.0	2.9	100.0		
東北	全線日平均交通量	885	20,797	3,579	5,182	664	31,107	265,941	679.5
	構成比（%）	2.8	66.9	11.5	16.7	2.1	100.0		
中国	全線日平均交通量	792	11,523	2,277	4,745	399	19,736	154,743	543.1
	構成比（%）	4.0	58.5	11.5	24.0	2.0	100.0		

ただし、表３－１８では軽自動車と普通自動車を小型車とし、中型車、大型車と特大車を大型車としている。ところで、前節では、六甲北有料道路において大型車、小型車別に単位距離走行時の発生 COD 負荷量としてγ，δを求めた。この結果を全国規模の交通流に適用する。すなわち、表３－１８の結果については道路１車線当たりの幅は六甲北有料道路と同一として表３－１８の４区間の高速道路についての延長距離も右欄に示されているので、各高速道路別にＣＯＤの総汚濁負荷量として求められる。これを表３－１９に示す。ところで京浜葉、東海、北九州、西北海道のそれぞれのルートに対して平均的な運行パターンと自動車１台当たりの輸送時間と輸送距離を述べる。ここで輸送時間とは、自動車では高速道路を時速 90km で走り一般国道は時速 35km で走行するとし、高速道路では 30 分休憩を京浜葉では２回、東海で１回、北九州で２回、西北海道では５回採るとした。西北海道に限りフェリーの航走時間を４時間加えている。また、海運では荷役時間を１時間とし鉄道の荷役

表3-19　自動車によるCOD負荷量の変化　単位:トン/日

阪神より	距離 km	現状(1990)の の分担率	2010年の負荷	
			将来分担	計算分担
京浜葉	549.9	8.73	14.85	8.61
東海	181.0	4.51	11.43	4.68
北九州	641.4	8.04	11.10	11.87
西北海道	1214.1	30.14	30.18	34.70
合　計		51.41	67.55	59.87

註：右欄の将来分担率とは、現在の分担率を将来の輸送推定量に割り当てたものであり、計算分担率がモーダルシフトによる分担率を指す。

時間を30分と仮定する。

以上述べたように全国規模において表３－１８に高速道路の通行量と延長距離がが示されており、表３－１９のCOD負荷量は、現状(1990年)の貨物輸送形態別分担率に対するものである。

３－７　結　　言

大阪湾のような内海・内湾に対して全域の水質管理を行う必要があることは緒言で述べた。それには水質改善する責務を有している立場にいる行政の環境問題担当者が、日常業務として使いなれているコンピュータ上に管理システムを構築すればよいのではないかという発想から、本論文の研究が開始された。この水質管理システムを陸域の汚濁負荷量集計システム、海域の水質再現システム、施策試行システムおよび環境データファイルに分けて構築することにした。本章は、陸域の汚濁発生から海域へ流入するまでの負荷量集計を行うためのサブシステムに関するものである。集計モデルは、汚濁負荷発生→流出→海域流入を点源と面源に分けて構築している。

汚濁負荷集計方法については先行研究[10]があり、これをシステム化して組み込んで改良した。３－２節では研究対象領域における汚濁負荷発生源について考察し、汚濁発生源を点源と面源に分た。３－３節では、それぞれの発生源からの流出過程に関して排水経路において受ける浄化作用を考慮に入れた。ついで排水は、終末処理場で処理されて海域に流入する。この過程で発生負荷、陸域流出負荷、海域流入負荷をそれぞれ集計するシステムを構築した。ところで、本論文の目的の一つに陸域で何らかの施策を執った際の海域での反応を検討するということにあるので、陸域を細分割しなければならない。当然のことながら、負荷集計結果と実測値との誤差は小さくしなければならない。そこで、まず陸域の流達率を考慮しなくて良い沿岸部を内陸部から分離し、内陸部は行政境界、河川流域、雨水幹線、下水道境界、広域下水道境界などが複雑に入り組んでおりブロック分けに工夫を要した。この操作は、将来的にはGIS(地域情報システム)によって、より系統的かつ容易になされると期待される。

３－４節では、本システムによる汚濁負荷の集計値を実測値と突き合わせることにより本システムの妥当性を評価した。３－５節では、将来の汚濁負荷を推定して現況負荷と比較評価し、COD全負荷量が若干削減される結果を得た。上述したように本陸域汚濁負荷の集計手順は複雑ではないが、計算機システムとしては下水道敷設工事の進捗、大規模宅地開発や工場移転のように年々変化する状況に対応することが要求され、本システムはそのような柔軟性を備えたものとなっている。このシステムを実際に使用する場合の使い勝手を考えると、入力のし易さ、処理時間の問題などがあり集計方法は簡素にしたが、負荷集計結果の精度は全体のシステムに対して対応できる精度を持っていると判断した。

また、３－６節では後に考察する自動車からの路面負荷量を算出するために実測を行なっている。この結果、単位距離当たりに道路面に排出されるCOD原単位を大型車と小型

車別に求めている。

水質を改善するための施策を次章で論じるため、陸域のブロックを細分割した集計計算を行っているが、下水処理設備の統廃合のような大きな変更には追随できるとは必ずしもいえない。ここは流域内の活動量の変化量は、それぞれ独立であるとの仮定で算定システムを構築したが、相互干渉の度合いの大きい変更を想定するときには、研究のフレームを重視して研究を進めている。今後、集計システムの見直が必要になることも予想される。

第４章　内海・内湾の水質改善施策の効果と評価

４－１　緒　　言

本論文の第２章において、内海・内湾地域の水質再現を試みるために①作用反応モデルに基づき、②物質の移動量を表す物質の循環過程を定式化し、③感度解析を適用することによって全てのパラメータ値を定めて、現況における水質の再現性の良好な解を導き出した。さらに、この方法を応用して西暦 2000 年における内海・内湾水域の水質を推定し、それに対応する将来の水質予測を行った。さらに、第３章において、陸域汚濁負荷の集計システムを構築し現況と将来についての負荷集計の実行結果を得た。このシステムに環境観測値を格納する環境データベースをシステム本体に付加し水質管理システムを構築した。

本章では、これら自然現象を再現するシステムを基に自然に対して意志を持つ主体すなわち人間集団が水環境を改善するための施策を実行したときの効果を評価することにする[1-2]。また、施策の併用による効果や施策優先順位の決定など、きめ細かい使用上の反応についても検討する。まず、４－２節において環境庁の定めた水質基準値をと 75%水質値を考慮に入れて、施策の有効性を判断する基準としてこれを用いることにする。施策効果をシミュレーションモデル上で実行した場合の指標として COD の非超過の値（以下では 75%値)を採用する。水域内で行政機関により測定された実測値より 75%値を定めるための理論式を重回帰分析によって誘導する。４－３節ではその回帰式を用いて水質モデルより得られた計算値(予測計算値)と 75%を対比した上で、水質改善のための施策として陸域汚濁負荷量を削減した場合の効果を評価し、さらに大阪湾全域の陸域からの流入負荷量削減による将来時点での施策の効果について評価している。４－４節では陸域のどのブロックの負荷が、大阪湾のどの部分に影響を与えているかをインパクト・マトリックスにより表し線形計画による海域の水質改善のための施工優先順位を求めている。４－５節では、本章で論じた成果を要約している。

表４－１　海域における環境基準

類型＼項目	利用目的の適応性	基準 pH	COD	DO	大腸菌群数	n-ﾍｷｻﾝ抽出物質
A	水産１級 水浴 自然環境保安及びB以下の欄にあげるもの	7.8 以上 8.3 以下	2 mg/l 以下	7.5 mg/l 以下	1,000 MPN/100ml 以下	検出されないこと
B	水産２級 工業用水及びCの欄にあげるもの	7.8 以上 8.3 以下	3 mg/l 以下	5 mg/l 以下	――	検出されないこと
C	環境保全	7.0 以上 8.3 以下	8 mg/l 以下	2 mg/l 以下	――	――

註）1 水産１級　：ﾏﾀﾞｲ,ﾌﾞﾘ,ﾜｶﾒなどの水産生物用および水産２級の水産生物用
2 水産２級　：ﾎﾞﾗ,ﾉﾘなどの水産生物用
3 自然環境保全：自然探勝などの環境保全
4 環境保全　：国民の日常生活（沿岸の遊歩等を含む）において不快感を生じない程度

４－２　環境基準値と 75%水質の解釈

（１）設定されている公的な環境基準値

一般に海域に対して公的に設定

された環境基準は、その海域の利水目的に応じて水域別に設定されており、表４－１に示すように個別に水域類型が定められている。神戸港を含む海域に関しては 1971 年環境庁告示として図４－１のように大阪湾の環境基準類型と基準値が定められている。図中のカタカナは達成までの期間を示すものであって、（イ）は直ちに達成、（ロ）は５年以内で可及的速やかに達成、（ハ）は５年を越える期間で可及的速やかに達成することを意味している。ちなみに第２章のボックス分割には、この線引が考慮されている。

一方、神戸港海域における水質汚濁防止については、1973 年に制定された「瀬戸内海環境保全特別措置法」[2)]に基づき、陸域の汚濁負荷を総量で削減するため「化学的酸素要求量（ＣＯＤ）に係わる総量削減計画」が 1979 年から発動された。それによると第１次計画目標年度が５年後の 1984 年と定められ、それに従って規制が行われた。さらに、赤潮の発生による漁業の被害や、富栄養化による環境悪化を防ぐため「リン及びその化合物に係わる削減指導方針」を 1980 年に策定され、リンの削減を指向した第２次削減指導方針を策定、実施された。また、1986 年には、第２次総量規制の実施や 1989 年の水質汚濁防止法の改正も行われた。このような状況のもとで、神戸港を含む大阪湾に流入する汚濁負荷量の経年変化と神戸港における水質の経年変化を比較してみると、表４－２の示すようにＣＯＤ総量規制が始まった 1979 年以後、流入負荷量は頭打ちになっているものの、海域における水質はそれほど改善されていない。とくに、環境基準達成状況を類型毎にみると、Ｃ類型は環境基準をほとんど達成しているが、ＡとＢ類型は未達成の地点が多く、さらなる水質改善努力が要請されている。そこで、本論文では水質改善の目標値として環境庁が 1971 年に定めた環境基準類型値（以下は緩急基準値）を用いることとする。小領域大領域の各ボックスに対応する環境基準値を表４－３に示す。とくに小領域に着目するのは、陸域から流入する汚濁負荷に直接影響されるため、水質が悪化しているからである。図４－１に、大阪湾全域に

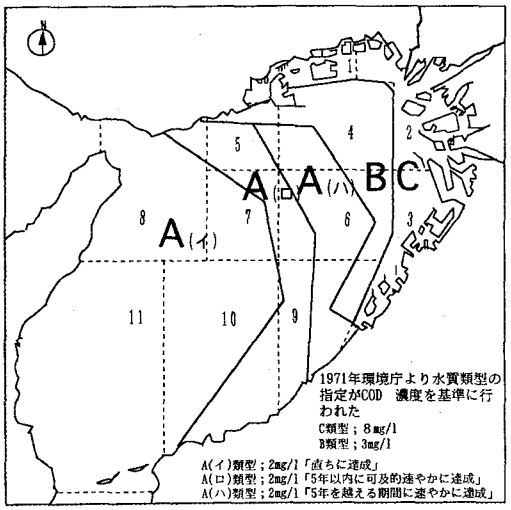


図４－１　大阪湾の環境基準類型図

表４－２　大阪湾関係府県の COD負荷削減実績(ﾄﾝ/日)

	1979年	1984年	削減量
大阪府	190	156	34
兵庫県	156	127	29
和歌山県	48	40	8
３府県計	394	323	71

表４－３　海域ボックスでの環境基準値

大領域ボックス番号	環境基準値 mg/ﾘｯﾄﾙ	小領域ボックス番	環境基準値 mg/ﾘｯﾄﾙ
1	8	1-1	8
2	8	1-2	8
3	8	1-3	8
4	3	2-4	8
5	3	2-5	8
6	2	2-6	8
7	2	5-7	8
8	2	4-8	3
9	3	4-9	3
10	2	4-10	3
11	2	8-11	2
		5-12	2
		4-13	2
		4-14	3

対する環境基準値が示されているが、当然のことながら、水質改善を行う際には、これによって定められた各ボックスの環境基準値を目標にするべきと解釈されている[4,5]。

なお、海域ボックスは第２章図２－７、２－８に、陸域ブロックは第３章図３－１に記載している。

（２）実測値に基づくＣＯＤ７５％水質代表値の定義

さて、海域のある地点において水質を多数回測定した場合、夏冬などの季節変動、昼夜の日変動などとして植物プランクトンの増殖により水質測定値が変動ものである。さらに、観察につきものであるが得られた実測値は統計的にバラツキを示している。したがって、年間を通じて多数回測定した水質実測値により海域の水質が環境基準値を満たしているかどうか判断する方法が必要である。そこで、環境基準点において測定された水質が環境基準値よりも良好であるかどうかの適合性を判断するために、昭和 52 年に環境庁はCOD75%値による評価方法を定めている。第２章でも指摘したように 75%水質代表値(75%水質値)とは年間の日間平均値のﾃﾞｰﾀ数をｎとするとき、それらのデータをその値の小さいものから順に並べて 0.75×ｎ番目のデータ値であると定義されている。本論文においても環境庁の定めた環境基準を満たしているかどうかを判定するために、環境基準点における水質の実測値に対してこの方法を適用することにする。問題は、将来実施すべき水質改善案によって得られる水質値を水質モデルから導出し、その計算値より 75%水質値を推定することである。上に環境庁の 75%水質値に関する「公共水路における COD の評価方法について」を参考のため掲げる。

公共用水域におけるCODの評価方法について
(昭和５２年７月１日　環水管第５２号、昭和５２年５月１８日　公害第３２４号) 「環境基準点における水質判定結果の環境基準値に対する適合性についての判断方法」 環境基準点において、年間を通じて環境基準に適合　していたか否かを判断する場合には、年間を通じた日間平均値の全データのうち７５％以上データが基準値　を満足している基準値を適合しているものと判　断する。 従って、環境基準値と比較して水質の程度を判断する場合、以下の方法より求めた「７５％水質値」を用いる。 ＊７５％水質値：　年間の日間平均値のデータをその値の小さいものからに並べ、0.75 ×ｎ番目(ｎは日間平均値のデータ数)データ値をもって、７５％水質値とする。

まず、バラツキを示している実測された水質データに基いて、75%水質値に対する夏季水質計算値および冬季水質計算値の相関性を調べるために重回帰分析を行うことにする。すなわち、第２章で解析した水質モデルを用いて、ある与えられた環境条件のもとで各ボックス毎に夏季と冬季において得られた水質の計算値を用いて、その環境条件のもとで測定された水質データによる 75%水質値を推定するのである。それには、各ボックス毎に測定された水質データに基づいて、夏季の解析計算値と冬季の解析計算値を説明変数にして重回帰分析を行って回帰式を求めることにする。そこで、第２章で解析した各ボックスに対する水質計算の結果が表２－９～２－１０と表２－５に示されているがこれと実測値の表、たとえば表２－５などによって 75%水質値を推測する。得られた重回帰式は

1．大領域

$$y = 0.53x_1 + 0.42x_2 + 0.23 \qquad (4-1)$$

（重相関係数　R=0.950）

y　：実測のＣＯＤ７５％水質値

x_1　：実測のＣＯＤの夏季平均値

x_2　：実測のＣＯＤの冬季平均値

2．小領域

$$y = 0.37x_1 + 0.98x_2 + 0.25 \qquad (4-2)$$

（重相関係数　R=0.950）

y　：実測のＣＯＤ７５％水質値

x_1　：実測のＣＯＤの夏季平均値

x_2　：実測のＣＯＤの冬季平均値

である。

この回帰式を用いて各ボックスごとのＣＯＤ７５％水質値を推定した結果を表４－４～５に示す。ただし、表４－４～５の第２欄の環境基準値は環境庁によって定められたものであるが、第３欄の値は、たとえば、大領域のボックス１の上層に対する夏季小領域のＣＯＤの理論値x_1は、第２章の表２－９により 3.64 であり、冬季夏季大領域のＣＯＤの理論値x_2は表２－１０より 3.03 であってこれらの値を式（４－２）に代入すると、ＣＯＤの75%値yの推定値として

$$y = 0.53 \times 3.64 + 0.42 \times 3.03 = 3.4318$$

がえられる。この値より表４－４の第３欄の第１行上層の項に 3.43 が記入されている。以下、同様にして 75%値を逐次求めている。表４－５は、同様に小領域の各ボックスにおける 75%値と環境基準を示したものである。大領域、小領域の各ボックスにおける COD75%水質値と環境基準を図４－２、４－３にそれぞれ図示してある。

表4－4　大領域ﾎﾞｯｸｽCOD75%水質値と環境基準値

ボックス番号	環境基準値 mg/ﾘｯﾄﾙ	75%COD推定値(mg/ﾘｯﾄﾙ) 上層	下層
1	8	3.43	1.554
2	8	4.16	1.673
3	8	3.85	1.990
4	3	2.44	1.124
5	3	1.98	1.031
6*	2	2.56	1.142
7	2	1.91	1.021
8	2	1.77	0.988
9	3	2.45	1.237
10	2	1.99	1.028
11	2	1.75	0.988

*印は環境基準を達成していないボックスを示す

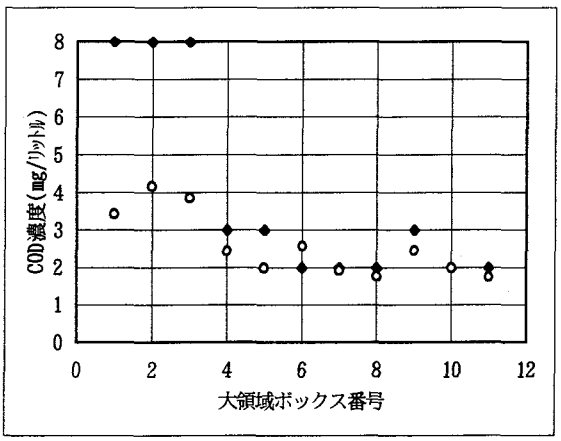


図４－２　大領域ﾎﾞｯｸｽCOD75%水質値と環境基準値
◆印は環境基準値、○印はCOD75%推定値

表４－５　小領域ﾎﾞｯｸｽCOD75%水質値と環境基準値

ボックス番号	環境基準値 mg/ﾘｯﾄﾙ	75%COD推定値(mg/ﾘｯﾄﾙ) 上層	下層
1-1	8	3.32	3.04
1-2	8	3.82	3.17
1-3	8	4.53	3.64
2-4	8	7.08	5.89
2-5*	8	8.23	6.40
2-6	8	4.44	2.97
5-7	3	2.19	2.04
4-8	3	2.64	2.34
4-9*	3	3.40	2.63
4-10*	3	4.57	3.13
8-11	2	1.57	1.14
5-12	2	1.74	1.25
4-13*	2	2.15	1.49
4-14	3	2.85	1.94

*印は環境基準を達成していないボックスを示す

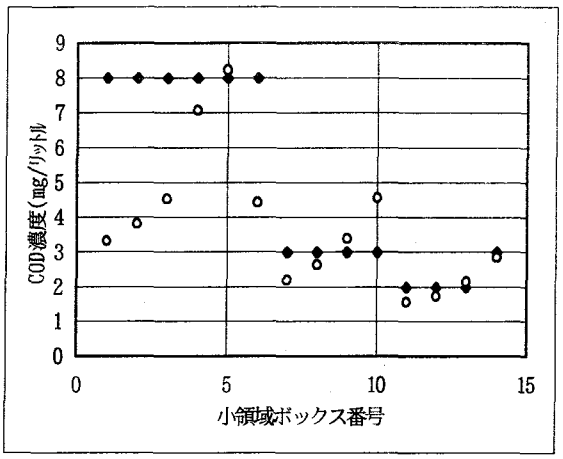


図４－３　小領域ﾎﾞｯｸｽCOD75%水質値と環境基準値
◆印は環境基準値、○印はCOD75%推定値

表４－４によると堺市沖のボックス６が環境基準を満たしていない。表４－５からは、湾奥をより細かく分割した小領域の中で、環境基準を満たしていないボックスは 2-5, 4-9, 4-10, 4-13 と４ボックスもあるということになり、水質が相当悪化していることが指摘される[6,7]。

４－３　水質改善のために海陸で施す施策とその効果の評価

前節で示したように、大阪湾の現況の水質が環境基準を満たしていない小領域ボックスが４ボックスもあり、それらは 2-5、4-9、4-10 および 4-13 であって、何等かの水質改善措置が必要である。ところで、本研究では大阪湾の水質の再現を行う際に第２章で述べたような感度解析によって決定されたパラメータを用いている。感度解析を行う目的は、パラメータの決定に当たって各パラメータに対する水質濃度の感度が敏感であるような値を選ぶということと、水質の計算結果を現実の海中で生じている物質の循環プロセスに近づけるということであった。その目的の一つである水質濃度に対する感度を調べれば水質悪化に大きく影響しているパラメータを見つけることができるが、この様にして見つけだしたパラメータの値を制御することが出来れば水質を改善することが容易となる[7,8]。

ここでは、水質濃度に影響の大きいパラメータとして生産速度定数、ＩＰ・ＣＯＤ溶出速度が注目される。しかし、第２章の水質モデルで示したように生産速度定数は水温、照度、ＩＰ濃度の関数で表されるものであり施策により生産速度定数を制御することはほとんど不可能である。

ところが、陸から流れてきた汚濁物が溶けずに海底まで沈み、また、枯死した植物プランクトンが沈降し、その後海底に蓄積した泥から汚染物質として逆に溶け出すという溶出現象に関しては、浚渫あるいは覆土などの方法で溶出速度を抑えることが実行可能である。溶出を抑える施策としての浚渫は、海底の泥をさらって溶出を防ぐ方法であって有効と思われる。一方、覆土という方法は、底泥に土砂を被せて海底に蓄積している汚濁物質の溶出を防ぎ、一方では土砂内に含まれているバクテリヤにより栄養塩の分解を促そうという

のである。さらに、有効なもう一つの施策として流入汚濁負荷量の削減によって水質の改善をはかるという方法がある。たとえば、現在陸域において処理されていない生活雑排水を公共下水道や合併浄化槽の設置により現状と較べて流入負荷量を削減できるので、その場合の汚濁負荷の算定値を用いたときの水質改善効果について検討できる。このように、本論文では、浚渫・覆土および削減という２つの手段を用いて水質の改善を行い、このような施策が現状に見合ったものであるかを検討することにする。水質改善の判断の基準としては表４－１，４－３に示した環境基準値を目標にする。

（1）　小領域での浚渫・覆土とその効果

本節では、汚濁状態が悪化している小領域の各ボックスに対して、浚渫を施した場合の水質効果を調べることにする。まず、底泥を 80%まで浚渫可能であると仮定する。第２章で議論した水質モデルに基づいて、ボックス１～６においてそれぞれ 80%浚渫した場合、すなわち溶出速度を 20%の値に設定した場合の夏季および冬季の水質計算値より 75%値を推定した結果の一例が図４－４～図４－５に示されている。これらの図の「－」記号は、浚渫後の 75%値であり、○印は浚渫しない場合の 75%値であり、◆は環境基準を表している。ボックス１－１に浚渫を施した図４－４では、最大でボックス４(本来は、大領域のボックス番号を前に付けて 2-4)の COD 濃度が 3.1%低下するが図４－５では全く効果がない。もちろんこれ以外でも効果が見られなかった。しかも、浚渫には多額の費用がかかるものと考えられ経済的にみても得策ではない。一方、覆土に関しては定量的なデータが公表されていないが、水質解析の理論上では覆土の効果は底泥からの汚濁負荷量の溶出度合いを抑制することを意味するので、浚渫と全く同様と考えられ、本論文では底泥をさらう浚渫だけを考えれば良いとしている。なお、浚渫・覆土ともにそれに要する費用に関しては議論しない。

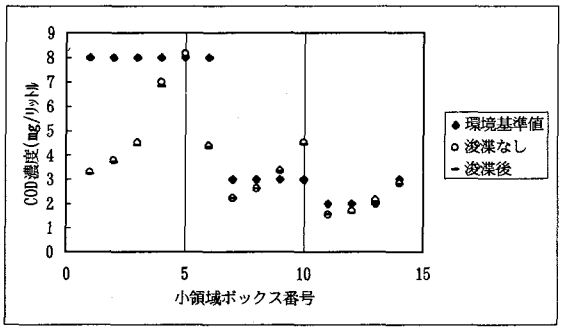


図４－４　小領域 ﾎﾞｯｸｽ 1-1での浚渫
（溶出/80%を除く）

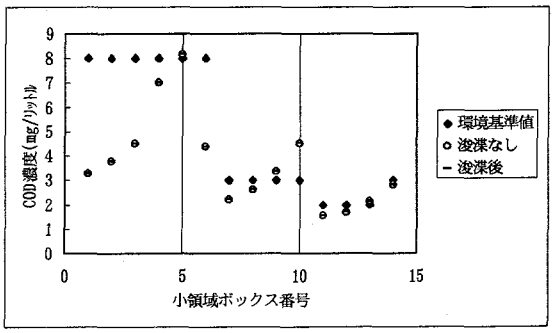


図４－５　小領域 ﾎﾞｯｸｽ 1-2での浚渫
（溶出/80%を除く）

（2）　大阪湾全域の流入負荷量の削減施策とその効果

以上の議論から浚渫・覆土の方策では余り効果が期待できないことから、つぎに本項では陸域から流入する汚濁負荷量を削減するという施策について検討する。大阪湾に隣接する諸都市のうち、神戸市や大阪市のように 95%以上の下水道普及を成し遂げているところもあるが大阪湾の流域全体での下水道普及率は 40%以下と言われている。そこで、下水道

普及率が将来向上すると仮定した場合の汚濁負荷の削減効果を調べることにする。

1）流入負荷削減対象と水質改善対象項目

現在、環境基準値として濃度が定められているものはＣＯＤであるので、水質改善の対象としてはＣＯＤ濃度について前述の75%水質値を用いる。また、流入負荷については、ＯＰに関して陸上から海域に流入する時点で活性化するなどの不明確な点が多いが、本論文ではＩＰとＯＰの和を総リン（ＴＰ）と考え、ＣＯＤと共に流入負荷削減の対象とする。

2）流入負荷削減による水質改善の検討

本項においては、第２章で構築した水質モデルの解析方法を用いて、大阪湾で定められた環境基準を達成するために要求される大阪湾全体の流入負荷量の削減目標値を算出することにする。表２－６などに示した流入負荷量の各ボックスの総リン、ＣＯＤのそれぞれ10%を１ユニットとし、全てのブロックについて削減を行うことにする。すなわち、

①大阪湾全体全汚濁負荷量入量の10%を１ユニットとして２ユニット、３ユニット、５ユニット削減したときの夏季および冬季の水質値（ＣＯＤ濃度）の計算を行う。

②計算値から重回帰式を用いて、それぞれの負荷削減をしたときの各ボックスの年間代表値であるCODの75%値を求める。

③求めた75%値から環境基準を満たすための削減率を求める。

これらの水質再現計算の結果を大領域と小領域についてそれぞれ表４－６(a),(b)および図４－６，４－７に示す。これらの計算結果から図４－８～４－９に示すようにＣＯＤ濃度の変化は大阪湾全体の流入負荷量の削減量に比例することが認められる。一般的にも、各ボックスの濃度変化は大阪湾全体の流入負荷量（リン、ＣＯＤ）の変化量に比例すると言われている。

大領域、小領域の下層のＣＯＤ推定値は全て環境基準値を満たしている。つぎに前述の線形性に着目して水質再現計算において環境基準を満たしていない大領域のボックス６について回帰分析を行い、流入負荷削減による濃度変化の式（４－３）を求めた。すなわち、ボックス６のＣＯＤ濃度をC_6とするとC_6は、流入負荷削減量Ｌの線形回帰式として（図４－８参照）

$$< \text{ボックス } 6 > \quad C_6 = -0.1862\,L + 2.55 \qquad (4-3)$$

と表せた。ただし、Ｌは10%を基準とした削減ユニット数であるが連続変数とみなしても差し支えない。したがって、ボックス６において環境基準値２を達成するための大阪湾全体の流入負荷削減量Ｌは（４－３）式のC_6に２を代入してＬについて解けば30.0%と算出できる。さらに、この算出された流入負荷量を用いて水質再現計算を実行し、上に論じたと同様な解析を行って回帰分析によって得られたＣＯＤ濃度と比較を行った。その結果を図４－８に示す。

小領域モデルについても表４－６（b)を用いて、同様の計算を行った。その結果流入負

荷量をＬユニット削減したときの当該ボックスのＣＯＤ濃度の達成値を表す回帰式として、

$$<\text{ボックス } 2\text{-}5> \quad C_5 = -0.585\ L + 8.23 \qquad (4-4)$$

$$<\text{ボックス } 4\text{-}9> \quad C_9 = -0.159\ L + 3.40 \qquad (4-5)$$

$$<\text{ボックス } 4\text{-}10> \quad C_{10} = -0.353\ L + 4.57 \qquad (4-6)$$

$$<\text{ボックス } 4\text{-}03> \quad C_{13} = -0.621\ L + 2.15 \qquad (4-7)$$

が得られた。

これらの式より求めた環境基準を達成する流入負荷の削減量を表４－６（ｂ）に示してある。この結果より、大阪湾奥部の環境基準を完全に達成するには44.5%の流入負荷量削減量が必要であるという結論を得た。

