

分布型流出モデルを用いた流域スケールでの水利用環境の評価

平井基弘*・野原大督・堀智晴

* 京都大学大学院工学研究科都市環境工学専攻

要 旨

持続可能な水利用環境を考えるためには、流域スケールで、日あるいは旬といった単位で、水の移動と収支・水利用の関係を、表流水・地下水の両社を含めて、定期的に把握することが重要になってくる。そこで、本研究では時空間分布を考慮できる分布型流出評価モデルHydro-BEAM (Kojiri, 2006) を用いて、地下水取水を加味した長期流出解析を行った。これにより、実際に観測することが困難である地下水を降雨量、河川水、蒸発量といった水収支から計算し、流域スケールでの地下水の時空間分布特性の把握を行うことで、流域内の表面流出・中間流出・地下水流出を統合的に捉え、地下水取水による水利用環境の評価を試みた。

キーワード：水資源、水利用、水収支、分布型流出モデル、地下水、表流水

1. はじめに

近年、河川表流水に加え、地下水の利用も含めた統合的水利用政策が重要になってきている(武田, 2008)。専ら水資源を表流水に頼っている地域においては、地下水は気候変動による渇水リスクの増大に対する適応策として活用できる可能性があり、水質的にも優れた水資源である。地下水を安定的に利用するためには、地下水アセスメントが必要不可欠である。一般に、工場の設置など新たに比較的大規模な地下水取水を行う場合には、取水による地下水面変動がどのようになるかという点について、揚水試験等を行って確認されることが多い。こうした解析では、主に近隣の既存の井戸に悪影響を及ぼさないかどうかといったことに主眼が置かれており、考慮期間は短く、また、考える範囲も限定的であることがほとんどである。地下水は河川が流域を持つように、広域の地下水流域を持ち、鉛直方向だけではなく水平方向にも広く移動する。また、地下水の流速は0.1m/day~10m/dayと遅い。そのため、大規模な地下水取水が行われれば、かなり離れた下流域にまでその影響が及んだり、あるいは影響が時間的に遅れて現れたり、長期に渡って続いたりすることも考えられる。したがって、持続可能な水利用環境を考えるためには、流域スケールで、日あるいは旬とい

った単位で、水の移動と収支・水利用の関係を定期的に把握することが重要になってくる。

土中の水の流れを詳細に追跡するには、土壌、地盤などの地質データに基づき、地下水の流域、流速、流出方向などを正確に表現する地下水流の方程式を解かなければならない。しかし、三次元で地下水の流動を追跡する手法は、地下構造の推定精度や計算負荷の点から、困難なことが多い。一方、流域全体といったスケールでの水利用の影響を考える場合には、細かいスケールで地中水の流動を見ることよりも、流域全体の状態をマクロに把握することが重要になることも多い。流域全体を取り扱うことに関しては、特に表面流出や中間流が、河川表流水となって流出してくる過程をシミュレートする。いわゆる降雨・流出モデルがいくつか提案されている。洪水流を解析対象とする場合には、蒸発や地下浸透などは一定の損失としての取り扱いをされることが多いが、長期の流出を取り扱う場合には、地下への浸透や地下での水の流れを貯留タンクのように概念的に構成して結合したものが用いられることがある。こうしたモデルでは、地下部分の流動は詳細な物理則に基づいて計算されるわけではないが、プロセスを単純化することにより、表面流、中間流、浅い地下水流出、深い地下水流出を統一的に、しかも流域スケールで一定程度とらえることができるという特徴

がある。したがって、こうしたモデルで流域全体の降水流出過程を地下浸透・流動まで含めてシミュレートできれば、大規模な水利用が、流域の水環境に及ぼす影響を時間的、かつ空間的に定量化して把握できる可能性がある。

そこで、本研究では時空間を顧慮できる空間分布型流出評価モデルHydro-BEAM (Kojiri, 2006) を用いて、地下水取水を加味した長期流出解析を行った。これにより、実際に観測することが困難である地下水を降雨量、河川水、蒸発量といった水収支から計算し、流域スケールでの地下水の時空間分布特性の把握を行うことで、流域内の表面流出・中間流出・地下水流出を統合的に捉え、地下水取水による水利用環境の評価を試みた。

