

タイ国、洪水低地帯における 地下水取水と地下水収支解析

ON GROUNDWATER BUDGET SIMULATION AND GROUND WATER EXTRACTION IN LOWLAND FLOODPLAIN, THAILAND

Phattaporn MEKPRUKSAWONG¹ ・ 市川勉² ・ 山田正³

Phattaporn MEKPRUKSAWONG, Tsutomu ICHIKAWA and Tadashi YAMADA

¹ Member of JSCE, Royal Irrigation Department, Thailand (Samsen Road, Dusit, Bangkok 10300, Thailand)

² 正会員 工博 九州東海大学教授 工学部都市工学科 (〒862-8652 熊本県熊本市渡鹿9-1-1)

³ 正会員 工博 中央大学教授 理工学部土木工学科 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

The floodplain in Phichit province, Thailand always has flood in rainy season and water lacking in dry season. This area is a major recharge area of Thailand and farmers set many wells for drawing groundwater, because of insufficient surface water during two times of paddy crop and unavailable irrigation systems. This causes severe decreasing of groundwater level with no sign of recovery. In inundation area, the average flood depth is about 2 m and has duration 1-2 month. The authors set up the observation systems in this study area to monitor their daily change in groundwater level, river water level, and rainfall. Flood water in this area recharges shallow aquifer and continuously flows down to deep aquifers. This paper presents the simulation of groundwater budget in this area based on the Tank model concept using data in 2002-2004. The results show that recharge through ground surface by flood is about 55% of annual recharge and 73% of annual recharge flow down to deeper aquifer.

Key Words: groundwater, flood plain, pumping, recharge, tank model

1. はじめに

タイ国には洪水が頻発する地域に農地が集中している。特に、Phichit県Yom川兩岸に位置する農地は毎年のように洪水が発生している。他方、この地域には灌漑用水がないために、地下水が主水源となり、農業用水として乾期のみならず雨期にも地下水が利用されている。しかし、特別な涵養機構もないため地下水位は年々減少しつつあるが^{1), 2)}、この地域で地下水の連続観測は行われていない。浅い部分にある地下水は地表面に近接しており(地表面下2-20m)、それゆえに、地表面からの涵養が盛んである。タイ国王立灌漑局(RID: Royal Irrigation Department, Thailand)と著者らはこの地域の地下水循環の解析を行うため、降雨、河川水位、地下水位観測井戸を設置し、観測を行った。さらに、農業用の灌漑井戸の位置、取水状況のデータをアンケート及び聞き取り調査によって収集した。本研究ではこれらのデータを使って地下水の取水量、地下水の涵養量などの水収支解析を行ったものである。この水収支解析には平面二次元の地

下水解析用に提案されたThiessen Polygon 型タンクモデルを用いた。このモデルはTyson&Weber³⁾によって1964年に提案されたもので、均質な地表付近の地下水に関して、連続式とDarcyの法則に基づいた運動方程式に基礎をおいている。

2. 研究地域

研究地域は図-1に示したようにタイ国首都Bangkokの北、約350kmに位置するChao Phraya川の支川であるYom川西岸である。この地域は面積約120km²、Yom川の洪水域で灌漑網はない地域である。その領域は洪水域と低い河岸段丘の2つに別れている。西から東方向へ勾配1%以下の湿地と自然の堤防が地表面の一般的状況であり、これらが、3%以下の河床勾配のYom川に沿って広がっている⁴⁾。

洪水氾濫は毎年9月から10月にかけてYom川の越流によって発生し、研究地域の50%近くが1~2ヶ月の間氾濫する。この地域の季節は、冬期(10月中旬から2月)、夏期(2月中旬から5月)、雨期(5月から10月)

