

# 閉鎖系水域水質浄化の動学的最適政策

——霞ヶ浦を事例として——

森 島 隆 晴

## 摘 要

日本第二の面積をもつ霞ヶ浦が、アオコの発生などで汚れが進み瀕死状態と言われて久しい。霞ヶ浦湖岸には、民間企業・沿岸市町村・県・国による、21世紀前半を目指した開発事業が多数ある。湖岸開発主体者にとっては霞ヶ浦の水質浄化は湖岸開発の前提となっていると言える。また、今まで霞ヶ浦に親しんできた湖岸住民にとっても、アメニティの向上につながる霞ヶ浦の水質浄化は望ましい。茨城県は霞ヶ浦の水質浄化を目指す霞ヶ浦富栄養化防止条例を1982年に施行した。しかし、この条例では、排水規制対象になる事業所は全体の約1割でしかなく、恒常的に汚水を流しているレンコン農家、コイ養殖業者や養豚農家、さらに「霞ヶ浦を汚染する原因の3分の1を占めている」と言われる生活系雑排水は規制対象外となっている。このため、霞ヶ浦の水質浄化のためには規制対象の拡大、下水道・廃水処理関連の投資等の施策が必要となっている。

本研究では、霞ヶ浦の水質浄化達成のために、行政が農業・畜産、水産、工業等の産業活動、および人々の生活による水質汚染をどの程度規制し、汚染規制の関連投資をどの程度すべきかを分析した。ここでは、富栄養化の指標としてリンに焦点をあてている。産業活動・生活水準を動学的産業連関プログラミングモデルで捉え、これにリンの負荷収支方程式を組み込むことで、霞ヶ浦の水質と産業活動・生活のレベルおよび、下水道・廃水処理投資を導出した。経済活動を優先した場合には、水質の悪化は留まる

ことなく進行し、水質浄化・保全を優先した場合には、下水道・廃水処理施設の整備だけでは不十分で、産業活動・生活のレベルをも規制する必要がある。したがって、産業活動・生活のレベルを維持しながら水質浄化・保全をおこなうためには、既存の方法以外に、より根本的対策を講じる必要がある。

キーワード：閉鎖系水域水質浄化，霞ヶ浦，動学的最適編成，下水道・廃水処理投資

## 1. はじめに

霞ヶ浦沿岸周辺は、首都圏に近く開発業者のゴルフ場建設申請等が殺到しており、今後、ゴルフ場開発だけでなく様々な開発がなされようとしている。そこで、県は虫食いの乱開発されることを防ぎ、バランスのとれた地域発展を目指そうと、昭和62年度から大規模なリゾート開発構想「霞ヶ浦・筑波複合リゾート開発整備基本構想」の検討を進め63年度にその素案をつくった。これとほぼ同時期に県と同様の理由で、いくつかの霞ヶ浦沿岸周辺市町村がリゾート開発を検討し始めた。いずれも民間のコンサルタント会社に構想策定を依頼、実際の開発のノウハウを持った民間企業に任せようというものであった。

一方、国では、首都圏の飲料水の確保という目的で霞ヶ浦を利水地として位置づけ事業を行っている。これは、水資源開発公団が行っている霞ヶ浦導水事業であるが、飲料水の確保の他に霞ヶ浦の水質浄化という目的も含んでいる。

また、これとは別に、国土庁は、「肥大化した首都東京をどう再構築していくか」という21世紀前半を目標に『首都改造計画』を打ち出し、5つの自立都市圏のうちの1つとして土浦・筑波研究学園都市を業務核都市と指定し、両市を拠点とした都市圏を作り上げている。自立都市圏とは、東京都区部以外の地域で職住が近接しており、地域圏内の生活・サービスの供

給や地域文化、地域コミュニティなどが形成されている都市圏のことである。確かに研究学園都市は発展してきているが、土浦市は前述した霞ヶ浦の水質汚濁等によるイメージの悪化によって発展しているとは言いがたい。国土庁の『首都改造計画』を推進する上でも霞ヶ浦の浄化は重要な問題となってくると考えられる。

以上述べたように霞ヶ浦湖岸には、民間企業ばかりでなく、沿岸市町村・県・国による、21世紀前半を目指した開発事業が多数ある。それらの事業は首都圏に近いという立地条件の良さや研究学園都市の発展を見込んでいるばかりでなく、近年、首都圏でなされている水と親しむ空間の創出というウォーターフロントの開発の波がついには霞ヶ浦湖岸にまで押し寄せてきたと言える。しかし、霞ヶ浦の現状を考えてみると親しむはずの水が汚れているため、湖岸開発をおこなったとしても果してその後順調に進むかどうかは分からない。つまり、湖岸開発主体者にとっては霞ヶ浦の水質浄化は湖岸開発の前提となっていると言える。また、今まで霞ヶ浦に親しんできた湖岸住民にとっても、アメニティの向上につながる霞ヶ浦の水質浄化は望ましい。

本研究では、霞ヶ浦の水質浄化達成のために、行政が農業・畜産、水産、工業等の産業活動、および人々の生活による水質汚染をどの程度規制し、汚染規制の関連投資をどの程度すべきかを分析した。

## 2. 霞ヶ浦と富栄養化

霞ヶ浦 ( $213.7\text{km}^2$ ) は、西浦 ( $167.7\text{km}^2$ )・北浦 ( $38.7\text{km}^2$ )・外浪逆浦 ( $7.3\text{km}^2$ ) の3つからなる湖で琵琶湖 ( $673.9\text{km}^2$ ) に次いで第2位の大湖である。地形的な特徴としては、西浦の最大水深は7.3 m、北浦は7.0 m、外浪逆浦は8.9 mで、霞ヶ浦の平均水深は約4m程度となる。他湖と比較しても、琵琶湖の103.4 m、サロマ湖 ( $151.7\text{km}^2$ ) の19.6 m、猪苗代湖 ( $103.9\text{km}^2$ ) の93.5 mと霞ヶ浦の浅さは明らかである。また、海拔はわずか

16cmと低い<sup>1)</sup>。利根川からの流入がない現在、西浦はおよそ26、北浦・外浪逆浦はおよそ10の流入河川しかなく、流出も常陸利根川のみである<sup>2)</sup>。また、西浦では滞留時間が1.3年と長いことも大きな特徴の1つである<sup>3)</sup>。

また、霞ヶ浦の流域は、千葉県・栃木県の一部を含む45市町村にまたがり、その面積は約2200km<sup>2</sup>と茨城県の3分の1に相当する広さで、流域人口約87万人、約23万世帯の人々がくらししており、湖容積に対する流域人口は10.6人／万・m<sup>3</sup>と琵琶湖の約27倍に達している<sup>4)</sup>。土地利用に関しては肥沃な平坦地と豊かな水資源に恵まれているため、農業・畜産・水産等が盛んに営まれている。特に畜産では全国有数の養豚地域で、飼育頭数は全国2位となっている。水産においても古くから漁業が盛んで内水面漁獲量、コイ養殖生産量はともに全国1位となっており、農業でも、レンコンの生産が全国1位である。また、工業については、首都圏から60kmと近いため高度経済成長期以降工場の新規立地が盛んで工場出荷額は急増している。

