

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 25 日現在

機関番号：13501

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560537

研究課題名（和文） 衛星観測と水文モデルの融合による未計測流域の河川流量推定

研究課題名（英文） Estimating the river discharge in un-gauged basins
by integration of satellite observation and hydrological model

研究代表者

石平 博（ISHIDAIRO HIROSHI）

山梨大学・大学院医学工学総合研究部・准教授

研究者番号：80293439

研究成果の概要（和文）：本研究では、水文モデルと衛星観測を融合させた新たな河川流量推定手法を開発した。これにより、水文観測が行われていない流域・河道地点においても流域水文・水理特性を考慮した河川流量の把握が可能となった。衛星による地球観測情報を利用する本手法は、世界の様々な地域に対して適用可能なものであり、途上国など地上水文観測網が不十分な地域における流域水管理に大きく貢献する可能性を有している。

研究成果の概要（英文）：The new method for estimating river discharge in un-gauged basins is developed by integrating satellite observations and hydrological model. This method allows estimation of river discharge considering local hydrological and hydraulic characteristics in the poorly-gauged/un-gauged river basin. This proposed method has potential to be applied for the river basin management in developing countries and regions where hydrological observation network is not sufficiently installed.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2010 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2011 年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・水工学

キーワード：未計測流域、河川流量推定、衛星観測、DSM

1. 研究開始当初の背景

合理的かつ公正な水管理政策は、最新の科学的事実に基づき策定されるべきものであり、河川流量データは、そのための最も重要な情報の一つである。しかしながら、河川流量の観測密度は十分とは言えず、さらに既設の観測所も維持管理予算の不足により、十分に機能していない場合も少なくない。このような流量観測網の不足と衰退は、特に発展途

上国において顕著であり、当該地域の持続的開発を実現するうえでの大きな障害となっている。

このように地上水文観測が行われていないあるいは観測網が十分に整備されていない流域(以下、未計測流域)においては、これまでに、主として以下2つの方法による流量推定が試みられてきた。

・水文モデルによる流量推定： 地表面水文

プロセスを表現する数値モデル(水文モデル)に降水量、放射量などの気象外力を与えて流出量を推定する方法である。これまでに、様々なタイプの水文モデルが開発されており、また、それを駆動するための気象外力データも衛星観測などにより得られるようになりつつある。さらに、物理的な水文モデルの開発により、地被・地質などの情報から、モデルパラメータを決定できるようになってきた。しかしながら、外力やパラメータの不確実性のために、十分な精度での流量推定は困難である。

・衛星センサーによる観測・推定：衛星高度計により得られる河川水位と現地観測流量との相関関係に基づく流量モニタリングの可能性については、多くの先行研究により報告されている。また、SWOT (Surface Water Ocean Topography mission)のような衛星観測計画も提案されており、これにより得られる河川水位などの情報は、未計測流域の河川流量推定に大きく貢献する可能性を秘めている。しかしながら、これら衛星による陸水観測計画は、まだ「アイデア」の段階であり、現業的な利用の見通しは立っていない。

以上のように、未計測流域における河川流量推定は、今もって実現されていない。したがって、現在利用可能あるいは近い将来に利用可能な衛星観測データを念頭においた手法開発が必要である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、水文モデルと衛星観測河道情報(河川水面幅・水位の変動、河道横断形状)を組み合わせた新たな河川流量推定手法を開発することである。またこれをもとに、準リアルタイムな河川流量監視の可能性についても検討を行う。具体的な検討項目は、以下の通りである。

- (1) 流量推定手法の開発
- (2) 河道横断情報の導入による流量推定手法の改善
- (3) 様々な衛星情報の適用に関する検討
- (4) 大川における流量推定手法の適用
- (5) 流量監視システム開発に向けた検討

3. 研究の方法

本研究の実施期間は3年間であり、1年目は、流量推定手法の開発・改良に取り組んだ。また、2年目は、衛星情報解析手法の検討と開発した流量推定手法の検証を行い、最終年度は、開発した流量推定手法の実利用に向けた検討を行った。

(1) 流量推定手法の開発

衛星画像から得られる河川水面幅変化を参照値として、水文モデルのパラメータ及び河川水面幅 W - 流量 Q 関係式(以下 W - Q 式)

