

気候変動による京都盆地水系地下水環境への 影響評価

IMPACT ASSESSMENT ON GROUNDWATER ENVIRONMENT IN KYOTO BASIN BY CLIMATE CHANGE

バトル アブドレイム¹・栗津進吾¹・城戸由能²・中北英一³
Batuer Abudoureyimu, Shingo AWADZU, Yoshinobu KIDO and Eiichi NAKAKITA

¹学生会員 京都大学大学院工学研究科(〒615-8530 京都市西京区京都大学桂)

²正会員 工博 京都大学防災研究所 准教授(〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

³正会員 工博 京都大学防災研究所 教授(〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

It is predicted that global warming and climate change will affect both of global and regional water environment in future. Local downpours or serious drought may be brought in an unexpected region. It is suspected that these impacts finally affect on the groundwater flow and water quality. Therefore, investigation and analysis of the water budget and the material balance in basin-wide are important for conservation and utilization of the water resources. In this study, two-dimensional model of groundwater flow and quality was prepared for evaluation of groundwater environment in Kyoto basin. This model has good performance for simulation of groundwater level and it has acceptable performance for simulation of T-N concentration observed in Kyoto basin. So, this model was used for the impact assessment on the groundwater system in Kyoto basin by global climate change in future using of MRI-AGCM20 outputs.

Key Words : Groundwater environment, climate change, groundwater flow and quality model

1. 研究の背景と目的

地球規模の気候変動は地域水系に多大な影響を及ぼすことが予想されている。将来的な水資源としての地下水利用可能性やその保全対策を検討・実施するためには、地下水利用実態と水位変動および水質汚染状況についても十分考慮する必要がある。特に地下水は一旦汚染されると短期間での水質改善は困難であり、汚染状態は長期間に及ぶため、水資源の安全な利用の観点からも地下水質の継続的な監視が求められるとともに、気候変動等の自然要因や揚水量変動等の人為的要因を含めた将来的な水位・水質の時空間的な分布特性の解析が重要となる。

地域水系に及ぼす気候変動影響については河川表流水系を対象とした研究が近年多く見られる。井本ら¹⁾はGCM出力をベースに分布型流出モデルを用い、国内外の河川流域を対象にした解析を実施し、気候変動により流量偏差の拡大、ピーク流量の増大および洪水被害の増大が予測され、ダム等を有効活用した流域管理の必要性を指摘している。立川ら²⁾も同様にGCM出力と分布型流出モデルを用いて、最上川・吉野川流域の河川流況に及

ぼす影響について解析し、融雪流出量の変化や低頻度の洪水ピーク流量が増大する可能性を示し、将来的な貯水池管理方式の変更や必要となる河川整備のレベルなどの適応策・対応策に結びつく知見を得ている。

気候変動は降水・蒸発散・表流水・浸透等を通して地下水環境に大きな影響を及ぼす。IGES白書³⁾ではアジア太平洋地域の地下水水資源への影響として、一部地域での地下水涵養能力低下や降水量変動が大きくなり利用可能な表流水量に格差が生じるために地下水利用の増大、海面上昇に伴う沿岸地域地下水の塩水化が予想されることを指摘している。今井ら⁴⁾は海水準が低下した場合、沿岸部地下水位も低下して塩分濃度の侵入範囲が拡大すること、氷期における涵養量減少を考慮した地下水流動解析に基づき地下水位が低下するとともに、塩分濃度の変化は比較的小さいことを明らかにしている。このように、モデルを用いて降水量と気温の変動がもたらす直接的な水環境への影響を定量評価する研究が進められている。

そこで、本研究では、現在および将来の平常時の地下水利用、特に災害時の緊急用水としての地下水利用を考えた場合ポンプ等により揚水される被圧帯水層の地下水利用を想定することは困難であり、人力等による揚水が

可能な浅層地下水の利用に焦点をあて、京都盆地水系の地下水流動と水質モデルを活用して、全球気候モデル(GCM)で予測された降水量に基づき、気候変動による地下水環境への影響評価を行った。