霞ヶ浦の水利用の経緯に関して述べると、江戸時代から湖岸住民を苦しめた洪水を防ぐための湖岸工事や利根川への導水を1948年から行ったが、利根川への疎通が極めてよくなった分海水が容易にさかのぼるようになり、塩害による被害がでた。そこで1963年に利根川からの逆流による洪水と海水の逆流による塩害を防ぐため常陸川水門が設置された。その後常陸川と利根川との水位関係で開放と閉鎖がくりかえされたが、霞ヶ浦を水源として利用するため1974年より水門を閉鎖し続け、沿岸に堤防を築き毎秒43m<sup>3</sup>の水利用が可能となるように事業が進行中である<sup>5)</sup>。しかし、皮肉なことに1974年頃から霞ヶ浦の水質は悪化している。

霞ヶ浦の水質浄化とともに、問題となったのは肥大化する東京都市圏の飲料水であった。そこで、国は、これら2つの問題を解決するため霞ヶ浦導水事業を計画した。霞ヶ浦導水事業は、那珂川下流部と霞ヶ浦、利根川下流部と霞ヶ浦を水路で結び年間約6.5億tの水を那珂川から霞ヶ浦へ導水することにより、霞ヶ浦の水質浄化を図るとともに毎秒12.7m<sup>3</sup>の新規都

市用水の確保、既得用水の補給を目的とした流況調整河川事業である。しかし、この霞ヶ浦利水事業による水位・水質の変化により、農漁業に対して何らかの影響が出ることが考えられ、今後どのような補償処置を講ずるか注目される。

次に富栄養化は、栄養塩類やプランクトンが少なく、透明度が高い貧栄養湖に有機物が流入、堆積して、栄養塩やプランクトンが多くなり透明度が低い富栄養湖になる現象をいうが、一般的に富栄養化と呼ばれて問題とされるのは湖周辺の人間活動がその進行速度を速めている場合を指すことが多い。

霞ヶ浦について考えてみると、海拔が低く、水深が浅く、流域面積が広いのもともと富栄養化しやすい性格の湖であり、流域には平坦地が多く可住地が広いので、人間の社会経済活動の影響を大きく受けている。

富栄養化の指標は何か述べよう。いままで述べてきたように富栄養化とは一次生産が増大する現象であるから、一次生産者の増加を支える物質、すなわち、一次生産者の要求する栄養塩類が富栄養化の指標として重視されなければならない。一次生産者が増加するには数多くの栄養塩類を必要とするが、そのすべてが指標となるのではなく、<sup>6)</sup>より藻類生産を制御しやすい窒素・リン量が富栄養化の指標となる。

霞ヶ浦の水質は、昭和41年を境に急激に悪化してきた。窒素は1.0mg/lで昭和49年頃からほぼ横ばい状態のままで、リンは昭和54年に約0.06mg/lから約0.1mg/lに激増したがその翌年からは約0.06mg/lになり近年はその値で横ばい状態である。窒素やリンは植物に不可欠な要素ではあるが、これが水に溶けて湖に過度に流れ込むと、植物プランクトンが異常に繁殖してアオコが発生し水の色が変わることがある。その結果、上水道ではろ過池が詰まったり、異臭味などの障害が起こったり、酸素欠乏による養殖ゴイのへい死等の被害を生じることがある。

富栄養化の発生源は、大別すれば、特定の場所に点として位置する「点

源」と自然生態系と一体となり広域に面として広がっている「面源」とに分類される。また、点源はその大きさから大点源と小点源に分類される。大点源には工場、事業場、都市下水、し尿処理場、大養豚場などであり、小点源は、農林地域に存在する小集落や小養豚場などを指す。面源は、水田、畑などの農耕地と山林・原野等の集水域の中に面として広がっている土地や集水域から成る。

現在の霞ヶ浦は点源負荷による汚濁の方が多く、その為の対策が必要である。面源負荷による汚濁も農地等では多いと言われるが因果関係を測定しにくく、また、季節により汚濁を吸収するといった2面性もあり、対策を立てるのは難しい。<sup>7)</sup>

### 3. 富栄養化対策について

1958（昭和33）年に名ばかりの水質2法が制定され、1970（昭和45）年の公害立法で多くの関係法が整備されたが、水質の改善が顕著には現われなかった。このため汚染を見かねた自治体は条例によって規制値の上乗せを行いより厳しい基準値を設定した。以下では、霞ヶ浦に関する関係法と条例を概観しておく。<sup>5), 8)</sup>

#### 3.1 公害対策基本法

1972（昭和47）年に、環境庁告示により水質汚濁に係る環境基準が定められ、霞ヶ浦は生活環境の保全に関する環境基準で類型A（水素イオン濃度pH：6.5-8.5；化学的酸素要求量COD：3mg/l以下；浮遊物質SS：5mg/l以下、容存酸素量DO：7.5mg/l以上）に指定された。また、1986（昭和61）年に全窒素・全リン濃度について類型Ⅲ（全窒素0.4mg/l以下、全リン0.03mg/l以下）に指定されたが、これは、湖沼の汚濁がひどいため、段階的に暫定目標を達成しつつ、環境基準の可及的速やかな達成に努めるという条件の下、当面類型Ⅳ（全窒素0.6mg/l以下、全リン0.05mg/l以下）の達成に努めるとした。また、1973、74（昭和48、49）年に、茨城県告示

により霞ヶ浦に流入する河川のうち、桜川、恋瀬川、小野川等 24 河川について河川類型 A（pH：6.5-8.5；COD：2mg/l 以下；SS：25mg/l 以下，DO：7.5mg/l 以上）に指定された。

### 3.2 公害防止事業費事業者負担法

1970（昭和 45）年に成立した公害関係 14 法のうちの 1 つ。国や自治体が防止事業を行う場合に、発生源の企業などから事業費強制徴収することにして、その負担割合を定めている。しかし、費用の徴収は企業が直接の発生源となっている公害の防止対策に限られ、しかも長期に渡って蓄積された汚染や、その事業が、公害防止以外の効果を持っている場合は、企業の負担分は減る仕組みになっており、事業者負担が甘すぎるという声もある。

### 3.3 水質汚濁防止法

わが国初の公害立法である 1958 年制定の水質保全法と工場排水規制法を、それらの非実効性から統合し 1970（昭和 45）年に水質汚濁防止法が成立した。主な改正点は、①排水には国が一律の基準を設け、都道府県知事に上乗せ基準を設ける権限を与える、②事業場が基準違反の水を流したときは、知事が排水停止を命令する他、違反者を罰することができる、等。

