

3 水物質循環モデルの構築

3.1 水物質循環とは

本研究で取り扱う水物質循環とは、地表における巨視的な水移動のシステムを意味する「水循環」と、この水循環に伴って運ばれる物質の流れのシステムを意味する「物質循環」を合わせたものである。

水循環は、降雨、貯留(窪地、湿地、湖沼等)、表面流出(河川等)、地下浸透(地下水の流れ等)、蒸発散といった自然系の水の循環と人工的に構築された上水道(河川からの導水、地下水の汲み上げ等)や下水道による雨水排水、汚水排水といった人工系の水の循環から構成されている。例えば、自然系と人工系の水循環系を模式化すると図-3.1.1、図-3.1.2のようになり、水が存在形態と存在場所を変えながら循環していることが分かる。また、この水循環に伴う汚濁負荷等の物質移動は、取水・排水、清掃等の人為的な現象と希釈、拡散、移流、沈殿、吸着・脱着、溶解・分解、浸透、掃流、生物による取り込み・排泄等の自然現象から構成されており、物質の移動過程で生物化学的な変化も生じている。

この水物質循環は、河川、湖沼等における水質、水量の問題を考えるに当たっての最も基本的かつ普遍的な工学的システムと言える。

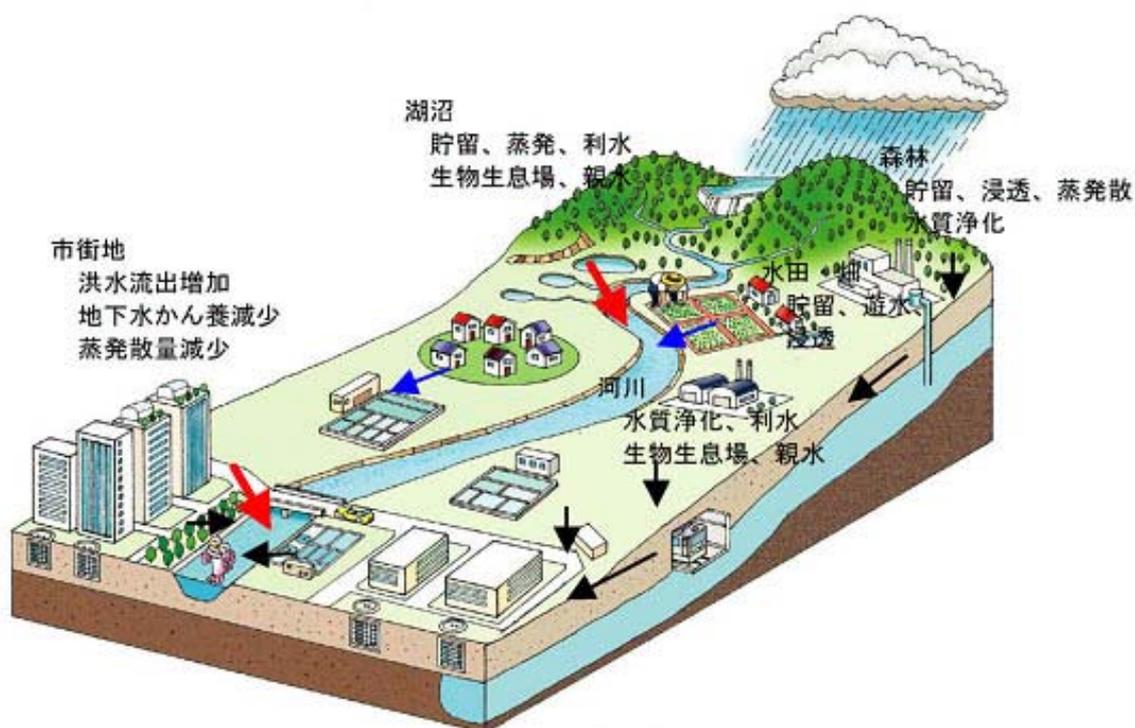


図-3.1.1 自然系の水循環系のイメージ¹⁾

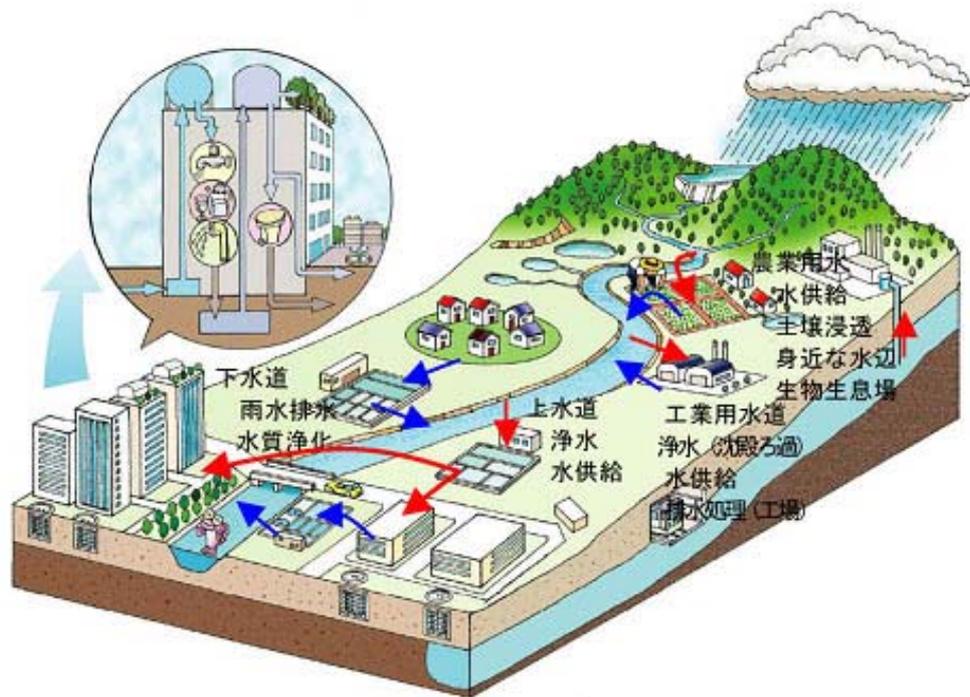


図-3.1.2 人工系の水循環系のイメージ¹⁾

3.2 水物質循環モデルとは

流域における水物質循環は、流域の状態を捉え、流域の健全性を診断し、流域再生のあり方を探るための最も基本的な現象である。水物質循環モデルには「水循環モデル」と「物質循環モデル」に分類される。水量を推定する水循環モデルには、年間総量ベースの大まかな四則演算により静的な水収支を定量化する簡便な方法（年間水収支法）から、経路毎の水量の時系列変動を推定できる精度の高いものまで種々の方法がある。表-3.2.1 に各方法の特徴を引用する。

水物質循環におけるシミュレーション・モデルとして、物理的な基礎式に基づいているか否かで、物理モデルと概念モデルに分けられる。概念モデルとしては単位図、タンクモデル、貯留関数法等が挙げられる。概念モデルは複雑な事象を単純化していることから、モデルパラメータの同定は、経験的であったり、試行錯誤的となる。一方、物理モデルは、各種提案されてきており、モデルパラメータは、水循環については基本的には対象流域の物性値で与えることができる。このことは、水循環系の将来予測や施策の効果の評価において、物理モデルのシミュレーション結果に一定の信頼性をおくことができる事を意味する。しかしながら、多くの要素をモデルに組み込み、複雑になるほどパラメータの数が膨大になることから、表-3.2.1 で示されているように、物理モデル構築に必要なデータや費用は莫大なものとなり、実務上の課題となっている。

表-3.2.1 水循環の定量化手法の特徴¹⁾

分類	年間水収支法	概念モデル	物理モデル
概要	降雨量、流量、人工系給排水量などの観測結果と地目別流出率などの経済的な係数により経路毎の循環量を概略推定するもの。計算は貯留量の時間変化を無視するため四則演算で実行される。 計算は極めて容易であるが、計算結果は年間値の目安程度の利用に留まる。	流出の各プロセスをタンクモデル、貯留関数などの概念的なモデルで表現したもの。モデル中のパラメータは観測流量と一致するように設定する。 年間水収支法、物理モデルの中間的な特徴を持つ。	流出の各プロセスを数理モデルで表現したもので、計算上の流向の仮定により1次元モデルから3次元モデルに分かれる。モデル中の定数は計測可能な物性値で設定することを前提とする。 精度の高い予測が期待されるが、演算に要するトータルコストが高い。
入力情報の多少	少	中	多
出力情報の多少	少	中	多
演算の難易度	低	中	高
結果の厳密性	低	中	高
計算時間単位	年	日	秒～時間
計算空間単位	流域一括	流域一括 あるいは小分割流域毎	計算格子点毎
入力条件 (計算空間単位毎)			
降雨量	年間値を入力	計算単位で入力	計算単位で入力
蒸発散量	実蒸発散量を入力	実蒸発散量を入力	可能実蒸発散量を入力
土地利用情報	浸透・不浸透の別を入力	浸透・不浸透の別を入力	浸透・不浸透の別、 等価精度係数を入力
人工系給排水量	年間値を入力	計算単位で入力	計算単位で入力
自然系保水特性	考慮せず	タンク孔定数、貯留量関数 等を入力	透水係数、不飽和帯特性 を入力
可動特性	考慮せず	考慮せず	形状、精度係数を入力
算定項目			
経路毎の年循環量	算定可	算定可	算定可
日流量・流況	算定不可	算定可	算定可
高水流量	算定不可	一部のモデルで算定可	算定可
地下水流出量	算定不可	一部のモデルで算定可	算定可
地下水位・かん養量	算定不可	一部のモデルで算定可	算定可

注)入力条件、算定項目は一般的な構成、内容を掲げたものであり、個別のモデルにより多少変化する。

水質を定量化するためのモデルには、流域全体を対象とした発生汚濁負荷量を算定し、水量との関係からこれを水質に変換するモデル、また、湖沼や河川における一定の領域を対象に有機物の内部生産を考慮した水質シミュレーションモデル等がある。前者は河川や湖沼に流出する汚濁物質の発生源を流域全体で把握し、水域の将来水質を予測する際に有効である。後者は河川や湖沼に排出された汚濁の集中や拡散等の状態を一定の領域内で把握する場合に有効である。

なお、水物質循環モデルの概論については、「都市小流域における雨水浸透、流出機構の定量的解明」研究会から出版されている「都市域における水循環系の定量化手法」に詳しく解説されているので参考にされたい²⁾。

3.3 水物質循環モデルの開発の意義

本研究で流域水物質循環モデルの検討対象としている霞ヶ浦流域では、流域の高度な土地利用と閉鎖性水域における沿岸域の開発などにより水環境などの悪化を招いている。これに対応するため様々な政策や事業が実施されてきているが、閉鎖性水域を抱える流域については未だ根本的な解決に至っていないケースが少なくない。このため、土地利用等流域条件や取排水条件の異なる様々な流域の水物質循環現象の再現が可能な分布型水物質循環モデルである「陸域モデル」と、流域からの外部負荷、底泥溶出等の内部負荷及び植物プランクトンの内部生産による水域の水質形成機構を表現できる「湖沼モデル」の統合モデルを構築することにより植生浄化などの自然再生や下水道整備などのインフラ整備をはじめとする様々な環境改善施策に対する検討を行うことが可能となる。また既存の知見の範囲内で過去の人口条件、土地利用状況、気象条件などを設定することにより、過去から現在に至る水環境の変遷を理解することができる。

3.4 研究における水物質循環モデルの開発目標

本研究では、以下の点に留意して水物質循環モデルを構築する。

水環境の改善に係わる政策検討を目的とした水物質循環モデル

本研究では、水問題の中でも特に平常時の水質・水量に係わる水環境問題の解決に資する「水物質循環モデル」を構築する。このため、流域の流出については、日平均流量のレベルで高水及び低水の再現を図るとともに、物質に関しては COD、N、P の汚濁負荷を対象の基本とする。

汎用型の水物質循環モデル

本研究で対象とする霞ヶ浦流域のみならず、全国各地域・水域の水物質循環現象の再現や水環境問題への適用が可能な汎用型モデルとする。このため、土地利用等流域条件や取排水条件の異なる様々な流域の水物質循環現象の再現が可能な分布型水物質循環モデルである「陸域モデル」と、流域からの外部負荷、底泥溶出等の内部負荷及び植物プランクトンの内部生産による湖沼の水質形成機構を表現できる「湖沼モデル」を構築する。

操作性の高い水物質循環モデル

本研究で開発される水物質循環モデルについては、今後普及し、全国の水環境問題の解決に資することを開発目的としており、このためには、シミュレーションモデルについて特別の知識を有しない現場管理者のレベルで、容易に使いこなせることが重要と考えている。このため、図-3.4.1 に示すように GIS をベースとしたユーザーインターフェイスを整備し、土地利用の改変等流域条件の変化や水環境に係わる様々な施策の入力や計算結果の出力を容易にする。

理論構造や計算内容が分かりやすい水物質循環モデル

開発対象とする水物質循環モデルについては、当該流域の水物質循環現象を限りなく精緻に再現するというよりも、関係者による現象や課題の共通理解、合意形成等を支援することを目的としており、政策議論に必要な精度・信頼性は確保しつつも、モデルの構造や計算の内容が分かりやすいモデルとすることとし、水物質循環の基本的現象に対応するモ

デルとする。なお、適用する流域や現象の特殊性により、本モデルの原理だけで対応できない場合に対して、その特殊性に対応する個別的・部分的モデルを作成し、本モデルに連結することによる適用性を確保する。

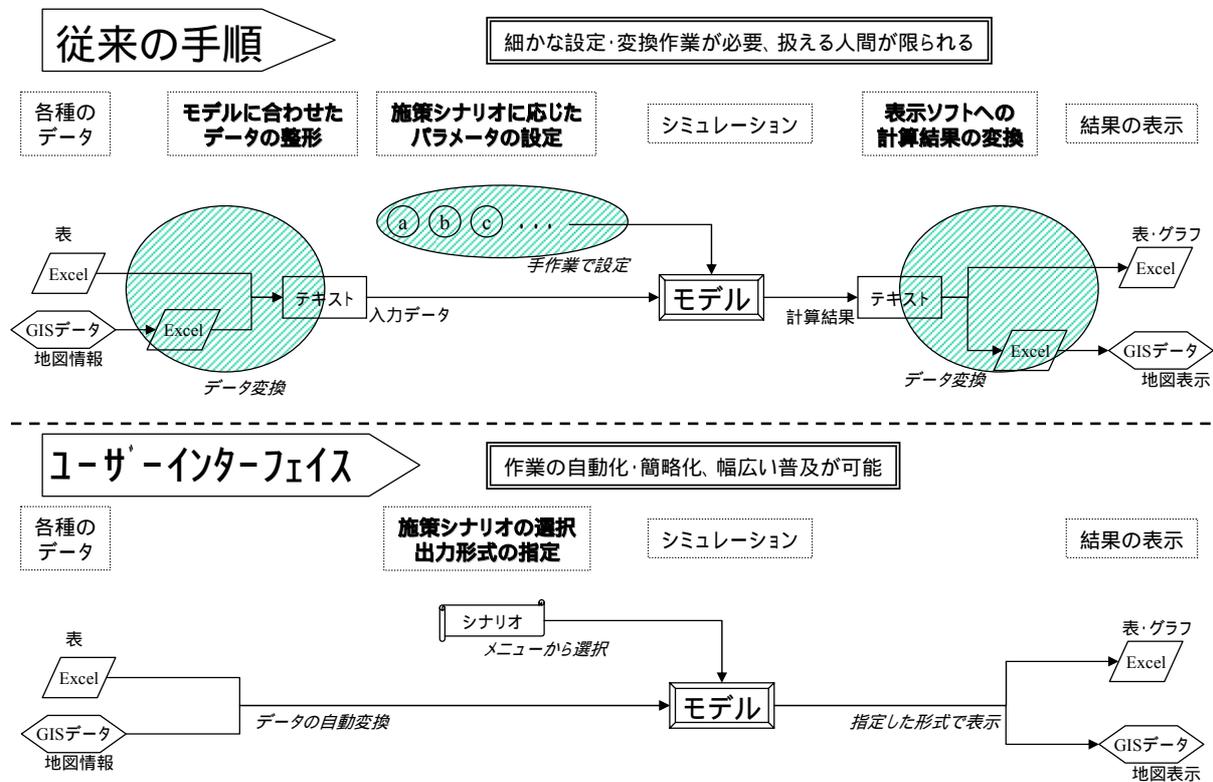


図-3.4.1 ユーザーインターフェイスの意義

3.5 本研究における水物質循環モデルの特徴

本モデルの特徴としては、以下のことが挙げられる。

分布型モデル：流域をメッシュに分割し、メッシュ単位で解析を行うことから、任意地点（メッシュ）での水・物質の挙動の解析・出力が可能

非定常モデル：平常時、降雨時を含めた任意時間での解析が可能

水量・物質連成解析モデル：水の挙動および物質の挙動の同時解析が可能

要素モデル統合型モデル：流域内の諸現象（蒸発散・地下水・地表流・河道流・湖沼）に応じて、各要素モデルにより解析し、それらを連成することによって流域全体の現象を解析

GIS連成型モデル：GISを介しての流域データのモデルへのインプットデータ作成、解析結果の格納、可視化

施策指向型モデル：雨水浸透マス設置や生活排水対策等、様々な水循環健全化施策による改善効果を解析することが可能

3.6 水物質循環モデルの概要

本研究で構築した流域水物質循環モデルは、以下の6つの要素モデルから構成されている分布型の物理モデルである(図-3.6.1)。

蒸発散モデル：流域の降雨の分配(蒸発散、地下浸透、表面流出)を行う。

地下水モデル：地下での水・物質の挙動(水位、流速、物質移動・拡散)、および地表への湧出(湧水量・湧水水質)を解析する。

地表流モデル：地表面での水・物質の挙動(水位、流速、物質移動・拡散)、および河川・湖沼への流出を解析する。

河道モデル：河道での水・物質の挙動(水位、流速、物質移動・拡散)、および湖沼への流出を解析する。

人工系モデル：生活系・事業所系・畜産系からの排出負荷量を解析する。

湖沼モデル：閉鎖性水域(湖沼)での水・物質の挙動(BOX 間流動、水質)を解析する。

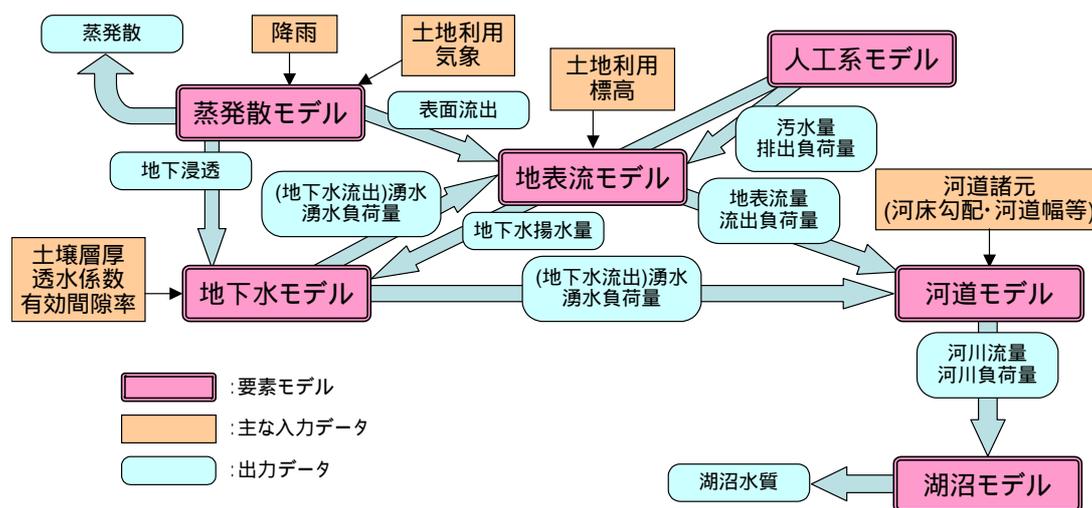


図-3.6.1 水物質循環モデルの概要

また、本モデルで追跡対象とする主な物質は陸域モデルでは COD、N、P、湖沼モデルでは COD、N、P、Chl-a である。モデルに時間雨量を入力することで、陸域における自然系・人工系の水循環と水循環をベースとした COD、T-N、T-P の移動、湖沼における植物プランクトンによる富栄養化現象等の再現・予測計算等、流域の様々な水・物質の挙動を直接解析することができる。