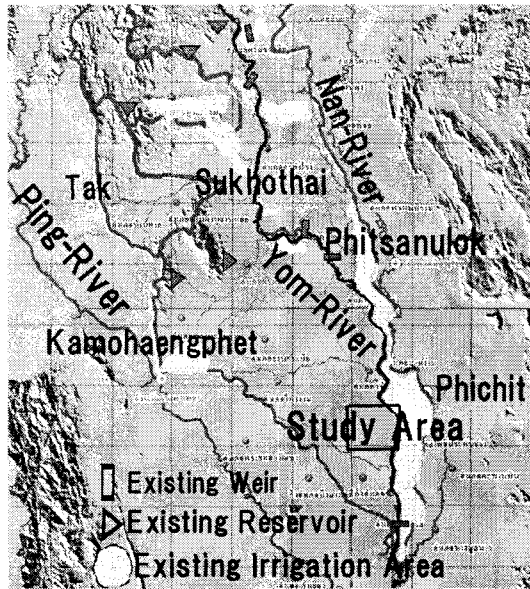


図-1 研究地域

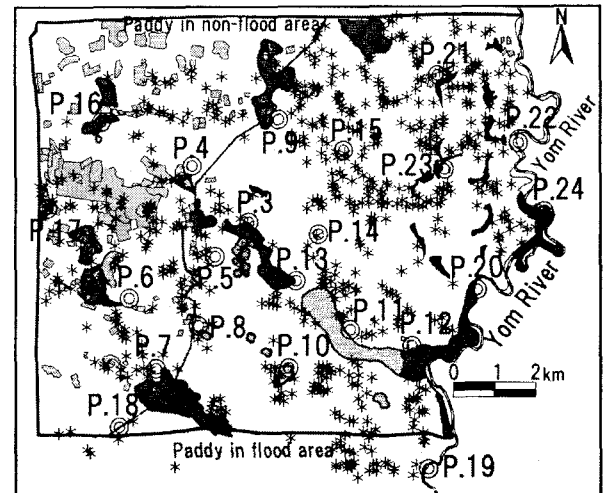


図-3 土地利用、観測井戸と灌漑用井戸

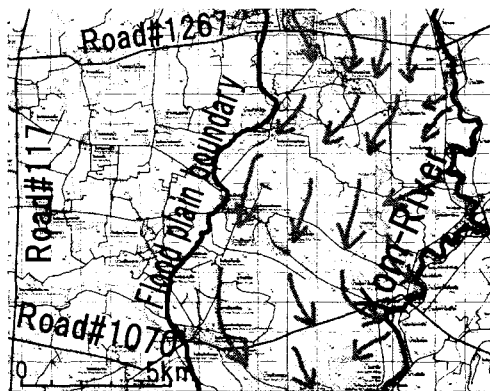


図-2 2002年の洪水域⁵⁾

crop	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Paddy (flood area)												
Paddy (non-flood area)												
Upland crop												

図-4 農作物の作付け状況

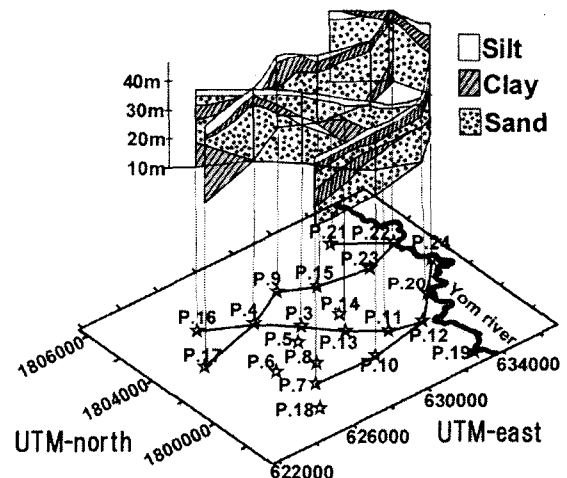


図-5 三次元地質図

の3つに別れる。年降水量は1434mm、平均降雨日数は80日であり、9月が最も降水量の多い月である。図-2は2002年における洪水域を示した⁵⁾。この地域の地表面の水源はYom川、細い水路、そして農業用水池である。Yom川の流下能力は約360m³/sであり、洪水期には流量がその流下能力を上回り標高34mの堤防を越流する。一方、この川は夏期の何ヶ月（2月から3月にかけて）かは水が流れない期間がある。地下水は乾期の主水源であり、図-3に示すように約900の灌漑用井戸がある。図-3には土地利用も示してあるが、この図に示しているように全体の86%が水稲の二期作である。この水稲の作付けは洪水の状況に左右され、Yom川の河川沿いでは9月から10月にかけて1~2ヶ月水稲作付けができなくなる。洪水を避けるために、農家は4月末から5月に作付けし、8月に刈り入れる。そして、洪水が過ぎた10月下旬から11月にかけて次の作付けを行う。洪水の無い地域では1ヶ月ほど遅れて作付けする。台地部ではトモシ、大豆、ササゲなどが5%の地域で栽培されている。稲作は主に二期作であるが、地表水と地下水の灌漑用水の供給状況によって灌漑用水が不足する地域もあり、地域によって98~31%の割合で二期作を行っている。図-4は年間の農地ででの作付け状況を示している。