流入負荷削減量が大領域モデルでは30.0%、小領域モデルでは44.5%となっており、これらの結果の差は、大領域海域モデルよりも小領域海域モデルの方が水質計算当面の目標と考えるべきであろう。

表4-6(a) 流入負荷削減計算結果(大領域,上層,COD75%値mg/ﾘｯﾄﾙ

ﾎﾞｯｸｽ番号	環境基準値	0ﾕﾆｯﾄ	2ﾕﾆｯﾄ	3ﾕﾆｯﾄ	5ﾕﾆｯﾄ
1	8	3.43	2.87	2.74	2.73
2	8	4.16	3.61	3.30	2.75
3	8	3.85	3.15	2.97	2.58
4	3	2.44	2.26	1.88	1.81
5	3	1.98	1.84	1.73	1.55
6	2	2.56	2.19	1.95	1.64
7	2	1.91	1.85	1.69	1.52
8	2	1.77	1.74	1.70	1.62
9	3	2.45	2.33	2.23	2.04
10	2	1.99	1.85	1.73	1.67
11	2	1.75	1.65	1.63	1.60

表4-6(b) 流入負荷削減計算結果(小領域,上層,COD75%値mg/ﾘｯﾄ

ﾎﾞｯｸｽ番号	環境基準値	0ﾕﾆｯﾄ	2ﾕﾆｯﾄ	3ﾕﾆｯﾄ	5ﾕﾆｯﾄ
1-1	8	3.32	2.93	2.84	2.51
1-2	8	3.82	3.55	3.32	2.91
1-3	8	4.53	4.05	3.87	3.29
2-4	8	7.08	6.11	5.79	4.83
2-5	8	8.23	6.07	5.84	5.23
2-6	8	4.44	3.92	3.65	3.03
5-7	3	2.19	2.21	2.06	1.82
4-8	3	2.64	2.58	2.34	2.09
4-9	3	3.40	3.1	2.94	2.57
4-10	3	4.57	3.83	2.24	2.98
8-11	2	1.57	1.49	1.42	1.37
5-12	2	1.74	1.69	1.66	1.6
4-13	2	2.15	1.99	1.91	1.87
4-14	3	2.85	2.62	2.41	2.18

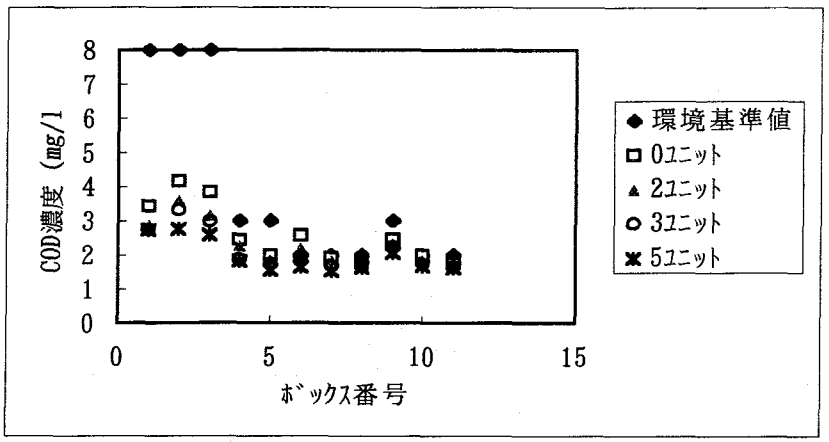


図４－６　流入負荷量の削減計算結果(大領域/上層/COD75%)

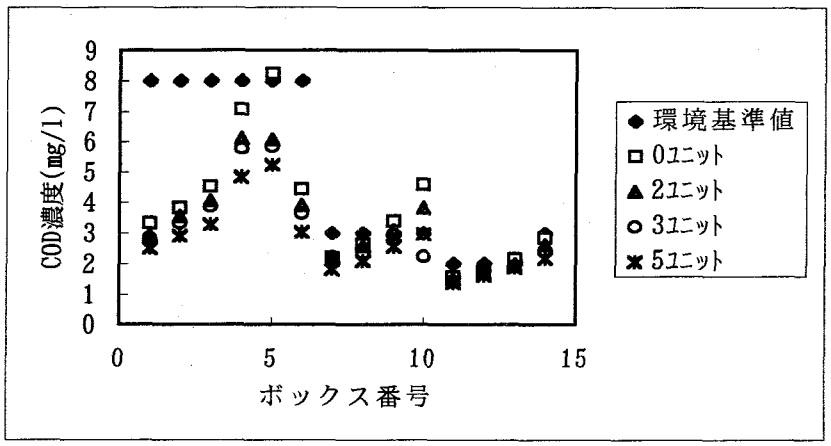


図４－７　流入負荷量の削減計算結果(小領域/上層/COD75%)

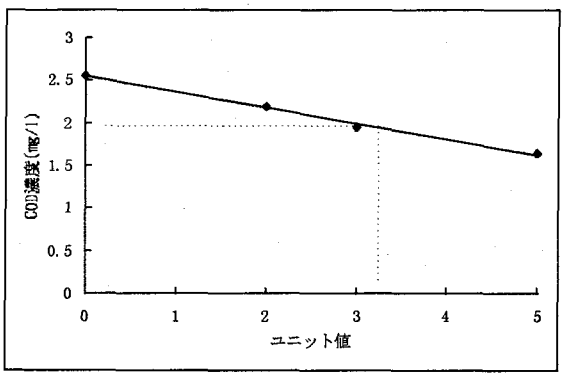


図４－8 大領域ボックス６の環境基準達成までの負荷削減量（%）

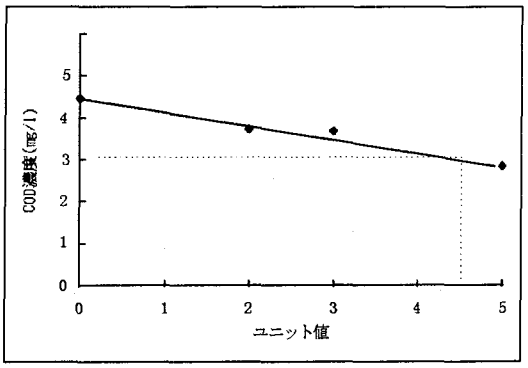


図４－9 小領域ボックス4-10の環境基準達成までの負荷削減量（%）

大領域の回帰式は図４－８より y=-0.1682x+2.55 となり、小領域ではボックス 4-10 の場合は図４－９より y=-0.353x+4.57 と表せる。

○浚渫と削減を併用した施策効果

以上に述べたことから、流入負荷削減による効果に較べて浚渫による効果が著しく低いことが明らかになったが、以下に浚渫と削減を併用した複合施策を採用した時の効果を調

べる。そこで、神戸港内のボックス 1-1 とボックス 1-2 の溶出を 80%引き下げるような浚渫を行うと同時に、大阪湾全域に流れ込む汚濁負荷量に対して 30%の削減を実施するという施策を考える。もちろん、この複合施策は実行可能なものである。この複合施策を採用した場合に対応するように水質モデルのパラメータ変更と入力条件に関して必要な所作を行って水質計算を実施した。

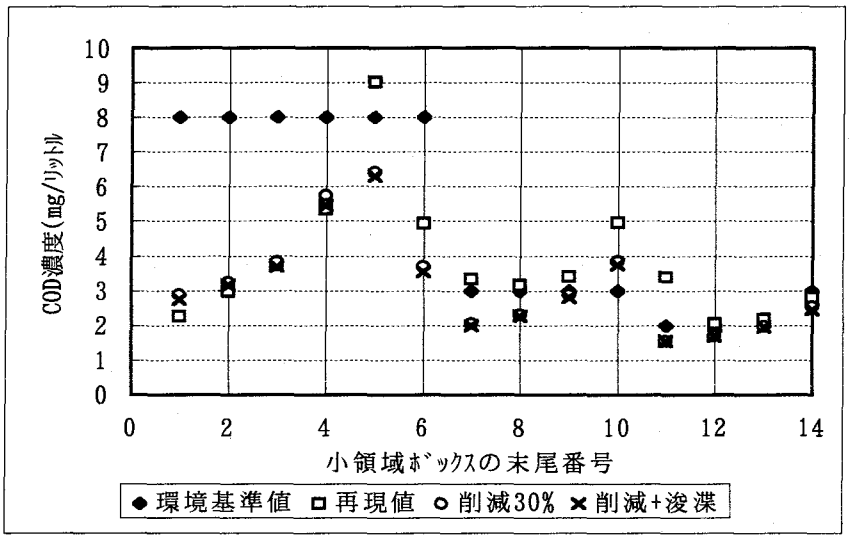


図4-10 負荷削減・浚渫の併用施策による効果

図４－１０によると汚濁負荷量を 30%削減すると同時にボックス 1-1、およびボックス 1-2 を 80%浚渫した時のＣＯＤ濃度を比較するとボックス 5-7 で 67%、ボックス 8-11 で 118%改善されるほか総じて改善割合が高く平均 27.3%となっている。しかしボックス 4-10 でなお環境基準値を上回っていることが判る。

（３）　特定地域(兵庫県，神戸市)における施策とその効果

これまでは、内海・内湾地域の水質改善について議論し大阪湾全体に流入する汚濁負荷量を総量としてどれくらい削減すれば環境基準を満たしうるかについて考察した。もともと政府は、1991 年 1 月 11 日の公害対策会議で東京湾、伊勢湾、瀬戸内海の閉鎖性三水域を対象にＣＯＤ負荷量を 1994 年までに 89 年度実績より 10%減らす「総量削減基本方針」を決めている。しかし、この目標は充分達成されているとはいえない。

ところで、大阪湾の周辺には複数の市町村が存在しているため本項では、１つの行政機関が、その権限内で流入負荷量の削減をした場合の水質改善程度を評価してみる。すなわち、特定地域について現実に可能と考えられる流入負荷量削減案を提案して、その案が施行された時に大阪湾の水質にどのような影響を与えるかについて考察する。

１）　神戸市地域における水質改善策の例

まず、神戸市地域を例にとり流入負荷削減施策を行った時の水質に対する影響を調べる。

○生活排水の処理

神戸市は現在、下水道普及率が約95%であるので下水道を普及させることにより流入汚濁負荷を削減することには限界があり、他の削減案を考えなければならない。そこで、費用の面を考慮して、現在、下水道として処理しきれていない生活雑排水を合併浄化槽などを設置することで処理することを考える。そこで第３章の陸域における汚濁負荷集計の議論に基づき水質モデルにより解析した結果、この案を実施した場合のＣＯＤ負荷量は1.2%しか削減されず、ＴＰ負荷量はほとんど削減されない結果が得られたが、この施策が実施された時の水質解析結果をもとに推定した 75%水質値を再現値と比較して図４－１１に示す。この結果より提案した施策による水質に対する改善効果はボックス２－４を除いてほとんど見られないといえる。

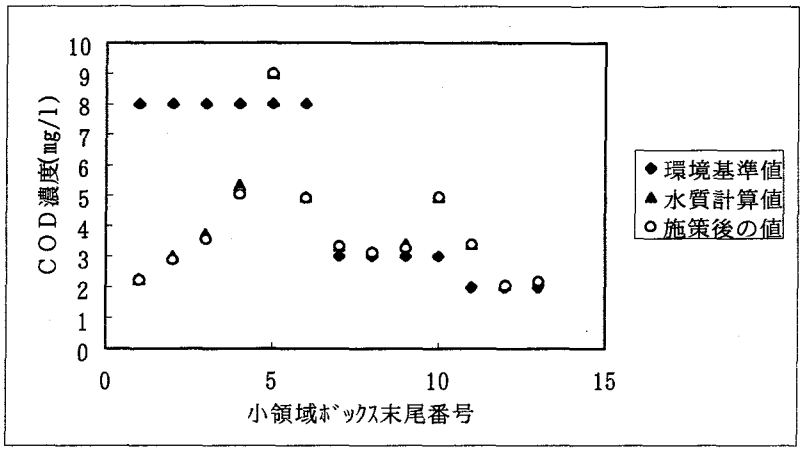


図４－１１　雑排水を処理した場合のＣＯＤ水質値(神戸市)

２）兵庫県全体における水質改善策の例

つぎに、兵庫県において流出汚濁量の削減を考え上と同様の施策を行うことにする。また、そこで上述の「総量削減基本方針」に基づき生活排水と産業排水を削減することにする。これらの施策による水質改善効果について以下に述べる。

現在、まだ処理し切れていない生活雑排水を合併浄化槽を設置することで処理した場合について第３章の陸域汚濁負荷量の集計の議論に基づいて解析すると、ＣＯＤ負荷量は25.5%削減されるという結果が得られた。このような施策が実施された時の75%水質値を

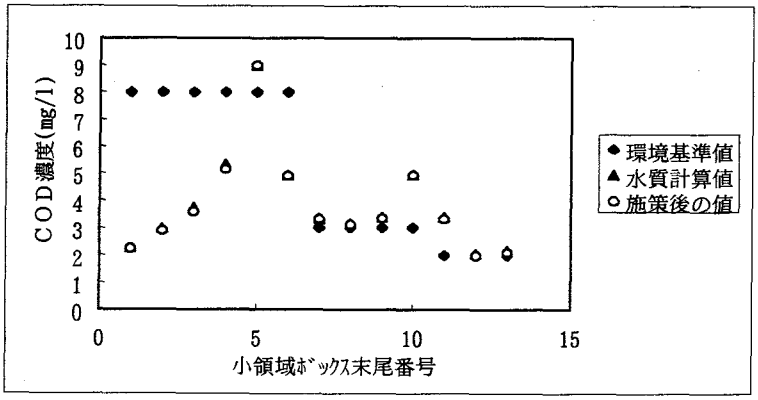


図４－１２　雑排水を処理した場合のＣＯＤ水質値(兵庫県)

再現値と比較して図４－１２に示す。この結果より図４－１１と同様、提案した施策による水質に対する改善効果はほとんど見られないといえる。

３）兵庫県において生活排水、産業排水を削減した場合の例

政府によるＣＯＤ負荷量の 10%削減「総量削減基本方針」によると瀬戸内海の場合、発生源別では生活排水 12%、産業排水 10%削減を目標量とする。この方針を基にして本研究ではこの「総量削減基本方針」を兵庫県のみで実施した時の 75%水質値を再現値と比較した結果を図４－１３に示す。この結果をみても、この施策による水質に対する改善効果はほとんど見られないといえる[9]。

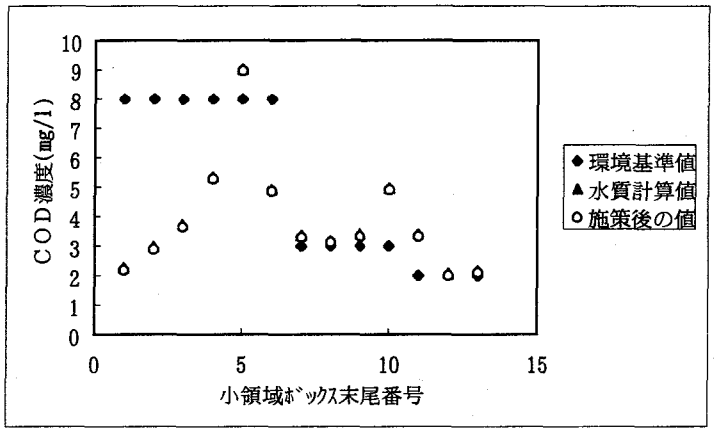


図４－１３ 雑排水を 10%,生活排水を 12%削減した場合の COD 水質値

（４） 将来の水質予測に基づく水質改善のための施策

これまで現況における大阪湾奥部を詳細に見た小領域について水質を改善するための施策について考察してきたが、本論文の第２章２－５節において西暦 2000 年の将来における大阪湾の水質予測を行っている。そこで、本節で議論した水質改善のための施策に関する結果を基に、西暦 2000 年の大阪湾全体を巨視的に見た大領域について、将来の大阪湾の水質が環境基準値を満たすためにはどのような施策を行えばよいかについて検討する。水質モデルは第２章で得られたものを用い各ボックスの水平移流量、鉛直移流量、溶出係数や湾全体の水平拡散係数、鉛直拡散係数、生産係数、分解係数、沈降係数などパラメタも第２章と同じものを使用する。

大阪湾に関する現況と将来における条件的な違いは潮汐流、汚濁負荷、境界条件である。関西の水質が環境基準値を満たすためにはどのような施策を行えばよいかについて検討する。関西国際空港、ポートアイランドⅡ期工事、りんくうタウンなどの大工事をはじめ西暦 2000 年に施工の確実な海岸線の沖出し工事の境界の変化により潮汐流および境界条件が変化すると予測されている。とくに関西国際空港ができ、さらに拡張工事が行われると大領域ボックス９の泉南地域と空港間の潮流が速くなることが知られている。このような潮汐流の変化と汚濁負荷の変化によって将来の水質はどのように変化するのかを第２章で大領域に対して考察した。つぎに大阪湾の水質に直接影響を及ぼす原因は陸域からの汚濁

負荷については将来時点で下水道がより普及し、下水処理場の処理能力も向上すると予想される。さらに農業集落に対する浄化設備の設置や浄化槽の充実も期待されるため、大阪湾に流入する汚濁負荷量が減少しその結果将来の水質は現況よりも改善されるという結論が２章で導かれている。いままで現況におけるより積極的な汚濁負荷の削減が必要であることを指摘してきたのに引き続いて、将来の大阪湾の水質をより改善する施策として、本節と同様の削減の施策をとりあげることにする。

水質の判断基準としては環境庁の定めた環境基準値と 75%水質値から将来の削減効果を検証する。

1）　環境基準値と将来のＣＯＤ７５％水質値

水質改善の目標値として、環境庁の定めた環境基準値を用いる。まず、第２章の２－５節において解析した大阪湾大領域の将来の水質予測値の結果を示した表２－18、２－１９に注目する。表２－１８には大領域について夏季のＣＯＤの上層の予測値が与えられている。ところで、各ボックスに対する 75%水質値を推定するために、本章の４－２節で議論した重回帰分析により求めた重回帰式

（４－１）　$y = 0.53x_1 + 0.42x_2 + 0.23$　に

$x_1 = 2.54$、および $x_2 = 2.02$ を代入すると

$$y = 0.53 \times 2.54 + 0.42 \times 2.02 + 0.23 = 2.42$$

がえられる。このようにして大領域の各ボックスの上層に対して求めた 75%水質予測値と環境庁の規定した環境基準値を表４－７に示す。これまでの議論で下層よりも光合成の行われる上層の方が水質が良くないため、ここでは上層についてだけ議論を進めることにしている。この結果によると、環境基準値を満たしていないボックスは依然としてボックス６である。以降、水質の改善を行う際にはボックス６の環境基準値を目標とする。

表4-7 環境基準値とCOD75%値

単位:mg/ﾘｯﾄﾙ

ﾎﾞｯｸｽ番	環境基準値	COD75%値
1	8	3.12
2	8	3.89
3	8	3.65
4	3	2.40
5	3	1.95
6	2	2.42
7	2	1.87
8	2	1.74
9	3	2.33
10	2	1.91
11	2	1.73

2）　汚濁負荷総量の削減と水質改善効果

上に示したように、西暦 2000 年では現在計画されている下水道の普及によって汚染負荷量が削減されるものの、ボックス６の水質が環境基準値を満たすには至っていないことがわかった。そこで、現在の状態から西暦 2000 年までに大阪湾に流入する全汚濁負荷量をどれだけ削減することができれば、大阪湾の水質が環境基準値を満たしうるかをか検討することにする。そこで、４－３節の（2）項で展開した議論と同様に

①全汚濁流入負荷の 10%を１ユニットとして２ユニット,３ユニット,５ユニット削減した場合の将来の水質再現計算を行う。このように、

②計算して得られた水質値から、各ボックスの 75%水質値を求めることにする。

③上に指摘した環境基準値を満していないボックス６について０ユニット,２ユニット,３ユニット,５ユニットと削減した場合の水質値に対応する４点をプロットして線形回帰式を求める。

このようにして流入汚濁負荷を削減した場合の75%水質値を表４－１０に示す。この結果によると、ボックス６に対する回帰式は

＜ボックス６＞　C'6 ＝ −0.1682 L'+2.42　　（４－３'）

となる。ここで、C'6はボックス６の75%水質値であって、L'は10%を基準とした削減ユニット数である。ボックス６の環境基準値は２であるから、（４－３'）式においてC'_6=2としたときのL'を求めるとL'=2.256が得られる。

すなわち、環境基準を達成するためには少なくとも流入負荷量を22.6%削減する必要がある。

表4-8　汚濁流入負荷量の削減計算結果
COD75%値　　単位：mg/ﾘｯﾄﾙ

ﾎﾞｯｸｽ番	0ﾕﾆｯﾄ	2ﾕﾆｯﾄ	3ﾕﾆｯﾄ	5ﾕﾆｯﾄ
1	3.12	2.57	2.28	1.76
2	3.89	3.05	2.64	1.91
3	3.65	2.89	2.51	1.83
4	2.40	2.05	1.86	1.50
5	1.95	1.73	1.60	1.35
6	2.42	2.06	1.87	1.49
7	1.87	1.67	1.56	1.32
8	1.74	1.58	1.49	1.28
9	2.33	1.99	1.81	1.46
10	1.91	1.69	1.57	1.33
11	1.73	1.56	1.46	1.25

表4-9 環境基準達成に必要な削減率

ﾎﾞｯｸｽ番	必要な削減率
1	
2	
3	
4	
5	
6	22.6%
7	
8	
9	
10	
11	

３）現況における水質と将来における水質の比較

以上に述べたように将来の水質予測を行い、環境基準値を満たすために西暦2000年において必要な汚濁負荷の削減率が22.6%であることが判った。西暦2000年の水質は現状に比べて全てのボックスにおいて改善されている。西暦2000年における75%水質値を表４－１０に示す。水質改善率は高々9%にしか過ぎない。

表4-10 環境基準値と予測COD75%値の比較

ﾎﾞｯｸｽ番	環境基準値	現況の予測	将来の予測	水質改善率%
1	8	3.43	3.12	9.0
2	8	4.16	3.89	6.5
3	8	3.85	3.65	5.2
4	3	2.44	2.40	1.6
5	3	1.98	1.95	1.5
6	2	2.56	2.42	5.5
7	2	1.91	1.87	2.1
8	2	1.77	1.74	1.1
9	3	1.45	2.33	4.9
10	2	1.99	1.91	4.0
11	2	1.75	1.73	1.1

単位：mg/ﾘｯﾄﾙ

４－４　流入負荷のボックス濃度への寄与と線形計画法による評価

前節までは、主として大阪湾全体で流入負荷量の削減を行うことによって、大阪湾、とくに陸奥部の水質を環境基準にまで改善することが可能であることを示した。しかし、４－１節で述べたとおり環境基準に達していないため水質改善を必要とする水域は大阪湾の一部である。したがって、大阪湾に流入する河川の全ての流域を一律に削減する必要はないと考えられる。また、潮流や河川流域の公共下水道普及率などを考えると、大阪湾全体を削減するよりも特定の陸上の汚濁物質を削減する方が効果的であり、かつ容易に環境基準を達成できる可能性がある。そこで、大阪湾へ流入する河川の流域にある特定の行政機

関が自己の行政区に属する海域の水質改善を行うためには、どの流域の流入量をどの程度削減すればよいかを以下で検討することにする。

（1）　流入負荷のボックス濃度への寄与割合

まず、海域の水質汚濁物質が、主としてどの流域から流入する負荷量から影響されているか、逆にいえば、ある陸上ブロックからの汚濁負荷量がある海域のボックスの汚濁にどれだけ寄与しているかを表す割合を水質伝達係数として定義し、その度合いを算定する方法について述べる。

潮流や大阪湾の地形状況などを考えると、ある陸上からの汚濁物質が大阪湾の各海域の水質悪化におよぼす影響は海域ごとに異なると考えられる。そこで、この影響を陸上で発生する汚濁負荷量を単位量だけ削減することによる特定海域の水質濃度変化の寄与割合として数値として表すことを考える。すなわち、ある海域のボックス i に陸接する陸上の流入負荷量のみを単位量 ΔL_i 削減したときの、海域のボックス j の濃度が ΔC_j 変化したとすると、寄与の割合、すなわち水質伝達係数 a_{ij} を

$$a_{ij} = \frac{\Delta C_i}{\Delta L_j} \qquad (4-8)$$

と定義する。このようにして i を隣接する全てのボックスのリン、ＣＯＤについてそれぞれ変化させることにより、大領域海域モデルで２２×１６の寄与度のマトリクスを作成することができる。ここでは、このマトリクスをインパクト・マトリクスと名付けることにする。

そこで、ΔL_i として各ボックスの流入負荷量リン、ＣＯＤについてそれぞれ 10%づつを１ユニットとして削減したときの水質計算を行ってその結果よりそれぞれのボックスのインパクト・マトリクスを求めた。ちなみに、式（４－３）によって示されているように各ボックスのＣＯＤ濃度の変化は流入負荷量変化量の１次の式として表されることが確認されている。図４－１４にインパクト・マトリクスを図示した例として、各陸域ブロックのＣＯＤ負荷量を１トン／日増加したときに大領域ボックス４に与える効果を示したものを掲げる。これはボックス４の上下層の濃度変化（mg/ﾘｯﾄﾙ）として各陸域ブロックに記入している。

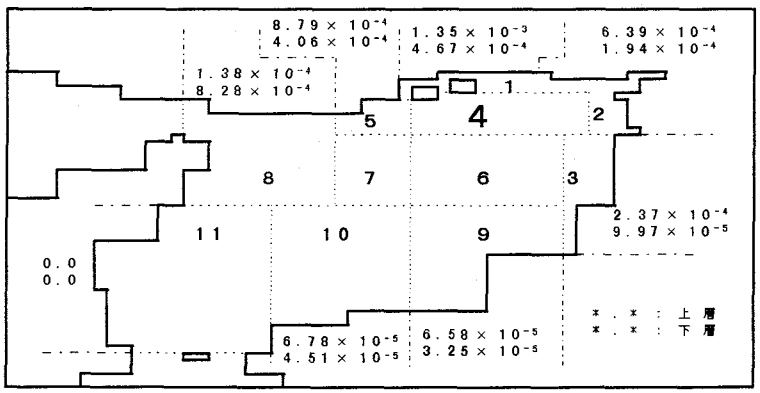


図４－１４　大領域ﾎﾞｯｸｽ４の夏季ＣＯＤ濃度に対する各陸域ブロックの流入負荷の寄与割合（COD 1ﾄﾝ/日）

（2）　水質改善施策の線形計画法としての定式化

前項において陸域負荷の海域への影響をインパクト・マトリクスとして求めることができたことと、陸域の汚濁量と海域のＣＯＤ濃度変化量の間に線形関係があることより、本節では線形計画法による海域の水質変化を再現計算を試みる[10]。

1）　制約条件

以上に述べたように、各ボックスの水質を表すＣＯＤ濃度の変化量ΔC_jが、陸上から流入する各ボックスの汚濁物質の変化量に比例すると仮定することができる。すなわち、ΔL_iは連続変数として任意に変化させてよく、それに対応するΔC_jの値はそれに比例するが、あるボックスの水質は陸域から流入するすべてのボックスの影響を受けるから、

$$\Delta C_j = \sum_i a_{ij} \times \Delta L_i \qquad (4-9)$$

とおける。ただし、

ΔC_j ：ボックス ｊのＣＯＤ濃度の変化量で連続変数

j =1,2,...,22（大領域モデル）

j =1,2,...,28（小領域モデル）

ΔL_i ：陸接ボックス ｉの流入負荷削減量（リン、 ＣＯＤ）で連続変数

i =1,2,3,5,8,9,10,11　（大領域モデル）

i =1,2,3,4,5,6,7,11,12　（小領域モデル）

a_{ij} ：水質伝達係数

である。

さて、ΔLは隣接するボックスの流入負荷量（リン、ＣＯＤ）の削減量ベクトルとして

$$\Delta L = (\Delta L_1, \Delta L_2, \cdots \Delta L_{11})$$

と表したもので、大領域モデルで１×１６のマトリクスである。ただし、施策後の水質濃度を現在の水質濃度より悪化させるべきではないし、各ボックスの流入負荷量を現況より増加させることはあり得ないし、また前節で求めた大阪湾全体での環境基準達成の削減量L_{01}より大きく削減する必要もない。すなわち、

$$0 \le \Delta L_i \le L_{01}$$

である。

つぎに、水質再現計算によって求められた現況再現値をC_0とし、環境庁が定めた環境基準類型を各ボックスに割り振った値をC_sと表し、

$$\Delta C_r = C_0 - C_s \qquad (4-10)$$

とおく。ΔC_rは流入負荷削減による各海域の上下層のＣＯＤ濃度改善目標値を表すもので、各ボックスを考慮するときベクトル表示となる。すなわち大領域モデルでは２２×１のマトリクスとなる。

ところで、本研究においては水質を表すのに年間を通じた75%水質値を用いるため、水質モデルより夏季、冬季に対して別々に計算されたインパクト・マトリクスを75%水質値

を表す値に変換する必要がある。寄与度マトリクスにより与えられた式（４－９）も75%水質値の重回帰式（４－１）、（４－２）も共に１次結合であるから簡単に変形できる。すなわち、ボックスｉの濃度変化ΔC_iは、

$$\Delta C_i = \left(K_s \sum_j a_{ijs} \Delta L_{js0} + K_w \sum_j a_{ijw} \Delta L_{jw0} \right) \qquad (4-11)$$