のパラメータを同時にキャリブレーションする。これにより、現地での実測流量データが得られない未計測流域においても、モデルパラメータの同定と流量推定を可能にする。さらに、この開発段階において、キャリブレーションに用いる河川水面幅の観測頻度が流量推定精度や不確実性に及ぼす影響についても明らかにする。また河川水面幅に加え、衛星高度計から得られる水位情報を用いたキャリブレーション手法についても検討を行う。なお、キャリブレーションの部分については、Multi-Objective 最適化手法の一つである NSGA-II やパラメータの不確実性を評価できる GLUE を利用する。また、河川水面幅の抽出には TERRA/ASTER などの高解像度衛星画像を用いる。水文モデルについては、流域水文量の空間分布を考慮しながらも最適化計算における計算負荷の増大を避けるため、比較的単純な構造と少ないパラメータにより降雨 - 流出過程を表現できる分布型モデル(分布型 HyMOD)を使用する。

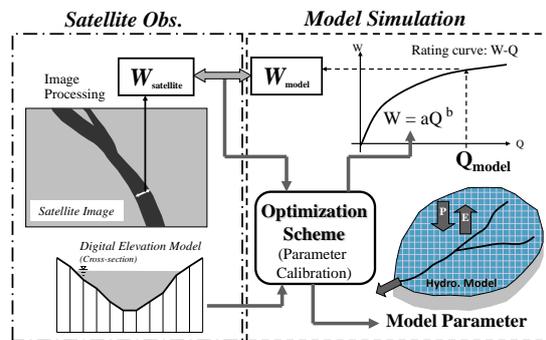


図-1 推定手法の概念図
(河川水面幅を使用する場合)

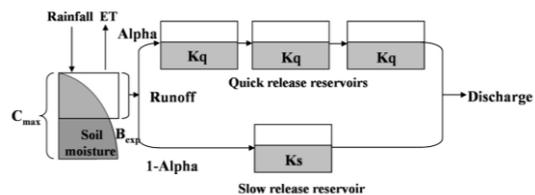
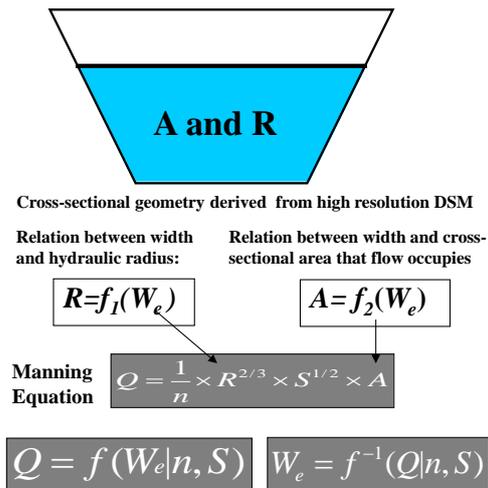


図-2 水文モデル HyMOD の概念図

(2) 河道横断情報の導入による流量推定手法の改善

ALOS/PRISM DSM (PRISM-DSM)などの数値地形情報を用いて、対象地点の河道横断形状を抽出する。衛星観測により作成される数値地形情報では、水面以下の情報を得ることができないが、低水期(乾季)の画像より作成される地形データを用いることにより、高水敷の断面形状を把握する。また、この横断形状から作成される水位と水面幅、流積の関係を水面以下まで外挿することで、対象地点における断面特性をモデル化する。これを最適化手法における拘束条件として利用するこ

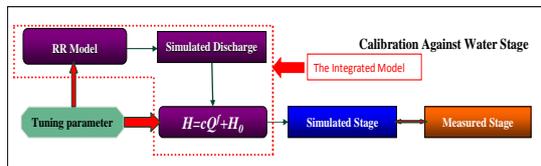
とで、流量推定手法の精度向上と不確実性を減少させる。



図一三 河道横断情報を導入した流量推定手法

(3) 様々な衛星情報の適用に関する検討

高解像度衛星画像に加え、より観測頻度の高い中解像度衛星画像や、河川水位の変動を捉えることができる衛星高度計データの利用可能性について検討する。このように、様々な衛星観測情報を流量推定手法に導入することで、衛星観測の頻度等に起因する推定誤差を軽減する。



