

分布型流出モデルの広域的適用

Application of a Distributed Model for Large River Watersheds

安陪 和雄¹ 大八木 豊² 辻倉 裕喜³ 安田 佳哉⁴

Kazuo ABE Yutaka OYAGI Hiroki TSUJIKURA Yoshiya YASUDA

¹ 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)

² 正会員 工修 (株)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)

³ 正会員 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)

⁴ 正会員 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)

We applied a distributed model, which Yoshino et al. had developed for the Lake Kasumigaura watershed. As this model was initially developed for mountainous area, we attached a quasi-three dimensional ground water model to it. The estimated result in river discharge, ground water height and lake surface height explained observed data almost successfully. Along with this, we estimated hydrological cycle of highly urbanized area in a standard grid cell and overall watershed. Compared to the latter, the former showed well the feature of hydrological cycle in urbanized area. The result showed that a distributed model attached a quasi-three dimensional ground water model was effective to enhance watershed management.

Key Words : *distributed model, quasi-three dimensional ground water model, hydrological cycle, standard grid cell, GIS, watershed management*

1. はじめに

我が国の河川計画や洪水予測には貯留関数等の集中型モデルを使用することが多い。集中型流出モデルは、降雨と流量の関係だけに着目して解析されるため、土地利用変化による流出量の変化予測、生活・工業・農業用水等、人工系水循環の局所的な変化による流出量の変化予測に対応できない。一方、分布型流出モデルは、流出現象を物理的に扱うため流域を細分し、各メッシュにパラメータを与えるため、集中型流出モデルが対応できないこのような変化予測が可能となる。

洪水流量の増大、低水流量の減少、河川水質の悪化等は、流域の都市化等と密接に関わっている。河川審議会答申¹⁾にもあるように、今後の河川行政は、行政機関のみならず地域住民、企業、NPO等と協働して水循環健全化に向けた取組を推進していくことが必要とされている。分布型流出モデルは、地域住民、企業、NPO等が関心のある地域情報を取り込み表現できるので、水循環健全化に向けた取組を支援するツールとして最適である。

吉野ら²⁾は、主要な流出の物理機構を残したまま大流域にも適用できる実用的な分布型流出モデルを開発している。また、そのモデルを山地河川流域である草木ダム流域(254km²)に適用し、年流出量及び洪水流出量に対して良好な適合性を得ている。

河川流域は、山地部だけで構成されることはまれであり、流域開発の進行した平地部を含むことが一般的である。鈴木ら³⁾は、洪水予測支援ツールとして吉野らが開発したモデルを活用するため、富士川流域を対象に、モデルを一部簡略化して、洪水時の観測河川流量と計算値を比較してモデルの適用性を検証している。一方、吉野らが開発したモデルを水循環健全化支援ツールとして活用するためには、広域的かつ一般的な河川流域に適用し、洪水時並びに低水時の観測河川流量と計算値を比較し、その適用性について確認しておく必要がある。併せて、モデル適用の必要条件となるデータセットの実用的な構築手法を確立する必要がある。

