

## 地下水環境への気候変動影響のアンサンブル評価に関する研究

### Ensemble Evaluation Method of Climate Change Impact on the Groundwater Environment

北側有輝<sup>(1)</sup>・城戸由能・中北英一

Yuki KITAGAWA<sup>(1)</sup>, Yoshinobu KIDO 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 Kyoto Basin, high quality and abundant groundwater has been used for drinks, industry, or agriculture. However, in 20th century, there were some problems like the land subsidence because of groundwater exploitation in rapid economic growth. On the other hand, circumstances surrounding groundwater are changing. For example, extreme meteorological phenomenon such as the local heavy rain or the abnormal drought causes more frequent disaster. There are many researches about climate change impact on river flow, but there are a few about impact on the groundwater environment. Therefore, in this study, in order to use groundwater sustainably, we assess global climate change impact on groundwater environment. We use two dimensional saturated groundwater flow model, which is generally used, and we assess climate change impact on groundwater environment quantitatively by ensemble climate experiment.

**キーワード:** 気候変動, 地下水, 影響評価

**Keywords:** global climate change, groundwater, impact assessment

#### 1. はじめに

高度成長期の日本では、都市部の人口集中と経済発展によって工業用水や生活用水が急増し、これに対応するために本格的な水資源開発が進められたが、その一方で、河川・湖沼の水質汚染や大量の地下水揚水による地盤沈下等新たな公害や環境問題が発生した。日本の水資源賦存量はS51年からH17年までの平均で約4,100億 $\text{m}^3$ であるが、H21年における取水ベースの水使用総量は815億 $\text{m}^3$ であり、その水源の内訳をみると地下水が123億 $\text{m}^3$ 、地下水依存率は約15%であり、近年増加傾向にある。一方、近年の経済成長に伴う人為起源のCO<sub>2</sub>の排出量増加により地球温暖化が進行しているとされており、自然災害や水資源、

生態系・生物多様性などへの影響評価が進められている。日本の水資源として依存度の高い河川及び湖沼に関して、渇水リスクや洪水リスクが増加するという研究結果は多くあるが、将来、水資源として地下水への期待が高まる可能性があるのに対し、地下水への気候変動影響に関する研究は少ない。

気候変動の影響下で、水資源としての地下水への需要が高まる可能性があり、地下水環境に対する気候変動影響を評価することが必要不可欠となっている。そこで本研究では、まず、地下水環境への気候変動影響を考える上で注意しなければならない点を明らかにする。それを踏まえて改良した地下水モデルと既往研究の地下水モデルを比較し、現況再現性が向上したことを確認した後、地下水位への気候変

動影響の不確実性を考慮し、地下水への影響をアンサンブル評価する。

黄色線内)とした。

## 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節で対象領域と地盤構造の同定方法について述べ、2.2節でモデルの概要を説明し、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 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、深さを最深部で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

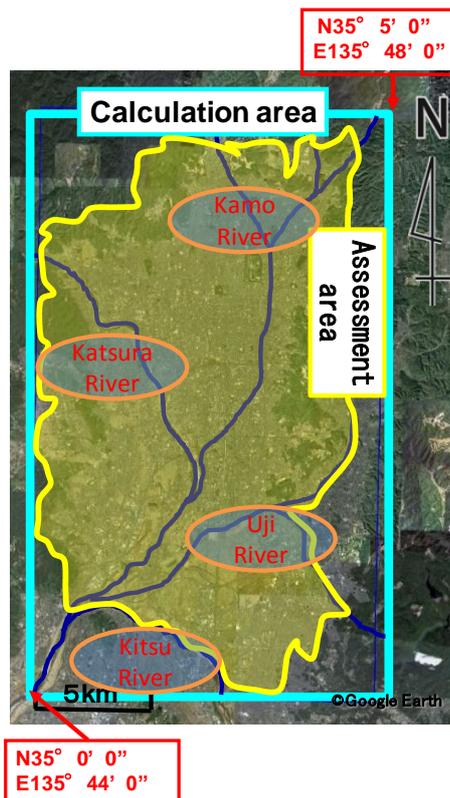


Fig.1 Calculation and Assessment Area

### 2.2 地下水モデル

本研究で用いた地下水モデルは、先行研究（粟津ら，2011）が使用した飽和平面二次元モデルを改良したモデルである。モデルの概要をFig.2に示す。

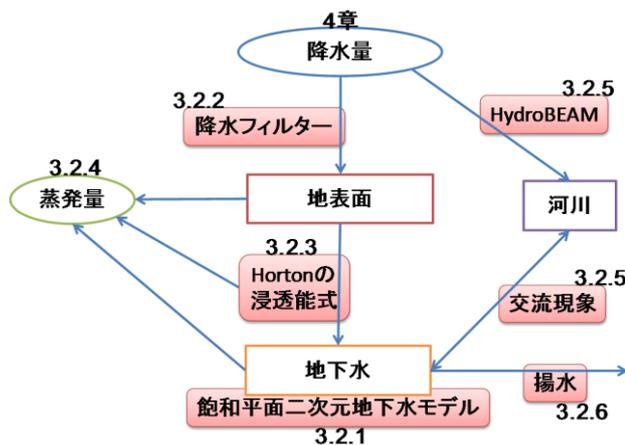


Fig.2 Outline of Groundwater Model

先行研究のモデルに加えた改良点を以下に示す。

#### A) 地理的要因による降水量の偏差

対象領域内であっても地形性降雨の影響などにより、年降水量が大きく異なっていたため、本研究では、国土数値情報の平年値メッシュデータ（平成24年作成）から降水量の平年値の空間分布を作

成し、それを元に地下水モデル内で降水量に空間分布を与えた。

B) 蒸発散量

先行研究では考慮していなかった蒸発散の情報を地下水モデルに導入し、気候変動が与える蒸発散量への影響も地下水モデルに実装した。

C) 河川流量・水位算定

気候変動影響予測における河川水位は、先行研究では河川の水位を降水量との単相関として表せると仮定して、降水量から求めていた。しかし、河川の流量は上流側に降った雨の量に大きく依存し、先行研究のような河川水位の求め方は理論的根拠に乏しく、また、降水時の河川流量増加の時間的な遅れを表現することができない。そこで本研究では、佐藤らに倣い、分布型流出モデル

Hydro-BEAM (Hydrological River Basin Environment Assessment Model) を用いた。

2.3 現況再現計算

本研究で使用した地下水モデルの再現性を評価するため、1992～2001年の10年間における国土交通省の観測井戸による日水位データと計算結果による地下水水位を比較した。再現計算における初期値については、1992～2001年の10年間の降雨データ・河川水位データを用いて30年間のスピニアップ計算を行った結果を用いている。

計算値と観測値を比較し、二種類の誤差の特徴に着目した。1つ目はお互いの平均値の差すなわち系統的な誤差で、ここではこれを平均値の誤差と呼ぶ。もう1つは水位変動の傾向が異なる、変動値の誤差である。これらの2つの誤差の特徴から、国土交通省の観測井21地点を以下の4つのパターンで分類する。

A)水位の平均値・変動値ともに合っている

B)水位の平均値のみ合っている

C)水位の変動値のみ合っている

D)平均値も変動値も合っていない

分類ごとに代表的な地点の水位時系列のデータをFig.3 (A)～(D)に載せる。観測井21地点のうち、パターンAに分類されるものは3つ、パターンBに分類されるものは1つ、パターンCに分類されるものは11つ、パターンDに分類されるものは6つとなっている。観測井の半分以上がパターンCに分類されており、パターンAを含めると、水位の変動値が観測値と一致している地点が14ヶ所となり、季節変動や多雨時の地下水水位変動を上手く再現できている。また、Table1は観測井のある地点の地表標高と、地下水モデル内の観測井が存在するメッシュの地表標高を示す。地下水モデルの空間解像度は100mメッシュ平均値で設定されており、実際の観測井が存在する地点の地表標高と差があることがわかる。パターンCに分類された11つのうち、8つが地表標高のずれと同じ方向に平均値のずれがあった。これは、地表標高と同様に、帯水層基盤標高も観測井地点と地下水モデル上で差があると考えられ、これがパターンCのような変動値のみが合う地点が多い原因だと考えられる。より詳細なボーリング調査をして、地下水モデルの空間解像度を細かくすれば、さらに精度が上がる余地はあるが、あまり現実的な解決方法ではない。本研究では、気候変動影響の評価をする場合、気候変動の影響下の地下水水位と現在気候での地下水水位の差をとり変化量として評価することで、平均値の誤差のある程度緩和できると考えている。