図一四 衛星観測水位情報を用いる方法

(4) 大河川における流量推定手法の適用

ミシシッピ河(アメリカ)やイラワジ川(ミャンマー)などの流域において、規模(大きさ、河川幅)の異なる河道地点を対象として開発した手法の適用・検討を行い、現在利用可能な衛星データを用いた場合の手法の有用性と適用限界を明らかにする。検証用データは、これまでに研究代表者が、過去約 10 年にわたるユネスコのアジア・太平洋地域 FRIEND への参加と IAHS PUB や山梨大学 COE の活動を通じて連携を深めてきたアジア地域の研究・実務者の人的ネットワークを活用して収集する。

(5) 流量監視システム開発に向けた検討

衛星観測に基づく準リアルタイムな流量推定とデータ配信を行うシステムを構築するために、必要となる技術や関連データの整備についても検討を行う。具体的には、曇天時における地表面情報抽出のためのマイクロ波放射計データの利用や衛星画像中から

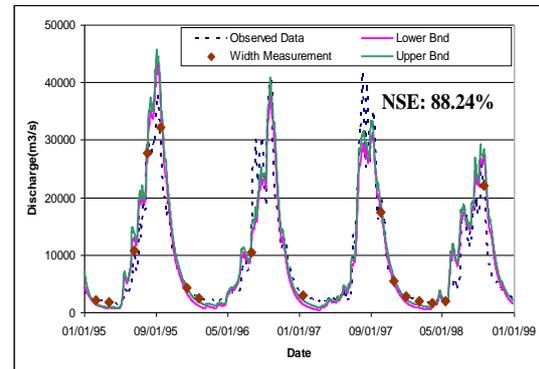
河道に対応したピクセルを自動抽出するための河道位置情報の整備などについて検討を行う。

4. 研究成果

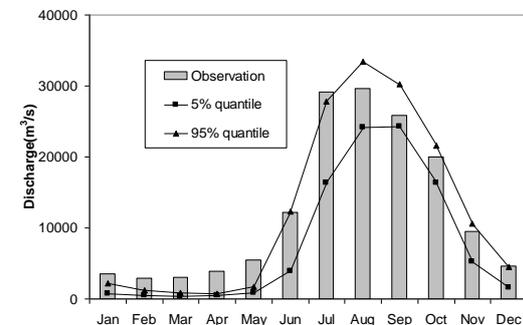
(1) 流量推定手法の開発

衛星画像から得られる河川水面幅の変化に関する情報をリファレンスとして、水文モデルのパラメータ及び河川水面幅 W と流量 Q の関係式(W - Q 式)のパラメータを同時にキャリブレーションする手法を開発した。また、キャリブレーションに用いる河川水面幅の観測頻度や精度が流量推定精度に及ぼす影響についても検討を行った。なお、これらの検討については、検証データ等が得られているメコン河 Pakse 地点を対象として行った。その結果、川幅が数 100m~1km 程度の河川については、TERRA/ASTER や JERS-1/SAR など現在利用可能な高解像度衛星画像を用いた流量推定が可能であることが明らかとなった。

次に、開発した手法の汎用性を確認するために、イラワジ河(ミャンマー)Pyay 地点に対して本手法を適用し河川流量推定を行った。その結果、地上観測情報が得られない状況下においても本手法を用いることで妥当な河川流量推定値を得ることが可能であることが確認された。



図一五 河川流量推定結果(メコン河 Pakse 地点)



図一六 河川流量推定結果(イラワジ河 Pyay 地点) 月単位流量の 10 年間(1970-1980)平均値

(2) 河道横断情報の導入による流量推定手法の改善

ALOS/PRISM より得られる地表面高さ情報(PRISM-DSM, 解像度 2.5m,)を用いて、対象地点の河道横断形状を抽出した。また、この河道横断形状とマンニング式を上記の流量推定手法に導入し、単純なべき乗関数でモデル化していた W-Q 式を、河道特性に基づく水理学的な式として与える方法を確認した。これにより、W-Q 式におけるチューニングパラメータの物理的な意味がより明確となり、キャリブレーションにおけるパラメータ値の上・下限値の合理的な決定やキャリブレーションにより得られたパラメータの妥当性のチェックが可能となった。さらに、この W-Q 関係の導入に伴う流量推定手法の精度向上、不確実性の減少などの効果が確認された。