### 3.4 霞ヶ浦富栄養化防止条例

1983（昭和 58）年に水質汚濁防止法に基づいて施行された。ここでは、窒素・リンの上乗せ排出基準等が定められている。同法に基づく茨城県公害防止条例においても、霞ヶ浦水域における上乗せ排出基準が定められている。

霞ヶ浦富栄養化防止条例の内容は琵琶湖富栄養化防止条例と酷似しているが、いくつかの問題点がある。第 1 は霞ヶ浦条例が琵琶湖条例よりも厳しいといわれる点である。琵琶湖では 1 日当りの排水基準を 30t 以上としており、霞ヶ浦では、これを 20t とすることによるものであろうが、この差はそれほど大きくないし、水質汚濁の状態が異なるので、この程度の規制では追いつかない。第 2 は農業用水、家畜し尿排出、養殖漁業、生活雑

排水について、いわゆる訓示規定にとどめたことである。他いくつかの問題点もあり、今後再検討を必要とされるであろう。

### 3.5 湖沼水質保全特別措置法（湖沼法）

湖沼法は、水質汚濁の進行により様々な環境上の障害をもたらしている湖沼について、従来からの水質汚濁防止法に加え、特別の措置を講じ湖沼の水質保全を図ることを目的として、1985（昭和60）年施行された。

当初は湖沼環境保全法案とされ、湖沼そのものだけでなく周辺地域の市街化計画や開発計画の抑制から、流入する生活・産業排水の規制まで盛り込まれていたが、建設・通産両省の猛烈な反対によって、周辺地区の土地利用規制を削除するといった大幅な骨抜きがされ、法案名には環境の代わりに水質の文字が入れられた。

計画期間は、1986～91（昭和61～平成2）年の5年間で、着実な水質改善による水質環境基準の確保を目処としつつ、水質保全に資する事業、各種汚濁源に対する規制等による湖沼の特性に応じた水質保全対策を総合的かつ計画的に推進することを方針としている。具体的には、富栄養化防止基本計画に加えて、浄化用水の導入、公共用水域の水質の監視強化、未規制対象者への指導等があげられる。

### 3.6 その他の対策

湖内21地点及び流入39地点（31河川）の水質を、茨城県と建設省で分担している。

また、霞ヶ浦の水質浄化には県民の理解と積極的な協力が不可欠であるため、流域市町村で構成している霞ヶ浦問題協議会を中心にして、県・市町村及び住民が一体となった県民運動を展開している。

以上の対策は、霞ヶ浦の水質汚濁防止のために、茨城県・流域市町村により総合的に進められている。



#### 4. 霞ヶ浦モデルの前提条件

霞ヶ浦モデルは、でき得る限り現実を反映するように構築したが、数学的解法の限界や自然科学的事実の不備、データの不足のために、いくつかの制限や仮定を設けた。

##### 4.1 霞ヶ浦の水域分割

霞ヶ浦は西浦，北浦，外浪逆浦の3つの水域からなるが，それぞれ独自の性質があり，1つの水域として扱うには無理がある。そこで，霞ヶ浦に12ヶ所ある公共用水域測定地点，水利，地形（狭窄部の有無），環境基準点の分布及び市町村境界を考慮し，霞ヶ浦を7つの水域に分割した。水域分割に対応して流域市町村も7地域に分割し，廃水処理施設投資・下水道投資を7つの地域ごとに考える（表－1）。

表1 水域分割－流域市町村分割一覧

水 域 名		測定地点名	市 町 村 名
A 1	土浦沖水域	掛馬沖, 木原沖, 牛込沖	つくば市, 土浦市, 明野町, 阿見町, 岩瀬町, 協和町, 真壁町, 新治村, 大和村
A 2	高崎沖水域	高崎沖, 玉造沖	石岡市, 小川町, 美野里町, 八郷町, 千代田村, 玉里村
A 3	湖心(I)水域	湖心, 西の洲	牛久市, 江戸崎町, 美浦村, 出島村, 玉造町, 桜川村
A 4	湖心(II)水域	麻生沖	竜ヶ崎市, 麻生町, 牛堀町, 利根町, 東村, 河内村, 新利根村
A 5	北浦(I)水域	武井沖	鉾田町, 北浦村, 大洋村
A 6	北浦(I)水域	釜谷沖, 神宮橋	鹿島町, 大野村
A 7	外浪逆浦水域	外浪逆浦	神栖町, 潮来町

## 4.2 富栄養化の指標

霞ヶ浦モデルで制御する公害は富栄養化であるが、富栄養化の指標としてリンに焦点をあてた。富栄養化の指標としてはCOD（化学的酸素要求量）やクロロフィルa濃度等がある。リンはこれらの指標との相関が比較的高い。

また、富栄養化状態に見られる顕著な現象として、アオコの大発生がある。アオコの増殖の制限因子は、水温と栄養物質である。八木（1986）<sup>10)</sup>では、霞ヶ浦の水の華より分離した2種の**Microcystis**を用いた実験から、ろ過法の場合には6、7、8月はリンと窒素が、これ以外の季節では鉄あるいは**EDTA**が制限因子となり、熱分解法では殆どの季節で窒素が制限物質になっていたと報告している。Miller, Maloney and Greene（1974）<sup>11)</sup>では、湖沼における植物プランクトンの制限物質はその水域の富栄養化が進行するにしたがい、リンから窒素に移行することが報告されている。したがって、アオコの発生を制御するためには窒素を制御するのが有効のようだが、リンが十分にあってこそ窒素が制限物質となるのであるから、リンを制御して制限物質となるようにするのが本質的な対策と言えよう。また、リンを制限物質にすることは富栄養化を逆行させることにもなる。

## 4.3 流入負荷発生源

流入負荷の発生源として生活系・工場・農業・漁業（おもにコイ養殖）を扱う。この他に、21世紀に向けて計画が進んでいるレジャー産業や、今後、負荷量に大きく関係すると思われる霞ヶ浦導水事業は考慮していない。

## 4.4 霞ヶ浦水質浄化の政策的手段

霞ヶ浦水質浄化の政策的手段として、下水道整備投資・工場排水処理施設投資および産業活動・生活レベルの規制を考える。

## 4.5 各地域の投入産出構造

茨城県を霞ヶ浦流域とその他の2地域に分割して扱うが、投入産出構造の地域毎の違いを無視し、各地域の投入産出表を茨城県のもので代用した。<sup>12)</sup>

また、流入負荷発生源の設定に合わせ、32部門分類表を農林業、漁業、製造業、鉱業・建築土木、その他の5部門に統合して用いた。ただし、家計を内生化しているので、部門は計6部門となっている。