2. 対象領域

京都盆地は南北約30km、東西約15kmの領域で(図-1)、周辺山地は砂岩・泥岩・緑色岩などの丹波帯中・古生層盆地北東方に分布する北白川花崗岩からなり、盆地周辺丘陵地には主に大阪層群が分布する。京都盆地の地下水帯は盆地南部の巨椋池干拓地以南で最大深度となり、盆地南西部の大山崎・男山付近で滞水層基盤深度が30~50m程度と浅く⁵⁾、この部分がダム堤体のような構造であるため、盆地内部の地下水は停滞性が強く、一旦汚染された地下水は容易には流出せず、水質回復には時間を要する。京都盆地の地下水は古くから清浄かつ豊富で、醸造業・染色業等の地場産業や茶道・華道などの文化を支える重要な水資源として利用されてきた。そのため、名井・名水も多く存在するが近代以降枯渇したものも多く、また水質悪化のために水道水へ転換する事例もみられた⁶⁾。盆地南部域では高度成長期の過剰な地下水揚水による地盤沈下が顕在化したため要監視区域に指定され、揚水量や地下水位の法管理規制が行われている。しかし、盆地北部・中部は要監視区域に指定されなかったため、近年、大口利用者ではないが新たに地下水利用を進める事業所が増加しており、地下水利用の管理は十分とはいえない。対象領域内には22地点の観測井戸における水位および水質観測が実施されており、水質については年1回(8月)の標準項目、年3回(2,5,11月)の簡易項目分析が行われ、1987~2002年までのデータが公表されている⁷⁾。

3. 解析手法

(1) 基礎方程式

京都盆地水系の地下水環境を解析するために、平面二次元の飽和地下水流動と移流・拡散水質モデルを適用した。京都盆地の地下水帯水層のうち1で述べたように大阪層群の上に堆積した沖積堆積層が形成する浅層地下水を対象とし、難透水層を挟んでその下に位置する被圧帯水層は対象としない。地下水流動の基礎式を以下に示す。

$$\lambda \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ k(h-s) \frac{\partial h}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ k(h-s) \frac{\partial h}{\partial y} \right\} + \varepsilon \quad (1)$$

ここで λ は有効間隙率、 h は水位、 k は透水係数、 s は帯水層基盤高、 ε は降水および河川水による涵養量である。移流拡散と涵養負荷量を含めた水質モデルの基礎式を以下に示す。



図-1 研究対象領域(赤枠は代表11観測地点)

$$\lambda \frac{\partial C}{\partial t} = \lambda \left(D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right) - u \frac{\partial C}{\partial x} - v \frac{\partial C}{\partial y} + \frac{\varepsilon}{h-s} C_\varepsilon \quad (2)$$

ここで、 C は汚染物質濃度、 D_x 、 D_y は x, y 方向の拡散係数、 u, v は x, y 方向のダルシー流速、 C_ε は地表および河川からの流入物質濃度を示す。対象領域の空間差分間隔は100(m)、時間差分間隔は数値解析におけるCFL (Courant-Friedrichs-Lewy)条件⁸⁾を考慮して3,600(s)として、上記2式を差分化し、同時並行で計算を実施した。

(2) 計算条件

地下水帯水層の基盤標高はボーリングコア図⁹⁾ 基に、岩盤層または厚い粘土層を基盤層の基準として領域内約1,500点の基盤標高を決定した。次に砂・粘土等地質別の標準的な透水係数および有効間隙率¹⁰⁾に帯水層内のボーリングコア図の地質構成比の重みづけ平均値を求めて各地点の帯水層の透水係数および有効間隙率を算定した。算定された各地点の基盤標高・透水係数・有効間隙率をもとにクリンギング法により領域全体の各グリッドの値を算定した。領域内の透水係数は $9.0 \times 10^{-5} \sim 3.68 \times 10^{-3}(\text{m/s})$ の範囲で平均値は $5.6 \times 10^{-4}(\text{m/s})$ 、有効間隙率の範囲は0.065~0.185、平均値は0.130となった¹¹⁾。さらに、国土地理院の細密数値情報の土地利用、地表標高(DEM)および京都気象台AMeDAS時間雨量を用いた。