3. 水理地質

研究地域は長い間、Yom川の洪水による堆積の影響を受けてきた。その結果、複雑な地層が形成された。地下水観測井掘削時のボーリングデータや現地揚水試験、土質試験などの結果を基に4つの地層堆積サイクルに分別し、地層図を作成した(図-5参照)⁶⁾。帯水層は第二層と第三層に厚さ数mで分布している。しかし、これら2つの帯水層を仕切る粘土層が研究地域の南西部にしか存在せず、Yom川に近い地域では同一の帯水層になっている。

著者らは2001年から22地点で地下水位、1地点で河川水位そして1地点で降水量を測定している(図-3

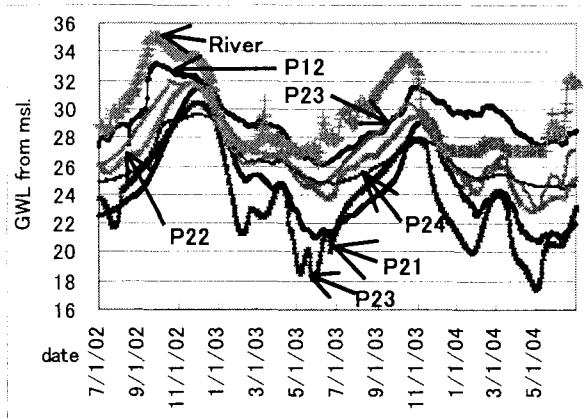


図-6 Yom川周辺の地下水位変動

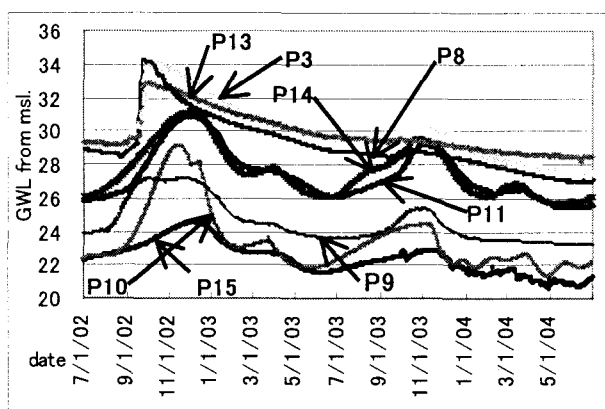


図-7 中央域の地下水位変動

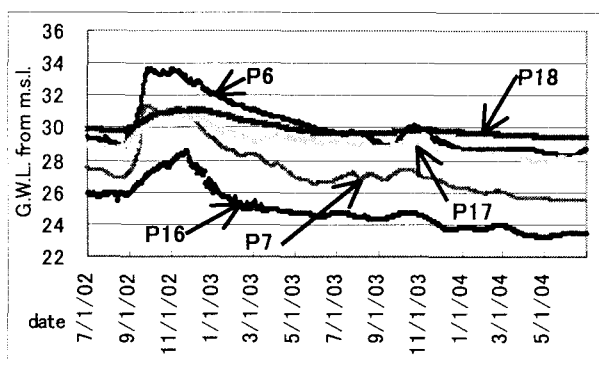


図-8 段丘域の地下水位変動

参照). 図-6～8はこれらの観測網で観測した地下水位と河川水位の2002年から2004年までの結果を示した. 図-6はYom川の水位と河川に近い地点の地下水位を示している. この地域の地下水は河川と直結しており, 氾濫地域のため河川の水位変動によく追従している. 図-7は中央地域の地下水位変動である. 2002年にはこの地域も洪水氾濫になったため, Yom川の水位とよく似た変化をしているが, 氾濫にならなかった2003年では地下水位の上昇はあまり見られない. これらから洪水氾濫による地下水涵養があることがわかる. 図-8は氾濫にならない西側丘陵部の地下水位変動である. P6とP7は2002年には地下水位が上昇している. P7は近くまで氾濫が来てい