となる。ただし、

ΔL_{js0}　：隣接ボックスｊの夏季の流入負荷量，（第３章４節）

ΔL_{jw0}　：隣接ボックスｊの冬季の流入負荷量，（第３章４節）

a_{ijs}　：水質伝達係数（夏季），（図４－１８）

a_{ijw}　：水質伝達係数（冬季），（図４－１８）

K_s　：75%水質値係数（夏季、大領域では0.53の値、式（４－１））

K_w　：75%水質値係数（冬季、大領域では0.43の値、式（４－２））

である。

つぎに、実際上の問題を簡単にするために夏季と冬季の汚濁物質の削減量は等しいと仮定する。このとき、削減率をh（０　≦　h　≦　１）と表すと上式（４－１１）は、

$$\Delta C_i = \left(K_s \sum_j a_{ijs} \Delta L_{s0} + K_w \sum_j a_{ijw} \Delta L_{jw0} \right) h \qquad (4-12)$$

と書き換えられる。ただし、L_{j0s}, L_{j0w}はそれぞれ、夏季と冬季の現況流入負荷量である。この場合、式（４－１０）の制約条件は、マトリクス形式では、

$$C_r = A_{75} H = \left(K_s A_s \cdot L_{s0} + K_w A_w \cdot L_{w0} \right) H \qquad (4-10')$$

と表される。

以上で各ボックスで削減すべき汚濁負荷量に対する具体的な制約条件が設定された。

２）目標関数の設定

つぎに、陸域負荷削減施策実行難易度ｅについて考えよう。削減難易度としては、たとえば流入負荷削減に必要なコストを考慮すべきという意見もあるが、本来この問題には政策的な因子が含まれているため、完全に客観的な数値を設定することは難しい。そこで、本研究においては次に示す３つの考え方について検討することとする。

① 各流域の流入負荷削減量に同等の重みを割り当てる

② 各ボックスに流入する河川流域の下水普及率を考慮して流入負荷削減量を設定する

③ 各ボックスに流入する河川流域の人口密度に逆比例して流入負荷削減量を設定する

①の考え方は、大阪湾全体での流入負荷量の削減量を最小にすることを意味する。②は、下水道普及率が低いほど新たな流入負荷量の削減は容易であり、流入負荷削減量が集中するにつれて削減にかかるコストは効果的になるということである。逆に③は流入負荷削減に係わるコスト－効果逓減法則を反映しており、人口密度が高いほど下水処理事業による

効果、すなわち削減効果が表れやすいため削減が容易なことを表しているものである。

これらの値を具体的に設定するに当たっては、大阪湾に流入する河川の流域全体を、海域の各ボックスの分割に基づく必要がある。本論文においては、各ボックスに流入する河川の流域図をもとに、市町村レベルでの分割を第２、３章で行っているのでここでは割愛する。市町村レベルの分割をもとに、上述の３つのケースについて、海域の水質再現の対象とした1987年のデータを基に算出した実行難易度ｅの各係数値を表４－１１に示す。

ケース１は①に対応するもので、荷重はすべて等しいとしており、ケース２は②に対応するもので、大領域ボックス 1,5,8 はほぼ下水道が完備していることを示しており、大領域ボックス 2, 3は下水道の改善がなお可能なことを意味している。ケース３は③に対応しており、人口密度から荷重係数が設定されたのである。このように、陸域に直接隣接している各ボックスの汚濁負荷の削減量からなるベクトルとその施策実行難易度を表すベクトルｅのスカラー積が目標関数となり、これが最小となるような施策を求めるのが問題となる。

以上述べたように、陸域の汚濁削減に伴う制限条件式と目標関数が設定された。すなわち、大阪湾の各海域ボックスのＣＯＤ濃度と陸域からの流入負荷削減量の削減方策に対し、問題は式（４－１３）のように線形計画問題として定式化できる。

$$\text{Minimize } e \cdot \Delta L \,, \qquad (4-13)$$

$$\text{subject to}$$

$$C_0 - C_s = C_r \le A \cdot \Delta L$$

$$0 \le \Delta L_i \le L_i^0$$

ただし、

ΔL ：陸域負荷削減量ベクトル

ΔL_i^0 ：ボックス ｉの大阪湾全体での環境基準達成のための削減量

C_0 ：現況再現ボックス濃度

C_s ：ボックス濃度が達成すべき水質（すなわち環境基準値）

C_r ：現況と目標値との濃度差

A ：流入負荷のボックス濃度への寄与度マトリクス

e ：陸域負荷削減施策実行難易度を表すベクトル

i ：陸域ボックス番号

（大領域海域モデル　i=1,2,3,5,8,9,10,11）

（小領域海域モデル　i=1,2,3,4,5,6,7,11,12）

である。

大領域ブロックの各行政の人口、面積、人口密度、下水道普及率より表４－１１の目的関数の係数が求められた。計算を容易にするため、表中のリンはＩＰおよびＯＰを区別せずリンとしている。

表４－１１　目的関数の係数

陸接ﾎﾞｯｸｽ	ケース１		ケース２		ケース３	
	リン	ＣＯＤ	リン	ＣＯＤ	リン	ＣＯＤ
1	1.0	1.0	0.989	0.989	1.40×10^{-4}	1.40×10^{-6}
2	1.0	1.0	0.553	0.523	4.25×10^{-4}	4.25×10^{-4}
3	1.0	1.0	0.598	0.598	4.55×10^{-4}	4.55×10^{-4}
5	1.0	1.0	0.989	0.989	7.21×10^{-5}	7.21×10^{-5}
8	1.0	1.0	0.989	0.989	3.60×10^{-4}	3.60×10^{-4}
9	1.0	1.0	0.0	0.0	6.28×10^{-4}	6.28×10^{-4}
10	1.0	1.0	0.0	0.0	1.18×10^{-3}	1.18×10^{-3}
11	1.0	1.0	0.0	0.0	2.84×10^{-3}	2.84×10^{-3}

４－５　線形計画法の解とそれに基づく水質改善の評価

線形計画問題を解いて得られたΔL_iとインパクト・マトリクスによって定められる水質値、すなわち

$$C_i = C_{i0} - \sum_j a_{ij} \cdot \Delta L_j \qquad (4-14)$$

に着目する。ただし、

C_i　：　ボックスｉの削減後の濃度

C_{i0}　：　ボックスｉの現況濃度

a_{ij}　：　水質伝達係数

ΔL_i　：　流入負荷削減量

である。このように線形仮定の基で得られた水質値の計算結果と、実際に水質再現計算を実行した結果を表４－１２に示す。

４－２節において水質モデルで求めた75%水質再現値と前節の線形計画法で解いたものの間には17.5%程度の誤差が生じている。水質モデルでは30分～90分の計算時間を要するのに較べ線形計画法では即答できるという利点があり、大きな傾向を見る場合には本方法が使用できるのではないかと考えられる。すなわち、結果は有用である。これより、線形計画法によって得られた削減率による水質計算結果は、環境基準を達成していることが確認された。実際の水質計算結果との間に若干の差異がみられるが、大略の方向を確認するためには有効であると確認できる。より正確を期すには、厳密な水質計算を行うことが必要であるといえる。

表4-12　水質再現計算と線形計画法による計算結果の比較

単位：COD75%(mg/ﾘｯﾄﾙ)

大領域ボックス	線形計画法		水質再現計算		差(%)	
	上層	下層	上層	下層	上層	下層
1	3.42	1.11	3.43	1.554	0.3	28.4
2	4.27	1.23	4.16	1.673	-2.6	26.8
3	4.04	1.68	3.85	1.99	-4.9	15.8
4	2.32	0.87	2.44	1.124	5.0	23.0
5	1.76	0.91	1.98	1.031	11.4	12.0
6	2.56	0.93	2.56	1.142	0.0	19.0
7	1.70	0.91	1.91	1.021	11.2	11.1
8	1.47	0.93	1.77	0.988	17.0	5.9
9	2.43	1.02	2.45	1.237	0.8	17.7
10	1.79	0.92	1.99	1.028	10.3	10.5
11	1.44	0.93	1.75	0.988	17.5	6.3

線形計画問題として与えた削減計算を基づいて３つのケースにおける流入負荷量の表を作成した。その結果を表４－１３～表４－１５および図４－１９に示す。

表4-13 ケース１(削減難易度を等しいとする)による環境基準を達成するための流入負荷量

陸接ﾎﾞｯｸｽ	リン(TP)			COD		
	流入量[g/15分]		削減率	流入量[g/15分]		削減率
	夏季	冬季	%	夏季	冬季	%
1	1560	1587	0.0	91481	89174	0.0
2	54704	45692	32.3	1814649	1641159	32.3
3	7537	6500	32.3	314422	331892	12.6
5	677	623	0.0	30780	29777	0.0
8	1310	1040	0.0	37739	29019	0.0
9	769	727	0.0	31697	33704	0.0
10	1177	1015	0.0	92331	92217	0.0
11	437	437	0.0	13724	13724	0.0

表4-14 ケース２(下水道普及率が高いほど難しいとする)環境基準を達成するための流入負荷量

陸接ﾎﾞｯｸｽ	リン(TP)			COD		
	流入量[g/15分]		削減率	流入量[g/15分]		削減率
	夏季	冬季	%	夏季	冬季	%
1	1560	1587	0.0	91481	89174	0.0
2	54704	45692	33.0	1814341	1041159	33.0
3	7537	6500	33.0	314422	340551	10.4
5	677	623	0.0	30780	29777	0.0
8	1310	1040	0.0	37739	29019	0.0
9	769	727	33.0	21246	22592	33.0
10	1177	1015	33.0	61890	61813	33.0
11	437	437	0.0	9199	9199	33.0

表4-15 ケース３(人口密度が低いほど難しいとする)環境基準を達成するための流入負荷量

陸接ﾎﾞｯｸｽ	リン(TP)			COD		
	流入量[g/15分]		削減率	流入量[g/15分]		削減
	夏季	冬季	%	夏季	冬季	%
1	1560	1587	0.0	91481	89174	0.0
2	54704	45692	33.0	1814649	1641159	32.3
3	7537	6500	33.0	314422	331892	12.6
5	677	623	0.0	30780	29777	0.0
8	1310	1040	0.0	37739	29019	0.0
9	769	727	0.0	31697	33704	0.0
10	1177	1015	0.0	92331	92217	0.0
11	437	437	0.0	13724	13724	0.0

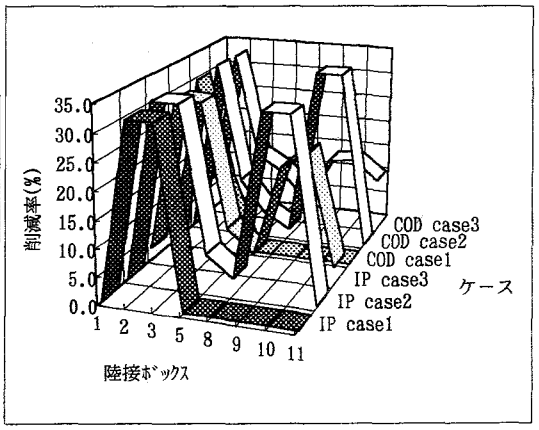


図 4-15 各ケースにおける環境基準達成への削減率

表４－１３のケース１では、削減難易度をどの地域においても等しいとみた場合、第３章図３－１より陸域ブロックの面積の大きい淀川と大和川流域の流入負荷を削減する必要があることが判る。淀川流域は人口密度が高く都市化が進んでおり負荷量の絶対量も多い。大和川流域は、面積も広く農村部が大部分を占め下水道普及率の低い地域である。他の地域は負荷量が少なく重点地域に入ってこない。

表４－１４のケース２は下水道普及率の低いところから優先的に施工することを考えたものである。ケース１に加えて大領域のボックス 9,10,11 の COD の削減が望まれることが判る。この地域は下水道普及率が低く、特にボックス９は関西国際空港開港に伴う人口増や都市化が進んだためと推測される。ボックス８はリンの負荷量は高いが、下水道が相当普及しており施策の難しい地域といえる。

表４－１５のケース３は人口密度が低いほど施工効率が低く効果が上がりにくいという条件の下で解いて得たもので負荷総量の多い陸ブロック２，３に対して優先的な投資が必要であるという結果になっている。図４－１５の横軸の陸接ボックス番号の２,３はどの条件においても３割強の削減を行うべきであるとみることができる。

４－６　結　　言

第３章の汚濁負荷集計モデルと第２章で構築した海域の環境負荷伝播モデルを用い、本章では、大阪湾全体で陸域から流入する汚濁物質の削減効果について検討を行い、流入負荷量の削減によって大阪湾の水質を、環境基準値まで削減できる手順とその支援システムを明らかにした。すなわち、どういう施策を採れば目標を達成し得るかという視点に立ち本章の各節で議論を展開した[11-15]。以下、節を追って得られた成果をとりまとめることにする。

４－２節では環境基準値を早急にクリアする必要があることを述べ、数値計算で求めた水質値を環境庁が環境指標として用いている75%水質値に変換する重回帰式を誘導した。

４－３節では、施策に対する準備が整ったところで、まず浚渫および覆土という海域に直接働きかける方法について検討を行ったが、浚渫、覆土共に明瞭な効果は期待できないことがわかった。つぎに、陸域の汚濁負荷を削減することを考え、大阪湾に流入するリンとＣＯＤに対して総量規制を行った際の効果を検討した。これによると環境基準を達成するには、大領域では 30%の負荷削減が、また小領域において 45%の負荷の削減を要することが導かれた。また、西暦 2000 年での環境基準達成に要する負荷削減量も計算した。海岸線の変更計画が具体化しているもの、たとえば関西国際空港やりんくうタウンなどを考慮した潮汐流を再計算しシステムに組み込んだ上で予測計算を行ったところ、大領域で環境基準を満足するためには23%の削減を要するとの結果を得た。これは下水道整備などが徐々に進み河川等に排出される汚濁負荷が減少することの効果であると考えられる。視点を変えれば、なお、その上に23%の削減が必要であることになり下水の高度処理などの他の施策も必要となり、この値の達成は非常に厳しい値であると理解できる。つぎに、下水道普及率が 100%に近い特定の地域での施策を行ったときの効果を検討している。この節の狙いは特定の地域の下水道工事や浚渫工事の施工進行状態が、海域での水質にどのように影響するのか、すなわち感度を調べたものである。本システムのもう一つの目的である施策管理に用いるため検討を行ったもので、その応答性が良好なため、水質評価モデルが充分使用し得るという結果を得た。

４－４節では、陸域の汚濁負荷が海域に与える影響を検討するため、陸域を海に接する陸接部分として大領域モデルでは８個のボックス、小領域モデルでは９個のボックスでの発生負荷量を変化させ、その反応を調べた。すなわち、陸域の汚濁物質が海域の水質変化に与える影響をインパクト・マトリクスとして表した。大領域モデルでは、当然それに接するボックスに大きな影響が表れるが、その中でも阪神間に接するボックス１が、陸域から受ける寄与割合が最も大きいことが確認できた。これは、防波堤などによって潮流が妨げられ、ボックス内の水の出入りが他のボックスに較べ少ないためと解釈される。また、ボックス２においては、淀川の河口に位置するため流入負荷の総量が大きいこともあり、他のボックスにも間接的に大きく影響を与えていることが確認できた。ボックス１～３に接する陸域すなわち、淀川、武庫川および大和川流域の各都市における負荷削減の施策を

優先することにより、大阪湾の水質改善に大きな効果が表れることが定量的に予測された。

小領域モデルについても、大領域モデルとほぼ同じ傾向の結論に達した。このインパクト・マトリクスを基に水質再現計算を線形計画法を用いて行う際の再現性について考察した上で、線形計画法の解を解釈し、４－５節において作用反応関係の空間的特性について検討を加えた。すなわち、大阪湾で33%総量規制を行うことにより、環境基準を達成するという前提のもとで、①陸接ボックスの下水道普及率を単位量だけ上昇させる難易度がどの地域も等しいとして解いた場合、②現在の下水道普及率を目的関数の重みとした場合、③下水道普及の難度を、人口密度に反比例するとした場合の３点である。①どのﾎﾞｯｸｽも同じ難易度で工事を進められるとしたときは、流域の広いブロック２，３の削減を進める必要があることを示している。②現況の下水道普及率を元に解いた解をみるとボックス２，３，９,10 の削減を重点的に進めるよう示唆している。下水道普及率の高い陸域ではなく、普及率の低い陸域の工事を優先するという当然の結果である。③下水道整備は、人口密度の高い地域では下水道敷設に伴い処理率が高くなることより、これを目的関数の重みとして解くとボックス２，３に接する陸接ボックスの工事を優先するべきであることが判る。これらの指標による評価を加えると、リン全量規制が律速的に効果をあげることが明かとなっている。すなわち、下水処理場、各事業所での高度処理の導入が最重要施策であることが判る。また、現在未規制の事業所より排出されるリンの量が多いことも流入量をみれば明らかなことより、さらに細かい法規制が必要であると言える。リンに次いでＣＯＤをみると、総量はリンより一桁大きい流入量が存在する。このためＣＯＤ規制による水質改善も大きく期待できるのでＣＯＤの総量規制のもとで現有の２次処理施設の改善と効率化が必要と解釈される。

本章の結論としては、淀川流域、大和川流域、次いで武庫川流域の特に人口密度の高い地域での下水道普及の促進と共に、現処理施設の改善と高度処理導入が必要であるとの従来からの提案が計画数理の上で裏付けられたといえる。本章の研究の狙いは第１部の数理的なモデルを用いて、汚染された自然を自然の持つ摂理に従って回復させる目安を得ることにある、その目的は達成されたが、現実の政策の選択には総合的な考察が必要である。

それには社会的な問題が絡むためより複雑な検討が必要となる。たとえば、浚渫の効果をそれ単独では、水質改善上は「効果は少ない」としているが、底質の生物への直接的効果や港湾の航路、浚渫の意義などを含めて複眼的な立場より考察を行うことが今後の課題である。また、一般には、モデルの複雑さと再現性とは必ずしも比例しないが、現象解明の進展に合わせ、さらに栄養塩循環などの細部においてなおモデル化の点で検討すべきことがらがあり、水質管理システムを実動、運用させた上で改良を施す必要があると理解している。

第５章　貨物輸送形態の選択による陸域での負荷と水域での負荷の競合とその評価

５－１　緒　　言

第４章までは、内海・内湾地域において水環境を改善するため大阪湾を例とした水質評価モデルを提案してきた。本章では、対象地域を瀬戸内海を中心とする地域に拡大し、水環境にとどまらない負荷削減について考察する。

貿易摩擦や円高、年間総労働時間短縮などの厳しい経済状態のなかにおいて企業は他社との差別化を際立たせるため、息の長い売れ行きを示す定番商品を生産することも止め、少しでも特徴ある商品を宣伝を伴って短期間に売るという戦略をとり多種少量生産を行っている。それと並行して経営の合理化のため多量の商品在庫を避け、流通の段階における在庫調整に力を入れている。同様に生産工程においても部品と製品の在庫を極力減少させるために納入・搬出時間の厳しい指定を行うところがある。このような生産方式と無在庫指向は、計算機を使用した通信網の発達に支えられ実現されたが、反面頻繁な配送が必要となった。 さらに、コンビニエンス・ストアなどでは食料品を長時間店頭に置くことを避けるために１日のうちに小口の配送を頻繁にしているし、消費者も長寿命の商品より軽薄短少なものを頻繁に購入するという購買行動をとったり、気軽に宅配便を利用するようになってきている。

結果として物流は、大口でも小口の物でも、きめ細かい配送を要求されてきている。たとえば、大都市の生鮮食料品市場での取引時間に合わせて深夜に生産地を出発する便が増え、夜間にも幹線道路付近での騒音、悪臭、振動、排気ガスによる近隣への迷惑を及ぼしており、生活道路の奥まで小型配送車が出入りし環境を悪化させている。

さらに、生活様式の変化に伴い排出するゴミの量も増え廃棄物処理用の輸送も多くなってきている。ところが、最近の経済不況により高級品の消費の冷え込みがあるとはいうものの、10年前と比較し輸入はドル換算で 196%、重量で 19.0%伸びている。同様に輸出は、ドル換算で2.05倍、重量で 14.9%の伸びを示し、海上貿易量は重量で 12.3%、航空貨物では実に 96.7%増加

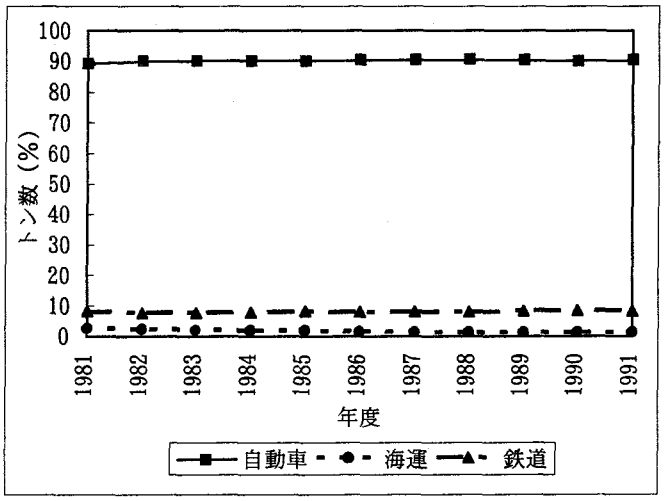


図５－１　輸送形態別の輸送量（ﾄﾝ）
自動車、鉄道、内航海運の各輸送統計より作成

している。このように港湾や空港より全国への配送する物資の量も多くなって来ている[1,2]。

前章では、水環境に直接働きかける提案を行ったが、本章は人間に対する視点を社会的な活動に移し汚濁負荷削減について考察する。そこで本章では、前段で述べたように著しい伸びを示している貨物輸送に着目する。５－２節では我が国における貨物輸送の問題点を明かにし、バランスのとれた輸送形態に近づける、いわゆるモーダルシフトの必要性について述べている。５－３節では、貨物輸送分担率の環境評価モデルを提案し、輸送問題を金銭的な側面として輸送コスト、非金銭的な側面として CO_2 排出係数・石油消費量を要素として挙げ評価する。その他の要因についても調べた上で、５－４節において社会効用関数に対する負の影響度に視点をおいたモデルの定式化を行い、得られた解より輸送形態毎の分担率を決定している[3]。５－５節では、最適分担率による環境への影響評価を行っている。５－６節は結論である。

５－２　我が国における貨物輸送の問題点

自動車による環境への悪影響や経済不況の中でトラック輸送業者は、復路での空便率を下げるため通信網の整備、長距離便の大型化、フェリーによる無人トラックの航走率の増加など返路の活用や運行管理、交通渋滞を避ける等による輸送効率化を計っている[4,5]。

もちろん物資の国内輸送は、トラックによる輸送（以下は自動車）国内船舶輸送（以下は海運）、鉄道貨物輸送（以下は鉄道）とおよび航空貨物便によって行われるが、航空機の分担率は重量単位で0.87%と極端に低くいので本論文では航空機輸送は考えない。

自動車、海運、鉄道の輸送形態別輸送量の年次変化の様相を図５－１～２に示す。

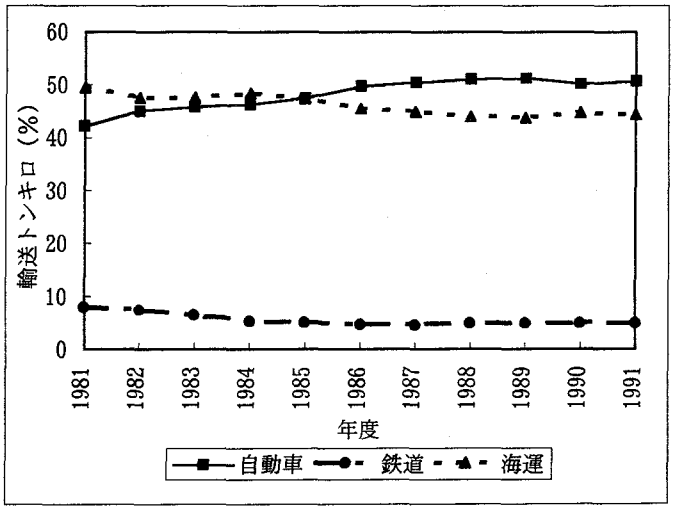


図５－２　輸送形態別の輸送量（ﾄﾝｷﾛ）
自動車、鉄道、内航海運の各輸送統計より作成

国内貨物輸送（以下輸送という）のシェア争いの結果、輸送分担率は図５－２から読みとれるようにトンキロベースで1985年に自動車が海運に逆転し今日に至っている。輸送価格が高価ではあるが荷扱いの便利さが原因で輸送の主力を占める自動車は、以前から指摘されているように[6,7]燃料効率の悪さ、排出する汚濁物による周辺環境への影響、交通渋滞と交通事故の多発、小口輸送増加と指定配達時間厳守による運転手不足、都市騒音問題や高速道路建設費の高騰など多くの根本的な問題を抱えている。しかし経営における情報の活用、農協(JA)との共同生産方式による需要の掘り起こし、運送会社間の連帯による空便の減少などの過去の行きがかりにとらわれな

い新しい戦略により、自動車輸送が重量では９割強を、トンキロベースでは５割強を占めている。ところが、米国の海岸線の約 1.5 倍の海岸線を持つ我が国は、海運にとって有利な条件にあると言える。海運は、これまで石油とその関連貨物、鉄鋼、非鉄金属、セメントなど産業基礎部門の資材輸送に主力を置いてきた。元来内航船主は零細な経営形態をとる者が多く合理化が難しかったのと同じ理由で輸送費のダンピングを生じやすく安定した経営体制をとることが出来なかった [8]。また、海運は自動車のような小回りが効かない、天候に左右されやすいなどの欠点を有しており、荷役と航走時間を考えると輸送は相当な時間的余裕をとることが必要となる。しかし、フェリーのような RORO 船やコンテナ船を投入することにより必要時間も縮小され小口輸送にも重きを置くことができるようになってきている。また、テクノスーパーライナーのような新しい海運手段により航走時間の短縮を計る計画も実現しつつある。

一方、鉄道は基礎的な輸送力が貨物輸送の繁忙期に合わせて設定されていなかった点と労働争議による輸送の不安定さのため委託される輸送量の現象を引き起こした。しかも輸送費の値上げでこれに対応しようとしたため、取り扱い貨物量の一層の減少という悪循環を起こしたが民営化によってＪＲ貨物として再出発したのを契機にヤード系輸送から拠点間直行方式とコンテナ輸送方式に抜本的な改変を行い、天候に左右されなく定時運行を全面に据えた前向きな戦略を採っている [9-11]。

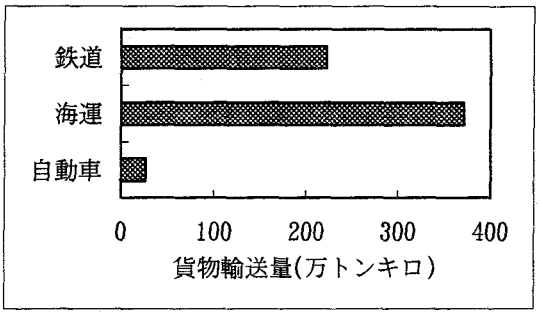


図５－３　労働者一人当たりの年間貨物輸送量
日本開発銀行「調査189」より作成

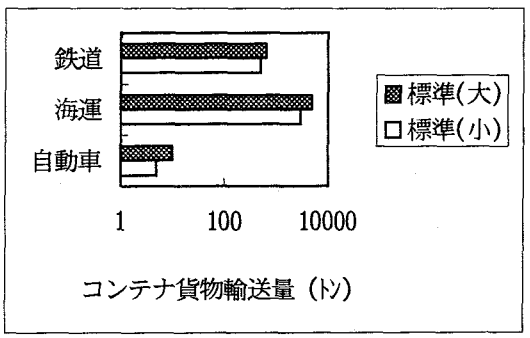


図５－４　一度に輸送可能な貨物量
輸送経済研究センター「環境と運輸・交通」より作

しかし自動車のように随時出発という形態はとれないし、日別、月別、旬別のダイヤ編成は難しいうえ、貨車や機関車の大型化が進んでいないこと、旅客優先のため昼間の軌道使用は思うにまかせず、国鉄時代の輸送量を維持するだけで精一杯で分担率の増加には転じていない。しかも、海運と鉄道は共に、経済的な要求から生まれたジャストインタイムという輸送の流れを自力で改変することは難しい。

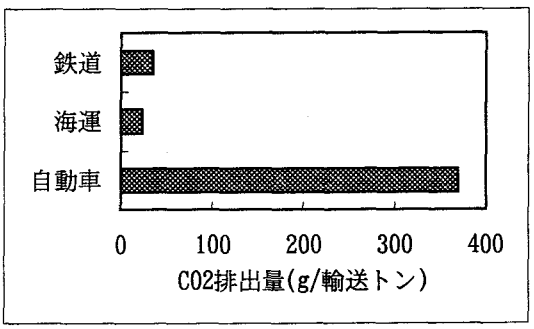


図５－５　輸送形態別のCO_2排出量
運輸白書「平成４年版」より作成

本論文では排出汚濁物の減少、石油消費量の削減、バランスの良い輸送形態を目指したモーダルシフト構想により、海運と鉄道の良さを見直し各種の輸送をバランスよく展開させることについて検討するものである。