## 5. 霞ヶ浦モデルの概要

### 5.1 水収支

リンは水の移動に伴って移動するため、水の収支を求める。貯水量は、年、季節毎の変動はあるものの、平均貯水量のまま一定とすることで各水域の流出水量を以下の式で算出した。

$$WI_k + WR_k = WE_k + WO_k \quad (k = 1, \dots, 7) \quad (1)$$

ここで、 $WI_k$ は $k$ 水域への流域からの流入水量、 $WR_k$ は降雨量、 $WE_k$ は蒸発量、 $WO_k$ は $k$ 水域からの流出水量を表している。水域別蒸発量・降雨量は、霞ヶ浦全域の蒸発量・降雨量（昭和51～56年の平均値）に水域別湖面積比を乗じて算出した。水域別流入水量は、霞ヶ浦全河川流入水量に水域別河川流域面積比を乗じて算出した（表－2）。各水域の貯水量は、水域面積に平均水深4 mを乗ずることで求め、これを平均貯水量とした。平均貯水量、流出量から、貯留率・移動率を求め（表－3）、これを用いて、各水域間および利根川（水域8）への移動水量を算出した（表－4）。例えば、土浦沖水域からは土浦沖水域の総水量の約64%が湖心（I）水域へ流出するが、湖心（I）水域に留まるのは約28%で、残り73%は湖心（II）水域へ流出する。湖心（II）水域には約7%が留まり、残り93%は外浪逆浦へ流出する。外浪逆浦には約4%が留まり、残り94%が利根川に流出する。したがって、土浦沖水域の総水量の約17%（ $= 0.64 \times 0.28$ ）が湖心（I）水域に、約3%（ $= 0.64 \times 0.73 \times 0.07$ ）が湖心（II）水域に、約2%（ $= 0.64 \times 0.73 \times 0.93 \times 0.03$ ）が外浪逆浦に、約41%（ $= 0.64 \times 0.73 \times 0.93 \times 0.96$ ）が利根川に移動することになる。同様に、各水域間および利根川への移動水量が求められる。このように求めた7つの水域間および系外の

表2 水域別水収支

単位：km<sup>2</sup>，百万m<sup>3</sup>

水 域		湖面積	流域面積	湖容積	蒸発量	降雨量	流入水量	流出水量
西 浦	土浦沖	48.4	488.1	193.6	45.5	58.6	325.7	338.9
	高崎沖	23.7	416.4	94.8	22.3	28.7	277.9	284.3
	湖心(I)	79.6	307.9	318.4	74.8	96.4	205.4	850.3
	湖心(II)	19.3	213.7	77.2	18.1	23.4	142.6	998.1
北 浦	北浦(I)	14.1	306.8	56.4	13.2	17.1	204.7	208.5
	北浦(II)	21.5	70.9	86.0	20.2	26.0	47.3	261.7
外浪逆浦(I)		13.4	111.8	53.6	12.6	16.2	74.6	1338.1
霞ヶ浦		220.0	1915.5	880.0	206.6	266.5	1278.3	1338.1

表3 水域別貯留率・水移動率

水域→水域	土浦沖	高崎沖	湖心(I)	湖心(II)	北浦(I)	北浦(II)	外浪逆浦	利根川	合計
土浦沖	0.3636		0.6364						1.0000
高崎沖		0.2501	0.7499						1.0000
湖心(I)			0.2724	0.7276					1.0000
湖心(II)				0.0718			0.9282		1.0000
北浦(I)					0.2129	0.7871			1.0000
北浦(II)						0.2473	0.7527		1.0000
外浪逆浦							0.0385	0.9615	1.0000

表 4 水域別移動水量・貯水量

水域→水域	土浦沖	高崎沖	湖心(I)	湖心(II)	北浦(I)	北浦(II)	外浪逆浦	利根川	合計水量
土浦沖	193.6		92.3	17.7			8.8	220.1	532.5
高崎沖		94.8	77.5	14.8			7.4	184.6	379.1
湖心(I)			318.4	61.0			30.4	758.9	1168.7
湖心(II)				77.2			38.4	959.7	1075.3
北浦(I)					56.4	51.6	6.0	150.9	264.9
北浦(II)						86.0	10.1	251.6	347.7
外浪逆浦							53.6	1338.1	1391.7

表 5 負荷移動行列

単位：百万 $m^3$ 

水域→水域	土浦沖	高崎沖	湖心(I)	湖心(II)	北浦(I)	北浦(II)	外浪逆浦
土浦沖	0.3636						
高崎沖		0.2501					
湖心(I)	0.1734	0.2043	0.2724				
湖心(II)	0.0332	0.0392	0.0522	0.0718			
北浦(I)					0.2129		
北浦(II)					0.1947	0.2473	
外浪逆浦	0.0166	0.0195	0.0260	0.0357	0.0228	0.0290	0.0385
利根川	0.4133	0.4869	0.6493	0.8925	0.5696	0.7237	0.9615
合計	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000

利根川への移動水量の間には以下の関係が成り立っている。

$$\sum_{l=1}^8 WM_{kl} = WO_k + WM_{kk} \quad (k = 1, \dots, 7) \quad (2)$$

ここで、 $WM_{lk}$  は  $l$  水域から  $k$  水域への移動水量、 $WM_{kk}$  は  $k$  水域の平均貯水量を表している。

## 5.2 流入負荷

流入負荷としては、生活系排水、工業排水、農業排水、コイ養殖を考える。なお、生活系排水および工業排水の負荷については下水道・廃水処理施設投資によって負荷量を減らすことができる。下水道・廃水処理施設の規模を表す指標として下水道整備率・工場排水処理率を用いた。各水域の産業別流入負荷について回帰分析をおこなった。

$$PI_{1k}(t) = -5.19 + 0.07X_{1k}(t) \quad (k = 1, \dots, 7) \quad (3a)$$

$$(7.82) \quad (\text{決定係数} = 0.92)$$

$$PI_{2k}(t) = 0.28 + 0.40X_{2k}(t) \quad (k = 1, \dots, 7) \quad (3b)$$

$$(13.70) \quad (\text{決定係数} = 0.98)$$

$$PI_{3k}(t) = 6.44 + 0.002X_{3k}(t) \quad (k = 1, \dots, 7) \quad (3c)$$

$$(0.92) \quad (\text{決定係数} = 0.14)$$

$$PI_{6k}(t) = 6.18 + 0.02X_{6k}(t) \quad (k = 1, \dots, 7) \quad (3d)$$

$$(10.88) \quad (\text{決定係数} = 0.95)$$

ここで、 $PI_{ik}(t)$  ( $i = 1, 2, 3, 6$ ) は農林業、漁業、製造業、家計の各部門で排出される負荷量である。鉱業・建築土木およびその他部門の負荷量はゼロである ( $PI_{4k}(t), PI_{5k}(t) = 0, k = 1, \dots, 7$ )。  $X_{ik}(t)$  ( $i = 1, 2, 3, 6$ ) は各期における各部門の総生産額である。ただし、家計部門 ( $i = 6$ ) の生産額は所得額を表している。また、面源負荷  $PI_{0k}$  は湖面積、山林面積、市街地農地面積を用いて、

$$PI_{0k}(t) = 0.015(\text{湖面積}) + 0.008(\text{山林面積}) + 0.063(\text{市街地農地面積})$$

$$(k = 1, \dots, 7) \quad (4)$$

より求めた。ここで、農林業から生じる負荷のうち、山林との内からの負

荷は面源負荷として扱われているため、点源としての農林業の負荷は主に畜産業である。ただし、回帰分析ではデータの不備により、農林業と畜産業を分けずに、畜産業を含む農林業として分析をおこなっている。