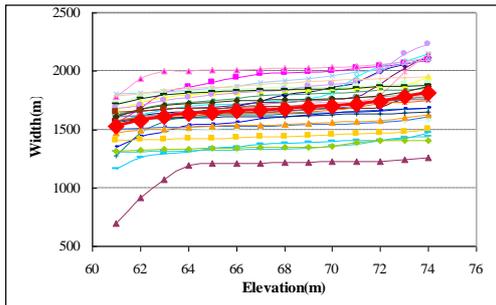
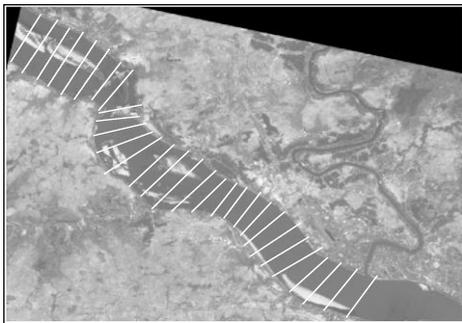


図-7 PRISM-DSM からの河道横断情報抽出 (メコン河 Pakse 地点)

上図: 断面取得位置(図中白線)

下図: 断面取得位置における標高-河幅の関係

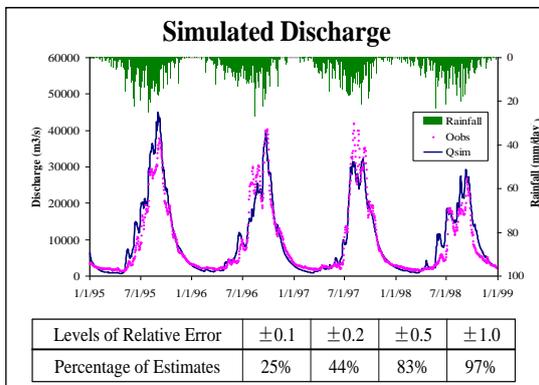


図-8 河道横断情報導入後の河川流量推定結果 (メコン河 Pakse 地点)

(3) 流量推定への不確実性評価手法の導入

モデリングにおける不確実性をより定量的に示すために、キャリブレーション手法として GLUE を導入した。90%信頼区間で推定された流量は、実測の日流量と良く適合していた。また、河川水面幅の計算結果と流量推定精度の相関性の検証も行われ、その結果から、水面幅と流量の間に相関性を仮定していることが流量推定に及ぼす影響は小さいことが明らかとなった。

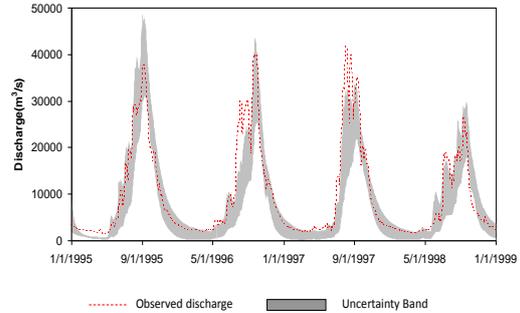


図-9 GLUE を導入した河川流量推定の結果 (メコン河 Pakse 地点)

赤破線: 実測流量, グレー: 不確実性の幅

(4) 衛星高度計データの利用

衛星搭載型のレーダー高度計である TOPEX/POSEIDON の観測値を用いたキャリブレーション手法について、ミシシッピ河上流クリントン地点でのケーススタディーにより検討を行った。TOPEX/POSEIDON は、海面観測を目的として開発・運用されてきた衛星センサーであるが、大河川や大規模湖沼水位変動の抽出など、陸水研究への応用事例も報告されている。このキャリブレーション手法の有効性について、モデルの入力に対する状態変数や出力値の挙動、流量推定の精度、モデルパラメータの分布などをもとに検討した結果、流量変動の大きさの再現性については主として水文モデルの構造に起因することが明らかとなった。また、実測流量でキャリブレーションを行った場合と、衛星観測水位でキャリブレーションを行った場合の推定流量の不確実性を比較した結果、本手法は未計測流域においては非常に有効な手法であるが、実測流量を用いたキャリブレーションと同程度の精度までは得られないことが示された。

その一方で、衛星観測が流量変動をとらえるのに十分な頻度で得られていれば、不確実性の大きい観測データを除去することで、キャリブレーションの結果として得られるパラメーターセットの中から不適当なものを排除することが可能となり、結果として推定流量の不確実性が軽減されることが確認された。