本研究は、広域的かつ一般的な河川流域として、社会経済活動の盛んな霞ヶ浦流域(2,135km²)を対象に吉野らが

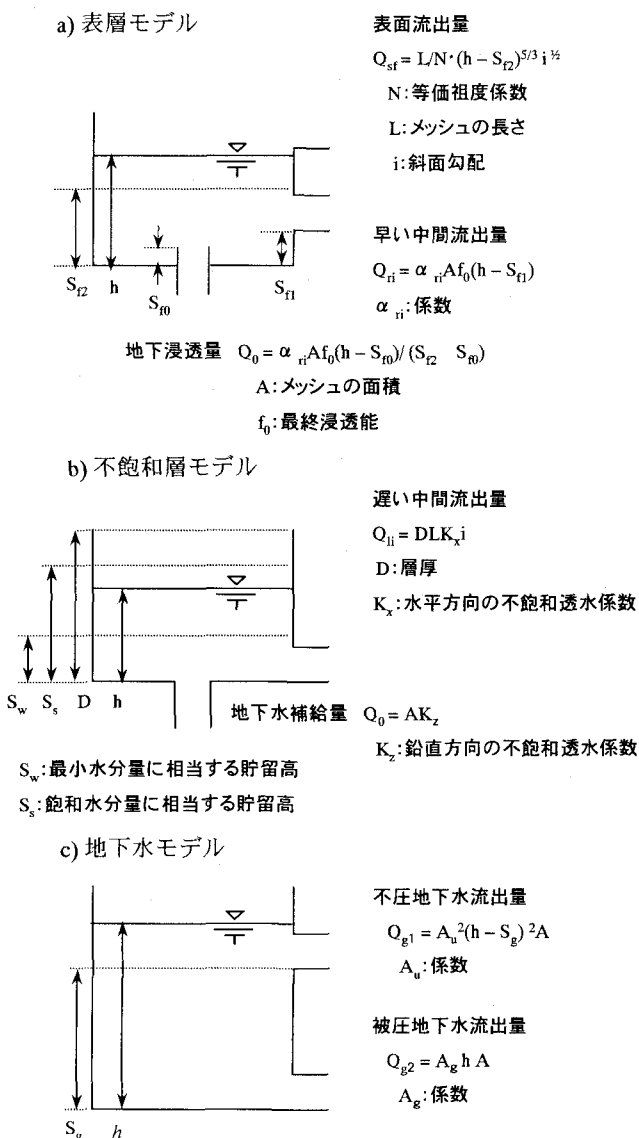


図-1 分布型流出モデルの概要

開発した分布型流出モデルを適用し、今後の全国展開への可能性を踏まえつつ、実用性に配慮した分布型流出モデルの適用手法を確立しようとするものである。

2. 分布型流出モデルとその他の付加モデル

(1) 分布型流出モデル

吉野らが開発した分布型流出モデルの概要を図-1に示す。また、モデル構築の基本的な考え方を以下に示す。

a) 表層モデル

表面流は Manning 則が成り立つものとする。早い中間流出量と地下浸透量は貯留高に比例するものとする。

b) 不飽和層モデル

遅い中間流は、不飽和透水係数に比例し動水勾配が近似的に地形勾配に等しいとして流出量を計算する。地下水モデルへの補給量は不飽和透水係数に比例し、動水勾配を1として計算する。

不飽和透水係数は、数値計算を容易にするため水平方

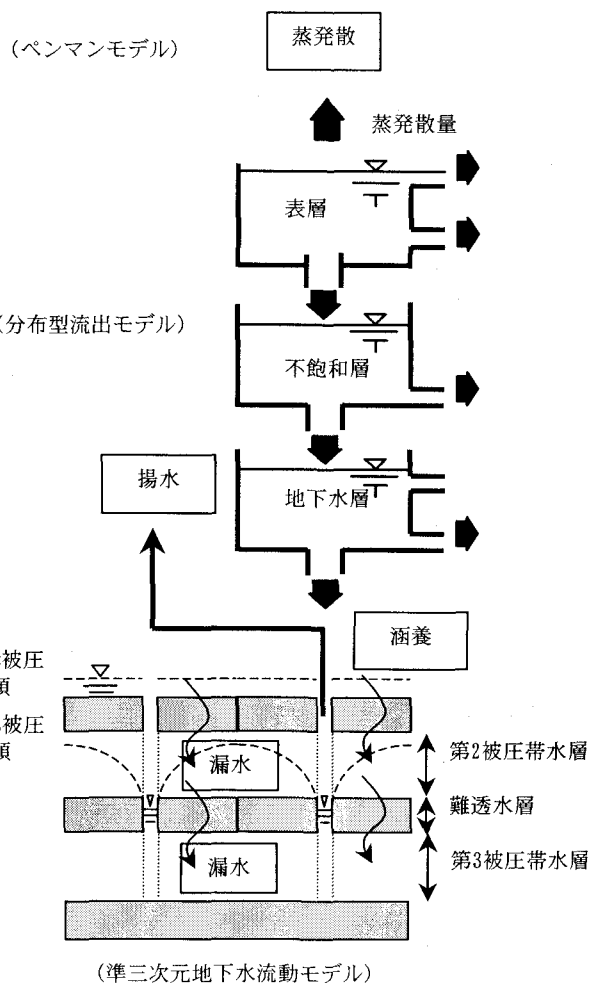


図-2 分布型流出モデルと地下水流動モデル

向と垂直方向の不飽和透水係数をそれぞれ(1)、(2)式とする。 θ は不飽和層の水分量であり、貯留高(h)と層圧(D)の比(h/D)である。

$$K_x = K_{sx} \cdot \frac{\exp(b \cdot \theta) - \exp(b \cdot \theta_w)}{\exp(b \cdot \theta_s) - \exp(b \cdot \theta_w)} \quad (1)$$

$$K_z = K_{sz} \cdot \frac{\exp(b \cdot \theta) - \exp(b \cdot \theta_w)}{\exp(b \cdot \theta_s) - \exp(b \cdot \theta_w)} \quad (2)$$