このことは、阪神－淡路大震災発生直後に生じた輸送途絶の経験からも重要性が大きいことが明白となった。そこで図５－３～５－５に既に運輸省などで研究されている輸送形態別の特徴を示す。このように直接、環境問題や経済的な要求だけでなく危機管理として輸送方式を自動車から海運、鉄道へいわゆるモーダルシフトして行く方法を研究する必要がある。

５－３　貨物輸送分担率の環境評価モデル

（１）　貨物輸送の金銭的側面と非金銭的側面

モーダルシフトによるバランスのよい輸送の実現は、同時に自動車輸送量を減少させることであり結果として汚濁負荷量が低下し石油消費量も減り、環境への好影響につながることが期待される。モーダルシフトを対象とした研究には、モーダルシフトそのものを議論したもの[12]、省エネルギー効果を考えたもの[13]、環境への影響を主に扱かったもの[14,15]数理モデルに着目したもの[16,17]などの研究があるが、本論文ではモーダルシフトを非線形計画問題として定式化して次世代を視野に入れて解析をする。

まず、輸送の活性化と環境改善を同時に実現させるべくモデル化を行うには代表となる要素を抽出しなければならない。運輸白書などによると、これまでの研究では輸送量と輸送コスト、輸送時間に主眼をおいてなされてきたが、本論文では貨物輸送の効用を金銭的な側面と非金銭的側面に分けて考察する。前者の金銭的側面とは輸送にかかわるコスト、すなわち固定費としては輸送機器、輸送基地の維持管理費など、変動費は労務費、燃料費、営業経費などがこれに当たる。これらを代表する値としては輸送コストが最も妥当な指標と考えられる。後者の非金銭的側面[18,19]としては、次世代へ引き継ぐべき環境保全要素を選定しなければならない。省エネルギーとして石油消費量を要素に用いることは妥当であろうが、輸送に関わるもう一つの環境汚染として指標としてここではCO_2排出量を取り上げることにする。輸送に関わる石油総消費量は、運輸関係エネルギー要覧によると原油換算で 39,313 千 kl／年である。これを瀬戸内海にあてはめると沿岸で消費される量はこの沿岸地域を通過する交通量より推定でき 8135 千 kl／年であって全国の消費量の約 21%に当たる。そこで、全ての輸送を海運と鉄道に移行し自動車を全く用いなければ、この地域における輸送関連の石油消費量が 87%削減される計算となる。

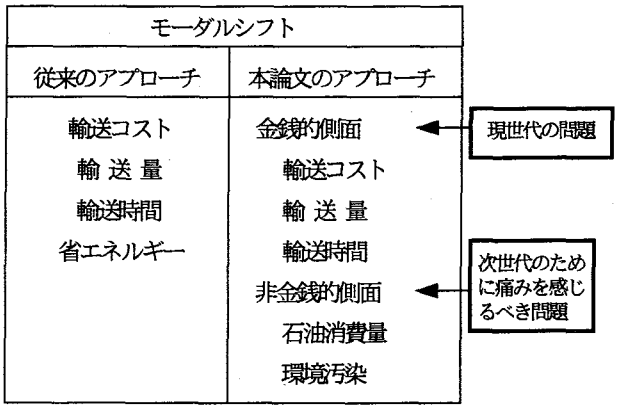


図５－6 分担率平衡化モデルの考え方

この例による非金銭的な側面による環境改善は、上述のように予測計算はできるが海運と鉄道に転換した場合に生ずるマイナス効果を考慮しなければ

ならず、その効果の具体的な計算は難しい。しかし次世代への負の遺産として残さないよう今後積極的に考えなければならない問題である。以上の考え方を図５－６に示す。

上述のように本論文では、輸送による環境への負の影響指標として金銭的側面から輸送コスト、非金銭的側面から CO_2 排出量と石油消費量を用いた貨物輸送分担率の環境評価モデルを提案する。分担率が平準化することによる影響を受ける社会的指標として社会効用関数を導入する。効用関数は凹関数として表わされることが知られているが、輸送コスト、CO_2 排出量、石油消費量の３指標おのおのを横軸に、縦軸に社会的効用関数をとった場合４次元の関数となり具体的に設定することは出来ない。ここでは各指標にウエイトを付け累和として線形化することを試みる。

輸送コストすなわち運賃は、前出の貨物運賃と各種料金表によると各対象区間に対するトン当たりが単位となっており、条件にもよるがほぼ 450km を越すと自動車運賃が鉄道の運賃を上まわる。短中距離の自動車輸送費は、海運と鉄道に較べ高いが利便性と輸送所要時間により輸送の主役を占めている。不況経済下の現在、輸送は利便性からコストを重視するように変化しつつあることから輸送コストの低い海運や鉄道にモーダルシフトの可能性は大きい。 CO_2 排出量については輸送部門からの分は， わが国全体の CO_2 排出量の２割強を占めていると推測されており、中でも自動車からの排出量が船舶、鉄道のそれに較べ大きい[19]。省エネルギーとしての石油消費量は CO_2 排出量と同様、明らかに自動車が大きい。また、各輸送機関のエネルギー分担率は，運輸関係エネルギー要覧によれば自動車 90%、海運 9%、鉄道 1%であり、ここでもモーダルシフトの効果を期待する価値はあるといえる。これらの３指標を念頭に、阪神を中心として北九州圏、東海圏、首都圏、西北海道圏の地域別に輸送される後述するモーダルシフト可能商品を累和し、さらに輸送機関ごとに分けて考える。

表５－１　モーダルシフト対象品目

品目番号	品目分類	対象品目	品目番号	品目分類	対象品目
1	穀物	○	17	ゼメント	○
2	野菜・果物	○	18	その他窯業品	○
3	その他の農産品	○	19	石油製品	
4	畜産品	○	20	石炭製品	
5	水産品	○	21	化学薬品	○
6	木材	○	22	化学肥料	○
7	薪炭	○	23	の他化学工業品	○
8	石炭		24	紙・パルプ	○
9	金属鉱		25	繊維工業品	○
10	砂利・砂・石材		26	食料品	○
11	石灰石		27	日用品	○
12	その他非金属鉱		28	その他製造業品	○
13	鉄鋼		29	金属くず	
14	非鉄金属	○	30	動植物性飼肥料	○
15	金属製品	○	31	その他特種品	○
16	機械	○	32	その他	

（2）　モデルの他の構成要素

貨物輸送を５－１節にある図５－１と５－２節の図５－２でみると、輸送トンキロでは日本全体として自動車 51.5%, 海運 43.6%, 鉄道 9.7%で、最近は景気の低迷の余波で輸送総量が減少している。また、CO_2の排出量は、運輸白書 平成４年版によると鉄道部門に対し海運は約 1.7 倍、自動車は約 36 倍の排出量であることが以前より指摘されている。

１）モーダルシフト対象品目と対象区間

①対象品目の設定

モーダルシフトの対象品目については国領[6]などにより以前より議論がなされおり、品類品目分類表を輸送統計に用いる標準品目分類表（貨物地域流動調査）により若干手直ししたのが前頁の表５－１である。この表に示すとおり a)鉄鋼や石油製品のように専用船や専用貨車で既に遠距離輸送されているもの、b)砂利･砂･石材･生コンクリートのように専用車で近距離を運ぶものを除く殆どの商品が、輸送転換対象の可能性を有することが判る。

②対象区間の設定

幹線物流には、自動車に頼らざるを得ない地域内物流と違って大量輸送形態であり海運や鉄道の利用が可能であり、政策的に輸送形態の転換を進める必要がある。そこで対象区間を、阪神（大阪・兵庫）を起点として輸送量の多い大都市圏の①京浜葉,②東海,③北九州,④西北海道を以って日本を代表する輸送区間と考える。

これら４区間における 1987 年から 1991 年の対象品目の輸送量の推移を図５－７に掲げる。この区間における海運と鉄道の分担率%の推移を図５－８～５－９に示す。

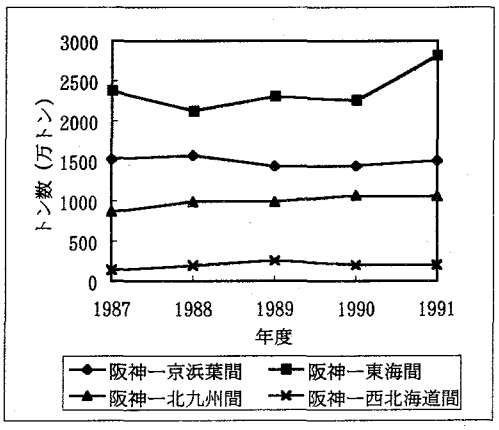


図 5-7 対象区間での対象品目の輸送量
自動車、鉄道、内航海運の各輸送統計より作成

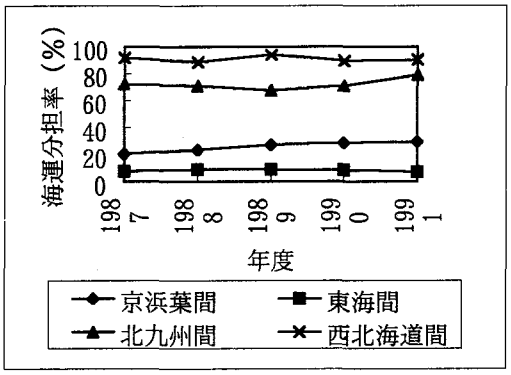


図５－８　海運分担率
内航船舶輸送統計月報より作成

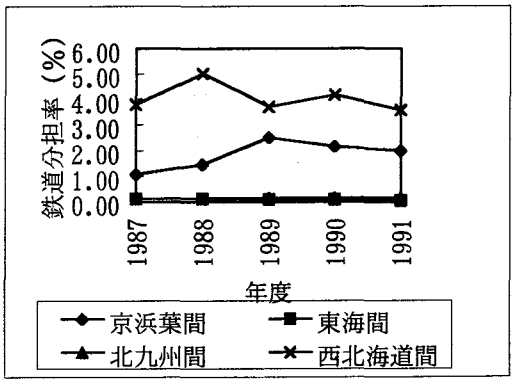


図５－９　鉄道分担率
月刊「貨物」より作成

③貨物輸送量の将来予測と輸送形態別の分担率

海上輸送への誘導を策するためのモーダルシフトは、息の長い展望が必要であるとされている。そこで各モーダルシフト対象区間ごとに分担率の決定を行うため、モーダルシフト

対象貨物の将来値を各モーダルシフト対象区間ごとに予測を行わなければならない。モーダルシフト対象貨物の過去のトレンドから将来値を予測することも一つの方法であるが、ここではモーダルシフト対象貨物量の伸び率を上位指標である実質 GNP の伸び率と対比した GNP 弾性値から予測することにする。実質 GNP と全機関総輸送量の関係を次に示す。まず、1980 年から 1993 年までの 14 年間の実質 GNP、1982 年から 1992 年までの全機関総輸送量は、表５－２の示すとおりである。

表５－２　国民総生産（GNP）と総輸送量の推移

年　度	国民総生産（GNP）				全機関総輸送量	
	名　目		実　質			
	総額(10億円)	伸び率(%)	総額(10億円)	伸び率(%)	(千トン)	伸び率(%)
1980年度	245,360	8.9	268,818	3.2		
1981年度	260,334	6.1	277,367	3.2		
1982年度	273,462	5.0	287,184	3.5	5,745,845	-2.0
1983年度	285,997	4.6	295,788	3.0	5,683,383	-1.1
1984年度	305,725	6.9	309,086	4.5	5,672,644	-0.2
1985年度	325,371	6.4	323,959	4.8	5,600,312	-1.3
1986年度	339,685	4.4	333,310	2.9	5,500,149	-1.8
1987年度	356,264	4.9	349,770	4.9	5,749,690	4.5
1988年度	379,230	6.4	370,642	6.0	6,154,550	7.0
1989年度	405,804	7.0	387,478	4.5	6,509,931	5.8
1990年度	435,254	7.3	407,156	5.1	6,776,257	4.1
1991年度	458,599	5.4	421,943	3.6	6,919,273	2.1
1992年度	469,605	2.4	425,093	0.7	6,702,844	-3.1
1993年度	472,893	0.7	424,668	-0.1		
平均	358,113	5.5	348,733	3.6	6,092,262	1.3
近年5年平均	448,431	4.6	413,268	2.8	6,612,571	3.2

1982 年から 1992 年までの実質 GNP と全機関総輸送量の伸び率の関係を図５－１０に示す。図５－１０をみると、1987 年以降はほぼ等しい値が得られていることが分かる。かつて、実質 GNP の伸び率と総輸送量の伸び率はだいたい比例的で、対 GNP 弾性値は１であるといわれていたことから本論文では、この対 GNP 弾性値を使用する方法を採用する。

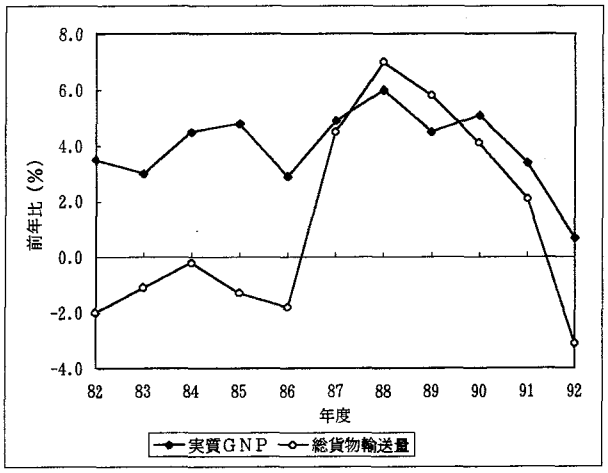


図5-10 実質GNPと全輸送機関による輸送料の伸びの関係
運輸白書、通称白書より作成

○対象品目の将来輸送量の予測

ここで使用する変数をつぎのように記号を設定する。

$$\left.\begin{array}{ll} x_i & \text{：輸送量} \\ X_i & \text{：輸送量の伸び率} \\ y_i & \text{：実質ＧＮＰ} \\ Y_i & \text{：実質ＧＮＰの伸び率} \end{array}\right\} i = 1987-1991$$

$$\left.\begin{array}{ll} x_j & \text{：将来の輸送量} \\ X_j & \text{：将来の輸送量の伸び率} \\ Y_j & \text{：将来の実質ＧＮＰの伸び率} \\ \dfrac{X_j}{Y_j} & \text{：対ＧＮＰ弾性率} \end{array}\right\} j = 1992-2010$$

このように記号設定すると、輸送量の伸び率X_i、実質ＧＮＰの伸び率Y_iは次のように表される。

$$X_i = \frac{(x_{i+1} - x_i)}{x_i} * 100$$

$$Y_i = \frac{(y_{i+1} - y_i)}{y_i} * 100$$

ここで、対 GNP 弾性値の平均値を$\overline{\left(\dfrac{X_i}{Y_i}\right)}$とすれば、将来の輸送量の伸び率および将来の輸送量は次式で求めることができる。

$$X_j = \overline{\left(\frac{X_i}{Y_i}\right)} * Y_j$$

$$x_j = \frac{X_j * x_i}{100} + x_i$$

まず、近年５年間（1987 年から 1991 年まで）のモーダルシフト対象貨物量と、その年にあたる対 GNP 弾性値を調べた。これによると、モーダルシフト対象貨物の年間伸び率は年によってかなりのばらつきがあることが判った。ここで、1980 年から 1993 年までの実質 GNP の年平均伸び率をみると、3.5%となっている。モーダルシフト対象貨物量の 1987 年から 1991 年までの５年間の年平均伸び率は、京浜葉間では-0.270%、東海間では 5.166%、北九週間では 5.217%、西北海道間では 1.207%となっている。その際の対 GNP 弾性値はそれぞれ、-0.024%、1.747%、0.895%、0.225%となっている。

この４つの対 GNP 弾性値を使用するとして、モーダルシフト対象貨物の将来予測をするためには、実質 GNP の伸び率を予測しなければならない。そこでこの実質 GNP をどう予測するかであるが、1980 年から 1993 年までの実質 GNP の伸び率は先に述べたように 3.5%である。しかし最近の景気状態からすると 3.5%という数字は今後あまり見込めない。このことから近年５年間の平均を求めたところ 2.8%という値が得られた。この 2.8%という数字をどうみるかであるが、日本経済研究センターの予測が実質 GNP の年平均伸び率

を 1975 年から 1990 年までは 4.3%、1990 年から 2000 年までは 2.7%、2000 年から 2010 年までは 3.5%としている（日本経済新聞 1994 年 2 月 23 日）。ここで計算した最近５年間の実質ＧＮＰの伸び率の平均が日本経済研究センターの予測とほぼ一致しているため、この 2.8%という値を使用することにした。つぎに実質 GNP の伸び率を 2.8%として、1990 年を基準としてモーダルシフト対象貨物量の伸び率を求めた。この伸び率より各区間の 2000 年、2005 年および 2010 年におけるモーダルシフト対象品目の流動量を推計すると、表５－３のようになった。

表 5-3 モーダルシフト対象貨物の将来予測量　　単位：トン

相手地域	1990 年	対 GNP 弾性値	2000 年	2005 年	2010 年
京浜葉	14,394,099	-0.024	14,869,241	14,780,724	14,693,640
東海	22,624,558	1.747	42,317,200	53,018,163	66,425,250
北九州	10,668,072	0.895	13,211,874	14,960,371	16,940,365
西北海道	2,016,024	0.225	2,104,225	2,171,338	2,240,609

１）輸送形態別分担率の決定要素

貨物輸送に伴う汚濁負荷については５－３節の１項で金銭的側面と非金銭的側面から考慮すべきであると述べたが、ここでは輸送に伴う負荷として炭酸(CO_2)ガスと輸送コストと輸送時間から輸送形態別の分担率を求める。

①輸送に伴う汚れ(CO_2)の発生

輸送における環境への影響を調べる上で、ここでは、地球温暖化の原因である CO_2 の排出量について調べた。

表 5-4 輸送形態別 CO_2 排出量の比較

	自動車	海運	鉄道
CO_2(g/トンキロ)	370	35	24

運輸経済研究ｾﾝﾀｰ「環境と経済・運輸」より

各運輸形態、すなわち自動車、海運、鉄道が排出する CO_2 をトンキロ当たりで調べた結果を表５－４に示す。それによると自動車は海運の 10.5 倍、鉄道の 15.4 倍となっている。つぎに各対象区間の距離を自動車、海運、鉄道の輸送形態別に調べ、トン当たりの CO_2 排出量を算出した。結果は後に表５－６に示す。

②輸送コスト

輸送コストは荷主の立場に着目し輸送運賃を調べる。各対象区間の距離に対する運賃を「貨物運賃と各種料金表」より自動車、海運、鉄道と形態別にトン当たりで算出した。結果を右の表５－５に示す。海運に関しては定期船の運賃を採用した。表５－５より自動車は海運や鉄道に比べて輸送運賃が高いことが読みとれる。

表５－５　阪神からの各対象区間別の輸送運賃

	輸送運賃(円/トン)			
	京浜葉	東海	北九州	西北海道
自動車	19,020	11,710	21,050	32,242
鉄道	7,057	3,481	7,986	14,201
海運	5,020	4,660	4,680	6,200
平均	10,366	6,617	11,239	17,548

日本交通社刊「貨物運賃と各種料金表」より作成

③石油消費量

日本の最終エネルギー消費量に占める運輸部門の割合は 23.9%で、このうち貨物輸送は４０.０%である [20,21]。輸送形態によって用いる石油製品は異なるが、1992 年度において

原油換算でＪＲ全体で316千ｋﾘｯﾄﾙ、貨物自動車で28,802千ｋﾘｯﾄﾙ、海運で3,174千ｋﾘｯﾄﾙであることと、運輸関係エネルギー要覧より単位重量と距離当たりの石油消費量から、各輸送形態について石油消費量を算出した。これを表５－６にまとめて示した。

④輸送分担率の決定要素

①項から③項により輸送における汚れ(CO_2排出量)、輸送コスト、石油消費量を得た。これらを輸送分担率の決定要素として表５－６に示す。自動車は石油消費量、輸送コスト共に高くCO_2排出量が多い。逆に海運や鉄道は輸送コストが低く、CO_2排出量が少ない。これらの３要素を考慮して各対象区間ごとに輸送分担率を以下モデルの定式化の節に従って決定する。ここでは、データ入手の容易な貨物輸送に絞って論じる。

表５－６　各輸送区間別の分担率決定要素の比較

	対象区間の距離(km)				石油消費量(原油万ｷﾛリットル)			
	京浜葉	東海	北九州	西北海道	京浜葉	東海	北九州	西北海道
自動車	549.9	181.0	641.4	1214.1	43.20	26.70	35.40	12.60
鉄道	580.0	213.6	668.5	1365.8	0.53	0.33	0.43	0.15
海運	361.0	232.2	238.2	877.3	4.65	2.87	3.81	1.36
平均	497.0	208.6	516.0	1152.4	16.10	9.70	12.20	4.70
	輸送コスト(円/ﾄﾝ)				ＣＯ2排出量(g/ﾄﾝｷﾛ)			
	京浜葉	東海	北九州	西北海道	京浜葉	東海	北九州	西北海道
自動車	19,020	11,710	21,050	32,242	203.5	67.0	237.3	449.2
鉄道	7,057	3,481	7,986	14,201	13.9	5.1	16.0	32.8
海運	5,020	4,660	4,680	6,200	12.6	8.1	8.3	30.7
平均	10,366	6,617	11,239	17,548	76.7	26.7	87.2	170.9

５－４　モデルの非線形計画法による定式化と有効な分担率の決定

（１）貨物輸送分担率の環境評価モデルの定式化

自動車は、全ての要素について環境への負の影響度が、海運と鉄道より高い。そこで輸送問題における各機関の、環境影響度と社会的効用の関係のモデル化を計る。一般に社会的な効用関数は非線形性を持つので、ここでは非線形計画問題として取り扱う。

現在の輸送形態は、５－２節でも述べたように近距離輸送では自動車、長距離輸送では海運に片寄っている。しかし、今回の阪神大震災のような天災が起きたとき、輸送手段が一つに片寄っていると、輸送ルートが途絶えてしまい最悪の事態を引き起こす。そこで陸上と海上でバランスのとれた輸送が望ましい。ここでは前節で述べた環境、輸送コスト、輸送時間の三つの項目にしぼり自動車、海運、鉄道の最適な輸送分担率を決定するモデルを構築する。輸送機関とマイナス効果について以下のような記号を導入する。

$i=1$ は自動車　　$j=1$ は汚れ(ＣＯ$_2$排出量)

$i=2$ は海運　　$j=2$ は輸送コスト

$i=3$ は鉄道　　$j=3$ は石油消費量

いま、自動車、海運と鉄道の分担率をそれぞれx_1, x_2, x_3 と表す。このとき輸送機関iの分担率がx_iのときj種のマイナス効果、すなわち社会的影響度を表す効用関数を$U_i(x)$と

表す。さらに、記号を下のように設定する。

A　：総輸送量（ﾄﾝ）

L_i　：輸送機関 i の平均走行距離　(ｷﾛﾒｰﾀ)　　$i=1,2,3$

a_{i1}　：輸送機関 i の出す汚れ(ＣＯ$_2$排出量)　　(ｸﾞﾗﾑ/ﾄﾝｷﾛ)

a_{i2}　：輸送機関 i の輸送コスト　　(円/ﾄﾝｷﾛ)

a_{i3}　：輸送機関 i の燃料消費量　　(ﾘｯﾄﾙ/ﾄﾝｷﾛ)

ところで、総輸送量 A (ﾄﾝ)は自動車、海運と鉄道にそれぞれ Ax_1, Ax_2, Ax_3 づつ分担される。輸送機関 i の輸送量は Ax_i となり、ＣＯ$_2$排出量は

（i の輸送量）×（CO_2排出量）×（平均走行距離）＝ $Ax_i \times a_{i1} \times L_i$　　（５－１）

となる。同様に輸送コストは

（i の輸送量）×（輸送コスト）×（平均走行距離）＝ $Ax_i \times a_{i2} \times L_i$　　（５－２）

となる。同様に石油消費量は

（i の輸送量）×（燃料消費量）×（平均走行距離）＝ $Ax_i \times a_{i3} \times L_i$　　（５－３）

となる。

これらの輸送によりＣＯ$_2$の総排出量は、$A\sum_{i=1}^{3} a_{i1}x_i$ となる。

同様に、総輸送コストは $A\sum_{i=1}^{3} a_{i2}x_i$ 、石油総消費量は $A\sum_{i=1}^{3} a_{i3}x_i$ となる。ただし、これらは平均値を基準に無次元化してある。

したがって、輸送機関 i の j 種の社会的影響度は $U_j\left(\sum_{i=1}^{3} a_{ij}x_i\right)$ となる。

このような定式化を阪神地区を中心に北九州、東海、京浜葉、西北海道に対して行っている。地域別に添字を付けると複雑となるため定式化においては省略して（５－１）～（５－３）式で代表させている。ここで j 種のマイナス効果による効用に対する寄与度を λ_j とすると目的関数は、つぎの一般式で表すことができる。

$$\sum_{j=1}^{3} \lambda_j U_j\left(\sum_{i=1}^{3} a_{ij}x_i\right) \rightarrow \min_{x_1,x_2,x_3} \qquad (5-4)$$

制約条件

$$\sum_{i=1}^{3} x_i = 1 \qquad (5-5)$$
$$x_i \geq 0$$

この非線形計画法による輸送モデルは、社会的影響度を表す負の効用関数 $U_j(x)$ を $\left(1-e^{-\sum_{i=1}^{3} a_{ij}x_i}\right)$ と仮定すると、目的関数はつぎのように書き換えられる。

$$-\sum_{j=1}^{3}\lambda_j\left(1-e^{-\sum_{i=1}^{3}a_{ij}x_i}\right) \rightarrow \max_{x_1,x_2,x_3} \qquad (5-6)$$

制約条件

$$\sum_{i=1}^{3}x_i-1=0$$

$$x_i \geq 0$$

この制約条件に対して、寄与度 $\lambda_j;\ j=1,2,3$ に対して数値を与えて、最適化問題を解き最適解 x^* を求める。

（２）　輸送形態別の分担率の決定

決定変数 x_i^*（分担率）は、市場経済の中で決まって行くが、ここでは理論的に示される値として考える。

表 5-7　単位輸送量当たりの量(鉄道=100)

	CO_2排出量 (g-c/ﾄﾝｷﾛ)	石油消費量 (ﾘｯﾄﾙ)	輸送コスト (円/ﾄﾝ)
鉄道	100	100	100
海運	164	881	256
自動車	371	8189	62

環境と運輸・交通(運輸経済研究ｾﾝﾀｰ)より作

定式化した非線形計画問題にデータを与えて計算した結果を図５－１１に示す。ここで寄与度 $\lambda_j;\ j=1,2,3$ は輸送コスト、CO_2 排出量、石油消費量に対する重要度であるが、決定変数が存在する条件のもとでは取りうる組み合わせは多くなくて、多目的計画法の解法でよく用いられる希求水準法 [22,23]により CO_2 排出量と石油消費量の感度を輸送コストに対する重要度より高くなる組み合わせとして CO_2 排出量、石油消費量および輸送コストの寄与度の値を求めた結果 CO_2 排出量 $\lambda_1=5.4(0.338)$、石油消費量 $\lambda_2=5.1(0.334)$、輸送コスト $\lambda_3=5.5(0.319)$ が得られた。上記の（ ）の数値は、合計が１となるように規格化した値である。この解は、多少輸送コストを犠牲にしても環境面を重視しているという立場のものであるといえる。例として図５－１１に CO_2 排出量の重要度に対する自動車、海運、鉄道の感度を示す。また、定式化にあたってこれを使用した。

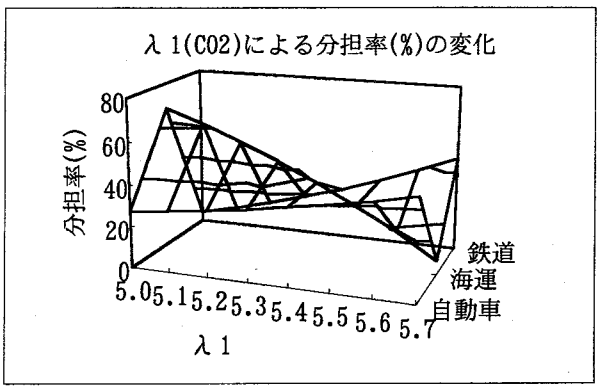


図５－１１　CO2 排出量の感度

L_i は表５－６より数値を計算し a_{i1},a_{i2},a_{i3} の原単位は表５－７などの値を用いた。

以上の数値解析の結果得られた分担率を図５－１２に示す。また、この分担率による環境に対する変化率を表わしたものが表５－８である。定式化の際、社会的な影響度を限界効用逓減の法則に従い対数関数を用いた計算も行っているが、一般に経済活動は指数関数を用いることが多いので本章では指数関数についてのみ考察している。また $U_j(x)$ の半飽和定数は 0.693 となっている。