2. 流域スケールでの表面流・中間流・地下水流の統合的把握

流出シミュレーションでは、各メッシュに地理特性・気象特性を加味した地理メッシュデータ・気象メッシュデータを入力として与えた。

地理メッシュデータの作成には、国土交通省の国土数値情報の河道・非河道の50mメッシュデータ、流域非集水域、土地利用の100mメッシュデータと国土地理院のDEMデータ（標高50mメッシュ）を用いた。これにより、流域界、河道メッシュ位置、メッシュ標高、斜面勾配、河道勾配、落水方向、土地利用区分・被覆率の情報を加味した地理メッシュデータを作成した。地理メッシュデータ作成のフローチャートをFig. 1に記載する。

気象メッシュデータの作成には、地域気象観測システム (AMeDAS : Automated Meteorological Data Acquisition System) の1時間単位の降水量と気温データ、地上気象観測網 (SDP : Surface Daily Product) データの日別の風速、大気圧、水蒸気圧、日照時間データを用いた。これにより、降水量、融雪量、実蒸発散量を内挿した気象メッシュデータを作成した。蒸発散に関しては、ポテンシャル蒸発散量を計算した後 (近藤, 徐, 1997), A層の土壤水分に応じた蒸発効率を乗じるといったタイプのモデル化を行っている (近藤, 1994)。積雪・融雪についてはSVATモデルによって考慮している (佐藤, 2009)。気象メッシュデータ作成のフローチャートをFig. 2に記載する。

作成した作成した地理メッシュデータ、気象メッシュデータを入力として、雨水の流出を追跡する。地表面およびA層はkinematic wave法で、B～D層は、線形貯留法で水量を追跡する。B, C層では貯留水量が層厚に達し飽和状態になると、溢水量は上層に復

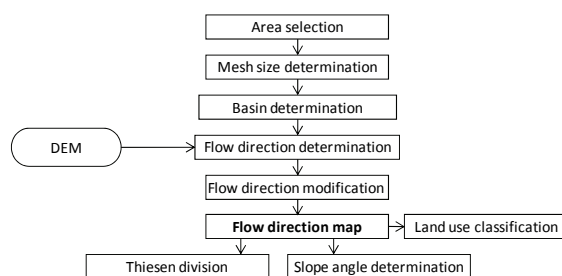


Fig. 1 Procedure for building geographical mesh data

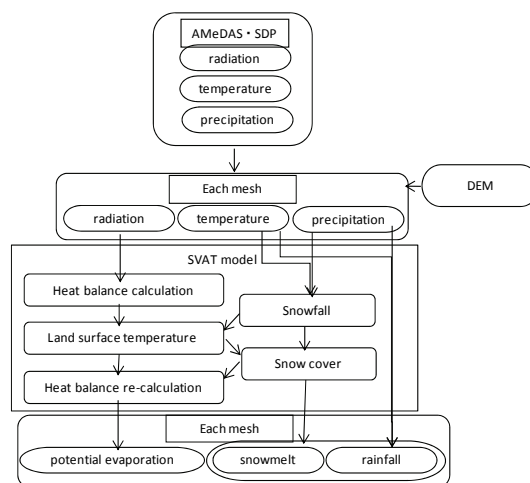


Fig. 2 Procedure for preparing meteorological mesh data

帰流として流入する。地表面およびA層については畑地、山林、市街地、水田、水域の土地利用別に流出計算を行う。水田からの流出は、kinematic wave法で追跡された用水路流として河川まで運ばれる。河道流についてもkinematic wave法を用いる。また、蒸発散量は、A層から差し引き、A層の水量が0のときは、それ以上は蒸発しないものとする。kinematic wave法は、流域をある程度細分化して、それぞれの斜面および河道の初期条件、境界条件、パラメータを与え、雨水流下現象を水流の運動法則と連続式の関係を用いて水理学的に追跡するものであり、流域の土地利用条件が一樣でない場合、あるいは変化した場合にも容易に対応できる点で大きな特長を有している。パラメータの大部分が流域の条件である程度推定できることから、水文資料の不足しているような流域でも概ねの結果が得られる。

地下水流動を詳細に表現するためには、土壌、地盤などの地質データに基づき、飽和・不飽和浸透流解析を行う必要がある。しかし、ここでは、流域全体の地下水流動を把握することに重点を置き、線形貯留法によって追跡する。線形貯留法によって浅層および深層の地下水流を表現するため、特に深層地