地表からの涵養量はHortonの浸透能モデルを用い、土地利用種別毎に標準的な係数値範囲を設定した上で調整し、初期浸透能(mm/h)は1.0(交通用地)~100.0(森林域)、最終浸透能(mm/h)は0.0(交通用地)~60.0(森林域)の範囲

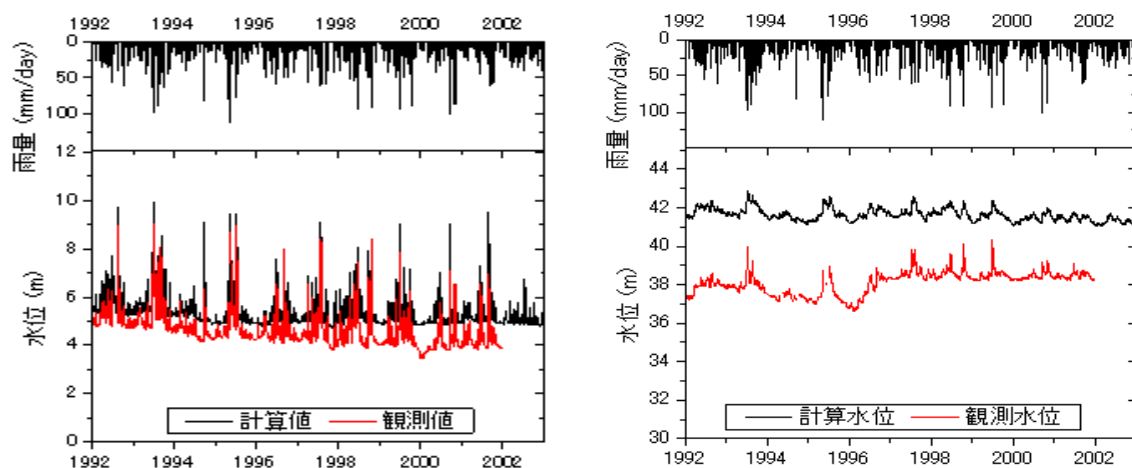


図-2 地下水流動モデル計算結果(左：大山崎地点[No. 8]，右：御所地点[No. 1])

で与えた¹²⁾。河床からの涵養量については河床部に難透水層を仮定した浸透流モデルを用い、層厚0.1(m)、透水係数0.4(m/s)は文献値¹²⁾を与えた。河川水位は観測地点の毎時間水位を内挿補間して領域内の全河道の水位を与えている。工業用および上水道用の地下水揚水量については、領域内の市町村・区別の年間統計データを用いた。農業用水について同様の空間分布データが得られなかったため、水田および畑地の全国平均面積あたり地下水揚水量原単位とグリッド内土地利用比を基に灌漑期・非灌漑期別に設定した。

水質計算の対象物質として地下水汚染の代表的な項目である総窒素(T-N)を選択し、拡散係数および地表涵養水中濃度については文献資料から想定される係数値範囲を設定し、計算値の再現性が高まるように調整した結果、拡散係数 $=0.084(\text{m}^2/\text{s})$ を与え、地表涵養水中濃度は森林(2.99mg/L)、水田(1.40mg/L)で高く、建物用地(0.50mg/L)で低い値を設定した。河川水質については各河川の1～2地点で月1回計測されている水質観測データ¹³⁾を毎月平均水質値として与えている。

計算領域の北東西境界は分水嶺境界条件(図-1実線)、南は流量境界(図-1破線)とし、淀川・宇治川・木津川の観測河川水位に基づいて与えている。計算対象期間は1992～2002年とし、1991年の平均水質および降水量を与えて年内変動が定常状態になるまでスピンアップ計算を行い、それを初期値として対象期間の計算を行った。別途実施した水質解析の結果¹⁴⁾から、地下水水質類型が異なる領域を代表する11の観測地点を選定して再現性の評価を行った。

