

V-19 総合的な水循環モデルに関する研究

研究予算 : 運営費交付金 (治水勘定)
研究期間 : 平 13~平 17
担当チーム : 水災害研究グループ (水文)
研究担当者 : 深見和彦、猪股広典

【要旨】

近年、国内外で多数の水循環モデルが開発されている。しかし、実際にどのモデルを選定・適用するかについて指針を示すものはまだ存在しない。そこで本研究では河川に関わる技術者が実務において効率的にモデル選定を行うことができるようにモデル選定に関する技術資料の作成を行った。技術資料の中では、国内外の水循環モデルを流域面積別または長短期別といった実務に供する項目について分類・整理を行った。また、複数のモデルを横断的・定量的に評価する方法を提示した。ここでは、Jackknife 法を利用した評価指標とモンテカルロ法を利用した評価指標を提示し、試験流域において検証を行った。

また技術資料を作成する上で多くの検証用水文データが必要とされるため検証用水文データベースの設計・構築を行った。

キーワード : 水循環モデル、評価指標、技術資料、水文データベース

1. はじめに

現在、国内外で多数の水循環モデルが開発されており、それぞれのモデルが独自の特徴を持っている。しかし実際に実務で利用の対象とする流域にとってどのモデルが適切であるかの判断は利用者の経験・勘などに依存しており、モデルを客観的な何らかの指標に基づいて横断的に評価して適用するモデルを選定する手法は確立していない。

また、一般に水循環モデルをある流域に適用する際は、過去の流出現象を参照してモデルのパラメータを調整する必要がある。その場面において過去の流出現象を参照して調整したパラメータが、例えば河川計画の対象とする極値的な洪水イベントや洪水予警報の対象となる任意の洪水イベントの流出現象を精度よく予測できるかどうか、モデルやパラメータの選定の基準となる。従って、どのモデルが未知の洪水に対して精度よく予測を行うことができるのかを横断的・定量的に評価する指標が必要となる。

上記のような問題から、本研究では河川に関わる実務者がモデルを選定する際の判断基準となるような技術資料を作成した。技術資料の中では、国内外の水循環モデルを流域規模別や長短期別といった実務に供する項目ごとに分類・整理を行った。また複数のモデルを横断的・定量的に評価できる方法を提案した。ここでの評価指標はモデルのパラメータの安定性で定義した。ある流出現象で調整したパラメータが他の流出現象でも高い再現性を示した時、安定性が高いと評価す

る。本研究では Jackknife 法を利用した評価指標およびモンテカルロ法を利用した評価指標の提示を行った。

また、上記の評価指標の提示に至るまでに様々な流域での検証計算を行う必要があり、必要となるデータを効率的に管理できる水文データベースの設計・構築を行った。

2. 国内外の水循環解析モデルの分類・整理

ここでは国内外の水循環モデルについて調査を行った。また、実務者が使用するモデルを選定する際の判断基準となるようにそれらのモデルを実務に供する項目について分類・整理を行った。

国内外の水循環モデルについて文献^{1)~11)}を調査した。それに加えて、学会誌(土木学会論文集(II)(1995~2002)、水文・水資源学会誌(1995~2002)、Journal of Hydrologic Engineering, ASCE (1996~2002)、Journal of Hydrology, Elsevier Publishin Co, Amsterdam, Netherlands (1996~2002)、Water Resources Research, American Geophysical Union, Washington, USA (1996~2002))およびインターネットで国内外の既往水循環解析モデルについて調査を行った。

収集した情報をもとに、用途に着目したモデルの分類を試みた。分類の方法は、まず、適用流域スケールを、文献を参考に¹²⁾¹³⁾大河川、河川、中小河川流域に分類した。これに大気循環も考慮に入れた大陸スケールと、中小河川流域に適用可能で下水道排水、河川取

水、地下水揚水の人工系モデルを付加した都市小流域を加えて5分類に設定した。また、日本への適用を考慮して、流出メカニズムの大きく異なる日単位以上の流量を比較的長期に渡って取り扱う高水用のモデルと、時間単位以下の流量を洪水時に限定して取り扱う低水用のモデルに区分した。次に、使用目的として法定計画用と支援解析用に大別した。法定計画用は、河川計画等の法定計画策定に用いられるモデルで従前の解析

結果との整合性が重要視され適用手法が一般的に普及・統一されていることが必要である。支援解析用は、詳細なメカニズム等の現象解明用途、現象の因果関係の解明・説明用途として用いられ実現象に対する説明性が高いことが特徴である。さらにパラメータ一次推定用の過去の流量データの必要性の有無によっても分類を行った。これはモデルの精度を評価する際にも利用者がモデルを選定する際にも重要な情報で¹⁴⁾、過去

