

湖沼流域管理のための総合的な 水循環・物質流動モデルの構築

CONSTRUCTION OF A HYDROLOGICAL CYCLE AND POLLUTANT FLOW MODEL FOR LAKE WATERSHED MANAGEMENT

辻倉裕喜¹・安倍和雄²・大八木豊³・田中伸治⁴

Hiroki TSUJIKURA, Kazuo ABE, Yutaka OYAGI and Shinji TANAKA

¹正会員 工修 国土交通省国土技術政策総合研究所 (〒305-0804 茨城県つくば市旭1)

²正会員 工修 国土交通省中部技術事務所 (〒461-0047 名古屋市東区大幸南 1-1-15)

³正会員 工修 ㈱建設技術研究所大阪支社 (〒540-0008 大阪市中央区大手前 1-2-15)

⁴正会員 工修 国土交通省国土技術政策総合研究所 (〒305-0804 茨城県つくば市旭1)

It is necessary to understand the hydrological and pollutant cycle system of the watershed where a nature system element is intertwined to an artificial system element to promote the lake watershed management in the cooperation of labor. Additionally, we should have an objective tool which is appreciable of the effect of an each measure in the entire system.

We constructed a distributed pollutant flow model continuously to a distributed hydrological cycle model. And, we applied these models to the Lake Kasumigaura watershed which was a large area and general watershed. As a result, the pollutant flow process of the watershed was able to be understood for the unit of a standard grid cell. In addition, it was shown that the simulation tool which these constructed models cooperated was effective for the lake watershed management.

Key Words : Lake watershed management, distributed model, hydrological cycle, pollutant flow

1. はじめに

湖沼の水質保全を図るためには、流域から湖沼に流入する汚濁負荷を削減することが不可欠である。本研究の対象である霞ヶ浦流域においては、茨城県が流域管理による湖沼水質保全を検討しており¹⁾、流域管理組織として霞ヶ浦に流入する河川流域単位で流域協議会を設置し、各流域協議会に関係する市町村が参加することを構想している。こうした流域管理・流域対策を連携・協働して推進していくためには、自然系要素と人工系要素とが絡み合う流域の水物質循環システムを把握するとともに、全体のシステム中での個々の施策の効果が算定・評価できるような客観的なツールが必要である。

流域で発生した汚濁負荷は流域の水循環を介して水域に流入する。安倍・大八木ら²⁾は自然系水循環モデルとして開発された分布型流出モデル³⁾に人工系水循環を組み込み構築した分布型流域水循環モデルにより、霞ヶ浦流域部1,811メッシュ(基準地域メッシュ)の水循環を

明確にしている。本研究は、上記水循環モデルと連動し、メッシュ単位における各種人工系要素を含んだ汚濁負荷流動過程を表現する総合的な分布型流域物質流動モデルを構築し、湖沼流域管理のためのツールとして供用することを目的としたものである。

2. 分布型流域水循環モデルの概要

図-1に安倍・大八木ら²⁾が構築した分布型流域水循環モデルの構造概要を示す。分布型流出モデル³⁾は流域内全メッシュについて、鉛直方向に並べられた各層モデル(表層・不飽和層・地下水層(浅)モデル)からの流出成分を落水線に沿った河道モデルに投入し、Kinematic Wave法で流出量を逐次計算するモデルである。特徴としては、各層毎にパラメータを設定することにより、土地利用、土壌、表層地質等の水文学的な特性を反映できることが挙げられる。なお、分布型流出モデルの鉛直下方に準3次元地下水流動モデル(地下水層(深)モデル)