(3)解析結果

地下水流動計算結果の一例を図-2に示す。大山崎地点は再現性が良好で、降水に対応した地下水位変動および地下水標高の絶対値についても計算値と観測値がほぼ一致している。一方、御所地点では降水に対応した時間変動は再現できているが地下水位標高の絶対値は3～4m程度ずれており、計算値は過大評価となっている。

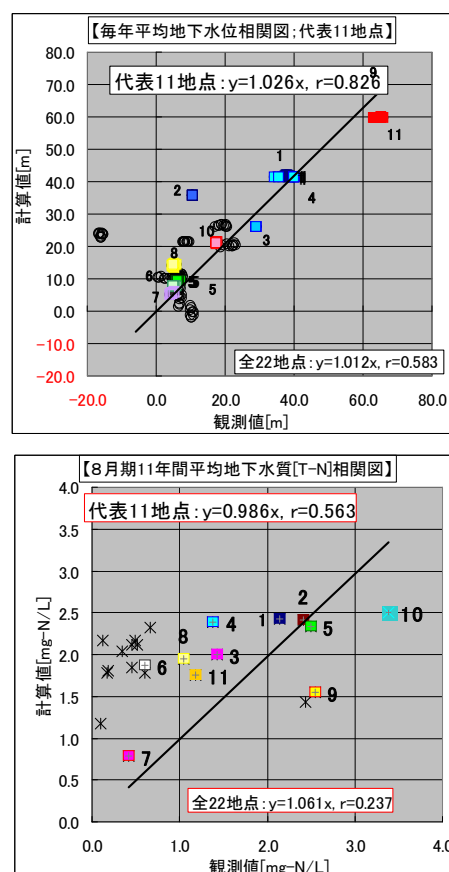


図-3 地下水位・水質の観測値と計算値の相関

地下水位・水質の観測値と計算値の相関図を図-3に示す。地下水位については毎年平均値、水質(T-N)については上述のとおり年1回(8月)のみの観測であるので全計算期間8月の平均値について示している。左図は全22地点の、中図は代表11地点の地下水位毎年平均値の観測値と計算値の相関図である。全22地点の再現精度を高めることは困難で、一部の地点では数m～十数mもの大きな誤差が生じている。これらの地点は、盆地周辺の丘陵部(日吉・上植野等)や盆地南西部の帯水層基盤標高が深い地域(東一口・岩田等)や、観測井戸のストレーナー位置が深い(巨椋池・下鳥羽)などの要因でモデル計算結果が十

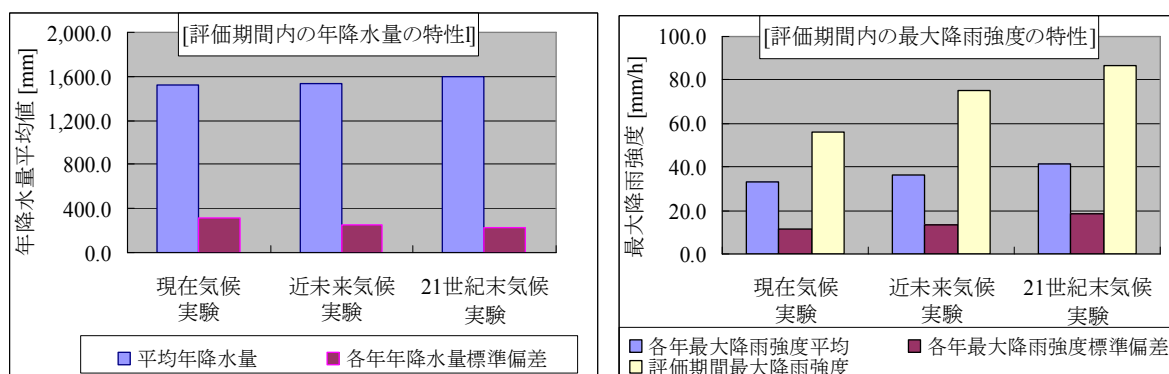


図-4 MRI-AGCM20による3期間の気候実験で求められた降水量特性

分観測値を再現できていないと考えられる。これらの地点は点を除いた代表11地点(図-1中の赤枠囲)での結果を見ると、回帰係数は1.026、相関係数は0.826であり、十分な再現精度をもっている。T-N濃度については全22地点の相関図は大きく分散しているが、代表11地点に絞込むと、観測値が低濃度の地点では過大評価となっている傾向があるものの、回帰係数は1に近く、相関係数は0.583とやや低いが、全体的な地下水水質の空間分布の再現性は許容範囲であると評価した。