表1 用途に着目した水循環モデルの分類

スケール	対象とする現象	計画用															
		流量再現(日本国内の法定計画)用		支援解析用(水循環マスタープラン等)													
		流量データ必要	流量データ不必要	流量データ必要						流量データ不必要							
				メカニズムの解明			土地利用・被覆変化			水マネジメント			土地利用・被覆変化			水マネジメント	
		森林	都市	その他	貯水池運用	水需要予測(節水)	メカニズムの解明	森林	都市	その他	貯水池運用	水需要予測(節水)					
大陸	通常、高水・低水の区別無し	タンクモデル等	なし	[TOPMO] [物理モデル]	なし	なし	なし	なし	なし	なし	GHM, RSHM, ISBA-MODCOU, CCSR/NIES AGCM	なし	なし	なし	なし	なし	
	河道	不等流等	なし	[人工衛星利用]							CCSR/NIES AGCM, ISBA-MODCOU						
大河川流域 (1000km ² ~、流域内にダムあり)	高水用	貯留関数法等	なし	[物理モデル]	CEQUEAU, ARNO, WISTOO			HEC-1	HEC-1		DWSM, GBHM					HEC-5	
	低水用	タンクモデル等	なし	[土研改良分布モデル]	David, N.LASOAM, CEQUEAU, ARNO, WISTOO			Mike basin	Mike basin	Mike basin	GBHM					WEAP, TAMUWRAP, Mike basin, CALIDAD, HEC-PRM, MODSIM	IWR-MAIN WEAP, HEC-PRM
	河道	貯留関数法等	貯留関数法		David, N.LASOAM, CEQUEAU, ARNO, WISTOO			HEC-1, Mike basin	HEC-1, Mike basin	Mike basin	DWSM, GBHM						HEC-5
中河川流域 (200km ² ~1000km ²)	高水用	貯留関数法等	なし	[物理モデル]	中山, 早川, David H, Jan H, Achela D, Ben Chia Yen, Nicasio S, A, Allen, Stefano O, TOPKAPL IHFS, ACTMO, 星モデル Y, ARO/EGMO, CEQUEAU, WATFLOOD, ARNO, WISTOO, CLS, WASMOD	HBV, NWSRF, PRMS, SSARR, UBC, Hydro-BEAM	SWMM, MOUSE, NAM, Hydro-BEAM	HEC-1, RORB, [土研改良PRMSモデル], SLURP, HSPF, XINANJIANG, MIKE11, TOPMODEL, [土研改良PRMSモデル], [土研モデル1]	HEC-1, SSARR, UBC		戸田, CASO2D, DWSM, SIRG, WBNM2000, Stephen J, HMS, DHSVM, SHETRAN, GBHM, HYDROTEL	IHDM, WEP, SHER, [中矢大モデル]	PDE, WEP, SHER	[京都大学モデル], KINEROS, THALES, MIKE SHE, SHE/SHSED, [PLUMPモデル], ANSWERS-2000			HEC-5, RSS
	低水用	タンクモデル等	なし	[土研改良分布モデル]	阿部, 秀島, David N, SVAT, LASOAM, HYDROLOGY, SIMHYD, TPMWBM, SWAT, 陸, Huaxia Y, ARO/EGMO, CEQUEAU, WATFLOOD, ARNO, WISTOO, CLS, WASMOD	HBV, NWSRF, PRMS, SSARR, UBC, Hydro-BEAM	[安藤・虫明・高橋モデル], SWRRB, Mike basin, [断バケツモデル], SLURP, HSPF, XINANJIANG, MIKE11, TOPMODEL, [土研改良PRMSモデル], [土研モデル1]	Mike basin, SSARR, UBC	Mike basin	Stephen J, HMS, DHSVM, SHETRAN, GBHM, HYDROTEL	IHDM, WEP, SHER	PDE, WEP, SHER	MIKE SHE, SHE/SHSED, ANSWERS-2000	WEAP, TAMUWRAP, ARSP, CALIDAD, HEC-PRM, MODSIM, RSS		IWR-MAIN, WEAP, CALIDAD, HEC-PRM	
	河道	貯留関数法等	貯留関数法		中山, 早川, Nicasio S, A, Allen, Stefano O, TOPKAPL IHFS, ACTMO, SVAT, LASOAM, HYDROLOGY, SIMHYD, 陸, Huaxia Y, ARO/EGMO, CEQUEAU, WATFLOOD, ARNO, WISTOO, WASMOD	NWSRF, PRMS, SSARR, UBC, Hydro-BEAM	SWMM, MOUSE, NAM, Hydro-BEAM	HEC-1, RORB, [土研改良PRMSモデル], SWRRB, Mike basin, SLURP, HSPF, XINANJIANG, MIKE11, TOPMODEL, [土研改良PRMSモデル], [土研モデル1]	HEC-1, Mike basin, SSARR, UBC	Mike basin	戸田, CASO2D, DWSM, SIRG, WBNM2000, HMS, DHSVM, SHETRAN, GBHM, HYDROTEL	IHDM, WEP, SHER, [中矢大モデル]	PDE, WEP, SHER	[京都大学モデル], KINEROS, THALES, MIKE SHE, SHE/SHSED, [PLUMPモデル], ANSWERS-2000			HEC-5, ARSP, RSS
小河川流域 (~200km ²)	高水用	貯留関数法等	合理式	[物理モデル] [WEPモデル]	中山, 早川, 今山, David H, Jan H, Achela D, Ben Chia Yen, Nicasio S, A, Allen, Stefano O, TOPKAPL IHFS, ACTMO, 星モデル Y, ARO/EGMO, CEQUEAU, WATFLOOD, ARNO, WISTOO, CLS, WASMOD	NWSRF, PRMS, SSARR, UBC, Hydro-BEAM	SWMM, MOUSE, NAM, Hydro-BEAM	HEC-1, RORB, [土研改良PRMSモデル], AGNPS, SLURP, HSPF, XINANJIANG, MIKE11, TOPMODEL, 土研改良PRMSモデル, 土研モデル1, CREAMS	HEC-1, Mike basin, SSARR, UBC		戸田, Allen H, CASO2D, DWSM, SIRG, WBNM2000, 長谷部, Rao S, DHSVM, SHETRAN, GBHM, HYDROTEL	IHDM, WEP, SHER, [中矢大モデル]	PDE, WEP, SHER	[京都大学モデル], KINEROS, THALES, MIKE SHE, SHE/SHSED, [PLUMPモデル], ANSWERS-2000			HEC-5, RSS
	低水用	タンクモデル等	比流量	[土研改良分布モデル] [WEPモデル]	阿部, 秀島, David N, SVAT, LASOAM, HYDROLOGY, SIMHYD, TPMWBM, SWAT, 陸, Huaxia Y, ARO/EGMO, CEQUEAU, WATFLOOD, ARNO, WISTOO, CLS, WASMOD	NWSRF, PRMS, SSARR, UBC, Hydro-BEAM	SWMM, MOUSE, NAM, Hydro-BEAM	[安藤・虫明・高橋モデル], SWRRB, Mike basin, EPIO, SPUR-91, [断バケツモデル], SLURP, HSPF, XINANJIANG, MIKE11, TOPMODEL, [土研改良PRMSモデル], [土研モデル1], CREAMS	Mike basin, SSARR, UBC	Mike basin	Stephen J, DHSVM, SHETRAN, GBHM, HYDROTEL	IHDM, WEP, SHER	PDE, WEP, SHER	MIKE SHE, SHE/SHSED, [PLUMPモデル], ANSWERS-2000	WEAP, TAMUWRAP, ARSP, CALIDAD, HEC-PRM, MODSIM, RSS		IWR-MAIN, WEAP, CALIDAD, HEC-PRM
	河道	無視	合理式洪水到達時間で考慮		中山, 早川, Nicasio S, A, Allen, Stefano O, TOPKAPL IHFS, ACTMO, SVAT, LASOAM, HYDROLOGY, SIMHYD, 陸, Huaxia Y, ARO/EGMO, CEQUEAU, WATFLOOD, ARNO, WISTOO, CLS, WASMOD	NWSRF, PRMS, SSARR, UBC, Hydro-BEAM	SWMM, MOUSE, NAM, Hydro-BEAM	HEC-1, RORB, [土研改良PRMSモデル], AGNPS, SWRRB, Mike basin, SPUR-91, SLURP, HSPF, XINANJIANG, MIKE11, TOPMODEL, 土研改良PRMSモデル, 土研モデル1, CREAMS	HEC-1, Mike basin, SSARR, UBC	Mike basin	戸田, CASO2D, DWSM, SIRG, WBNM2000, 長谷部, Rao S, DHSVM, SHETRAN, GBHM, HYDROTEL	IHDM, WEP, SHER, [中矢大モデル]	PDE, WEP, SHER	[京都大学モデル], KINEROS, THALES, MIKE SHE, SHE/SHSED, [PLUMPモデル], ANSWERS-2000			HEC-5, ARSP, RSS
都市小流域 (下水道等の人工系の影響が大)	高水用	貯留関数法(パラメータを土地利用別等係数より推定)	合理式			NWSRF, PRMS, SSARR, UBC, Hydro-BEAM	SWMM, MOUSE, NAM, Hydro-BEAM	RORB, AGNPS, MIKE11, [土研改良PRMSモデル]				IHDM, WEP, SHER	PDE, WEP, SHER	KINEROS, MIKE SHE, SHE/SHSED, [PLUMPモデル]			
	低水用	タンクモデル	比流量			NWSRF, PRMS, SSARR, UBC, Hydro-BEAM	SWMM, MOUSE, NAM, Hydro-BEAM	[安藤・虫明・高橋モデル], MIKE11, [土研改良PRMSモデル]				IHDM, WEP, SHER	PDE, WEP, SHER	MIKE SHE, SHE/SHSED, [PLUMPモデル]			
	河道	無視	合理式洪水到達時間で考慮			NWSRF, PRMS, SSARR, UBC, Hydro-BEAM	SWMM, MOUSE, NAM, Hydro-BEAM	MIKE11, [土研改良PRMSモデル]				IHDM, WEP, SHER	PDE, WEP, SHER	KINEROS, MIKE SHE, SHE/SHSED, [PLUMPモデル]			