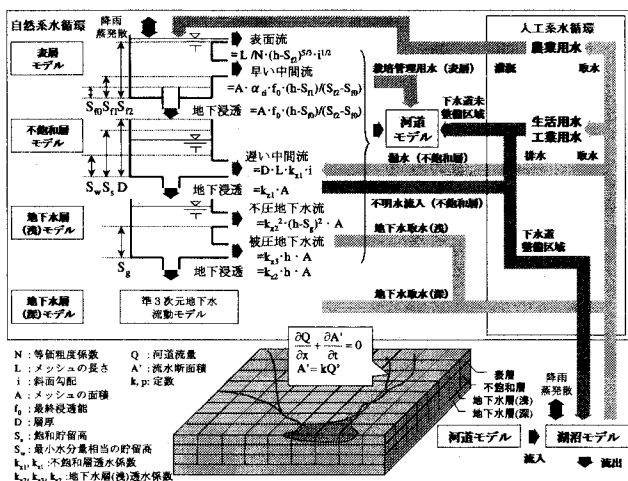


図-1 分布型流域水循環モデルの構造概要

を適用している。ここで、人工系水循環（生活・工業・農業用水）を図に示すように自然系水循環の各層モデルおよび河道モデルと組み合わせている。

3. 分布型流域物質流動モデル

汚濁負荷が各発生源から排出されある水域に流入するまでの間には、様々な現象が加わり非常に複雑な経路をたどる。また、流域から流出する汚濁負荷量は流出量（流量）に対応して変化するので、流達率を一定とする従来の方法では限界がある。本研究では、分布型流域物質流動モデルとして、各メッシュ鉛直方向の層については、浮田・関根ら⁴⁾が開発したシミュレーションモデルを一部簡略化して適用した。また、河道モデルについては、各層からの流出負荷量等を入力して堆積・掃流過程を解き、落水線に沿って次メッシュへと流出負荷量を引き渡すモデルとした。図-2に分布型流域物質流動モデルの構造概要を示す。以下に、各層モデル、河道モデルの基本的な考え方を示す。

(1) 表層モデル

面源負荷（降雨負荷を含む）、農業系取水負荷の地表面堆積・掃流、堆積物への吸脱着、地中浸透を考慮した。表層に堆積・吸着する汚濁負荷は表層流の掃流力により流出し、溶解性の汚濁負荷は表層から不飽和層に浸透し、降雨時に一部が表層流により流出するものとする。面源負荷は懸濁性の堆積物とし、これを含めた堆積物の流出負荷量は流量の2乗に比例するものとした。農業系取水負荷については溶解性負荷とみなした。

(2) 不飽和層モデル

表層モデルより地中浸透した溶解性の汚濁負荷は土壌内蓄積し、蓄積物から溶脱した溶解性の汚濁負荷は中間流によって流出、一部は地下水層へ浸透するものとした。

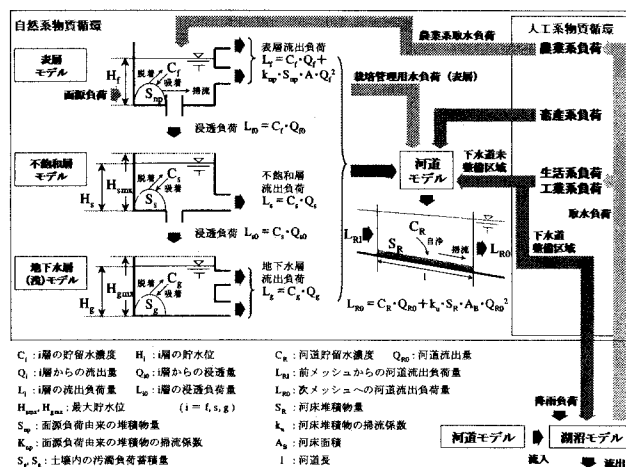


図-2 分布型流域物質流動モデルの構造概要

(3) 地下水層（浅）モデル

不飽和層モデルと同様のモデルとした。ただし、本研究の対象である霞ヶ浦流域全域にわたって、この下層に難透水層が確認されているため、浸透負荷が軽微であると考え、汚濁負荷は地下浸透しないものとした。

(4) 河道モデル

表層モデルからの掃流性流出負荷、溶解性負荷の自浄作用による河床への吸着等を含む河床堆積物が流量の2乗に比例して次メッシュへ流出するものとした。また、点源負荷（下水道未整備区域の生活系・工業系負荷、畜産系負荷）、栽培管理用水負荷（栽培管理上必要な人為的落水中に含まれる負荷）は溶解性負荷として河道に直接排出され、各層からの溶解性流出負荷とともに流量に応じて次メッシュへ流出するものとした。

4. 霞ヶ浦流域への適用

上記の各モデルを霞ヶ浦流域に適用した。この流域は3県44市町村にまたがり、「霞ヶ浦に係る湖沼水質保全計画」の対象区域でもある。流域面積は2,135km²（流域部：1,915km²、湖沼部：220km²）であり、桜川、恋瀬川、小野川等大小56の流入河川がある。流域内や流域界近くには、11カ所のアメダス観測所、5カ所の河川流量観測所、20カ所の湖沼水位観測所、38カ所の河川水質観測所、21カ所の湖沼水質観測所が存在する。流域の地表標高は0～861mであり、流域の北西部には筑波山の一部が分布し、湖沼周辺には鹿島台地、行方台地、筑波台地、稲敷台地、猿島台地、および桜川低地、霞ヶ浦低地、利根川低地が分布する。主要な表層地質は関東ロームである。1995年における流域内人口は約96万人であり、市街地、水田、畑地が流域部全体に占める割合はそれぞれ15%、23%、17%である。図-3に霞ヶ浦流域および各種観測地点を示す。

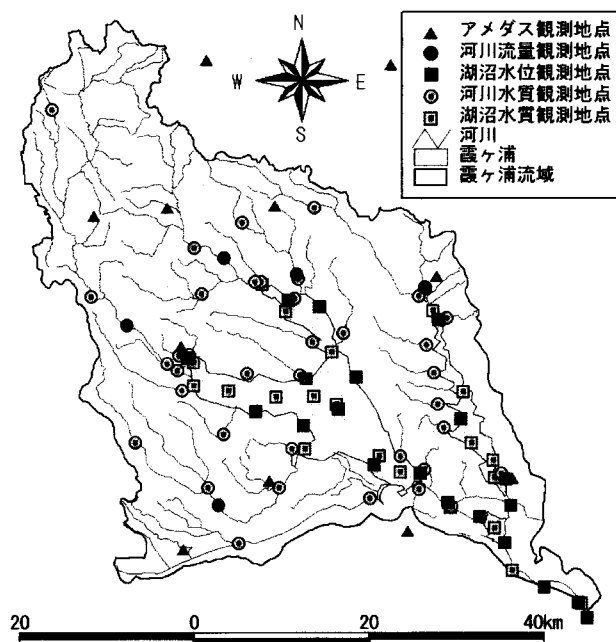


図-3 霞ヶ浦流域および各種観測地点

なお、計算メッシュスケールには、約1km四方の基準地域メッシュ（南北方向30秒、東西方向45秒の区画）を採用した。

(1) 分布型流域水循環モデルの適用

標高は、数値地図50mメッシュ標高の値から基準地域メッシュ毎の平均値を与えた。落水線網は、数値地図50mメッシュ標高をGISによりグラデーション表示して抽出した。また、河道幅算定には、レジューム理論を適用した。

a) モデルパラメータ

表層・不飽和層・地下水層（浅）モデルのそれぞれのパラメータ値は、既存の文献^{3),5)}を参考に、土地利用分類、土壌浸透度、表層地質浸透度の相違を反映させ、キャリブレーションを行い設定した。

b) 境界条件

降雨量、気温、日照時間、風速の各データについては、アメダス4要素から観測地点毎に収集して、ティーセン分割により基準地域メッシュ毎に設定した。また、可能蒸発散量はPenman法により推定し、可能蒸発散量に古藤田の補正係数を乗じて実蒸発散量を推定した。

基準地域メッシュ単位の人工系水循環（生活・工業・農業用水）については、安部・大八木ら^{2),6)}の推定結果を適用、一部追加修正した。

(2) 分布型流域物質流動モデルの適用

a) モデルパラメータ

モデルパラメータ値は、既存の文献⁴⁾を参考に、実測河道流出負荷量（水質測定値×測定時流量）を再現するようにキャリブレーションを行い設定した。

b) 境界条件

基準地域メッシュ単位における自然系・人工系排出負荷量の算定には原単位法を採用した。発生源別原単位として、「霞ヶ浦に係る湖沼水質保全計画（第3期）」において検討された値⁷⁾を用いた。なお、対象とする汚濁物質はCOD、TN、TPとした。

面源系排出負荷量については、基準地域メッシュ毎に整理した土地利用別占有面積に土地利用別原単位を乗じて算定した。

下水道未整備区域における生活系排出負荷量については、市町村別の処理形態（下水処理以外の処理形態）別人口割合に処理形態別原単位を乗じて、市町村毎の排出負荷量原単位を算出し、基準地域メッシュ毎に対応する市町村の排出負荷量原単位と下水道未整備人口を乗じて算定した。

下水処理場に向かう生活系下水処理負荷量については、「未処理」の原単位に基準地域メッシュ毎の下水道整備人口を乗じて算定した。

下水道未整備区域における工業系排出負荷量については、基準地域メッシュ毎の工業系排水量に対応する市町村の産業中分類別使用量割合を乗じて基準地域メッシュ毎の産業中分類別排水量を算定し、これに産業中分類別原単位（水質）を乗じて算定した。

下水処理場に向かう工業系下水処理負荷量については、基準地域メッシュ毎の工業系処理水量に対応する市町村の産業中分類別使用量割合を乗じて基準地域メッシュ毎の産業中分類別処理水量を算定し、これに産業中分類別原単位（水質）を乗じて算定した。

農業系取水負荷量については、基準地域メッシュ毎の農業用水取水量に取水先の湖沼および河川水質を乗じて算定した。

畜産系排出負荷量については、「農業センサス：農業集落カード」（（財）農業統計協会）に収録されている農業集落毎の家畜（牛・豚）頭数を基準地域メッシュ毎に整理し、これに家畜別原単位を乗じて算定した。

(3) 各モデルの検証

a) 分布型流域水循環モデルの検証

解析期間は1994～1998年の5年間とし、日単位で計算を行った。モデルの検証は、河道流量に対して行った。再現結果の一例として、図-4に小野川小野川地点の実測値と計算値の比較を示す。

計算期間において、灌漑期の農業用水還元による増大を含めた低水時流量、および高水時流量ともに、実測値と計算値の両者は概ね良好な一致を示している。しかしながら、1997年の灌漑期の低水時流量については、実測値と計算値の間に不一致が生じている。境界条件である農業用水取水量は報告値を基に推定しており、1997年についてはこのデータ数が他年と比較して少なく、正確に推定できなかったことが上記不一致の原因と考えられる。

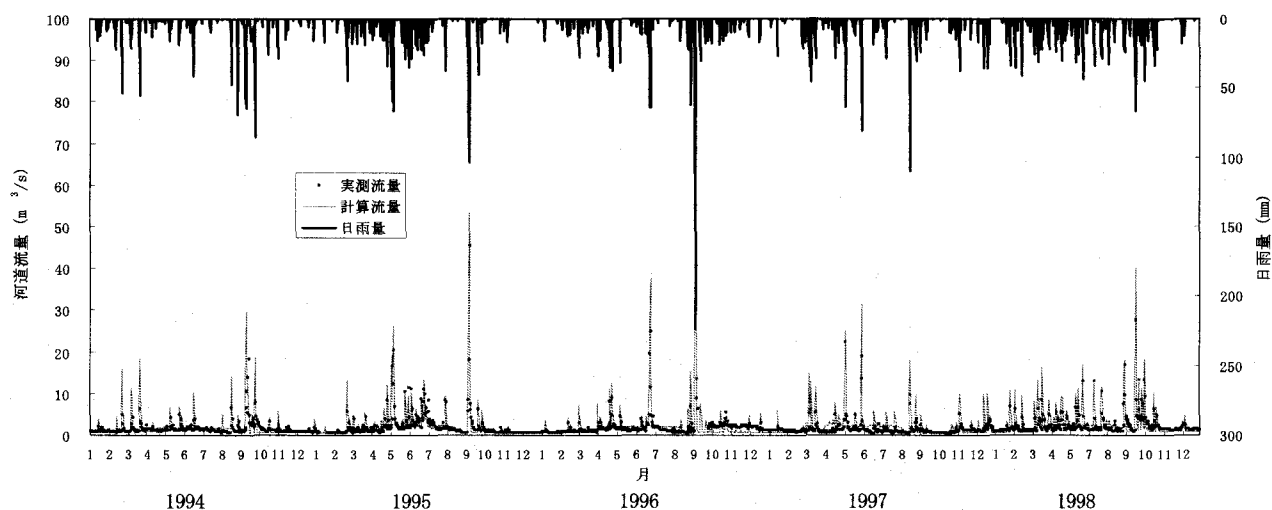


図-4 分布型流域水循環モデル河道流量再現結果（小野川小野川地点）

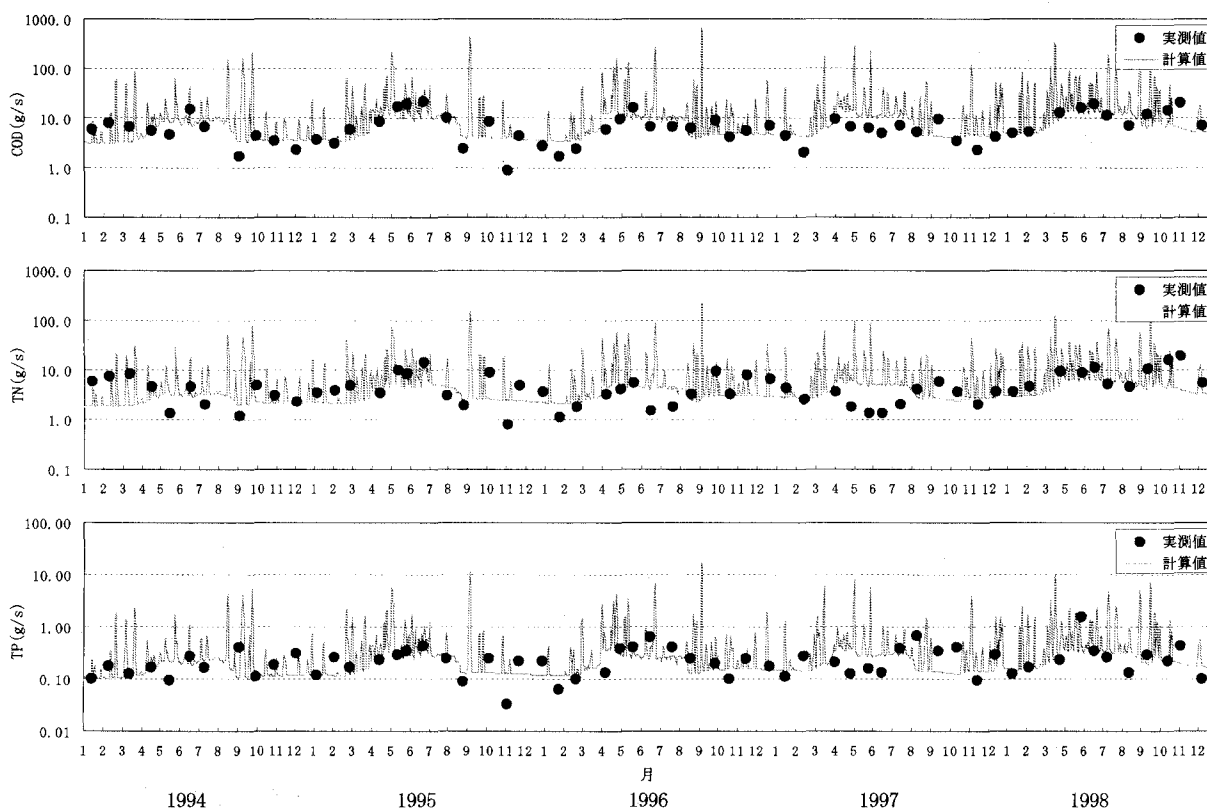


図-5 分布型流域物質流動モデル河道流出負荷量再現結果（園部川園部新橋地点）※縦対数軸

b) 分布型流域物質流動モデルの検証

解析期間は1994～1998年の5年間とし、日単位で計算を行った。モデルの検証は、河道流出負荷量に対して行った。再現結果の一例として、図-5に園部川園部新橋地点の実測値と計算値の比較を示す（縦対数軸）。なお、実測値としては公共用水域の水質測定結果（月1回程度の頻度）を使用しており、ここでの検証は主に低水時について行っている。

計算期間において、灌漑期の農業用水還元による低水時流量増大に伴う流出負荷量の増大を含めた低水時流出

負荷量については、COD、TN、TPともに実測値と計算値の両者は概ね良好な一致を示している。しかしながら、1997年の灌漑期の低水時流出負荷量については、特にTNとTPの実測値と計算値の間に明白な不一致が生じている。これらは上記原因によるこの期間の低水時流量の不一致に起因しているものと考えられる。

流域管理上重要な高水時流出負荷量については、測定データの不足から検証できていないものの、ここで分布型流域物質流動モデルにより計算された湖沼への年間総流達負荷量について確認すると、1995年において、COD

が23,485kg/日（報告値25,396kg/日⁸⁾の92%）、TNが10,519kg/日（報告値10,504kg/日⁸⁾の101%）、TPが667kg/日（報告値702kg/日⁸⁾の95%）であり、報告値とほぼ整合している。

(4) 年間物質収支の把握

上記各モデルの適用結果より、流域の物質収支を把握することができる。例として、図-6に1995年における霞ヶ浦全流域の年間物質収支図（TP）を示す。このような図は、他の汚濁物質収支や水収支についても作成することができ、あらゆる期間においても、また様々な流域規模や各メッシュ単位についても作成することができる。こうしたトータルシステムとしての現状把握を通して、どこを、何を、どの程度改善すべきかというような流域管理を行う上での重要な情報を与えることができる。

5. 湖沼（霞ヶ浦）水質の検証

分布型流域水循環モデルおよび物質流動モデルにより算定される湖沼に流入する河道流量および河道流達負荷量の精度について考察を加えることを主な目的として、湖沼（霞ヶ浦）の水質について検証を行った。

霞ヶ浦は、西浦、北浦、外浪逆浦と各水域を連携する河道からなる浅水湖であるため、湖沼水質モデルとしてメッシュ分割による平面2次元モデルを採用した。

(1) 平面2次元湖沼モデルの概要

平面2次元湖沼モデルとして、水位変動、湖水・物質の流動を表現するため、平面2次元非定常不定流モデルおよび平面2次元非定常移流・拡散モデルを採用した。なお、ここでは霞ヶ浦における比較的大規模な流動現象を対象としているので、非定常の流れを時間的平均流として取り扱い、渦動粘性係数および渦動拡散係数を一定値とし、それぞれについて各方向（x,y方向）ともに同一の値を用いた。

平面2次元非定常不定流モデルの計算手法としては、差分近似解法の一つであるADI法を適用した。また、平面2次元非定常移流・拡散モデルの計算手法としては、移流拡散方程式の効率的な計算法であるスプリット・オペレーター・アプローチを適用した。これは、方程式を移流計算と拡散計算に分離し、かつ移流方程式を各方向1次元の移流の連続した過程として計算する手法である。1タイムステップ内において、高精度のスキームである6-pointスキーム⁹⁾を採用した移流計算を完了させた後、そのデータを用いて拡散計算を実施している。

また、平面2次元非定常移流・拡散モデルには、底泥からのCODや栄養塩の溶出、植物プランクトンの増殖・死滅、有機物の無機化分解等の生物化学的生産・消費項と沈降項を考慮した富栄養化モデルを付加した。

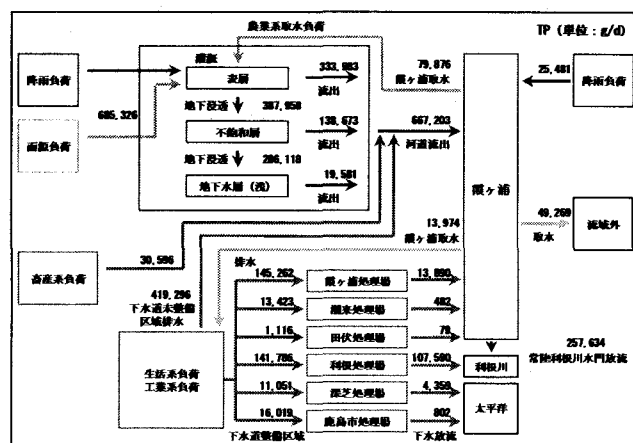


図-6 霞ヶ浦全流域の年間物質収支図（TP：1995年）

(2) 平面2次元湖沼モデルの適用

計算メッシュスケールには、計算時間、計算の安定性等を勘案し、基準地域メッシュを4分割した約500m四方のメッシュを採用した。

湖底標高は1/10,000湖沼図（国土地理院）から抽出した。また、初期条件として、計算開始時の西浦出島地点観測水位を全水域一定で与え、かつ、霞ヶ浦水域内各水質観測所の支配面積をティーセン分割のように割り当て、分割した水域に汚濁物質毎に観測水質を与えた。

a) モデルパラメータ

モデルパラメータ値には、底面摩擦係数：0.0026，風摩擦係数：0.0026，コリオリ係数： 8.3×10^{-5} ，渦動粘性係数： $1.8 \text{ m}^2/\text{sec}$ ，渦動拡散係数： $1.8 \text{ m}^2/\text{sec}$ をそれぞれ適用した。また、富栄養化モデルに関するパラメータ値については、霞ヶ浦における既往の検討¹⁰⁾を参考に設定した。

b) 境界条件

分布型流域水循環モデルのアウトプットである湖沼に流入する河道流量を境界条件として与えた。さらに、湖面への直接降水量，湖面蒸発量，湖沼を水源とする生活・工業・農業用水取水量，および各下水処理場から湖沼に排水される下水処理水量，湖沼からの流出量である常陸利根川水門放流量をそれぞれ境界条件として与えた。

分布型流域物質流動モデルのアウトプットである湖沼に流入する河道流達負荷量を境界条件として与えた。さらに、湖面への直接降雨負荷量，湖沼を水源とする生活・工業・農業用水取水負荷量，および各下水処理場から湖沼に排出される下水処理後負荷量，常陸利根川水門放流負荷量をそれぞれ境界条件として与えた。ここで、河道流達負荷量，湖面降雨負荷量，下水処理後負荷量は、分布型流域物質流動モデルとの連携上、窒素およびリンについて、TN，TPとして算定される。そこで、無機態窒素/有機態窒素比，無機態リン/有機態リン比を実測の全流入河川水質の平均値から推定して、上記負荷量を無機態分と有機態分に分割して与えることとした。

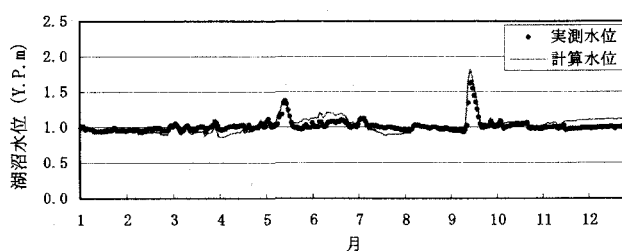


図-7 湖内物質流動モデル湖沼水位再現結果（西浦出島地点）

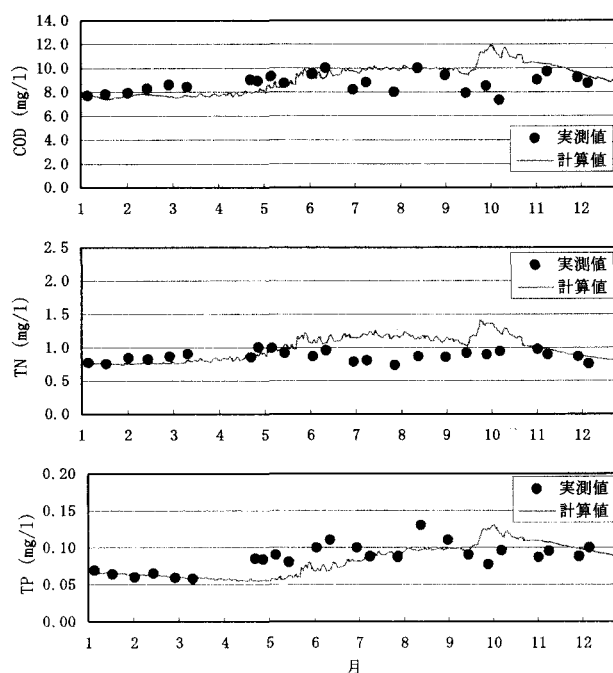


図-8 湖内物質流動モデル湖沼水質再現結果（西浦湖心地点）

なお、風向・風速データについては、土浦観測所（国土交通省）のデータを一樣に与えた。

(3) 湖沼水位・水質の検証

解析期間は1995年の1年間とし、平面2次元非定常不定流モデルは15秒単位で、平面2次元非定常移流・拡散モデルは2分単位で計算を行った。検証結果の一例として、図-7に西浦出島地点の湖沼水位の、図-8に西浦湖心地点の湖沼水質の実測値と計算値の比較を示す。

計算期間において、湖沼水位の両者は概ね良好な一致を示している。このことから、分布型流域水循環モデルにより算定された湖沼に流入する河道流量については、低水時、高水時を含めた年間を通して概ね妥当であると考えられる。一方、湖沼水質の実測値と計算値の間には、COD（7～10月）、TN（6～10月）に特に不一致が生じている。これらについては、湖沼モデルにおいて、夏季の底泥からの溶出を多く見積もりすぎたことも影響していると思われるが、分布型流域物質流動モデルにより算定された湖沼に流入する河道流達負荷量を正確に無機態分と有機態分に分割できていないことが主因と考えられる。

また、COD、TN、TPともに、9月の出水の影響により10月の水質計算値が増大しているが、実測値ではさほどその影響が見られない。このことから、分布型流域物質流動モデルは高水時の河道流達負荷量を正確に算定できていない可能性があると考えられる。

6. おわりに

本研究において、分布型流域水循環モデルと連動した各種人工系要素を含んだ総合的な分布型流域物質流動モデルを構築した。

分布型流域物質流動モデルの検証によって、低水時の河道流出負荷量については再現できることが確認できた。しかしながら、高水時の河道流出負荷量の再現性については確認できておらず、今後の早急な課題である。また、栄養塩類の無機態・有機態別河道流達負荷量を算定することにより、湖沼の水質予測を行う際の適切な境界条件を与えることができるようなモデルへの改良も望まれる。

謝辞：貴重な資料を提供して頂いた茨城県生活環境部霞ヶ浦対策課、同環境対策課、茨城県土木部下水道課、国土交通省霞ヶ浦工事事務所に感謝致します。

参考文献

- 1) 霞ヶ浦流域管理研究会：霞ヶ浦における流域管理手法の検討結果報告書，2000。
- 2) 安陪和雄，大八木豊，辻倉裕喜，安田佳哉：分布型流出モデルの広域的適用，水工学論文集，第46巻，pp. 247-252，2002。
- 3) 吉野文雄，吉谷純一，堀内輝亮：分布型流出モデルの開発と実流域への適用，土木技術資料，Vol. 32-10，pp. 54-59，1990。
- 4) 國松孝男，村岡浩爾：河川汚濁のモデル解析，技報堂出版，pp. 166-171，1989。
- 5) 鈴木俊郎，寺川陽，松浦達郎：実時間洪水予測のための分布型流出モデルの開発，土木技術資料，Vol. 38-10，pp. 26-31，1996。
- 6) 安陪和雄，大八木豊，安田佳哉：基準地域メッシュ単位における人工系水循環の推定，環境システム研究論文集，Vol. 29，pp. 321-330，2001。
- 7) 茨城県生活環境部霞ヶ浦対策課：霞ヶ浦に係る湖沼水質保全計画（第3期）策定関係資料集，pp. 57-124，1999。
- 8) 国土交通省霞ヶ浦工事事務所：霞ヶ浦・湖沼管理のための流動調査マニュアル，pp. II-16，2001。
- 9) 小松利光，朝位孝二，大串浩一郎，吉村耕市郎：拡散数値シミュレーションの最適計算手法に関する研究，土木学会論文集，No. 539/II-35，pp. 53-68，1996。
- 10) 国土交通省霞ヶ浦導水工事事務所：潤いの明日へつなぐ霞ヶ浦導水ー霞ヶ浦導水事業の役割と取り組みー，1995。

（2002. 9. 30受付）