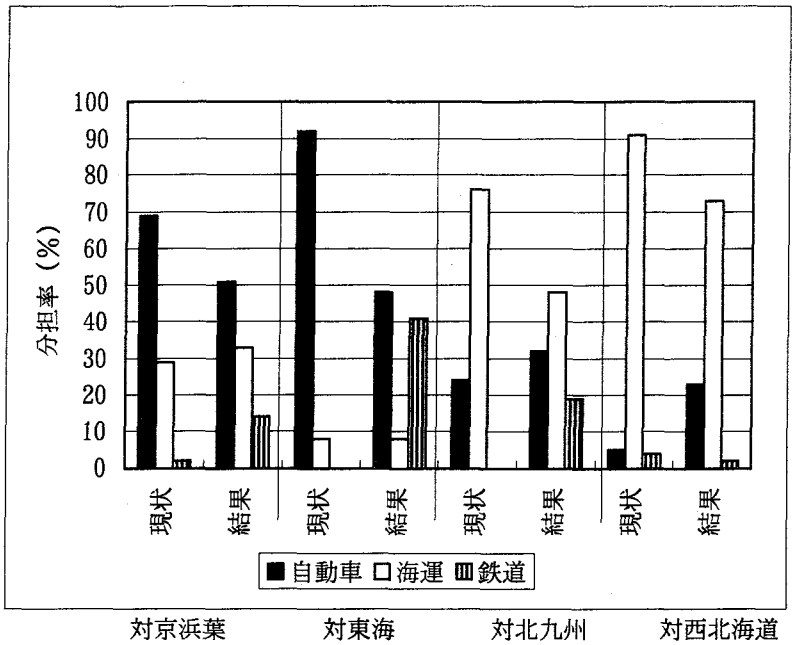


図５－12　貨物形態別の貨物輸送分担率（%）の変化

図５－１２より対京浜葉においては自動車の分担率が約 20%低下し、その分が海運と鉄道に移行している。対東海では、自動車分担率の 40%低下が鉄道に移っている。対北九州では、海運の独占的な輸送状況が主に鉄道に移行している。対西北海道では、海運分担率の低下を自動車が吸収するという結果になっている。対北九州で海運の一部が鉄道に移行したのはバランスの良い輸送形態を目指した目標につながっている。

（３）　貨物輸送形態の最適分担率による環境負荷量の削減効果

第３章において行った、面源負荷の汚濁負荷量の集計計算では、市街地の面積に較べ農地面積の占める割合は大きい。今後、市街化地域の面積は拡大するが、農地では、面積が減少するとともに肥料や農薬の使用が少なくなる傾向にある。また、道路から汚濁負荷量は現在は少ないが輸送料の増加に連動して多くなると考えられる。輸送による負荷量の調査は市街地で僅かに行われたにすぎない。第３章で、自動車による COD 負荷の原単位を求めているので、これを基に現状の分担率での COD 負荷量と、2010 年における推定分担率に対する COD 負荷量を計算し表５－８に示す。これによると、2010 年における１日当たりの COD 負荷量は 12.8%（7.7ﾄﾝ/日)削減されるという結果が得られた。ところで、瀬戸内海でのＣＯＤの流入負荷量は、中西 [24]によると 1970 年のピークに較べ 1989 年では約 30%減少したが、この十数年の削減については横這いであると言われている。そこで、同様の計算を瀬戸内

表5-8　自動車によるCOD負荷量の変化　単位:ﾄﾝ/日

阪神より	距離 km	現状(1990)の の分担率	2010年の負荷	
			将来分担	計算分担
京浜葉	549.9	8.73	14.85	8.61
東海	181.0	4.51	11.43	4.68
北九州	641.4	8.04	11.10	11.87
西北海道	1214.1	30.14	30.18	34.70
合　計		51.41	67.55	59.87

註：右欄の将来分担率とは、現在の分担率を将来の輸送推定量に割り当てたものであり、計算分担率がモーダルシフトによる分担率を指す。

海沿岸地域について行った。その結果ＣＯＤ負荷量は 6.8トン/日となるから前述の自動車貨物輸送による負荷は総負荷量 82トン/日の 8.3%に当たることが示された。

以上でモーダルシフトによるＣＯＤ負荷量削減効果について議論したが環境保全に対しては別の方法が考えられる。たとえば、和田ら[25-27]は道路に堆積する汚濁物の処理を汚水桝の清掃や透水性舗装で行なうことを提案している。また、道路清掃車の運用が手軽で有効な手段とされているであることは国松・村岡ら[28]が提案したモデルがある。なお、瀬戸内海地域の年間下水道工事・管理費用は約 1 兆 40 億円であるに比して道路清掃車の経費は微々たるものである。しかし、定期的に道路清掃車を運行しても実効効果のある清掃は出来なく、しかも降雨直前に清掃すべきである。ところが、降雨の間隔を予め予想して、その間に効果的な清掃車の運用をするというような時宜を得た清掃を実行することは難しい。さらに、COD の道路排出問題については主要幹線道路の汚水桝を簡易浄化可能な形に改造することが考えられるが、特に交通量の多い地域を区切れば可能であろう。やはり、環境保全の面からは汚濁発生源そのものを抑制するのが本道であろう。

全貨物輸送の 2010 年における輸送コストは海運と鉄道に分散する効果を表５－９に示す。この表より輸送コストは 19.3%、減額され、CO_2 排出量は 19.7%削減され、石油消費量では 5.8%削減されている。これに対し輸送時間の増加や輸送頻度の減少などのサービス低下が連動して生じるがここでは検討していない。サービス低下を輸送時間の度合いで考えると表５－１０のようになる。輸送時間によるサービス低下は距離が近ければ自動車が有利であるが、遠距離であれば差は小さくなることが判る。

表５－9　分担率の変化による３指標の変化率

	1990年の現状	2010年	
		現状分担率のまま推移	計算結果を採用の場合
輸送コスト(億円)	5,716	11,329	9,147
CO_2排出量(千トン)	1,411	2,442	1,962
石油消費量(原油千kl)	11,000	13,890	13,080

表５－10　輸送時間によるサービスの比

各地域の自動車を１とする

		輸送時間(分)		輸送距離(km)	
	自動車	海運	鉄道	海運	鉄道
京浜葉	1	1.90	1.08	0.66	1.05
東　海	1	2.85	1.95	1.28	1.18
北九州	1	1.06	1.14	0.37	1.04
西北海道	1	1.49	1.36	0.71	1.12

５－５　結　　言

現在の瀬戸内海は、大型で高速の旅客船とフェリーが時折通るものの貨物船の姿は少ない。平成６年版環境白書によると、環境保全を目的としてモーダルシフトを推進するために税制上の優遇措置や日本開発銀行による融資など支援の必要性があると記述されている。未解決の公害問題として道路問題が大きな比重を占めている今、さらに輸送の利便性や輸送時間また在庫を最小限に抑える速度を競う経営形態から、景気の低迷による輸送コストの見直しや震災で明かとなった道路物流偏重の弊害からもモーダルシフトを実施する気運が高まりつつあるといえる。

本論文では、輸送物流の絶対量は確保するという前提の上でモーダルシフトを議論した。

５－１節では貨物輸送の現状について述べ、５－２節で輸送の問題点に触れて、自動車から海運や鉄道への、いわゆるモーダルシフトの必要性を指摘した。５－３節では、貨物輸送分担率の環境評価モデルを提案した。このモデルでは、貨物輸送に対する新しい視点をもって数理的アプローチからの取り組みとして提案している。すなわち先行研究として取り扱われることの多い金銭面から見た側面以外に、次世代のために考えなければならない資源や環境問題として非金銭的な方面から検討を加えるべきとした。金銭面から輸送コストを非金銭面から石油消費量と CO_2 排出量を輸送分担率を決定する要素とし、その他に研究対象区間、対象貨物、西暦 2010 年の貨物輸送量の伸びなどを調べた上で、５－４節において輸送コスト、 CO_2 排出量、石油消費量という３項目が社会に与える負の影響の面から非線形計画問題として定式化している。得られた解を基に感度解析を行い輸送形態別の分担率を決定した。この分担率を用いて西暦 2010 年の CO_2 排出量を計算したところ、約 20%減少し、石油消費量も６％弱削減された。一方、第３章で研究した、自動車が直接道路を汚す原単位を基に COD 負荷量を計算したところ、13%弱減少することが判った。このように貨物輸送のバランスを考えたモデルを用いて、大気への CO_2 の排出量を減少させる実行可能な輸送の分担率を求めたが、それは同時に水環境にも好影響を及ぼし COD 負荷量も削減されることが判った。

本章では、貨物輸送を自動車から海運、鉄道に転換することにより CO_2 排出量、石油消費量を削減するだけでなく COD 負荷も減少させられることが判明した。しかし、いうまでもなくこのような環境効率の良い施策が採用されるためには関係者の学習と協力が必要である。モデル上の残された課題の点では、５－５(１)項で社会的影響を表す関数として限界効用逓減の考えに従い指数関数を用いているため、阪神－北九州でシェアの高い輸送を行っている海運による輸送形態をそのまま肯定的に評価することができず、自動車、鉄道に転換した形になっている。工夫を要する箇所であると理解している。

第６章　排出負荷取引による環境負荷の合理的削減に関するゲーム論的アプローチ

６－１　緒　　言

これまでに、本論文において人間集団と自然との間の環境保全問題について述べてきた。本章では実際に環境保全を行う人間集団の社会的な問題について論じる。戦後日本の本格的な経済発展は1960年代から始まったが、同時にそれは公害を伴ったものであった。70年代は環境庁の発足に象徴されるように、企業利益と国民の健康との相克の繰り返しであった。しかし、環境庁による公害防止の法規制[1-5]が整備されるにつれ、大企業を中心に公害防止技術の開発に力が入れられ始めた結果、有害物質除去装置も数多く設置されるにつれ原因の明確な公害は一応姿を消すことになった[6]。一方、地方行政機関も法運用の一貫として環境保全の啓蒙などに力を入れるようになり、中小企業への立入検査を行なったり、公害防止に対する指導力を発揮した。しかし、現在に至るも生活環境には積み残した問題が多く残されており、それらの中には地球規模の問題として考えなければならない事柄も含まれている[7]。現時点における環境問題は過去によく見られた特定された加害者による公害バラ撒き型ではなく、一般国民が被害者であると同時に加害者を演じるという広く拡散された制御しにくい問題として存在している。

以上で述べたように、環境庁による公害防止の法規制の整備により大企業による公害防止技術の進歩に伴い環境保全について一応の効果があがってはいるものの、大都市近郊の内海・内湾水域の水質は悪化をたどっており、より一層の汚濁負荷の削減が要請されている。とくに地域住民の生活排水の処理が不十分であることが指摘されている。下水道協会の資料によると、日本の下水道普及率を西欧並に近づけるために下水処理場や管渠の建設が進められているものの、平成７年度末における下水道処理人口普及率の目標は５５％にとどまっているに過ぎない。下水道関連事業を実施している市町村は５１％と年を追う毎に増加しているが、人口規模が小さいほど実施率は低くなっている。

一方、製造業は、これまでに環境改善のために排水処理技術の向上を心がけているので日常的に処理を行なえるようになっている。しかし、工学的にみて濃度の高い汚濁物を取り除くことは比較的容易であるが、残りの極く微量の汚濁物を除去することは濃度が低くなるに連れ技術的にも経済的にも困難となってきている。このように製造業は限界までにきた汚濁処理装置を前に、増産を行うことにより生じる汚濁物を処理するのにどう対処すべきかという問題に直面している。増産に伴う汚濁物のための処理装置にはさらに投資する必要があるが、近い将来生産量を下げる必要が生じた場合は処理装置への投資は無駄になる。そこで、無駄な投資や新規処理技術の開発負担を緩和するために毒物処理を行った後の排出基準を満たしていない工場排水をある期間、公共下水道に放流する代わりに環境改善のための原資として目的税の形で下水道料金と支払うという考え方がある[8]。

もともと、地方行政機関は下水道普及率の向上が愁眉の目的であると共に雇用率の向上や地域の活性化は是非とも成し遂げねばならない問題であるし、下水道敷設工事には莫大な資金が必要となる。このように製造業と地方行政機関の両者の間には、基本的な利害が一致するということで、互いに交渉により増産と下水道普及率向上を計ろうとする機運が生まれる可能性が多分にある。しかし交渉の場においては、互いに戦略を駆使して自らの陣営に有利な条件で落ちつくように導くという局面になると予想される[9-12]。

このような状況に対する考え方の一つとして米国で提案された「汚濁物を出す権利を排出権として売買する」というものがある。倉阪[13]によれば、米国における「排出権」とい考え方は、 1974年にＣＡＡ法（Clean Air Act）により認められたものであり、大気汚染物質排出権の企業内または企業外取引が最初であって、その後様々な議論や実績が積み重ねられている。そして、1990年に至りＣＡＡ法は改正され、一般参加による排出権取引市場が作られるまでになっているという報告がある[13-15]。しかし、実際には野放しの市場ではなく行政の示す枠の中で行われるので、純粋な意味での排出権取引は極少ないと報告されている。このような状況のもとで、最近では州レベルで排出権売買の交渉が行われるようになり水質浄化法（Clean Water Act）の改正も検討されている。TeitzやHahnら[14-16]は排出権取引をサンフランシスコ湾で行った適用例などを紹介して啓蒙している。 そこで、本論文では米国の考え方を日本流に解釈し、陸域からの汚濁負荷量の削減による水質汚濁を防ぐ方策として企業と地方行政機関との間の排出権交渉について考察する。 澤井ら[17]は、地方行政が環境保全より環境創造という視点に立って地方に密着した施策の展開を今後とも進めるべきだとしているし、寄本ら[18]も公共を担うのは行政機関だけでなく市民と企業という「民々」協力が必要としている。また、末石ら[19-20]は売買可能な排出許可証として排出権を解説している。本論文では水質改善計画を行政機関による一方的な施策ではなく、汚濁物を出す側と環境保全を図る行政の間の駆け引きと捉える立場からゲームの理論[21-29]を用いて解析する。排水権売買に関わる環境問題にゲームの理論を援用することにより、陽には下水道普及支援による環境改善を目的としているが、広い意味では地方の活性化や雇用問題にまで影響を及ぼすものとして本研究を展開する。

本論文では上に述べた企業間の排出権売買ではなく、企業が自社で排水を処理するか、公共下水道に処理を依頼するかという問題に限定することより排出負荷取引問題を考えるが、以下では排出権の代わりに、下水道利用権という名称を用いることにする。

意志を持った主体、すなわち人間が互いに相手の行動を考慮しつつ繰り広げる排出負荷取引の理論的な顛末を以下の節に分けて議論する。６－２節で問題を整理して要素を浮き上がらせモデル化を行う、６－３節ではモデルをゲーム理論を用いて定式化し、解析を行って均衡解を見出すと共にその意味するところを考察している。６－４節では均衡解を瀬戸内海沿岸に適用した数値解析を行っている。数値例として製造業と地方行政機関の間でお互いに均衡のとれた解を導出し検討し提案したモデルとその解析法の有意性を評価している。６－７章では本章の成果を結論としてまとめている。

６－２　排出負荷の受け入れを巡る取引問題のモデル化

前節で述べたように本論文で考察する問題は、製造業の生産によって得られる利益とその生産に伴って生じる汚濁物の処理費用を勘案して自社で処理する方が得策であるか、下水道利用権を購入して公共の下水処理設備を利用した方が有利であるかを分析する必要がある。一方、行政は製造業の排水を下水処理場で引き受けるとしたら、どの程度の下水道利用権を販売すればよいかを考えなければならない。以下では、この排出負荷取引モデルを非協力非ゼロ和連続ゲームとしてモデル化することにする。すなわち、ゲームの理論の慣習に従って、製造業をプレーヤー１、製造業の属する地方行政機関をプレーヤー２と呼ぶことにする。この両者の間で排出負荷取引が行われる際、製造業と地方行政機関は以下のように振る舞うと考えられる。

・製造業、すなわちプレイヤー１

製造業は自社で汚濁物質を処理するよりも、下水道利用権を購入しそれを行使して処理を地方行政機関に委託した方が安上がりであると判断されるなら、できるだけ多く下水道利用権を購入して増産したいと当然考える。しかし相手プレイヤーである行政機関が提示した下水道利用権売却量が希望購入量未満であれば、残りの汚濁物質は自社で処理せざるを得ない。この点に関しては地方行政機関の方が優位の立場にあるとしている。

・地方行政機関、すなわちプレイヤー２

製造業が排出権を行使して下水管へ放流する際、とくに有害物質を含む場合には、製造業が責任をもって規定した水質になるよう処理することを要求する。地方行政機関は製造業の排水の処理を肩代わりするわけであるが、製造業に下水道利用権を大量に行使されるとそれらを処理しきれないという状況に陥る可能性がある。しかしながら、一方では、地方行政機関は、下水道利用権を売却して下水道敷設工事費などを捻出しようとするならば、ある程度の量は売らなければならないであろうし、陽には表れないが製造業の増産によって地方産業の活性化や雇用の促進が図られる局面もありうる。

このように、製造業と地方行政機関の両者の関係は一見非協力ではあるが一部協調という面をもっていることがわかる。つまり利害において両者の関係は完全に対立しているわけではない。そこが本研究を非協力非ゼロ和連続ゲームで展開した最大の理由であるといえる。ゲームの理論では両プレイヤーの利得関数に互いに相手プレイヤーのとる戦略が入り、それぞれの利得関数をモデル化しゲーム論的に解析を行い、生産量と排出負荷取引量の理論的均衡解を求める方法を採っている。そこで、まずモデルの定式化のために必要な記号を説明することにする。

１）　使用記号の説明

$r_1(w)$：生産によって得られる製造業の利益。（発生する汚濁物の処理費用を含む。）

ただし、これは発生する汚濁物の量wに依存する関数であり、単位は円である。

$s(w)$ ：汚濁物を自社で処理する場合に要する費用。

これは処理の対象となる汚濁物の量wに依存する関数で、単位は円である。

h ：排出権（汚濁物を未処理のまま下水管に排出できる権利）の価格

これは排出の対象となる汚濁物の量wに依存する関数で、単位は円／トンである。

$r_2(w)$ ：製造業の生産活動によって得られる行政の利益

たとえば、税収入とか雇用の促進とかが考えられるが、一般的には、これらは生産により生じる汚濁物の量wに依存する関数と考えられ、その単位は円である。

$\alpha(w)$ ：行政機関の下水処理場で汚濁物を処理するのに要する費用

これは処理の対象となる汚濁物の量wに依存する関数で、単位は円である。

a, x ：製造業（プレイヤー１）の戦略。

aは、製造業の目標生産量を意味するが、解析の容易さのために目標生産量を達成したときにその生産によって発生する総汚濁物量〔トン〕に換算して考えることにする。すなわち、発生する汚濁物の総量がどの程度の量となるように生産目標をたてればよいかという戦略を表している。

xは、排出権の希望購入量〔トン〕のことである。すなわち、生産目標を定めた場合、その生産にともなって生じる汚濁物のうち、何トンを公共下水道に排出したいと行政に申し出ればよいかという戦略である。ただし$x \leq a$。

y ：行政（プレイヤー２）の戦略。

これは下水道利用権の売却量〔トン〕である。すなわち、下水道利用権を売ってほしいと申し出た製造業に対して、何トン分の下水道利用権を売ればよいかという戦略である。

$z(x, y)$ ：製造業側が下水道利用権をxトン購入したいと申し出て行政側が下水道利用権をyトンなら売ってもよいと提示した際に、両者の間で取り引きされる下水道利用権の量〔トン〕である。

2) 前提となる条件

まず、生産活動によって得られる製造業の利益$r_2(w)$は売り上げから発生する諸費用を減じたものであるが、ここでは、ある程度以上大量生産すると生産が困難となり生産物一単位あたりの利益は減少するものとする。また、生産に伴って発生する汚濁物質を自社内で処理する費用$s(w)$は汚濁物の量wが増えるに従って、汚濁物一単位当たりの処理費用$s(w)$は増加するものとする。製造業の生産活動によって得られる行政の利益$r_2(w)$を地域住民の雇用の増大につながるという観点から見れば生産が開始されたばかりの少量生産でも、最初の内は多くの人手が必要で、多くの雇用が期待されるが、やがて人員過剰となり

雇用の確保は徐々に縮小されていくものと考えられる。もちろん、税収は生産量に単純に比例する。行政機関の下水処理場における汚濁物の処理費用$\alpha(w)$も、製造業が自社内で処理する場合と同様に処理すべき汚濁物の量wが増加するに従って汚濁物一単位当たりの処理費用は増加するものとする。ただし、製造業が独自に汚濁物を処理する場合、公共下水処理場において一括処理するよりも高い費用がかかるものとする。すなわち、公共下水処理場では集中効果が存在すると考えているのである。この条件はすべてのwに対して$s(w) > \alpha(w)$と表される。一方、下水道利用権は一単位当たり一定の価格hであるとする。

以上述べたことを要約すると、前提条件として、

$r_1(w)$ ：単調増加凹関数

$s(w)$ ：単調増加凸関数

h ：傾きhの線形増加関数

$r_2(w)$ ：単調増加凹関数

$\alpha(w)$ ：単調増加凸関数

であって、いずれも微分可能と仮定する。また、すべてのwに対して$s(w) > \alpha(w)$ と仮定している。

６－３　ゲーム論的な排出負荷取引モデルの定式化と解析

（１）　製造業と地方行政機関の利得関数の設定

上に述べた前提条件のもとで、製造業が生産目標をaと設定し、そのうちのx量の下水道利用権を希望したのに対して行政はyだけの下水道利用権を製造業に提示した場合の各プレーヤーの利得関数を表すことにする。ただし、市場経済における売買の自然な法則として下水道利用権の売買においても実際に購入量と販売量は常に一致しなければならなく、購入希望量よりも多くの下水道利用権を販売できないし、逆に製造業には公共下水処理場の能力以内の下水道利用権しか販売できない。すなわち、両者の間で取引される下水道利用権の量$z(x,y)$については$z(x,y) = x \wedge y$でなければならない。ここで、$x \wedge y$はx, yのいずれかが小さい方の値を意味する。したがって、残りの$a - z(x,y)$は製造業が自社で処理することになる。

そこで、製造業（プレーヤー１）はaだけの生産によって得られる利益$r_1(a)$から汚濁物を自社内で処理し、残りを公共下水道に依頼するために下水道利用権を購入しなければならないから製造業の利得関数$M_1(a,x;y)$は、

$$M_1(a,x;y) = r_1(a) - s(a - z(x,y)) - h(z(x,y))$$

と表される。同様に、地方行政機関の利得に関しては、製造業のaだけの生産活動によって得られた行政の利益$r_2(w)$、および排出負荷取引の利益$h(z(x,y))$から、公共下水道処理場で製造業から引き受けた汚濁物の処理費用$\alpha(z(x,y))$を減じたものが行政、すなわちプレイヤー２の利得関数になる。すなわちプレイヤー２の利得関数$M_2(a,x;y)$は

$$M_2(a,x;y) = r_2(a) + h(z(x,y)) - \alpha(z(x,y))$$

と表される。

問題は、$a \geq 0, 0 \leq x \leq a, y \geq 0$ のもとで、それぞれの利得 $M_1(a,x;y)$ と $M_2(a,x;y)$ を同時に最大にするような戦略、すなわち製造業の生産目標 a と下水道利用権の希望購入量 x、および地方行政機関の最適戦略である下水道利用権売却量 y を求めることであって、

$$\begin{cases} M_1(a,x\,;\,y) = r_1(a) - s(a - z(x,y)) - h(z(x,y)) \longrightarrow \max\limits_{a,\,x} \\ M_2(a,x\,;\,y) = r_2(a) + h(z(x,y)) - \alpha(z(x,y)) \longrightarrow \max\limits_{y} \\ \quad \textit{subject to} \\ \qquad a \geq 0\ ,\quad 0 \leq x \leq a\ ,\quad y \geq 0 \end{cases}$$

と定式化される。ただし、市場経済の売買の原則により $z(x,y) = x \wedge y$ のケース、すなわち x と y の小さい方の値をとる場合だけを考えればよい。

次項では上記のモデルの解析を行い、互いに相手の戦略に対する最適反応戦略を求めることにより、両プレイヤーの均衡戦略を定めることにする。

（2）製造業の利得関数 $M_1(a,x\,;\,y)$ について

まず、製造業の利得について考える。製造業（プレイヤー1）の利得関数 $M_1(a,x\,;\,y)$ は x と y の大小関係により以下のように与えられる。

$$M_1(a,x\,;\,y) = \begin{cases} r_1(a) - s(a-x) - hx \rightarrow \max\limits_{a,x} & \textit{if} \quad x \leq y \\ r_1(a) - s(a-y) - hy \rightarrow \max\limits_{a,x} & \textit{if} \quad x \geq y \end{cases}$$

ここで、相手プレイヤー、すなわち行政の戦略 y を固定して考える。行政機関の下水道利用権の売却量が y と決定されたとして、$M_1(a,x\,;\,y)$ を単に $M_1(a^0,x)$ と表すことにする。製造業としては、生産目標 a を仮に a° と設定しておき、さらに行政の認める下水道利用権の売却量 y 以内で購入希望量 x を設定する。そこで、生産目標 a° を固定して $x \leq y$ の領域で利得関数 $M_1(a^0,x) = r_1(a^\circ) - s(a^\circ - x) - hx$ を最大にする x の値を求める。もちろん、その値 x は a° の値によって変化すると考えられるので、a の関数として $\tilde{x}(a)$ と表すことにする。つぎに、関数 $M_1(a^0,x) = r_1(a^\circ) - s(a^\circ - x) - hx$ を最大にする x の値を求めるために s で微分し、次いで x について微分すると、

$$\frac{d}{dx} M_1(a^0,x) = -s'(a^0 - x)(-1) - h = s'(a^0 - x) - h$$

$$\frac{d^2}{dx^2}M_1(a^0,x)=s''(a^0-x)(-1)=-s''(a^0-x)$$

が得られる。ここで、前提として関数$s(\cdot)$は凸関数としているので、$s''(\cdot)\geq 0$であって、

$$\frac{d^2}{dx^2}M_1(a^0,x)=-s''(a^0-x)\leq 0$$

が成り立つ。よって、$M_1(a^0,x)$はxについて凹であることが示された。

したがって、$M_1(a^0,x)$を最大にするxの値は$\frac{d}{dx}M_1(a^0,x)=0$ より求められる。そこで、$s'(a^0-x)=h$の解xを$\tilde{x}(a^0)$とおく。

ところが、$s(w)$が凸関数であることにより$s'(w)$は増加関数であるから、その逆関数が存在する。そこで、$s'(w)$の逆関数を以下のように定義する。

$$s'^{-1}(u)=\begin{cases} 0 & if \quad 0\leq u\leq s'(0) \\ s'^{-1}(u) & if \quad s'(0)<u<s'(\infty) \\ \infty & if \quad s'(\infty)\leq u \end{cases}$$

このように定義すると、hの逆関数$s'^{-1}(h)$は $0\leq s'^{-1}(h)\leq\infty$ となり$a^0-x=s'^{-1}(h)\geq 0$より $a^0-x\geq 0$ が満たされる。一方$s'\left(a^0-x\right)=h$の解に関して$a^0-x=s'^{-1}(h)\geq 0$より、$a^0-x\geq 0$の条件と矛盾しない。したがって、$\tilde{x}(a^0)=a^0-s'^{-1}(h)$ が最適戦略となる。ただし、$0\leq s'^{-1}(h)$より、 $\tilde{x}(a)=a-s'^{-1}(h)\leq a$が成立している。

以上の議論により、生産目標をaと固定したときの製造業の利得関数$M_1(a,x;y)$のyについての変化は以下の図 6-1に示すように単峰性となる。

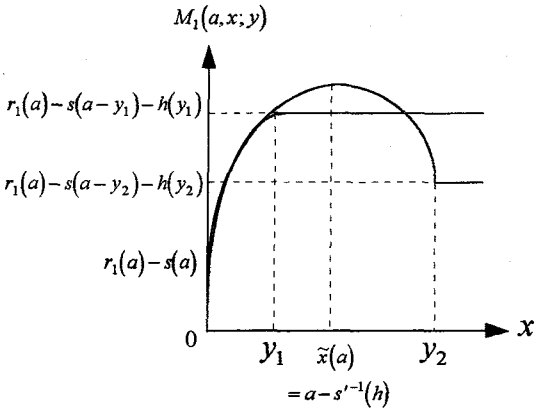


図6-1　aを固定したときのxについて$M_1(a,x;y)$の変化

製造業の最適戦略$x^*(a)$は、行政の販売する下水道利用権yに等しいか、それより小さくなければならないから、図6-1より、

$$x^*(a)=\tilde{x}(a)^+\wedge y=\{a-s'^{-1}(h)\}^+\wedge y$$

$$=\begin{cases} 0 & if \quad a-s'^{-1}(h)\leq 0 \\ y & if \quad y\leq a-s'^{-1}(h) \\ a-s'^{-1}(h) & if \quad a-s'^{-1}(h)\leq y \end{cases}$$

と与えられる。

aの値による$x^*(a)$の変化が分り易くなるように条件を書き換えると

$$x^*(a)=\tilde{x}(a)^+\wedge y=\{a-s'^{-1}(h)\}^+\wedge y$$

$$=\left\{\begin{array}{lll} 0 & if & 0\leq a\leq s'^{-1}(h) \\ a-s'^{-1}(h) & if & s'^{-1}(h)\leq a\leq y+s'^{-1}(h) \\ y & if & y+s'^{-1}(h)\leq a \end{array}\right\} \qquad (6-1)$$