*[] = モデル入手ルート要調査

の流量データが不要なモデルの条件としてはモデルパラメータに物理的な意味があること、流域と河道の情報からモデルパラメータの一次推定を設定可能なことの2点を設定した。さらに、土地利用や水管理の取り扱い、メカニズム研究用途での分類も行うこととし表1に示す分類方法を提案した。分類された結果からわかるように、国内外で開発されているモデルの多くは支援解析用のメカニズム解明用に分類され、法定計画に分類されるモデルは極端に少ない。また、過去の流量データがなくてもパラメータの設定ができるモデルも少ないことがわかった。

3. 検証用水文データベースの設計・構築

各種モデルの性能、適応性を容易に比較検証することを可能とする水文データベースの設計を行った。本研究を遂行するに当たって必要となる水文データを登録した。流域の水位や流量といった水文データの他にも流域界や土地利用分布といったGISデータも登録している。これらのデータをただの水文データの羅列にとどめるのではなく、ナレッジベースとするべく水文データベースの設計も行った。

水文データの収集にあたり、最初のケーススタディ領域として多摩ニュータウンの多摩川水系大栗川流域を選定しデータ収集を行い、水文データベースを構築した。その後、山地流域の水文データを収集・整理し水文データベースに登録した。収集対象流域は、国土交通省の水文水質データベースを用いて検索した全国の「ダム・堰」で、その中からダム年鑑水系図で他のダムを集水域に含まず流域面積が記載されている45のダム流域を選定した。選定された45のダム流域を対象に、1990年以降の時間毎の流域平均雨量(mm/h)とダム流入流量(m³/s)を収集した。また、地形図から河床勾配と流路長を、数値地図標高から落水線、流域界、流域面積を、1/10細分区土地利用からメッシュ毎の土地利用を判読した。

本データベースは研究者・実務者が個々に持っている情報やノウハウなどを、成文化しているものもそうでないものも集約し、研究・実務に対してスムーズに活用できる使い勝手のよいナレッジベースとするべく設計した。そのために表2に示す機能を搭載した。

表2 水文データベースを内在するナレッジベースに搭載した機能

機能名	機能概要	
検索機能	全文検索 (テキストマイニング)	全項目、キーワード、ファイル、PDF、紙(OCR)などすべての文字情報からの全文検索
	キーワード検索	キーワード(流出解析、...)による検索
	項目検索	タイトル、資料種別、部門(河川、ダム、水質調査、...)
	位置情報検索	緯度・経度、地域名、所在地、河川名、ダム名等
	時間検索	年月日やイベント名等
閲覧機能	検索結果リスト閲覧	検索結果をリスト形式で閲覧、検索ヒット数も表示
	項目閲覧	タイトル、資料種別、部門(河川、ダム、水質調査、...)
	資料内容閲覧	どのようなデータ形式でも閲覧可能
	写真台帳閲覧	写真台帳として写真サムネールを表示、項目(部門、資料種別)や位置(河川、地域)、時期(期間、洪水、台風)で検索
GIS操作	GIS基本操作	拡大・縮小、レイヤ選択、緯度・経度表示
	GIS拡張仕様	河川名、ダム名による移動
登録機能	資料登録	項目・キーワード登録
	OCR登録	紙ベース資料をOCRスキャナによりOCR登録
	ファイル登録	どのようなデータ形式でも登録可能
	位置情報登録	緯度・経度、地域名、所在地、河川名、ダム名等
	時間登録	年月日やイベント名等
	ユーザセキュリティ登録	データ公開レベルを設定可能とする
メンテナンス機能	ユーザメンテナンス	ユーザ情報のメンテナンス
	位置情報メンテナンス	河川↔緯度・経度対比情報

4. モデル評価指標の提案

4.1 モデル評価指標の必要性

一般にモデルを用いて流出現象をシミュレーションするにはモデルのパラメータを既往の流出イベントに照らして調整を行う。過去の流出イベントの再現という意味ではどのモデルもパラメータ調整を行えば良好に流出現象を再現できることが知られていて、モデル間の優劣をつけることは難しい。その一方でモデルは未知の流出イベントに対する精度を要求される。ここでは、既往の流出イベントで調整したパラメータが未知の流出イベントをどれだけ精度良く推定できるかが重要であるため、モデル間で客観的にパラメータの安定性を評価できる指標が必要となる。

図1は貯留関数法、準線形貯留型モデル、合理式合成法、等価粗度法およびGIS活用合理式で1997年7月25日の蓮ダム流域(流域面積:81km²)および1999年8月26日の竜門ダム流域(流域面積:27km²)での洪水イベントについて誤差関数を最小にするパラメータの組み合わせを求めて計算を行ったものである。どのモデルに関してもパラメータ調整を行えば洪水イベントを良好に再現できることが分かる。水文データベースに登録してあるその他の流域(大石ダム、鳥地川、厳木、邪馬溪ダム)で複数の洪水イベントについて計算を行った結果についても一次推定では誤差関数0.03を下回ることはできなくてもパラメータ調整を行えばどのモデルでも多くの洪水イベントで誤差関数0.03を下回る精度で洪水を再現できることが確かめられている。(表3)このように、現況で業務に用いられているモデルは既往の洪水に関して再現にあたってはモデル間で優劣は見受けられない。

表3 収集したダムデータ

No	水系名	河川名	観測所名	管轄	流域面積 km2	データ	期間	流域界	河道網
1	天塩川	天塩川	岩尾内ダム	北海道開発局	331	雨量 流量	1990 - 2002 1990 - 2002	○	
2	石狩川	石狩川	大雪ダム	北海道開発局	292	雨量 流量	1990 - 2002 1990 - 2002	○	
3	石狩川	小樽内川	定山溪ダム	北海道開発局	104	雨量 流量	1990 - 2002 1990 - 2002	○	
4	石狩川	豊平川	豊平峡ダム	北海道開発局	159	雨量 流量	1990 - 2002 1990 - 2002	○	
5	石狩川	漁川	漁川ダム	北海道開発局	113	雨量 流量	1990 - 2002 1990 - 2002	○	
6	後志利別川	後志利別川	美利河ダム	北海道開発局	115	雨量 流量	1991 - 2002 1991 - 2001	○	
7	菅呂川	菅呂川	鹿ノ子ダム	北海道開発局	124	雨量 流量	1990 - 2001 1990 - 2001	○	
8	阿武隈川	大滝根川	三春ダム	東北地方整備局	226	雨量 流量	1990 - 2002 1990 - 2002	○	
9	阿武隈川	白石川	七ヶ宿ダム	東北地方整備局	237	雨量 流量	1990 - 2002 1990 - 2002	○	
10	名取川	碓石川	釜房ダム	東北地方整備局	195	雨量 流量	1990 - 2002 1990 - 2002	○	
11	北上川	和賀川	湯田ダム	東北地方整備局	583	雨量 流量	1990 - 2002 1990 - 2002	○	
12	北上川	胆沢川	石瀬ダム	東北地方整備局	154	雨量 流量	1990 - 2002 1990 - 2002	○	
13	雄物川	玉川	玉川ダム	東北地方整備局	287	雨量 流量	1990 - 2002 1990 - 2002	○	
14	最上川	寒河江川	寒河江ダム	東北地方整備局	231	雨量 流量	1990 - 2002 1990 - 2002	○	
15	最上川	置賜白川	白川ダム	東北地方整備局	205	雨量 流量	1990 - 2002 1990 - 2002	○	
16	利根川	利根川	矢木沢ダム	水資源機構	167	雨量 流量	欠測 - 欠測 欠測 - 欠測	○	
17	利根川	楢俣川	奈良俣ダム	水資源機構	60	雨量 流量	欠測 - 欠測 欠測 - 欠測	○	
18	利根川	赤谷川	相俣ダム	関東地方整備局	111	雨量 流量	1990 - 2002 1990 - 2002	○	
19	利根川	鬼怒川	川俣ダム	関東地方整備局	179	雨量 流量	1990 - 2002 1990 - 2002	○	
20	利根川	吾妻川	品木ダム	群馬県	35	雨量 流量	1990 - 1999 1990 - 1999	○	
21	荒川	浦山川	浦山ダム	水資源機構	52	雨量 流量	欠測 - 欠測 欠測 - 欠測	○	
22	荒川	荒川	二瀬ダム	関東地方整備局	260	雨量 流量	1990 - 2002 1990 - 2002	○	
23	相模川	中津川	宮ヶ瀬ダム	関東地方整備局	101	雨量 流量	確認中 - 1999 - 2002	○	○
24	荒川(北陸)	大石川	大石ダム	北陸地方整備局	70	雨量 流量	1990 - 2002 1990 - 2002	○	
25	信濃川	三国川	三国川ダム	北陸地方整備局	76	雨量 流量	1992 - 2002 1992 - 2002	○	○
26	手取川	手取川	手取川ダム	国土交通省(電源開発)	247	雨量 流量	1990 - 2002 1990 - 2002	○	
27	天竜川	大入川	新豊根ダム	電源開発	136	雨量 流量	1990 - 2001 1991 - 2001	○	
28	天竜川	小浜川	小浜ダム	中部地方整備局	288	雨量 流量	1990 - 2002 1990 - 2002		
29	天竜川	木曾川	味噌川ダム	水資源機構	55	雨量 流量	欠測 - 欠測 欠測 - 欠測		
30	木曾川	馬瀬川	岩屋ダム	水公園(中電)	1,035	雨量 流量	欠測 - 欠測 欠測 - 欠測		
31	櫛田川	蓮川	蓮ダム	中部地方整備局	81	雨量 流量	1991 - 2002 1991 - 2002	○	○
32	淀川	一庫大路次川	一庫ダム	水資源機構	115	雨量 流量	欠測 - 欠測 欠測 - 欠測	○	
33	淀川	布目川	布目ダム	水資源機構	75	雨量 流量	欠測 - 欠測 欠測 - 欠測	○	
34	淀川	木津川	比奈知ダム	水資源機構	76	雨量 流量	欠測 - 欠測 欠測 - 欠測	○	
35	九頭竜川	九頭竜川	九頭竜ダム	電源開発	185	雨量 流量	1990 - 2002 欠測 - 欠測	○	
36	江の川	江の川	土師ダム	中国地方整備局	308	雨量 流量	1990 - 2002 1990 - 2002	○	
37	佐波川	島地川	島地川ダム	中国地方整備局	32	雨量 流量	1990 - 2002 1990 - 2002	○	○
38	渡川	中筋川	中筋川ダム	四国地方整備局	21	雨量 流量	1998 - 2002 1998 - 2002	○	○
39	吉野川	吉野川	早明浦ダム	水資源機構	472	雨量 流量	欠測 - 欠測 欠測 - 欠測	○	
40	松浦川	巖木川	巖木ダム	九州電力	34	雨量 流量	1990 - 2002 1990 - 2002	○	○
41	筑後川	佐田川	寺内ダム	水資源機構	51	雨量 流量	欠測 - 欠測 欠測 - 欠測	○	
42	筑後川	小石原川	江川ダム	水資源機構	30	雨量 流量	欠測 - 欠測 欠測 - 欠測		
43	筑後川	津江川	下釜ダム	九州地方整備局	185	雨量 流量	欠測 - 欠測 欠測 - 欠測	○	
44	菊池川	追間川	竜門ダム	九州地方整備局	27	雨量 流量	1997 - 2002 1997 - 2002		
45	山国川	山移川	耶馬溪ダム	九州地方整備局	89	雨量 流量	1990 - 2002 1990 - 2002	○	○

表4 大栗川流域で収集した水文データ

観測所		期間		
雨量観測所	霞ヶ関橋	1972	-	1983
	大栗川橋	1972	-	1983
	車橋	1969	-	1979
	南大沢	1975	-	1983
	別所	1970	-	1983
	青木葉	1971	-	1983
	諏訪	1980	-	1983
	瓜生	1970	-	1975
	永山	1970	-	1983
	南多摩斎場	1978	-	1983
	長池	1979	-	1983
	水位流量観測所	報恩橋	1971	-
霞ヶ関橋		1972	-	1983
常盤橋		1972	-	1983
大栗川橋		1972	-	1983
車橋		1969	-	1983
南大沢		1969	-	1983
永山		1970	-	1983
別所		1970	-	1983
諏訪		1980	-	1983
長池		1979	-	1983

表5 鶴見川流域で収集したデータ

項目	内容
流域地形	数値地図標高50mメッシュにより流域内の地形メッシュを作成した。
土地利用	1/10細分区土地利用(約100mメッシュ)により流域内の土地利用メッシュ図を作成した。
流域界	既往資料に基づいて、流域界および流域分割図を作成した。
河道位置	同上
降水量	既往の観測資料を整理した。(鶴川、寺家、野川、荏田、川崎、綱島、本町、長津、都田、鶴見)
流量	同上(亀甲橋)
期間	1976-1996

表6 多摩川流域で収集したデータ

項目	内容
流域地形	数値地図標高50mメッシュにより流域内の地形メッシュを作成した。
土地利用	1/10細分区土地利用(約100mメッシュ)及び細密数値情報土地利用(10mメッシュ)を合成して流域内の土地利用メッシュ図を作成した。
流域界	既往資料に基づいて、流域界および流域分割図を作成した。
河道位置	同上
降水量	既往の観測資料を整理した。
流量	同上(小河内ダム、調布橋、日野橋、高幡橋、石原橋)
期間	イベント毎(昭和49年9月1日洪水、昭和57年8月2日洪水、昭和57年9月12日洪水、昭和58年8月17日洪水、昭和60年7月1日洪水、昭和61年9月3日洪水、平成3年8月21日洪水、平成3年9月19日)

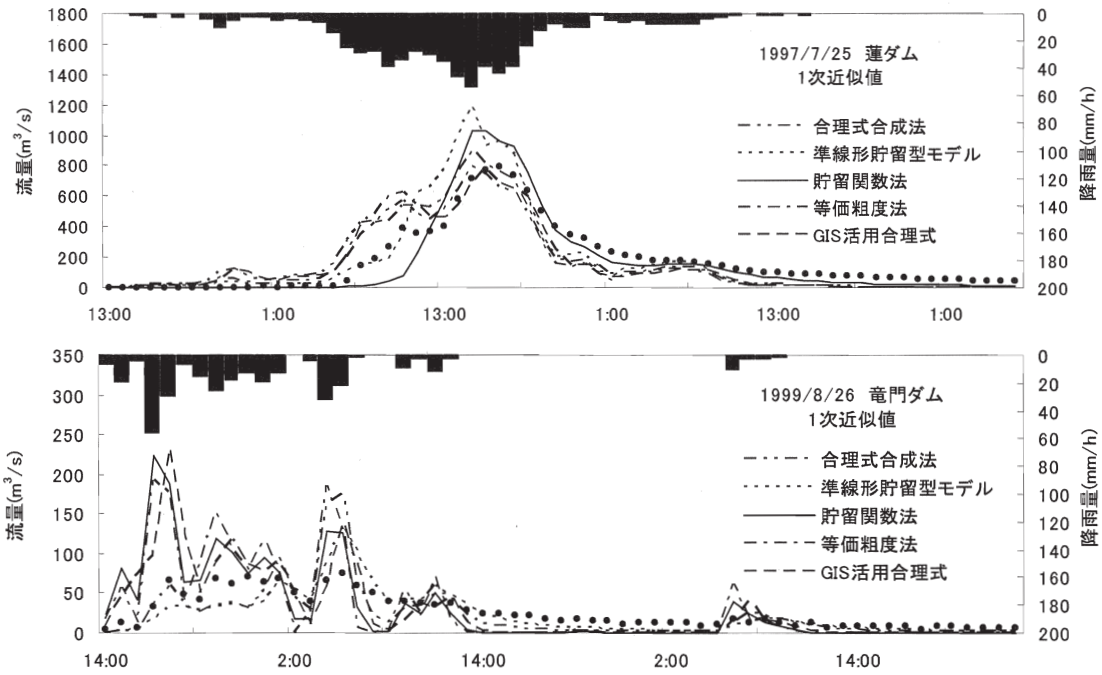


図1 一次近似値による洪水流出計算結果

表7 再現計算結果の誤差(誤差関数)と流域諸元

ダム流域名 洪水No	ピーク雨量	総雨量	合理式合成法		準線形		貯留関数		等価粗度		流域面積 (km ²)	土地利用				平均傾斜	河道延長 (m)
			誤差関数	1次近似値による誤差関数	誤差関数	1次近似値による誤差関数	誤差関数	1次近似値による誤差関数	誤差関数	1次近似値による誤差関数		田	畑・荒地	森林	市街地		
大石1	31	213	0.008	0.014	0.007	0.036	0.012	0.030	0.006	0.017	70	0%	5%	94%	1%	1/12.2	19369
大石2	30	170	0.012	0.166	0.009	0.127	0.013	0.027	0.007	0.029							
大石3	29	147	0.014	0.122	0.006	0.230	0.009	0.011	0.005	0.016							
大石4	26	237	0.016	0.108	0.005	0.129	0.005	0.023	0.004	0.027							
大石5	25	159	0.017	0.085	0.008	0.145	0.016	0.050	0.006	0.055							
蓮1	54	646	0.007	0.021	0.003	0.021	0.002	0.014	0.001	0.025	81	0%	2%	96%	2%	1/14	14657
蓮2	28	951	0.017	0.040	0.008	0.034	0.003	0.047	0.003	0.030							
蓮3	45	359	0.014	0.048	0.004	0.048	0.003	0.057	0.001	0.023							
蓮4	42	489	0.017	0.050	0.005	0.052	0.004	0.054	0.003	0.029							
島地川1	30	387	0.015	0.094	0.005	0.125	0.002	0.023	0.002	0.072	32	3%	2%	92%	4%	1/29.6	17437
島地川2	28	220	0.022	0.118	0.018	0.137	0.008	0.045	0.002	0.043							
島地川3	22	251	0.032	0.116	0.004	0.091	0.002	0.046	0.002	0.045							
島地川4	25	180	0.015	0.246	0.002	0.205	0.004	0.055	0.001	0.046							
島地川5	27	189	0.026	0.208	0.005	0.230	0.002	0.037	0.004	0.032							
巖木1	56	286	0.023	1.496	0.067	1.679	0.044	0.233	0.044	0.600	34	9%	3%	87%	2%	1/23.7	12919
巖木2	31	269	0.009	0.327	0.010	0.456	0.008	0.301	0.006	0.131							
巖木3	48	440	0.006	0.026	0.004	0.035	0.005	0.045	0.005	0.036							
巖木4	38	198	0.017	0.167	0.021	0.204	0.040	0.020	0.024	0.027							
巖木5	52	385	0.004	0.041	0.005	0.070	0.004	0.076	0.004	0.037							
竜門1	63	136	0.018	0.432	0.011	0.238	0.016	0.028	0.012	0.019	27	3%	6%	89%	1%	1/10.2	8965
竜門2	62	149	0.008	0.255	0.005	0.351	0.017	0.008	0.006	0.016							
竜門3	55	325	0.020	0.242	0.006	0.265	0.007	0.084	0.004	0.039							
竜門4	49	98	0.013	5.371	0.006	2.447	0.058	0.059	0.036	0.060							
竜門5	44	233	0.014	0.151	0.004	0.226	0.004	0.024	0.003	0.025							
耶馬溪1	24	252	0.009	0.073	0.003	0.034	0.002	0.085	0.002	0.030	89	3%	5%	91%	1%	1/38.2	24651
耶馬溪2	47	279	0.005	0.007	0.002	0.005	0.002	0.013	0.002	0.013							
耶馬溪3	21	344	0.015	0.062	0.007	0.036	0.006	0.050	0.006	0.039							
耶馬溪4	35	274	0.003	0.008	0.001	0.007	0.001	0.007	0.001	0.009							
耶馬溪5	33	438	0.006	0.020	0.003	0.023	0.003	0.013	0.003	0.010							

既往の洪水を再現するというに加えて、計画規模洪水のシミュレーションに代表されるような未知の極値的な大洪水をモデルでシミュレーションする場面が河川計画や洪水予測を行うにあたっては少なくない。その際は既往の洪水でパラメータを調整し、それに対して想定される雨量（たとえば計画雨量）を与えて流出量を予測するという手法をとるのが一般的である。未知の洪水イベントを精度よく予測するためには既往

の洪水で調整したパラメータがその他の洪水イベントに対しても安定して精度を有していることがモデルに対して要求される。水文統計における降雨確率分布モデルの評価については、実績雨量のプロットに対する適合度に加えて、雨量データ母集団に対する安定性も重要な評価の視点であるとして Jackknife 法や Boot Strap 法によるモデルの安定性に関する客観的な評価手法の適用プロセスが整理され、標準化されている。

しかし流出解析にはパラメータの安定性を評価するための方法が標準化されていない。

ここではパラメータの安定性をモデルの評価指標として表 1 で整理した国内外のモデルについて、任意のモデル間で比較を客観的・定量的に行うことができる指標の提案を行う。具体的には Jackknife 法とモンテカルロ法を流出解析に適用した評価指標について検討した結果を述べる。

4. 2 モデル評価指標検討にあたっての諸条件

評価指標の提案に当たって利用するモデルは、日本国内の多くの河川において適用実績を持つ貯留関数法、準線形貯留型モデル、等価粗度法および合理式合成法とした。

また、試験流域としては水文データベースでデータが管理されている釜房ダム（流域面積：196km²）を試験流域とすることとした。その理由として以下の点が挙げられる。

1. 1990 年から 2002 年までの時間雨量、流量データが整備されている。
2. 雨量、流量観測の精度が良好と思われる。
3. 流域面積が約 196km²であり、流出計算において単一流域として取り扱うことが可能である。

対象洪水イベントは、洪水到達時間内（クラーヘン式によれば 2 時間）雨量上位の 10 洪水イベントとした。抽出したイベントを表 8 に示す。

表 8 抽出した洪水イベント

順位	一雨内の洪水到達時間内雨量のピーク時刻 (Tc = 2.0hr)	洪水到達時間内雨量 [mm/2hr.]	降雨継続時間 [hr]	一雨の総雨量 [mm]	ピーク流量 [m ³ /s]
1	1999/8/13 23:00	87.5	57	422.1	785.9
2	2002/7/11 6:00	50.6	48	225.8	804.8
3	1994/9/30 8:00	50.0	34	221.0	712.3
4	1999/10/28 1:00	49.2	28	163.4	324.1
5	1990/11/4 19:00	43.0	18	95.0	272.0
6	1994/9/22 20:00	42.0	18	135.0	191.0
7	1998/7/23 7:00	39.7	15	99.0	218.1
8	1990/12/1 0:00	37.0	19	112.0	462.9
9	1998/9/16 8:00	36.5	16	110.8	402.4
10	2002/10/2 0:00	35.6	30	108.8	368.5

4. 3 Jackknife 法を用いたモデル安定性の評価

① Jackknife 法を用いた評価指標の概要

複数の洪水に対する流出モデルの安定性の評価方法の一つとして複数の洪水イベントに対する誤差指標値（誤差の平方和）の平均値を最小とするパラメータを総当り法で求め、最適化されたパラメータによる流出モデルを用いて Jackknife 検定を実施し、Jackknife 誤差指標を求める手法を検討した。手順を以下に示す。

1. N 個の複数洪水に対する最適パラメータを算出する。ここでは、各洪水に対する誤差指標値である

$$E = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \left(\frac{Q_o(t) - Q_c(t)}{Q_{Op}} \right)^2$$

の N 個の平均値を最小とするパラメータを最適なものとして求める。ここに $Q_o(t)$: 時刻 t の流量観測値、 $Q_c(t)$: 同時刻の流量計算値、 Q_{Op} : 観測ピーク流量である。

2. N 個の洪水に対する平均誤差指標値を次式から求める。

$$\bar{E}_N = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N E_i$$

3. 複数のパラメータセットについて \bar{E}_N を計算し、これが最小となる時のパラメータセットを最適なパラメータセットとする。この時の \bar{E}_N を $\bar{E}_{N \min}$ と定義する。

4. 1. から 3. の操作を、 N 個の複数洪水ではなく N 個から j 番目の洪水データを取り除いた $N-1$ 個の洪水データセットについて行ない、最小誤差指標値を算出する。この値を $\bar{E}_{N-1 \min(j)}$ とする。

5. 4. の操作を取り除く洪水データを変えながら N 回繰り返す、それぞれの $\bar{E}_{N-1 \min(j)}$ を算出する。

6. N 個の $\bar{E}_{N-1 \min(j)}$ の平均値を算出する。

$$\bar{E}_{N-1 \min(\bullet)} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \bar{E}_{N-1 \min(j)}$$

7. Jackknife 推定誤差を求める。

Jackknife 推定誤差

= N 個の洪水の最小平均誤差指標のバイアス

$$= (N-1) (\bar{E}_{N-1 \min(\bullet)} - \bar{E}_{N \min})$$

② 釜房ダム流域への適用

① の手順に従い、表 9 に挙げた 10 個の洪水イベントについて 4 つのモデルで計算を行い $\bar{E}_{N \min}$ を求め、その後 Jackknife 指標誤差を算定した。結果を表 9 に示す。

表 9 各モデルの $\bar{E}_{N \min}$ および Jackknife 推定誤差の値

	$\bar{E}_{N \min}$	Jackknife 推定誤差
合理式合成法	0.092	2.34E-04
準線形貯留型モデル	0.043	1.20E-04
貯留関数法	0.033	1.58E-04
等価粗度法	0.051	3.91E-04

今回の検証ケースでは準線形貯留型モデル、貯留関数法、合理式合成法、等価粗度法の順となった。

今回釜房ダム流域で行った検証結果が全ての流域で普遍的に言えるとは限らない。また今回の検証では誤差指標を流出総量の RMSE 誤差を基にして行なっているため、例えば洪水立ち上がり部に着目した誤差指標を設定した場合に結果が異なることが想定される。しかしここで提案した手法は、流域毎にどのモデルのパラメータ安定度が高いかについてモデル間で客観的に評価を行うことができるものとして有効と期待される。

4. 4 モンテカルロ法を用いたモデル安定性の評価

① モンテカルロ法を用いた評価指標の概要

モンテカルロ法を用いたモデル評価は Beven¹⁴⁾、Binley¹⁵⁾、および佐山¹⁶⁾によって行われている。その概要を以下に述べる。

モデルが持っている複数のパラメータの各々についてある値の範囲内で乱数を発生させて、得られたパラメータセット全てについて流出計算を行う。ここで得られたハイドログラフはある範囲の幅をもっていることが予想され、この幅が大きいほどパラメータの安定性が低い、幅が小さいほどパラメータの安定性が高いという評価を行うものである。

上記の既存研究成果では、モデルそれ自体の評価を行ったものであり、複数のモデルを横断的に評価したものではない。今回の我々の研究では、複数のモデルを横断的に評価することを目的としているため、モデル間で共通の誤差指標を導入することとした。具体的には、以下の手順で行った。

1. あるモデルの各パラメータの値の範囲を既存の資料から決定する。
2. その範囲内で各パラメータについてモンテカルロ法により乱数を発生させ 10,000 個のパラメータセットを作成する。
3. 全てのパラメータセットについてある流出イベントの流出計算を実施し、表 10 に示す各誤差指標を満足するパラメータセットを抽出する。今回の検討では 4 つの誤差指標を想定した。
4. 3. で抽出されたパラメータセットを同じ流域の別の流出イベントに対して適用し、流出計算を行う。ここで、適用した全てのパラメータセットのうち、どれだけの割合のパラメータセットが表 10 の指標を満足したかを計算する。この割合をモデルの

パラメータの安定性の評価指標とした。

5. 1. から 4. の作業を他のモデルについても行い、モデル間の比較を行う。

表 10 設定した誤差指標

No.	対象	評価範囲	基準
1	総量	ピークを含む範囲	RMSE ≤ 0.03
2	立ち上がり部	ピークより前の範囲	RMSE ≤ 0.03
3	低減部	ピークより後の範囲	RMSE ≤ 0.03
4	ピーク値	ピーク時	相対誤差 ≤ 0.1 ピーク発生時刻の差違は無視する。

② パラメータ値の範囲設定

パラメータの値の範囲としては実務での利用という観点から全国の工事実施基本計画を調査して各モデル各パラメータの最大値と最小値を採用した。値を表 11 に示す。

表 11 設定したパラメータの範囲

パラメータ	範囲	対象モデル
f1	0.1~0.9	貯留関数、準線形、等価粗度
fsa	0.6~1.5	貯留関数、準線形、等価粗度、合理式合成法
Rsa	10~総雨量 (mm)	貯留関数、準線形、等価粗度
K	0~100	貯留関数
p	0.1~1	〃
Tl	0.1~3(hr)	〃
C	50~1000	準線形
N	0.1~3.0	等価粗度
Tc	0~10.0hr	合理式合成法

③ 釜房ダム流域への適用

①で述べた方法を釜房ダム流域に適用した。今回の検証では既往の洪水で調整したパラメータが例えば計画規模の洪水に代表される未知の洪水に対してどれだけ安定して精度を有するかを評価することが目的である。そこで、最初に表 8 のなかで中規模の洪水である洪水 5 を 10,000 個のパラメータセットについて計算