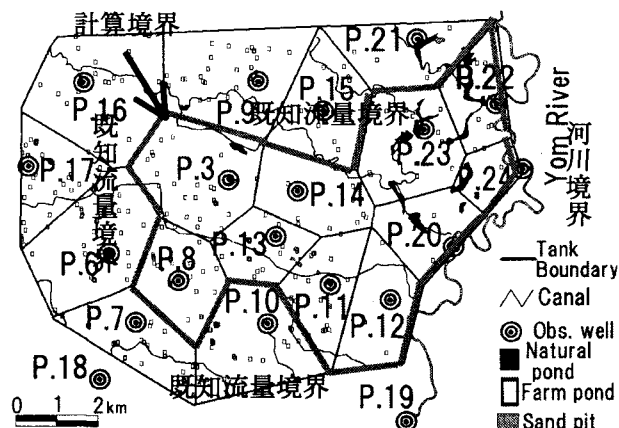


図-9 Thiessen Polygonと計算領域

た影響と思われる. P6は, 隣接した灌漑用の池の影響と考えられ, 渇水年の2003年に地下水上昇はほとんど見られない. これらの地下水位と河川水位を用いて地下水収支解析を行う.

4. 水収支解析モデル

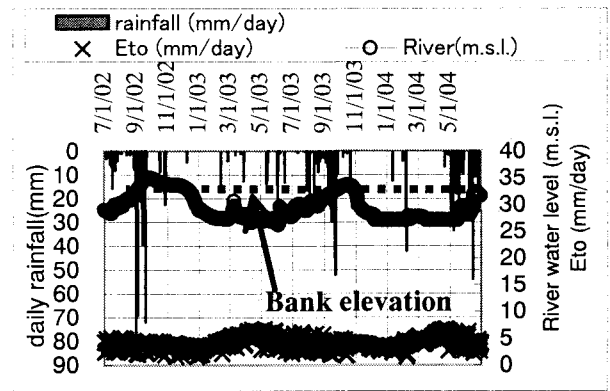
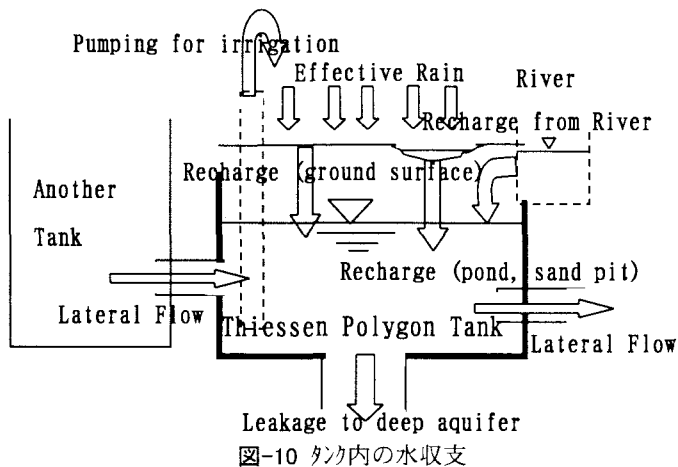
(1) 基礎方程式と計算モデル

研究地域は河川の氾濫地形であるため非常に平坦で, かつ, 非常に広い範囲に帯水層が分布している. また, 地質的にはシルト・粘土層と砂・礫層の互層であるが, 深さ30m程度までに2つの帯水層があり, かつこれを分離している難透水層は研究地域の南西部に存在するのみでほとんど一つの帯水層と考えても良いと考えられる. しかし, 地表からの涵養は農業などの土地利用, 氾濫, 河川など複雑な要因が多く, そのため, 地下水シミュレーションを行う前に, Tyson & Weber によるThiessen Polygon型のタンクモデルで水収支解析を行った³⁾. 図-9はこの地域のThiessen Polygonによる分割図である. 各要素の中心は観測井戸であり, おのおののタンクの境界は観測井戸を結ぶ直線の垂直二等分線で決められ, 図-9に示している. この研究地域の地下水は氾濫原の地下水であるため, 周辺に明らかな境界として利用できるものは河川境界(東側境界)だけである. その他の境界は地下水帯として連続している. そこで, 研究地域の外側に面した地点の各地下水観測点は計算領域境界外の既知水頭測点として取り扱い, その内側のタンク境界を通して流れる地下水流量を計算し, 既知流量境界とした. 計算領域は図-9の太線内として解析を行った.