下水流出に以下の仮定を置いた。

（仮定1）流域内の地下水流速は一様にもっとも一般的な値である1.0m/dayとする。

（仮定2）地下水流出方向は河川の落水方向と同じとする。

（仮定3）地下水流域は河川流域と一致する。

この仮定に基づき、流出シミュレーションを行う。

以上2つのモデルを組み合わせることにより、流域を表面流出、中間流出、地下水流出を追跡する。メッシュ内の水の挙動と水流追跡方法の図をFig. 3に記載する。

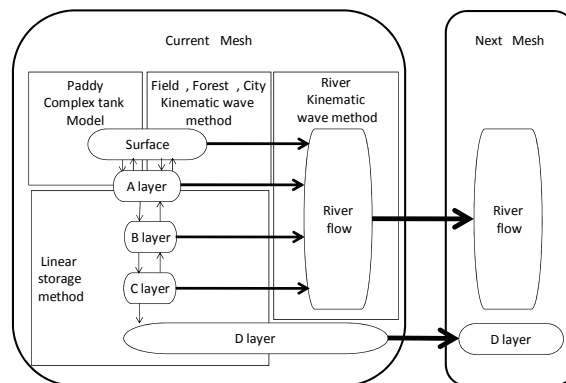


Fig. 3 Water movement and runoff routing in a mesh

3. 地下水取水とその影響評価指標

地下水取水においては、「流域内に地下水取水施設が建設され、日量 $x \text{ m}^3$ の地下水取水が行われるようになった」状態を考える。ここで、地下水の取水は、D層から行われ、D層の地下水位が0mになったときにはそれ以上の取水は行わないものとする。本研究では、取水を行うメッシュの位置と日量の地下水取水量 $x \text{ m}^3$ を組み合わせ、複数パターンでの流出シミュレーションを行う。これにより計算された各地下水位と、地下水取水を行わなかった計算地下水位の差を求め、その差を低下地下水位と定義し、それを用いて地下水取水に伴う水利用環境の評価を行う。

同一量の取水であっても、流域のどの位置で取水が行われるかによって、その影響は異なるものになることが予想される。そこで、上流域、中流域、下流域、それぞれに取水箇所を設置し、その影響の比較を行うことにする。

具体的には計9地点の取水地点（上流5地点、中流3地点、下流1地点）を選定し、2つの取水期間（5年間と全期間（30年））で、計6パターンの取水（0, 1,000, 5,000, 10,000, 50,000, 100,000 ton/day）を行った。解析を行うメッシュは取水メッシュを含めて、落水方向10メッシュとする。Fig. 4に取水メッシュと影響メッシュを示す。流出シミュレーションを行えば、各メッシュについて、流出量や各層の水位といった水用量を表す物理量が計算される。こうした水動態から、水利用のインパクトを適切に、かつシンプルに表現することは、水利用環境を評価する上で有益である。そこで、ここでは、流出シミュレーションから得られるデータを用いて、地下水利用の影響を表す指標をいくつか提案する。

1) 地下水位低下率

本モデルにおいて、地下水層を表すのは、D層の水位である。しかし、このD層の水位は必ずしも、地下水の涵養量を正確に表すものとはいえない。そこで、解析の際には地下水の取水を加味した流出シ

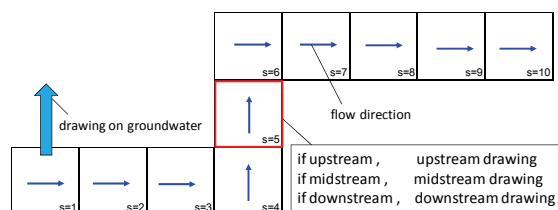


Fig. 4 Intake mesh and affected meshes

ュレーションの出力地下水位と地下水取水を行わなかった出力地下水位の差である低下地下水位 f_d (m) を用いる。これはD層の水位の変化量に関しては、有意性があると考えたからである。さらにこの取水低下地下水位と地下水取水の行われなかった出力地下水位の比を地下水位低下率 F_d (%) とし、今回の解析指標として用いる。