となる。これを図示すると、図 6-2が得られる。

つぎに、aによって変化する$x^*(a)$の中にも最適な$x^*(a)$が存在する、つまり、最適なaが存在するとして解析を進める。

$x^*(a)$が(6-1)式で表されるときの製造業の利得$M_1(a,x^*(a);y)$は、それぞれつぎのように変形される。

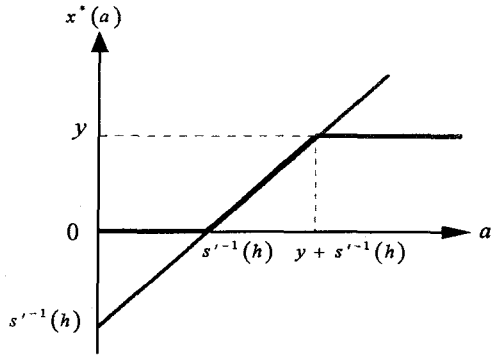


図6-2　aの値による$x^*(a)$の変化

$$M_1(a,x^*(a);y)$$
$$=r_1(a)-s\left(a-x^*(a)\right)-h\cdot x^*(a)$$

$$=\begin{cases} r_1(a)-s(a) & if \quad 0\le a\le s'^{-1}(h) \\ r_1(a)-s\left(s'^{-1}(h)\right)-h\cdot\left(a-s'^{-1}(h)\right) & if \quad s'^{-1}(h)\le a\le y+s'^{-1}(h) \\ r_1(a)-s(a-y)-hy & if \quad y+s'^{-1}(h)\le a \end{cases}$$

ここで、$M_1(a,x^*(a);y)$をaに関して２度微分すれば、

$$\frac{\partial}{\partial a}M_1(a,x^*(a);y)$$

$$=\begin{cases} r'_1(a)-s'(a) & if \quad 0\le a\le s'^{-1}(h) \\ r'_1(a)-h & if \quad s'^{-1}(h)\le a\le y+s'^{-1}(h) \\ r'_1(a)-s'(a-y) & if \quad y+s'^{-1}(h)\le a \end{cases}$$

$$\frac{\partial^2}{\partial a^2}M_1(a,x^*(a);y)$$

$$=\begin{cases} r''_1(a)-s''(a) & if \quad 0\le a\le s'^{-1}(h) \\ r''_1(a) & if \quad s'^{-1}(h)\le a\le y+s'^{-1}(h) \\ r''_1(a)-s''(a-y) & if \quad y+s'^{-1}(h)\le a \end{cases}$$

$$\le 0$$

となり、$M_1(a,x^*(a);y)$はaについて凹である。したがって、$M_1(a,x^*(a);y)$を最大にするaの値は、第１次導関数を０と置くことにより求められる。そこで、

$$\frac{\partial}{\partial a}M_1(a,x^*(a);y)$$

$$=\begin{cases} r'_1(a)-s'(a) & if \quad 0\le a\le s'^{-1}(h) \\ r'_1(a)-h & if \quad s'^{-1}(h)\le a\le y+s'^{-1}(h) \\ r'_1(a)-s'(a-y) & if \quad y+s'^{-1}(h)\le a \end{cases}$$

$=0$　より

$r'_1(a) = s'(a)$　　の解aを　a_1

$r'_1(a) = h$　　の解aを　a_2

$r'_1(a) = s'(a-y)$　の解aを$a_3(y)$

と置く。$r'_1(a)$はaについて減少関数であり、$s'(a)$はaについて増加関数であって、yは正の値しかとらないから、$a_1 \le a_3(y)$であることは明かである。したがって、常に$a_1 \le a_3(y)$が成り立っている。よって、a_1 , a_2, $a_3(y)$の関係を図示すると、図6-3aがえられる。あとはa_2がどこにくるかによって以下のようなにケース(1)、ケース(2)、ケース(3)の３通りに分けられる。

$$\begin{cases} \text{ケース(1)}: a_2 \le a_1 \quad (r'_1(a_2) = h \ge r'_1(a_1)) \\ \text{ケース(2)}: a_1 \le a_2 \le a_3(y) \quad (r'_1(a_3(y)) \le r'_1(a_2) = h \le r'_1(a_1)) \\ \text{ケース(3)}: a_3(y) \le a_2 \quad (r'_1(a_2) = h \le r'_1(a_3(y))) \end{cases}$$

上の条件の括弧内の$r'_1(a)$はaについて単調減少関数であることより従っている。最適生産目標a^*はケース(1)、ケース(2)、ケース(3)ごとに定められる。

ケース(1)の場合、すなわち$a_2 \le a_1$の場合は $r'_1(a_2) = h \ge r'_1(a_1)$ が成り立ち、図6-3aの関係があるから、最適なa^*については、図6-3bに示すように、$a^* = a_1$であることが分かる。

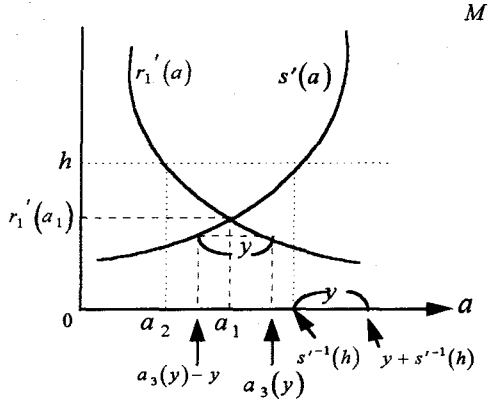


図6-3a　a_1, a_2, $a_3(y)$の関係
（$a_2 \le a_1$　の場合）

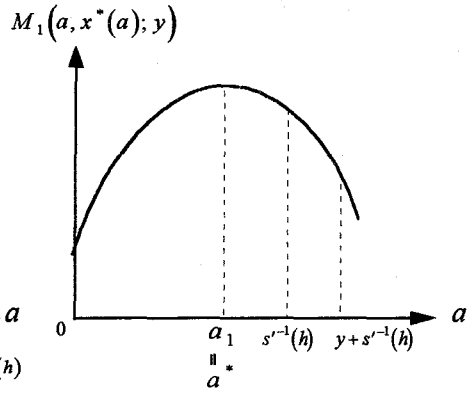


図6-3b　$h \ge r_1'(a_1)$の場合のa^*

ケース(2)の場合、すなわち$a_1 \le a_2 \le a_3(y)$ の場合、$r'_1(a)$はaについて単調減少関数であるから、 $r'_1(a_3(y)) \le r'_1(a_2) = h \le r'_1(a_1)$ が成り立つ。この様相を図6-3ｃに示す。これより、同様にして$M_1(a, x^*(a); y)$を最大にするaの値a^*は　a_2　であることが分かる。図6-3d参照のこと。

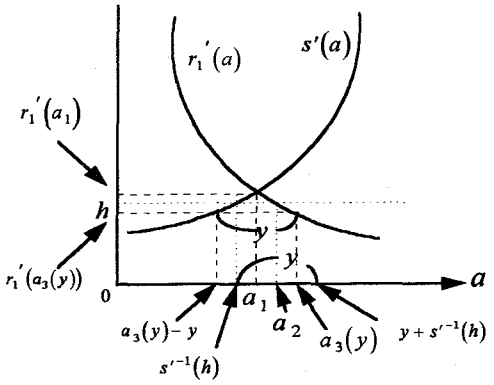


図6-3c a_1, a_2, $a_3(y)$ の関係
($a_1 \le a_2 \le a_3(y)$ の場合)

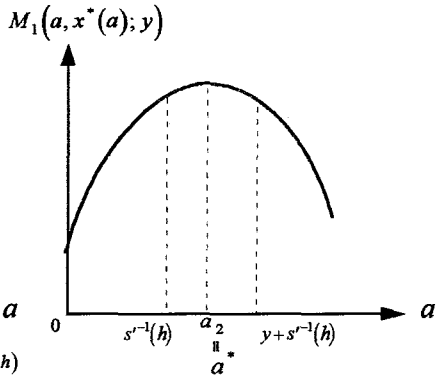


図6-3d $r_1'(a_3(y)) \le h \le r_1'(a_1)$
の場合の a^*

ケース(3)の場合、すなわち $a_3(y) \le a_2$ の場合、 $r'_1(a_2)=h \le r'_1(a_3(y)$ が成り立つ。この様相を図6-3eに示す。これより、$M_1(a, x^*(a); y)$ を最大にする a の値 a^* は $a_3(y)$ であることが分かる。図6-3f参照のこと。

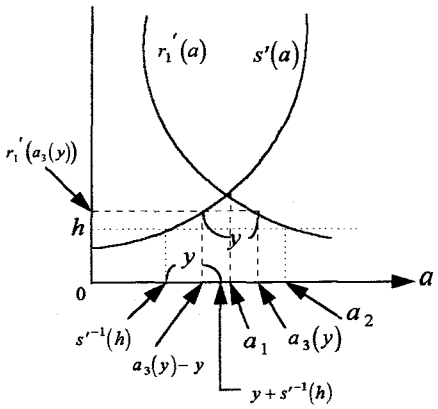


図6-3e a_1, a_2, $a_3(y)$ の関係
($a_3(y) \le a_2$ の場合)

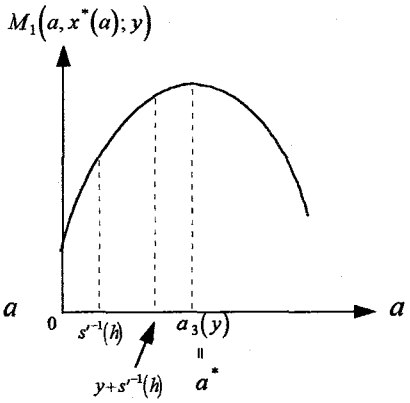


図6-3f $h \le r_1'(a_3(y))$ の場合の a^*

以上の結果をまとめると、a^* は以下のようになる。

$$a^* = \begin{cases} a_1 & if \quad h \ge r'_1(a_1) \quad \text{このとき} \quad 0 \le a_1 \le s'^{-1}(h) \\ a_2 & if \quad r'_1(a_3(y)) \le h \le r'_1(a_1) \quad \text{このとき} \quad s'^{-1}(h) \le a_2 \le y + s'^{-1}(h) \\ a_3(y) & if \quad h \le r'_1(a_3(y)) \quad \text{このとき} \quad y + s'^{-1}(h) \le a_3(y) \end{cases}$$

(6－2)

(3)行政機関の利得関数 $M_2(a, x; y)$ について

つぎに、地方行政機関の最適戦略について議論するため、行政の利得関数 $M_2(a, x; y)$ に注目する。行政、すなわちプレイヤー2の利得関数 $M_2(a, x; y)$ は x と y の大小関係により以下のよう与えられる。

$$M_2(a, x\,;\,y) = \begin{cases} r_2(a) + hx - \alpha(x) \;\rightarrow\; \max\limits_{y} & if \quad x \le y \\ r_2(a) + hy - \alpha(y) \;\rightarrow\; \max\limits_{y} & if \quad x \ge y \end{cases}$$

$x \le y$ のとき $M_2(a, x\,;\,y)$ は y に無関係な式であって、y について定数である。したがって、$x \ge y$ のときの $M_2(a, x\,;\,y)$ に対して解析を行えばよい。そこで、$M_2(a, x\,;\,y)$ の最大値を求めるために、その第１次、第２次導関数を計算する。すなわち、

$$\frac{\partial}{\partial y} M_2(a, x\,;\,y) = h - \alpha'(y)$$

$$\frac{\partial^2}{\partial y^2} M_2(a, x\,;\,y) = -\alpha''(y) \;\le\; 0$$

が得られる。この場合、$\alpha(\cdot)$ は凸関数であるので、その第２次導関数 $\alpha''(\cdot)$ は正であることに注意すれば、行政の利得関数 $M_2(a, x\,;\,y)$ は y について凹であることが分かる。そこで、$M_2(a, x\,;\,y)$ を y についての最大にするような y の値は

$$\frac{\partial}{\partial y} M_2(a, x\,;\,y) = h - \alpha'(y) = 0$$

を基準にして求まる。すなわち、 $\alpha'(y) = h$ の解 y を $\tilde{y}$ とおくと、$\tilde{y}$ が求めるものであるが、逆関数を考えると、$\tilde{y} = \alpha'^{-1}(h)$ となる。製造業の下水道利用権購入希望量 x_1 が $\tilde{y}$ より大きくない時は、行政は x_1 より大きく下水道利用権を販売することはできない。一方、製造業の希望量 x_2 が $\tilde{y}$ より大きくても $\tilde{y}$ しか購入できない。もし、行政が $\tilde{y}$ より大きい量を製造業に販売した時には行政の利得は減少する。このように、行政の利得関数 $M_2(a, x\,;\,y)$ の y についての変化を以下の図6-4に示す。

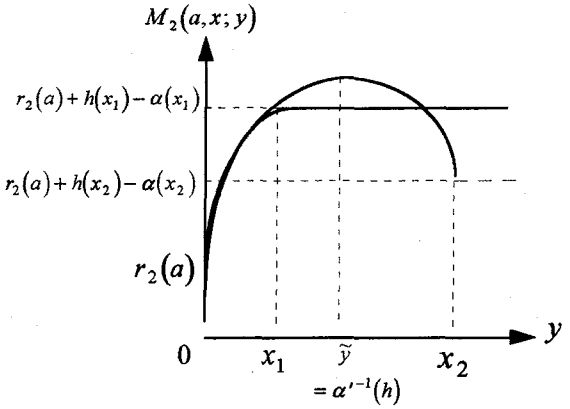


図6-4 y についての $M_2(a, x\,;\,y)$ の変化

よって、$\tilde{y}$ と x の大小関係によって求める行政の最適戦略 y^* は、つぎのように定められる。

$$y^* = \left\{ \begin{array}{ll} \tilde{y} & if \quad \tilde{y} \le x \\ x & if \quad x \le \tilde{y} \end{array} \right\} = \tilde{y} \wedge x \qquad (6-3)$$

（4）　均衡解の概念とその評価

以上で求めた式（6－1）～（6－3）で表される製造業と行政のそれぞれの最適戦略 a^*, $x^*(a)$, y^* を排出権の価格 h に関する条件別にベクトル形式（a^*, $x^*(a)$, y^*）でまとめると以下のようになる。

$$(a^*,\ x^*(a),\ y^*)$$

$$= \begin{cases} (a_1,\ 0,\ \tilde{y} \wedge x) = (a_1,\ 0,\ 0) \\ \qquad if \quad 0 \le a_1 \le s'^{-1}(h) \quad \text{このとき} \quad h \ge r'_1(a_1) \\ \\ (a_2,\ a_2 - s'^{-1}(h),\ \tilde{y} \wedge x) = (a_2,\ a_2 - s'^{-1}(h),\ \tilde{y} \wedge (a_2 - s'^{-1}(h))) \\ \qquad if \quad s'^{-1}(h) \le a_2 \le y + s'^{-1}(h) \quad \text{このとき} \quad r'_1(a_3(y)) \le h \le r'_1(a_1) \\ \\ (a_3(y),\ y,\ \tilde{y} \wedge x) = (a_3(\tilde{y}),\ \tilde{y},\ \tilde{y}) \\ \qquad if \quad y + s'^{-1}(h) \le a_3(y) \quad \text{このとき} \quad h \le r'_1(a_3(y)) \end{cases}$$

この結果を図示すると、以下の図6-5が得られる。この図から h、つまり下水道利用権１単位当たりの価格の与え方によって、３通りの均衡解が存在することが分かった。

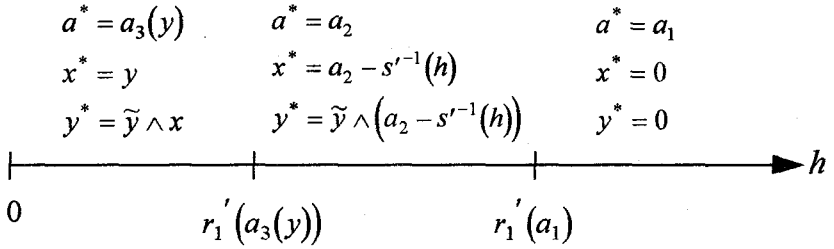


図6-5 h によって異なる均衡点

６－４　数値解析による排出負荷取引モデルの評価

（1）計算対象地域と計算条件

ここでは、これまで解析を行ってきたモデルに対して数値解析を試みる。本モデルの地方行政機関は、瀬戸内海に汚濁負荷を流入させる工業区を持つ各府県とする。製造業の排出する汚濁物の指標として環境庁が水質指標の一つとしているＣＯＤを用いることにする。もちろん瀬戸内海沿岸には多くの種類の製造業が存在し、それぞれ異なった濃度のＣＯＤを工業排水として排出している。下水道協会資料(1990年)より瀬戸内海沿岸４９工業区の排出ＣＯＤ原水水質の平均値を10, 3024. 8mg/ﾘｯﾄﾙと計算した。この平均値は、「皮革工業」と「その他製造業」の計２業種の排出量が極端に少なかったので、除外して計算している。

さらに、瀬戸内海沿岸の４９工業地区の産業を、平均値の工業排水を排出する産業のみと仮定し、１９９０年の総ＣＯＤ排出量を求めたところ71,122トン/日であることが分かった。製造業ならびに下水処理場から排出される処理水の濃度は規程通りとし下水処理場の処理費用は下水道要覧(1990年版)より求め、集中効果を考慮して製造業の半分の処理費でまかなえると仮定した。行政の利益$r_2(w)$は陽に表れない値を含んでいるので、ここでは$r_1(w)$の10分の１として分析を行っている。

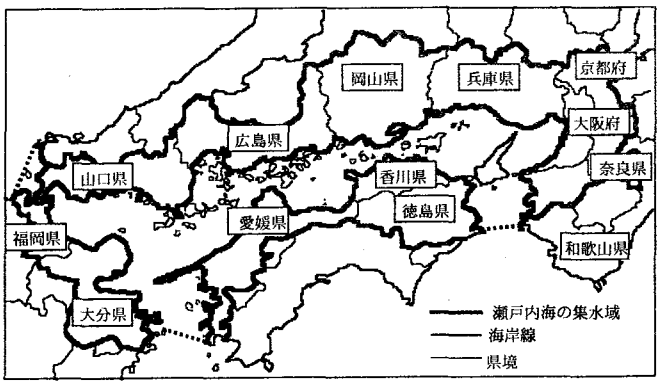


図6-6 瀬戸内海沿岸の工業地区

（２）均衡解の感度解析と下水道利用権の性格

以上の条件のもとで数値解析を行い、数値例としての均衡解およびプレイヤー１の期待利得$M_1(a, x\,;\,y)$，プレイヤー２の期待利得$M_2(a, x\,;\,y)$を求めた。

６－３節(１)項で示した関数のうち、利得関数$r_1(w)$、自社での処理費用関数$s(w)$および公共下水道の処理費用関数$\alpha(w)$に関しては、実データに基づき回帰分析を行い各府県毎に具体的な関数形が得られた。代表例として大阪府について図６-7aに利益関数$r_1(w)$を、図６-7bに処理費用関数$s(w)$を示す。

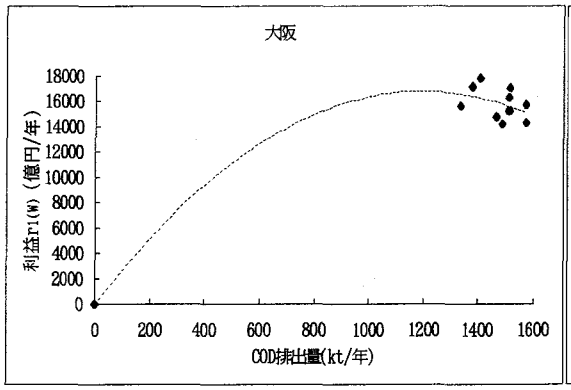


図6-7a物質量(COD)と利益$r_1(w)$の関係
回帰曲線 $y=-0.039x^2+9.265x-0.492$
通産省編「工業統計表」
三菱総研「企業経営の分析」より作成

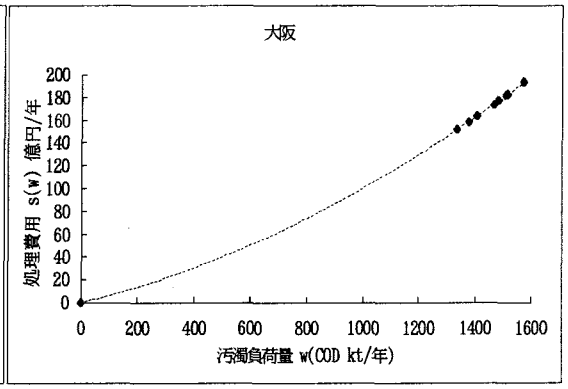


図6-7b 汚濁物量(COD)と処理費用$s(w)$の関係
回帰曲線 $y=0.00004x^2+0.06x+0.0012$
通産省編「工業統計表」
下水道協会「下水道統計、指針と解説」より

６－３節で理論的に求めた均衡解は下水道利用権１単位の価格hによって異なった解を持つことを示している。そこで、モデル内に示された幾つかの関数形とhの値を与えれば自動的に解が得られるようなプログラムを作成した。このプログラムを用いてhを変動さ

せ、それによって$M_1(a,x;y)$や$M_2(a,x;y)$がどのような変化を示すかをhの感度分析という形で行った。その結果を図で示したものが以下の図6-8a、図6-8bである。hは行政（プレイヤー２）が決定する定数であるので、行政の利得$M_2(a,x;y)$が最大となるようなhを求めた。

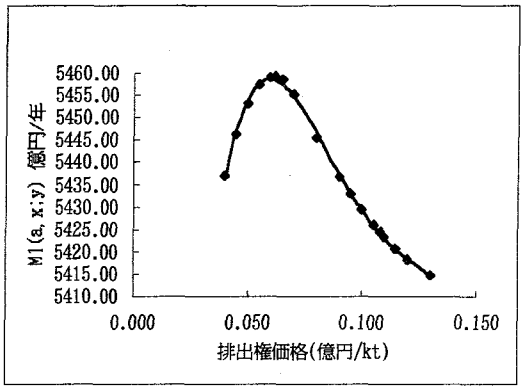


図6-8a 排出権価格hと製造業の期待利得 $M_1(a,x;y)$の関係

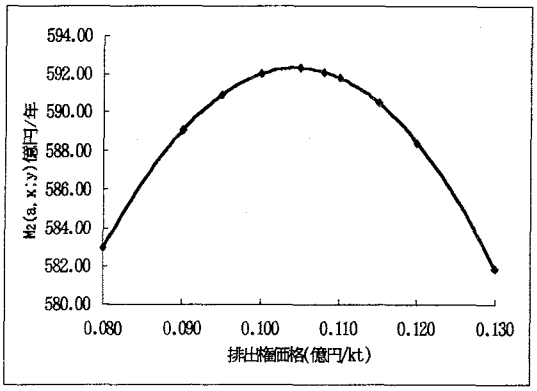


図6-8b排出権価格hと地方行政機関の期待利得 $M_2(a,x;y)$の関係

均衡解の感度分析により、行政（プレイヤー２）の期待利得$M_2(a,x;y)$を最大にする下水道利用権価格hとhがその値をとるときの製造業の最適戦略 a^*、排出負荷取引量$x^*=y^*$は1993年を例に計算した。表6-1はその結果を示す。

（３） 排出負荷取引モデルの瀬戸内海沿岸自治体への適用とその効果

前節で得られたhおよびx^*（$=y^*$）の積を本章の６－１節で述べた目的税のように、下水道建設資金に充てることを考える。

この数値解析では、本章のモデルにしたがって各行政が独立して取引を行うとしている。いま瀬戸内海沿岸の行政それぞれが排出負荷取引を行ったとして表６－１をみると、取引される排出権の量x^*の項の合計は、ＣＯＤ量に換算して約1.7万キロトンとなることが判る。各府県の期待利得である$M_2(a,x;y)$を最大にする下水道利用権価格hは、その行政の置か

表 6-1 各府県で排出権取引が行われた場合の結果

	h 〔億円/kt〕	a^* 〔kt〕	x^* 〔kt〕	$hx^*(=hy^*)$ 〔億円〕
京都府	0.11	321.9	295.2	32.47
大阪府	0.11	1178.3	615.7	64.65
兵庫県	0.52	10228.8	5549.8	2858.12
奈良県	1.60	1999.1	1005.2	1608.34
岡山県	0.10	1054.5	659.5	62.66
広島県	0.29	4959.2	2571.2	732.78
山口県	0.14	1907.2	918.2	132.22
徳島県	0.09	2121.0	1786.0	164.31
香川県	0.10	1093.4	618.4	59.98
愛媛県	0.21	4520.0	2596.3	537.42
福岡県	0.08	358.7	281.2	22.50
大分県	0.08	743.6	532.0	44.15
合 計			17428.6	6319.60

表6-2 下水道建設費

1993年	〔億円〕
京都府	926.3
大阪府	3055.4
兵庫県	1621.8
奈良県	224.6
岡山県	733.7
広島県	918.2
山口県	334.1
徳島県	59.4
香川県	196.0
愛媛県	343.0
福岡県	164.2
大分県	206.6

下水道統計・財政編より作成

れている社会的な状況、すなわち下水道建設に投入している金額、工業生産額、瀬戸内海へ汚濁物を流している量などにより差違がみられる。また、このモデルにより排出負荷取引が行われた場合、単年度でhx^*が行政の得ることになる金額である。たとえば、大阪府の場合は65億円、徳島県では164億円、香川県では60億円、そして愛媛県では537億円と推定される。ただし、表6-1の数値は丸められているため$h \times x^*$の値とhx^*の値は完全には一致していない。参考のために1993年度の各府県の下水道建設費を表6-2に示す。表6-2は、これまでの実績を示したものであり表6-1の右欄は将来の上乗せ額を示している。これによると大阪府では過去に下水道投資が大きく、本計算の上乗せ額は当然のことながら小さいが四国地域では過去の投資が小さいため排出権売買による上乗せ額は大きくなることを示している。

6－5　結　　言

1993年度末の日本の総人口下水道普及率は42%で、瀬戸内海沿岸では大阪府の69%、兵庫県の66%という全国平均を上回る府県から徳島県 9%、香川県21%、愛媛県24%と相当な格差が存在する。社会資本の投入の遅れている日本にとって、下水道域を拡大する施策への優先順位は必ずしも低いとはいえないが、他の施策との競合は常に生じている。下水道要覧によると、直径1.65mの下水道本管を1m敷設するための費用は100万円から120万円を要するとある。さらに、建設費に加えてほぼ同等の管理費が必要となってくる。一方、製造業は６－２節で述べたように汚水処理設備を整備して処理を行っているが、処理能力を上回る一時的な増産や高度処理の費用などの点で、より有利な道があるのであれば下水道での高額料金での処理の契約の取引に応じる可能性がある。

本論文では、この両者の間に下水道利用権という概念を導入することにより、結果として製造業と行政がともに得策であるという排水処理方法があるという理論的な根拠が得られた。６－１節では排出負荷取引制度に関する前提や米国の例やを述べ、６－２節において排出負荷取引モデルについて述べた後、定式化を行っている。６－３節で製造業は生産目標をその生産に伴う汚濁物量に置き換えて戦略とし、行政は下水道利用権量を戦略とした上で、互いの理論的な均衡解を求めた。このモデルの均衡解においては、下水道利用権１単位の価格によって異なる一群の解を示した。６－４節では、この解の中から行政の期待利得を最大にする解を最適解として求めるために、すなわち、行政に排出負荷取引の主導権を与えるという立場から、得られた均衡解に具体的な数値を与え感度分析を行い行政の最適解を得た。さらに、瀬戸内海沿岸の各府県を行政として取り扱った数値解析によると、下水道の普及状況、すなわち建設費の過去の投入姿勢により今後の戦略の差違がみられることがわかった。

以上のように本論文は、日本では未だ一般的でない排出負荷取引による成果を予想したわけであるが、米国では、量は多くはないが排出権市場が出現し企業間で取引が行われたという報告[16]もなされているし、将来は企業が余裕のある内に先行投資によって下水道利

用権あるいは排出権を入手したり、生産効率の高い企業が排出権を買い占めたりする事態も出現するかもしれない。これに対しては排出負荷取引において行政が主導的立場をとる事が必要と考えられる。

本研究は、社会的な制度の実態と離れ、環境負荷低減の能力とその操業水準との差異を複数主体が相互に話し合うという側面の、理論的な考察を行っている。今後、工場排水だけでなく産業廃棄物処理などの分野にも応用できる可能性があり、いわゆる複数の主体の連携の効果と選考を考察する研究の端緒に着いたところであるともいえる。

第7章　結　論

本論文においては、人間集団と自然の関係を①汚染発生源とその受容体への影響、②自然に対して配慮する人間集団の振る舞い、③人間集団と人間集団の相互依存関係の、３つの視点から捉えてシステム論的な研究を行った。

第１章は本研究の目的と歴史的背景を示し研究の意義を明らかにしており、①の視点は第２，３章において②の視点は第４，５章において③の視点は第６章で論じられている。

第１の視点は、人間による汚濁負荷発生とそれを受け取る内海・内湾地域における富栄養化現象を見通すものであって、この現象を水質モデルとして捉え計算機上に再現したものである。すなわち、まだ環境基準を達成していない大阪湾を例として、負荷に対応する水質の発現を表すモデルを構築し、その運用を行い伝達を評価することを目的としている。

第２章では、内海・内湾の富栄養化現象を作用反応モデルとして表しており、大阪湾を例にして２次元で深さ方向が２層の非保存系ボックスモデルとして記述し、湾内の潮汐流や陸域からの汚濁負荷を受けて水質変化を起こす水質汚濁負荷伝播モデルを使って、意思決定支援者の個人的利用に供するコンピュータ上に、水質を再現するインパクト伝達システムを構築し、水質再現性を評価した。

第３章においては、陸域における汚濁負荷発生から海域に流入するまでの汚濁負荷プロセスを大きく点源と面源に分け、流下途中の浄化を考慮に入れて海岸線で流入する汚濁負荷を集計するモデルを提案した。このモデルに基づいて汚濁負荷集計システムを作成し、得られた汚濁負荷量と沿岸の観測値とを比較し、本システムの妥当性を評価した。この汚濁負荷集計システムでは、陸域の市町村の境界を基本に、下水道、河川流域の領域設定を考慮しているが、これには将来の宅地開発、下水道工事の面的な進捗に対応できる形で設計したものである。さらに、西暦 2000 年における陸域からの汚濁流出負荷量の変化および海岸線埋め立てによる潮流の変化などを配慮できるよう、システムに可変性を持たせ状況の改変に対応できるものとした。

第２の視点として、自然と人間集団の関係を社会的な脈絡で解釈し直し、環境問題に対する影響のあり方を定量的に論じている。ここでいう人間集団とは一般住民と行政庁の環境担当をいう。汚染された水環境を改善するための施策として①行政による施策と、②市民に協力を求める施策とに分けて、その数理的なモデル解釈を試み施策効果を評価している。第４章と第５章で、この第２の視点による研究の成果をまとめている。

第４章では、第２章で確立した水質再現モデルを用いて大阪湾の水質を環境庁の設定した環境基準にまで改善するための施策の必要量を検討した。浚渫と覆土という海域に対する改善方法のみでは、明瞭な効果は期待できないが、汚濁負荷削減を併用すれば改善効果が期待できることを示した。また、リンと COD に対して総量規制を行った際、陸域の汚濁負荷の削減がもたらす改善効果を示している。大領域では３割の負荷削減が、また、小領域においては４割強の削減により環境基準が達成できるという予測結果が得られた。さ

らに、西暦 2000 年において環境基準達成に要する負荷削減量の計算を行い、湾内全水域で環境基準を達するためには約２割の負荷削減を要すると推定された。この汚濁負荷削減は、現在進行中の下水道整備などが確実に実施されることにより汚濁負荷が減少することによってはじめて可能となる値である。さらに、陸域の特定の場所の汚濁負荷が海域に与える影響を解析するために、陸域が海に接するボックス（大領域モデルでは８個、小領域で９個）を設定し、これらの各ボックスに流れ込む負荷量を変化させた際、陸域の汚濁物質が海域の水質変化に与える影響を水質伝達係数として求めた。この係数の示すところは、淀川流域、武庫川流域、大和川流域の負荷削減施策を優先することにより、大阪湾の水質改善に大きな効果が現れるということである。つぎに、特定の陸域の負荷が、海域のどの部分に大きな水質伝達係数を示すかをインパクト・マトリクスとして表し、これを基に線形計画法による水質計算方式を提案し、水質再現の厳密計算に較べて簡易な方法でありながら、ある程度の確からしさをもって将来予測も可能であることを明らかにした。

さらに第２の視点から論じた第５章では、貨物輸送がトラックに偏っていることに着目し、環境負荷を削減し得る輸送手段の選択、配分について考察した。貨物輸送が主としてコスト、サービスで選択されるのに対し、次世代のための環境インパクト=非金銭面では、石油消費量と CO_2 排出量をとりあげトラック、海運、鉄道の３輸送形態のバランスを考え、これら輸送形態の分担に伴う環境評価モデルを提案した。このモデルを非線形計画問題として定式化し、瀬戸内海地域に適用した数値解析の結果として次のことが明らかにされた。①阪神－北九州（瀬戸内海沿岸）では海運の比率が下がった分鉄道の分担率が上昇した。このほか②阪神－京浜葉、阪神－東海ではトラックの比率が下がり海運と鉄道の分担率が上がるが、③阪神－西北海道でも海運の独占状態が若干トラックに移動するという結果が得られ、総じて現行より輸送形態別のバランスのよい分担率が得られた。この結果、得られた分担率の下で環境への負荷として CO_2 が約２割減少するのに加えてトラック走行により誘発される道路面負荷として COD 負荷が約１割強削減されるという効果も定量的に示された。

第３の視点は、汚濁負荷を発生する製造業と行政庁の環境担当という２種類の人間集団に焦点を当てて、その間の交渉、協力、非協力などの関係について考察したものであり、第６章がこれにあたる。すなわち、互いに相手の戦略に対応して自己の利益を計るという行動のやりとりを記述するためにゲームの理論を応用している。排出基準の見直しが検討されている今日、製造業が生産による排水処理を自前で行う場合には、処理設備に対する大きい投資が必要となる。そこで、工場排水を自社処理せず一定の料金のもとで公共下水道に処理を依頼こともでき、それぞれ優劣に合わせた選択問題が考察対象となる。これを仮に下水道利用権問題と名付け、地方行政機関との下水道利用権の価格交渉により排水処理に対する意思決定を行うという排出負荷取引モデルを提案した。地方行政機関は下水道利用権を販売した資金で下水道普及のための設備投資等をさらに押し進め、全体として汚濁負荷を削減しようという方向を示すものである。このモデルを定式化し、問題を理論的に解析して得られた均衡解から、排出負荷１単位の価格によって異なる一群の解があるこ

とが示された。この解の中から行政の期待利得を最大にする均衡解に関して感度分析を行い、行政機関有利となる最適解を得た。この解析結果を用いて、瀬戸内海沿岸の各府県をモデルの主体として扱って行った数値解析により、行政機関の得る利益が算定され、利益は下水道の普及状況、すなわち過去の建設費の投入合計により反比例の方向で影響を受けることが判明した。たとえば年間に再投資に用することのできる下水道利用権の収入は大阪府、岡山県では意外に小さく、下水道整備が進行中の奈良県、兵庫県では顕著に大きいという結果が得られ、下水道普及の過去の実績により相当の差が生じることが示された。

第6章の研究により二者の非ゼロ和型の状況の下での排出負荷取引の理論的裏付けが明確となり、具体的な施策に結びつける論理が得られた。

総じて、本研究では、人間活動を環境保全の視点から誘導して行こうという立場をとっていて、活動と環境質との間の因果関係のモデル化と、人間集団の複数の主体の間での行動の協力のモデル化を試みていて、内海・内湾地域の水環境の特性を反映したモデルを作成し運用、評価を行った。論理的なフレームの構築がまず課題であり、全体構成を示すことに優先順位をおいたため、個々のモデルの細部の設計にはさらに検討すべき点が残されてはいるが、内海・内湾地域の環境を扱うシステム論の方式、技法をおおむね明らかにした。

参 考 文 献

第１章　緒論

1)Goodie,A.：*The HumanImpact, Man's Role in Environmental Change*,Oxford.pp.41-45,1981.

2)河合信和：400 万年の人類史　-ヒトはいかにして地球の主になったか -,光文社, pp.242,1981

3)Young,T.C.：*Pollution begins in Prehistory*. In Levine L.D.(ed)：*Man is Nature*, Tronto,pp.9-26,1975.

4)Whyte：*Evolution of land use in South Western Asia*. IN L.D.(ed)：*A History of Land Use in Arid Region*. UNESCO,pp.68-74, 1961.

5)梅原　猛：「森の思想」が人類を救う，小学館,pp.170-179,1995.

6)Oakley,kk.p.,：*The earliest Fire-makers. Antiquity*.Vol.30,1956; Oakley,K.P.,*Fire as Paleolithic Tool and Weapon*.,Prehistoric Society,No.4, pp.36-48,1995.

7)Simons,I.G.：*Changing the Face of the Earth.,Culture, Environment, History*. Oxford.pp.82-83,1989.

8)内藤正明：地球環境問題が求める社会変革,ｼｽﾃﾑ/制御/情報,Vol.40,No.3,pp.1-8,1996.

9)メドウズ,D.H.他：成長の限界,ダイヤモンド社,1983.

10)オルトマンズ,ウィレム L.：明日の地球世代のために,日賀出版社,1973.

11)デービス,M.D.：ゲームの理論入門,講談社,1994.

12)三根　久編：現代応用数学講座４,見市　晃：閉鎖性海域の水質管理システム,コロナ社,pp,110-135,1994.

13)平野俊行編：沿岸域保全のための海の環境科学,恒星社厚生閣,1983.

14)平野木,斉藤,小菅：海洋技術者のための流水学,東海大学出版会,1992.

15)森田恒幸他：環境政策の経済への影響,環境情報科学,23-4,pp.20-27,1994.

16)井村秀文他：環境保全対策における経済的手法,環境情報科学,23-4,pp.7-19,1994.

17)國松孝男,村岡浩爾：河川汚濁のモデル解析,技報堂出版,1989.

18)伊理正夫：線形計画法,共立出版,1983.

19)増井,百合本：OR による生産流通システムの設計,槙書店,1988.

20)今野,山下：非線形計画法,日科技連,1990.

21)Kreps,David.M.:*Game Theory and Economic Modelling*,Oxford at the Clarendon Press,1990.

22)Gramlich,E.M.:*Benefit-Cost Analysis of Government Programs*,Prentice-Hall,1981.

23)GUerrier,Y.et.al.,:*Values and the Environment*,John Wiley & Sons,1995.

24)西田俊夫：ゲームの理論，日科技連,1992.

第２章　内海・内湾における環境負荷の伝播モデル

1) Morioka,T.,Kido,Y.,Miichi,A.,Nakadan,M.,:*Personal Computer System Supporting Water Quality Management in Eutrophicated Bay*, Marine Pollution Bulletin,Vol.23
EMECS'90. pp.557-561,1990.

2)堀江毅他：海域における物質循環数値モデルの水質支配要因について、湾技術研究所報告,Vol.22,no3,p159～205,1983.

3)中段満,見市晃、佐々木孝史：大阪湾水質汚濁機構の解明と水質評価に関する研究１、OR 学会秋季研究発表会、p.195-196、1989

4)見市晃,佐々木孝史：大阪湾水質汚濁機構の解明と水質評価に関する研究 2、OR 学秋季研究発表会、p.90-91、1990.

5) 盛岡,見市他：神戸海域の水質汚濁機構の解明に係る調査研究,水質汚濁機構研究会昭和 63 年度報告書,水質汚濁機構研究会,1988.

6) Canale,R.P.,Chapra,S.C.: *Personal Computer and Environmental Engineering Pert 1.- Trends and perspective-*,Env.Science & Tech.,Vol.21(9),pp.832-837,1987.

7) Canale,R.P.,Chapra,S.C.: *Personal Computer and Environmental Engineering Pert 2.- Applications-*,Env.Science & Tech.,Vol.21(10),pp.936-942,1987.

8)冨永政英:海洋波動,共立出版,1976.

9)高野暲：流体力学２　基礎工学 16,岩波書店,1973.

10)金子安雄,堀江　毅,村上和男：ADI 法による潮流汚染拡散の数値計算－大阪湾に適用した場合につい－,港湾技術研究所報告,Vol.14(1),1975.

11)金子安雄,堀江　毅,村上和男：大阪湾の潮流と物質拡散に関する模型実験(第 2 報)、港湾技術研究所報告,Vol.15(2),1976.

12)堀江毅,金子安雄,村上和男,細川恭史,亀山豊：潮流計算における境界等の取り扱い－特に ADI 法による検討－港湾技術報告,Vol6(2),1976.

13)城　久：大阪湾における富栄養化の構造と富栄養化が漁業生産におよぼす影響について、大阪府水産試験場研究報告,第 7 号,1986.

14)堀江毅：内湾域における水質分布とその予測－大阪湾を事例として－,昭和 60 年度港湾技術研究所講演会講演集,p.59-118、1985.

15)堀江毅、細川恭史：海域における物質循環数値モデルの水質支配要因について,港湾技術報告書 22,Vol.3,pp.129-205,1983.

16)村岡浩爾他:ボックスモデルを用いた水質予測方式に関する研究,土木学会論文報告集,vol336,pp85-94,1983.

17) Walsh,J.J.:*A spatial simulation model of Peru upwelling ecosystem*,Deep-Sea Research and Oceanographic Abstracts,Vol.22,pp.201-236,1976.

18) O'brien,J.J.,et al.,:*A simulation of mescal distribution of the lower marine tropic levels of West Florida*:Inv Pesq.Vol.37,pp.193-244,1973.

19) Landry,M.R.:*The structure of marine ecosystem; An alternative*:Marine BIology,Vol.35,pp.1-7,1976.
20)三根　久編：現代応用数学講座４,見市　晃：閉鎖性海域の水質管理システム,コロナ社,pp,110-135,1994.
21)その他参照した資料など
a)運輸省第三港湾建設局編：水質改善予測調査，1982.
b)環境庁水質保全局,水質汚濁シミュレーション調査(東京湾)、1982.
c)環境庁水質保全局,東京湾水域環境予測報告書 1988.
d)環境庁：平成元年度東京湾水質予測モデル検討確率調査報告書,1990
e)関西国際空港(株)：関西国際空港建設に係る環境影響評価報告書,1986
f)兵庫県：尼崎西宮芦屋港（尼崎港区）公有水面埋め立てに係る環境影響評価準備書,1986
g) 大阪府：大阪湾表層・中層の水質調査,1983-1987.
h) 神戸市：環境水質,1983-1987.
i)環境庁：水質総量規制促進検討調査,1985.

第３章　陸域における汚濁負荷量集計システムの構築と集計結果の評価

1)環境庁水質保全局 監修:水質汚濁防止法の解説,中央法規出版,1988.
2)宮本忠,他：現代の公害と法規制 ―水質汚濁問題を中心にして―,高文堂出版社,1983.
3)建設省下水道法令研究会編：下水道法,ぎょうせい,1992.
4)厚生省生活衛生局水道環境部計画課編：廃棄物六法,中央法規出版,1994.
5)環境庁規格調整局 編著：環境基本法の解説,大蔵省印刷局,1994.
6)中島,加納,小島,金子：水環境工学の基礎,森北出版,1994.
7)NHK 取材班,真柄 泰基：飲み水が危ない,角川書店,1992.
8)宇井 純：NHK 人間大学 日本の水を考える,日本放送出版協会,1994.
9)稲葉 紀久雄：下水道と環境,朝日新聞社,1986.
10)國松孝男,村岡浩爾：河川汚濁のモデル解析,技報堂出版,1989.
11)宗宮功編著：自然の浄化機構,技報道出版,1990.
12)Fernandez,a.l.:*Pollutant Load-Recepter Relationships;Approaches and Applications*,Ph.D.dissertation,Osaka.Univ.1990.
13)Costa,L.A. and Glatzel,K.A.:*Simuklating Non-point Source Runoff to Coastal Water*,Proc.Coastal Zone '87,Vol.12(2),pp.245-252,1976.
14)Woltering,D.M.,et al.:*The Environmental Fate and Effects of Detergents*,Tenside Surfactants,Vol.24(5),pp.286-295,1987 .
15)Haimes,Y.T. and Hall,W.A.:*Multiobjectives in Water Resources Systems Analysis ; The Surrogate Worth Trade-off Method*,Water Resources Research,Vol.10(4), pp.615-624,1974.

16)Lohani,B.N. and Todino,G,:*Water Quality Index for Chao Phraya River*,J. Environ. Div.(ASCE).Vol.10(6).pp.1163-1176,1984.
17)Officer,C.B.,et al.,:*Secondary sewage treatment versus ocean outfalls;An assessment*,Science,Vol.197,pp.1056-1060,1977.
18)土木学会：水理公式集,1985.
19)盛岡、見市他：神戸港海域を対象とした水質管理計画支援パイロットシステム構築に係わる調査研究,水質汚濁機構研究会,1989.
20)見市晃：汚濁負荷集計システムの構築－大阪湾水質管理計画のサブシステムとして－,追手門経済・経営研究,No.3,pp.31-44,1996.
21)伊藤知美他：地域間物流に伴うエネルギー消費量及び CO_2 排出量の評価に関する研究,環境システム研究,Vol.22,pp.352-358,1994
22)中西弘：水域の富栄養化にかかる流入負荷とその制御,瀬戸内海科学,Vol.1,No.3,pp.31-43,1990.
23)和田,三浦:都市路面堆積負荷流出とモデル化,第 11 回環境問題ｼﾝﾎﾟｼﾞｳﾑ,pp.39-44,1983.
24)和田,三浦：都市域の雨水流出抑制と浸透能の評価, 第 14 回環境問題ｼﾝﾎﾟｼﾞｳﾑ,pp.7-12,1986.
25)和田ら:都市域における複数の雨水浸透型施設における流出抑制のｼﾐｭﾚｰｼｮﾝ予測とその評価,衛生工学研究論文集,Vol.26,pp.91-96,1990.
26)河　成龍：都市非点源汚濁負荷の流出機構に関する研究,大阪大学学位論文,1989.
27)参考にした資料など
a)運輸省第三港湾建設局：大阪湾河川流出堆積機構等調査,1983.
b)大阪湾広域臨海環境整備センター：昭和 60 年度広域処理場整備事業海域現況調査,1985.
c)関西国際空港株式会社:大阪湾及びその周辺海域に流入する汚濁負荷量調査,1985.
d)日本下水道協会：流域別下水道整備総合計画調査,昭和 55 年度.
e)大阪府：大阪湾への水質汚濁流出負荷量と水質予測調査,昭和 55 年度.
f)環境庁：瀬戸内海栄養塩類総合管理モデル作成調査,昭和 58 年度.
g)神戸市環境局：富栄養化モデル諸係数決定調査,昭和 62 年度事業報告書.
h)大阪府土木部港湾課：水質汚濁負荷量調査報告書,1984.
i)運輸省大３港湾建設局：水質改善予測調査,昭和 55 年度.
j)神戸市：神戸海域水質改善調査,昭和 57、58 年度.
k)大阪湾海水汚濁対策協議会：大阪湾環境水質,1987.
l)大阪府土木部港湾課：水質汚濁負荷量調査報告書,1984.

第４章　内海・内湾の水質改善施策の効果と評価

1)盛岡、見市他：神戸海域の水質汚濁機構の解明に係わる調査研究,水質汚濁機構研究会

昭和６２年度報告書,水質汚濁機構研究会,1987.
2)盛岡,見市他：神戸港海域を対象とした水質管理計画支援パイロットシステム構築に係わる調査研究 昭和６３年度報告書,水質汚濁機構研究会,1988.
3)塩野　宏：六法全書１平成８年版,有斐閣,1996
4)中段,見市他：大阪湾の水質汚濁機構の解明と水質評価に関する研究Ⅰ,ＯＲ学会春季研究発表会,pp.195-196,1989.
5)見市,佐々木他：大阪湾の水質汚濁機構の解明と水質評価に関する研究Ⅱ,ＯＲ学会秋季研究発表会,pp.90-91,1990.
6) Morioka,T.,Miichi,A.,Kido,Y.: Personal Computer System Supporting Water Quality Management in Eutrophicated Bay, EMECS'90 pp261,1990.
7)見市,佐々木他：：大阪湾の水質汚濁機構の解明と水質評価に関する研究Ⅲ,ＯＲ学会春季研究発表会,pp236-237,1991.
8) Miich,A.Sasaki,K.Mine,H.,: Simulation Model for Water Quality Management in Enclosed Sea. APORS'91,pp.192-198,1991.
9)見市,竹田他：大阪湾の水質汚濁機構の解明と水質評価に関する研究Ⅳ,ＯＲ学会春季研究発表会,pp.218-219,1991.236-237,1992.
10)三根　久：オペレーションズ・リサーチ上,朝倉書店,1974.
11)華山　謙：環境政策を考える,岩波新書,pp.133-148,1978.
12)中西準子：水の環境戦略,岩波新書,pp.61-79,1994.
13)金本良嗣：環境の経済価値,環境情報科学,Vol.13,No.2,1984.
14)澤井安男編：分権化時代の地球環境政策;山本,菅原：環境基本条例と環境基本計画,ぎょうせい,pp.58-64,1994.
15)Hartwick,J.M.et al.,：*The Economics of Natural Resource Use*,Haper and Low,1986.
16)華山　謙他：東京湾環境の総合管理-費用便益分析の試み-,公害研 究,Vol.14,No.4,1985.
17)内藤正明：総量規制と環境容量に関するシステム的考察,公害と対策,Vol.11,No.6,pp.41-49,1975
18)参考にした資料など
a) 水質汚濁負荷量調査報告書,大阪府土木部港湾課,昭和 59 年３月
b) 水質改善予測調査,運輸省大３港湾建設局,昭和 55 年度
c) 神戸海域水質改善調査,神戸市,昭和 57,58 年度
d) 瀬戸内海栄養塩類総合管理モデル作成調査,環境庁,昭和 58 年度
e) 昭和 60 年度広域処理場整備事業海域現況調査,大阪湾広域臨海環境整備センター,1985
f) 昭和 62 年度事業概要,神戸市港湾局,1987.
g) 大阪湾環境水質,昭和 61 年大阪湾海水汚濁対策協議会,1987.
h) 水質汚濁負荷量調査報告書,大阪府土木部港湾課,昭和 59 年３月
i) 富栄養化モデル諸係数決定調査,神戸市環境局昭和 62 年度事業報告書,1988
j) 土木学会：水理公式集,社団法人 土木学会,1985.

k) 流域別下水道整備総合計画調査,日本下水道協会,昭和 55 年度
l) 大阪湾への水質汚濁流出負荷量と水質予測調査,大阪府,昭和 55 年度
m) 大阪湾およびその周辺海域に流入する汚染負荷量調査報告書,運輸省第三港湾建設局,昭和 55 年度
n) 大阪湾及びその周辺海域に流入する汚濁負荷量調査,関西国際空港株式会社，財団法人関西産業公害防止センター,昭和 60 年度
o) 下水道統計,日本下水道協会　昭和 61 年度より各年度
p) 下水道年鑑,水道産業新聞社　1990 年より各年
q) 全国公共用水域水質年鑑,1986
r) 兵庫県工業統計調査結果表,兵庫県,昭和 62 年度
s) 兵庫県統計書,兵庫県統計協会,昭和 63 年度
t) 水質汚濁負荷量調査報告書,大阪府土木部港湾課,昭和 59 年３月

第５章　貨物輸送形態の選択による陸域での負荷と水域での負荷の競合とその評価

1)鹿島　茂：物流の高度化について,交通工学,Vol.25,No.5,pp.67-74,1990
2)加藤隆二：運輸統計に見る輸送特性の変化,交通工学,Vol.25,No.5,pp.22-32,1990
3)見市　晃他：非線形計画法を用いたモーダルシフトによる環境改善の一考察,環境システム研究,Vol.23,pp.99-104,1995
4)市来清也：自動車の流通と海上輸送の動向,流通問題建久,No.23,pp1-38,1994
5)山野邊義方：鉄道貨物の動向と課題,流通問題研究,No.23,pp.39-55,1994
6)国領英雄：海上輸送誘導のための一つの試算]海事交通研究,43 集,pp27-53,1994.
7)国領英雄：物流政策のなかの内航海運]海事交通研究,38 集,pp.3-24,1991
8)中島基員：内航海運の現状と課題,運輸と経済,Vol.53,No.11,pp.66-79,1993
9)伊藤直彦：日本の鉄道コンテナ輸送(上),運輸と経済,Vol.50,No.8,pp.34-43,1990
10)伊藤直彦：日本の鉄道コンテナ輸送(下),運輸と経済,Vol.50,No.9,pp.45-64,1990
11)伊藤直彦：鉄道貨物輸送に関する一考察,運輸と経済,Vol.53,No.6,1993
12)谷利　亨：モーダルシフトの検証,交通学研究,Vol,1991,pp.111-126,1992
13)手塚哲央：貨物輸送におけるモーダルシフトによる省エネルギー効果の分析,エネルギー・資源,Vol14,No.6,pp.582-588,1993.
14)Newstrand,N. W.：*Environmental Impacts of a Modal Shift*,Transportation Res. Rec.,No.1333, pp.9-12, 1992
15)岡田　清：環境に配慮した２１世紀の交通体系のあり方,自動車工業,Vol.25,No.11,pp.2-7,1995
16)三木楯彦他：モーダルシフトの数理計画モデル,日本航海学会,No90.pp.131-136,1993
17)松本昌二：物資輸送への非集計モデルの適用性,土木学会論文集,No.353/Ⅳ-2,　pp.43-59,1995.

18)寺西俊一：地球環境問題の政治経済学,東洋経済新報社 ,pp.177-214, 1992.
19)松原　望,森田恒幸：講座 地球環境３ 地球環境の経済,中央法規 pp.75-98, 1990.
20)伊藤知美他：地域間物流に伴うエネルギー消費量及び CO_2 排出量の評価に関する研究,環境システム研究, Vol.22, pp.352-358 ,1994
21)伊藤,井村；地域間物流に伴うエネルギー消費量及び CO2 排出量の評価に関する研究,環境システム研究,vol22, pp352-358, 1994
22)中山弘隆：あれもこれもよくしたい多目的計画法,オペレーションズ・リサーチ,Vol.41, No.6, pp.343-348, 1996.
23)田中寛：水資源問題における多目的調整, 大阪大学修士論文,(環境工学専攻),1988.
24)中西弘：水域の富栄養化にかかる流入負荷とその制御,瀬戸内海科学,Vol.1,No.3, pp.31-43,1990.
25)和田,三浦：都市路面堆積負荷流出とモデル化,第 11 回環境問題ｼﾝﾎﾟｼﾞｳﾑ,pp.39-44,1983.
26)和田,三浦：都市域の雨水流出抑制と浸透能の評価, 第 14 回環境問題ｼﾝﾎﾟｼﾞｳﾑ, pp.7-12,1986.
27)和田ら：都市域における複数の雨水浸透型施設における流出抑制のｼﾐｭﾚｰｼｮﾝ予測とその評価,衛生工学研究論文集,Vol.26,pp.91-96,1990.
28)國松孝男,村岡浩爾：河川汚濁のモデル解析,技報堂出版,1989.
29)その他参照した資料
a)運輸経済研究センター編；環境保全に資する幹線物流体系のモーダルシフトのあり方に関する調査研究報告書,運輸経済研究センター,1990.
b)運輸経済研究センター編；環境と運輸・交通,運輸経済研究ｾﾝﾀｰ,1994.
c)運輸省運輸政策局情報管理部編；平成 6 年版 運輸関係エネルギー要覧,大蔵省印刷局,1994.
d)日本開発銀行編；調査,第 189 号,日本開発銀行,1994.
e)日本開発銀行編調査, 第 123 号, 日本開発銀行,1988
f)建設省道路局監修；道路統計年報 1994, 全国道路利用者会議, 1995
g)通商産業省編；平成４年版 通商白書 (総論,各論),大蔵省印刷局,1992
h)環境庁編；平成７年版 環境白書 (総論,各論),大蔵省印刷局,1995
h)運輸省編；平成４年版 運輸白書,大蔵省印刷局,1992

第６章　排出負荷取引による環境負荷の合理的削減に関するゲーム論的アプローチ

1)宮本 忠 ,立石 雅彦：現代の公害と法規制 －水質汚濁問題を中心にして－,高文堂出版社,1983.
2)環境庁水質保全局 監修：水質汚濁防止法の解説,中央法規出版,1988.
3)建設省下水道法令研究会 編日本下水道協会：下水道法,ぎょうせい,1992.
4)厚生省生活衛生局水道環境部計画課 編：廃棄物六法,中央法規出版,1994.

5)環境庁規格調整局 編：環境基本法の解説,大蔵省印刷局,1994.
6)宇井純：NHK 人間大学 日本の水を考える,日本放送出版協会, 1994.
7)湊 秀雄他：地球人の環境,東京大学出版会,1993
8)細田 衛士：排出権売買の経済的基礎,環境研究,pp.63-71,No.97,1995
9)仲上健一：環境経済システム論,実教出版,1991.
10)森下 研編著：企業の環境対策,日本経営協会総研,1992.
11)大木 英男：企業の環境対応の考え方と実践,ダイヤモンド社,1992.
12)宮崎 修行：エコロジカル・アカウンティング,中央経済社,1994
13)Alexandra Teitz, : *Assessing Point Source Discharge Permit Trading: Case Study in Controlling Selenium Discharges to the San Francisco Bay Estury*, Ecology Law Quarterly:,vol.21,No.79, pp.79-162,1994.
14)Robert W.Hohn & Gordon L.Hester : *Marketable Permits: Lessons for Theory and Practice*,Ecology Law Quarterly: Vol.16,No.36, pp361-406,1989.
15)Robert W.Hahn & Gordon L.Hester : *Where Did All the Markets Go? An Analysis of EPA's Emission Trading Program*,The Yale Journal Regulation: vol.6,No.109,pp.109-153,1989.
16)倉阪 秀史：アメリカにおける水質保全のための排出権売買の実際,資源環境対策, Vol.31,NO.11, pp935-939,1995.
17)澤井 安男編：分権化時代の地域環境政策,渕上俊則著：地域環境施策に対する地方財政措置の概要,pp.325-338,ぎょうせい,1994.
18)寄本 勝美編：地球環境時代の市民、企業そして行政,遠藤久夫:環境制約の変化と企業の対応,pp.73-87,ぎょうせい,1994.
19)末石富太郎他著：環境計画論,森北出版,1993.
20)Brown,G.M.et.al., : *Pollution Controll by Effluent Charges: It works in the Federal Republic of Germany, Why Not in the U.S.*,Natural Resources J.,Vil.24,pp.929-966,1984.
21)岡田 憲夫,M.M.Kilgour：水資源配分問題のコンフリクト分析 -環境負荷量配分のゲーム 論的アプローチー,地域学研究, Vol.18, pp.113-124,1988.
22)盛岡通,内海秀樹：コンフリクト解析に基づく地球温暖化防止行動の評価に関する研究,土木学会論文集, No.515/2, pp13-22,1995.
23)Ichiishi,Tatsuro : *Game Theory for Economic Abalysis*,Academic Press,1983.
24)Moulin Herve' : *Game Theoy for The Social Sciences*,New York University Press,1986.
25)Myerson,Roger B. : *Game Theory -Analysis of Conflict-*,Harvard University Press,1991.
26)Ptrosjan,Leon A. : *Game THory -Series on Optimization vol.3*,World Scientific,1996.
27)Jones,S.A. : *Game-Theoretic Framework for Risk Reduction*,Environmental Science & Thchnology Decisions,Vol.30,No.3,pp.128-132,1996.