また、工業部門と家計部門からの流入負荷量は、廃水処理施設および下水道・浄化槽の整備により減少させることができる。廃水処理施設および下水道・浄化槽の普及率が100%の時の流入負荷の除去率をそれぞれ、0.9および0.7とする。

### 5.3 負荷収支

各水域内でリンの濃度を一定と仮定すると、リンの貯留量は以下の式で表される。

$$P(t+1) = M \{ \sum_{i=0}^6 PI_i(t) + P(t) + PG - PS \} \quad (5)$$

$$M = [m_{lk}], \quad m_{lk} = WM_{kl} / (\sum_{l=1}^8 WM_{kl}) \quad (k, l = 1, \dots, 7) \quad (6)$$

ここで、 $P(t)$ は $t$ 期における各水域の貯留負荷量ベクトル、 $PI_i(t)$ は $t$ 期における各部門の総流入負荷量ベクトル、 $M$ は負荷移動行列(表-4)、 $PG$ は底泥溶出負荷量ベクトル、 $PS$ は沈降負荷量ベクトルを表している。

### 5.4 投入産出構造

茨城県を霞ヶ浦流域とその他の2地域に分割し、霞ヶ浦流域を第1地域、その他の茨城県を第2地域とする。県外への輸移出は外生として、県外からの輸移入は県内需要に比例するとして扱う。各期の生産額の増分に対する投入産出構造を表す需給バランス制約は以下の式で表される。

$$\begin{aligned} (I - M) \{ (A + L) [\Delta X^{11}(t) + \Delta X^{12}(t)] + \Delta F^1(t) + \Delta KP(t) + \Delta E^1(t) \} \\ = \Delta X^{11}(t) + \Delta X^{21}(t) \end{aligned} \quad (7)$$

$$\Delta KP(t) = \delta_3 \sum_{k=1}^7 \Delta K_{3k}(t) + \delta_6 \sum_{k=1}^7 \Delta K_{6k}(t) \quad (8)$$

$$\begin{aligned} (I - M) \{ (A + L) [\Delta X^{22}(t) + \Delta X^{21}(t)] + \Delta F^2(t) + E^2(t) \} \\ = \Delta X^{22}(t) + \Delta X^{12}(t) \end{aligned} \quad (9)$$

ここで、 $M$ は輸移出係数行列、 $A$ は家計を内生化した投入係数行列、 $L$ は民間資本係数行列、 $\Delta X^{ij}(t)$ は $i$ 地域から $j$ 地域への生産額の増分ベクトル、

$\Delta^i(t)$ は*i*地域の最終需要の増分ベクトル,  $\Delta E^i(t)$ は*i*地域の輸移出額の増分ベクトル,  $\Delta KP(t)$ は公的資本投資額,  $\delta_i(i=3, 6)$ は廃水処理および下水処理の投資係数を表している。

## 5.5 目的関数および目標制約

本研究の目的は, 経済活動を一定の水準に保ちながら, 経済活動に伴って増加するリンの負荷量を減少させることにある。このために, 目標計画法の考え方をを用いて目的関数の設定をおこなう。すなわち, リンの負荷量を目標値に極力近づけつつ, 経済成長(総付加価値の増分)の水準が最も高い解を求めることとする。これは, 以下の式で表せる。

$$\text{Min } w_1(e^-_1 - e^+_1) + w_2(e^-_2 + e^+_2) \quad (10)$$

$$\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 v \Delta X^{ij}(t) / (1 + R)^{(t-1)} + e^-_1 - e^+_1 = G \quad (11)$$

$$\sum_{k=1}^7 P_k(T) + e^-_2 - e^+_2 = Z \quad (12)$$

ここで,  $w_i(i=1, 2)$ はウェイト,  $e^-_i(i=1, 2)$ は目標値からの不足差異,  $e^+_i(i=1, 2)$ は超過差異,  $G, Z$ は付加価値およびリン負荷量の目標値,  $T$ は計画期間の最終期,  $v$ は付加価値係数ベクトル,  $R(=0.04)$ は利子率を表す。

## 6. シミュレーション結果の分析

昭和60年を基準年として5期間モデルでシミュレーションをおこなった。比較のために, 以下のケースについてシミュレーションをおこなった。

ケース1: 環境基準無視, 経済成長優先 ( $w_1=1, w_2=0$ ), 最終需要の成長率2%, 廃水処理施設投資, 下水道投資無し。

ケース2: 環境基準達成, 経済成長 ( $w_1=1, w_2=1$ ), 最終需要の成長率2%。

ケース3: 環境基準達成, 経済成長 ( $w_1=1, w_2=1$ ), 最終需要の成長率0%。

ケース4: 環境基準達成, 経済成長 ( $w_1=1, w_2=1$ ), 最終需要の成長率0%, 霞ヶ浦流域の経済活動水準規制。



ここで、ケース 1 では、廃水処理施設投資・下水道投資をおこなわないように投資変数を除いたモデルを用いた。ケース 4 では、霞ヶ浦流域の農林業、漁業、製造業、家計の生産額増分の非負制約を除いたモデルを用いた。非負制約を除いくことで、霞ヶ浦流域の生産が基準年より減少し、その減少分がその他茨城県で生産される。このモデルによって目標環境基準達成のために、霞ヶ浦流域の経済活動をどの程度規制すべきかを算出できる。