2) 取水耐久日数, 最大地下水位低下率・日

どの程度の期間であれば、地下水の取水が可能であるかを把握できたら、地下水利用のマネジメントに有益であると思われる。この取水耐久日数は、そのメッシュの持つ涵養能力により、大きく異なると考えられる。そこで、本研究は取水を行い、そのメッシュの低下地下水位比が0, 1, 5, 10, 25, 50, 100%に達するまでの日数を取水耐久日数として指標化した。また、取水期間における地下水位低下率の最大値を最大地下水位低下率、そのときの日数を最大地下水低下日と定義した。

3) 5年間取水回復日数

取水により減少したメッシュ内の地下水がどのくらいの期間で再び、どのくらい回復するのかを把握することは、継続的に、かつ計画的に地下水を利用するためには必要であると考えられる。そこで、本研究では、5年間の取水を行い、減少した低下地下水

位比が100, 50, 25, 10, 5, 1, 0%に回復するまでの日数を5年間取水回復日数として指標化した。

4. 日野川流域への分布型流域水利用モデルの適用

4.1 適用流域日野川の概要

日野川流域は主に鳥取県西部に位置する流域面積870km²、河川延長77kmの一級河川である。Fig. 5に日野川流域図を示す。近年、流域東部に位置する大山の豊富な地下水を求め、複数の飲料水メーカーの工場が進出しており、その将来的な影響が懸念されている。

4.2 日野川流域における流出シミュレーションの結果

流出シミュレーションの適用結果を示す。キャリブレーション期間は2002年～2004年の3年間、流出シミュレーションの評価を行うバリデーション期間は2006～2007年の2年間とする。

同定後のパラメータセットを用いたキャリブレーション期間における計算流量と観測流量のグラフをFig. 6に、バリデーション期間における計算流量と観測流量のグラフをFig. 7に、キャリブレーション期間・バリデーション期間の評価指標の値をTable 1に、それぞれ示す。

キャリブレーション期間の流出再現は、Fig. 6から全体的な挙動は捉える事ができていると判断できる。傾向として、計算流量が観測流量に対して、洪水時には、小さく出力され、低水時には大きく出力される傾向がある。これは、洪水の再現に対して用いるRMSEと、低水の再現に対して用いるMREの両方を用いた結果であると考えられ、問題はない。しかし、400日、780日周辺の計算流量の値が観測流量に対して、小さく出力されている。これに関しては、Fig. 8より融雪量が1, 2, 12月に多く出力されていることに原因があると思われる、今後、改善が必要である。バリデーション期間の流出再現においても、図-7から全体的な挙動は捉えることができています。しかし、200日周辺の流出に関しては観測流量に比べて、計算流量が約300m³/s小さく出力されている。これは、キャリブレーション期間中に経験していない流出が生じたためであると思われる。用いているパラセットはキャリブレーション期間中の流出に最適化するように決定されたパラセットであるため、今回のように大きく異なる条件が入力されたときには流出シミュレーションの再現性が低下したと考えられる。評価指標の値に関しては、MREを除いて多少の悪化が見られるが許容範囲内と判断した。

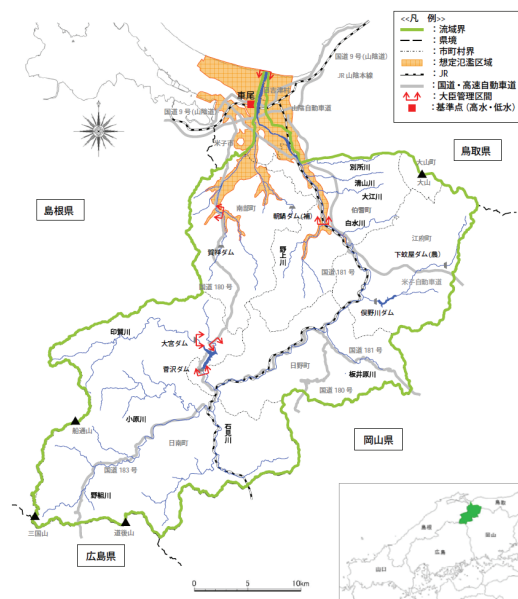


Fig. 5 The Hinogawa River Basin (reprinted from river improvement plan of Ministry of land, infrastructure and transportation)

Table 1 Calibration results of runoff model at Kuzumoto gauging station

index	for calibration	for validation
WBE	0.05	0.20
MRE	0.83	0.47
RMSE	25.5	30.5

以上の結果から河川流出に関しては、適切に表現できたと判断し、この流出シミュレーションから地下水取水を行った。

4.3 日野川流域における地下水取水に伴う水利用インパクトの結果

取水地点として、上流取水メッシュを5メッシュ (u1～u5)、中流取水メッシュを3メッシュ (m1～m3)、下流取水メッシュを1メッシュ (d1) とし、計9メッシュをできるだけ散らばるように選定した。取水メッシュから取水メッシュを含めた落水方向10メッシュ (10km) を取水影響メッシュと定義し、解析対象とした。Fig. 9に取水メッシュと影響範囲メッシュを記した図を示す。なお、上流取水メッシュ、中流取水メッシュ、下流取水メッシュは定義した。取水量は日量0, 1000, 5000, 10000, 50000, 100000m³の6パターンとし、流出計算単位10分ごとに日量の取水量を均等に分割して取水をおこなった。取水期間

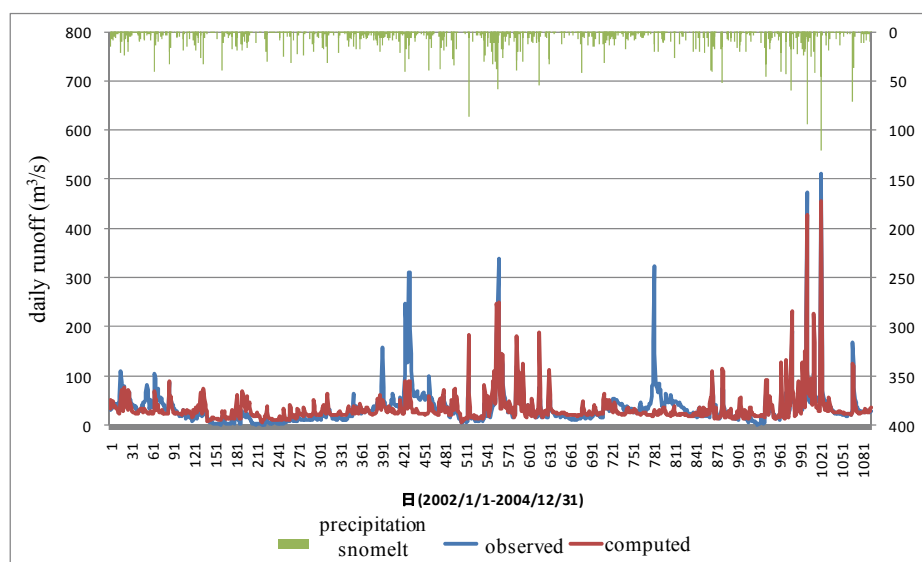


Fig. 6 Computed and observed hydrograph at Kuzumo gauging station for calibration period

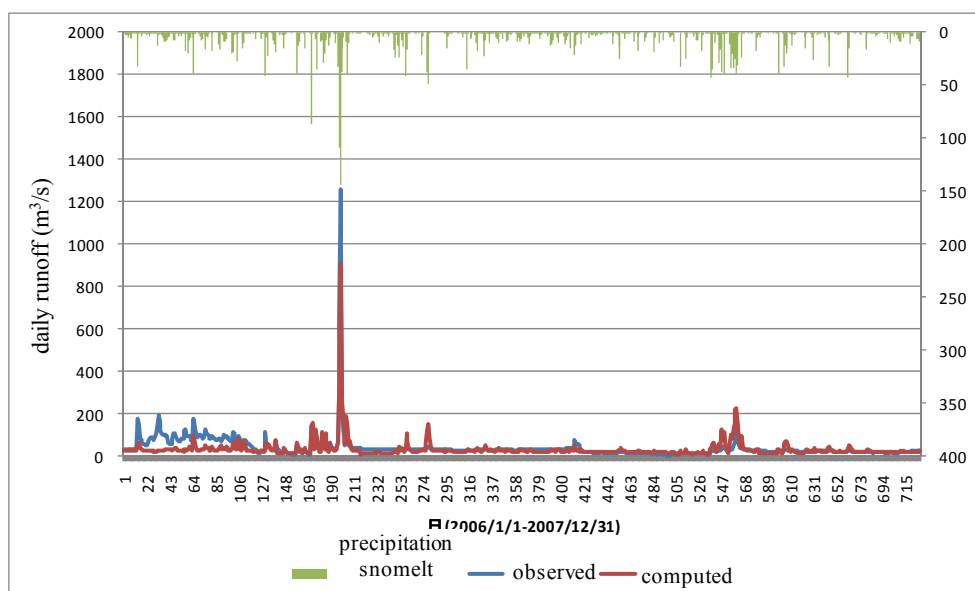


Fig. 7 Computed and observed hydrograph at Kuzumo gauging station for validation period

はシミュレーション期間30年間（1978～2007年）の全期間と開始5年間（1978～1982年）の2パターンとした。 $u1 \cdot m1 \cdot d1$ メッシュにおける10,000m³の取水時の取水メッシュと影響メッシュの地下水位低下率のグラフをそれぞれFig. 10に示す。これより、取水メッシュから落水方向の影響メッシュに、取水の影響が徐々に伝わっていく様子がわかる。また、地下水位低下率は下流へといくにしたがって、徐々に小さくなっていくことが分かる。 $u1$ の取水メッシュから影響メッシュ（ $s=4$ ）までの安定地下水低下日は4541, 6922, 8715, 9619日と徐々に遅くなり、安定地下水

位低下率はそれぞれ28.54, 26.9, 24.79, 21.92%と下がっている。つまり、本流出シミュレーションでは取水の影響は離れた場所ほど、ゆっくり生じ、かつその影響は小さくなるという実現象を表現できているということがわかる。これは、 $m1$, $d1$ においてもいえることから、上流・中流・下流全てにおいて同様の傾向が見られる。また、 $u1$, $m1$, $d1$ いずれにおいても下流の影響メッシュが30年で安定していないことから、流域全体の解析には、更に長期の流出計算が必要であるといえる。

全取水メッシュにおける取水耐久日数をTable 2に

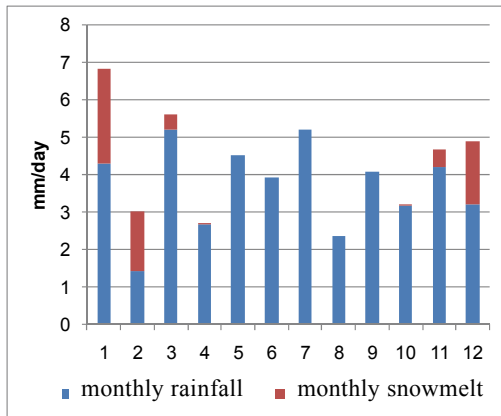


Fig. 8 monthly-averaged daily input (rainfall and snowmelt) in year 2002.

記載する。Table 2の結果から上流メッシュ数が少ない取水メッシュほど最大地下水位低下率が大きいことが分かる。地下水層であるD層の涵養源は、上層であるC層からの浸透と、上流メッシュからの横流入の2種類である。上流メッシュ数が多いということは、上流メッシュからの涵養が多いということを意味する。その為、上流メッシュ数の多い取水メッシュは取水の影響が小さかったと考えられる。このことから、取水箇所（メッシュ）選定の際には、上流メッシュ数が多い涵養が豊かなメッシュを選定することが望ましい。

u1における10,000m3取水時（5年間）の取水メッシュ（ $s=1$ ）と影響メッシュ（ $s=2$ ）のグラフをFig. 11に示す。Fig. 11より、最大地下水位低下率は取水メッシュが24.1%で影響メッシュが16.0%、10%回復日数は、取水メッシュが890日、影響メッシュが1373日である。このことから、取水時には取水メッシュに比べ、影響が小さかった影響メッシュの方が地下

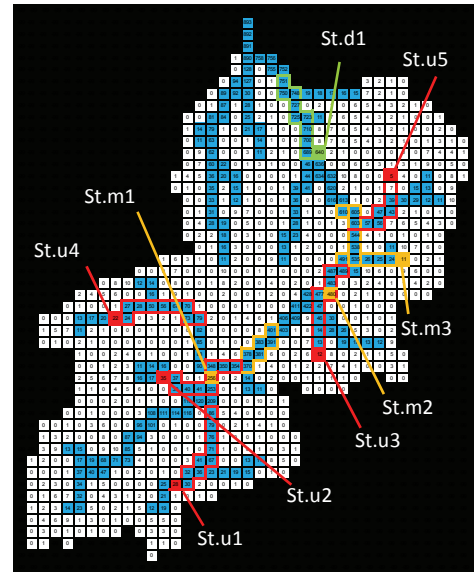


Fig. 9 Intake mesh and affected areas

水位の回復に時間を要しているということが分かった。これは、取水メッシュは、直接的な取水期間が終わった後には、取水の影響がない上流からの流入により涵養されるのに対して、影響メッシュ（ $s>1$ ）では、取水の影響をまだ改善できていない上流からの流入により涵養された為だと考えられる。ここから予測される仮説として、影響メッシュの主な涵養源が取水メッシュとは異なる他の上流メッシュである場合、このような涵養の回復の遅れは生じないかもしれない。この結果から、取水の際には、取水メッシュだけではなく、下流メッシュの空間情報（上流メッシュ数等）を把握することも重要であるといえる。この検討は時空間的検討を行うことができる分布型モデルを用いた為に行うことができたもので

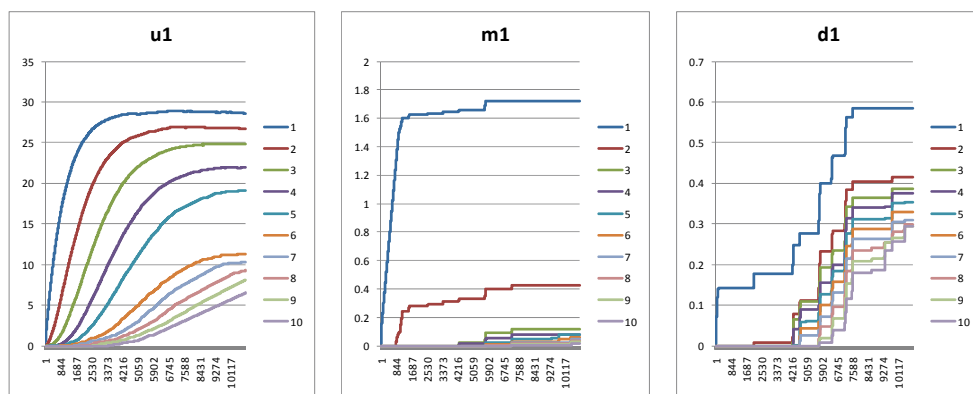


Fig. 10 Groundwater level decreasing rate at intake and affected grids for 10,000 cm/day intake. (left: u1, middle: m1, right: d1)

Table 2 Endurance days for water withdrawal

intake mesh	number of upper meshes	maximum subsidation of groundwater level		endurance days for water withdrawal						
		rate (%)	day	0%	1%	5%	10 %	25 %	50 %	100 %
u5	5	100	1704	0	8	41	85	228	521	1704
m3	11	69.4	4644	0	14	73	153	439	1247	
u3	12	67.1	4646	0	15	78	163	468	1370	
u4	22	35	5688	0	28	153	335	1239		
u1	28	28.9	6982	0	35	191	430	2022		
u2	35	21.6	6410	0	46	263	625			
m2	480	0.2	10957	0	637					
d1	640	0.58	10957	0						

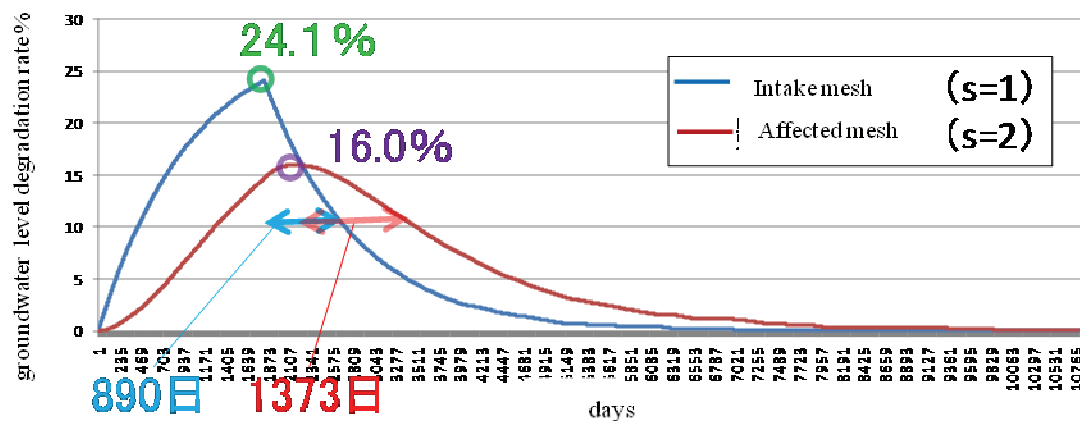


Fig.11 Degradation rate of groundwater levels at intake and affected grids for five years withdrawal of 10,000 cbm at u1 grid.

あり、地下水を含めた水利用アセスメントにおいて分布型モデルはある程度、有効であったと考えられる。

5. 結論

流出シミュレーションに関しては、融雪量の関係から4月、5月の流出量の再現に少し、違いがあったものの、概ねの挙動を捉え、水収支の再現をすることができた。また、今回は日野川流域における地質データを組み込まずに、一般的値を与えることによ

りシミュレートしたが、一部に流域による地質特性を組み込むことにより精度を上げることが可能かもしれない。

地下水の取水による環境評価に関しては、本研究の目的である流域スケールでの時空間での解析を行うことができた。地下水の挙動は非常に時間スケールが長いため、今回解析を行った10メッシュ (10km) でも、30年間の解析で、その影響の最終的な状態を掴むことはできなかった。このことから、流域スケールの地下水の解析を行う際には更に長いスケールの解析が必要になることがわかった。また、分布型

モデルを用いた本解析では、上層からの浸透に比べて、上流の地下水層からの流入量の積算値が地下水の涵養を大きな割合で支配していることが分かった。本研究では、当初、渇水期や豊水期など季節による取水の影響も考察しようと考えていたがこのモデルでは季節による取水の影響評価はできないということがわかった。取水メッシュの影響メッシュでは取水をやめた後にも、上流の水位低下の影響から、その流入量が減少するため、涵養能力が低下し、回復までに時間を要するケースがあるということがわかった。これは影響メッシュの上流メッシュ数中の取水メッシュの上流メッシュ数の割合により、異なった結果が生じるかもしれない。

本研究では、今後、地下水と河川水の統合水利用計画の必要性が増加すると予測されることから、地下水を安定的に利用するためには、流域での地下水のアセスメントを試みた。従来の研究では、大規模な地下水取水に対してのアセスメントとして、近隣への影響を考えたものが多かった。しかし、本研究では空間分布型流出評価モデルを用いることにより、

下流域への影響や、影響が時間的に遅れて現れたり、更に、長期に渡って続いたりすることへの時空間的な検討を行うことができた。持続可能な水利用環境を考えるための流域スケールでの地下水を含めた水利用環境の評価として、空間分布型流出評価モデルは有効性があると思われる。

参考文献

- 近藤純正・徐健青(1997): ポテンシャル蒸発量の定義と気候湿度度, 天気第44巻12号, pp.875-88.
- 佐藤葦展(2009): 気候変動に関する先行適応のための流域スケールでの洪水及び渇水リスク評価, 京都大学防災研究所年報, 第52号B.
- 武田建紀(2008): 地下水利用のトレンドと問題点 設備と管理, 巻:39号, pp.39-52.
- Kojiri,T.(2006) : Hydrological River Basin Environment Assessment Model(Hydro-BEAM), Watershed models, eds: Singh, V.P. and Frevert, D.K., 613-626, Taylor & Francis, CRC Press, U.S.A.

Water Use Environment Assessment at Basin-wide Scale using Distributed Runoff Model

Motohiro HIRAI*, Daisuke NOHARA, and Tomoharu HORI

*Graduate School of Engineering, Kyoto University

Synopsis

Combined use of surface water and ground water is recently getting more important. Appropriate management is indispensable for effective and sustainable ground water use. In order for proper management of ground water use, basin-wide understanding of water balance in time and space is important as well as detailed water flow analysis in rather small influence zone of well pumping. From this view point, long term runoff simulation has been carried out with the combination of surface, subsurface, and ground water. Then the spatial and temporal impact of water withdrawal on ground water environment is estimated by several cases.

Keywords: water resources, water use, water balance, distributed runoff model, groundwater, surface water