K_x : 水平方向の不飽和透水係数,

K_z : 垂直方向の不飽和透水係数,

K_{sx} : 水平方向の飽和透水係数,

K_{sz} : 垂直方向の飽和透水係数,

b : 定数, θ : 水分量 (h/D),

θ_s : 飽和水分量 (S_s/D), θ_w : 最小水分量 (S_w/D),

S_s : 飽和水分量に相当する貯留高,

S_w : 最小水分量に相当する貯留高

c) 地下水モデル

地下水の流出は下段の穴が被圧地下水の流出として貯留高に比例し、上段の穴が不圧地下水の流出として貯留高の2乗に比例すると考える。

た。

湖底標高は、1/10,000 湖沼図（国土地理院）から抽出した。

降雨量、気温、日射、風速、湿度については、AMeDAS 観測データを使用した。河川流量、湖水位については、国土交通省の観測データを使用した。地下水位は、国土交通省と茨城県の観測データを使用した。

c) 人工系水循環

生活用水は、水道統計資料から市町村単位で水源別生活用水使用量を推定した。各メッシュの使用量は、「国勢調査・地域メッシュ統計」及び「国勢調査、事業所・企業統計調査等のリンク」（(財)統計情報研究開発センター）から各メッシュの夜間人口と昼間人口を抽出し、これらの人口をパラメータに使用するなどして推定した¹¹⁾。

工業用水は、従業者 30 人以上の事業所を対象に工業統計資料から市町村単位で水源別工業用水使用量を推定した。各メッシュの使用量は、工業統計メッシュデータ（(財)通商産業調査会）から抽出した。事業所数が 2 以下のメッシュでは工業用水使用量が秘匿されるため、これらのメッシュについては(6)式で推定した。すなわち、市町村単位の工業用水使用量から秘匿されていない事業所数 3 以上のメッシュ工業用水使用量の市町村合計値を差し引き、メッシュ工業用水使用量が秘匿されている各メッシュの事業所数で按分した。

$$miq_{s \geq 30} = \left(MIQ_{s \geq 30} - \sum miq_{s \geq 30} \right) \frac{mns_{s \geq 30}}{\sum mns_{s \geq 30}} \quad (6)$$

$miq_{s \geq 30}$ ：メッシュ単位の工業用水使用量（事業所数 2 以下）

$MIQ_{s \geq 30}$ ：市町村単位の工業用水使用量

$\sum miq_{s \geq 30}$ ：メッシュ単位の工業用水使用量の市町村合計値（事業所数 3 以上）

$mns_{s \geq 30}$ ：メッシュ単位の事業所数（事業所数 2 以下）

$\sum mns_{s \geq 30}$ ：メッシュ単位の事業所数の市町村合計値（事業所数 2 以下）

以上の推定は、従業者数 30 人以上を対象としている。従業者数 30 人未満事業所については、工業用水使用量のデータ自体が存在しないため、従業者数 30 人以上と従業者 30 人未満の製造品等出荷額の比率により推定した。

生活用水と工業用水の下水道流入量は、下水道計画図¹²⁾から対象年の整備区域をデジタイズし、GIS により基準地域メッシュにおける下水道整備区域の面積占有率を算出した。次に、基準地域メッシュ単位の生活用水使用量と工業用水使用量を各面積占有率に掛け合わせ各メッシュにおける生活用水と工業用水の下水道流入量を算出した。それらの下水道流入量を下水処理場単位で集計し、下水道統計に記載されている生活系処理量と工場系処理量を真値として補正した¹¹⁾。