地下水水位の再現性が高いと評価した大山崎地点でも、晴天時の平常水位において計算値と観測値に1m程度のバイアスが生じており、観測地点近傍の桂川の河川水位の影響が考えられる。このようなバイアスが生じる要因として、モデルの空間分解能が100mであり、地表標高は一格子内の平均標高であるのに対して、観測地点はピンポイントの地点標高値であり、観測水位が計算格子領域の平均水位を代表しているとは限らないこと、観測井戸のストレーナー位置が対象としている帯水層を含んでいるか不明確なこと、主要河川河道に近いグリッドでは河床からの浸透による涵養の影響が強く表れること、さらに、ボーリングコアデータから求めた帯水層基盤標高も地下水水位に影響を及ぼしている地点があり得ることなどが挙げられる。しかし、各観測地点においてこれらの要因を精査してモデル条件を変更するためには膨大な作業量を要する。また、盆地中央の平野部に位置する観測井戸では全般に地下水水位の再現性は高かったため、今回はこのモデルを用いて、気候変動の影響評価を行う。

4. 気候変動による地下水環境への影響評価

IPCC第四次評価報告書におけるCO2排出シナリオSRES-A1Bの今世紀末までの平均全球気温上昇は約2.8℃であり、多様な温暖化シナリオの中で平均的な気温上昇を想定している。これに基づき気象庁気象研究所が開発した超高解像度全球大気モデル(MRI-AGCM20, TL959)で計算された、現在気候(1979～2003年)、近未来気候(2015～2039年)、21世紀末気候(2075～2099年)の3期間

の出力降水量を入力データとして、地下水流動・水質モデルを用いて、気候変動による地下水環境への影響評価を行った。MRI-AGCM20の空間解像度は約20kmであり、対象領域をひとつのグリッドでほぼカバーしている。それぞれの期間後半10年間を評価期間とし、それ以前のデータでスピニング計算を行い、評価期間の初期値を設定している。なお、河川水位については、本来ならば同じ気候実験の降水量データを用いて表面流出解析を行い河川水量・水位を計算したものを与えるべきであるが、作業量が膨大となるため、今回はモデル作成時に使用した1992～2002年の各河道地点での月平均水位を求め、将来予測時の河川水位としている。また、将来的な土地利用の改変、地下水揚水量の変化は想定せず、農業用施肥の質および量の変化もなく、地表からの雨水浸透水中のT-N濃度も変化しないものとして計算を行った。

評価期間の降水量データの特性を図-4に示す。21世紀末気候実験において年降水量はやや増加するが年降水量の評価期間内での変動は小さい。最大降雨強度については、現在気候実験から近未来気候実験、21世紀末気候実験になるほど、毎年最大降雨強度の平均、標準偏差、評価期間内における最大降雨強度が大きくなっており、集中豪雨の発生が増えることを示している。このような降水量特性の将来変化がもたらす地下水流動と水質への影響に着目した。GCMによる将来予測(近未来気候実験および21世紀末気候実験)の降水量を入力して得られた地下水位とT-N濃度の計算結果とGCMの現在気候実験との差を図-5に示す。10年間の評価期間内の平均水位およびT-N平均水質の差をとっており、水位については差がプラスの場合地下水位の上昇、T-Nの場合は差がプラスの場合は濃度増加を示している。なお、水位については傾向が見えやすいように領域全体については±1.0mの範囲で図を描き、最大の水位低下が発生した地点を拡大した図を加えている。

評価期間内平均水位差(図-5(a))を見ると、盆地中央部の桂川・鴨川沿いの両岸に連なる領域で将来気候実験では地下水位の低下(図中青色)がみられ、その最小値は近未来気候実験で-2.27 (m)、21世紀末気候実験で-2.35 (m)であり、ともに、桂川・宇治川・木津川の三川合流

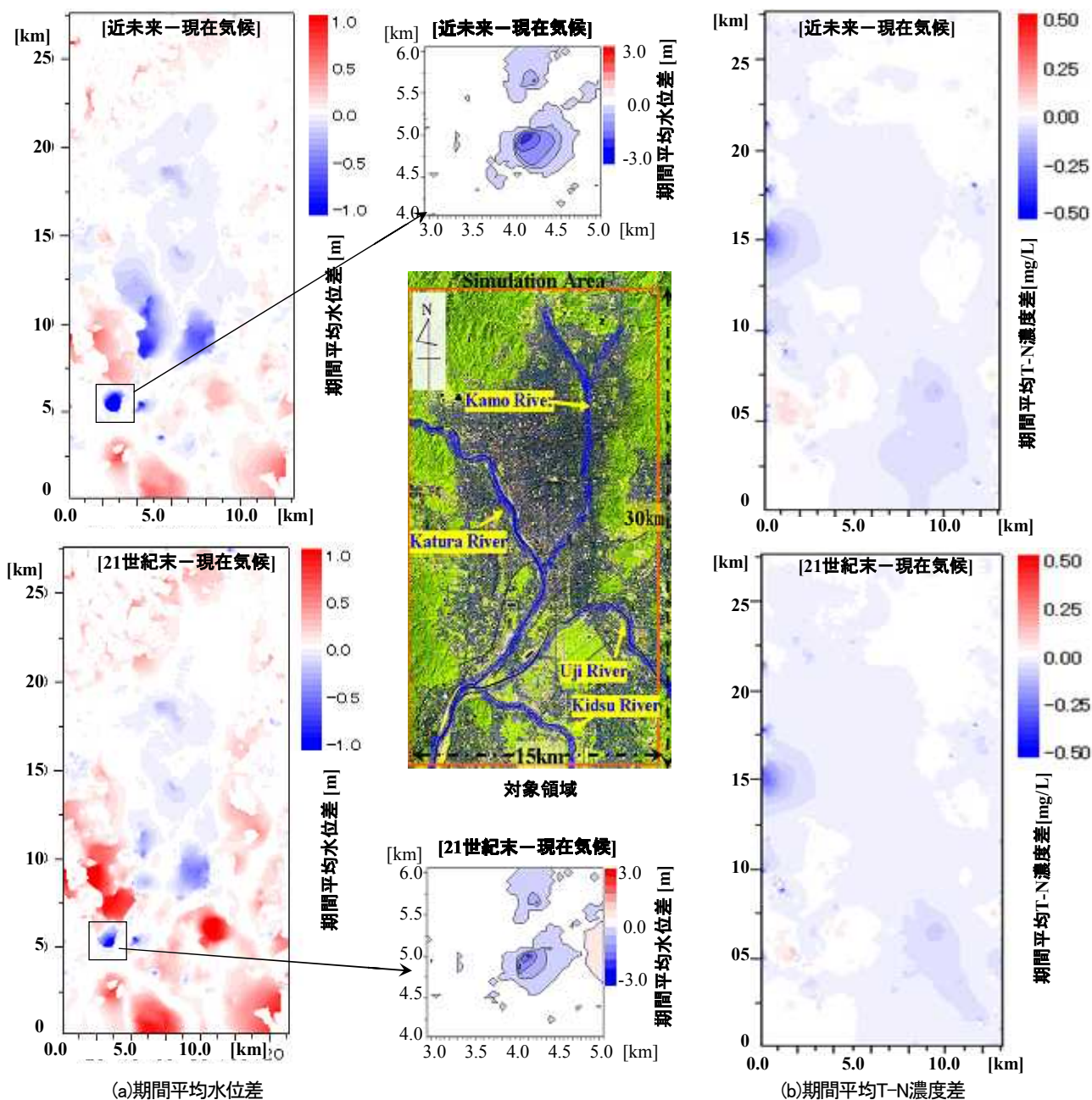


図-5 MRI-AGCM20出力を用いた地下水位・T-N予測結果の評価期間平均値の将来と現在気候の偏差

部の北部の大山崎町付近に約1km四方の領域で地下水位低下が現れた区域である。この区域では21世紀末気候実験の方が地下水位低下は大きくなるが、他の区域を含めて地下水位低下の面積は小さくなっている。逆に地下水位上昇(図中赤色)が特に大きくなるのは、盆地西部の丘陵部、宇治川以南の巨椋池干拓地付近、木津川以南の領域最南部区域であり、その最大値は近未来気候実験で+0.82 (m)、21世紀末気候実験で+1.40 (m)であった。前者は三川合流部南の区域で、後者は三川合流部の北部で大山崎町から長岡京市にかけての区域で算定された。

以上の結果から、将来の気候変動による降水量の変化は、京都盆地水系の中央部の地下水位を低下させ、南部と南西部では上昇させる可能性がある。ただし、地下水位の上昇と低下がモザイク状に入り組んだ構造になって

おり、2. で述べたように三川合流部付近に地下水帯水層基盤標高の浅い領域がダム堤体のような構造になっていることが影響していると考えられる。また、21世紀末気候実験を用いた予測地下水位が上昇する区域面積が、近未来気候実験よりも増加し、逆に地下水位が低下する区域面積が減少している。気候変動による将来の降水量変化は、盆地水系地下水の水位を全体的に上昇に導く結果となった。

地下水水質についても同様の検討を行った。評価期間内平均T-N濃度差(図-5(b))を見ると、盆地域北西部から南部の巨椋池干拓地周辺部にかけて連続的にT-N濃度低下(図中青色)区域がつながり、濃度上昇(図中赤色)区域が盆地南西部にかたまって現れるとともに、盆地周辺丘陵部にも点在する。T-N濃度低下の最小値は近未来気候

