農業用水取水ルールを考慮した分布型水文流出 モデルによる紀の川流出解析

RUNOFF ANALYSIS USING DISTRIBUTED HYDROLOGICAL MODEL WITH IRRIGATION WATER USE MODEL IN THE KINOKAWA RIVER

石塚正秀¹・江種伸之² Masahide ISHIZUKA and Nobuyuki EGUSA

¹正会員 博(工) 香川大学准教授 工学部安全システム建設工学科(〒761-0396 高松市林町2217番20) ²正会員 博(工) 和歌山大学准教授 システム工学部環境システム学科(〒640-8510 和歌山市栄谷930番地)

We showed that the amount of irrigation water was 34.4 m^3 /s during irrigation period in the kinokawa river, Japan. This is very large compared to the river discharge in a normal flow condition. To take water use into account a runoff analysis using a distributed hydrological model, we proposed a new model that consider the water-intake from head works, inflow, storage and flood control by dams. It was found that the simulated river discharge using this model agreed with the observation data, especially for the low water flow in the irrigation period. In addition, the reduction rate of irrigation water from paddy fields to kinokawa river was inversely estimated. The rate was low in a small precipitation year and was high in a high precipitation year. This characteristic agrees with a traditional and empirical water uses of irrigation water.

Key Words : Distributed hydrological model, Kinokawa river, Irrigation water, Rate of reduction

1.はじめに

紀の川は, 十津川紀の川開発総合事業(昭和22年策定)や紀の川工事実施基本計画(昭和49年修正)などを経て,現在も多様な水利用がなされている.古くから農業用水としての利用が進められ,平成16年3月時点で農業用水としての利用が82%を占める.同時に,奈良県,和歌山県,大阪府に給水人口約75万人を持つ重要な水源である.しかし,過去20年間の渇水流量の平均は1.5 m³/sであり¹⁾,平成6年8月には岩出井堰下流付近の大規模な瀬切れが発生し,平成16年6月には洪水による氾濫危険性が高まるなど,流況は不安定である.

さらに,平成9年の河川法改正を受け,平成17年11月 に発表された紀の川水系河川整備基本方針においては, 利水・治水に,環境を加えた方針が示された.河川の生 物環境の多様性や固有性の維持には,新たに低水流量の 維持が重要となる.一方で,平成16年4月には新六ヶ井 堰上流湛水域の河川水を水源とする和歌山市水道用水に 2-MIB(カビ臭)問題が発生する²⁾といった,新たな課 題についても危機管理を高める必要がある.

今後,多様な水利用や河川環境を考えていくためには,より高度で複雑な流出解析が必要であるが,地方自治体

では依然として簡易的な手法も多く,水利用の現状把握 や水需要の将来予測の精度向上が求められている³³.

紀の川では,水利用の歴史的経緯から,農業用水の視 点からの水量予測がタンクモデル⁴⁾や回帰モデル⁵⁾を用 いて行われているが,流水の時間遅れの考慮などを含め た実地形に対するモデルの適用が必要である.また,農 業用水は慣行的に利用され,その特徴は地域ごとに異な るため,堰・頭首工ごとの実測データを整理して取水 ルールを定量的かつ時系列的に明らかにし,流域全体と しての取水の特徴を明らかにすることが必要である.

本研究の目的は,1)紀の川における頭首工やダムなど による取水量や放流量および農業用水の取水ルールを示 し,その特徴を明らかにすること,2)農業用水などの取 水モデルおよび分布型水文流出モデルを構築し,流域で 起こりうる降雨流出現象や灌漑期の低水流量を再現する こと,3)灌漑用水の反復利用を通した河川水への還元率 の特徴を数値解析的に明らかにすることである.

2. 紀の川における水利用

(1) 紀の川流域の概要紀の川は日本最多雨地帯である奈良県南部の大台ケ原



図-2 紀の川の土地利用(1997年)

を水源とし,紀伊水道に注ぐ流域面積1,750 km²(全国 38位),幹川流路延長136 km(全国27位)の一級河川 であり,主な支川には,大和丹生川,紀伊丹生川,貴志 川がある(図-1).土地利用は上流部ではほとんどが針 葉樹による森林地帯(全体の72%)となっている(図-2).中流部から下流部にかけては,五條市や橋本市な どの建物用地,両岸沿いに果樹園・水田が広く分布する.