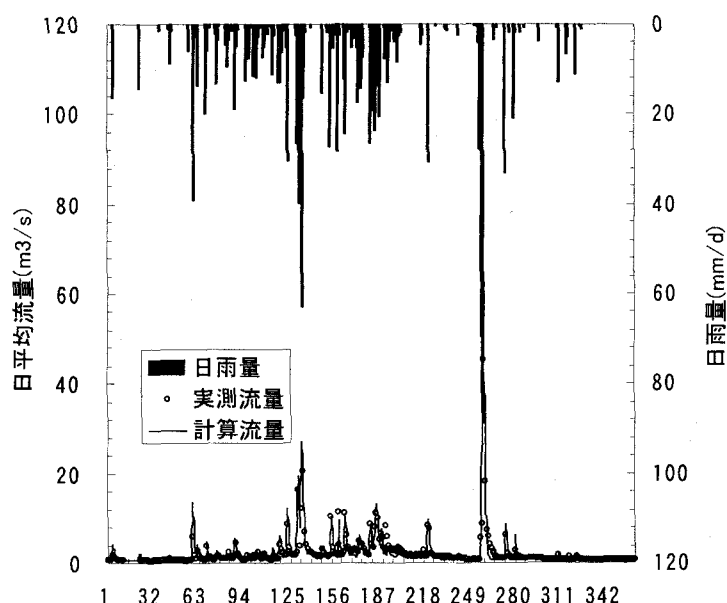


図-4 日流量の比較（小野川地点）

農業用水は、水源を水利権が存在する表流水と水利権の存在しない地下水に分類して使用量を推定した。表流水を水源とする灌漑区域については、国土交通省霞ヶ浦工事事務所が保管する紙地図をデジタイズして抽出した。地下水を水源とする灌漑区域は、GIS により、国土数値情報・土地利用ファイルの水田地域から表流水を水源とする灌漑区域と重複する水田地域を除外して抽出した。使用量については、霞ヶ浦工事事務所が保管する水利権単位の取水量報告値から日単位の取水量を抽出し、GIS により算定した水利権単位の灌漑面積との関係から、流域全体を対象とした単位面積当たりの平均的な灌漑用水取水パターンを作成し、各灌漑区域に割り当てた。

(3) モデルの検証

解析期間は 1995 年の 1 年間である。計算値と観測値の比較は 1 日単位とした。

モデルパラメータの値は、既存の文献を参考に、流域の特性を考慮して初期値を与えた。具体的には、分布型流出モデルの表層モデル、不飽和層モデル、地下水モデルのパラメータは、吉野ら²⁾及び鈴木ら³⁾を参考にキャリブレーションを行った。表層モデルのパラメータは土地利用の相違を反映させた。また、不飽和層モデル、地下水モデルのパラメータは、中野¹³⁾の分類に従い、土壌及び表層地質の相違を反映させた。地下水流動モデルの透水係数と貯留係数は、既存の文献^{14)、15)}から一般的な値を与えた。蒸発散モデルのアルベド、地中熱容量、実蒸発散量と可能蒸発散量の比は、KOTODA¹⁶⁾を参考に決定した。

モデルの検証は、河川流量、地下水位、湖水位に対し

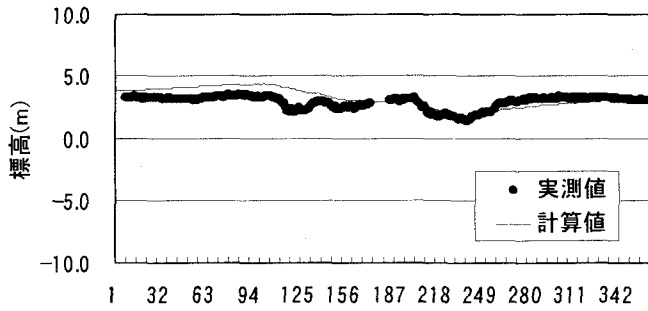


図-5 地下水位の比較 (出島地区)

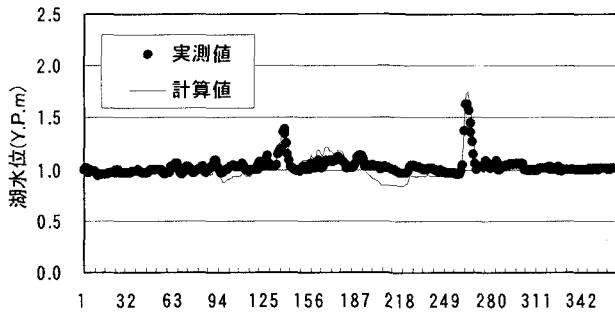


図-6 湖水位の比較 (湖心)