水収支式は式(1)で表される³⁾.

$$\nabla \bar{v} + S \frac{\partial h}{\partial t} + Q = 0 \quad (1)$$

ここに, $\bar{v}$ はDarcy流速, h は各タンクの中の地下水位, S は帯水層の有効空隙率, Q は地表面の涵養, 揚水, 下層への漏水などタンクへ流出入する流量である. Tyson & Weberは式(1)を着目するタンク j (図-9の計算境界内の各タンク)について式(2) のように変形した³⁾. 式(2)で, A_j はタンク j の面積, $Y_{i,j}$ はタンク i, j 間の通



過伝導率, $J_{i,j}$ はタンク i, j 間の地下水流動面積, $L_{i,j}$ はタンク i, j 間の距離, k は透水係数, i は着目するタンク j に隣接するタンクである。

$$\Sigma_i (h_i - h_j) Y_{i,j} = A_j S_j \frac{dh_j}{dt} + A_j Q_j,$$

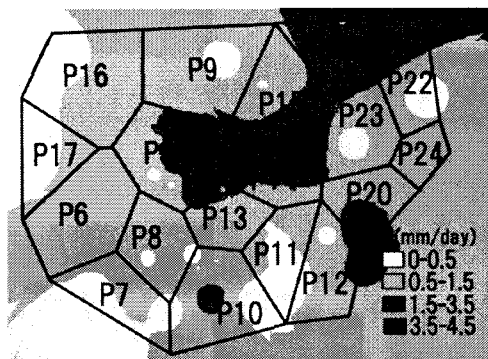
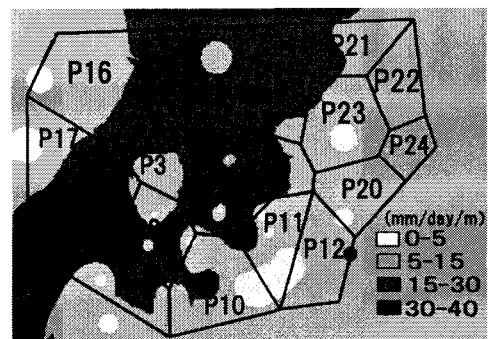
$$Y_{i,j} = \frac{J_{i,j} k h_{i,j}}{L_{i,j}} \quad (2)$$

式(2)の左辺は地下水の側方流動量を、右辺第一項は各要素における dt 時間当たりの貯留量の変化を表し、第二項は各要素における鉛直方向の涵養・流出量を表す。式(2)における涵養・流出として考えられるものは図-10に示したような鉛直方向の流出入量、すなわち、地表面からの降水、水田、洪水による涵養、地下水からの流出には灌漑用井戸からの揚水、帯水層下部を通じた漏水が考えられる。側方の流れは各要素間の地下水流動、河川からの漏水が考えられる。計算期間は図-6～8に示した研究地域全ての観測井戸で連続データを得ることのできた2002年7月～2004年6月の2年間とし、時間ステップ dt は1日とした。この期間の河川水位(標高)、降水量、蒸発散量(Eto)を図-11に示す。この図から2002年9月12日～24日は河川水位が堤防の高さを越えていることがわかる。この氾濫は12月初めまでこの地域に留まる。2003年の河川水位は堤防を越えていないが、上流部からの水が河川に近い範囲で氾濫を起こした。

(2) 涵養量・流出量の計算

a) 涵養量

地表面からの涵養は図-10に示したように降水、水田、洪水、灌漑用の池・砂採取場跡の池、自然池などから考えられる。このうち、各種の池からの涵養については、池の数、面積、池底の状況によって大きく変化する。そのため、定量的な評価ができない。したがって、これらの池からの涵養については、地下水位の変化と他の涵養の差から推定した。ただし、池の水位が乾期には低下して涵養はほとんどないと考えられる。また、地下水位が洪水期に上限に達した状況では涵養が促進できない状況になるので、洪水期の地