以下に各要素モデルについて示す。

3.6.1 陸域モデル

陸域モデルについては、水循環部分とそれに伴う物質流動部分に分けられるため、水循環部分について述べた上で、物質流動部分について述べる。

(1) 水循環モデル

1) 蒸発散モデル³⁾

a) モデルの概要

蒸発散モデルの概念図を図- 3.6.1.1に示す。蒸発散モデルは、流域に降った雨を、土地利用に応じて、蒸発散・地下浸透・表面流出に分配する要素モデルである。地表面に表層土壌層とその層にある土壌水分量を仮定し、土壌層への水の出入りを考えることによって、蒸発散量・地下浸透量・表面流出量を計算する。

また、蒸発散モデルはメッシュを計算単位として計算する。なお、蒸発散モデルにより計算される地下浸透量は地下水モデルへ、表面流出量は地表流モデルへ受け渡される。

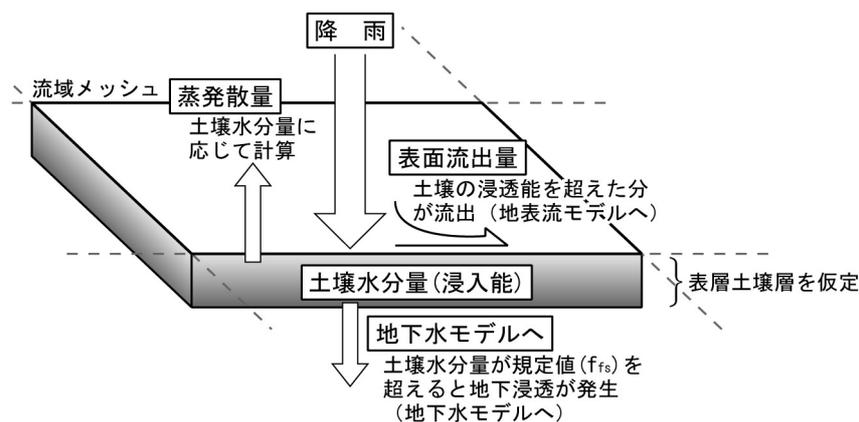


図- 3.6.1.1 蒸発散モデル概念図

b) 基礎式

表層土壌層の土壌水分量を θ とすると、 θ の収支式は以下のように表すことができる。

$$\theta(t + \Delta t) = \theta(t) + \int_t^{t+\Delta t} g(t)dt - \int_t^{t+\Delta t} Et(t)dt - \int_t^{t+\Delta t} Fs(t)dt$$

ここで、

$g(t)$: 時刻 t において土壌に浸入できる水分量: 土壌への浸入能(mm/hr)、

$Et(t)$: 蒸発散量(mm/hr)、 $Fs(t)$: 地下浸透量(mm/hr)

以降に、上式右辺の各項の計算方法を記述する。

ア) 土壌層への浸入能($g(t)$)の計算

ここで、土壌への水の浸入能について、一般に、地表面の水吸収能力を示す浸透能は降雨の継続と共に急激に減少し、やがて一定の最終浸透能に達する。その過程については、いくつかの式が提案されており、例えば *Horton* の提案した経験式で説明することができる⁴⁾。

Horton の浸入能方程式は、土壌にその土壌の浸入能を越えるような降雨が継続してあった場合の土壌の浸入能の時間変化を表したものである。一方、実際の現象では、常に土壌の浸入能を越えた降雨量があるとは限らず、必ずしも土壌の浸入能の時間変化は *Horton* の浸入能方程式と同じにはならない。また、時間の概念も異なってくる。

そこで、本モデルでは、実際の降雨による土壌への浸入能の時間変化を捉えるために、*Horton* の浸入能方程式での考え方を参考とし、土壌水分量を媒介とした式形を用いて、土壌の浸入能を計算することとする。

Horton の浸入能方程式：

$$f(t) = f_{\infty} + (f_{\max} - f_{\infty}) \exp(-\alpha \times t)$$

ここで、

$f(t)$: 浸入能(mm/hr)、 f_{\max} : 最大浸入能(mm/hr)、 f : 最終浸入能(mm/hr)、
: 逓減係数、 t : 降雨始め(*Horton* の実験開始)からの経過時間(hr)

いま、実際の降雨のような連続した現象を表すために、本モデルでは、上式の式形を引用して、下式のように考えることとする。

$$f(t' + \Delta t') = f_{\infty} + (f(t') - f_{\infty}) \exp(-\alpha \times \Delta t')$$

ここで、

$$H(\theta) = f(t')$$

とする。ただし、 t' は以下の式を満たす値である。

$$\theta(t) = \int_0^t f(t') dt' \quad 0 \leq t' \leq t_{\max}'$$

(*Horton* の式において土壌層から地下浸透が無いとした場合)

なお、 θ と t' の関係は下図のようになる。

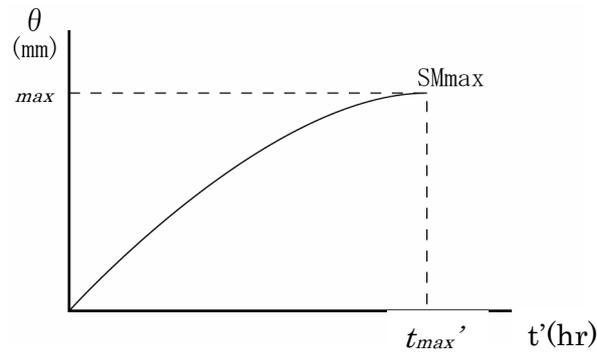


図- 3.6.1.2 土壌水分量 と t' の関係

いま、ある時刻 t_1 において、土壌水分量が θ_1 とすると、

$$g(t_1) = H(\theta_1) = f(t_1')$$

であり、 t_1' は、下式から求めることができる。

$$\theta_1 = \int_0^{t_1'} f(t') dt'$$

また、時刻 t_2 において、土壌水分量が θ_2 とすると、

$$g(t_2) = H(\theta_2) = f(t_2')$$

であり、 t_2' は、次式から求めることができる。

$$\theta_2 = \theta_1 + \int_{t_1}^{t_2} \min\{Ra(t), g(t)\} dt = \int_0^{t_2'} f(t') dt' = \theta_1 + \int_{t_1'}^{t_2'} f(t') dt'$$

$$Ra : \text{有効降雨量} (= r_f - Et \quad : r_f : \text{降雨量})$$

よって、 $f(t_2') = g(t_2)$ は、

$$f(t_2') = f(t_1' + t_2' - t_1') = f_\infty + (f(t_1') - f_\infty) \exp(-\alpha(t_2' - t_1'))$$

$$= f_\infty + (g(t_1) - f_\infty) \exp(-\alpha(t_2' - t_1'))$$

となり、時刻 t_1 の浸入能である $g(t_1)$ から、 $t_2 - t_1$ 後 (t 後) の浸入能 $g(t_2)$ を、 $t_2 - t_1$ t_2' - t_1' に変換することにより計算できる。

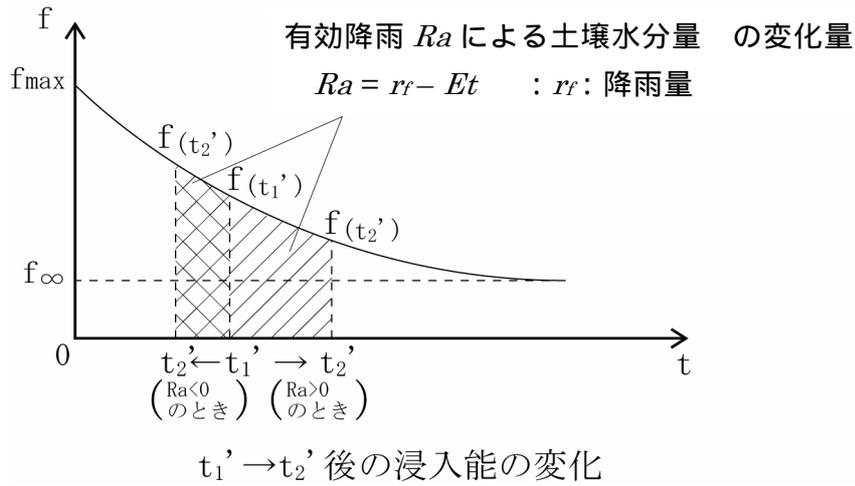


図- 3.6.1.3 t_1' t_2' の時の f の変化

なお、土壌層に浸入できる水分量には限界がある。その最大土壌水分量を SM_{max} とする。
 ここで、下式を用いて、最大土壌水分量 SM_{max} から、この SM_{max} に対応する最大浸入能 f_{max} を計算する。浸入能 $f(t')$ は、 f_{max} を越えないものとする。

$$SM_{max} = \int_0^{t_{fs}'} [f_{\infty} + (f_{max} - f_{\infty}) \exp(-\alpha t')] dt' + \int_{t_{fs}'}^{\infty} [f_{\infty} + (f_{fs} - f_{\infty}) \exp(-\alpha t') - f_{\infty}] dt'$$

ここで、 t_{fs}' : 浸入能 f_{fs} のときの時刻、 f_{fs} : 地下浸透が生じるときの浸入能

イ) 蒸発散量(E_t)の計算

蒸発および蒸散の機構は地被の状況や気象条件により複雑であり、研究者によって、ペンマンの式、ペンマン・モンテースの式、ソーンズウェイトの式、ハーモンの式等、種々の算出式が提案されている。

蒸発散量は、一般に、流域の土地利用や植生状態、土壌の水分状態、および気象条件に影響される。晴天が続くと土壌は乾燥し、蒸発散量は減少する。逆に降雨が続くと土壌は湿潤状態となり、蒸発散量は可能蒸発散量に漸近してくる。

そこで、本モデルでは、可能蒸発散能と土壌の水分条件等によって変化するパラメータである蒸発散比を用いて、蒸発散量を計算することとする。

可能蒸発散能の計算

可能蒸発散能の計算には、計算が容易で、かつ気象データの入手のしやすさから、ソーンズウェイトの式を採用することとする。ソーンズウェイトの式は、以下の通り定義される。

$$E_p = 0.533 \times D_0 \times (10 t_j / J)^a$$

$$a = 0.000000675J^3 - 0.0000771J^2 + 0.01792J + 0.49293$$

$$J = \sum_{j=1}^{12} \left(\frac{t_j}{5}\right)^{1.514}$$

ここで、

E_p : j 月の日平均蒸発散能(mm/日)、

D_0 : 可照時間(12 時/日を 1 とする)・・・下表参照、 t_j : j 月の月平均気温()

表- 3.6.1.1 可照時間 D_0 (12 時/日)

月	可照時間	月	可照時間
1	0.830	7	1.191
2(平)	0.900	8	1.123
2(閏)	0.902	9	1.033
3	0.992	10	0.938
4	1.087	11	0.854
5	1.167	12	0.809
6	1.209		

表- 3.6.1.2 ソーンズウェイト式による各月の日平均蒸発散能 E_p (mm/日)の算出

月	可照時間	平均気温 t_j 土浦(平年値)	$(t_j/5)^{1.514}$	Ep
	12hr/day			mm/day
1	0.830	3.6	0.61	0.18
2	0.900	4.2	0.77	0.25
3	0.992	7.3	1.77	0.63
4	1.087	12.7	4.10	1.60
5	1.167	17.2	6.49	2.72
6	1.209	20.3	8.34	3.63
7	1.191	23.8	10.61	4.55
8	1.123	25.7	11.92	4.82
9	1.033	22.2	9.55	3.55
10	0.938	16.7	6.21	2.09
11	0.854	11.0	3.30	1.01
12	0.809	6.0	1.32	0.38
			J=	65.00
			a=	1.52

土浦アメダス気温データから計算

蒸発散比と蒸発散量の計算

蒸発散量 $E_t(t)$ (mm/日)は、下式により計算する。

$$E_t(t) = ETR(t) \times E_p(t)$$

ここで、蒸発散比 $ETR(t)$ は下式の通り。

$$ETR(t) = PET \left(1 - \frac{2}{1 + \exp(-k \times SW(t))} \right)$$

PET : 蒸発散比の最大値、 k : 係数、 $E_p(t)$: 可能蒸発散能(mm/日)

$SW(t)$: 最大土壌水分量 SM_{max} に対する土壌水分量の割合(= t/SM_{max})

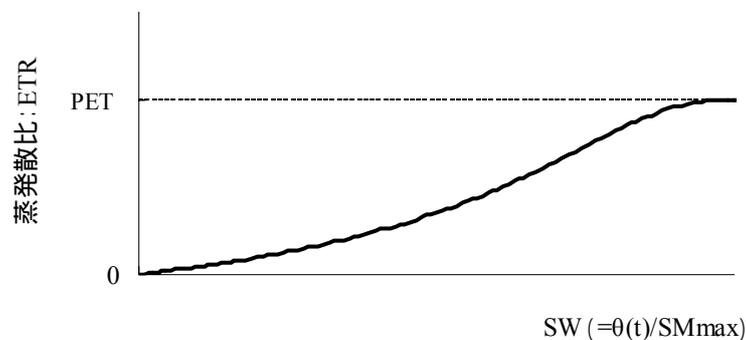


図- 3.6.1.4 蒸発散比と土壌水分量の関係の概念図

ウ) 表面流出量(Q_s)の計算

表面流出量を Q_s とすると、 Q_s は以下の式により計算する。

$$Q_s = r_f - g(t) - Et(t) - F_s(t) \quad \text{ただし、} Q_s < 0 \text{ なら、} Q_s = 0$$

ここで、

Q_s : 表面流出量(mm/hr)、 r_f : 降雨量(mm/hr)、
 $g(t)$: 時刻 t の土壌への浸入能、 $Et(t)$: 蒸発散量(mm/hr)、
 $F_s(t)$: 地下浸透量(mm/hr)

イ) 地下浸透量(F_s)の計算

地下浸透量 $F_s(t)$ は以下の条件より計算する。

$$\begin{cases} g(t) \text{ が } g_{fs} \text{ を越える場合、} & g(t) \geq g_{fs} & F_s(t) = 0 \\ g(t) \text{ が } g_{fs} \text{ を下回る場合、} & g(t) < g_{fs} & F_s(t) = f_{\infty} \end{cases}$$

ここで、 g_{fs} : 地下浸透が生じるときの浸入能、 f_{∞} : 最終浸入能

一般に、土壌中に十分な水分量が供給されると、それまで毛管力等により土壌中に保持されていた水分量が、重力に耐えきれなくなり、地下へと浸透を始める。このような土壌水分量となるとききの浸入能が g_{fs} である。これまでの研究により、その地下浸透量は、土壌水分量によらずほぼ一定値であることがわかっている。また、その量は f_{∞} に一致することが示されている。これらのことから、本モデルでもそのように扱うこととする。

従って、地下浸透量 $F_s(t)$ は、浸入能 $g(t)$ が地下浸入能 g_{fs} を下回った場合、 f_{∞} で生じるものとする。

c) 蒸発散モデルのパラメータ

蒸発散モデルで設定が必要となるパラメータを表- 3.6.1.3に示す。パラメータは考慮する土地利用ごとに設定する必要がある。例えば、文献 4)に現地試験による最終浸透能を、文献 5)に他事例における蒸発散モデルのパラメータ値が示されている。

表- 3.6.1.3 蒸発散モデルにおけるパラメータの設定例

地目	最大土壌水分量 (mm)	逓減係数 (1/hr)	最終浸入能 (mm/hr)	最大蒸発散比	蒸発散係数
	SM_{max}		f	PET	k
山林	150	0.3	6	1.2	0.13
水田	80	0.6	3	1	0.13
畑	80	0.5	4	1	0.13
市街地・宅地	50	0.7	1	0.9	0.18
道路	50	0.7	1	0.9	0.18
荒地	80	0.7	3	1	0.13
その他	80	0.7	3	1	0.13
水面	10	0.9	0.01	1	0.5

水面では、常時水面があることから、土壌水分量が常に最大であるとして、蒸発散の計算を行っている。すなわち、水面では、常に可能蒸発散能での量が蒸発していることになる。

最終浸入能について、設定したパラメータは文献⁴⁾に示されるような現地試験等から得られる最終浸入能（山林：300mm/hr等）とは合致していない。このことについて、(1)本モデルでのメッシュはある程度の広さをもつことから、そのメッシュ内での平均的な浸透能として考えている。また、(2)地下浸透量は表土層の状況だけで決まるものではなく、さらにその下の層の湿潤状況等の影響も受けることから、現地試験から得られる浸入能より浸入能が小さくなる場合もある。以上のことから、本モデルでは、これらの影響等を加味して最終浸入能を設定することと考える。

2) 地下水モデル

a) 基礎式

図- 3.6.1.5に示すように、土壌層の飽和側方浸透流と山体地層の地下水流動は、平面 2次元多層浸透流により解析する。構成式は以下に示すとおりである(図は 3 層の場合)。

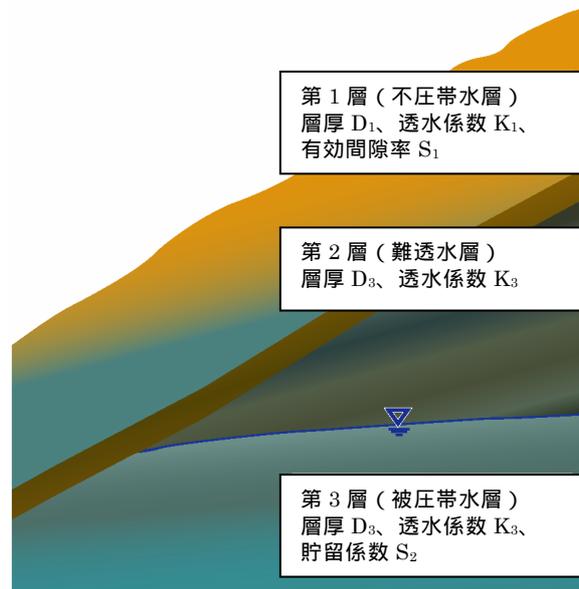


図- 3.6.1.5 地下水層のイメージ

$$\text{第 1 層(不圧帯水層)}: S_1 \frac{\partial h_1}{\partial t} = T_1 x \frac{\partial^2 h_1}{\partial x^2} + T_1 y \frac{\partial^2 h_1}{\partial y^2} + q_p - q_1 - Q_1 - q_{sp}$$

$$\text{第 2 層(難透水層)}: q_1 = K_2 \times D_2 \times A \times (h_1 - h_3)$$

$$\text{第 3 層(被圧帯水層)}: S_3 \frac{\partial h_3}{\partial t} = T_3 x \frac{\partial^2 h_3}{\partial x^2} + T_3 y \frac{\partial^2 h_3}{\partial y^2} + q_1 - Q_2$$

ここで、

T_1 : 第 1 層の透水量係数(= $K_1 \times D_1$)

T_3 : 第 3 層の透水量係数(= $K_3 \times D_3$)

D_1 : 第 1 層の層厚

D_2 : 第 2 層の層厚

D_3 : 第 3 層の層厚

K_1 : 第 1 層の透水係数

K_2 : 第 2 層の透水係数

K_3 : 第 3 層の透水係数

S_1 : 第 1 層の有効間隙率

S_3 : 第 3 層の貯留係数

h_i : 各層の水頭

q_p : 降水からの涵養量(地下浸透量)

q_1 : 難透水層への漏水層

q_{sp} : 地表面への湧水量

A : メッシュ面積

Q_1 : 浅井戸揚水量(第 1 層からの揚水)

Q_2 : 深井戸揚水量(第 3 層からの揚水)

b) 湧水の湧出機構

湧水は、第1層の地下水位が地表面標高よりも高くなった場合に発生する。実現象では、地下水位は地表面標高よりも高くなることはないことから、湧水となって地表に湧出している。モデルでは、地下水位と地表面標高との水位差に透水係数(漏水係数)を乗じて、湧水量を計算する。

$$q_{sp} = l_r (h - h_r) \times A / D$$

q_{sp} : 湧出(漏水)量(m³/s)、 h_B : 地表面標高(m)、 h_I : 第1層の地下水位(m)、
 l_r : 漏水係数(m/s)、 A : メッシュ面積(m²)、 D : 層厚(m)

また、湖沼底からの湧出水については、地表面の場合と同様の計算方法で、湖沼メッシュでの第1層地下水位が湖沼水位よりも高くなった場合に、湖底からの湧水量を計算する。

c) 地下水モデルのパラメータ

地下水モデルで設定が必要となるパラメータを図- 3.6.1.5に示す。パラメータは考慮する土地利用ごとに設定する必要がある。設定例を表- 3.6.1.4 に示す。

表- 3.6.1.4 地下水モデルのパラメータの設定例

	低地台地等分類	透水係数	漏水係数	有効間隙率	貯留係数
		m/s	m/s	-	-
第1帯水層	1 崖	1.0E-05	1.0E-02	0.3	-
	2 低地	1.0E-05	5.0E-03	0.3	-
	3 台地	1.0E-05	8.0E-03	0.3	-
	4 山地	1.0E-05	7.0E-05	0.3	-
	5 水面	1.0E-05	1.0E-02	0.3	-
難透水層	1 崖	-	1.0E-08	-	-
	2 低地	-	1.0E-08	-	-
	3 台地	-	1.0E-08	-	-
	4 山地	-	1.0E-08	-	-
	5 水面	-	1.0E-08	-	-
第2帯水層	1 崖	1.0E-05	-	-	0.01
	2 低地	1.0E-05	-	-	0.01
	3 台地	1.0E-05	-	-	0.01
	4 山地	1.0E-05	-	-	0.01
	5 水面	1.0E-05	-	-	0.01

3) 地表流モデル

a) 基礎式

正方メッシュで分割された流域メッシュにおいて、ダイナミックウェーブ・モデルを用いて、平面二次元不定流として計算する。

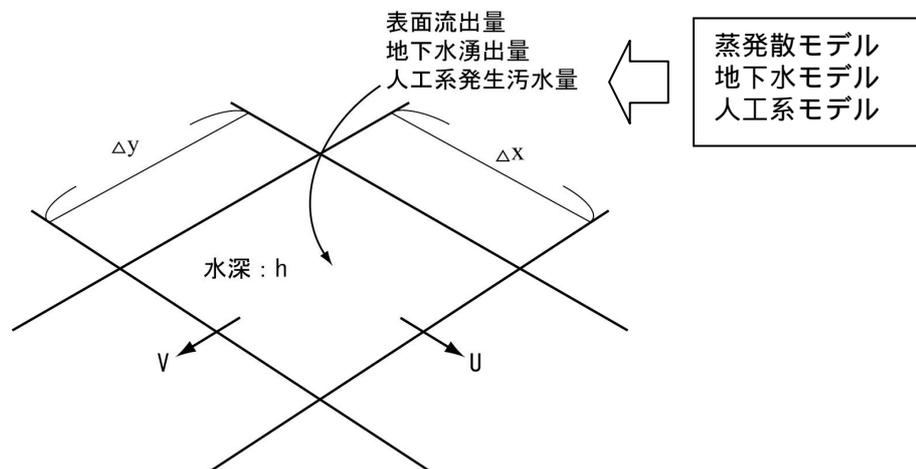


図- 3.6.1.6 正方メッシュのイメージ

$$x - \text{方向の運動方程式:} \quad \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} uM + \frac{\partial}{\partial y} vM = -gH \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{\tau_{xb}}{\rho}$$

$$y - \text{方向の運動方程式:} \quad \frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} uN + \frac{\partial}{\partial y} vN = -gH \frac{\partial h}{\partial y} - \frac{\tau_{yb}}{\rho}$$

$$\text{連続式:} \quad \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = r_e$$

ここで、

M 、 N : x 、 y 方向の流量フラックス

$M = uh$ 、 $N = vh$ u 、 v : x 、 y 方向の流速

H 、 h : 水深

r_e : メッシュ発生水量・・・表面流出量、地下水湧水量、人工系汚水量の合計値

τ_{xb} 、 τ_{yb} : 摩擦速度・・・ Manning式を用いて、次式から算出する。

$$\tau_{xb \text{ or } yb} = gn^2 (u \text{ or } v) \sqrt{u^2 + v^2} / h^{1/3}$$

n : 粗度係数

b) 水田メッシュにおける計算方法

ア) 基礎式

水田における流出計算には、欠口流出法を採用する。欠口流出法は、水田に降った雨は一時田面に貯留された後、水田の欠口部から流出するものとして、清野によって提案されたものである。基礎式は水田に対する連続の条件から以下ようになる。

$$\frac{dz}{dt} = \frac{R(t) \cdot A - q}{A}$$

ここで、

z : 水田水深、 A : 水田面積、 R : 降雨量、 q : 欠口部流出量

欠口からの流出量 q を広頂堰として本間公式を用いる。計算式は以下の通り。

- ・ 完全越流の場合 $\left(\frac{2}{3}h_1 \geq h_2\right)$ $q = 0.35 \cdot B \cdot h_1 \sqrt{2gh_1}$
- ・ 潜り堰の場合 $\left(\frac{2}{3}h_1 < h_2\right)$ $q = 0.91 \cdot B \cdot h_2 \sqrt{2g(h_1 - h_2)}$

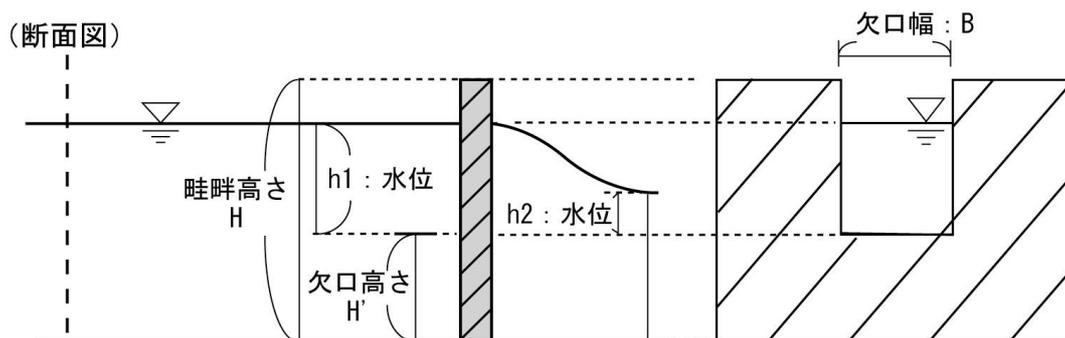


図- 3.6.1.7 水田メッシュにおける欠口流出法による計算方法

イ) かんがい用水量の設定

栽培期ごとに維持湛水深(モデル中では欠口高さ)を設定し、水田での減水量(地下浸透+蒸発散量+流出量)を補う量を水田のかんがい水量(用水量)とする。ただし、代かき期については、実際、用水量は多くなるので、補正係数(1.2程度)を乗じることにより調整する。

[水田用水量]

$$= [\text{前時間水田水量}] + [\text{降雨量}] - [\text{地下浸透量} + \text{蒸発散量} + \text{地表流量(差引量)}]$$

水深 < 期別湛水深のとき：かんがい用水量(補給量) = (期別湛水深 - 水深) × 水田面積

水深 > 期別湛水深のとき：かんがい用水量 = 0

c) パラメータ

ア) 地盤高

地盤高は、標高データで与える。1つのメッシュでの地盤は水平とする。

イ) 粗度係数

国土交通省土木研究所(現、国土技術政策総合研究所)における研究(洪水氾濫シミュレーション)においては、粗度係数 n を土地利用によって分類し、建物と農地では 0.060、道路では 0.047、その他では 0.050 とし、氾濫域あるいは一つの差分格子内でそれぞれの土地利用の面積によって加重平均を取るとともに、さらに建物占有率によって補正を加える方法が提案されている。

ここでは同様に、土地利用区分ごとに粗度係数を与え、メッシュ内の土地利用比率から、加重平均を取ることによって、合成した粗度係数を与える。

表- 3.6.1.5 粗度係数の一例

土地利用区分	山地	水田	畑	宅地	市街地	道路	公園	水面
粗度係数	0.7	-	0.3	0.1	0.03	0.01	0.3	0.02

ウ) 人工系汚水量

人工系モデルにより、メッシュ格子ごとに計算された汚水量を用いる。(計算方法の詳細は後述)

エ) 表面流出量

蒸発散モデルにより計算される表面流出量を用いる。

オ) 水田・調節池

欠口流出計算では水田の畦畔の高さ、欠口の高さ、欠口幅を設定する。

表- 3.6.1.6 水田・調節池のパラメータ

No.	パラメータ	変数	単位
1	畦畔高さ 堤防高さ	H	m
2	欠口の高さ 越流堰の高さ	H'	m
3	欠口幅 越流堰の幅	B	m

4) 河道モデル

a) 基礎式

河道における流れは、1次元 kinematic-wave モデルにより計算する。

地表流モデルにより計算される流域メッシュからの地表流量、および地下水モデルにより計算される地下水の湧出量を入力条件として計算を行う。

基礎式は、以下のとおり。

$$\text{連続式} \quad : \quad \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q$$

$$\text{運動量式} \quad : \quad Q = A \times \frac{R^{2/3} I^{1/2}}{n}$$

ここで、

Q : 流量、 A : 流水断面積、 q : 横流入量、 R : 径深、 n : 粗度係数、 I : 河床勾配

b) パラメータ

ア) 河床標高・河道幅

河床標高・河道幅は、入力データとして与える。

イ) 河床勾配

河床勾配は、上流側・下流側メッシュの河床標高差から求める。

ウ) 粗度係数

入力データとして、河道メッシュごとに「河道状況」といった属性を与え、その河道状況に応じて粗度係数を設定する。

(2) 物質循環モデル

1) 地下水モデル

a) 基礎式

地下水水質は、平面 2 次元移流拡散方程式を採用し、計算を行う。また、土壌内での水質変化として、土壌への吸着、分解等の項を方程式中に加える。

$$R_d \frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{xx} \frac{\partial C}{\partial x} + D_{xy} \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_{yx} \frac{\partial C}{\partial x} + D_{yy} \frac{\partial C}{\partial y} \right) + L_{in} - L_{sp}$$

ここで、

C : 物質濃度、 u 、 v : 地下水流速、 R_d : 吸着係数(遅れ係数)、

L_{in} : 地表面からの供給負荷量(農地および降雨からの負荷)、

L_{sp} : 湧水による地表面への湧出負荷(= $q_{sp} \times C$)

$D_{xx} = D_{xy} = D_{yx} = D_{yy} = D$: 分散係数(等方性を仮定)

地下層内物質の鉛直方向の移動について

通常、地下に浸透した負荷量は、時間遅れをともなって徐々に地下方向、水平方向に拡がっていくが、本モデルは平面 2 次元モデルであるため、地表から地下に浸透した負荷量は、地下層第 1 層の鉛直方向に瞬時に拡がる。このため、地表面から地下に浸透した負荷量が経時的にどのように拡がるのかを再現することは難しい。しかし、地表面から与えられる負荷の一定条件のもとで定常状態に達したときにどの程度の地下水水質、湧水水質になるのかを予測することは可能である。

b) 土壌の吸着

地下水に含まれる物質が土壌粒子に吸着される場合には、地下水濃度と土壌表面に吸着されている物質濃度との間に吸着等温式が成立する。ここでは、可逆的であり、両者の間で吸脱着過程があると仮定すると、吸着係数(遅れ係数)は以下の式で表現する⁶⁾。

$$R_d = 1 + \frac{(1-n)\rho_s}{\theta} k_d$$

ここで、

n : 土壌間隙率、 ρ_s : 土壌の真密度、 θ : 体積含水率、 k_d : 分配係数

2) 地表流モデル

a) 基礎式

地表面の汚濁負荷の流達は、地表面の水の流動により生じるメッシュ間移流負荷と、該当メッシュで発生する人工系排出負荷、自然系排出負荷、湧水負荷とを用いて、メッシュ単位での収支式により計算を行う。

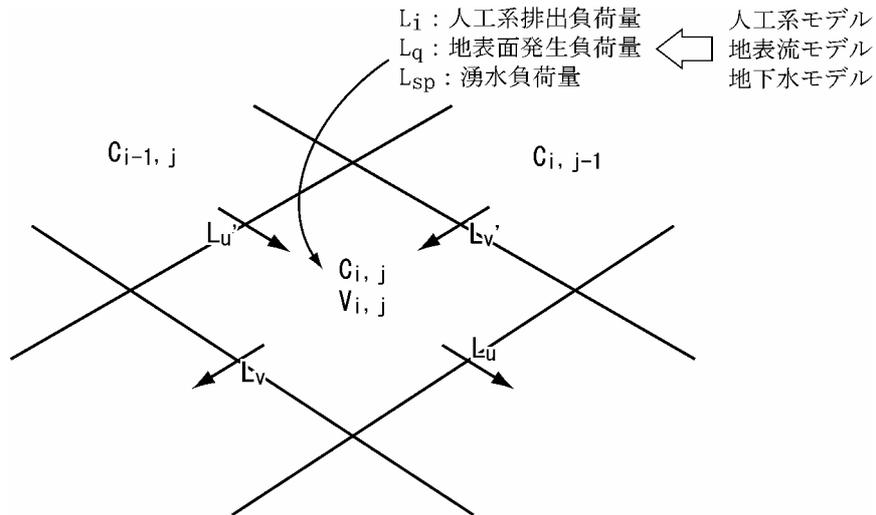


図- 3.6.1.8 地表流モデルの物質収支のイメージ

メッシュごとの収支式を下式に示す。

$$\frac{\partial(C_{i,j}V_{i,j})}{\partial t} = \underbrace{(L_{u'} + L_{v'})}_{\text{(メッシュ間移流負荷項)}} - \underbrace{(L_u + L_v)}_{\text{(メッシュ発生負荷項)}} + L_i + L_q + L_{sp}$$

人工系負荷 L_i 、地表面発生負荷 L_q の算出方法は後述する。湧水負荷 L_{sp} の算出は前述のとおりである。

b) 流域の浄化機能

ア) 基礎式

流域の浄化機能については、実際流域を流れる水は、山林等では水みち、市街地や宅地では側溝や排水路等を流下していることが多い。このため、浄化の機構としては河道での機構と類似していると考えられる。

従って、流域の浄化機能は河道の浄化機能と同様に、Streeter-Phelps 式によって評価する。

$$C = C_0 e^{-kt}$$

ここで、

C : メッシュ内の物質濃度(mg/l)、 C_0 : $t = t_0$ のときの C 、 k : 浄化係数

1) 浄化係数

浄化係数は、物質項目ごと、土地利用ごとに設定する。ただし、水面では浄化作用は生じないことから、浄化係数はゼロとする。

c) 地表面負荷の発生

ア) 降雨からの負荷

地下水水質の計算時と同様に、下式により算出する。

$$[\text{降雨負荷(g/s)}] = [\text{降雨水質(g/m}^3\text{)}] \times [\text{表面流出量(m}^3\text{/s)}]$$

ここで、表面流出量は、蒸発散モデルにおいて算出された値を用いる。

イ) 降雨時表面流出による負荷の発生

降雨時の地表面から発生する負荷は、負荷堆積量を考慮した雨天時流出負荷量算定モデルを用いる。このモデルは下式により表現される。

$$L = k \times S^m \times (Q - Q_c) Q^n$$

$$S = S_0 - \int L$$

ここで、

L : 流出負荷量(g/s)、 Q : 表面流出量(m³/s)、 Q_c : 限界流量(m³/s)、

S : 堆積負荷量(g)、 S_0 : 初期堆積負荷量、 $k \cdot m \cdot n$: パラメータ

堆積負荷量と流出負荷量の関係図を図- 3.6.1.9に示す。降雨時に表面流出 Q が生じ、限界流量 Q_c を超えると、その時の堆積負荷量 S に応じた負荷が発生し、流出する。負荷が流出することにより堆積負荷量 S は減少する。降雨が継続すれば、減少した堆積負荷量 S に応じた負荷が発生し、流出する。降雨中はこの過程を繰り返し、負荷が流出し、堆積負荷量 S が減少する。

無降雨時には、 S により堆積負荷量 S が回復する。無降雨が継続し、最大堆積負荷量 S_{max} に達すると、それ以上堆積負荷量は増えない。

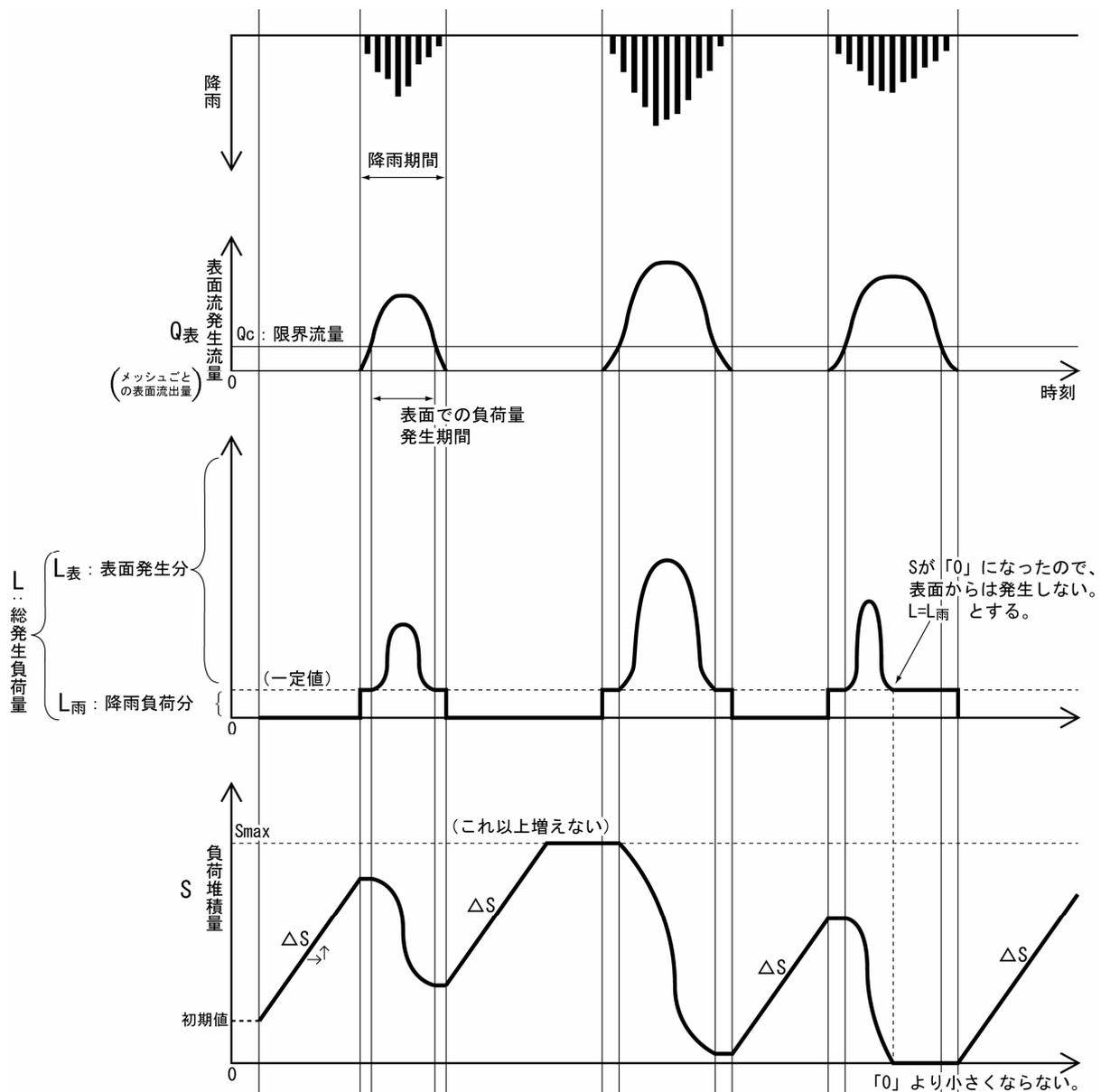


図- 3.6.1.9 堆積負荷量の変化と表面発生負荷量の関係

り) 農地からの負荷の発生

i) 降雨からの負荷

ここでは、降雨水質が土壤中で変化することなく、地下浸透とともに地下に浸透すると考え、降雨水質に地下浸透量を乗じて求めた負荷量を地下への降雨負荷とする。

ii) 水田からの負荷

かんがい期における水田からの負荷発生概念図を図-3.6.1.10 に示す。この図から、水田メッシュにおける物質(水質)の収支を、次式のように表現する。水田メッシュでの水質と同じ水質が地下に浸透するとし、水田からの地下浸透量とともに地下へ供給される。

非かんがい期については、畑での負荷量計算と同様の計算方法とする。

【物質量の収支式】

[水田メッシュ内物質量]

$$= [\text{前ステップ物質量}] + [\text{肥料溶脱量}] \\ + [\text{降雨負荷量}] - [\text{地下浸透負荷量}] - [\text{流出負荷量}]$$

[肥料溶脱量(g)] = [肥料溶脱定数] × [残存肥料量(g)]

[残存肥料量(g)]

$$= [\text{施肥量(kg/ha)}] \times [\text{面積(m}^2\text{)}] \times 1/10 - \int \text{肥料溶脱量 dt} - \text{作物収穫量(g)}$$

[地下浸透水質(g/m³)] = [水田物質量(g)] / [水田水量(m³)]

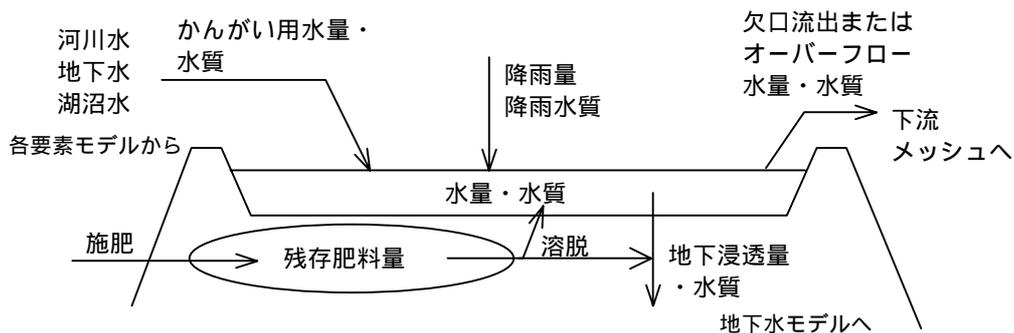


図- 3.6.1.10 水田からの負荷発生概念図

iii) 畑からの負荷

畑からの負荷発生概念図を下図に示す。この図から、畑メッシュにおける肥料の溶脱量を下式のように表現する。降雨時(地下浸透発生時)に溶脱が生じ、溶脱量を地下へ浸透させる。

【肥料量の収支式】

$$[\text{肥料量(g)}] = ([\text{施肥量(kg/ha/年)}] \times [\text{面積(m}^2\text{)}]) \times t - \int \text{肥料溶脱量 dt}$$

[肥料溶脱量(g)] = [肥料量(g)] × [肥料溶脱定数]

[地下浸透水質(g/m³)] = [溶脱量(g)] / [地下浸透量(m³)]

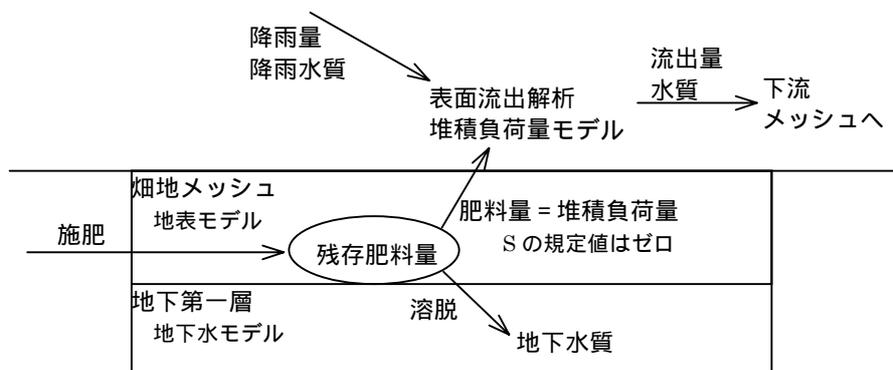


図- 3.6.1.11 畑からの負荷発生概念図

3) 河道モデル

a) 基礎式

河道における物質の挙動(流達)は、流域で計算された河道への流入負荷と河道に直接湧出する湧水の負荷を入力条件として、1次元移流方程式により計算する。

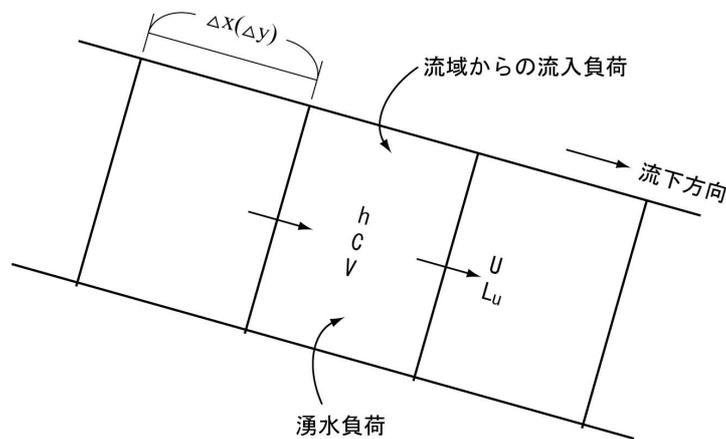


図- 3.6.1.12 河道モデルにおける物質の挙動

$$\frac{\partial V \cdot C}{\partial t} + u \frac{\partial V \cdot C}{\partial x} = Li$$

ここで、

V : 河道メッシュ体積($A \times h$)(m^3)、 C : 河川水質濃度(mg/L)、 u : 流速(m/s)、 Li : 外部流入負荷量(流域からの流出負荷量、湧水負荷量)(g/s)

b) 河道の浄化機能

ア) 基礎式

河川の浄化機能は、Streeter-Phelps 式によって評価する。

$$C = C_0 e^{-kt}$$

ここで、

C : 物質濃度(mg/l)、 C_0 : $t = t_0$ のときの物質濃度(mg/L)、 k : 自浄係数
一次元移流拡散方程式において、等速定流を仮定し、拡散を無視すると得られる。

イ) 浄化係数

COD の場合、自浄作用としては微生物分解と沈殿がある。よって、 $k = k_{\text{分解}} + k_{\text{沈殿}}$ と分けて考える。T-N の場合、自浄作用として脱窒と沈殿があるが、脱窒は嫌気状態でのみ発生するため、嫌気化した底泥を除いて発生は無視する。よって沈殿のみを考える。T-P の場合、自浄作用は沈殿のみである。

浄化係数の一例を表- 3.6.1.7に示す。

表- 3.6.1.7 河川水質モデルの浄化係数の一例

水質項目	浄化係数 k				根拠
	A = B+C+D	沈殿	分解	脱窒	
		B	C	D	
COD	1.4	1.0	0.4	-	文献値 ⁷⁾ に基づき設定
T-N	0.1	0.1	-	0.0	仮定値
T-P	0.1	0.1	-	-	仮定値

現地における流下方向の水質調査結果などに基づき設定することが望ましい。

り) 河川の浄化機能の評価

河川の浄化機能进行评估する場合、植生繁茂区間、自然土羽区間、多自然川づくり区間などは上記の自浄係数を大きくすることで評価可能である。

4) 人工系モデル

人口データ、および汚水処理形態別人口データ、事業所、家畜頭数等の流域データから、原単位法により、メッシュごとの人工系・畜産系・産業系の排出負荷量を計算する。

a) 人工系、産業系の排出汚濁負荷算出に用いるデータ

人工系および産業系の排出汚濁負荷の算出に用いるデータを表- 3.6.1.8に示す。

表- 3.6.1.8 人工系・産業系汚濁負荷の算出に用いるデータ

用途	データ	出典	備考
人口分布作成	字ポリゴン	数値地図 2500(空間データ基盤)など	数値地図 2500(空間データ基盤)では、一部地域では字ポリゴンが設定されていない。この場合、デジタイズするか、または市販のデータを購入する。 字人口を市町村HPなどから入手し、ポリゴンの属性として与える。
	土地利用	細密数値情報(10mメッシュ土地利用)(入手できなければ)1/10 細分区画土地利用データ	細密数値情報データは、10mメッシュで3大都市圏のみデータがある。1/10 細分区画土地利用データは100mメッシュで全国のデータがある。
汚水処理形態別人口分布作成	字毎のフレーム値(汚水処理形態別人口)	流総計画*、湖沼計画**等のデータ	字毎のデータが入手できなければ、市町村毎などのデータで代用する。
排出負荷量、排水量計算	字毎のフレーム値(家畜頭数)	流総計画、湖沼計画等のデータ	字毎のデータが入手できなければ、市町村毎などのデータで代用する。
	事業所ポイントデータ(位置、排水量、排水水質)	流総計画、湖沼計画等のデータ	
	原単位	流総計画、湖沼計画等のデータ	流域に固有の値が存在しなければ、流総指針等を参考に設定する。

* 流総計画：「流域下水道整備総合計画」の略称

**湖沼計画：「湖沼水質保全計画」の略称

b) 人口分布作成

- ・ 字ごと、あるいは市町村ごとに土地利用を集計
- ・ 字ごと、あるいは市町村ごとに、土地利用のうち居住地系(宅地・市街地)の面積(グリッド数)を計算
- ・ 字ごと、あるいは市町村ごとに、居住地系面積あたりの人口(1グリッドあたりの人口)を計算(人口÷居住地系面積)
- ・ 計算した人口を各グリッドに配分し、メッシュ単位で集計

c) 汚水処理形態別人口分布作成

b)で作成した各グリッドの人口を、字ごとあるいは市町村ごとの汚水処理形態 別人口比率を用いて配分する。

汚水処理形態：下水道、農業集落排水処理、合併処理浄化槽、単独処理浄化槽、し尿処理、自家処理等

d) 排出汚濁負荷・排水量の算出

ア) 排出汚濁負荷・排水量(生活系)の算出

生活系汚濁負荷とは、人間の生活活動に由来して発生する負荷量を指す。下式により負荷量・排水量を算出する。

$$\begin{aligned} \text{各メッシュの負荷量} &= \text{メッシュの合併処理浄化槽人口} \times \text{合併処理浄化槽負荷原単位} \\ &+ \text{メッシュの単独浄化槽人口} \times \text{単独浄化槽負荷原単位} \\ &+ \quad \quad \quad : \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{各メッシュの排水量} &= \text{メッシュの合併処理浄化槽人口} \times \text{合併処理浄化槽排水量原単位} \\ &+ \text{メッシュの単独浄化槽人口} \times \text{単独浄化槽排水量原単位} \\ &+ \quad \quad \quad : \end{aligned}$$

負荷量は、水質項目(COD、T-N、T-P 等)ごとに算出する。

水質の単位は mg/l または g/m³(1mg/l = 1g/m³)、排水量の単位は l/日または m³/日(1 m³ = 1,000l)、負荷量の単位は g/秒, kg/日, t/年(1g/秒 = 86.4kg/日 = 31.536t/年)で与えられる。

イ) 畜産系排出汚濁負荷・排水量の算出

畜産系の排出負荷量の算出方法は、以下の通りである。

- ・ 畜産頭数の分布データを該当するメッシュに振り分ける。
- ・ 分布データがない場合、字ごと、あるいは市町村ごとの家畜頭数を、字ごと、市町村ごとのメッシュに一律に振り分ける。
- ・ メッシュごとに、畜産頭数 × 畜産原単位により、排出負荷量を計算する。

$$\begin{aligned} \text{COD 負荷量} &= \text{牛頭数} \times \text{牛の COD 原単位} + \text{馬頭数} \times \text{馬の COD 原単位} \\ &+ \text{豚頭数} \times \text{豚の COD 原単位} \end{aligned}$$

T-N、T-P も同様に計算する。

畜産系の排水量はゼロとする。

り) 事業所系排出汚濁負荷・排水量の算出

事業所からの排出負荷量の算出方法は、以下の通りである。

- ・対象は、届け出義務のある特定事業所のみとする。
- ・特定事業所の住所から該当するメッシュを関連づける。
- ・排水量・排水水質は届け出排水量・排水水質とする。
- ・排水負荷量は、排水量×排水水質で算出する。
- ・メッシュ内に複数事業所がある場合は、全て合算し、そのメッシュでの事業所系排出負荷量とする。

い) し尿処理場負荷

霞ヶ浦流域の生活系負荷に関わる下水処理場、し尿処理場について、排出先、排水水質、排水量原単位などを表- 3.6.1.9に整理する。このうち、排出先が「流域内」である処理場のみが陸域モデルの入力データとなる。排出先が「湖沼」である処理場は、湖沼モデルにその排水量・負荷量を入力する。

なお、第4期湖沼計画では1996年～2000年のデータのみ整理されているため、2001年～2003年の値は、排水量はトレンドで求め、排水水質は2000年の値をそのまま用いた。また排出負荷量は、排水量×排水水質で求めた。

お) 結果の合算

以上の結果を合算し、人工系排水量、排出負荷量として陸域モデルに与えた。

表- 3.6.1.9 下水処理場およびし尿処理場一覧^{8)、9)}

No.	区分	処理場名	下水道名	排出先区分	排出先ID			処理水質			排水量原単位 L/人/日	出典	
					湖沼： ボックスID	流域内： メッシュID	下水処理場： 処理場ID	COD mg/L	全窒素 mg/L	全リン mg/L			
1	下水処理場	霞ヶ浦浄化センター	湖北流域	湖沼	1			6.4	8.17	0.16	348	第4期霞ヶ浦湖沼水質保全計画	
2	下水処理場	潮来浄化センター	水郷流域	湖沼	7			5.2	6.28	0.08	292	第4期霞ヶ浦湖沼水質保全計画	
3	下水処理場	田伏浄化センター	出島特環	湖沼	3			6.2	3.87	0.6	199	第4期霞ヶ浦湖沼水質保全計画	
4	下水処理場	玉造浄化センター	玉造特環	湖沼	2			5.9	3.78	1.06	138	第4期霞ヶ浦湖沼水質保全計画	
5	下水処理場	小貝川東部浄化センター	流域	流域外				6.4	22.2	2.43	244	下水道統計(H12年度版)	
6	下水処理場	利根浄化センター	流域	流域外				9.3	12.9	1.1		下水道統計(H14年度版)	
7	下水処理場	深芝処理場	特環	流域外				28	90.3	1.64		下水道統計(H12年度版)	
8	下水処理場	鹿嶋市浄化センター	公共	流域外				10.5	14.9	0.18		下水道統計(H12年度版)	
9	下水処理場	江戸崎公共下水道終末処理場	公共	流域内		15104		7.4	2.1	0.96			
10	下水処理場	美浦水処理センター	公共	流域内		13579		7.4	2.1	0.96			
11	下水処理場	東浄化センター	特環	流域内		14987		7.4	2.1	0.96		下水道統計(H14年度版)	
12	下水処理場	八郷浄化センター	公共	流域内		6942		12.3	13.2	0.5		下水道統計(H14年度版)	
13	し尿処理場	土浦市衛生センター	土浦市	下水処理場			801000	7.2	1.6	0.04		8	
14	し尿処理場	鹿嶋市衛生センター	鹿嶋市	流域外									
15	し尿処理場	潮来衛生センター	潮来牛堀	流域内		14042		4.2	7.44	0.087	3	第4期霞ヶ浦湖沼水質保全計画	
16	し尿処理場	銚田町エコパーク銚田	銚田町	流域外									
17	し尿処理場	大津村サニタリーセンター	大津村	流域外									
18	し尿処理場	神栖町衛生センター	神栖町	流域外									
19	し尿処理場	波崎町衛生プラント	波崎町	流域外									
20	し尿処理場	麻生町衛生センター	麻生町	流域内		12379		5.8	6.8	0.06	3	第4期霞ヶ浦湖沼水質保全計画	
21	し尿処理場	北浦町自給肥料供給センター	北浦町	流域外									
22	し尿処理場	玉造町有機肥料供給センター	玉造町	流域外									
23	し尿処理場	龍の郷クリーンセンター	龍ヶ崎市	流域外									
24	し尿処理場	筑北環境衛生組合クリーンセンター	筑北地域	流域内		2503		7.2	1.6	0.04	8	第4期霞ヶ浦湖沼水質保全計画	
25	し尿処理場	茨城町外4町環境事務組合	茨城町外4町	流域外									
26	し尿処理場	大洗旭水戸環境衛生組合	水戸市	流域外									
27	し尿処理場	湖北環境衛生組合	湖北地域	流域内		7097		2.4	1.32	0.43	46	第4期霞ヶ浦湖沼水質保全計画	
28	し尿処理場	筑西広域市町村圏事務組合	筑西地域	流域外									
29	し尿処理場	筑南地方広域行政事務組合	筑南地域	流域外									
30	し尿処理場	下妻地方広域事務組合	下妻地域	流域外									

注：1) 出典が「第4期湖沼計画」となっている処理場の処理水質および排水量原単位は、湖沼計画に記載のデータから求めた。
 2) No.9および10の処理水質は、No.11東浄化センターのデータを用いた。
 3) No.5～12の排水量原単位は、No.1～4の平均値を用いた。
 4) No.13の処理水質および排水量原単位は、No.24のものを用いた。
 5) 排出先が「流域内」である処理場の負荷のみを流域モデル入力データとする。「湖沼」のものは水質モデル入力データとなる。

3.6.2 湖沼モデル

湖沼モデルとしては、今回の検討対象が湖沼水域全体の空間的、時間的な平均水質であることから、閉鎖性水域の水質を再現できる最も簡潔なモデルとして、ボックスモデルを選定した。ボックスモデルとは、水域をその形状や流域条件から水質が概ね等しいと想定される、複数の水域ボックスに分割し、ボックス間の水の移動、物質の移流・拡散は考慮しつつも、ボックス内における水・物質の流動現象は考慮しないモデルである。なお、閉鎖性水域においては、富栄養化現象が重要となるため、植物プランクトンの増殖を組み込んでいる。

(1) 湖沼モデルの概要

1) ボックス分割とボックス間の水・物質の移動

霞ヶ浦の水域分割については、湖沼の形状特性や基本的な流れ方向に応じて、図- 3.6.2.1 に示す通り、西浦を 4 分割、北浦を 2 分割し、それぞれ外浪逆浦に接続した。各ボックスの水位は等しいとして出島における観測水位を与えるとともに、ボックス毎に求められた H-V 式(水位と容積の関係)を用いて、流域及び上流ボックスからの流入量、取水量を含めた各ボックスの水量を算定し、超過分を下流ボックスに流す(外浪逆浦ボックスに関しては系外へ排出する)ことにより調整する。

また、流出側のボックス内の水質とボックス間の移動水量及び濃度差に応じて、COD、N、P の物質も移動・拡散するものとする。

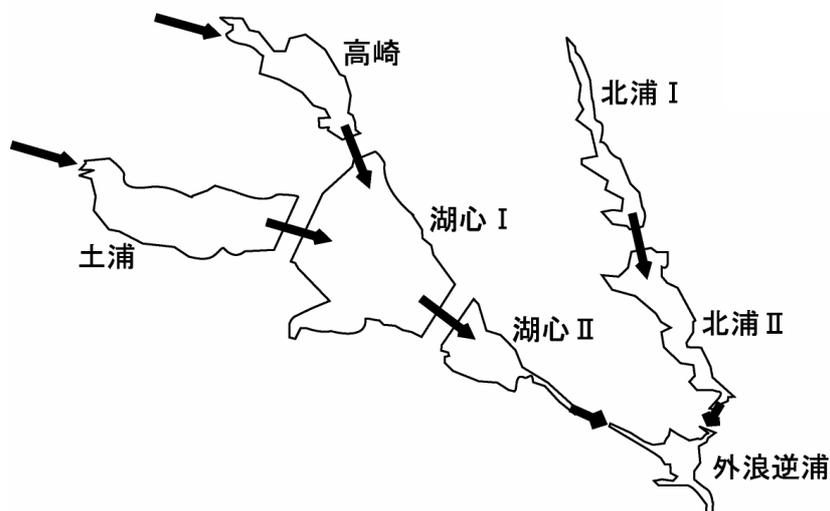


図- 3.6.2.1 霞ヶ浦の 7 分割図

2) 陸域モデルと湖沼モデルの接続

陸域モデルと湖沼モデルを接続し、流域からの流出水量、流出汚濁負荷量が水域の水質に反映されるよう、流域のメッシュ分割と水域ボックスを対応付け、陸域モデルの出力水域モデルの入力となるようプログラムの接続を行った。陸域モデルから湖沼モデルへ受け渡すデータの種類、変換方法等については、表- 3.6.2.1の通りである。

表- 3.6.2.1 流域水物質循環モデルからのデータの受け渡し

流域モデル出力	変換処理		湖沼モデル入力
	平均・合計	変換	
水位(流域モデル入力条件)	全湖一定値	変換なし	水位
平均気温	内部メッシュ平均	気温 水温	水温
正味放射量	内部メッシュ平均	変換なし	日射量
降雨量	内部メッシュ合計	3項目を合計	BOX への流入量
河川流入量からの流入量	隣接メッシュ合計		
下水処理水排水量	隣接メッシュ合計		
蒸発量	内部メッシュ合計	3項目を合計	BOX からの流出量
生活・工業・農業用取水量	隣接メッシュ合計		
常陸利根川水門放水量 (BOX7のみ)	隣接メッシュ合計		
降雨負荷量 (COD、窒素、リン)	内部メッシュ合計	3項目を合計 懸濁・溶存分離	COD 負荷量
流域からの負荷量 (COD、窒素、リン)	隣接メッシュ合計		窒素負荷量 (Inorg-N,Org-N)
下水排水負荷量 (COD、窒素、リン)	隣接メッシュ合計		リン負荷量 (Inorg-P,Org-P)

3) 底泥からの溶出量の設定

水域への汚濁負荷供給として重要な底泥からの溶出については、既往の溶出実験に基づき求められた溶出速度式により与えた。各物質の溶出速度は、底質中の当該物質濃度の関数として与えている。

(2) 水域水質形成機構とモデル上で考慮する範囲

各水域ボックス内では、汚濁負荷の流入・流出・溶出・沈降の他、懸濁態有機物の分解(溶存栄養塩類化)、植物プランクトンの光合成・呼吸・枯死・沈降等による水質形成をモデル化する。水域の水質形成機構(水質物質と反応素過程の関連図)の概略図を、図- 3.6.2.2 に示す。図中、枠線で囲んだ範囲が、モデル上で考慮する範囲である。なお、想定しうる水質形成機構は可能な限りモデルで表現することが望ましいが、一方で観測データの無い水質物質や反応速度定数の知見が少ない反応過程をやみくもにモデルに加えても、不確定要素が増えて計算が煩雑になるのみである。研究目的、新たな知見の発見のためのモデルと異なり、本モデルのように合理的対策の決定を目的としたモデルは、利用可能なデータにより現実的な範囲で構築することが望ましい。

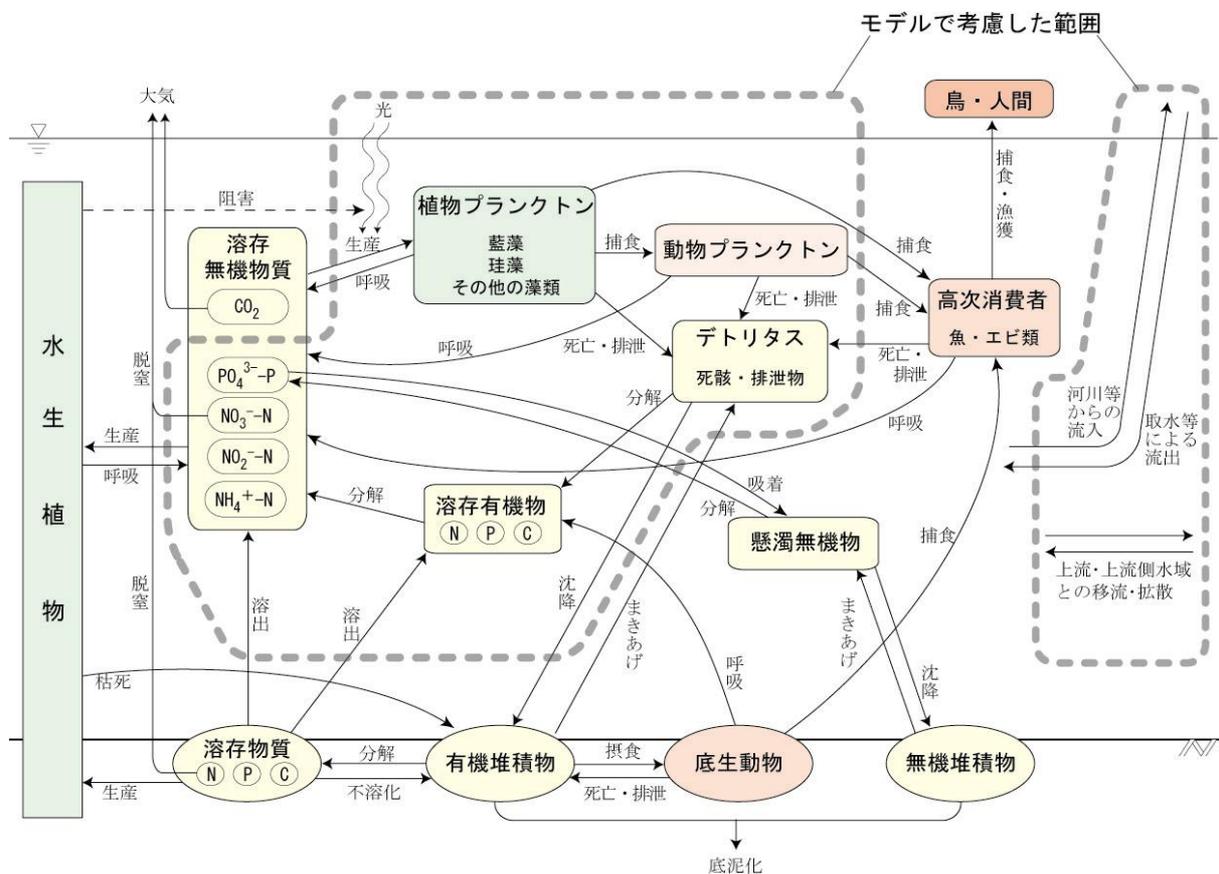


図- 3.6.2.2 水域の水質形成機構概略図とモデルで考慮した範囲

(3) 計算対象水質物質

1) モデル上の変数

モデル上で考慮する水質物質(モデル変数)を表- 3.6.2.2に示す。

表- 3.6.2.2 モデル上で考慮する水質物質

項目	水質物質	単位	モデル変数名
植物プランクトン	藍藻類	mgChl.a/L	M1
	珪藻その他藻類	mgChl.a/L	M2
動物プランクトン	動物プランクトン	mgC/L	Z
デトリタス	デトリタス	mgC/L	D
窒素	無機態窒素	mgN/L	IN
	溶存有機態窒素	mgN/L	ON
リン	無機態リン	mgN/L	IP
	溶存有機態リン	mgN/L	OP
COD	溶存態 COD	mgCOD/L	COD

2) 計算出力項目

モデル計算の結果出力される項目を表- 3.6.2.3に示す。

表- 3.6.2.3 計算出力項目

項目	水質物質	単位	計算方法 ¹	観測値 ²
植物プランクトン	Chl.a	mgChl.a/L	M1+M2	クロロフィル a
	Chl.a(藍藻類)	mgChl.a/L	M1	藍藻類個体数(細胞数/mL)
	Chl.a(珪藻類)	mgChl.a/L	M2	珪藻その他藻類個体数(")
動物プランクトン	動物プランクトン	mgC/L	Z	個体数のみ
デトリタス	デトリタス	mgC/L	D	なし
窒素	無機態窒素	mgN/L	IN	NO ₃ -N + NO ₂ -N + NH ₄ -N
	有機態窒素	mgN/L	ON+植物 P 態 N+動物 P 態 N+デトリタス態 N	全窒素 - 無機態窒素
	全窒素	mgN/L	IN+ ON+植物 P 態 N+動物 P 態 N+デトリタス態 N	全窒素
リン	無機態リン	mgP/L	IP	リン酸態リン(PO ₄ -P)
	有機態リン	mgP/L	OP+植物 P 態 P+動物 P 態 P+デトリタス態 P	全リン - リン酸態リン
	全リン	mgP/L	IP+ OP+植物 P 態 P+動物 P 態 P+デトリタス態 P	全リン
COD	溶存態 COD	mgCOD/L	COD	溶存態 COD
	懸濁態 COD	mgCOD/L	植物 P 態 COD+動物 P 態 COD+デトリタス態 COD	COD - 溶存態 COD
	COD	mgCOD/L	COD+植物 P 態 COD+動物 P 態 COD+デトリタス態 COD	COD

注)1：本欄はモデル内での計算方法を示す。略号は表- 3.6.2.2の「モデル変数名」と同一。

2：本欄は一般的に観測されている項目を示す。他の項目から加減算で求める項目は、その計算方法を示す。

(4) 基礎式

1) 物質収支式

水質モデルにおける各水質物質の物質収支式は、下式の通り表現される。各ボックス毎に、全ての計算対象水質物質(表- 3.6.2.2)について本式を立式し、連立方程式として数値解析解を得る。

$$\underbrace{\frac{d}{dt}(V_i C_i)}_{\text{物質量変化}} = \underbrace{J_{in} C_{in} - J_{out} C_i}_{\text{移流}} + \underbrace{\sum_j \frac{DA_{ij}}{l_{ij}} (C_j - C_i)}_{\text{拡散}} + \underbrace{L_{in} - L_{out}}_{\text{負荷流出入}} + \underbrace{R_i}_{\text{反応}}$$

ここで、

- V : 当該ボックスの容量
- C_i : 当該ボックスの水質濃度
- J_{in} : 上流側ボックスから当該ボックスへの移流量
- C_{in} : 上流側ボックスの水質濃度
- J_{out} : 当該ボックスから下流側ボックスへの移流量
- D : 拡散係数
- A_{ij} : 当該ボックスと隣接ボックス間の断面積
- l_{ij} : 当該ボックスと隣接ボックス間の距離
- C_j : 隣接ボックスの水質濃度
- L_{in} : 当該ボックスに流入する負荷量(河川流入等)
- L_{out} : 当該ボックスから流出する負荷量(取水等)
- R_i : 当該ボックスにおける反応項(生物増殖、分解、沈降、溶出等)
- 添え字 i, j : それぞれ当該ボックス、隣接ボックスを示す

2) 反応項

各水質物質の反応項 R_i は以下のように表される。各式右辺は、水質モデルでの各反応経路に関わる項である。

a) 無機態窒素(IN)

$$R_{IN} = -Y_{N/M} \cdot R_{11} - Y_{N/M} \cdot R_{12} + Y_{N/M} \cdot R_{21} + Y_{N/M} \cdot R_{22} + Y_{N/Z} \cdot R_{2Z} + R_{4N} + R_{6N}$$

b) 無機態リン(IP)

$$R_{IP} = -Y_{P/M} \cdot R_{11} - Y_{P/M} \cdot R_{12} + Y_{P/M} \cdot R_{21} + Y_{P/M} \cdot R_{22} + Y_{P/Z} \cdot R_{2Z} + R_{4P} + R_{6P}$$

c) 藍藻類(M1)

$$R_{M1} = (1 - \varepsilon_1) \cdot R_{11} - R_{21} - R_{31} - R_{51} - R_{1Z}$$

d) 珪藻類(M2)

$$R_{M2} = (1 - \varepsilon_2) \cdot R_{12} - R_{22} - R_{32} - R_{52} - R_{1Z}$$

e) 有機態窒素(ON)

$$R_{ON} = Y_{N/M} \cdot \varepsilon_1 \cdot R_{11} + Y_{N/M} \cdot \varepsilon_2 \cdot R_{12} + Y_{N/M} \cdot R_{31} + Y_{N/M} \cdot R_{32} + Y_{N/D} \cdot R_{4D} - R_{4N} - R_{5N}$$

f) 有機態リン(OP)

$$R_{OP} = Y_{P/M} \cdot \varepsilon_1 \cdot R_{11} + Y_{P/M} \cdot \varepsilon_2 \cdot R_{12} + Y_{P/M} \cdot R_{31} + Y_{P/M} \cdot R_{32} + Y_{P/D} \cdot R_{4D} - R_{4P} - R_{5P}$$

g) 溶存態 COD(COD)

$$R_{COD} = Y_{C/M} \cdot \varepsilon_1 \cdot R_{11} + Y_{C/M} \cdot \varepsilon_2 \cdot R_{12} + Y_{C/M} \cdot R_{31} + Y_{C/M} \cdot R_{32} + Y_{C/D} \cdot R_{4D} - R_{4C} - R_{5C} + R_{6C}$$

h) 動物プランクトン(Z)

$$R_Z = Z/M \cdot R_{1Z} - R_{2Z} - R_{3Z}$$

i) デトリタス(D)

$$R_D = D/M \cdot (R_{31} + R_{32}) + D/M \cdot (1 -) \cdot R_{1Z} + D/Z \cdot R_{3Z} - R_{4D} - R_{5D}$$

ここで、

R_{1X} : 増殖速度 [g/m³/day]

R_{2X} : 呼吸速度 [g/m³/day]

R_{3X} : 枯死・死亡速度 [g/m³/day]

添え字 X は、1 : 藍藻、2 : 珪藻、Z : 動物プランクトン、D : デトリタス

R_{4X} : 分解速度 [g/m³/day]

R_{5X} : 沈降速度 [g/m³/day]

添え字 X は、1 : 藍藻、2 : 珪藻、D : デトリタス、N : 有機態窒素、P : 有機態リン

R_{6X} : 溶出速度 [g/m³/day]

添え字 X は、N : 無機態窒素、P : 無機態リン、C : COD

ε_X : 細胞外分泌比 [-]

添え字 X は、1 : 藍藻、2 : 珪藻

: 動物プランクトンによる植物プランクトン捕食時の同化率

x/Y : 物質換算係数 [-]

添え字 X、Y は、M : クロロフィル a、N : 窒素、P : リン、Z : 動物プランクトン、D : デトリタス

3) 反応速度式

反応速度式 $R_{1X} \sim R_{6X}$ は、以下の通り与える。

a) 増殖速度 R_{1X}

$$R_{1j} = \mu_{\max} \cdot \frac{IP}{k_P + IP} \cdot \frac{IN}{k_N + IN} \cdot f_{Ij} \cdot f_{Tj} \cdot M_j \quad (j: 1 \text{ のとき藍藻、2 のとき珪藻})$$

$$f_{Ij} = \frac{e}{(g \cdot (M_1 + M_2) + w) \cdot h} \left[\exp\left\{ -\frac{I}{I_{OPT}} \exp(- (g \cdot (M_1 + M_2) + w) \cdot h) \right\} - \exp\left(-\frac{I}{I_{OPT}}\right) \right]$$

$$f_{Tj} = \left\{ \frac{T}{T_{OPTj}} \cdot \exp\left(1 - \frac{T}{T_{OPTj}}\right) \right\}$$

$$= \exp(- \quad \cdot (M_1 + M_2))$$

ここで、

μ_{\max} : 最大比増殖速度 [1/day]

k_P : リン半飽和定数 [g/m³]、 k_N : 窒素半飽和定数 [g/m³]

f_{Ij} : 照度による影響関数 [-]、 f_{Tj} : 温度による影響関数 [-]

: 混雑効果関数 [-]

g : 光減衰係数 [1 / m · (g COD/ m³)]、 w : 湖沼に固有の定数 [1/m]

h : 平均水深 [m]

I : 湖沼表面における日射量[MJ/m²/day]、 I_{OPT} : 藻類増殖最適日射量[MJ/m²/day]

T : 水温 [], T_{OPT} : 藻類増殖最適水温 [], : 温度指数 [-]

: 混雑効果定数 [m³/g]

$$R_{1Z} = C_g \cdot Z \cdot (M_1 + M_2)$$

$$C_g = C_{gm} \cdot \frac{K_{mg}}{K_{mg} + (M_1 + M_2)} \cdot \frac{T}{20}$$

ここで、

C_g : 単位動物プランクトンあたりのろ水速度 [m³/g 動物プランクトン/日]

C_{gm} : 20 における最大ろ水速度 [m³/g 動物プランクトン/日]

K_{mg} : 動物プランクトン飽食効果に関する半飽和定数 [g/m³]

b) 呼吸速度 R_{2X}

$$R_{2j} = k_{2j} \cdot 2_j^{T-20} \cdot M_j \quad (j: 1 \text{ のとき藍藻、2 のとき珪藻})$$

$$R_{2Z} = k_{2Z} \cdot T \cdot Z$$

c) 枯死・死亡速度 R_{3X}

$$R_{3j} = k_{3j} \cdot 3_j^{T-20} \cdot M_j \quad (j: 1 \text{ のとき藍藻、2 のとき珪藻})$$

$$R_{3Z} = k_{3Z} \cdot T \cdot Z$$

d) 分解速度 R_{4X}

$$R_{4X} = k_{4X} \cdot 4X^{T-20} \cdot X \quad (X \text{ は有機態窒素、有機態リン、COD、デトリタス})$$

ここで、

$$k_{2X}, k_{3X}, k_{4X} : \text{呼吸、枯死、分解の速度定数} \quad [1/\text{day}]$$

$$2X, 3X, 4X : \text{呼吸、枯死、分解の温度定数} \quad [-]$$

e) 沈降速度 R_{5X}

$$R_{5X} = \frac{v_X}{h} \cdot X \quad (X \text{ は藍藻、珪藻、有機態窒素、有機態リン、COD、デトリタス})$$

ここで、

$$v_X : \text{沈降速度定数} \quad [\text{m}/\text{day}]$$

f) 溶出速度 R_{6X}

$$R_{6X} = k_{6X} \cdot 6X^{T-20} \cdot A \quad (X \text{ は無機態窒素、無機態リン、COD})$$

ここで、

$$k_{6X} : \text{底泥からの溶出速度定数} \quad [\text{g}/\text{m}^2/\text{day}], \quad 6X : \text{温度定数} \quad [-], \quad A : \text{底面積} \quad [\text{m}^2]$$

4) 計算条件の設定

a) 対象領域

対象水域を単数、あるいは複数のボックスに分割し、各ボックスにおいて、BOX 間流動、および水質を計算する。

b) 気象

計算に必要な気象データは、気温、日射量である。

c) 流入流量・負荷量

地表流モデル、汚濁負荷モデルにより計算された河川ごとの流量・水質を入力データとして用いる。

d) 水収支

各ボックス間の移流量は、毎日の流入量、取水量、容量変化(水位から計算)を用いて、ボックス毎の水収支から計算する。ボックス毎に下記の水収支式が成立する。

$$V = Q_{\text{in}} - Q_{\text{out}} + Q_{\text{上流}} - Q_{\text{下流}}$$

ここで、

V : ボックスの日容量変化(前日と当日の水位、および $H-V$ を用いて算出)

Q_{in} : ボックスへの河川流入量、 Q_{out} : ボックスからの取水量

$Q_{\text{上流}}$: 上流ボックスからの移流量、 $Q_{\text{下流}}$: 下流ボックスへの移流量

本式を用いて、上流側ボックスより順次移流量を算出していく。

3.6.3 流域対策の水物質循環モデル上での評価方法

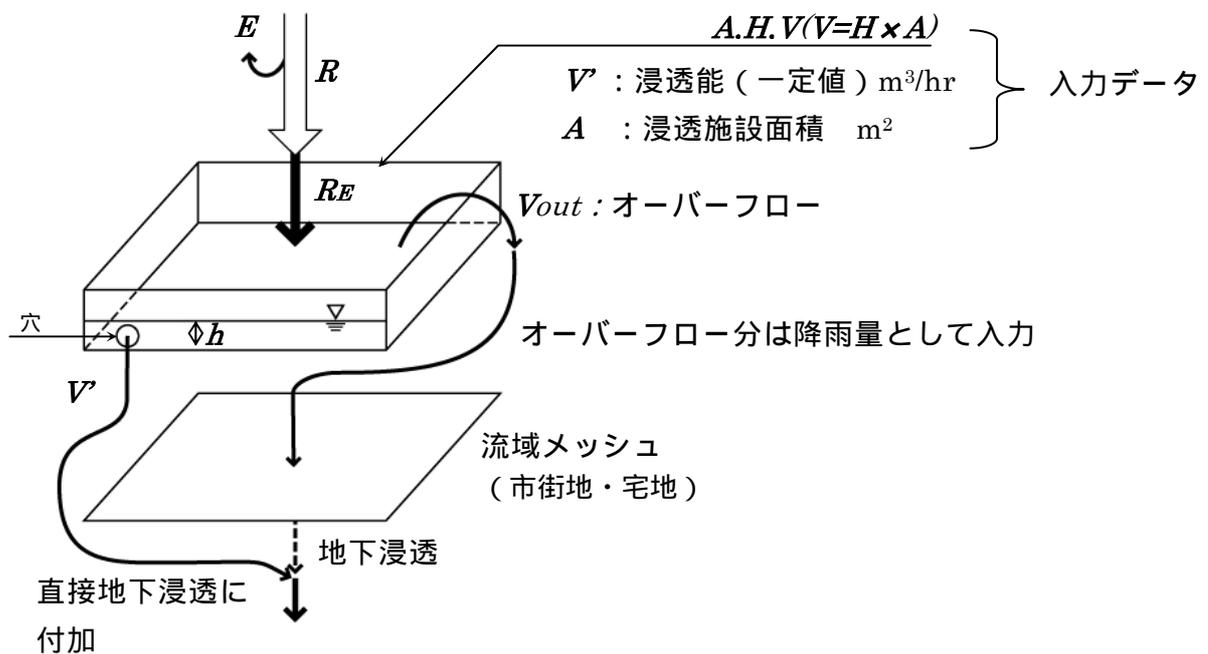
5章で検討する流域で実施する施策について、水物質循環モデルでの考え方と、計算式を以下に示す。

(1) 雨水貯留浸透対策

1) モデルでの考え方

流域メッシュの上に、入力データで設定した貯留浸透施設の貯留量をもつ貯留タンクを想定することにより、貯留浸透の効果を計算する。

ここで考慮している対策は、雨水浸透マスおよび浸透トレンチ等である。



2) 計算式

計算式は以下の通りである。

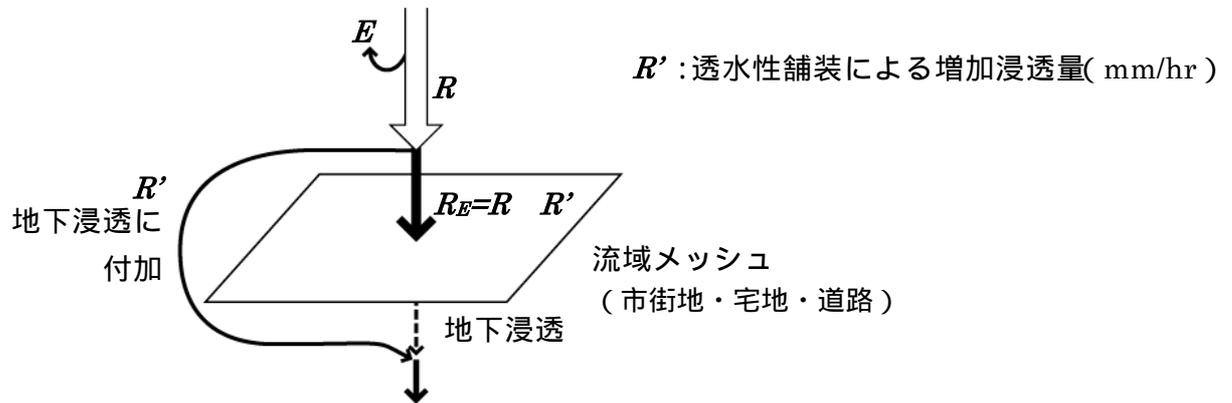
$$h_{t+1} = h_t + R_E - \frac{V_{out}}{A} - \frac{V'}{A} \Delta t$$

$$\left\{ \begin{array}{l} h_t \geq H \text{ の場合} \\ \quad V_{out} = (R_E - \frac{V'}{A} \Delta t) \times A \\ h_t < H \text{ の場合} \\ \quad V_{out} = 0 \end{array} \right.$$

(2) 透水性舗装

1) モデルでの考え方

透水性舗装の設置により増加した地下浸透量を、直接、蒸発散モデルにより計算される地下浸透に付加することにより、対策の効果を評価する。



2) 計算式

計算式は、以下の通り。

$$R' = V_p \times A$$

V_p : 透水性舗装の浸透能 $\text{m}^3/\text{hr}/\text{m}^2$

A : 舗装整備面積 m^2

} 入力データ

$$\left\{ \begin{array}{l} R > R' \text{ の場合} \\ \quad R_E = R - R' \\ R < R' \text{ の場合} \\ \quad R_E = 0, \quad R' = R \end{array} \right.$$

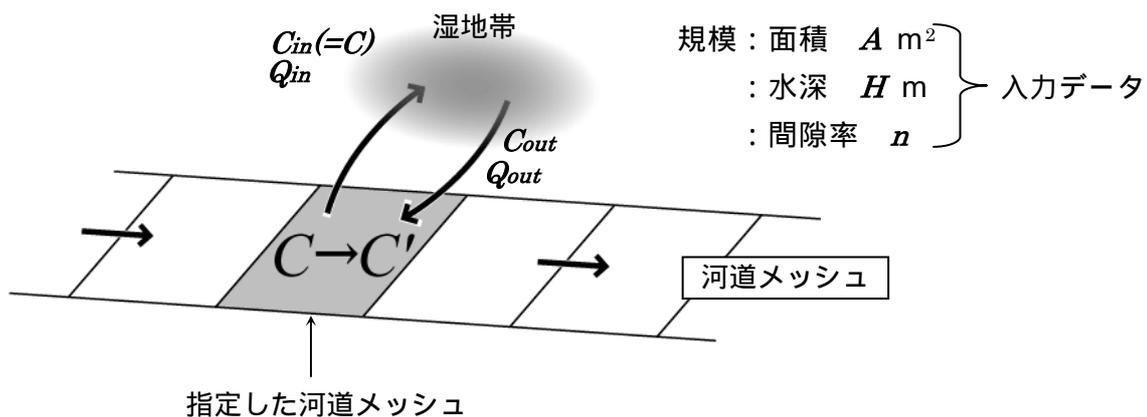
(3) 湿地浄化

1) モデルでの考え方

河道メッシュで湿地帯位置を指定し、その河道メッシュの負荷量を浄化することにより、負荷削減の効果を評価する。

$$C'V = CV - C_{in} \cdot Q + C_{out} \cdot Q$$

$$Q_{in} = Q_{out} = Q : \text{浄化流量 (m}^3/\text{日)}$$



2) 計算式

湿地による水質浄化の調査は欧米で進んでおり、その設置後の汚濁物質除去の設計指針が Sherwood C. Reed et al.¹⁰⁾ によってまとめられている。湿地浄化の効果の定量化は、この設計指針を参考に以下の通り与える。

COD

$$C_{out} = C_{in} \times \exp(-0.678 \times 1.06 \times HRT)$$

T-N

$$C_{out} = C_{in} \times \exp(-0.376 \times 1.15 \times HRT)$$

T-P

$$C_{out} = C_{in} \times \exp\left(\frac{-2.73}{HLR}\right)$$

ここで、

$$HRT = \frac{A \times H \times n}{Q} : \text{滞留時間 (日)}$$

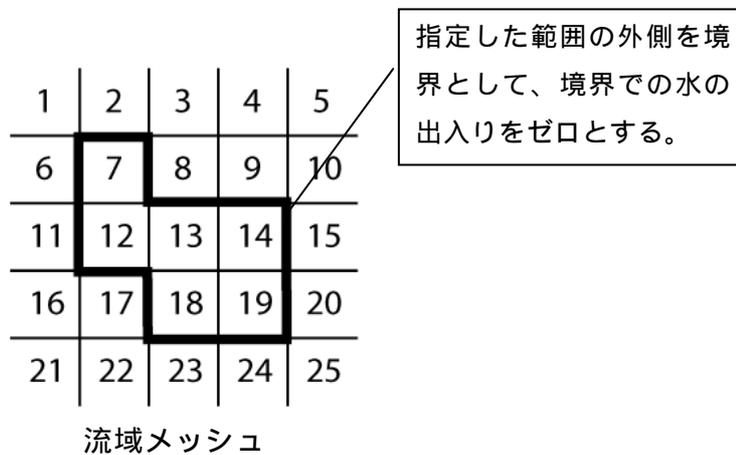
$$HLR = 100 \times \frac{Q}{A} : \text{水面積負荷 (cm/日)}$$

なお、CODについてはBODの式として提案されているものを同様に適用できると仮定した。また、T-Nについては硝酸の脱窒量の式として提案されているものを適用することとした。

(4) 地下汚濁物質の囲い込み

1) モデルでの考え方

指定した流域メッシュを超える地下水の水・物質の流入はなし（流速がゼロ）として効果を計算する。



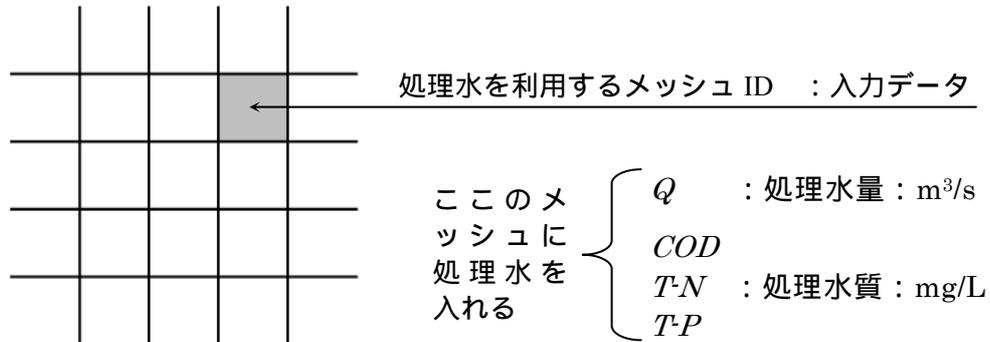
2) 計算式

上図の太枠線での第1層の地下水流速を強制的に「ゼロ」とする（太枠線を通して、メッシュ間の水、物質の出入りがない）。なお、地下水は第一層のみで、地下層間の浸透・漏水といった鉛直流動は生じる。

(5) 下水処理水の利用（かんがい用水）

1) モデルでの考え方

下水処理水を放流する水田を含んだメッシュを指定し、処理水の水量、水質を入力する。入力する水量分をこれまで入れていた維持湛水深を維持するための補給量から差し引くことにより取水量の削減効果を評価する。



2) 計算式

かんがい期においてのみ、維持湛水深を維持するための補給量について下記の計算式により、水田への補給水量、補給水質を計算する。

$$\text{対策前 (補給量)} = (\text{取水量})$$

↑ ↓ 同じ

$$\text{対策後 (補給量)} = (\text{処理水量}) + (\text{取水量})$$

処理水量分減少する。

$$\text{対策後 (補給水質)} = \frac{(\text{処理水質} \times \text{水量}) + (\text{取水水質} \times \text{水量})}{(\text{処理水量}) + (\text{取水量})}$$

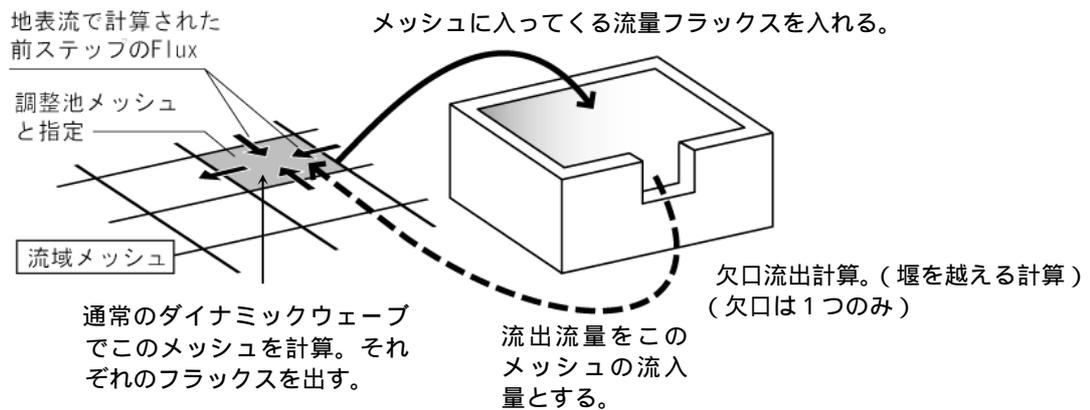
水田への補給量は変わらないが、水質が変化することになる。

(6) 調節池

1) 水量

a) モデルでの考え方

地表メッシュと切り離し、別レイヤーにおいて調節池の計算を行う。調節池が設定されたメッシュに流入してくる地表流量を一旦調節地に入れ、欠口流出の計算を行う。その後、調節池から出てくる流量を地表メッシュに返し、その流量でダイナミックウェーブ計算を行う。



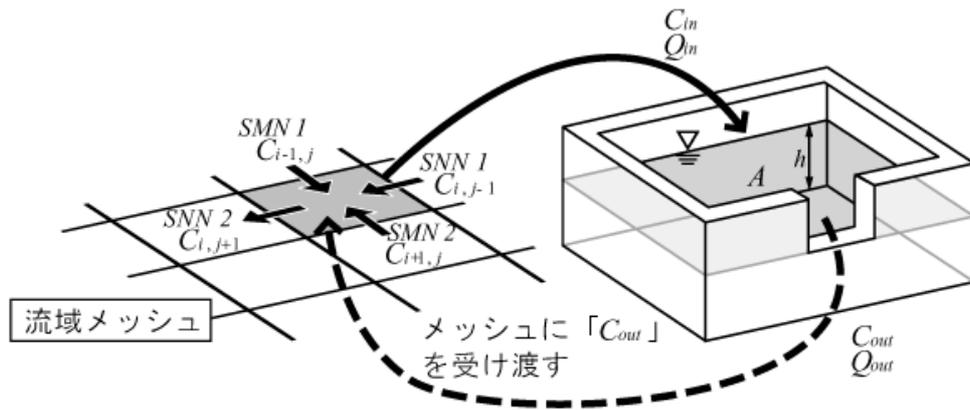
b) 計算式

調節池の計算方法は、地表流モデルでの水田における欠口流出の計算法と同じとする。

2) 水質

a) モデルでの考え方

水量の計算と同様に、調節池メッシュに流入する水量とともに負荷量も調節池に流入させ、調節池内での沈降により負荷が除去されるとして、浄化効果を計算する。



b) 計算式

計算式は、以下の通りとする。

$$C_{in} = \frac{(C_{i-1,j} \times SMN + C_{i,j-1} \times SNN1 + C_{i+1,j} \times SMN2 + C_{i,j+1} \times SNN2) \times \Delta X}{(SMN1 + SMN2 + SNN1 + SNN2) \times \Delta X}$$

$$C_{out} = C_{in} \times Q_{in} \times (1 - E)$$

ここで、

$SMN1$ 、 $SMN2$ 、 $SNN1$ 、 $SNN2$: 地表流量(単位幅流量 : m^2/s)、 X : メッシュ幅(m)、 C_{ij} : メッシュ水質濃度(mg/L)

E : 除去率

$$= \frac{V}{\left(\frac{Q_{in}}{A \times h} \right)}$$

V : 沈降速度 m/s

A : 調節池面積 m^2

h : 調節池内水深 m

} 入力データ

3.7 モデルのプログラム構造

3.7.1 モデルの構成

(1) フォルダ構成

本モデルのフォルダ構成を図- 3.7.1.1に示す。

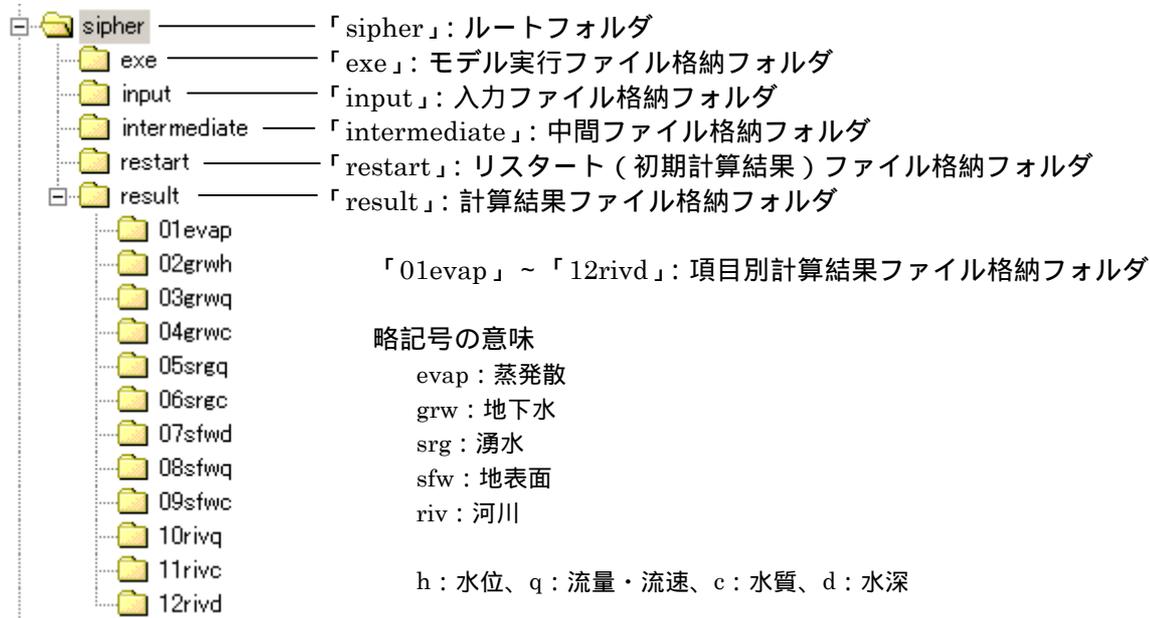


図- 3.7.1.1 モデルのプログラムフォルダ構成

(2) モデルの使用環境

モデルの実行にあたっては、下記の PC 環境を必要とする。

- ・ Windows 搭載の PC (Windows 2000 以降のバージョンで動作を確認)
- ・ 必要ソフト：Microsoft Excel (Excel 2000 バージョンでモデル開発を実施している)
- ・ PC の必要スペック：Windows が起動可能なスペック

(3) モデルの計算実行の流れ

モデルの計算実行の流れを図- 3.7.1.2に示す。あらかじめ、input ファイルは全て用意しておく。

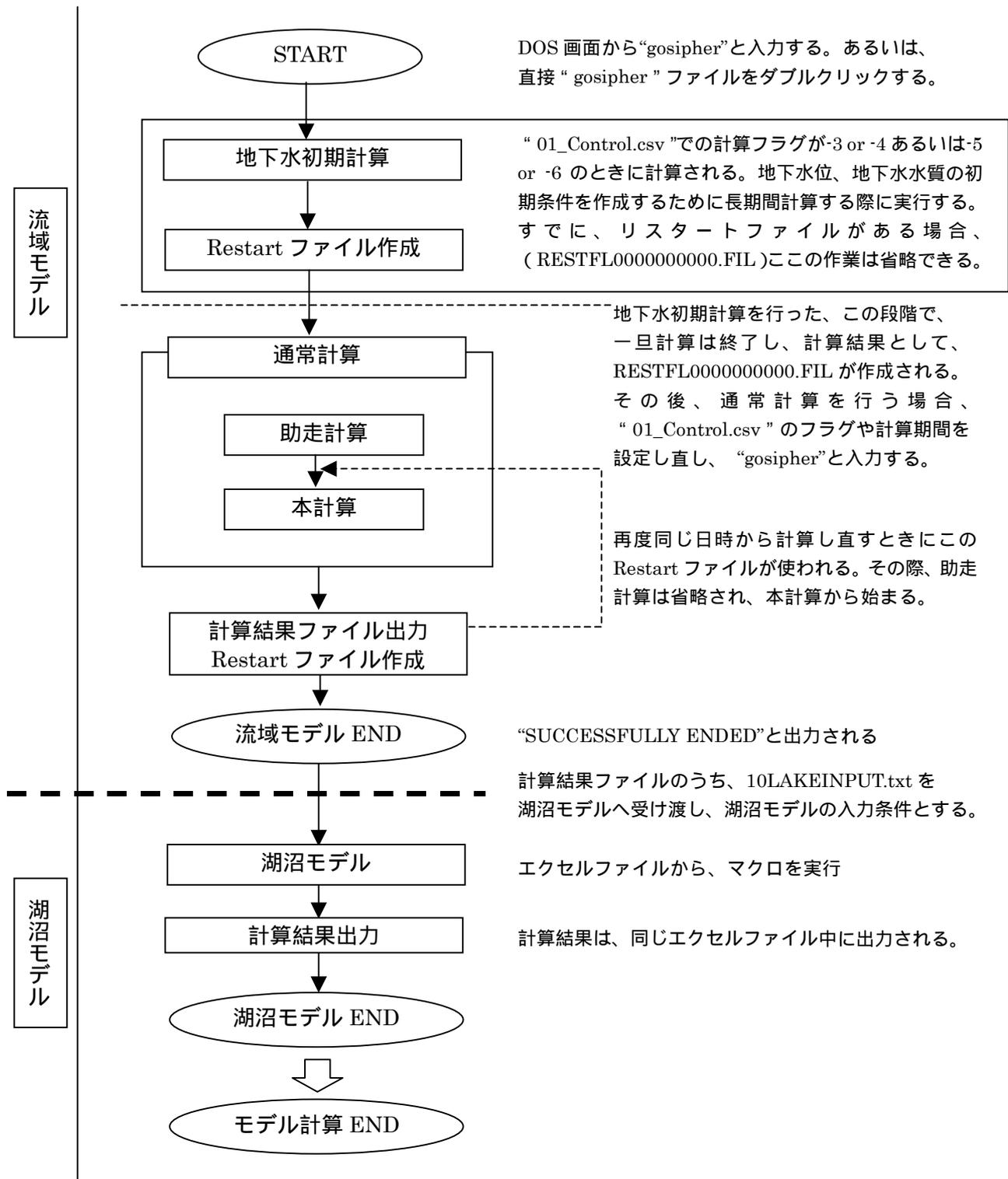


図- 3.7.1.2 モデルの計算フロー

3.7.2 入力ファイルの仕様

(1) 入力ファイルの作成方法

1) 流域モデル

入力ファイルの作成は、「input」フォルダに格納されているエクセルファイル「入力ファイル.xls」を使用する。

入力ファイルの作成は、基本的に、エクセルファイル中に入力データの項目や単位を記載している。その指示に従い、データの入力を行うことによって、入力ファイルを作成することができる。

表- 3.7.2.1に流域モデルの計算に必要な入力ファイルを示す。

表- 3.7.2.1 必要入力ファイル一覧(流域モデル)

シート名	CSVファイル名	ファイル内容	備考
1基本	01_Control.csv	基本設定	
2流域	02_Grid.csv	流域データ	
3土地利用	03_LandUse.csv	土地利用データ	
4降雨	04_Rain.csv	降雨量データ	
5蒸発散	05_Evapo.csv	蒸発散モデルパラメータ	
6-1地下水	06-1_GroundWater.csv	地下水モデルパラメータ	
6-2地下水	06-2_GW-Boundary.csv	地下水モデル境界条件データ	
6-3地下水	06-3_GW-Pump.csv	地下水揚水量データ	
6-4地下水	06-4_GW-aquiclude.csv	地層厚データ	
7地表流	07_SurfaceRunoff.csv	粗度係数	
8河道	08_River.csv	河道諸元	
8-2河道2	08-2_RiverBasic.csv	河道諸元	
9水田	09_PuddyField.csv	水田パラメータ	
10面源負荷	10_NonpointLoad.csv	面源負荷パラメータ	
11地下水質	11_GroundWaterQuality.csv	地下水水質パラメータ	
12浄化	12_Purification.csv	自浄係数	
13湖沼水位	13_WL.csv	湖沼水位データ	
14浸透対策	14_percolation.csv	浸透系対策量	流域対策
15調整池	15_reservoir.csv	調節地諸元	流域対策
16湖沼モデル	16_LakeInputFile.csv	湖沼モデル入力データ設定	出力設定シート
17水収支	17_WaterBalance.csv	水収支出力設定	出力設定シート
18物質収支	18_MaxxBalance.csv	物質収支出力設定	出力設定シート
19湿地浄化	19_marsh.csv	湿地浄化諸元	流域対策
20地下汚濁物質の囲い込み	20_GWenclose.csv	地下汚濁物質の囲い込み諸元	流域対策
21下水処理水の再利用(農水)	21_water-recycle.csv	下水処理水の再利用諸元	流域対策

2) 湖沼モデル

“霞ヶ浦湖沼モデル.xls”、“入力データ設定.xls”の2つのエクセルファイルを使用する。エクセルファイル内に記載の指示に従い、データを入力する。

(2) 入力ファイルの仕様

基本的にエクセルファイル記載の指示に従って入力データを作成するが、流域モデル 21 個の入力ファイルのうち、特別な作成方法を必要とするファイルの仕様を以降に示す。

1) 流域データ(02_Grid.csv)

「セル ID」、「X・Y 座標」の振り方を図- 3.7.2.1に、「計算領域」ID の振り方を表- 3.7.2.2 にそれぞれ示す。

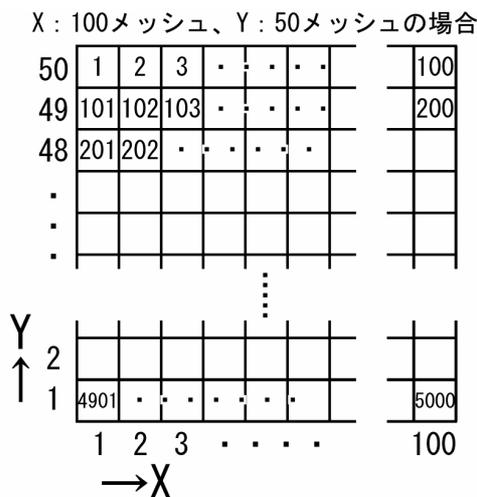


図- 3.7.2.1 「セル ID」、「X・Y 座標」の振り方

表- 3.7.2.2 「計算領域」ID の振り方

セルID	X	Y	計算領域	標高 EL.m	低地台地分類 ID	表層地質 ID	土壌分類 ID	ティーンセン分割 ID	河川メッシュ位置
1	1	139	99	64	4	45	12	1	0
2	2	139	99	64	4	45	12	1	0
3	3	139	99	74.51	4	45	12	1	0
4	4	139	99	67.29	4	45	18	1	0
5	5	139	99	66.81	4	45	18	1	0
6	6	139	99	67	4	14	99	1	0
7	7	139	99	65.48	4	14	99	1	0
8	8	139	99	67	4	45	16	1	0
9	9	139	99	67	4	45	16	1	0
10	10	139	99	67	4	45	16	1	0
11	11	139	99	68	4	45	16	1	0
12	12	139	99	67.51	4	45	16	15	0
13	13	139	99	69.19	4	45	13	15	0
14	14	139	99	69	5	45	13	15	0
15	15	139	99	87.77	5	33	12	15	0
16	16	139	5	115.75	5	33	12	15	0
17	17	139	5	67.27	5	14	40	15	0
18	18	139	99	67.76	5	14	40	15	0
19	19	139	99	70	5	33	13	15	0
20	20	139	99	74.63	5	33	13	15	0

流域内メッシュ 0 : 流域内 (河川、湖沼を除く) 1 : 河川、2 : 湖沼
 流域外メッシュ -1 : バッファ領域、99 : 流域外

2) 河道データ(08_River.csv、 08-2_RiverBasic.csv)

08_River.csv、 08-2_RiverBasic.csv の 2 つの入力ファイルの作成方法について、単純な河川メッシュを例としたケースを図- 3.7.2.2、表- 3.7.2.3に示す。

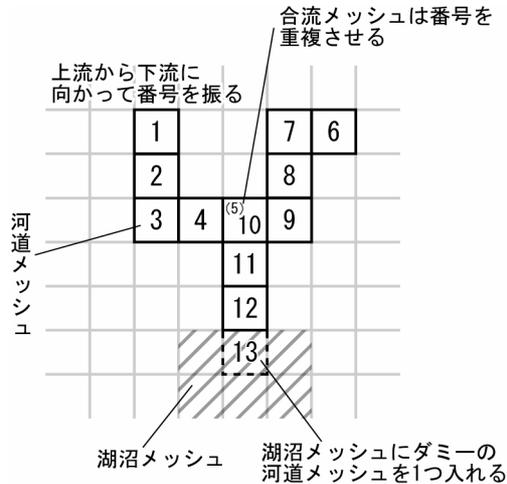


図- 3.7.2.2 河川メッシュ図

表- 3.7.2.3 上図の河川メッシュの場合についての河道データの作成

08_River.csv

河道セルID 河床標高 河川幅 河道状況ID 流量のもらい先
EL.m m

河道セルID	河床標高 EL.m	河川幅 m	河道状況ID	流量のもらい先
1	10.000	2	1	0
2	9.000	2	1	0
3	8.000	3	1	0
4	7.000	3	1	0
5	6.000	4	1	0
6	12.000	2	1	0
7	10.000	2	1	0
8	9.000	3	1	0
9	8.000	3	1	0
10	6.000	4	1	4
11	4.000	4	1	0
12	2.000	5	1	0
13	1.000	5	1	0

08-2_RiverBasic.csv

境界水位 初期水深 河川数 上流端流入量
T.P.m m m3/s

(任意)	(任意)	2	0.001
------	------	---	-------

河川メッシュ番号

始点番号 終点番号 水位の折り返し先番号

1	4	10
6	12	0

(3) 出力データの仕様

計算結果の出力データは、01_Control.csv で設定したデータが「result」フォルダに出力される。

「result」フォルダの構成を図- 3.7.2.3に示す。主な計算項目ごとに、面的な分布状況と指定した地点の時系列データが出力できる。

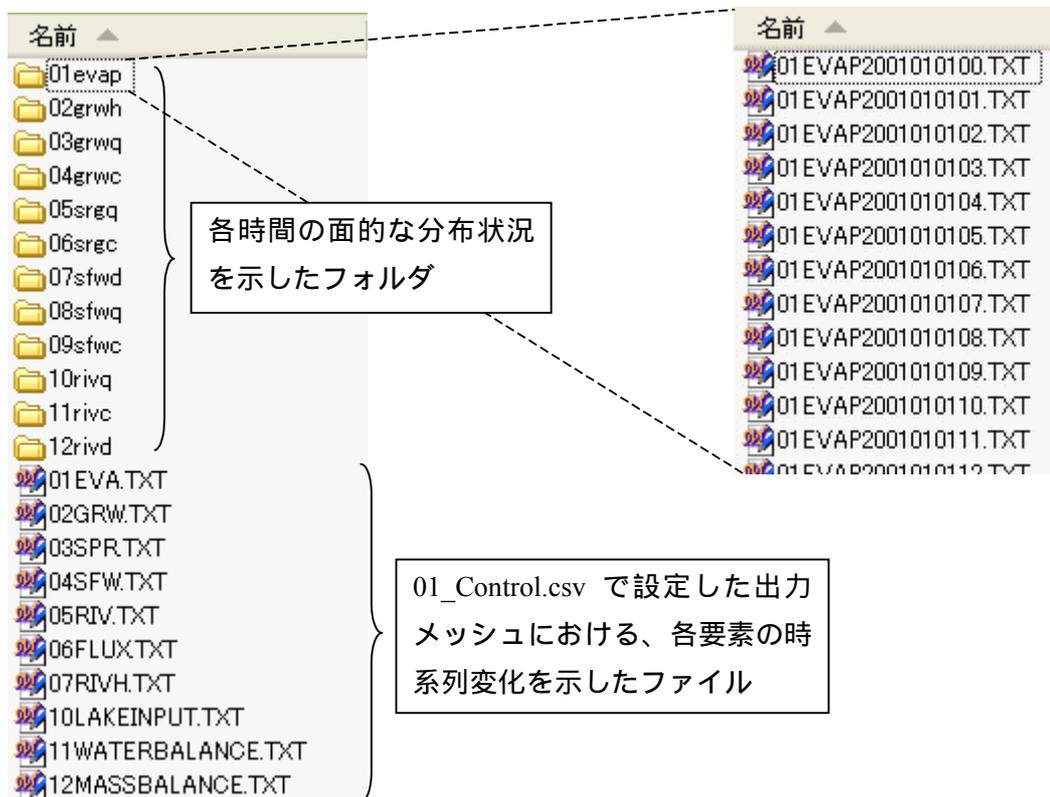


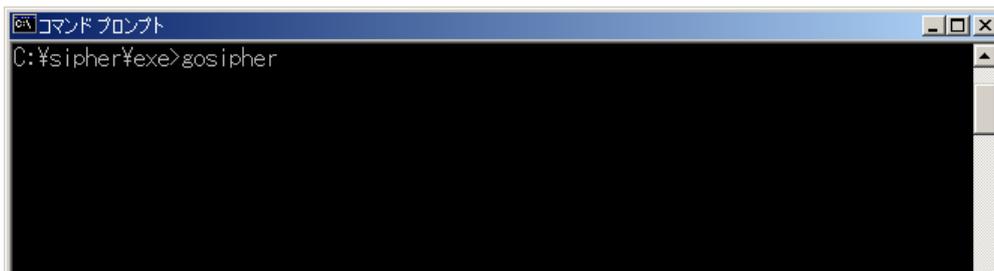
図- 3.7.2.3 計算結果の出力

(4) モデルの実行

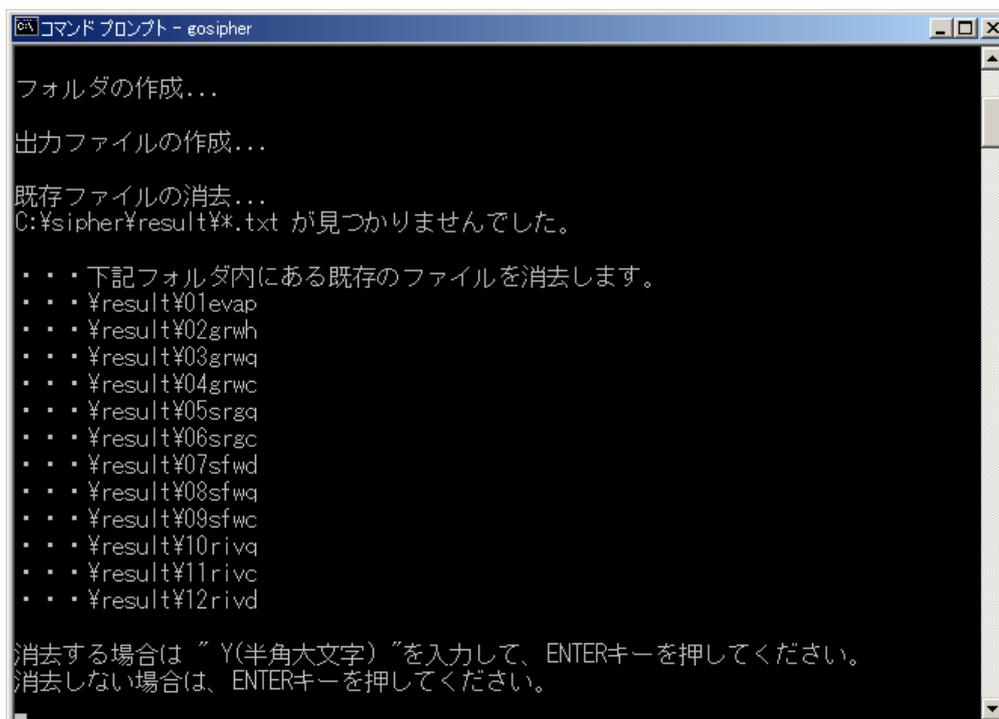
全ての入力ファイルを準備した後、以下のような手順でモデルの実行を行う。

1) 流域モデル

- ・ 「スタートメニュー - アクセサリ」から、コマンドプロンプトを立ち上げ、現在のディレクトリを「exe」フォルダがある場所に設定する。
- ・ “gosipher” と入力し、「Enter」キーを押す。



- ・ 「sipher¥result」フォルダ内にある、過去の計算結果ファイルを消去して良ければ、「Y」を入力して、「ENTER」キーを押す。消去せず残しておく場合は、何も入力せず、「ENTER」キーを押す。



- ・ この処理後、計算が自動的に開始される。
- ・ 助走計算を行う場合には、助走計算が開始される。助走計算終了後、本計算が自動的に開始される。

```

コマンド プロンプト - eosipher
現在 ¥result¥06srgcフォルダ内のファイルを消去中です。 . . .
現在 ¥result¥07sfwdフォルダ内のファイルを消去中です。 . . .
現在 ¥result¥08sfwqフォルダ内のファイルを消去中です。 . . .
現在 ¥result¥09sfwcフォルダ内のファイルを消去中です。 . . .
現在 ¥result¥10rivqフォルダ内のファイルを消去中です。 . . .
現在 ¥result¥11rivcフォルダ内のファイルを消去中です。 . . .
現在 ¥result¥12rivdフォルダ内のファイルを消去中です。 . . .

**RESTA ofname= ../RESTART/RESTFL2001010100.FIL
**RESTA ofname= ../RESTART/RESTFL0000000000.FIL
**** 助走計算開始 ****
助走計算継続時間      120時間
助走計算      1時間目 CPU TIME =      10.562
助走計算      2時間目 CPU TIME =      18.828
助走計算      3時間目 CPU TIME =      27.062
助走計算      4時間目 CPU TIME =      35.312
助走計算      5時間目 CPU TIME =      43.547
助走計算      6時間目 CPU TIME =      51.781
助走計算      7時間目 CPU TIME =      60.031

```

- ・ 計算が終了すると、画面に“ SUCCESSFULLY ENDED ”“ Sipher-Model 終了 ”と表示される。

2) 湖沼モデル

- ・ “ 入力データ設定.xls ” を起動し、ファイルに記載の指示に従い、流域モデルの出力ファイル “ 10LAKEINPUT.txt ” の内容を貼り付け、マクロを実行し、データ整理を行う。
- ・ “ 霞ヶ浦湖沼モデル.xls ” を起動し、“ 入力データ設定.xls ” でのデータ整理結果を所定のシートに貼り付ける。
- ・ シート「MENU」にて「計算実行」ボタンをクリックしてマクロを実行し、計算を行う。
- ・ 計算結果は、シート「Rslt1」「Rslt2」に出力され、図化したグラフがシート「graph」に表示される。

3.8 インターフェイスの整備

3.8.1 インターフェイスの全体像

霞ヶ浦水物質循環モデルは、霞ヶ浦流域の陸域を対象とした水物質循環モデルに、霞ヶ浦の湖沼を対象にした生態系モデルを融合したモデルである。このモデルより流域の上流から河口を経て最終的に湖沼へ至るまでのシームレスな水物質循環モデルとして取り扱うことができる。

各モデルは単体のエンジンとして起動するが、GIS(ESRI 社 ArcGIS)をプラットフォームとして、パラメータの確認と修正、施策の選択、モデルの実行、結果の可視化による水物質循環モデルと流域での施策効果の検討など一連の操作が同一の画面上で行うことができる。

インターフェイスで行う操作の全体像を図- 3.8.1.1に示す。水物質循環モデルを GIS インターフェイスから操作するには、まず表や図面(GIS、写真など)、データ、書籍等の様々なデータソースを、パーソナルジオデータベース形式(Microsoft 社 Access の MDB ファイルにデータが格納される)で整理する必要がある。この GIS データベースに基づき、インターフェイスはモデル入力ファイルを作成し、解析を実行、結果の可視化を行うことができる。

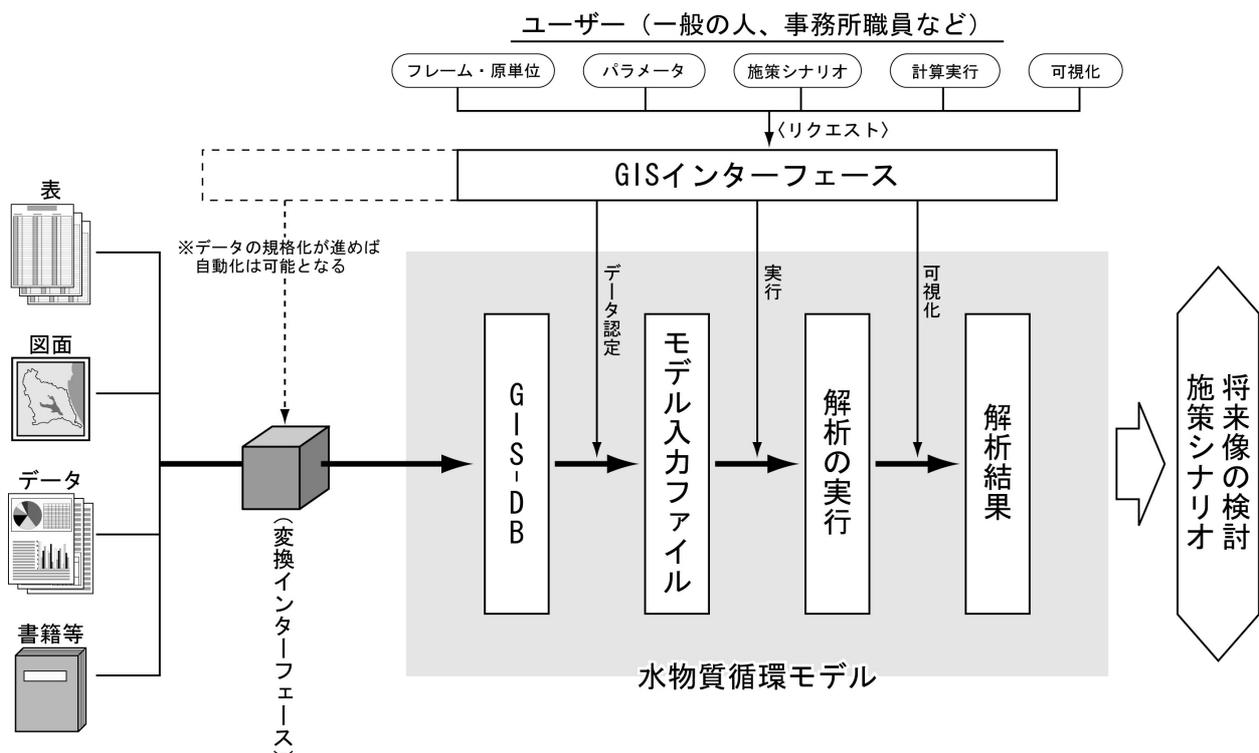


図- 3.8.1.1 インターフェイス概念図

またインターフェイスでは、様々な施策による流域や湖沼へのインパクトを検討したり、過去の状況を再現したりすることが可能である。インターフェイスで選定可能な施策の項目と概要を表 3.8.1.1 に示す。プルダウンメニューで施策を選択し、ダイアログで対策量を入力することで、各施策あるいはシナリオ(施策の組み合わせ)による効果の検討ができる。

インターフェイスで検討できる施策は、大きく分けて 3 つある。

フレーム設定: 過去や将来の人口や土地利用など、フレームに関する設定を行う。

流域対策: ポイント・ノンポイント負荷を削減する陸域対策の対策量を設定する。

湖内対策: 浚渫や植生浄化など湖内対策での対策量を設定する。

これら 3 つの施策を組み合わせることで、湖沼の将来予測や過去状況の再現を行うことが可能となる。

表- 3.8.1.1 インターフェイスで選定可能な施策

大項目	小項目	概要
フレーム設定	人口・汚水処理形態別人口	流域の人口と汚水処理形態別人口の変更を行う。
	土地利用	流域の土地利用を変化させる。
	家畜頭数	将来の家畜頭数を増加あるいは減少させる。
	事業所・工場	事業所・工場を増加あるいは減少させる。
流域対策	下水道・高度処理型合併浄化槽整備	下水道水洗化人口、高度処理型合併処理浄化槽の人口の増加を設定する。
	各戸雨水貯留・浸透	各家庭で設置する雨水貯留浸透施設（雨水マス、トレンチ等）を設定する。
	透水性舗装	道路や歩道、駐車場に整備する透水性舗装を設定する。
	下水処理水の再利用	農地還元：下水処理水を農業用水として再利用することにより、農業用水取水量と下水処理場からの排水量を削減する。 生活用水利用：下水処理水を生活用水（トイレ用水など）として再利用することにより、生活用水取水量と下水処理場からの排水量を削減する。
	湿地浄化	河道内あるいは河川近辺に設置する湿地帯を設定する。
	環境保全型ライフスタイルへの転換	環境への負荷を低減するライフスタイルの転換により、一人あたりの生活用水の使用量・負荷量を削減させる。
	環境保全型農業	水田、畑への施肥量の削減を設定する。
	家畜し尿の農地還元	発生する家畜し尿のうち、現在農地還元されていないものを農地還元させる。
	調節池	流域に雨水の流出を一時貯留させる調節池を設定する。
	地下汚濁物質の囲い込み	地下水の流れをせき止め、地下における水・物質循環の流れを封じ込めるエリアを設定する。
下水処理場の高度処理化	下水処理場の高度処理による下水処理場からの放流水質濃度を設定する。	
湖内対策	浄化用水の導入	霞ヶ浦に流域外からの導水量を設定する。
	浚渫	底泥の浚渫量を設定する。
	植生浄化	水生植物などにより浄化が期待できる植生帯の面積を設定する。
	シジミ浄化	水を浄化する効果が見込まれるシジミの現存量や漁獲高を設定する。
	水産負荷対策	コイ養殖による負荷の削減を設定する。
	重点再生エリア	霞ヶ浦の特定水域において、囲い堤を設置して囲い込み水域を設定することで以下の効果が期待できる。 施策の集中的な実施による囲い込み水域内の水質改善 流入汚濁負荷の封じ込めによる周囲水域の水質改善

3.8.2 インターフェイスにおける操作の流れ

インターフェイス操作手順の流れは次ページ図- 3.8.2.1に示す通りである。(具体的な操作方法は巻末の参考資料 1 を参照のこと)

霞ヶ浦水物質循環モデルを立ち上げると、ユーザーはまず過去に保存した施策やシナリオを読み込むかどうかを選択する。過去に行った検討結果を閲覧したいときや、過去の検討に微細な修正を加えて再度計算を行いたいときには、保存データを読み込んでから起動する。そうでない場合は、現況データを読み込んで起動する。

ArcMap が立ち上がると、ユーザーは施策の選定を行う必要がある。フレーム設定、流域対策、湖内対策から単数あるいは複数の施策を選定し、それぞれの対策量を決定する。必要があれば、モデル入力パラメータや原単位についても変更することができる。

これでモデル実行のための準備は整っているが、構築した水物質循環モデルの実行には、1年間の計算で約1日を要する(CPU: Pentium4 3GHz、メモリ 2GHzの場合)。そこでインターフェイスではモデル実行前に施策効果の予測を立てるために、施策を行う前と後で排水量や排出負荷量、人口・土地利用などのフレーム値がどの程度変わるのを見ることができる。このためには、施策によるモデル入力条件の更新を行う必要がある。

条件設定前後の比較を行い、施策効果が見込めそうであれば、モデルの実行を行う。ここでは、モデルで計算させる年月を選択し、流域モデル、湖沼モデルのどちら(あるいは両方)を実行するのを選択する。ただし湖沼モデルについては、実行画面に移るのみで、自動的に計算の実行はなされない。従って、流域モデルの計算が終了し、湖沼モデルの画面に映れば、「計算実行」のボタンをクリックして湖沼モデルを動かす必要がある。

モデル計算が終了したら、結果の可視化を行って施策効果の検討を行う。可視化は蒸発散モデル、地下水モデル、地表流モデル、河道流モデル、人工系モデル、湖沼モデルの6つのモデルにおいて可能である。

モデルの入力条件、あるいは計算結果は、保存することができる。保存に当たっては検討したケースの名称の他、概要を入力して保存が可能である。ただし計算結果については、全ての計算結果を出力していた場合には1年間の計算結果でも数十GBの容量を必要とするため、注意が必要である。

以上でインターフェイスを用いたモデル計算は終了であるが、引き続き他の施策計算を行う際や、途中で施策入力を間違えた場合には、データを全て現況に戻すことで再度初めから施策の選定を行うことが可能である。

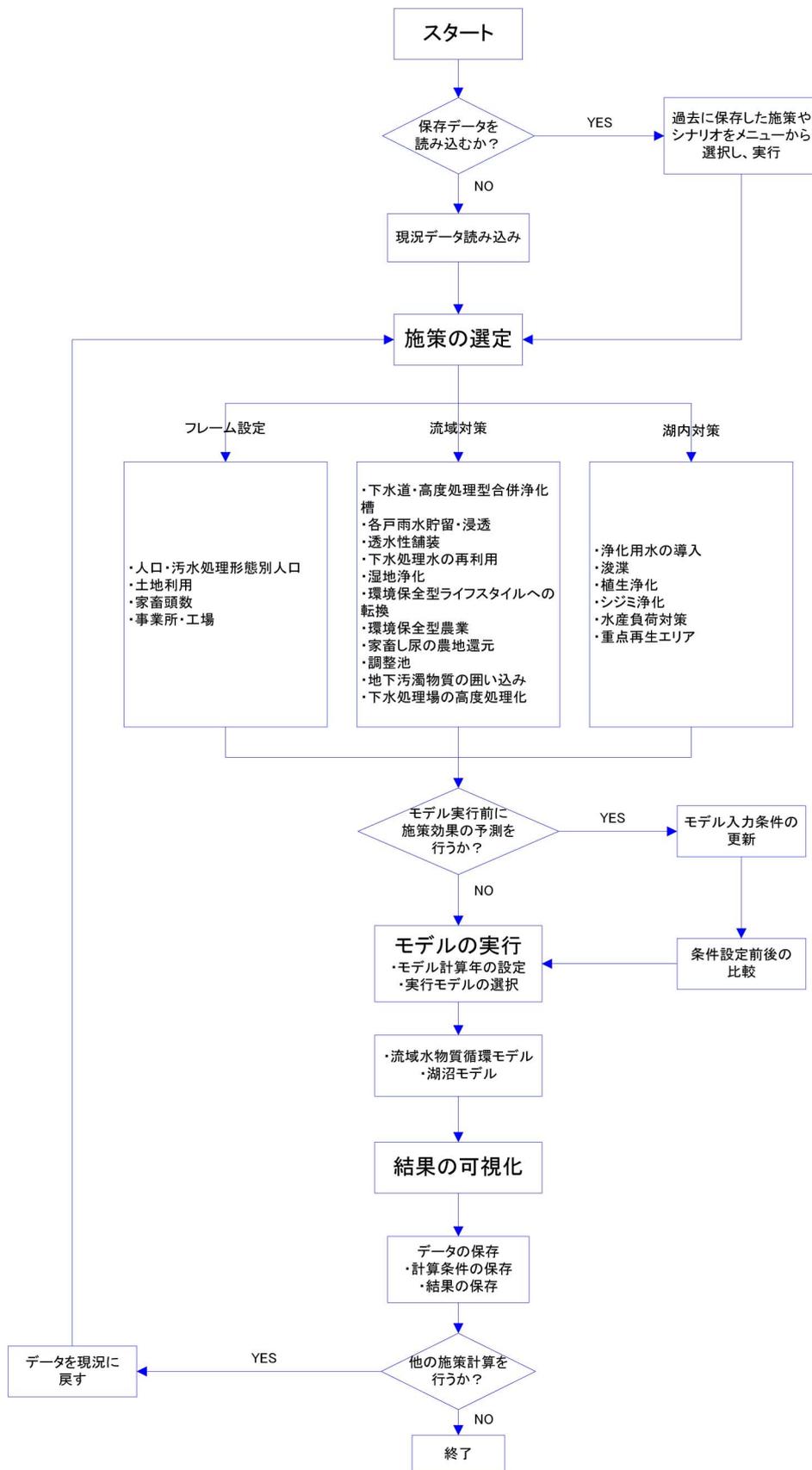


図- 3.8.2.1 インターフェイス操作手順

3.8.3 インターフェイスにおける計算手順

インターフェイスは図- 3.8.3.1に示すフォルダ構成となっている(保存されるディレクトリはインターフェイスのセットアップにおいて指定可能)。各フォルダの役割は以下の通りである。

(1) DispShape フォルダ

霞ヶ浦 GIS で表示させる市町村界や流域界、河川などの SHP ファイルが格納されている。

(2) Proj フォルダ

インターフェイスを立ち上げるための実行ファイルや、ユーザーが選択した施策からモデル入力ファイルを作成したり、結果の可視化を行ったりするためのプログラムが格納されている。

(3) User フォルダ

ユーザーが保存した検討ケースの入力条件・結果が、ケースごとに一つのフォルダとして格納される。

(4) Work フォルダ

ユーザーがインターフェイスを立ち上げたときに、作業フォルダとして現況フォルダか User フォルダ内各ケースのどちらかの内容がコピーされる。ユーザーがインターフェイス上で指定した施策や対策量は、全てこのフォルダ内のファイルに反映される。

(5) 現況フォルダ

霞ヶ浦の現況に関するデータベースや、モデル入力ファイル、湖沼モデル、結果の可視化のためのファイルが格納されている。

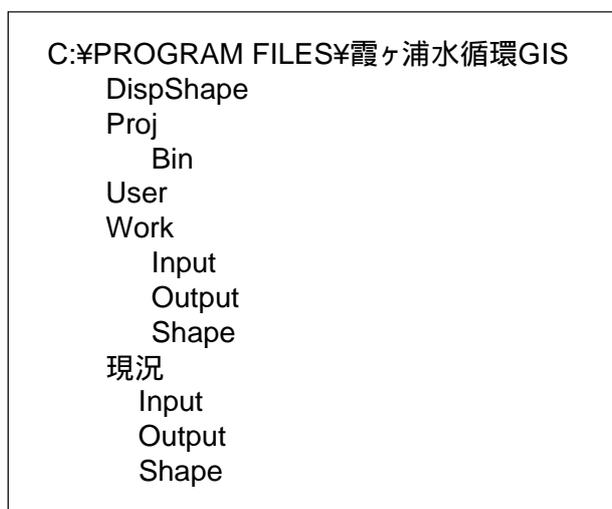


図- 3.8.3.1 インターフェイスのフォルダ構成

次に、インターフェイスにおける計算手順を、システムを立ち上げた段階から結果の可視化に至るまでで時系列に追うと以下ようになる(項目番号は図- 3.8.3.2内の番号に対応)。

システムを立ち上げると、現況再現の場合には現況フォルダの中身が Work フォルダにコピーされ、保存ケースを選択した場合には User フォルダの中の該当ケースの中身が Work フォルダにコピーされる。

インターフェイスでフレーム設定や施策を行うと、その結果はまず Work/Shape 内のパーソナルジオデータベースに保存される。

「モデル入力条件の更新」を行うと、Work/Shape 内のデータベースに基づいて Work/Input 内のモデル入力ファイルが更新される。

「計算実行」を行うと、 のプロセスを経て Work/Input 内のモデル入力ファイルが霞ヶ浦水物質循環モデルに入力され、流域モデル、湖沼モデルの計算が行われる。

計算終了後、「結果の可視化」を選択すると、霞ヶ浦水物質循環モデルの結果を読み込んで GIS 上で表示させる(Work/Output 内ファイルを用いて行われる)。

ただし、ここで説明したインターフェイスの計算手順については、基本的にユーザー側が意識する必要はない。

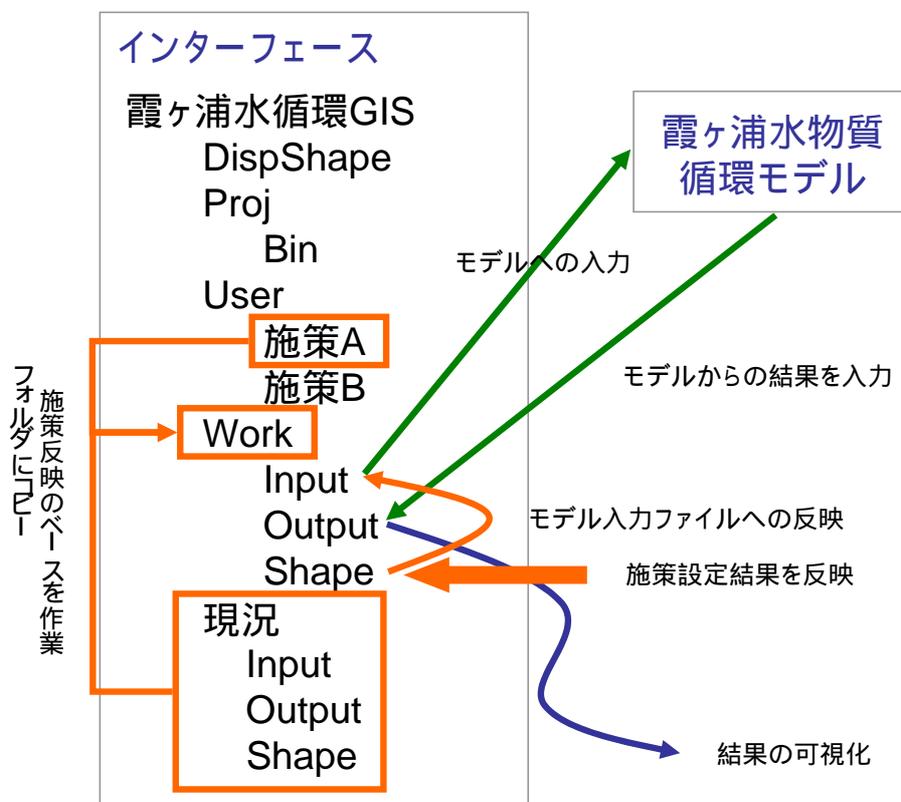


図- 3.8.3.2 インターフェイスにおける計算手順

3章 参考文献

- 1) 健全な水循環系構築に関する関係省庁連絡会議:健全な水循環系構築のための計画づくりに向けて, pp37-45, 2003.
<http://www.mlit.go.jp/tochimizushigen/mizsei/junkan/keikakudukuri.html>
- 2) 「都市小流域における雨水浸透、流出機構の定量的解明」研究会:都市域における水循環系の定量化手法-水循環系の再生に向けて-, pp.44-82, 2000.
- 3) 竹下伸一, 高瀬恵次:蒸発散サブモデルを導入した長期間流出モデルの開発, 水文・水資源学会誌, 第16巻1号, pp23-32, 2003.
- 4) 塚本良則編:森林水文学, 文永堂出版
- 5) 竹下伸一, 三野徹:多目的計画法によるIE-Model 定数の同定とモデル評価, 平成14年度農業土木学会大会講演会
- 6) 土木学会:水理公式集(平成11年版), 1999.
- 7) 宗宮功編著:自然の浄化機構, 技報堂出版, pp90, 1990
- 8) 茨城県生活環境部霞ヶ浦対策課:第4期の霞ヶ浦に係る湖沼水質保全計画策定関係資料集, 2004.
- 9) 下水道統計
- 10) Sherwood C. Reed et al.著・石崎勝義ら訳:自然システムを利用した水質浄化, 技報堂出版, 2001.