28)西田 俊夫：ゲームの理論,日科技連, 1992..
29)鈴木 光男：ゲーム理論入門,共立出版, 1994.
30)その他参照した資料など
a)塩野　宏他編：六法全書 平成八年版,有斐閣,1996.
b)建設省都市局下水道部編：流域別下水道整備総合計画調査 第六版,日本下水道協会,1993.
c)通産省大臣官房調査統計局：工業統計 用地・用水編,大蔵省印刷局,各年度版.
d)日本下水道協会編：下水道統計 財政編,日本下水道協会,各年度版.

謝　辞

本論文は主として関西大学工学部管理工学科における研究をまとめたものであります。大阪大学へ派遣された研究生の私を水質汚濁機構研究会に加え下さった時から本研究が始まりました。以来、ご懇切なる御指導を賜りました大阪大学工学部環境工学科盛岡　通教授に謹んで深甚なる謝意を表します。研究の取り組み方の違いから戸惑いつつも、ここまで辿り着けたのは辛抱強く研究の方向と適切な位置づけ示して下さった先生のお陰です。主査として論文執筆のご指導を頂きました重ねて御礼申し上げます。

本論文をまとめるにあたり副査として環境工学のシステム的な捉え方を御指導頂きました環境工学科の笹田剛史教授に厚く御礼を申し上げます。また、環境流体工学の立場から丁寧なご指導を頂戴いたしました副査の環境工学科山口克人教授に深く御礼を申し上げます。同じく副査として、工学研究科応用物理専攻の石井博昭教授には数理モデルの適用と評価に関して、貴重な時間を割いて教授賜りましたことに対して厚くお礼申し上げます。

10年前、研究生として快く受け入れて下さり、御指導下さいました環境工学科の教授で現県立滋賀大学教授の末石富太郎先生に深謝申し上げます。また、サバティカルの願いを叶え末石教授をご紹介下さったのが関西大学工学部の教授であった三根　久先生です。関西大学在任中だけでなくご退職後も研究に関するご指導を下さいました。ここに深く御礼申し上げたいと存じます。

本研究のきっかけとなった当時の第六講座水質汚濁機構研究会は、座長の盛岡　通先生を始め、博士課程前後期の学生として東海明宏氏、李　適宇氏、河　成龍氏、Frernandez, A. L. 氏、城戸由能氏らがおられ、研究生仲間として天野　智順氏と橋本　郁男氏を加えて構成され、深夜まで議論を重ねたり合宿勉強会を行うなど貴重な助言が多く得られました。今は各地でご活躍の方々です。このとき知り合えた秋岡敬三氏、児島　猛氏ほか神戸市環境局水質保全課の方々には卓越したご意見や研究のご支援を頂きました感謝申し上げます。

ゲーム理論などのご指導を頂いた関西大学工学部管理工学科中井暉久教授並びに、計算機ｼﾐｭﾚｰｼｮﾝの勉強会を作りご指導を下さいました関西大学工学部物理教室の佐々木　孝史助教授に感謝申し上げます。さらに、関西大学工学部管理工学科ＯＲ研究室の赤潮班として一緒に研究をした院生と学部生諸君に、楽しかった思い出と共にお礼を申し上げたいと思います。追手門学院大学では福田　得夫教授、真庭　功助教授ならびに野呂香代子講師にご協力を仰ぎました。ここまで支えてくれた、家族にも感謝の意を表したいと思います。ありがとうございました。

付　　録

付録Ⅰ　第２章 ――――――――――――――――――――――― １３２
付録Ⅱ　第３章 ――――――――――――――――――――――― １３７

付録Ⅰ　　第２章

p. 18

付表２－１ 大領域ボックスの隣接ボックスとの接触面積

隣接ﾎﾞｯｸ番号	隣接面積ｋ㎡ 上層	隣接面積ｋ㎡ 下層	隣接ﾎﾞｯｸ番号	隣接面積ｋ㎡ 上層	隣接面積ｋ㎡ 下層
1～2	0.0390	0.0048	6～7	0.1000	0.1092
1～4	0.0300	0.0140	6～9	0.1200	0.1024
1～5	0.0200	0.0040	7～8	0.1000	0.3814
2～3	0.0400	0.0110	7～10	0.0800	0.1787
2～4	0.1100	0.0351	8～10	0.0500	0.1828
3～6	0.1000	0.0478	8～11	0.0900	0.4113
3～9	0.0970	0.0223	8～12	0.0400	0.1220
4～5	0.0800	0.0614	9～10	0.1460	0.1005
4～6	0.1300	0.1107	10～11	0.2100	0.3425
5～7	0.0800	0.1338	11～13	0.1000	0.3036
5～8	0.0600	0.0782			

付表 2-2　大領域ボックスの重心間距離

隣接ﾎﾞｯｸｽ番号	重心距離 上層 km	下層の重心深さの差 m	重心距離 下層 km
1 ～ 2	12.58	0.80	12.58
1 ～ 4	6.93	2.35	6.93
1 ～ 5	9.61	2.90	9.61
2 ～ 3	14.08	0.90	14.08
2 ～ 4	7.82	3.15	7.82
3 ～ 6	8.05	3.00	8.05
3 ～ 9	14.75	1.60	14.75
4 ～ 5	11.74	0.55	11.74
4 ～ 6	10.28	0.75	10.28
5 ～ 7	8.27	9.80	8.27
5 ～ 8	12.18	14.20	12.18
6 ～ 7	10.95	9.60	10.95
6 ～ 9	11.62	1.40	11.62
7 ～ 8	11.62	4.40	11.62
7 ～ 10	13.97	4.80	13.97
8 ～ 10	19.22	9.20	19.22
8 ～ 11	19.56	0.85	19.56
8 ～ D	20.00		20.00
9 ～ 10	11.18	6.20	11.18
10 ～11	14.42	10.05	14.42
11 ～ D	20.00		20.00

註 1;重心間距離（下層）
　＝SQRT ((重心距離(上層))^2+(重心深さの差)^2)
註 2;ﾎﾞｯｸｽ番号のＤはﾀﾞﾐｰﾎﾞｯｸｽを示す

付表 2-3　大領域ボックスの上・下層重心間距離

ボックス番号	下層の重心間距離 m
1	5.80
2	5.00
3	5.90
4	8.15
5	8.70
6	8.90
7	18.50
8	22.90
9	7.50
10	13.70
11	23.75

註;上・下層の重心間距離
　=ﾎﾞｯｸｽの平均深さ÷2

付表２－４　小領域ボックスの隣接ボックスとの接触面積

隣接のボックス番号	隣接面積(km²) 上　層	下　層
1-1～1-2	0.0022	0.0013
1-1～4-7	0.0040	0.0023
1-2～2-3	0.0052	0.0045
1-2～4-8	0.0040	0.0035
1-3～2-4	0.0180	0.0053
1-3～4-9	0.0081	0.0069
2-4～2-5	0.0060	0.0009
2-4～4-10	0.0160	0.0208
2-5～2-6	0.0230	0.0035
2-5～4-10	0.0150	0.0023
2-6～4-14	0.0240	0.0136
2-6～D-19	0.0176	0.0100
4-8～4-9	0.0130	0.0205
4-8～4-13	0.0200	0.0315
4-9～4-10	0.0150	0.0168
4-9～4-14	0.0200	0.0333
4-10～4-14	0.0120	0.0134
4-13～4-14	0.0288	0.0539
4-13～D-17	0.0360	0.0845
4-14～D-18	0.0160	0.0299
5-7～4-8	0.0070	0.0103
5-7～5-12	0.0250	0.0368
5-12～4-13	0.0240	0.0563
5-12～D-16	0.0320	0.0817
8-11～5-12	0.0230	0.0870
8-11～D-15	0.0584	0.1601

付表２－５　小領域ボックスの隣接ボックスとの重心距離

ボックス番号	重心間距離 上層 km	重心深さの差 m	重心間距離 上層 km
1-1～1-2	4.30	0.64	4.30
1-1～5-7	3.00	1.67	3.00
1-2～1-3	5.45	0.30	5.45
1-2～4-8	3.10	1.33	3.10
1-3～2-4	3.75	0.98	3.75
1-3～4-9	3.85	1.69	3.85
2-4～2-5	5.90	0.38	5.90
2-4～4-10	4.30	1.51	4.30
2-5～2-6	5.40	0.83	5.40
2-5～4-10	4.75	1.89	4.75
2-6～4-14	6.20	2.56	6.20
2-6～D-19	6.00	0.88	6.00
4-8～4-9	5.00	6.00	5.00
4-8～4-13	4.55	1.50	4.55
4-9～4-10	3.95	1.16	3.95
4-9～4-14	5.35	0.34	5.35
4-10～4-14	5.10	1.50	5.10
4-12～4-13	7.15	0.32	7.15
4-12～D-16	6.00	9.50	6.00
4-13～D-14	6.50	1.10	6.50
4-13～D-17	6.00	0.28	6.00
4-14～D-17	6.00	1.32	6.00
5-7～4-8	4.85	0.30	4.85
5-7～5-12	4.00	2.12	4.00
8-11～5-12	6.25	3.90	6.25
8-11～D-15	5.10	10.00	5.10

註１:重心距離(下層)=SQRT ((重心距離)^2
＋(重心深さの差)^2))
註２;ボックス番号中のＤはダミーボクスを示

付表２－６　小領域ボックスの平均深さと上下層重心間距離

ボックス番号	平均深さ m	上下層 m 重心間距離	ボックス番号	平均深さ m	上下層 m 重心間距離
1-1	10.42	5.21	5-7	13.75	6.88
1-2	11.70	5.85	5-12	18.00	9.00
1-3	11.09	5.55	8-11	25.80	12.90
2-4	9.14	4.57	D-15	45.80	22.90
2-5	8.38	9.19	D-16	37.00	18.50
2-6	10.04	5.02	D-17	17.80	8.90
4-8	14.36	7.18	D-18	17.80	8.90
4-9	14.48	7.24	D-19	11.80	5.90
4-10	12.14	6.08			
4-13	17.36	8.68			
4-14	15.16	7.58			

註1;上下層の重心間距離＝ボックスの平均深さ÷２
註2;ボックス番号中のＤはダミーボックスを示す

付表２－７
大領域ボックスの観測値点名

ﾎﾞｯｸｽ番号	地点名称
1	葺合港摩耶大橋
	六甲ｱｲﾗﾝﾄﾞ東ﾌｪﾘｰ埠頭
	神戸港東神戸大橋
	ﾎﾟｰﾄｱｲﾗﾝﾄﾞ東中埠頭東
	神戸港西兵庫第２突提南
2	Ｃ－３
	西宮市沖１
3	Ｃ－４
	Ｃ－５
4	西宮市沖２
	神戸市東部沖１
	神戸市東部沖２
	神戸市東部沖３
	六甲ｱｲﾗﾝﾄﾞ南沖合
5	神戸市中部沖
	ﾎﾟｰﾄｱｲﾗﾝﾄﾞ南船舶給油施設
6	Ｂ－３
	Ｂ－４
	Ａ－２
7	神戸市東部沖４
8	神戸市西部沖１
	神戸市西部沖２
9	Ａ－６
	Ｂ－５
	Ａ－３
１０	Ａ－１１
	Ａ－１０
	Ａ－７

註;ボックス11の水質観測地点は
洲本港内にあり、水質観測値は
洲本川の値を示しているので
割愛している

付表２－８
小領域ボックスの観測値点名

ﾎﾞｯｸｽ番号	地点名称
１－　１	葺合港摩耶大橋
	神戸港東神戸大橋
	神戸港西兵庫第２突提南
１－　２	石屋川河口南
	六甲大橋
	ﾎﾟｰﾄｱｲﾗﾝﾄﾞ東中埠頭東
	第４突提南
１－　３	深江ﾌｪﾘｰ
	東部市場西
	六甲ｱｲﾗﾝﾄﾞ東ﾌｪﾘｰ埠頭
２－　４	西宮市沖１
２－　５	ブルイ跡
	神崎川河口中央
	淀川河口中央
	中島川河口
	尼崎港口
	扇町航路口
	丸島沖
２－　６	南港
	関門外
	木津川河口中央
	Ｃ－３
５－　７	ﾎﾟｰﾄｱｲﾗﾝﾄﾞ南船舶給油施設
	神戸燈台南
	長田港口
４－　８	神戸市東部沖１
	神戸市東部沖２
４－　９	六甲ｱｲﾗﾝﾄﾞ南沖合
８－１１	JR須磨駅前
	海釣り公園
５－１２	第１防波堤南沖合い
	苅藻島南沖合い
	須磨西防波堤
	神戸市中央部沖
４－１３	神戸市東部沖３
４－１４	西宮市沖２

註;ボックスの前番号は大領域を後の番号は
小領域の延べ番号を示す

付表２－９淡水流入量、汚濁負荷量
（現況／大領域／冬季）

ボックス番号	淡水流入量 kg/1潮汐	ＩＰ kg/1潮汐	ＯＰ kg/1潮汐	ＣＯＤ kg/1潮汐
1	152829.3	32.3	139.7	2622.8
2	8411025.0	3307.7	1903.5	75743.7
3	3780947.5	452.6	604.9	17555.8
4	0.0	0.0	0.0	0.0
5	124452.4	51.0	35.1	2578.6
6	0.0	0.0	0.0	0.0
7	0.0	0.0	0.0	0.0
8	119534.6	49.9	15.4	1391.4
9	59647.0	34.9	46.8	1617.8
10	2143237.5	50.4	67.4	4531.7
11	94616.0	21.0	8.0	658.8

付表２－１０　淡水流入量、汚濁負荷量
（現況／大領域／夏季）

ボックス番号	淡水流入量 kg/1潮汐	ＩＰ kg/1潮汐	ＯＰ kg/1潮汐	ＣＯＤ kg/1潮汐
1- 1	30116.5	0.9	1.4	130.1
1- 2	47588.8	16.8	19.2	276.2
1- 3	117633.5	15.7	119.8	2336.8
2- 4	955372.0	337.6	127.9	7452.5
2- 5	7739900.0	2334.0	1238.8	89764.8
2- 6	3367408.0	1281.3	998.8	33906.1
5- 7	124567.9	52.9	33.7	2573.5
4- 8	0.0	0.0	0.0	0.0
4- 9	0.0	0.0	0.0	0.0
4-10	0.0	0.0	0.0	0.0
8-11	19354.1	13.4	9.2	510.5
5-12	8179.5	0.7	0.4	52.3
4-13	0.0	0.0	0.0	0.0
4-14	0.0	0.0	0.0	0.0

付表２－１１　淡水流入量、汚濁負荷量（現況／小領域／冬季）

ボックス番号	淡水流入量 kg/1潮汐	ＩＰ kg/1潮汐	ＯＰ kg/1潮汐	ＣＯＤ kg/1潮汐
1- 1	18322.5	0.7	1.2	103.2
1- 2	26075.3	16.4	19.0	215.6
1- 3	108431.5	15.3	199.5	2304.1
2- 4	391180.0	261.1	90.9	4562.7
2- 5	3540889.0	2082.2	1052.6	45427.1
2- 6	4478957.0	964.5	760.1	25754.0
5- 7	1171374.4	49.9	34.6	2526.3
4- 8	0.0	0.0	0.0	0.0
4- 9	0.0	0.0	0.0	0.0
4-10	0.0	0.0	0.0	0.0
8-11	3779.0	1.3	0.9	59.2
5-12	7315.0	1.0	0.6	52.3
4-13	0.0	0.0	0	0.0
4-14	0.0	0.0	0	0.0

付表２－１２ 水質再現計算結果（現況／小領域／夏季）単位 mg/ﾘｯﾄﾙ

ボックス番号	Ｐ 上層	Ｐ 下層	Ｐ 上層	Ｐ 下層	ＣＯＤ 上層	ＣＯＤ 下層
1- 1	0.0208	0.0282	0.0457	0.0354	2.86	2.12
1- 2	0.0229	0.0364	0.0673	0.0535	3.89	3.00
1- 3	0.0249	0.0422	0.0863	0.0695	4.79	3.76
2- 4	0.0353	0.0576	0.0128	0.1120	7.04	5.69
2- 5	0.0550	0.0906	0.2210	0.2060	12.60	10.70
2- 6	0.0385	0.0471	0.1080	0.0789	6.26	4.63
5- 7	0.0258	0.0166	0.0479	0.0197	3.62	1.50
4- 8	0.0234	0.0261	0.0553	0.0346	3.71	2.29
4- 9	0.0265	0.0340	0.0662	0.0530	4.06	3.22
4-10	0.0369	0.0513	0.1110	0.0986	6.30	5.43
8-11	0.0206	0.0057	0.0259	0.0051	2.91	0.63
5-12	0.0129	0.0129	0.0184	0.0122	1.84	1.31
4-13	0.0142	0.0196	0.0251	0.0203	2.14	1.82
4-14	0.0203	0.0288	0.0465	0.0367	3.19	2.59

付表２－１３ 水質再現計算結果（現況／小領域／冬季）単位 mg/ﾘｯﾄﾙ

ボックス番号	Ｐ 上層	Ｐ 下層	Ｐ 上層	Ｐ 下層	ＣＯＤ 上層	ＣＯＤ 下層
1- 1	0.0202	0.0200	0.0372	0.0321	0.97	0.98
1- 2	0.0249	0.0265	0.0548	0.0466	1.32	1.33
1- 3	0.0301	0.0339	0.0730	0.0630	1.74	1.73
2- 4	0.0471	0.0515	0.1050	0.1010	2.54	2.59
2- 5	0.0850	0.0852	0.1550	0.1480	4.20	4.25
2- 6	0.0447	0.0375	0.0733	0.0567	2.41	2.29
5- 7	0.0276	0.0129	0.0422	0.0178	1.79	0.96
4- 8	0.0264	0.0200	0.0474	0.0301	1.56	1.23
4- 9	0.0297	0.0266	0.0569	0.0433	1.68	1.47
4-10	0.0516	0.0598	0.0933	0.0970	2.42	2.79
8-11	0.0208	0.0050	0.0240	0.0051	2.11	0.58
5-12	0.0135	0.0112	0.0167	0.0120	1.15	1.09
4-13	0.0152	0.0165	0.0215	0.0195	1.15	1.35
4-14	0.0229	0.0241	0.0365	0.0321	1.40	1.58

付表 2-14　大領域の隣接ボックスとの接触面積

隣接ﾎﾞｯｸｽ番号	隣接面積 km² 上層	下層
1～2	0.026	0.003
1～4	0.021	0.014
1～5	0.004	0.004
2～3	0.034	0.011
2～4	0.078	0.035
3～6	0.082	0.048
3～9	0.084	0.022
4～5	0.064	0.053
4～6	0.104	0.111
5～7	0.064	0.134
5～8	0.046	0.078
6～7	0.080	0.109
6～9	0.094	0.102
7～8	0.064	0.381
7～10	0.064	0.179
8～10	0.040	0.183
8～11	0.070	0.411
8～12	0.030	0.122
9～10	0.133	0.059
10～11	0.174	0.343
11～13	0.082	0.304

付表 2-15 大領域の隣接ボックス間の重心距

隣接ﾎﾞｯｸｽ番号	重心距離 上層 km	下層の重心深さの差 m	重心距離 下層 km
1 ～ 2	12.58	0.80	12.58
1 ～ 4	6.93	2.35	6.93
1 ～ 5	9.61	2.90	9.61
2 ～ 3	14.08	0.90	14.08
2 ～ 4	7.82	3.15	7.82
3 ～ 6	8.05	3.00	8.05
3 ～ 9	14.75	1.60	14.75
4 ～ 5	11.74	0.55	11.74
4 ～ 6	10.28	0.75	10.28
5 ～ 7	8.27	9.80	8.27
5 ～ 8	12.18	14.20	12.18
6 ～ 7	10.95	9.60	10.95
6 ～ 9	11.62	1.40	11.62
7 ～ 8	11.62	4.40	11.62
7 ～ 10	13.97	4.80	13.97
8 ～ 10	19.22	9.20	19.22
8 ～ 11	19.55	0.85	19.56
8 ～ D	20.00		20.00
9 ～ 10	11.18	6.20	11.18
10 ～11	14.42	10.05	14.42
11 ～ D	20.00		20.00

註 1;重心距離（下層）
　＝SQRT((重心距離(上層^2)+(重心深さの差^2)
註 2;ﾎﾞｯｸｽ番号のＤはﾀﾞﾐｰﾎﾞｯｸｽを示す

付表 2-16　大領域ボックスの上･下層重心間距離

ボックス番号	下層の重心間距離 m
1	5.80
2	5.00
3	5.90
4	8.15
5	8.70
6	8.90
7	18.50
8	22.90
9	7.50
10	13.70
11	23.75

註;上･下層の重心間距離
　=ﾎﾞｯｸｽの平均深さ÷2

付表 2-17　淡水流入量、汚濁負荷量

ボック番号	淡水流入 kg/1潮	ＩＰ kg/1潮	ＯＰ kg/1潮	ＣＯＤ kg/1潮
1	161040.	105.4	66.5	2568.3
2	7162070.	2396.6	1523.4	56611.8
3	3882414.	410.9	579.0	16566.0
4	0.0	0.0	0.0	0.0
5	150334.	62.5	77.1	2358.5
6	0.0	0.0	0.0	0.0
7	0.0	0.0	0.0	0.0
8	143093.	49.8	50.2	1470.3
9	75339.0	62.1	83.1	2008.0
10	2132364.	51.2	68.4	4431.5
11	94116.0	24.4	8.8	666.3

付表 2-18 現況負荷と将来負荷の比較(IP/夏

ボックス番号	現況 kg/潮汐	将来 kg/潮汐	将来負荷の増減率(%)
1	33.3	106.1	218.6%
2	3952.9	2904	-26.5%
3	524.7	477.8	-8.9%
4	0.0	0.0	0.0%
5	53.6	63.2	17.9%
6	0.0	0.0	0.0%
7	0.0	0.0	0.0%
8	62.9	51.5	-18.1%
9	36.9	65.1	76.4%
10	58.4	59.5	1.9%
11	21.0	24.4	16.2%
合計	4743.7	3751.6	-20.9%

付表 2-19 現況負荷と将来負荷の比較(OP/夏

ボックス番号	現況 kg/潮汐	将来 kg/潮汐	将来負荷の増減率(%)
1	140.3	66.7	-52.5%
2	2365.4	1991.5	-15.8%
3	533.2	485.6	-8.9%
4	0.0	0.0	0.0%
5	34.0	77.7	128.5%
6	0.0	0.0	0.0%
7	0.0	0.0	0.0%
8	22.3	51.8	132.3%
9	37.4	66.0	76.5%
10	59.4	60.2	1.3%
11	8.0	8.8	10.0%
合計	3200.0	2808.3	-12.2%

付表 2-20 現況負荷と将来負荷の比較(COD/

ボックス番号	現況 kg/潮汐	将来 kg/潮汐	将来負荷の増減率(%)
1	2343.0	2628.1	12.2%
2	131123.6	106209.3	-19.0%
3	16596.0	15754.0	-5.1%
4	0.0	0.0	0.0%
5	2626.7	2396.7	-8.8%
6	0.0	0.0	0.0%
7	0.0	0.0	0.0%
8	1810.0	1524.7	-15.8%
9	1521.5	1838.5	20.8%
10	4537.2	4438.0	-2.2%
11	658.8	666.3	1.1%
合計	161216.8	135445.6	-16.0%

付録Ⅱ　第３章

付表３－１　面源フレーム値

河川名	下水道以外				畜産(頭数)				土地(面積)			
	浄化槽 合併小	浄化槽 単独小	汲取り (人)	雑排水 (人)	牛	馬	豚	鶏	山林	田	畑	その他
高橋川	0	0	0	0	0	0	0	0	164	0	0	155
天上川	0	0	0	0	0	0	0	0	193	0	0	85
住吉川	0	0	0	0	0	0	0	0	37	1	0	148
高羽川	24	45	104	149	0	0	0	0	220	1	0	67
石屋川	154	291	254	545	0	0	0	0	1058	1	1	91
天神川	0	0	0	0	0	0	0	0	7	0	0	653
都賀川	15	29	65	94	0	0	0	0	728	0	0	129
西郷川	0	0	0	0	0	0	0	0	206	0	0	81
生田川	145	277	280	557	30	50	0	0	1065	0	0	43
宇治川	0	0	0	0	0	0	0	0	322	0	0	13
新湊川	295	559	1437	1996	30	0	0	0	1964	13	6	991
妙法寺川	161	306	485	791	0	0	0	0	430	31	1	519
千森川	8	15	34	49	0	0	0	0	115	0	0	30
一の谷川	2	5	11	16	0	0	0	0	123	0	0	32
塩屋谷川	106	200	169	369	0	0	200	0	230	18	2	255
福田川	1807	882	851	1733	0	0	0	0	247	57	5	1457
山田川	429	816	1458	2274	0	0	0	0	309	5	2	499
朝霧川	156	296	776	1072	0	0	0	0	5	4	1	87

付表 3-2 陸域流出算定結果(左)　付表 3-3 海域流入算定結果(右)

単位：kg/日

河川・沿岸名	COD 負荷量	TP 負荷量
蓬川	2877.2	
武庫川	5796.1	
新川	1077.5	
東川	1563.0	
夙川	661.5	
堀切川	112.0	
宮川	9.5	
芦屋川	18.2	
高橋川	3.1	0.2
天上川	4.3	0.2
天神川	1.5	0.1
石屋川	13.7	0.4
住吉川	19.6	1.2
高羽川	6.5	0.3
都賀川	40.2	2.0
西郷川	12.7	0.8
生田川	21.4	1.3
宇治川	1.0	0.2
新湊川	543.6	40.1
妙法寺川	47.6	2.1
千森川	1.6	0.1
一の谷川	3.9	0.2
塩屋谷川	37.2	4.7
福田川	401.6	26.2
山田川	76.0	2.8
朝霧川	25.3	1.0
志筑川	208.1	
洲本川	1187.4	
尼崎市沿岸	1757.5	
西宮市沿岸	2150.0	
芦屋市沿岸	406.0	
芦屋・神戸市境～都賀川沿岸	4385.2	20.8
都賀川～和田岬沿岸	1450.4	269.5
和田岬～妙法寺川沿岸	2215.8	25.6
妙法寺川～神戸・明石市境沿岸	1055.7	60.1
神戸・明石市境沿岸～朝霧川沿岸	181.1	135.1
朝霧川～林崎漁港沿岸	542.0	76.6
洲本・南淡町境～天川沿岸	96.1	0.2
天川～洲本・津名町境沿岸	637.7	
洲本・津名町境～志筑川沿岸	101.1	
志筑川～東浦町沿岸	184.2	
東浦町沿岸	373.2	
淡路町沿岸	402.0	

単位：kg/日

河川・沿岸名	COD 負荷量	TP 負荷量
蓬川	2589.5	
武庫川	5216.4	
新川	969.8	
東川	1064.7	
夙川	595.3	
堀切川	100.7	
宮川	8.5	
芦屋川	16.4	
高橋川	2.8	0.2
天上川	3.8	0.2
天神川	1.4	0.1
石屋川	12.4	0.4
住吉川	17.6	1.1
高羽川	5.8	0.3
都賀川	36.2	1.8
西郷川	11.4	0.8
生田川	19.2	1.2
宇治川	0.9	0.2
新湊川	489.2	36.1
妙法寺川	42.8	1.9
千森川	1.4	0.1
一の谷川	3.5	0.2
塩屋谷川	33.5	4.3
福田川	361.4	23.6
山田川	68.4	2.6
朝霧川	22.8	0.0
志筑川	41.6	0.9
洲本川	237.4	
尼崎市沿岸	1575.5	
西宮市沿岸	2150.0	
芦屋市沿岸	407.0	
芦屋・神戸市境～都賀川沿岸	4385.2	20.8
都賀川～和田岬沿岸	1450.4	269.5
和田岬～妙法寺川沿岸	2215.8	25.6
妙法寺川～神戸・明石市境沿岸	1044.5	60.1
神戸・明石市境沿岸～朝霧川沿岸	192.3	135.1
朝霧川～林崎漁港沿岸	542.0	76.6
洲本・南淡町境～天川沿岸	96.1	0.2
天川～洲本・津名町境沿岸	637.7	
洲本・津名町境～志筑川沿岸	101.1	
志筑川～東浦町沿岸	184.2	
東浦町沿岸	373.2	
淡路町沿岸	401.9	

付表３－４大領域の負荷算定結果

付表 3-4 大領域の負荷量算定結

単位：kg/日

ﾎﾞｯｸｽ番号	COD 負荷量	TP 負荷量
1	4965.8	345.6
2	246867.3	11529.5
3	34151.8	2115.4
4	0.0	0.0
5	5205.3	173.7
6	0.0	0.0
7	0.0	0.0
8	3201.4	150.5
9	3139.3	156.0
10	9068.9	235.6
11	1317.6	58.0
合計	267917.4	14764.3