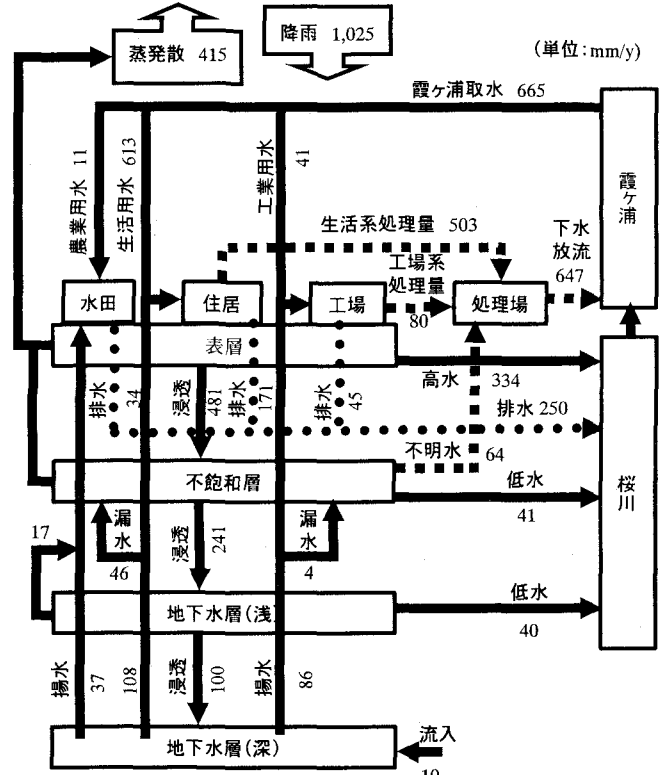


図-7 土浦市街地周辺の年間水収支

て行った。

小野川地点の実測河川流量と計算河川流量を比較した結果を図-4に示す。計算結果と観測結果は概ね良好な一致を示している。

出島地区の観測地下水位と計算地下水位を比較した結果を図-5に示す。計算結果は観測結果と比べて変動が若干緩慢であるが、変動パターンを概ね捉えている。

湖心の観測湖水位と計算水位を比較した結果を図-6に示す。計算結果は観測結果の変動パターンを概ね良く捉えている。

(4) 水収支の検討

水循環改善支援ツールとして、分布型流出モデルが有用な理由として、メッシュ単位で水循環を追跡できることが挙げられる。メッシュ単位で水循環が追跡されれば、市町村単位、河川流域単位、霞ヶ浦流域単位で水循環を追跡することは、それぞれの空間単位を構成するメッシュの水循環に係る諸量を合計すればよい。

図-7、8は、土浦市街地周辺1メッシュ及び霞ヶ浦流域全体における1995年の年間水収支である。水収支の単位を“mm/y”としているため、図-8の水収支が霞ヶ浦流域における平均的な1メッシュの水収支と考えて良い。

両者を比較すると、土浦市周辺市街地の1メッシュは、霞ヶ浦流域の平均的な水収支と比較して、生活用水使用量が16倍 $\{(613+108-46)/(20+26-4)\}$ 、工業用水使用量が3.7倍 $\{(41+86-4)/(12+24-3)\}$ 、農業用水使用量が0.19倍 $\{(11+37+17)/(191+88+56)\}$ であり、都市域の水循環の

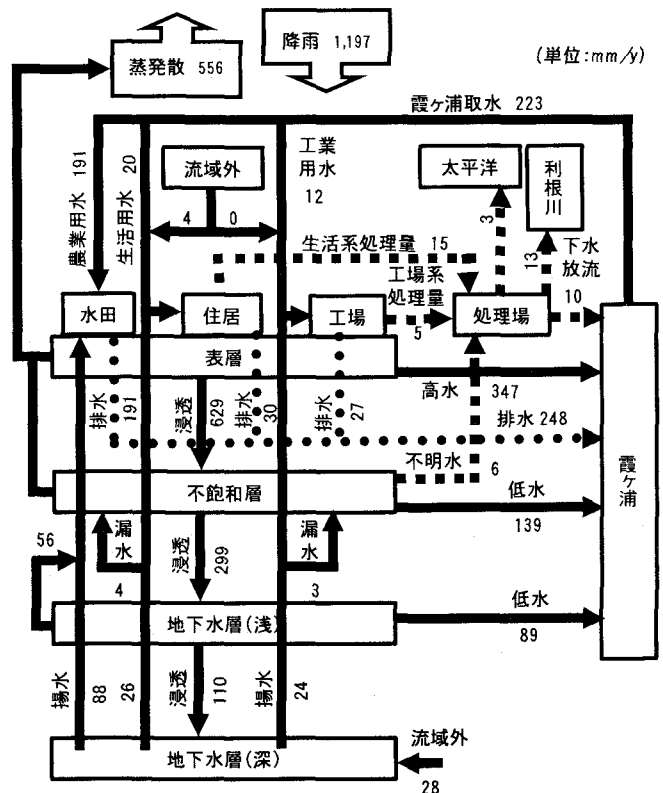


図-8 霞ヶ浦流域の年間水収支

様相を呈している。また、表層からの地下浸透量は、0.77倍 $(481/629)$ であり、都市化に伴う不浸透域拡大の影響が反映されている。この中には、水田からの地下浸透量

が含まれている。すなわち、農業用水の取水量における地下浸透量は、0.22 倍 $\{(11+37+17-34)/(191+88+56-191)\}$ である。

土浦市街地周辺 1 メッシュは、夜間人口：5,066 人、昼間人口：10,332 人、推定水洗化人口：4,211 人である。一方、土浦市の下水道接続率は、84.9%であり、これが仮に 100%になると、生活系処理量は 503 から 592 (mm/y) $(503 \times 100/84.9)$ に増大し、河川への生活系排水量は、171 から 82 (mm/y) に減少する。これは、低水時の河川流出量における生活系排水量の比率が、2.1 $\{171/(41+40)\}$ から 1.0 $\{82/(41+40)\}$ に減少することになり、都市域での下水道接続率を向上は地域の水循環に大きな影響を与えることが認められる。

4. 結論及び今後の課題

(1) 結論

本研究は、山地部と平地部を含む社会経済活動の盛んな霞ヶ浦流域に分布型流出モデルを適用したものである。得られた成果を要約すると以下ようになる。

- 1) 地下水流動モデルを組み込んだ分布型流出モデルを作成した。
- 2) 生活用水、工業用水、農業用水の人工系水循環を GIS 等を活用して基準地域メッシュ単位で推定した。
- 3) モデルにより霞ヶ浦流域の平均的な水循環と流域内における都市化の進捗した地域の水循環を比較した。後者は前者と比べて都市域の水循環特性を良く表現しており、基準地域メッシュ単位での水循環解析を可能とする分布型流出モデルの有効性が明確になった。

(2) 今後の課題

対象地域が広域になればなるほど、水循環解析は既存の統計資料等に頼らざるをえない。特に、生活・工業・農業用水等の人工系情報については、個別の施設の管理者が別々に取得・保有している。今後の水循環改善施策を立案する上で、個別の施設の管理者が取得・保有している情報は必要不可欠であり、共通のデータベース化が望まれる。

謝辞：貴重な資料を提供していただいた茨城県生活環境部霞ヶ浦対策課、同土木部下水道課、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) 国土交通省河川審議会答申：新たな水循環・国土管理に向けた総合行政のあり方について、流域における水循環はいかにあるべきか、平成 11 年 3 月
(<http://www.mlit.go.jp/river/shinngikai/shingi/index.html>)
- 2) 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
- 3) 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
- 4) 茨城県生活環境部：霞ヶ浦水質保全等関係例規集, pp. 109-118, 平成 7 年 3 月
- 5) 茨城県生活環境部霞ヶ浦対策課：霞ヶ浦関係資料集, pp. 34, 平成 12 年 3 月
- 6) 森北佳昭, 松下越夫：河川および湖沼流域における水量・水質解析モデル, 土木研究所資料第 2414 号, pp. 49-90, 1986
- 7) 佐藤正, 市川正巳, 榎根勇, 海老原寛, 新藤静夫, 青木直昭, 小沼直樹, 田中正：筑波地区における深層地質および深層地下水の地球科学的研究, 筑波の環境研究, Vol. 4, pp. 136-147, 1979
- 8) 佐藤正, 新藤静夫, 青木直昭, 市川正巳, 榎根勇, 田中正, 小沼直樹, 海老原寛：筑波地区における深層地質および深層地下水の地球科学的研究—その 2—, 筑波の環境研究 (自然編), Vol. 5A, pp. 1-8, 1980
- 9) 通商産業省工業技術院地質調査所：筑波研究学園都市及び周辺地域の環境地質図説明書, 1988
- 10) 経済企画庁総合開発局国土調査課：首都圏地下水 (深井戸) 資料台帳, 1972
- 11) 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
- 12) 茨城県土木部：茨城県下水道計画図 (平成 7 年 3 月 31 日現在)
- 13) 中野秀章：森林水文学, 森北出版, 1976
- 14) 松尾新一郎, 河野伊一郎：地下水位低下工法 (改訂増補), 鹿島出版会, pp. 20, 1979
- 15) 山本荘毅：新版地下水調査法, 古今書院, pp. 29, 1983
- 16) Kazuo KOTODA : ESTIMATION OF RIVER BASIN EVAPOTRANSPIRATION, Environmental Research Center Papers, NUMBER 8 , 1986

(2001. 10. 1 受付)