(2) 農業用水取水量

a) 許可水利権

紀の川には農業用水許可水利権として,計9箇所で河 川水の取水が行われている(図-1,表-1).灌漑期(6月 10日~9月15日)における船戸地点までの最大取水量の 合計は40.33 m³/sである(2000年の実績値は34.61 m³/s). 過去20年平均(昭和57~平成13年,船戸)の平水流量が 26.63 m³/s,低水流量が14.97 m³/sである¹⁾ことを考えると, 農業用水の取水量は非常に多いことが分かる.

許可水利権としては,全ての頭首工において非灌漑期

にも取水が可能であるが,実測データをまとめると(図-3),通年取水されている場所は西吉野,藤崎左岸であり, 小田,藤崎右岸では灌漑期と冬季に取水され,下渕,岩 出では非灌漑期の取水は無いことがわかった.また,水 量としては,許可水量と同程度の取水が行われているこ とが明らかとなった.同様の特徴は1999年にもみられた. b)慣行水利権

慣行水利権としての農業用水量は,許可水利権以上に 実績データが不確実である.旧井堰箇所を中心として, 8箇所で計0.28 m³/s取水されていることがわかった¹⁾が, これは許可水利権と比較して少量である.

c) ダム

猿谷ダムは十津川水系上流に位置し,紀の川流域外で あるが,十津川紀の川開発総合事業により,奈良県大和 平野の農業用水と上水を下渕頭首工から取水するための 補填として,最大16.7 m³/sが分水されている.これは発 電にも利用されており,年間を通じて水が供給されてい る(図-4).とくに降雨時に最大量(16.7 m³/s)が分水 されていることがわかった.

大迫・津風呂・山田ダムは農業用水用ダムであるが, 流域平均で日雨量が230 mm観測された2000年9月11日の 豪雨時(東海豪雨)など,降雨時に治水操作している.

(3) 上水取水量

上水としては,計7市町に1.4 m³/sの取水が許可され ているが,下渕頭首工以外は実測データは得られなかっ た.なお,大滝ダムによる暫定取水量は含めていない. また,船戸より下流の紀の川大堰の湛水域では,和歌山 市の上水道・工業用水道や和歌山県工業用水道などに利 用されているが,本論では範囲外となる.

3. 取水モデルの概要

前章で示した取水形態を考慮して, つぎに示す取水モ デルを提案する.

				紀の川水系	系水利権	2000年実績				
種類	形態		受益地域	灌漑期	非灌漑期	灌漑	期間			
				6/10~9/15	9/16~6/9	開始日	終了日	灌漑期	非灌漑期	取水パターン
				m³/s	m³/s			m³/s	m³/s	
農水	許可	下渕頭首工	右岸	9.91	2.91	6/1	9/19	7.75	0.01	灌漑期
農水	許可	西吉野頭首工	左岸·右岸	5.81	2.49	6/10	9/11	2.99	0.75	通年
農水	許可	小田頭首工	右岸	7,21	0.53	6/1	9/29	6.96	1.51	灌漑期+冬季
農水	許可	藤崎頭首工	左岸	2.96	0.18	6/1	9/30	2.86	1.21	通年
農水	許可	藤崎頭首工	右岸	4.59	0.44	6/1	9/22	3.49	0.66	灌漑期+冬季
農水	許可	岩出頭首工	左岸	10.80	1.03	6/1	9/22	6.32	0.00	灌漑期
農水	許可	岩出頭首工	右岸	4.96	0.35	6/1	9/10	4.24	0.00	灌漑期
農水	許可	諸井井堰	左岸	0.98	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
農水	許可	諸井井堰	右岸	0.32	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
農水	許可	ーの木ダム®		0.696	-	-	-	-	-	-
農水	許可	山田ダム ^{ы)}		1.793	-	-	-	-	-	-
農水	許可	新六ヶ頭首工 ^{。)}	右岸	2.64	0.20	6/1	9/10	2.27	0.01	灌漑期
		合計 ^{d)}		40.33	7.93			34.61	4.14	

表-1 頭首工・ダムにおける許可水利権としての農業用水の取水量¹⁾と2000年の取水実績

a)1999年, 2000年は未完成 b)ダム放流量で考慮した c)船戸より下流に位置する

d)ーの木ダム、山田ダム、新六ヶを除く



図-3 頭首工からの取水実績(2000年)

$$q_{r} = q_{org} - \sum_{i=l}^{I} (I - r_{i})q_{i} + \sum_{j=l}^{J} \Delta q_{j} + \sum_{k=l}^{K} p_{k}q_{k}$$
(1)

ここで, q_r は取水・分水が考慮された流量(m^3 /s), q_{org} は取水・分水を考慮していないシミュレーション流量, q_i は頭首工iの取水量, r_i は農業用水の還元率(= 0-1),

 q_i はダム放流量と流入量の差, q_k は流域外ダムからの 分水量, p_k は分水効率を表す.

本取水モデルは,最下流の流量観測地点(船戸)にお いて適用することとした.一般に,取水場所は特定でき るが,還元場所の特定は難しい.陸ら⁶は農業用水の灌 | 漑や取水位置を考慮したモデルを提案している.しかし, 還元水は取水地点と同じ場所で考慮されている.また, 東西に長細い形状の紀の川では河川両岸に農業用水路が 長距離に配されているため, 堰で取水された農業用水が 河川に再流入している場所の特定は,観測データがない ためにさらに難しい.また,取水された水は用水路網を 通して反復利用され,水田に湛水すると時間遅れが発生 するが、これについても明らかではない、つまり、一旦 取水された農業用水の河川への還元は,モデルとしても 確立していないし,流域の特徴もある.したがって,現 実問題としての不確定要素があることから、本モデルは、 最下流地点において適用し,流域全体としての水利用の 特徴を明らかにすることに焦点をおいた.

ここで,下渕頭首工からの取水は流域外の奈良県へと 疎水されるためr=0とした.同様に,岩出頭首工は船戸 観測所の直上にあるため,r=0とした.なお,その他の 頭首工からのrは一定とした.また,ダムによる治水操 作をモデル化した流出モデル⁷⁰も提案されているが,本 研究では,日流量データしか得られなかったため,式 (1)のように最下流部で考慮することとした.

4.分布型水文流出モデルの概要

(1) モデルの概要

紀の川のような広い流域を対象とする場合,分布型モ デルが必須である.図-5は,本研究で構築した分布型水



図-4 猿谷ダムの分水量および大迫・津風呂・山田ダムの調整 量(放流量 - 流入量)の観測データ(2000年)



図-5 水文流出モデルの構造

文流出モデルの構造を示す.本モデルは降雨遮断を解く 森林遮断蒸発サブモデル⁸,蒸散過程および地下浸透 を解く浸透・蒸散サブモデル⁸,斜面および河道の流 れを解く斜面・河道流出サブモデル⁹⁰の3つのサブモデ ルを有し,それらをカップリングさせた.

(2) モデルの仮定

流出モデルを用いて複雑な流出プロセスを考慮する 際には,流出モデルの利用目的に応じた様々な仮定を行 う必要がある.本モデルでは規模の大きい紀の川流域へ の適用を考えており,基礎的な水文過程を組み込むこと を第一に考えた.以下に5つの仮定を示す.1)降雨後の 地下浸透にはタンクを用いており,飽和・不飽和帯の区 別は林地のA層における水深高で考慮する.2)市街地に おける下水道などの用排水システムは考慮していない. 3)河道からの水面蒸発は考慮していない.4)土地利用の 違いは側方浸透流のマニングの粗度係数,遮断降雨の有 無,地表面流のタイプで表現され,水田タンクモデルな どは用いていない.5)小河川からの河道流出は無視し, 斜面流として考慮する.

(2) 森林遮断蒸発サブモデル

林分に到達した雨水は樹冠滴下雨と樹幹流に分かれ, 地表到達降雨は双方の和となる.雨水が樹冠および樹幹 に残っている間は遮断蒸発強度eで蒸発する.

(3) 浸透・蒸散サブモデル

a)浸透の基礎方程式

地表に到達した降雨は,土壌・地下に浸透する.ま た,浸透後に一部は樹木により蒸散される.本モデルは 土壌内の雨水変換過程を2層のタンク(図-5のタンク, タンク)により構成し,貯留関数法により計算を行う.

貯留関数法の基礎方程式は,連続式(式(2))と運動 方程式(式(3))で表される.

連続式:
$$\frac{dS_i}{dt} = r_i - Q_i$$
 (2)

運動方程式:
$$S_i = K_i \cdot Q_i^{P_i}$$
 (3)

ここで, S_i は流域の貯留高(mm), t は時間, r_i は流入強度(mm/hr), Q_i は流出高(mm/hr), K_i は流域の貯留定数, P_i は Q_i のべき定数, i はタンク番号である.

b) 蒸発散モデル

蒸発散はハーモン法(1961)により推定した.

c) 浸透モデル

土壌水分量が減少した場合,蒸散の抑制が考慮される.第1段階では,蒸散量がポテンシャル蒸散量に一致し,第2段階では,図-5のタンクからタンクへ補給され,第3段階では,土壌水面から毛管パイプが途切れるため,蒸散量は抑制される.なお,抑制に関する関数形は,福蔦ら⁸と同様の式を用いた.

(4) 斜面・河道流出サブモデル

斜面・河道流出サブモデルでは,斜面・河道グリッド を流下方向にさらに分割し,斜面勾配と流路勾配を求め た上で,斜面系と流路系のそれぞれについてKinematic wave法を用いて差分計算を行う.斜面系の流量は連結 する河道の上端に流入させた.Kinematic wave法は連 続式(式(4))と運動方程式(式(5))からなる.運動方 程式は流れの形態により流量・流積関係式としてマニン グ型の地表面流とダルシー型の中間流を考慮した.

連続式:
$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r_e$$
 (4)

運動方程式(河道):
$$q = \frac{\sqrt{\sin\theta}}{n} h^{\frac{5}{3}}$$
 (5)

(斜面):
$$q = \begin{cases} \frac{k \cdot \sin\theta}{\gamma} h & (h < D) \\ \frac{k \cdot \sin\theta}{\gamma} h + \frac{\sqrt{\sin\theta}}{n} (h - D)^{\frac{5}{3}} & (h > D) \end{cases}$$

ここで,hは水深(mm),tは時間,qは単位幅流量(mm²/s), r_e は有効降雨強度(mm/s),xはグリッド上端からの距離 (mm),DはA層の厚さ(mm), は河床および斜面勾配 (degree),nはマニングの粗度係数(m^{-1/3}sec),kは透水係数 (cm/sec), は有効空隙率(無次元)である.

斜面の運動方程式は,山腹斜面表層の透水性の高い土 壌層(A層)内の自由水側方流れ(中間流)を考え,降 雨強度が大きくなると,側方流水深がA層厚Dを越えて 地表面に到達したときに,地表面流(飽和表面流)が発生する⁹⁹.なお,A層が不飽和であるグリッドでは,表面に雨水は滞留せず,すぐにA層に浸透すると考える. なお,斜面幅方向に水深および流速は一様と仮定する.

(5) フローチャート

図-6は水文流出モデルのフローチャートを示す.入力 条件として,1時間毎に変化する降水量・気温を各グ リッドに与え,遮断蒸発サブモデルと浸透・蒸散サブモ デルにより,1年間の有効降雨と地下流出量をグリッド 毎に算定する.そのつぎに,有効降雨と地下流出量を入 力条件として,斜面・河道サブモデルにより河道流出量 を計算する.



図-6 水文流出モデルのフローチャート

(6) 地形・土地利用のメッシュ化

a) 流域地形

本モデルでは国土数値情報の土地利用,標高,河道網, 流域界データを用いて,流域のメッシュ化を行った (図-7).次章で示すように,河川流量の定性的な特徴 を再現でき,かつ,計算機負荷の少ない条件として,水 平格子間隔は4 km × 4 kmの正方形格子とした.

b) 河道網,斜面勾配,落水線

河道は,斜面グリッドの境界部を直線状に流れるとした.また,紀の川本川に合流する支川は大小合わせて 181本あるが,本モデルでは大和丹生川,紀伊丹生川, 貴志川の3支川とした.

斜面勾配を求めるために国土数値情報50mメッシュ標 高データを利用し, グリッド内の最高標高と最低標高の 差およびグリッド幅を用いて, 傾斜角のを求めた.なお, 落水線は隣接するグリッド間4方向とし, グリッド内の 最急勾配方向とした.

c) 土地利用

土地利用は1997年の国土数値情報100mメッシュを利



図-7 モデル流域(4 km×4 km)

用した.1グリッド内(4 km×4 km)に占める割合が最 も大きい土地利用をそのグリッドの土地利用データの代 表とした(図-7).その際,12種類に分類されている土 地利用データをつぎの4種類に再分類した.山林(森林, 荒地),市街地(建物用地,幹線交通用地,その他の用 地),田,畑(その他の農用地,ゴルフ場).

(7) 計算条件

AMeDAS観測所で観測された1時間毎の降水量(11地 点)と気温(7地点)を与えた.計算期間は,1999年1月 1日0時から2000年12月31日24時までとした.なお,1年 ごとに分けて計算を行い,初期条件はすべて0とした.

モデルパラメータを表-2に示す.森林遮断蒸発サブモ デルのパラメータの値は和泉山地千手川流域で用いた値 を使用した¹⁰⁾.また,下層タンクのべき定数は $P_4 = 0.08$ と固定して,貯留定数 K_4 は感度解析により決定した. 表-2 モデルパラメータ

変数(単位)	記号	値
空間差分間隔(m)	Δx	40
差分時間間隔(hr)	Δt	0.001
斜面勾配	θ	0.575~5.7
遮断蒸発強度(mm/h)	е	0.21
林地系表層部(タンク皿)の貯留定数(hr)	K_{3}	19
林地系下層部(タンクⅣ)の貯留定数(hr ⁶²⁵ ・mm ^{-5.25})	K_4	300
直接流出の貯留べき定数	P_{3}	1.0
基底流出の貯留べき定数	P_4	0.08
A層厚(mm)	D	20
粗度係数(m ^{-1/3} s)	n	0.01~2
森林(0.1), 田(2), 畑(0.3), 市街	地(0.01)	,河川(0.01)

5. 紀の川の河川流量予測

(1) 流出モデルの適用

図-8より,洪水や河川流量の低減など,降雨による応 答特性を長期的によく再現できていることがわかる. 図-8では,取水を考慮していない結果を示しており,取 水のない非灌漑期における低水流量が一致していること から,本流出モデルの精度はよいといえる.ただし,洪 水時のピーク流量を合わすためには,紀の川流域のよう な大きな流域に対しては,降水量の空間分布を考慮する などの入力データの精度向上が必要である.





図-8 船戸における2000年の河川流量の比較(日データ使用)

が実測値よりも大きくなる傾向がみられる.とくに,6 月から9月初旬にその傾向が強い.図-3で示したように, この時期は灌漑期で,農業用水が大量に取水されている. したがって,取水を考慮していないシミュレーション結 果と実測値との差が生じたと考えられる.このような灌 漑期の堰直下における流量低下の実例は,著者ら自身の 目視観測においても明らかである.そこで,つぎに取水 モデルを適用して,農業用水取水の影響を検討する.

(2) 取水モデルの適用

広域な流域を対象として,正確な還元率を示すことは 難しいが,十津川紀の川開発総合事業で用いられている ように,還元率は一般に60%とされている.そこで,還 元率を60%(r = 0.6)とした場合の河川流量の比較結果 を図-9に示す.取水モデルを適用すると,実測流量とよ く一致する結果が得られた.ただし,灌漑期間中すべて 一致したわけではないため,つぎに取水の影響と還元率 の関係について詳しく検討する.



図-9 取水モデルの適用結果(2000年7月10~24日,船戸)

(3) 取水の影響と還元率の逆推定

和歌山県が計算した紀の川における還元率(平成6年6 月)は11~100%と大きく日変化している.つまり,灌 湖開始時や降水による水田への直接降雨,中干しなどの 水稲成長に伴う灌漑形態の変化などに応じて,農業用水 の還元率は変化すると考えられる.図-10は農業用水の 取水が始まった6月1日から約1週間後までの河川流量を 示す.取水を考慮しないモデルおよび還元率60%を考慮 したモデルでは取水開始によって急激に減少する実測流 量を十分に再現できていない.還元率60%を考慮しても, 依然として実測流量よりも大きいままである.そこで, 式(1)において,シミュレーション流量と実測流量との 差が還元水量と等しいと仮定して,実測流量とシミュ レーション流量が一致するように,還元率を逆推定した



図-10 灌漑開始時の河川流量の低下実績と推定結果(船戸)

(図-10).その結果,還元率は0~42%と低い値が得られた.その理由として,6月1日から,各頭首工からの 取水が始まり,多くの水田が湛水されたために,還元率が下がったと考えられる.