下水位のピク時から乾期の終わる4月までは涵養はないものとした。次に、地表面からの涵養は降水、水田及び洪水の湛水によるものである。これらの涵養量は地表面の浸透能力に依存する。湛水する場合の浸透については浸透能係数 a_c (mm/day/m, 単位湛水深当たりの浸透高さ、図-12) を用い、降雨浸透に関しては可能浸透係数 I_c (mm/day, 図-13) を用いた。これらの定数は現地試験によってその分布を求め、各要素の平均値を求め、涵養量を計算した。計算方法は、降水の涵養量は、降水が可能浸透量を超えた場合、(要素の全面積) × (可能浸透量)、降水が可能浸透量を超えない場合、(要素の全面積) × (降水量) で計算した。水田からの涵養量は、この地域の平均湛水深(10cm) × (浸透能力係数) × (水田面積) から計算した。しかし、水稻作付け状況は地域によって変化する、特に乾期では水不足が発生し作付けできない地域があるので、水稻作付け率(地域によって98～31%)を

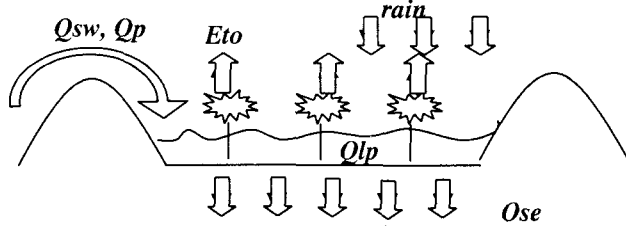


図-14 水田モデル

乗じることによって、水田からの涵養量を決めた。水稻作付け率は、聞き取り調査、資料収集によって決めた。洪水による涵養量は、河川水位から洪水水深を計算し、(洪水域の平均水深)×(洪水面積)×(浸透能力係数)×(水稻作付け率)から計算した。

b) 井戸からの揚水量

井戸は灌漑網が無いこの地域の農業用水の主要水源である。水稻作付け期間は図-3に示している。地下水揚水是水田への水の供給であるので、水田の水収支を考える。図-14に示したように水田の水収支に関係するものは、降水(rain)、水田からの浸透(Qse)、蒸発散量(Eto)、表流水の供給(Qsw)及び地下水揚水(Qp)である。そこで、各要素における表面水の水量、浸透能力、蒸発散量を求めた。表面水の水量はGISデータと現地調査から面積、平均水深を求め、全水量を推定した。浸透能力は現地調査の結果(図-12)から各タノの平均値を計算した。蒸発散量は気象観測所及びRIDのデータを参照し、Penman-Montheithの式から求めた⁷⁾。また、水田面積は土地利用図から求めた。地下水揚水量を計算する場合、井戸からの揚水にかかるガリン代などの経済的理由から、地表水を先に利用する傾向にあり、その傾向を考慮して地下水揚水量の日量を計算した。また、約900本の井戸の深度を調査し、最上部の帯水層の底部より深い井戸については帯水層の深さに比例配分して、対象とした帯水層からの揚水量とした。

c) 地下水流動量と下部帯水層への漏水

各タノ間の地下水流動量は、式(2)の左辺の側方流動項を計算した。計算対象のタノとこれに接する各タノ間の側方流動量の総和がそのタノの側方流動によるdt時間(1日)あたりの貯留量とし、この値から地下水側方流動による地下水位変動量を求めた。この計算で使う透水係数は現地揚水試験結果から、 $k=0.0032\text{cm/s}$ を、また、有効空隙率は同様に $S=0.083$ の値を用いた。Yom川の河川境界では、河川の側壁で大きな透水性があり、河床部は固いシルト・粘土であった。そこで、透水係数は帯水層と同じ値を用い、河川の帯水層との境界の面積を求め、Darcy則によって水位勾配と流積から流量を計算した。