### 6.1 全リン濃度と廃水処理施設・下水道普及率の推移

各ケースにおける全リン濃度の推移を示した図 2～4 から分かるように、ケース 1 では全リン濃度は増加している。その他のケースでは水質の改善

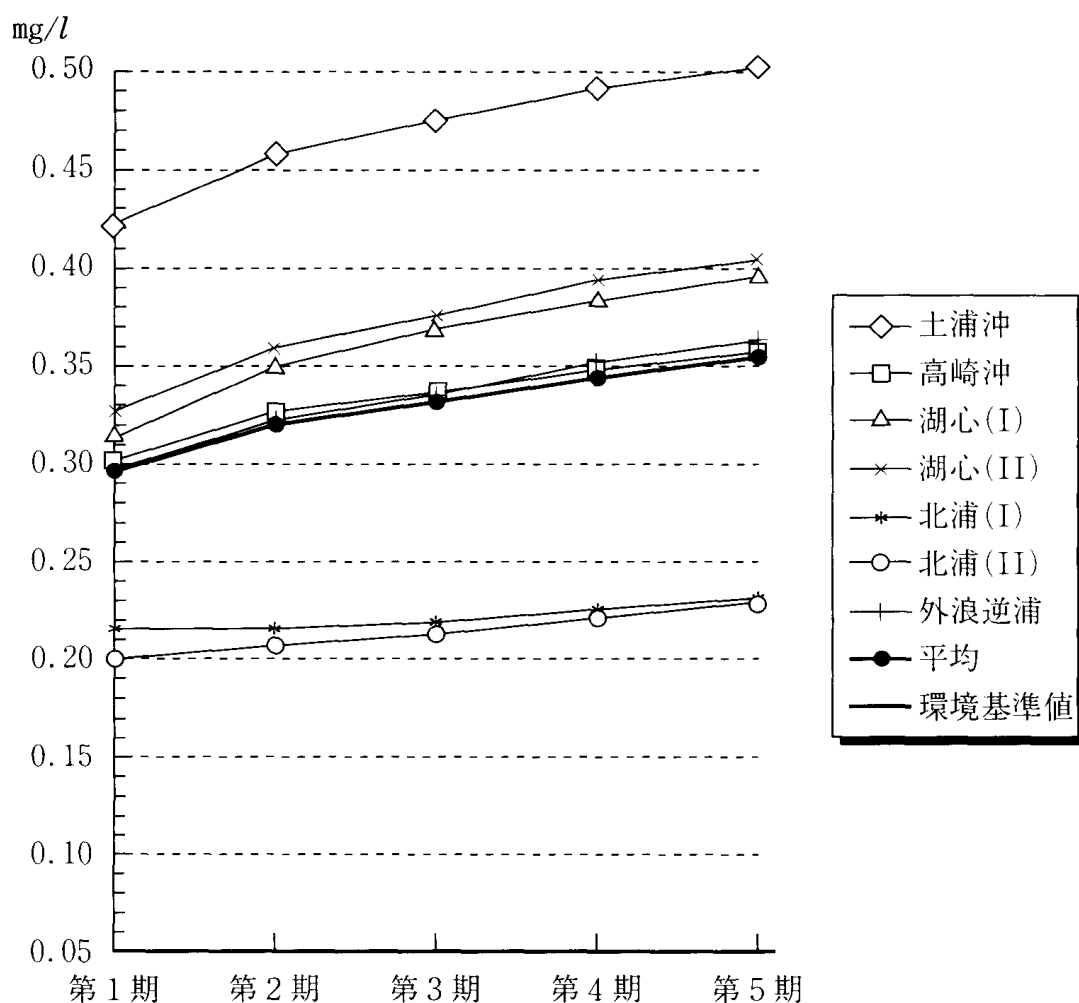


図 2 全リン濃度の推移 (ケース 1)

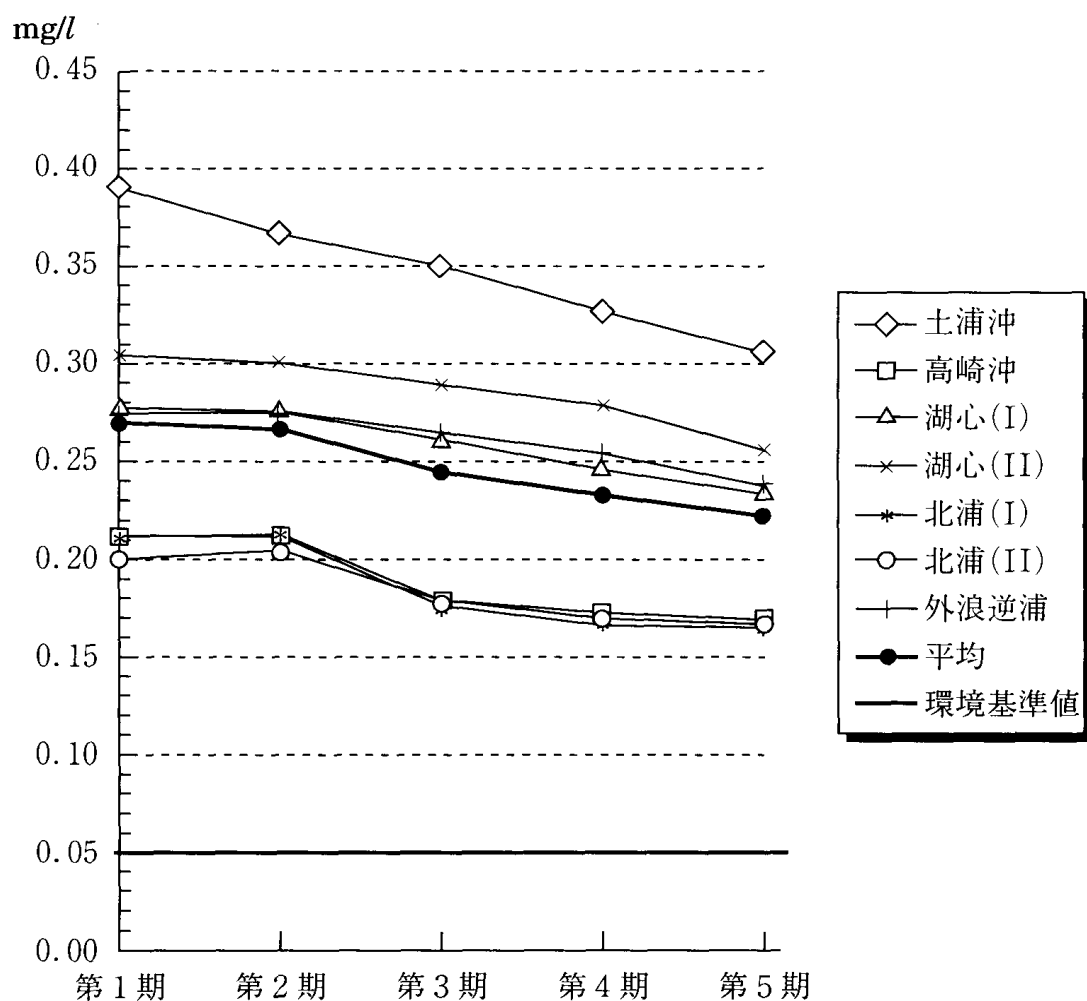


図3 全リン濃度の推移（ケース2，3）

がみられるとはいえ、平均値でみた濃度は当面の目標である類型Ⅳ（全リン0.05mg/l以下）には到達していない。特に、ケース2から3までは基準値の3倍から6倍程度とほど遠い状況である。これに対し、霞ヶ浦流域の経済活動を規制したケース4では、第5期の平均濃度が0.08mg/lとかなりの改善がみられる。