図-11は逆推定により得られた灌漑期間中(6月1日~9 月10日)の還元率を1999年と2000年で比較した結果を 示す.ただし,流域平均雨量が20 mm/day以下の日の結 果を示す.両年共に還元率は一定ではないが,推定され た還元率は,1999年に大きな値(0.3~0.9)を示すの に対して,2000年では,0.2~0.6に分布している.こ の理由として,降水量の違いが考えられる.つまり, 1999年の灌漑期は規模の大きい降水が多く,2000年は 少ない.降水量が多いと,水田への直接降水も増加し, 灌漑水の紀の川への還元性が高くなり,降水量が少ない と,湛水量や反復利用量が増加し,還元率が低下すると いう慣行的な水田灌漑の利用方法と一致する結果といえ る.

6.まとめ

本研究では,紀の川流域における農業用水の取水実績 データを用いて,頭首工からの取水の特徴を明らかにし, 灌漑期に34.6 m³/s,非灌漑期に4.1 m³/sの取水が行われ ていることが分かった.また,分布型水文流出モデルと 取水モデルを構築し,頭首工による取水,ダムによる分 水・貯留・放流を考慮した結果,実測データで得られて いた灌漑期における河川流量の減少を定量的に再現でき た.

さらに,取水を考慮していない流出解析結果を用いて 還元率を逆推定した結果,降水量の少ない年では還元率 は低く,降水量の多い年では還元率は高い結果が得られ た.つまり,還元率は降水量の増減などの降雨特性に応 じて変化しており,水田の水利用量を降水量に応じて変 化させるといった慣行的な水田灌漑の利用方法と一致す る結果が得られた.逆に,紀の川河川水の低水流量は農 業用水利用と強い関係があることが水文流出モデルと取 水モデルを用いて示された.





(ただし,還元率は0以下および1以上は図示していない.)

集中型の簡易モデルを考えた.今後は,分水・取水や還 元水流入を場所毎に考慮できる取水モデルを組み込んだ 分布型水文流出モデルに発展させる必要がある.

謝辞:本研究は,(財)日本生命財団 環境問題研究 助成(代表:江種伸之)および,香川県と香川大学の連 携融合事業(代表:白木渡)の補助を得た.取水量デー 夕取得には,和歌山県の協力を得た.ここに謝意を表す.

参考文献

- 1) 国土交通省:紀の川水系河川整備基本方針,2005.
- 2) 楠部加寿代ら他7名: Phormidium tenue によるカビ臭発生事 例,第57回全国水道研究発表会概要集,2006.
- 3)神野健二:水文・水資源研究の実践への展開,水文水資源
 学会誌,第17巻,5号,p.457,2004.
- 4) 中桐貴生,渡辺紹裕,堀野治彦,丸山利輔:紀の川流域に おける流域水循環モデルの開発.農業土木学会論文集,198 号,第66巻,第6号,1998.
- 5) 角道弘文,千賀祐太朗,兒島陽一朗,西田倫子:紀の川水 系における農業用ダム群統合管理計画に関する研究,水 文・水資源学会誌,第10巻,第2号,pp.174-180,1997.
- 6) 陸旻皎・小池俊雄・石平博:分布型水文モデルに基づく水利用シミュレーションモデルの開発の試み,水工学論文集, 第46巻, pp.277-282,2001.
- 7) 佐山敬洋, 立川康人, 寶馨, 市川温: 広域分布型流出予測 システムの開発とダム群治水効果の評価, 土木学会論文集, No.803/II, 73, pp.13-27, 2005.
- 8) 福蔦義宏,鈴木雅一:山地流域を対象とした水循環モデルの提示と桐生流域の10年連続日・時間記録への適用,京大 演習,pp.162-185,1986.
- 9) 立川康人:水理公式例題プログラム集,第1編水文編(例題 1-9),土木学会,2001.
- 10) 石塚正秀,福波大典,井伊博行,平田健正:流域スケールの水循環モデルの構築と山地小流域への適用,平成16年度 土木学会関西支部年次学術講演概要集,II-4-1,2004. (2007.9.30受付)