実験で -0.48 (mg/L), 21世紀末気候実験で -0.39 (mg/L)であり, ともに領域中央西部の桂丘陵と盆地中央東部の東山山麓南端に現れる. 地下水位の変動と比較すると, 後者の東山山麓付近の地下水位は現在気候実験と同等かやや地下水位が上昇しており, 物質量と水量のバランスを考えるとT-N濃度が低下しても不自然ではない. ただし, 地下水位の上昇は小さく, それに対して非常に狭いエリアでT-N濃度の低下が現れた原因は不明確である.

T-N濃度上昇の最大値は, 近未来気候実験で $+0.228$ (mg/L), 21世紀末気候実験で $+0.335$ (mg/L)であった. 両者ともに盆地西部の大山崎北部に現れている. 地下水位の変動と対応させると, 長岡京市一大山崎町付近では地下水位上昇とT-N濃度の低下が見られ, 三川合流部直北の区域と南東部の巨椋池干拓地では, 地下水位の低下とT-N濃度の上昇が見られ, 地下水流動と物質の移流・拡散の収支に対応した結果となっている. しかし, さらに南の淀川左岸域では, 地下水位の上昇とT-N濃度の上昇域が重なる. また, 盆地中央部では地下水位とT-N濃度が低下する区域が広がっている. これらは地下水流動のみでは説明が難しく, 3(2)で説明したように土地利用別に設定した涵養水中負荷量の影響および観測データに基づいて時間毎に設定した河川水位等の影響を検討する必要がある. 以上の結果から, 将来の気候変動による降水量変化は, 京都盆地水系の西部丘陵部から中央部および南部巨椋池干拓地地域の地下水中T-N濃度の低下をもたらす. 盆地南西部と東山山麓南部丘陵区域では濃度上昇をもたらす. その濃度変化の最大幅は現況再現濃度平平均値(2.3 (mg/L))の1/5程度であり, 推定された濃度上昇により水質環境基準を超過する地点はなかった,

4. 結論

本研究では, GCMによる現在・近未来・21世紀末の時間降水量データを活用し, 地下水流動・水質モデルを用いて気候変動が京都盆地の地下水環境に及ぼす影響評価を行ない, 地下水水位およびT-N濃度変動の空間分布特性を明らかにした. モデルの再現性については, 盆地中央の平野部に位置する観測地点の水位・水質の再現性は高かった. 今後の課題として, 再現性が高くなかった地点毎に個別に影響要因を特定して, 地表標高・基盤標高, 河川水位等を修正することで, 再現性が向上することが期待できる.

水資源としての地下水利用を考慮すると, 気候変動の影響で盆地南部域・巨椋池干拓地周辺と長岡京市付近の地下水位が上昇するとともに, T-N濃度が低下することは上水道・農業用・工業用として地下水利用の上では好条件となる. しかし, 現在でも地下水揚水量の多いこの区域での地下水利用を促進するほどの状況になるとは

考えにくい. また, 近未来および21世紀末において, 地下水位上昇と低下が発生する区域の最大水位変動幅は $\pm 2.0\sim 3.0$ (m)であり, その区域がモザイク状に混在する三川合流部付近では, 帯水層厚が薄いことも考え合わせると, 一部の地下水揚水が周辺地域の地下水環境に与える影響は無視できない. さらに, 盆地中央部の京都市街地では近年の小口地下水利用者の増加が加速すれば, この区域の地下水環境への影響が大きくなる可能性もある.

謝辞: 本研究は文部科学省21世紀気候変動予測革新プログラムの支援を受けた. ここに記して謝意を表します.

参考文献

- 1) 井本昂志・小尻利治・田中賢治・浜口俊雄: 気候変動による流域水環境の変動特性に関する比較, 京都大学防災年報, No.51B, 799-813, 2008.
- 2) 立川康人・滝野晶平・市川温・椎葉充晴: 地球温暖化が最上川・吉野川流域の河川流況に及ぼす影響について, 水工学論文集, 第53巻, pp.475-480, 2009.
- 3) (財)地球環境戦略研究機関(IGES): アジア太平洋の未来戦略: 気候政策と持続可能な開発の融合を目指して, 2008.
- 4) 今井 久・塩崎 功・山下 亮・操上広志・新里忠史・安江健一・前川恵輔: 気候・海水準変動が地下水流動に与える影響に関する解析的検討, ハザマ研究年報, <http://www.iges.or.jp/jp/pub/whitepaper2.html>, 2007.
- 5) 関西地盤情報活用協議会: 新関西地盤一京都盆地, 2007.
- 6) 仲上健一・大橋 浩・小幡範雄・千頭 聡・河野 泰: 地下水管理における「京都方式」の研究～地下水の活用管理をめざして～, NRS-84-28総合研究開発機構助成研究報告書, システム科学研究所, 1986.
- 7) 国土交通省河川局監修: 地下水年表, 1994-2004.
- 8) 藤井孝蔵: 流体力学の数値計算法, 東京大学出版会, 1994.
- 9) KG-NET・関西圏地盤情報協議会: 関西圏地盤情報データベース, 2006年度版, 2007.
- 10) 地下水ハンドブック編集委員会編: 改訂地下水ハンドブック, 建設産業調査会, 1998.
- 11) 田中幸夫・城戸由能・中北英一, 京都盆地を対象とした地下水流動および水質解析, 京都大学防災研究所年報, Vol.52, pp.607-624, 2007.
- 12) 城戸由能・栗津進吾・バトル アブドレイム・鳥井宏之・中北英一: 京都盆地水系における表流水-地下水間の水・物質収支に関する観測調査, 京都大学防災研究所年報, Vol.53, pp.495-505, 2010.
- 13) 京都府: 公共用水域水質測定結果(1992-2002).
- 14) バトル アブドレイム・城戸由能・栗津進吾・中北英一: 京都盆地水系における地下水水質の時空間特性解析, 土木学会環境工学論文集, Vol.49, pp.679-684, 2010.

(2011.9.30受付)