廃水処理施設・下水道普及率の推移を示した表6から分かるように、全リン濃度が低下しているのは、廃水処理施設・下水道の普及率が投資によって高くなることによる。ケース2～4では普及率の推移は全く同じで、

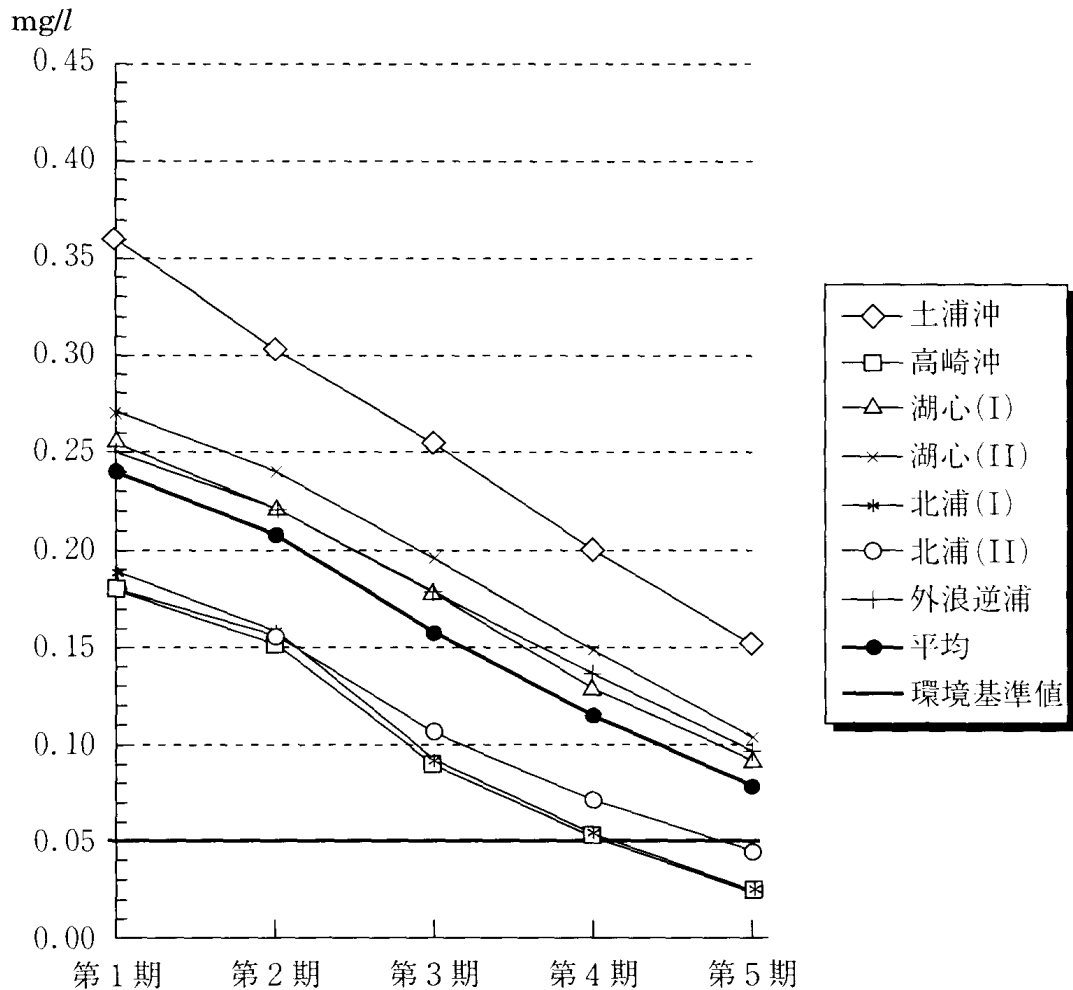


図4 全リン濃度の推移(ケース4)

地域1～地域5に対して、廃水処理施設投資・下水道投資ともおこなわれており、ほとんどの地域で第5期の普及率が100%となっている。地域に対する投資の順序は、第1期には地域2の廃水処理施設に対して、第2期には地域1, 3の廃水処理施設に対して、第3期には地域3, 5の廃水処理施設, 地域1, 2, 5の下水道に対して、第4期には地域1, 3の下水道に対して、第5期には地域4の廃水処理施設, 地域1, 4の下水道に対してそれぞれ投資がおこなわれている。

水域ごとの濃度で見ると高崎沖水域を除く西浦と外浪逆浦で平均値を上

表6 排水処置施設・下水道普及率の推移(ケース2,3,4)

地域		基準年	第1期	第2期	第3期	第4期	第5期
廃水処理普及率	A 1	8%	50%	100%	100%	100%	100%
	A 2	13%	100%	100%	100%	100%	100%
	A 3	20%	20%	97%	100%	100%	100%
	A 4	7%	7%	7%	7%	7%	100%
	A 5	14%	14%	14%	100%	100%	100%
	A 6	1%	1%	1%	1%	1%	1%
	A 7	12%	12%	12%	12%	12%	12%
下水道普及率	A 1	37%	37%	37%	52%	83%	100%
	A 2	17%	17%	17%	100%	100%	100%
	A 3	36%	36%	36%	36%	100%	100%
	A 4	24%	24%	24%	24%	24%	66%
	A 5	0%	0%	0%	100%	100%	100%
	A 6	10%	10%	10%	10%	10%	10%
	A 7	18%	18%	18%	18%	18%	18%

回っており、北浦と高崎沖水域で平均値を下回っている。高崎沖水域が平均値を下回るのは、廃水処理施設に対する投資により、流入負荷が減少するためと考えられる。これは、ケース2～4で第1期から廃水処理施設の普及率が100%となってることから分かる。これに対し、外浪逆浦は全リン濃度が平均値を多少上回っているものの、廃水処理施設投資も下水道投資も一切おこなわれていない。

## 6.2 生産額の推移

地域ごとの生産額の推移を表7～10に示す。ケース1では霞ヶ浦の環境基準を無視しているため、霞ヶ浦流域およびその他茨城県の両地域とも家計部門を含む各産業部門の生産額は増加している。霞ヶ浦流域の漁業、製

表7 生産額の推移(ケース1)