する。表 10 の誤差指標を満足したパラメータセットを表 8 の中の大規模洪水に該当する洪水 1 に対して適用し、安定性を計算した。これを貯留関数法、準線形貯留型モデル、等価粗度法および合理式合成法について行い、各モデル間の安定性を比較した。結果を図 2 に示す。

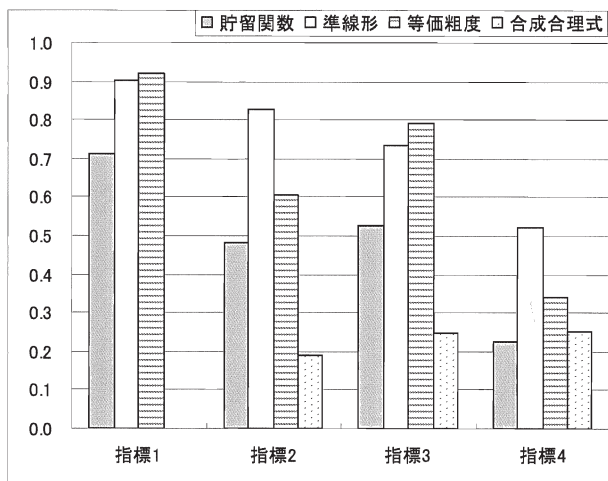


図 2 各モデルのパラメータ安定性

今回の検証ケースの結果を以下にまとめる。

1. 指標 1 に関しては、準線形貯留型モデルと等価粗度法が高い安定性を示している。
2. 指標 2 に関しては、準線形貯留型モデルが高い安定性を示している。
3. 指標 3 に関しては、等価粗度法が一番高い安定性を示し、二番目に準線形貯留型モデルが高い安定性を示した。
4. 指標 4 に関しては、全体的に安定性が低く、最も安定性が高い準線形貯留型モデルでも 0.5 を少し超える程度である。

全体として準線形貯留型モデルが全ての指標について他のモデルよりも高い安定性を示している。貯留関数法は高い安定性を示しているとは言えず、合理式も全体的に安定性が低い。

このようにして、どのような目的でモデルの比較を行うのかを明らかにすれば、それに準じた誤差指標を設定することで各モデル間の比較が行うことができる。

4. 5 Jackknife 法およびモンテカルロ法を用いた評価指標について

Jackknife 法を用いた評価指標は、総当り法という客観的を導入しているもののパラメータ調整は行わなければならない。総当り法で求めたパラメータが必ず

しも最適なパラメータであるとは限らず、別の流出イベントに適用した際に極めて大きな誤差が生じる可能性もある。

それに対してモンテカルロ法を用いた評価指標では、最適なパラメータを求めることなくモデル間の比較を行うことができるため恣意性が全く含まれないことが特徴である。その一方で、計算にかかる時間・手間が膨大であるため、多数の流出イベント・多数のモデル間での比較を行う際は Jackknife 法を用いた評価指標と比較して非常に負荷が大きい評価方法であるといえる。

5. 技術資料の作成

2. で述べた国内外の水循環モデルを分類・整理し、4. で提案する Jackknife 法とモンテカルロ法に基づくモデル評価指標の詳細をまとめた技術資料を作成した。本技術資料は、全国各地の河川・ダム計画・管理における最適な水循環モデル選定を行うにあたっての重要な参考資料になりうるものと期待される。

6. まとめ

総合的な水循環モデルを構築するための技術資料を作成することを目的として以下の検討を行った。

1. 国内外の水循環モデルの分類・整理
2. 検証用水文データベースの設計
3. モデル評価指標の提案
4. 技術資料の作成

1. では、実務者がモデルを適用したい流域に対してどのモデルを適用するのがよいか選択の判断をしやすいことを目的として作成したものである。ここでは流域面積規模、長短期流出解析の別を始めとして実務に供するような項目を列挙してそれに基づいて分類を行っている。

2. では、3. で行うモデル評価指標の提案に向けて検証・評価用の多くの水文データを格納できるデータベースを設計・構築した。ここでは水文データだけではなく研究者・実務者が個々に持っている情報やノウハウなどを、成分化しているものもそうでないものも集約し、研究・実務に対してスムーズに活用できる使い勝手のよいナレッジベースとするべく設計・構築した。

3. では、モデル選定にあたって複数の候補に絞られた際にモデルを横断的・定量的に評価できる指標の提示を行った。ここでは、各モデルのパラメータ安定性を評価指標と見立てて Jackknife 法とモンテカルロ法

を利用した評価指標の提示を行った。

4.では上記の 1.と 3.の成果を取りまとめた。

参考文献

- 1) 都市小流域における薄い新党、流出機構の定量的解明研究会：「都市域における水循環系の定量化手法－水循環系の解明－」、2000年12月
- 2) Office of Technology Assessment: “Use of models for water resources Management, Planning, and Policy”, 1982
- 3) Ralph A. Wurbs: “Computer Models for Water Resources Planning and Management”, 1994
- 4) “Benchmarking and Scoping Study of Hydraulic River Models”, University of Bradford R&D Technikal Report W88
- 5) World Bank: “Operational Manual”
- 6) Asian Development Bank: “Operational Manual·Technical Assistance”
- 7) Harry C. Torno: “Computer Application in Water Resources”, 1985
- 8) Ven Te Chow: “Handbook of Applied Hydrology”, 1964
- 9) Danish Hydraulic Institute: “DHI Software”
- 10) FEMA: “Policy for Accepting Numerical Models for Use in the NFIP”
- 11) 都市水文学研究会：「多摩ニュータウン流出試験地調査報告書」、1986年3月
- 12) Vijay P. Singh: “Computer Models of Watershed Hydrology, Water Resources Publications, January 1995
- 13) 吉谷純一：水資源に関する意思決定支援に必要とされる解析及び解析ツールのあり方に関する考察、第6回水資源に関するシンポジウム論文集、81-86、2002
- 14) Keith Beven and Andrew Binley: “The Future of Distributed Models: Model Calibration and Uncertainty Prediction” Hydrological Processes, Vol. 6, 279-298, 1992
- 15) A. M. Binley and K. J. Beven: “Changing Responses in Hydrology: Assessing the Uncertainty in Physically Based Model Predictions”, Water Resources Research, Vol.27, No.6, 1253-1261, June 1991
- 16) 佐山敬洋、立川康人、寶馨：「流出モデルの不確実性評価手法とそのモデル選択への適用」、土木学会論文集 No.789/II-71、1-13、2005