帯水層の上部からの漏水や帯水層間の漏水は、一般に、式(3)で表すことができる。

$$Q_L = -k'_z \left(\frac{h - h_L}{b'} \right) wl \quad (3)$$

ここに、 Q_L は漏水量、 k'_z は鉛直方向の透水係数、 b' は漏水層の層厚で、 k'_z/b' は漏水係数である。また、

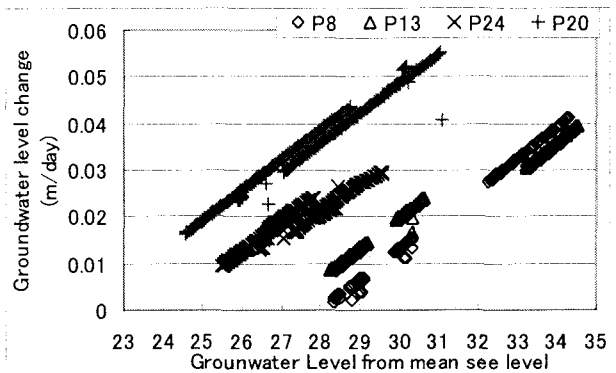


図-15 地下水位の日あたり低下量と地下水位

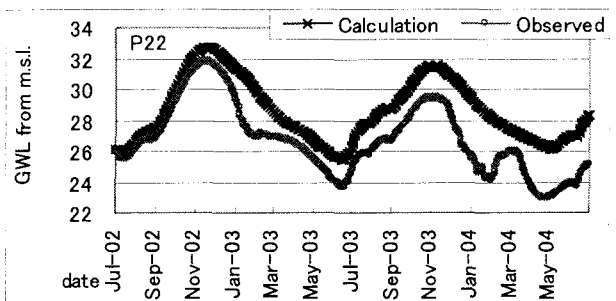


図-16 地下水位の変化比較(Yom川沿い P20)

wl は各タノの面積である。 h, h_L は漏水のある上下の帯水層または給水源の水頭である。この式(3)は、

$$\frac{Q_L}{wl} = F_L = -\frac{k'_z}{b'} h + \frac{k'_z}{b'} h_L \quad (4)$$

と書き換えることが出来る。ここに、 F_L は、漏水フラックスである。もし、下部帯水層の水頭が大きな変化がなく一定と考えられるなら、この式(3)は直線の式に置き換えられる。実際に、下部の帯水層の水位変動は上部の帯水層に比べ小さいことから、漏水フラックスを直線式で表すことを試みた。研究地域の地下水位変動は、水位低下期は乾期であり、水田の作付けがない場合、地下水の流動のみが水位に影響を与える。そこで、1日あたりの地下水位低下量から側方流動による地下水位変動量を引いた値を漏水フラックスとし、地下水位との相関をとった。その例が、図-15である。図-15より、漏水フラックスは式(4)の形式で表すことができると考え、図-15の直線勾配が漏水係数として、この回帰式から漏水フラックスを求めた。

5. 計算結果

前章で示した計算方法によって、地下水の水収支解析を行った。図-16はYom川に沿った地域にあるP20の地下水位変動の比較である。この点では地下水位の上昇過程はよく再現されているが、低下過程及び小規模な地下水位上昇は再現されていない。P20は河川に近く河川と帯水層が直結しているところであるので、河川の水位変化の影響を受けやすいが、その形を追従できていない。河川からの涵養についてさらに検討する必要がある。図-17は、河川から

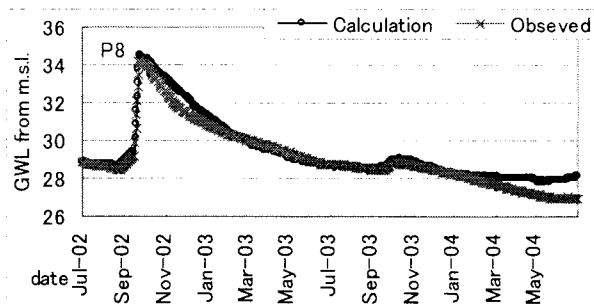


図-17 地下水位の変化比較(中央部 P8)