全体の傾向としては、三川合流地点付近では観測値と計算値で水位のバイアスも変動値も合いやすい傾向にあった。

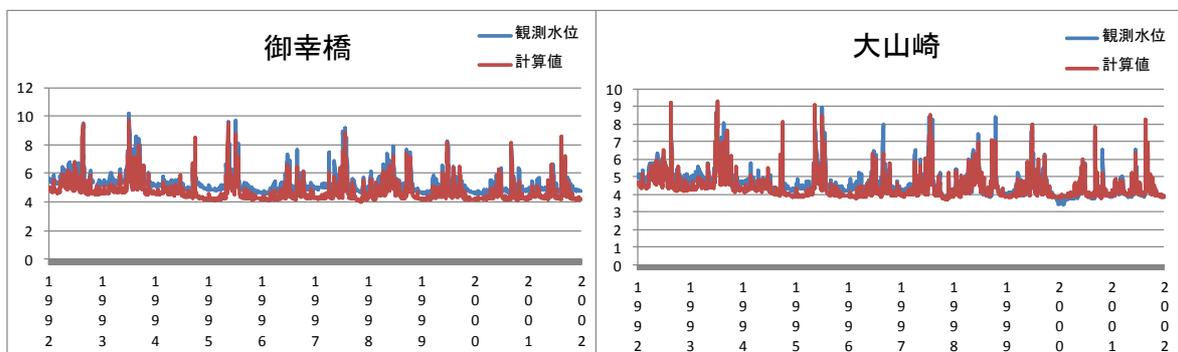


Fig.3(A) Example of Pattern A

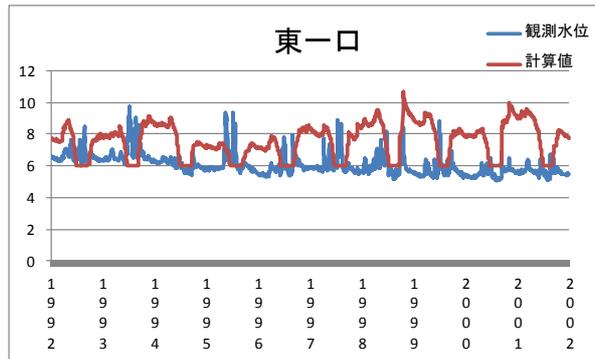


Fig.3(B) Example of Pattern B

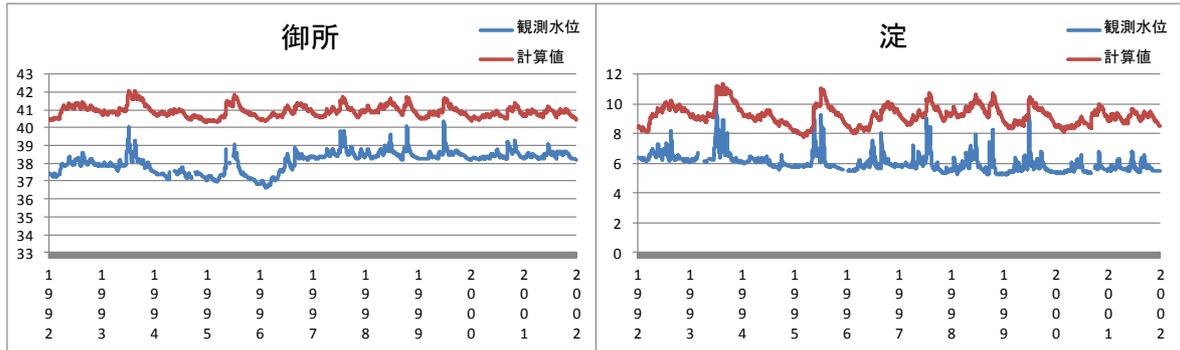


Fig.3(C) Example of Pattern C

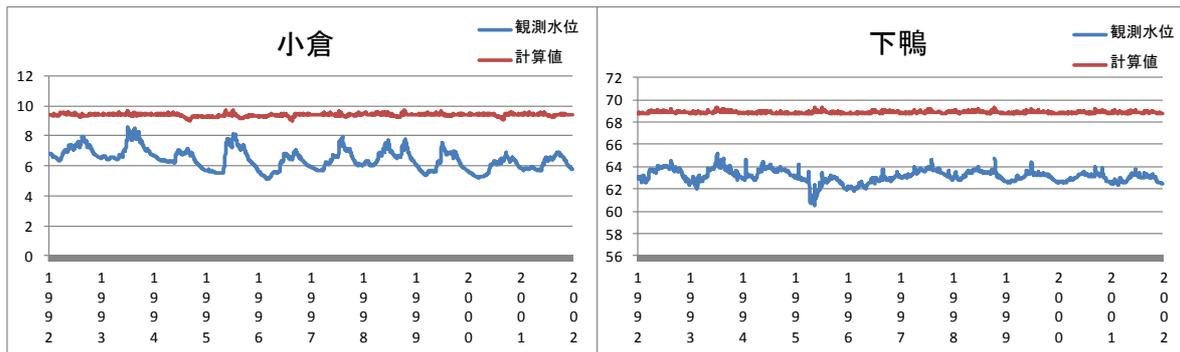


Fig.3(D) Example of Pattern D

Table1 Surface Elevation of the Observation Well and Surface Elevation on the Groundwater Model

	深草	醍醐	下鳥羽	上植野	東寺	桂	上鳥羽
モデル上の標高	31	24	14	15	28	22	22
井戸の標高	31.47	27.1	13.42	15.87	27.21	23.25	16.87
モデル上-観測井戸	-0.47	-3.1	0.58	-0.87	0.79	-1.25	5.13
	下鴨	花園	御所	日吉	桃山	巨椋池	淀
モデル上の標高	70	42	46	73	36	9	13
井戸の標高	69.22	43.3	45.64	73.49	12.51	10.3	13.12
モデル上-観測井戸	0.78	-1.3	0.36	-0.49	23.49	-1.3	-0.12
	東一口	小倉	御幸橋	大山崎	八幡	久御山	八幡南
モデル上の標高	12	10	16	10	17	14	14
井戸の標高	12.21	10.63	16.87	14.26	15.08	12.96	14.6
モデル上-観測井戸	-0.21	-0.63	-0.87	-4.26	1.92	1.04	-0.6

### 3. 気候変動予測情報について

本章では、本研究で用いる全球大気モデルMRI-AGCM3.2Hの特性について、モデルの概要や降水量といった視点から解説する。3.1では気候モデルの概要を説明し、3.2では先行研究でも実施した全球大気モデル出力値である降水量の空間解像度の不確実性を考慮したtranspositionアンサンブルについて説明する。3.3では、本研究で新たに採用した「少雨カット」という補正について説明し、降水量特性についてアンサンブル毎に比較した結果を紹介する。

#### 3.1 気候モデルの概要

本研究では、気象庁気象研究所で開発された超高解像度の全球大気モデルMRI-AGCM3.2Hの出力値を用いて気候変動影響を評価する。このモデルは、大気の循環や大気中の現象（降水や雲）の物理法則をコンピュータで計算し予測しており、海洋内の循環等は直接計算しないモデルである。モデルの実験期間は現在気候実験（1979～2003）、近未来気候実験（2015～2039）、21世紀末気候実験（2075～2099）であり、モデルの空間解像度は約60kmである。現在気候実験では全球観測値の海面水温分布を与えている。このデータセットの特徴は、複数のSST境界条件や複数の積雲対流スキームを用いたアンサンブル予測実験を行っている点である。3つの異なった積雲対流スキームと4つの異なったSST境界条件から気候変動をシミュレーションしており、合計12個のアンサンブル実験を行っている。積雲対流スキームとしては、荒川・シューベルト（AS）スキーム、Kain\_Fritsch

（KF）スキーム、吉村（YS）スキームの3つを用いている。また、海面水温は、CMIP3の各モデルにおける海面水温上昇パターンをクラスター分析して3つに分類し、CMIP3の平均海面水温条件を加えた4つの海面水温条件を60kmモデルに加えた実験を行っている。クラスター1は他に比べ昇温の東西変動が少ないパターン、クラスター2はエルニーニョ現象発生時のような昇温パターン、クラスター3は北半球亜熱帯での昇温が他に比べて大きいパターンとなっている。Table2に本研究で利用した60kmAGCMの対流積雲スキームとSST条件のアンサンブル実験名一覧を示す。

#### 3.2 transpositionアンサンブル

本研究では、栗津（2012）に倣い、transpositionアンサンブルを導入した。transpositionアンサンブルとは、全球大気モデルであるGCMの空間解像度の不確実性を考慮した疑似的なアンサンブルである。具体的には、MRI-AGCM3.2Hは全球モデルなので、地球を640×320の格子に分けて数値計算を行っているが、その内の対象領域上の1つのメッシュのみの降水情報を対象領域の地下水モデルに適用するのではなく、周りのメッシュの降水情報も地下水モデルに与えて計算する。これは空間解像度が約60kmのMRI-AGCM3.2Hでは、対象領域の降水特性を必ずしも直上のメッシュが表現しているとは限らず、周囲のメッシュも対象領域の降水特性を表現している可能性があるからである。本研究では、対象領域の周辺メッシュのうち、水域を含まない6つの気候変動予測情報を用いた。

Table2 Ensemble Experiment Name of MRI-AGCM3.2H

	A1B シナリオ			
	SST 条件	積雲対流スキーム		
		吉村スキーム (YS)	荒川・シューベルト (AS)	Kain-Fritsch (KF)
現在気候 シナリオ	観測値	HPA_m01	HPA_as_m01	HPA_kf_m01
21世紀末気候 シナリオ	CMIP3 平均	HFA_m01	HFA_as_m01	HFA_kf_m01
	クラスター 1	HFA_cluster1_m01	HFA_as_cluster1_m01	HFA_kf_cluster1_m01
	クラスター 2	HFA_cluster2_m01	HFA_as_cluster2_m01	HFA_kf_cluster2_m01
	クラスター 3	HFA_cluster3_m01	HFA_as_cluster3_m01	HFA_kf_cluster3_m01

### 3.3 少雨カットと降水特性

一般的に、GCMのモデルパラメータは年降水量や月降水量等のタイムスケールでの積算降水量にもとづいて調整されており、また、気候変動の影響として取り上げられやすい洪水リスクの評価等のため、極値分布が合うように調整されていることが多い。そのため、年降水量では観測値に近いが、時間スケールや日スケールでは観測値と異なり、特に微小な降雨が長時間存在するケースが多く見られる。

本研究で利用するMRI-AGCM3.2Hにおいても同様の特徴があったため、時間雨量0.3mm未満をカットした。MRI-AGCM3.2Hにおける2000年7月6日12時の日本本州の降水量をFig.4(A)に示し、0.3mm未満をカットした場合をFig.4(B)に示す。

また、Fig.5に全アンサンブルメンバーの平均年降水量を示す。降水特性としては、現在気候と比較し世紀末気候では、降水継続時間が短くなり強い雨の発生頻度が増えていた。また、60kmAGCMのアンサンブルメンバー毎の比較では、年降水量はSST境界条件やtranspositionアンサンブルより積雲対流スキームの違いによって大きく影響されており、平均降雨継続時間は、transpositionアンサンブルに最も影響されやすく、また、SST境界条件にはほとんど影響されていなかった。

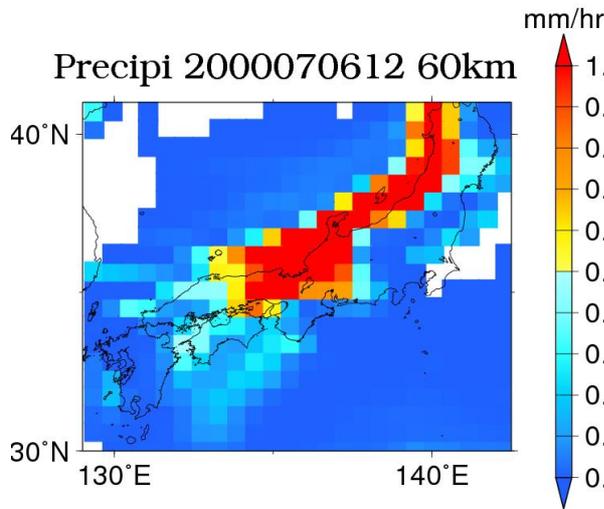


Fig.4(A) Precipitation Non-cut(2000/7/6 12:00)

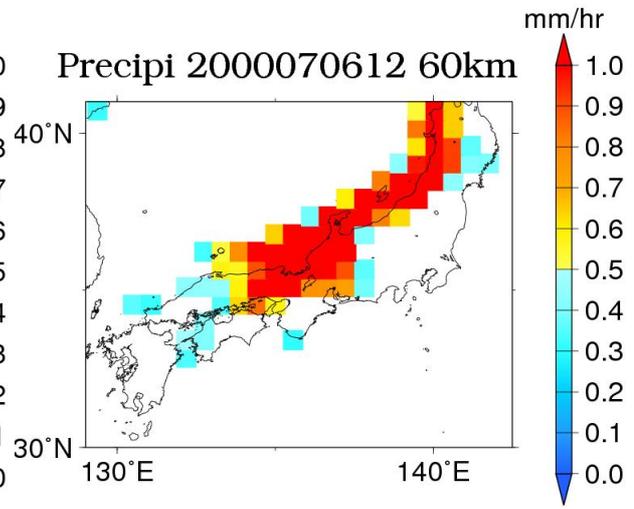


Fig.4(B) Precipitation Cut under 0.3mm/hour (2000/7/6 12:00)

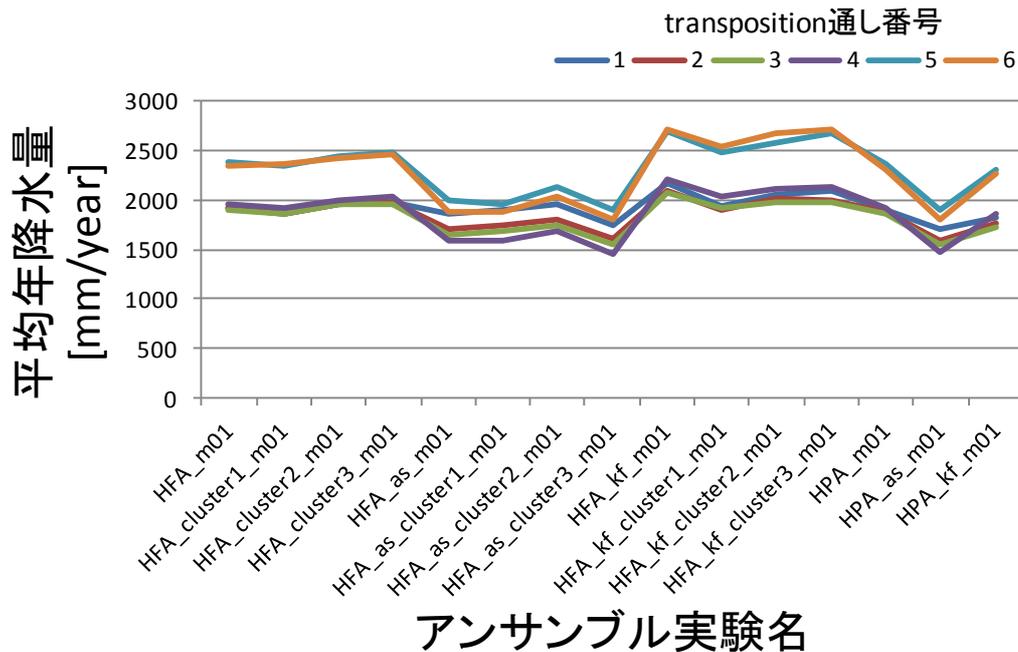


Fig.5 Average Annual Precipitation in all ensemble members

#### 4. 気候変動が及ぼす地下水への影響

本章では、気候変動予測情報と地下水モデルから算出した地下水水位を示す。60kmAGCMのアンサンブル情報を用いて、地下水水位計算結果から定量的に気候変動影響を評価する。Fig.6は、48メンバー全てにおいての平均地下水水位影響変化量（同じ積雲対流スキームの現在気候実験から得た地下水水位からの変化量）と地下水水位影響変化量の標準偏差を示す。盆地中央部や伏見区、大山崎付近で地下水水位が平均的に低下しており、一方で桂川の西側では地下水水位の上昇が顕著に見られる。伏見区は現在でも酒造業等で地下水が利用されており、また過去に地盤沈下が発生している。また、大山崎でも酒造のために地下水が利用されており、メンバー間の標準偏差が大きいことから地下水水位の不確実性が高く注意が必要である。

伏見付近で最も水位が低下したメッシュを中心とした5×5 (500m×500m) のメッシュの平均低下水位は-0.9mとなっており、同様に大山崎付近で最も水位が低下したメッシュを中心とした5×5のメッシュの平均低下水位は-1.17mとなっている。

本研究では、この2ヶ所の地点において気候変動影響がどの程度あるのかという点に着目した。Table3は、全アンサンブルメンバーにおける伏見メッシュと大山崎メッシュ平均で閾値以上の水位低下が発生しているメンバーの数を示す。伏見メッシュでは0m以上水位低下が発生しているメンバーが47個ある。つまり、ほとんど全てのメンバーで水位低下が発生しているため、気候変動により水位低下が発生する可能性が非常に高いと言える。

また、48メンバーのうち半数以上の28個が0.8m以上の水位低下が発生している。一方、大山崎メッシュでは、4分の3を占める36個のメンバーで地下水水位の低下が発生しており、半数である24個のメンバーで1.2m以上の水位低下が発生している。

上記では、水位が低下する危険性のあった大山崎や伏見といった狭域での地下水水位について議論した。しかし、揚水規制などの地下水水位低下対策を取る場合、区単位や市単位の規制となる。狭域の地下水水位を評価することでも対策の効果は検討できるが、周辺地域への影響も同時に評価できるように広域での地下水水位への影響評価を行う。具体的には、評価領域内において、ある閾値以上地下水水位が低下する面積を求め、影響面積率として算出した。

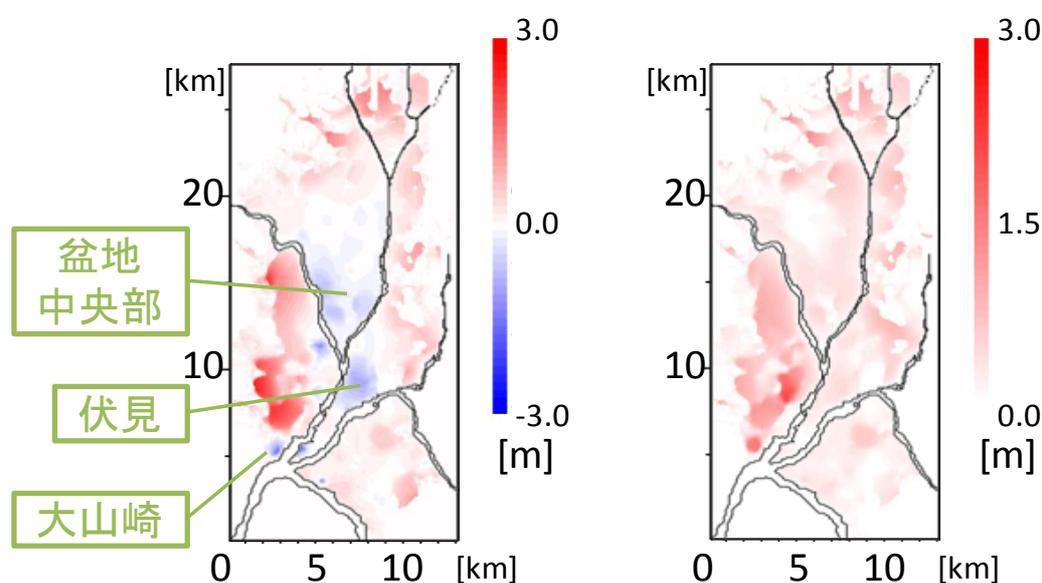


Fig.6 Difference Map between Calculated 'Present' and 'Far Future' Groundwater Level and Standard Deviation of Calculated Groudwater Level from All Ensemble Members

Table3 The Number of Ensemble Members in which Calculated Groundwater Level Are above Threshold Level in Fushimi and Oyamazaki

閾値[m]	0	-0.4	-0.8	-1.2	-1.6	-2	-2.4	-2.8	-3.2	-3.6	-4
伏見メッシュ	47	42	28	15	1	0	0	0	0	0	0
大山崎メッシュ	36	32	28	24	23	18	14	8	5	4	0

48個的全アンサンブルメンバー平均地下水位における超過面積率（地下水位が閾値より低下する面積率）とその近似指数分布関数をFig.7に示す。この近似指数分布関数より、任意の水位以上の水位低下が発生する面積を求めることができる。一例として、0.4m以上の水位低下が発生する面積は、評価領域の1.6%であるということが求められる。

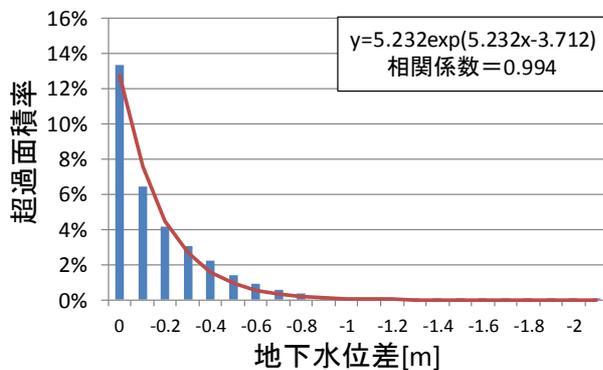


Fig.7 Spatial Exceedance Probability in Average of All Ensemble Members and the Approximate Function

同様に、48個のアンサンブルメンバー全てで超過面積率を求めた。Fig.8は48メンバー全ての地下水位差における超過面積率を示す。ここで、それぞれのアンサンブルメンバーの生起確率を同等と仮定することで、超過面積率の不確実性を確率的に表現することができる。例えば、地下水位が0.4m以上低下する場合の超過面積率は48メンバーの平均では1.6%であるが、この時、それぞれの超過面積率を超えるアンサンブルメンバーの個数の分布はFig.9のようになる。この場合、48メンバー中20メンバーが0.4m以上水位低下する面積率が3%以上あるということが言える。

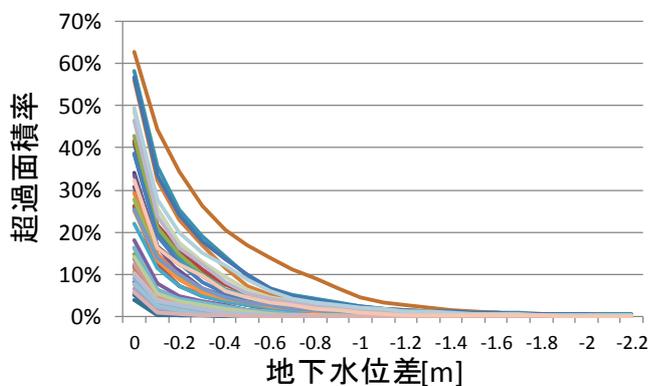


Fig.8 Spatial Exceedance Probability in Each Ensemble Members

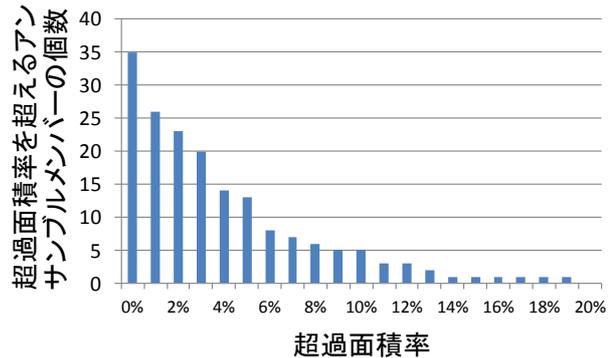


Fig.9 The Number of Ensemble Members over Spatial Exceedance Probability

## 5. 結論

本研究の目的は、「地下水への気候変動影響を考える上で、注意しなければならない点を明らかにすること」と「地下水への気候変動影響を定量的に評価すること」である。

本研究の地下水モデルに新たに実装したものは、「蒸発散量の導入」、「降水フィルターの導入」、「流出モデルによる河川流量・水位算定」、「降水量カット」という4つである。現況再現計算では前者2つが地下水モデルに組み込まれており、気候変動予測では4つ全ての改良点が地下水モデルに組み込まれている。本研究の対象領域内でも平均年降水量が250mm以上異なる場所があり、実際の降水現象に近づけるため地下水モデル内では降水フィルターを導入した。また、先行研究ではほとんど考慮していなかった蒸発散を地下水モデルに組み込んだ。これにより、地下水への気候変動影響を考えるうえで、気候変動による蒸発散量変化も考慮することができる。地下水モデルの再現性については、観測井21地点のうち14ヶ所で水位の変動値が観測値と一致しており、季節変動や多雨時の地下水位変動を上手く再現できていた。また、「蒸発散量」と「降水フィルター」を導入することで、現況再現性が向上していることも確認した。

また、本研究で利用する全球大気モデルには、少雨が長時間降るといった特徴がある。そのため、本研究では、GCMの降水現象を時系列で確認し、不自然に現れる微小降雨域を切り捨てるための閾値を決め、定性的ではあるが、閾値以下の時間雨量の影響を排除した。次に、降水量特性について確認した。本研究で利用した20kmAGCMおよび60kmAGCMでは、transpositionアンサンブルやSST境界条件より、積雲

対流スキームが卓越して降水量算定に影響を与えている可能性が高い。また、GCMに実装されている陸面過程モデルの構造を把握することにより、土地利用に基づき蒸発散量を補正した。また、GCMの空間解像度の不確実性を考慮して、影響評価にtranspositionアンサンブル取り入れた。これにより、影響評価で利用するアンサンブルメンバーの数は48個になった。

60kmAGCMのアンサンブル情報を活用して、地下水への気候変動影響を評価した。水位低下の危険性が高い伏見メッシュでは、48メンバー中47メンバーで水位低下が発生しており、また、半数以上の28個で0.8m以上の水位低下が発生している。一方、大山崎メッシュでは、半数の24メンバーで1.2m以上の水位低下が発生しているという結果を得た。

## 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.
- 国土地理院 : 国土数値情報平年値メッシュデータ, 2010.
- 小尻利治・東海明宏・木内陽一(1998):シミュレーションモデルでの流域環境評価手順の開発, 京都大学防災研究所年報, 第41号B-2, pp119-134.
- 21世紀気候変動予測革新プログラム(2012):超高解像度大気モデルによる将来の極端現象の変化予測に関する研究 平成23年度研究成果報告書, pp.101-121.
- Horton R. E (1939) : Analysis of runoff-plot experiments with various infiltration-capacity, Trans. Amer. Geophys. Union, pp.693-711.
- Yoshinobu Sato, Toshiharu Kojiri, Yuri Michihiro, Yasushi Suzuki, and Eiichi Nakakita(2013) : Assessment of climate change impacts on river discharge in Japan using the super-high-resolution MRI-AGCM, Hydrol. Process, Vol.27, pp.3264-3279.
- Yoshinobu Sato, Toshiharu Kojiri, Yuri Michihiro, Yasushi Suzuki, and Eiichi Nakakita(2012) : Estimates of Climate Change Impact on River Discharge in Japan Based on a Super-High-Resolution Climate Model, Terr. Atmos. Ocean. Sci., Vol.23 No.5, pp.527-540.

(論文受理日 : 2015年6月11日)