単位：億円

		基準年	第1期	第2期	第3期	第4期	第5期
霞ヶ浦流域	農林業	2,707	2,707	2,707	2,746	2,859	2,973
	漁業	70	70	70	70	70	79
	製造業	34,127	34,127	36,107	38,086	40,066	42,045
	鉱業・建築土木	6,157	6,194	6,458	6,723	6,987	7,251
	その他	17,951	18,070	19,213	20,356	20,936	22,079
	家計	10,392	10,392	10,392	10,392	10,578	10,578
その他茨城県	農林業	3,032	3,145	3,258	3,333	3,333	3,333
	漁業	376	385	393	402	411	411
	製造業	65,407	67,386	67,386	67,386	67,386	67,386
	鉱業・建築土木	6,157	6,385	6,385	6,385	6,385	6,385
	その他	41,245	42,269	42,269	42,269	42,832	42,832
	家計	23,878	24,552	25,227	25,901	26,390	27,065

表8 生産額の推移(ケース2)

単位：億円

		基準年	第1期	第2期	第3期	第4期	第5期
霞ヶ浦流域	農林業	2,707	2,707	2,707	2,707	2,707	2,707
	漁業	70	70	70	70	70	70
	製造業	34,127	34,127	34,127	34,127	34,127	34,127
	鉱業・建築土木	6,157	6,456	6,755	7,053	7,053	7,352
	その他	17,951	19,153	20,355	20,553	20,553	21,753
	家計	10,392	10,392	10,392	10,392	10,392	10,392
その他茨城県	農林業	3,032	3,146	3,260	3,374	3,489	3,603
	漁業	376	385	393	402	411	420
	製造業	65,407	67,400	69,394	71,387	73,394	75,387
	鉱業・建築土木	6,157	6,157	6,157	6,157	6,490	6,490
	その他	41,245	41,245	41,245	42,246	43,504	43,504
	家計	23,878	24,581	25,283	25,985	26,714	27,416

表9 生産額の推移(ケース3)

単位：億円

		基準年	第1期	第2期	第3期	第4期	第5期
霞ヶ浦流域	農林業	2,707	2,707	2,707	2,707	2,707	2,707
	漁業	70	70	70	70	70	70
	製造業	34,127	34,127	34,127	34,127	34,127	34,127
	鉱業・建築土木	6,157	6,191	6,226	6,226	6,294	6,294
	その他	17,951	18,010	18,032	18,058	18,102	18,134
	家計	10,392	10,392	10,392	10,392	10,392	10,392
その他茨城県	農林業	3,032	3,033	3,034	3,034	3,036	3,037
	漁業	376	376	376	376	376	376
	製造業	65,407	65,421	65,435	65,448	65,476	65,489
	鉱業・建築土木	6,157	6,158	6,158	6,192	6,192	6,227
	その他	41,245	41,245	41,282	41,312	41,383	41,409
	家計	23,878	23,906	23,934	23,961	24,017	24,044

表10 生産額の推移(ケース4)

単位：億円

		基準年	第1期	第2期	第3期	第4期	第5期
霞ヶ浦流域	農林業	2,707	2,177	1,583	1,020	459	0
	漁業	70	0	0	0	0	0
	製造業	34,127	34,141	34,155	34,169	34,182	34,196
	鉱業・建築土木	6,157	6,192	6,226	6,261	6,295	6,329
	その他	17,951	18,010	18,069	18,125	18,181	18,238
	家計	10,392	10,420	10,449	10,476	10,503	10,509
その他茨城県	農林業	3,032	3,563	4,158	4,722	5,283	5,743
	漁業	376	446	446	446	446	446
	製造業	65,407	65,407	65,407	65,407	65,407	65,407
	鉱業・建築土木	6,157	6,157	6,157	6,157	6,157	6,157
	その他	41,245	41,245	41,245	41,245	41,245	41,245
	家計	23,878	23,878	23,878	23,878	23,878	23,899

造業、鉱業・建築土木、その他の部門で第5期の成長率が最終需要の成長率10%を超えており、製造業では20%を超えているため、全リンの流入負荷量がかなり増加していることが分かる。

これに対してケース2では、流入負荷を発生する霞ヶ浦流域の農林業、漁業、製造業、家計の各部門で、最終需要が年率2%で成長しているにもかかわらず、生産額が基準年から変化せず、不足分をその他の茨城県から移入している。このため、リンの負荷量が増加せず、廃水処理施設・下水道投資によって水質が若干浄化される結果となっている。また、最終需要の成長がないケース3でも同様に、流入負荷を発生させる部門の生産額は基準年から増加していない。このため、ケース2と3の全リン濃度の推移は全く同じとなっている。

ケース4では、生産額の減少を認めているため、霞ヶ浦流域の負荷発生部門である農林業と漁業で霞ヶ浦流域からその他茨城県へ、生産活動が完全に移転する結果となっている。これに対して同じ負荷発生部門の製造業と家計の両部門はわずかばかりの成長が見られる。

ケース4の結果から、環境基準を達成するには、霞ヶ浦流域の（点源としての）農林業（すなわち畜産業）と漁業を規制するのが経済的効率性の面から望ましいということが分かる。

## 7. おわりに

以上、4つのケースについてのシミュレーションから次のことが分かる。ケース1のように廃水処理施設や下水道に対する投資をおこなわず、このままの状態を続ければ、霞ヶ浦の水質の悪化は留まることなく進行することとなる。ケース2、3のように廃水処理施設や下水道に対する投資をおこなっても経済活動に規制を加えなければ、環境基準値を達成することは困難である。ケース4のように、環境基準値を達成するためには霞ヶ浦流域の汚染負荷を発生させる産業活動・生活水準を規制する必要がある。も

し、産業活動・生活の水準を維持しながら水質浄化・保全をおこなおうとするのであれば、汚染負荷減少のための既存の方法以外に、水中汚染物質の除去等の根本的対策を模索する必要がある。

## 参考文献

- 1) 茨城大学農学部霞ヶ浦研究会（1977）霞ヶ浦，三共出版，203pp
- 2) (株)地域開発コンサルタント（1982）茨城県委託 汚濁負荷削減計画策定調査報告書
- 3) 安野正之（1984）霞ヶ浦の生態系の特性 ～陸水と人間活動，東京大学出版会
- 4) 茨城県環境局 霞ヶ浦問題審議会（1989）清らかな水のために～霞ヶ浦
- 5) 茨城大学地域総合研究所（1984）霞ヶ浦 ―自然・歴史・社会―，古今書院，300pp
- 6) 合田健（編著）（1979）水環境指標，思考社
- 7) 田淵俊雄，高村義親（1985）集水域からの窒素・リンの流出，東京大学出版会
- 8) 茨城県（1988）環境白書
- 9) 茨城県環境局霞ヶ浦対策課（1985）霞ヶ浦の水質予測について（メモ）
- 10) 矢木修身（編著）（1986）アオコの増殖及び分解に関する研究，国立公害研究所研究報告92
- 11) Miller, W.E., Maloney and J. C. Green (1974) Algal productivity in 49 lake waters as determined by algal assays, Water Research, 8, 667-679
- 12) 茨城県企画部統計課（1990）昭和60年産業連関表