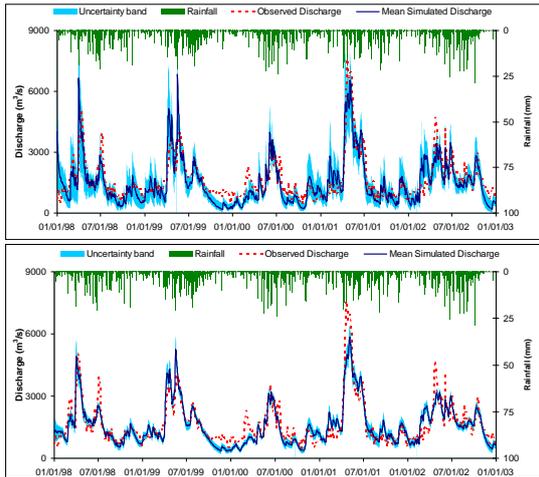


図-10 水位情報を用いた河川流量推定の結果
(ミシシッピ河上流クリントン地点)

赤破線: 実測流量, 水色: 不確実性の幅, 黒実線: 推定流量の平均値であり、上図は衛星高度計の水位情報を用いた結果で、下図は現地観測流量を用いた推定結果

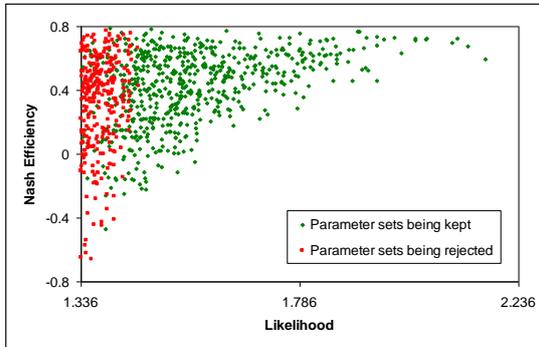


図-11 流量推定精度(Nash 効率)と尤度の関係
赤点: 最適化の結果得られたパラメータセットのうち、水位観測精度が低く除外されたもの
緑点: 流量推定に採用されたパラメータセット

(5) 高精度河道位置データの整備

アジアの主要河川(メコン河など)を対象として、空間解像度衛星画像の全球モザイクデータである GeoCover から河川水際線を抽出し、これをもとに高い位置精度を有する河道位置データを作成した。このデータは、衛星画像から河川水面の位置や面積変化を自動抽出する際の補助的な情報として用いるものであり、従来の全球河道位置データと比較して、高い位置精度を有しているなどの特徴がある。

(6) マイクロ波放射計データの利用可能性の検討

本研究で開発した河川流量手法の適用において、十分な推定精度を確保するためには、より高い頻度での河川水面幅の観測が必要となる。しかしながら、可視・近赤外センサーでは、曇天下での地表面観測が出来ないため、熱帯地域などにおいて長期にわたるデー

タ欠損が起こる可能性があり、全天候観測が可能な合成開口レーダーについては、観測頻度が低いという問題が残されている。そこで、解像度約 25km のマイクロ波放射計データから、偏波比を用いて間接的に河川水面幅の変動を抽出する技術について検討を行った。図-12 はインダス河中流域において、37Ghz 垂直/水平偏波放射輝度データから得られる(偏波比)の時間変化と、年最大偏波比のリターンピリオドを表している。2010年に発生した大規模な洪水に対応して、極端に大きなPR値及びリターンピリオドが2010年に表れている。このような結果から、マイクロ波放射計の観測データをもとに、非常に大規模な洪水ピークの発生時期や規模、高水流量の年々変動に関する情報などが得られることが明らかとなった。

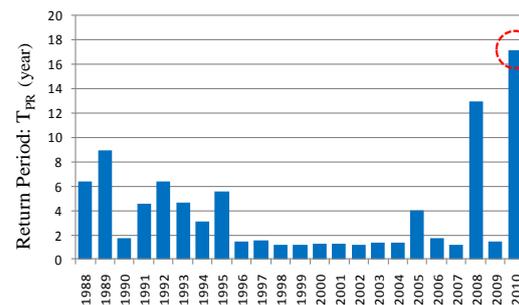
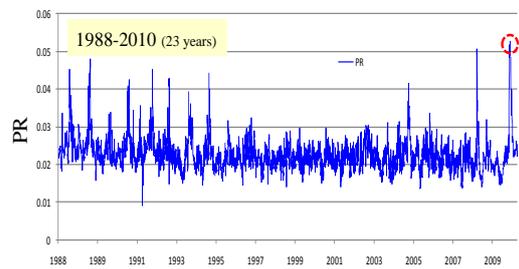


