

## 京都盆地水系における地下水環境への気候変動影響の定量的評価 —MRI-AGCM2.3sを用いた気候変動影響評価—

### Quantitative Evaluation of Global Climate Change Impact on Groundwater Environment in Kyoto Basin

城戸由能・北側有輝<sup>(1)</sup>・中北英一

Yoshinobu KIDO, Yuki KITAGAWA<sup>(1)</sup> and Eiichi NAKAKITA

(1) 京都大学大学院工学研究科

(1) Graduate School of Engineering, Kyoto University

#### Synopsis

In order to evaluate groundwater environment for appropriate and sustainable use, impact assessment should be carried out with considering global climate change in future by using groundwater flow and water quality model. In this study, generally used type of two dimensional saturated groundwater flow model and advection-dispersion equation for Total Nitrogen (T-N) are used. Precipitation data is supplied from GCM calculation results (MRI-AGCM3.2s), where single mesh can almost cover study area because spatial resolution of this data is 20km. In order to obtain probabilistic estimation from simulation results calculated by a lot of precipitation information, rainfall data surrounding meshes of target area are applied.

A risk of groundwater drawdown and water quality deterioration is evaluated with time and space domain by using multiple calculation results. These results are analyzed by using of probabilistic distribution function (PDF).

**キーワード:** 気候変動, 地下水, 定量的評価, 確率密度関数

**Keywords:** global climate change, groundwater, quantitative assessment, probabilistic distribution function

#### 1. はじめに

高度経済成長期の日本では, 人口増加や経済発展による水需要増加を補うため, 地下水の過剰揚水による地下水位低下がもたらした地盤沈下等の公害が発生した. その対策として, 工業用水法(1956年制定)や各地方自治体の条例により揚水規制等が実施された結果, 近年では, 極端な地盤沈下の発生事例は少なくなった. また, トリクロロエチレン等の有機溶剤や重金属類による地下水水質汚染問題は現在でも継続する地下水環境の問題である.

一方, 集中豪雨や異常渇水等の極端な気象現象に伴う水災害が多発しており, 河川等表流水のみならず地下水への影響も懸念されている. わが国でも近年, 気候変動を原因とする災害の巨大化・頻発化を対象とした大型研究プロジェクト(文部科学省の21世紀気候変動予測革新プログラム(2007~2011年)や気候変動リスク情報創生プログラム(2012~2016年)等)が進められ, 河川流況への影響評価や適応策の検討が進められているが, 地下水環境への定量的な影響評価についての検討事例は国内外を通して多くは見られない.

本研究では、今後の適正な地下水利用と持続可能な水資源の確保を行うために、揚水量や涵養量を含む流動特性と表流水系から供給される様々な汚濁物質の地下水帯水層内での挙動を含む水質特性を評価できる地下水流動・水質モデルと全球気候モデル(GCM)の出力を用いて、気候変動がもたらす地下水環境の変化を解析し、その結果を統計確率的に処理することで、将来的に持続可能な地下水利用の方策を検討するための定量的な影響評価情報を作成することを試みた。

## 2. モデル・使用データと現況再現計算

本研究では、先行研究(城戸ら, 2011)を基に、Darcy式を基礎とした飽和二次元地下水流動・水質モデルを使用した。本章では、2.1節でモデルの概要を説明し、2.2節で対象領域と地盤構造の同定方法について述べ、2.3節で現況再現計算と観測値を比較した内容を紹介する。

### 2.1 飽和二次元地下水流動・水質モデル

本研究で用いた地下水流動モデルは、先行研究(栗津ら, 2011)で作成した飽和平面二次元の地下水流動モデルを用いた。基礎式は以下の式で表される。

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

ここで、 $\lambda$  : 有効間隙率、 $h$  : 地下水位[m]、 $k$  : 透水係数[m/s]、 $s$  : 帯水層基盤標高[m]、 $\varepsilon$  : 涵養量および揚水量[m/s]、 $x, y$  : 空間座標、 $t$  : 時間とする。この式で示される涵養量には地表面および河川河床部を通じた浸透・流出量および揚水量が含まれている。これらの涵養量は全て栗津ら(2011)と同様に、地表面からの浸透量はHortonの浸透能式に基づいて決定し、河川河床部からの浸透量は、河床に薄い難透水層が存在することを仮定し、その透水係数と河川水位と地下水位差に基づき河川・地下水間の交流現象を表現している。揚水量については市区町村別の統計データと土地利用データに基づいて地下水からの引き抜き量として与えた。また、運動方程式はDarcy則に従うとした。数値計算の境界条件としては、領域部の基盤標高の高低差に従って流入を算定する分水嶺境界条件と流量境界条件の二種類の条件を用いている。空間差分間隔は100[m]、時間差分間隔はCFL条件の考え方に基づき 3,600[s]を与えた。また、くり返し前後の水位差の収束判定条件を $1 \times 10^{-5}$ [m]以下とした。

地下水水質モデルについても、栗津ら(2011)に基づき、移流分散を基本とするモデルに、降雨浸透

量・河川涵養量・揚水量を加えたモデルを用いた。基礎式は以下の式で表される。

$$\lambda \frac{\partial \{(h-s)C\}}{\partial t} = \lambda \frac{\partial}{\partial x} \left\{ D(h-s) \frac{\partial C}{\partial x} \right\} + \lambda \frac{\partial}{\partial y} \left\{ D(h-s) \frac{\partial C}{\partial y} \right\} - \frac{\partial \{v_x \cdot (h-s)C\}}{\partial x} - \frac{\partial \{v_y \cdot (h-s)C\}}{\partial y} + \varepsilon \cdot C_r \quad (2)$$

ここで、 $C$  : 物質濃度[mg/L]、 $D$  : 拡散係数[m<sup>2</sup>/s]、 $\varepsilon$  : 涵養量および揚水量[m/s]、 $C_r$  : 涵養による物質流入濃度および揚水による物質流出濃度[mg/L]、 $v_x, v_y$  : 水平方向Darcy流速[m/s]とする。拡散係数については文献値を参考に、水平方向で一定として与えた。水質モデルは流動モデルと連動しており、流動モデルで求めたDarcy流速を基に、移流量が決まり、降雨浸透・河川涵養・揚水といった表流水とのやりとりで地点毎に濃度変動するようになっている。河川からの涵養水中物質濃度については河川水の水質観測濃度を用いて一定とし、降雨による河川水質の変動等は考慮していない。また、地表面からの涵養水中濃度は、複数の文献から地下水への年間供給負荷量等のデータを収集し、総涵養水量で除した値を求め、その値を濃度として与えた。

### 2.2 対象領域と地盤構造

本研究では、京都盆地を対象領域とした。京都盆地では、古くから醸造業や染色業等に地下水を用いており親しみが深く、現在でも名水や名井が多く存在している。揚水により地盤沈下や井戸の枯渇が発生したことから、地下水環境の変化により重大な問題が発生する可能性が高く、気候変動による影響を評価する対象として適切であると判断した。

北岡ら(2011)によると、京都盆地の地下水帯水層の大きさを南北約35km、東西約10km、深さを最深处で0.8kmと仮定してその体積を約125km<sup>3</sup>とし、さらにボーリングデータに基づいて砂礫層と粘土層との割合は56:44、砂礫層の平均間隙率を30%と仮定した場合、京都盆地の貯水量は211億m<sup>3</sup>と試算し、琵琶湖の約2/3程度の地下水量が京都盆地内に存在しているとしている。しかし、これらの仮定が正しいとしても、100mを超える深度の地下水は容易に利用できず、有効利用できる浅層地下水の水量は非常に限定されると考えられる。

本研究では、田中ら(2009)が作成した地表標高データ、土地利用データ、帯水層基盤標高データ、透水係数データ、有効間隙率データを使用した。地表標高は国土地理院の数値地図50mメッシュから、土地利用は国土地理院の国土数値情報土地利用メッシュ(100m)から作成し、帯水層基盤標高、透水係数、有効間隙率は、関西圏地盤情報データベース(関

西地盤情報協会2006)に収録された3,600地点余りのボーリングコアデータを基に空間内挿補間して作成している。このように観測・調査データをベースとして空間的に高密度な帯水層構造に関するデータを作成することは地下水解析を行う上では非常に有用といえる。

解析範囲はFig.1に示す南北約30km，東西約15kmの領域を空間解像度100mで分割したメッシュ毎に計算している。長方形の計算領域の外部境界は全て自由境界であるが，領域内に流量境界や分水嶺境界となる条件を含んでおり，その内側を評価領域(図中黄色線内)とした。

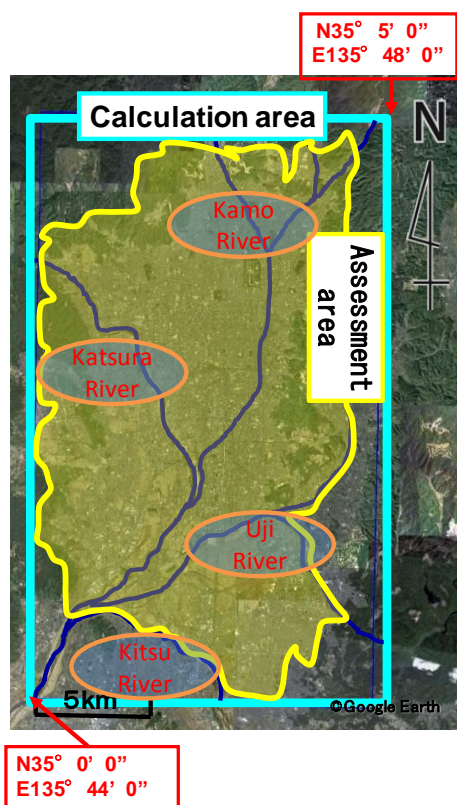


Fig.1 Calculation and Assessment Area

### 2.3 現況再現計算

本研究で用いたモデルの再現性は栗津ら(2011)により評価されている。栗津らは，観測雨量から上記モデルを用いて計算した地下水位およびT-N(全窒素)濃度と観測値を用いて，複数の地点において地下水位の時系列変動，および全期間平均水位・T-N濃度を空間分布で比較した。水位の時系列変動に関しては，地点によって再現性に大きな差があった。全般的には，平均値に偏りが見られたが，降雨時の水位変動の再現性は高く，特に三川合流地点付近では，平均値バイアス差も少なく変動の再現性も高い結果となった。水位空間分布比較では，観測値と計算値が概ね±10[m]以内となっており，高い再現性を示した。水質空間分布比較では，観測値と計算値の差は観測濃度値とほぼ同等の±2.0[mg/L]に収まっているが，水位と比較して相関は低かった。代表地点における地下水位とT-N濃度の観測値・計算値の相関図をFig.2に示す。

### 3. 気候変動が地下水環境へ与える影響評価

本研究では，気象庁気象研究所の高解像度全球大気モデルAGCM20の後期ラン(MRI-AGCM3.2s)の現在気候および近未来気候実験の降水データを用いて地下水位とT-N濃度のシミュレーションを行い，現在気候下の計算結果を基準として将来変動を評価した。3.1節では，このAGCM20を用いて行った疑似アンサンブル計算について述べ，3.2節でシミュレーション結果を述べる。さらに3.3節では，シミュレーション結果を地盤構造と水収支の面から考察する。

#### 3.1 疑似アンサンブル計算の必要性について

AGCM20の空間解像度は約20kmであり，対象領域の京都盆地をほぼ一つのメッシュで覆ってしまうため，単一の降水データを用いた計算・評価は行える

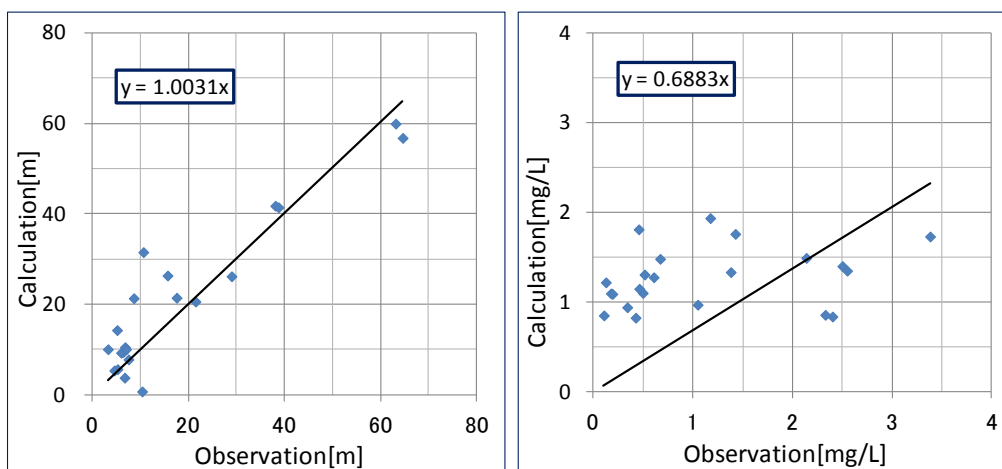


Fig.2 Correlation of groundwater level (L) and Total Nitrogen (R)

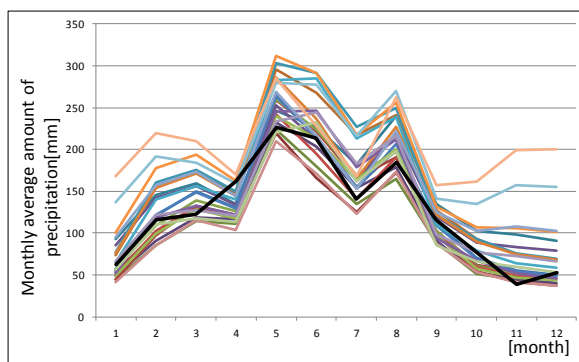


Fig.3 Monthly average amount of precipitation in each mesh and target area observation during 25 years in present period

が、全球大気モデルの空間再現精度を考慮すると、対象領域を覆うメッシュだけでなく、隣接するメッシュの降水データが対象領域上の降水を表現している可能性がある。そのため、対象領域周辺の5×5メッシュの降水データをモデルに適用する候補としたが、AGCM20は水面温度を境界条件としており、大阪湾と琵琶湖等の水塊を多く含む2メッシュについては、地表のみのメッシュとは異なる条件となることを考慮し、これらを除いた。さらに、残りの降水データのうち、現在気候（1979年～2003年）での降水データの時系列変動傾向が観測値と大きく異なるものがあり、地域の降水特性の差異が強く現れていると考えられた(Fig.3)。特に、近畿北部域に相当するメッシュでは冬季に降水量大きく、降雪の影響が強いと考えられる。そこで、月別の平均月間降水量に関して観測値(京都気象台)とAGCMの降水データとの相関を調べ、観測値と同じような傾向のある降水データを選別した。このように選別された15個のメッシュの降水データの平均年間降水量の最大値は1,935mm、最小値は1,244mm、平均値は1,545mm、標準偏差は208mmとなっている。これは、観測値の平均年間降水量1,512mmと比較しても現実的な値となっており、モデルに適用するのに適切な降水データとなっている。本研究では、このように選別した複数の降水量データをモデルに適用して計算することにより、得た複数の出力値を総合的に判断するという疑似アンサンブル計算を行った。疑似アンサンブル計算を行うことにより、確率情報という形で定量的に影響評価を行うことが可能となる。

### 3.2 計算結果

シミュレーション計算結果を現在気候（1979～2003年）と近未来気候（2015～2039年）のそれぞれで期間平均し、近未来気候と現在気候での地下水位とT-N濃度の差をとり、地下水環境の変化を確認した。Fig.4は現在気候下を基準とした近未来気候での地下水位変化量（左）とT-N濃度変化量（右）を示す。

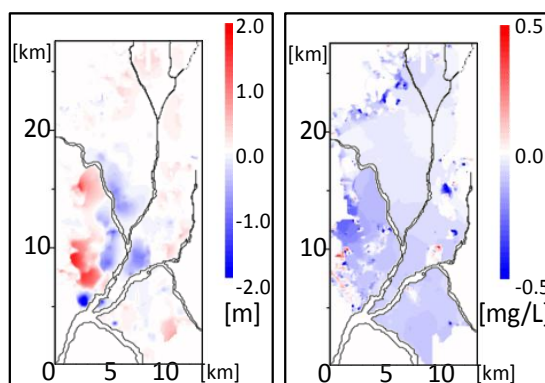


Fig.4 Difference map between calculated present and near future groundwater level(L) and total nitrogen(R)

近未来気候では、盆地中央部と三川合流地点北部で地下水位の低下（図中青）が見られた。特に三川合流地点北部の大山崎付近では2m程度低下すると考えられる。この地域には多くのビール工場等が立地しており、地下水利用量が多い地域であるので、地下水水位や水質の将来変化は大きな問題となる可能性が高い。さらに、アンサンブルメンバー間の標準偏差も大きく、降水量の差異により地下水位のばらつきの大きな地域である。その他、東西の山麓域では逆に水位上昇が見られるが、地下水揚水が大きな地点ではなく、水位変動の幅も小さい。

T-N濃度に関しては、近未来気候では現在気候より濃度が上昇する領域は少なく、また、アンサンブルメンバー間の標準偏差も全域で小さな値となっており、現時点の評価に基づくと地下水利用を阻害するほど水質が極端に悪化する危険性は小さいと考えられる。

### 3.3 地下水環境変化要因の考察

本節では、期間平均地下水位が著しく低下しており、アンサンブルメンバー間の標準偏差も大きく、地盤沈下や井戸枯渇の危険性が考えられる大山崎付近（三川合流地点北部）において、水位低下の要因を地盤構造と水収支の面から検討した。Fig.5に大山崎付近の地盤構造断面図を示す。

大山崎付近の帯水層は、小水盆状の構造をしており、地下水位が低下したとき周辺のメッシュから水が流れ込むような構造となっている。本研究では、降雨による地表浸透量は、栗津ら（2011）と同様に、Horton(1939)の浸透能式に基づいて算出した。Hortonの浸透能式では、降雨強度が地表の浸透能よりも強くと、表面流出量が増える仕組みになっている。現在気候よりも降水頻度が少なく、一降雨イベント毎の降水量が多い近未来気候では、地表面の浸透能よりも降雨強度の方が強くなり、表面流出量の総量が増え、全体的に地表浸透量が少なくなると考えられる。大山崎付近では、地盤構造上の理由から周囲の

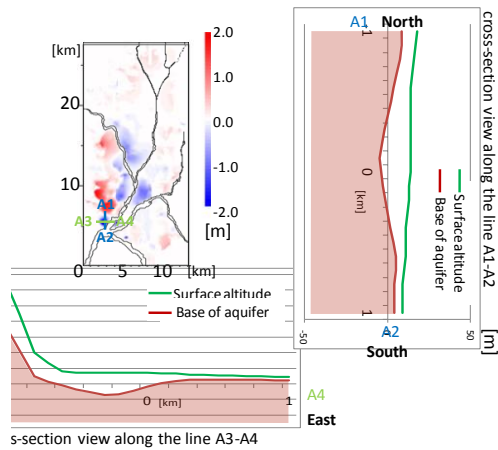


Fig.5 Cross-section view of aquifer structure

Table 1 Total water budget of Present and Near Future

|             | infiltration amount by rainfall | Pumping amount          | Advection amount      |
|-------------|---------------------------------|-------------------------|-----------------------|
| Present     | 287,926m <sup>3</sup>           | 1,080,917m <sup>3</sup> | 792,265m <sup>3</sup> |
| Near Future | 258,717m <sup>3</sup>           | 1,230,087m <sup>3</sup> | 970,785m <sup>3</sup> |

メッシュの影響を受けやすく、水位低下が発生したことが推定できる。

次に、この大山崎地点での水収支を解析した。Table 1に現在気候と近未来気候での25年間合計の地表浸透量・揚水量・移流量を示す。前述の通りこの領域では地下水揚水量が多く、地表浸透量と同じオーダーとなっているため浸透量の変化が強く現れやすい。さらに地盤構造から推測した通り、近未来気候では、地表面からの浸透量が現在気候下より少なくなっている。それに加えて、近未来気候では揚水量も多くなっており、水位低下が発生していると考えられる。また、それを補うように、周囲のメッシュから水が流入してきている。以上の考察に基づくと、大山崎付近の水位低下の原因は、「降雨強度が強いため表面流出量が多く地下水位が低下しやすい近未来気候の傾向が、地盤構造によって強く現れた」ということと、「揚水量が増加した」ことによりさらに地下水位低下が促進されることが推定される。

#### 4. 統計確率的な影響評価

本研究では、不確実性の高い地下水環境の変化を表現するために、確率情報を付加することにより、定量的に影響評価する手法を検討した。ここでは、空間的・時間的の2つ面から影響評価をおこなっている。4.1節では、対象領域内の影響範囲を面積率で表現する空間的影響評価について述べ、4.2節では、解析時間のうち影響が出ている時間の割合を算出する

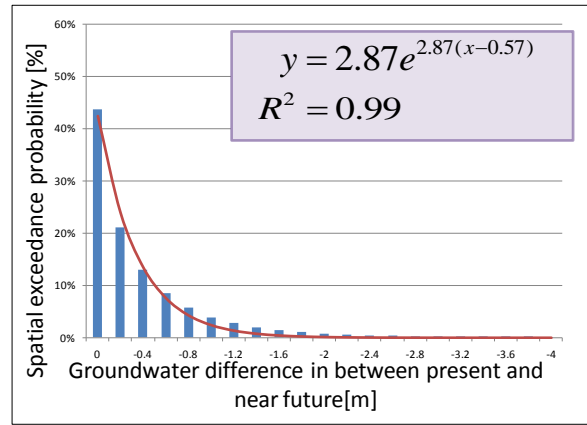


Fig.6 Spatial exceedance probability in average of all ensemble members and the approximate function

Table 2 Spatial exceedance probability and groundwater level difference

| Spatial exceedance probability | Difference in groundwater level[m] |
|--------------------------------|------------------------------------|
| 25%                            | -0.284                             |
| 20%                            | -0.362                             |
| 15%                            | -0.462                             |
| 10%                            | -0.603                             |
| 5%                             | -0.845                             |

ことにより、影響時間を表現する時間的影響評価について述べる。なお、水質に関しては時系列での再現性が十分ではなかったため、時間的影響評価は行わなかった。

#### 4.1 空間的影響評価

本節では、対象領域における影響範囲の割合を算出することで、空間的な影響評価を行った。具体的には、地下水位と水質のそれぞれで閾値を設け、閾値を超える水位低下・水質悪化が発生した地域が対象領域に占める割合（超過空間面積率）を全アンサンブルメンバー平均で計算した。さらに、その超過空間面積率が指数分布形状を示したため、最小二乗法で近似した。

Fig.6は地下水位低下に関する全アンサンブルメンバー平均の超過空間面積率とその近似関数(式(3))を示している。

$$y = 2.87e^{2.87(x-0.57)} \quad (3)$$

地下水位の超過空間面積率の近似は、もとの分布値と近似関数の値の相関係数も0.99となっており、高い精度で近似できている。近似関数(式(3))に基づくと、現在気候と比べて近未来気候では、対象領域内の20%の面積で-0.36(m)以上の水位低下が発生し、10%の面積で-0.60(m)以上の水位低下が発生していることが評価できる (Table 2)。また、各アンサンブルメンバ

Table 3 Occurrence probability calculated by approximation function

| occurrence probability |                    | spatial ratio |       |       |
|------------------------|--------------------|---------------|-------|-------|
|                        |                    | 15%           | 10%   | 5%    |
| drawdown               | 0.2m and more over | 9.0%          | 14.2% | 22.4% |
|                        | 0.6m and more over | 4.1%          | 11.4% | 31.4% |
|                        | 1.0m and more over | 0.6%          | 4.0%  | 27.6% |

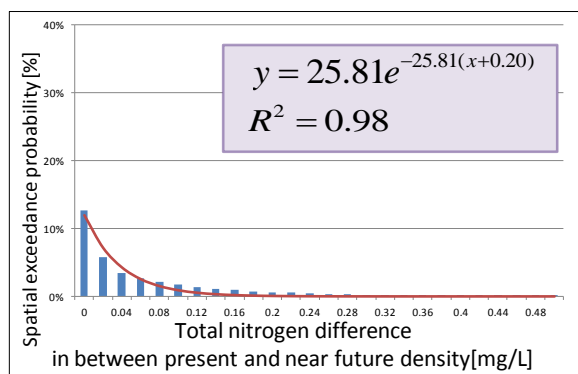


Fig.7 Spatial exceedance probability in average of all ensemble members and the approximate function

一についても超過空間面積率を求め、水位低下が0.2, 0.6, 1.0(m)の時のアンサンブルメンバーの度数分布を作成し、それぞれのアンサンブルメンバーの生起確率が同等だと仮定することにより、超過空間面積率を変数とした確率密度関数を求めた。水位低下が0.2, 0.6, 1.0(m)の時の超過空間面積率の近似確率密度関数は、それぞれ、以下の式で表される。

$$y = 9.10e^{-9.10(x+0.40)} \quad (4)$$

$$y = 20.28e^{-20.28(x+0.20)} \quad (5)$$

$$y = 38.90e^{-38.90(x+0.09)} \quad (6)$$

今回の解析では、全て指数分布関数で近似したが、それぞれの相関係数は0.81, 0.97, 0.98と高い近似を示している。これらの近似確率密度関数より、ある一定値の以上の水位低下が発生する面積が、確率情報と共に表現することが可能となる (Table 3)。Table 3より、0.2m以上水位低下する時と比較すると、1.0m以上水位低下する時は、超過空間面積率が低い時のみ発生確率が高く、不確実性の低い評価となっている。

水質に関しても、同様の手順を踏んだ。水質に関する全アンサンブルメンバー平均の超過空間面積率の近似指数関数は式(7)で表される。

$$y = 25.81e^{-25.81(x+0.20)} \quad (7)$$

元の分布値と近似関数の値の相関係数は0.98と、高い精度で近似できている (Fig.7)。式(7)より、現在気候と比べて近未来気候では、対象領域内の10%の面積で全窒素濃度が0.017(mg/L)以上増加し、5%の面積で

Table 4 Spatial exceedance probability and difference in total nitrogen concentration

| Spatial exceedance probability | T-N concentration difference[mg/L] |
|--------------------------------|------------------------------------|
| 15%                            | 0.001                              |
| 10%                            | 0.017                              |
| 5%                             | 0.044                              |

Table 5 Occurrence probability calculated by approximation function

| occurrence probability            |                        | spatial ratio |       |       |
|-----------------------------------|------------------------|---------------|-------|-------|
|                                   |                        | 15%           | 10%   | 5%    |
| increasing total nitrogen density | 0.00mg/L and more over | 10.1%         | 19.4% | 37.6% |
|                                   | 0.02mg/L and more over | 0.1%          | 1.8%  | 24.8% |
|                                   | 0.04mg/L and more over | 0.0%          | 0.0%  | 5.4%  |

0.044(mg/L)以上増加する (Table 4)。

また、各アンサンブルメンバーについて超過空間面積率を求め、全窒素濃度上昇が0.00, 0.02, 0.04(mg/L)の時のアンサンブルメンバーの度数分布を作成し、それぞれのアンサンブルメンバーの生起確率が同等だと仮定することにより、超過空間面積率を変数とした確率密度関数を求めた。全窒素濃度上昇が0.00, 0.02, 0.04(mg/L)の時の超過空間面積率の近似指数分布関数は、それぞれ、以下の式で表される。

$$y = 13.18e^{-13.18(x+0.25)} \quad (8)$$

$$y = 52.98e^{-52.98(x+0.06)} \quad (9)$$

$$y = 116.72e^{-116.72(x+0.02)} \quad (10)$$

元の分布の値との相関係数は、全て0.90を上回っており、精度の良い近似曲線を得られている。これらの近似確率密度関数より、ある一定値の以上の水位低下が発生する面積が、確率情報と共に表現することが可能となる (Table 5)。Table 5より、0.00mg/L以上濃度上昇が発生する面積率は、5%~15%の範囲で発生確率にばらつきがあり、不確実性の高い評価であるといえる。

## 4.2 時間的影響評価

本節では、近未来気候下において水位低下の危険性が高いと考えられる大山崎付近について、時間的な影響評価を行った。具体的には、全アンサンブルメンバー平均に対し、閾値を越える水位低下が発生している時間が全解析時間に占める割合 (超過時間確率) を算出することにより、定量的な評価を行った。なお、現在気候での全期間平均地下水位を基準

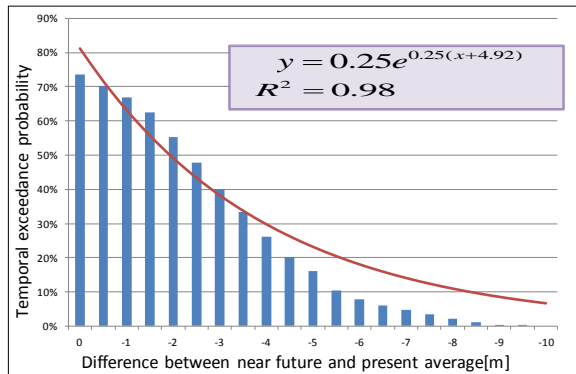


Fig.8 Temporal exceedance probability in average of all ensemble members and the approximate function

値として閾値を設定している。さらに、その超過時間確率が指数分布形状を示したため、最小二乗法で近似した。Fig.8は近未来気候における地下水位低下に関する全アンサンブルメンバー平均の超過時間確率とその近似関数は次式で表される。

$$y = 0.25e^{0.25(x+4.92)} \quad (11)$$

地下水位の超過時間確率について、元の分布と近似関数の値の相関係数は0.98で高い相関性を示しているが、現在気候平均との水位差が5(m)以上となる所では、近似関数では超過時間確率を高く見積もっている。ところで、時間的影響評価で算定した近未来気候の超過時間確率は現在気候での超過時間確率と比較することにより、初めて影響評価が可能となる。よって、現在気候下においても、同様に超過時間確率を算出し、指数分布関数で近似した。近似関数は次式で表される。

$$y = 0.29e^{0.29(x+2.85)} \quad (12)$$

これらの近似関数から、超過時間確率に対する現在気候平均地下水位からの水位差を求めた (Table 6)。Table 6に示すように、同じ超過時間確率でも、近未

Table 6 Margin from Present average according to temporal exceedance probability

| temporal exceedance probability | margin from Present average[m] |             |
|---------------------------------|--------------------------------|-------------|
|                                 | Present                        | Near Future |
| 60%                             | -0.306                         | -1.459      |
| 55%                             | -0.608                         | -1.805      |
| 50%                             | -0.938                         | -2.184      |
| 45%                             | -1.304                         | -2.604      |
| 40%                             | -1.712                         | -3.072      |

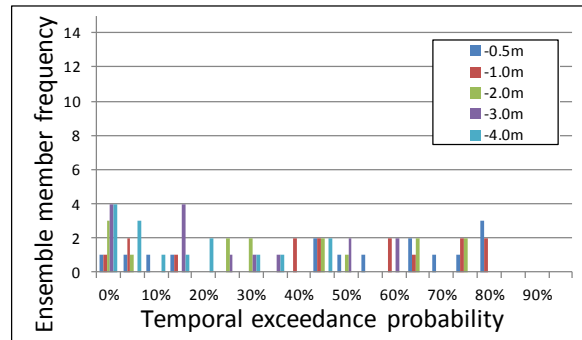


Fig.9 Ensemble member frequency according to temporal exceedance

来気候下の方が大きく水位低下している。また、時間的影響評価においても、空間的影響評価と同様に、それぞれのアンサンブルメンバーにおいて超過時間確率を算出し、生起確率が同等として、確率情報を付加した評価を試みた。しかし、どのような閾値においても、アンサンブルメンバーの度数分布はばらついており、分布関数の近似を行うことができなかった (Fig.9)。

## 5. 結論

本研究の目的は、気候変動が及ぼす地下水環境への影響を、確率統計的手法を用いて定量的に評価する手法を確立することである。これにより、持続可能な水利用へ向けた揚水規制などの対策や各種シナリオの影響評価にも応用することが可能となる。本研究で用いた飽和平面二次元地下水流動・水質モデル (城戸ら, 2011) は、再現計算の結果、地下水位空間分布は良い再現性が得られており、水質空間分布も一定の再現性が得られている。また、時系列の地下水位に関しても、大山崎付近では高い水位相関が得られたが、水質に関しては時系列変化の再現性は十分得られなかった。モデルの精度向上が測られた場合でも、本研究で開発した定量的影響評価手法を同様に適用した影響評価が可能であるので、本研究では、モデル再現精度については言及していない。

本研究では、まず地下水位低下の危険性が高いと考えられた大山崎地点付近の地盤構造と水収支を調べ、近未来気候下での地下水位低下の要因を検討した。その結果、周囲の地下水位の影響を受けやすい地盤構造をもつ地点では、降雨強度が強いため表面流出量が相対的に多くなり、浸透量が減少することで地下水位が低下しやすいという近未来気候の傾向が強く現れるということが考えられた。

次に、気候変動による地下水環境への定量的影響評価手法の検討を行った。複数の入力値から得られ

た複数の出力結果から、総合的に判断するアンサンブル手法を取り入れることにより、将来の地下水位変動の不確実性を考慮した影響評価を、空間分布と時間変動の両面から行った。空間的評価手法では、アンサンブルメンバー平均の超過空間面積率に対する低下水位・濃度上昇を算出し、定量的評価を行った。また、それぞれのアンサンブルメンバーの超過空間面積率分布から、超過空間面積率の発生確率密度関数を求め、超過空間面積率に確率情報を付加した。時間的評価手法では、アンサンブルメンバー平均の超過時間確率に対する低下水位を算出し、定量的評価を行った。時間的評価手法では、アンサンブルメンバー平均の超過時間確率に対する近似を行うことができず、他の関数形を適用するなどの改善の余地がある。今後は、他の近似関数の適用と近似関数の選択方法についても検討していく予定である。

## 謝 辞

本研究は文部科学省・気候変動リスク情報創生プログラムの支援を受けた。記して謝意を表す。

## 参考文献

- 関西地盤情報協議会・関西圏地盤DB運営機構 (2006) : 関西圏地盤情報データベース (CD-RON, 2006年度版), (財)地域地盤環境研究所.
- 北岡貴文・楠見晴重・中村真 (2011) : 京都盆地における複数の揚水井が地下水状に及ぼす影響と3次元揚水シミュレーション解析, 地盤工学ジャーナル, Vol.6, No2, pp.371-381
- 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 (2011) : 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, 第53号B-53, pp.495-505
- 国土交通省河川局 (1994~2004) : 地下水水質年表, 地下水技術協会
- 田中幸夫・城戸由能・中北英一 (2009) : 京都盆地水系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, 第52号B-62, pp.607-624
- Horton R. E (1939) : Analysis of runoff-plot experiments with various infiltration-capacity, Trans. Amer. Geophys. Union, pp.693-711

(論文受理日 : 2013年6月10日)