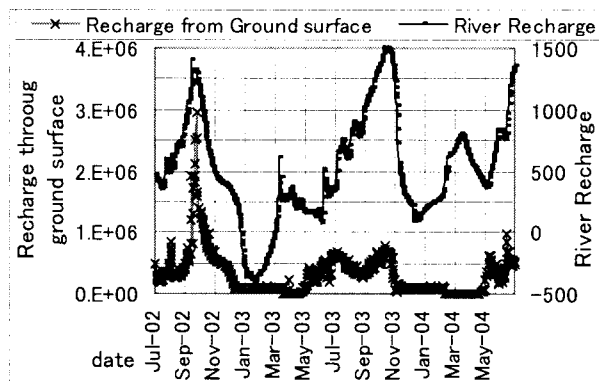


図-18 地表面からの涵養量と河川涵養量の日変化

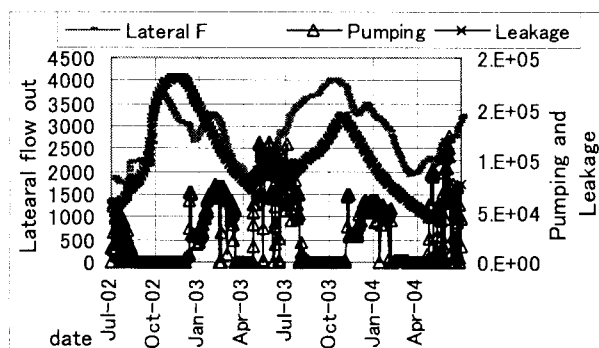


図-19 境界からの流出量、揚水量と漏水量の日変化

5km程度離れた洪水の縁部にあるP8の地下水位変動の計算結果と観測値の比較である。この地点は、河川の影響を受けていないので、複雑な地下水変動もなく、計算結果もよく一致している。

この計算結果から地下水収支を求めた。図-18は地下水涵養に関する項目である地表面からの涵養と河川の涵養を示している。地表面の涵養は洪水期で日最大約300万 m^3 になり、灌漑や雨期でも100～200万 m^3 の涵養があると推定された。2002年7月から一年間の総涵養量は約5500万 m^3 であり、そのうち、洪水期(約3ヶ月)の涵養が約55%の3100万 m^3 と洪水期の地下水涵養が大きい。一方、河川からの涵養量は日最大1500 m^3 程度とあまり大きくないが、河川沿いの地域の地下水には複雑な影響を与えていると考えられる。

次に、流出である図-19を見ると、計算領域外への流出が日最大約4000 m^3 とそれほど大きくないことがわかる。流出で最も大きいのが漏水であり、日最大

50万 m^3 、2002年7月から一年間で約4000万 m^3 と全涵養量の約73%が下方へ涵養されている。この地域の最上部の帯水層の地下水は、その地質構造の特殊性から、水平方向の流動よりも鉛直方向の涵養が大きく、さらに深い帯水層の地下水の補給が迅速に行われていることが推定される。また、地下水は灌漑期を中心に取水されており、日量最大15万 m^3 程度と考えられる。2002年7月からの1年間では約1000万 m^3 もの地下水が揚水されている。

6. まとめ

熱帯モンスーン地帯の低地洪水が頻発する水田地域で地下水位、河川水位及び降水量の連続観測を行い、Thiessen Polygon型のタンクモデルによって、地下水収支解析を行った結果、以下の結論を得た。

- ・洪水の頻発するこの地域の地下水変動は洪水の涵養を強く受け、洪水期の地下水涵養量は年間涵養量約5500万 m^3 の55%に達する。

- ・河川からの漏水は最大1500 m^3 /日程度であるが、河川周辺の地下水位変動には大きな影響を与えている。

- ・地下水の揚水量は日最大15万 m^3 、年間約1000万 m^3 にのぼる。

- ・年間の漏水量は約4000万 m^3 と推定され、最上部の帯水層では水平方向の流れより、下部の地層への漏水を主とする鉛直方向の流れが卓越している。

この地下水収支計算によって、ある程度の地下水の状況が把握できた。今後このデータを用い、さらに詳しい地下水シミュレーションをしていく予定である。

参考文献

- 1) Department of Local Administration: Thailand; The inventory of natural water resources in Thailand, pp. 219-222, 1988.
- 2) Public Works Department, Thailand: The feasibility study on groundwater conservation and recovery in Phichit province report, pp. 4-14, 1998.
- 3) Howell N. Tyson, Jr. and Ernst M. Weber: Groundwater management for the nation's future-computer simulation of groundwater basins, *Journal of the HYDRAULIC DIVISION, Proceedings of the A.S.C.E.*, HY4, pp.59-76, July 1964.
- 4) Department of Mineral Resources, Thailand: Groundwater map manual, Phichit Province, pp.16-17, 2001.
- 5) Sombat Chuenchooklin, Tsutomu Ichikawa and Sa-nguan Patamatamkul: Flood flow pattern and distribution of infiltration over large floodplain and natural groundwater recharge area, *Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE*, VOL.47, February, pp.211-216, 2003.
- 6) Phattaporn Mekpruksawong, Tsutomu Ichikawa and Tadashi Yamada: Hydrogeological condition and groundwater behavior in low land, Thailand, *Journal of JSHWR*, Vol.17, No.1, pp.32-42, 2004.
- 7) Royal Irrigation Department, Thailand: Crop coefficient of Penmans-Monteith, December, pp1-6, 1996.

(2004.9.30 受付)