図-12 マイクロ波放射計による洪水情報の抽出
上: 解析対象地点(インダス河中流域、)
中: 偏波比の変化(1988-2010年、5日間移動平均)
下: 年最大PRのリターンピリオド(GEV分布を適用)

なお、上記(1), (2)をまとめた論文(Sun et al., 2010)が平成 22 年度水工学論文賞を受賞するなど、本研究の成果は当該分野において高く評価されている。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計7件)

- ① Wang, J. and Ishidaira, H. (2012): Effects of Climate Change and Human Activities on Streamflow and Sediment flow into the Hoa Binh Reservoir, Journal of Japan Society of Civil Engineering, Ser. B1 (Hydraulic Engineering), 査読有, Vol.68, No.4, I_91-I_96
- ② Sun W., Ishidaira H. and Bastola S.(2012): Prospects for calibrating rainfall-runoff models using satellite observations of river hydraulic variables as surrogates for in situ river discharge measurements, Hydrological Processes, 査読有, Vo.26 Issue 6, pp.872-882
- ③ Wu S., Ishidaira H., Sun W. and Magome J. (2011): Coupling RLWE Model with Distributed Hydrological Model for Water Budget Simulation in the Tonle Sap Lake, Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE, 査読有, Vol.55, pp.13-18
- ④ Sun W, Ishidaira H. and Bastola S. (2011): On utilizing river widths measured from synthetic aperture radar images for calibrating rainfall-runoff models in ungauged basin, IAHS Publication, 査読有, 343: 53-58.
- ⑤ Sun W, Ishidaira H. and Bastola S. (2011): Coupling a hydraulic model incorporating river cross-sectional geometry derived from high resolution DSM with a hydrological model for river discharge estimation, Journal of Hydrosience and hydraulic engineering, 査読有, 29(1): 57-68.
- ⑥ Sun, W., Ishidaira H. and Bastola S (2010): Towards improving river discharge estimation in ungauged basins: calibration of rainfall-runoff models based on satellite observations of river flow width at basin outlet, Hydrol. Earth Syst. Sci., 査読有, Vo.14, pp.2011-2022
- ⑦ Sun W., Ishidaira H. and Bastola S (2010): An Integrated Approach Incorporating River Cross-Sectional Geometry Derived From High Resolution DSM for River Discharge Estimation, Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE, 査読有, Vol.54, pp.1-6

[学会発表] (計5件)

- ① Sun W., Ishidaira H. and Bastola S: Calibration of rainfall-runoff models using remotely sensed river flow widths at the

basin outlet, 5th Conference of the Asia Pacific Association of Hydrology and Water Resources, 2010年11月10日, ハノイ(ベトナム)

- ② Sun W., Ishidaira H. and Bastola S: Calibration of rainfall-runoff models based on satellite observations of river width at the basin outlet, Remote Sensing and Hydrology 2010 Symposium, 2010年9月28日, Jackson Hole (アメリカ)
- ③ Sun W., Ishidaira H. and Bastola S: Integration of satellite-derived river width, hydraulic geometry and a rainfall-runoff model for tracing river discharge, EGU Topical Conference on Earth Observation & Water Cycle Science, 2009年11月19日, ローマ(イタリア)
- ④ Sun W., Ishidaira H. and Bastola S: A new approach for estimating streamflow in large ungauged basins from remote sensing: integration between hydrological model and at-a-station hydraulic geometry, The 8th IAHS Scientific Assembly and 37th IAHS Congress, 2009年9月11日, ハイデラバード(インド)
- ⑤ Sun W., Ishidaira H. and Bastola S: Prospects for Extracting River Cross-sectional Information from High Resolution DSM Generated from ALOS PRISM Data, 第22回(2009年度)水文・水資源学会, 2009年8月20日, 石川県文教会館

[その他]

ホームページ等

http://titan2.cee.yamanashi.ac.jp/~ishi/kaken/kiban_c_h21_23_ishi.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

石平 博 (ISHIDAIRA HIROSHI)
山梨大学・大学院医学工学総合研究部・
准教授
研究者番号: 80293439

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし