

熱帯低密度観測流域での実時間洪水推定に関する研究

中西健一郎*・田中賢治・小森大輔**・沖大幹**・小尻利治

*京都大学大学院工学研究科

**東京大学生産技術研究所

要 旨

本稿では気象・水文観測網の密度が十分でない、いわゆる低密度観測流域における洪水対策として、およそ 500km²~1000km² 規模の流域を対象とし、レーダーによる降水の詳細な空間分布観測値を用いて、標高と重心からの距離の 2 変数によって効果的な観測点を特定できる指標を算定し実流域で検証した。加えて衛星による全球降水マップの有効性について議論した。全球降水マップは過小評価傾向や見逃しがあるが、一定の地上観測があれば洪水対策に対して有効であると判明した。

キーワード : 低密度観測流域, 洪水対策, 雨量計設置基準, 流域地形, 全球降水プロダクト

1. はじめに

本稿では、地上雨量計による観測網が十分に展開されていない、いわゆる低密度観測流域における洪水対策として、低密度観測流域に新規に雨量計を設置する際の設置基準の策定を目的とする。近年世界各地で集中豪雨に起因する水災害の発生が頻繁に報告されている。こういった現象と気候変動との明確な因果関係は分かっていないが、IPCC 第 4 次評価報告書 (文部科学省ほか, 2007) の中で述べられている通り、今後世界各地で水災害リスクが増加する可能性がある。そのため、洪水対策への取り組みは現在喫緊の課題であると考えられる。

洪水対策への取り組みの一つとして、分布型水文モデルを用いた手法が近年提案されており (例えば関井ほか, 2007 ; 立川ほか, 2007), 特に降雨発生から洪水予警報発令までのリードタイムの短い中小河川においては、一分一秒でも早く河川流量に関する情報を得ることは河川管理上非常に有効であると言える。

こういった分布型水文モデルによる流出計算は様々な情報を必要とする。特に洪水流出に限定して言えば、降水量の時間空間分布情報は必要不可欠な情報である。日本は AMeDAS

(Automated Meteorological Data Acquisition System) による高密度な雨量計ネットワーク (約 17km 四方の正方形領域をカバー) が展開されている。しかしこれほどの密度で降水観測が行われている地域は世界でも数少なく、中には全く雨量計の存在しない未観測流域も存在する。雨量計を設置できない原因としては、例えば設置コストと維持コストが挙げられ、特に発展途上国においては AMeDAS のように高密度に観測を展開していくことは困難であると考えられる。

こういった低密度観測問題を解決するための情報の一つとして、衛星リモートセンシング技術を用いた降水量プロダクトがある。例えば日本で開発された衛星降水マップ GSMaP (Global Satellite Mapping of Precipitation) (Kubota et al., 2007) に含まれる GSMaP_MVK プロダクトはマイクロ波放射計及び静止気象衛星による赤外放射計データを複合利用し全球 (60°S-60°N) を 1 時間、0.1 度 (約 10km) の高解像度でカバーし、準リアルタイムで配信されている。こうした衛星による全球降水プロダクトを活用した洪水検出に関する研究も進められており、例えば瀬戸ら (2007) は日本域において GSMaP の洪水検出能力を検証しており、以下の 3 点を指摘している。

- 他の衛星プロダクトと同様に、陸域降水量を過小評価
- 1 ヶ月・1 度グリッドでの積算降水量を一致させるよう

補正ことで洪水検出能力が向上

- アルゴリズム自体の改良が必要であるとともに、雨量計による補正プロダクトを作成することもまた有効となりうる

また、地上での降水観測手法として、近年レーダーによる降水観測に関する研究が進められている。レーダーはリモートセンシング技術を利用した観測手法であり、広範囲の降水の面的分布情報を得ることができる。しかし雨量計と比較してレーダーの設置コストはきわめて高く、さらにメンテナンスの際に高度な技術的知識が必要とされ、未観測流域に早急に導入するという事は難しい。またレーダーの観測原理は雨滴により反射されたビームの強度より降水強度を推定するものであり、定量的な評価には地上雨量計データとのマッチングが必要となる。

以上より、地上雨量計による観測網を展開する利点として、

- (1) 設置・維持コストが安い
 - (2) 衛星観測の補正に有効
 - (3) レーダーのキャリブレーションに有効
- さらに
- (4) 設置直後から活用できる即効性
 - (5) レーダー故障時のバックアップの役割

等が挙げられ、限られた数の雨量計を効果的に配置するための設置基準を策定することは意義深いと考えられる。

そのため本研究では、洪水頻発流域であり、全球地球観測システム(GEOSS)の元進められている地球観測システム構築推進プラン(JEPP)の一つとして日本の AMeDAS をもしく超高密度雨量計ネットワークが展開されている東南アジア・タイ国の MaeWang 流域(流域面積約 550km²)における観測データ(小森ほか, 2007)を活用する。

本稿の流れとして、まず山岳部でのタイ北部の降水分布データを用いて雨量計設置基準を算定し、その結果を MaeWang 流域に適用し、分布型流出モデル HydroBEAM(例えば Kojiri et al., 2008)を用いた流出計算を通じて基準の妥当性を検討することとする。さらに、衛星観測により作成される全球降水マップの洪水対策への有効性について議論し、低密度観測流域での活用の可能性について検討する。

2. 雨量計設置基準の算定

本章では低密度観測流域への洪水対策を目的とし、効率的な雨量計設置位置特定のための基準を策定する。「効率的な設置」について、今回は「流域平均的な降水強度を観測できる観測地点の絞り込み」を目的とする。立川ら(2003)では、洪水流出計算において、以下の2点が重要であると結論付けている。

- 流域平均的な降水強度
- 降水分布の度合い

特にわずかな数の雨量計で降水分布を捕らえるのは非常に困難となるため、まず流域平均降水量を観測することを目指す。高精度な洪水流出計算には降水の空間分布情報も必要になると考えられるが、雨量計だけで空間分布を捕らえるには相当高密度な観測網が要求され、低密度観測地域への新規導入においては現実的に困難である。そのため本稿では流域平均的な降水観測値がどれほど洪水計算に貢献し得るかを検討し、限られた観測情報のみから洪水対策を行っていく方法についても検討する。

2.1 設置基準の算定手法

特に 500km²~1000km²程度のスケールの流域において、流域平均降水量と相関の高いメッシュを抽出し、そのメッシュが流域内でどういった位置に属しているかを調べることで、流域を代表する降水を観測するのに有効な地点を絞り込む。具体的には、流域地形量の中でも標高と重心偏差(重心からメッシュまでの距離)に着目し、選ばれたメッシュが所属する標高・重心偏差より、一般的な流域の中で流域平均値と相関の高いメッシュの属する標高・重心偏差のレンジを決定し、雨量計設置基準とする。流域が非常に大きい場合は、導入可能な雨量計の数に応じて流域を分割し、部分流域ごとに雨量計設置基準を適用することで、効果的な雨量計配置を行うことができると考えられる。算定の手順を以下に示す。

(1) 年最低相関係数分布及び Bias の算出

流域内に存在する各メッシュの降水量と流域平均降水量の相関係数及び Bias を計算する。Bias は年積算降水量の比を表し、式(1)で定義する。

$$Bias = YrP / YrP_{ave} \quad (1)$$

ここで、YrP は年積算降水量、添え字 ave は流域平均値を表す。なお、降水は年一様に発生するのではなく、季節ごとに偏りを持つ可能性があるため、1年間をいくつかの期間に分割し、期間毎に相関係数を計算し、その最低値を年最低相関係数とする。ここで、年最低相関係数に着目するのは、悪くても一定以上の相関を示す地点、すなわち大外れ(空振り)が少ない地点を選定するためである。

(2) 正規化標高・正規化重心偏差の算出

流域地形と年最低相関係数の関係を調べる。異なる標高や形状を持つ流域でも適用できるように、以下の正規化した2つの指標を用いて流域地形と関係付ける。

$$erate = \frac{elev - elev_{min}}{elev_{max} - elev_{min}} \quad (2)$$

$$drate = \frac{dis - dis_{\min}}{dis_{\max} - dis_{\min}} \quad (3)$$

ここで、elev : 標高, drate : 重心からメッシュ中心までの距離, 添え字 max,min : 最大値・最小値をそれぞれ表す。

(3) 優良メッシュの選定

Bias が一定範囲内にあるメッシュのうち, 年最低相関係数の上位 1 割程度を優良メッシュとする。

(4) 雨量計設置基準の選定

優良メッシュの属する erate, drate の範囲を雨量計設置基準として算定し, この 2 つの基準をいずれも満足する地点が雨量計設置候補地点となる。

2.2 対象流域と降水分布データ

上述の手順を行うには, 降水の詳細な空間分布情報が必要である。本稿ではタイ北部の OmKoi レーダーによる観測データを用いて検討を行う。またレーダーの降水量推定精度により結果が変動するのを避けるため, 本稿ではレーダーパラメータ(B,β)として, 標準的な値に加えて, 既往研究で算出された 2 種類のパラメータにより推定されたデータも使い, 式(4)により降水強度を推定した。

$$Z = BR^\beta \quad (4)$$

ここに, Z : レーダー反射強度[mm⁶/m³], R : 降水強度[mm/hr] である。また本稿で使用した(B,β)を Table 1 にまとめる。

Table 1 Value of radar parameters B and β

CASE	(B,β)	
1	(200, 1.6)	Standard value
2	(17.7, 2.1)	Yokoi (personal communication)
3	(74, 1.6)	Punpim et al. (2008)

対象流域として, OmKoi レーダーの観測範囲の中から流域面積が適切で, かつ流域の向き(方位)の異なる流域として, MaeChaem 流域の支流域(流域面積 435km², 以後単に MaeChaem 流域と呼ぶ)と MaeRit 流域(流域面積 1260km²)の 2 流域(エラー! 参照元が見つかりません。)を選定した。

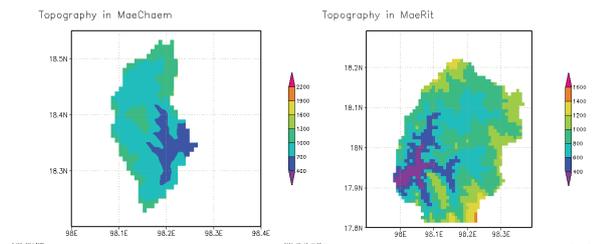


Fig.1 Topography of target basins (left: MaeChaem, right: MaeRit)

2.3 基準の算定

タイ北部の流域は南西モンスーンの影響により月ごとの降水変動が大きいため, 年最低相関係数の算出には月ごとの降水量データをサンプルとして用いた。解析期間はレーダーデータが存在しかつ少雨年でない 1999 年とした。レーダー観測は 1999 年については 5 月~10 月に行われており, 降水量データの期間を月ごとに 6 つに分割する。

流域を 30 秒(約 1km)メッシュに区切り, 各メッシュの真上を通過するレーダーエコー Z を対象メッシュの観測エコーとし, そこから Table 1 に示すパラメータに従い降水分布データを算出した。得られた降水量データを用いて年最低相関係数(Fig.2)と Bias を計算する。年最低相関係数が 0.7 以上である地点の中から Bias の各レンジ(5%, 5-10%, 10-20%)毎に, 月別に相関係数の上位 10 地点を優良メッシュとして選定する。これを 3 組のレーダーパラメータ毎に実施し, 合計 180 地点(重なる場合もある)の優良メッシュを抽出した。それらの優良メッシュの所属する erate (Fig.3), drate (Fig.4) の範囲を求めると, 雨量計設置基準は Table 2 のようになり, この基準により雨量計の設置範囲が 3 割程度にまで絞られることになる (Fig.5)。実用的にはこの限定された範囲の中で最もアクセスしやすい箇所に設置していくことになると思われる。

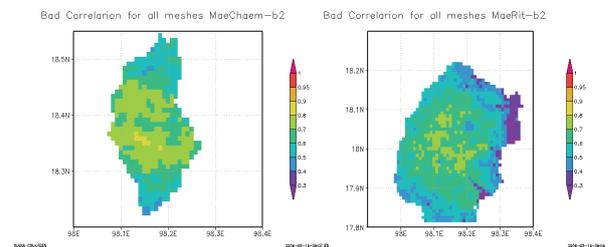


Fig.2 Annual minimum correlation coefficients (CASE2) (left: MaeChaem, right: MaeRit)

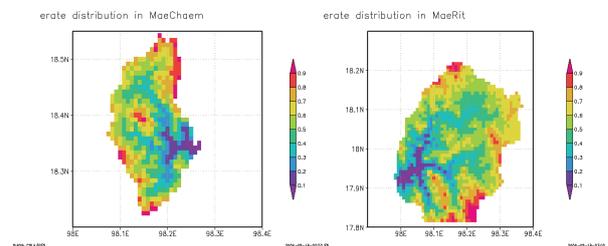


Fig.3 Normalized elevation erate (left: MaeChaem, right: MaeRit)

Table 2 Estimated guideline of an installation of rain-gauge networks

正規化標高(erate)	0.307~0.641
正規化重心偏差(drate)	0.180~0.492

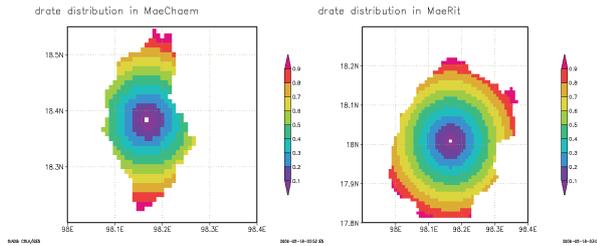


Fig. 4 Normalized elevation rate (left: MaeChaem, right: MaeRit)

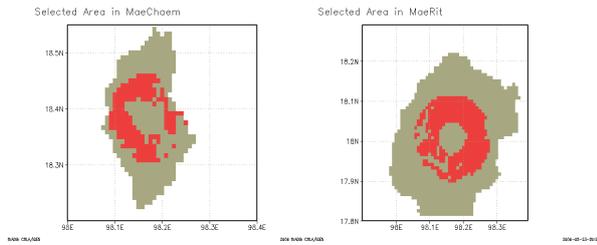


Fig. 5 Meshes satisfying the guideline in each basins (Red area)

3. MaeWang 流域での検証

0 で算定された設置基準の妥当性を地上雨量計データを用いて検討する。具体的には分布型流出モデル HydroBEAM を用いた流出解析により、1 地点の降雨観測値による洪水の再現性を検証するとともに、適当な流域平均降水量が観測された場合に、それが降水の詳細な空間分布データと比べて流出計算にどれほど寄与しうるのであるかを検討する。

3.1 MaeWang 流域の観測体制

タイ北部に位置する MaeWang 流域では 2006 年より GEOSS による集中観測が行われており、550km²に 13 観測地点という、日本の AMeDAS をもしのご超高密度雨量計ネットワークが展開されている (Fig.6)。各観測点では 10 分ごとにデータロガーにデータが記録され、携帯電話網を通じて転送され、観測から 1 時間以内に Web 上に公開される (小森ほか, 2007)。

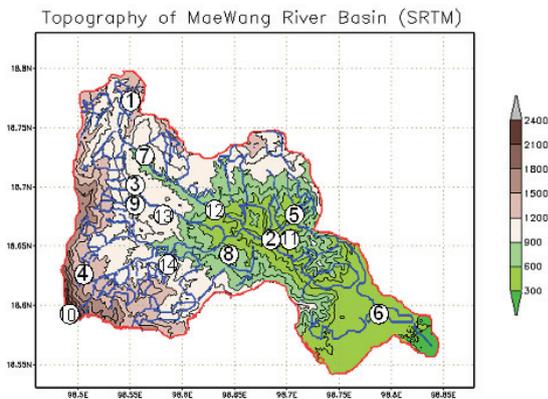


Fig. 6 GEOSS Observation network in MaeWang basin

3.2 MaeWang 流域での洪水流出再現計算

分布型流出モデルは降水の空間分布情報を陽に考慮できるという特徴を持ち、本稿で行うような降水入力値の変化や有効性の検証を行う上で適している。本節では MaeWang 流域において洪水流出再現計算を行い、以降で降水量入力値を変化させた場合の流出計算との精度比較を行えるようにする。

Hydro-BEAM は、いわゆるメッシュ型多層流出モデルである。Hydro-BEAM は鉛直方向には A~D の 4 層構造を有しており、A~C 層の水平流出量は河川に流入するが、D 層だけは河川流量に影響を及ぼさない地下水層としている。地表面および河川における流出については kinematic wave 法を、A 層には下層からの流入量を考慮した kinematic wave 法を、また B, C, D 層では線形貯留法を用いて追跡している。落水線は東西南北の 4 方向いずれかと仮定し、河道網を構成する。

(1) 計算条件

地理データに関しては、現地データのあまり整備されていない地域への適用を意識して、可能な限り全球規模で整備されているデータセットを活用することとした。標高データは解像度約 100m の SRTM-3 (<http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>) を、土地利用データは解像度約 1km の GLCC ver.2 (<http://edc2.usgs.gov/glcc/>) を用いた。

Hydro-BEAM の入力気象データとしては降水と蒸発散量の 2 つが必要である。GEOSS による現地観測データを距離による重み付内挿により降水分布データを作成した。蒸発散量については陸面過程モデル SiBUC (Tanaka et al., 1994) により算定した。SiBUC の気象強制力 7 要素は同様に GEOSS 観測データの内挿値を用いた。その他 SiBUC に必要な地表面パラメータについては、例えば Tanaka et al.(2006) を参照されたい。

日本のような湿潤域では流出率の季節変動は小さいと仮定し、オリジナルの HydroBEAM では流出率が土地利用毎に固定値で与えられているが、今回対象としたタイのように雨季と乾期が明瞭な地域では、流出率の季節変動が大きいと考えられる。そこで、流出率 ff を式(5)~式(7)のように貯留量 θ でパラメータ化し、季節変動を表現した。

$$ff = \begin{cases} 0 & (RR < dks) \\ \frac{RR - dks}{RR} * f(\theta) & (otherwise) \\ ff_p & (ff > ff_p) \end{cases} \quad (5)$$

$$f(\theta) = 1 - \exp(-\theta^\lambda) \quad (6)$$

$$\theta = \frac{STO_A + STO_B + STO_C}{STO_{s,A} + STO_{s,B} + STO_{s,C}} \quad (7)$$

ここに、RR : 降水量, dks : 浸透能, 添え字 p : ピークを表す, STO_k : k 層の貯留量 (k : A~C), 添え字 s : 飽和を表す.

計算期間は 2006/5/1~2007/10/31 とする. MaeWang 流域では行政が洪水対策を始める基準が, P82 地点 (Fig. 6 における No.2 地点) において流量が 150 トンとなることである. この期間中 150 トンを超えるイベントが 3 回確認されたため, この 3 イベントを再現することをパラメータ同定の最低限の目標とした.

(2) 洪水再現結果

流出率のパラメタリゼーションの効果を見るために 2007 年 5 月の結果を Fig.7 に示す. 流出率のパラメタリゼーションを行わない場合, 乾期終了時期である 2007 年 5 月の流出を過大評価する傾向にある事が見て取れる (Fig.7 左). すなわち直接流出成分が過大評価され, 結果地下貯留量が減少し基底流出が過小評価されているが, 貯留量によるパラメタリゼーションを導入することで流出計算精度向上が図られた (Fig.7 右). なお, スペースの関係で図示しないが, 再現計算でも 150 トンを超えるイベントが全期間を通じて 3 回だけとなっている.

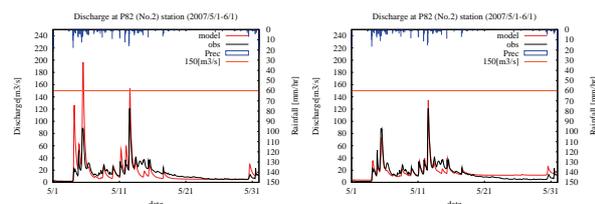


Fig.7 Effects of parameterization of runoff rate (left : not parameterized, right : parameterized)

3.3 雨量計設置基準の検証

Fig. のように展開された GEOSS による雨量計データを用いて, 0 で算定した基準の検証を行う. 流量評価地点が図中の No.2 地点であるため, この上流域にありかつ降水観測を行っているサイトとして, No.6, No.11 を除く 12 サイトを対象とする. まず $erate$, $drate$ を算出し基準を満たすサイトを探したところ, No.9, No.13 が該当した. 次に各観測サイトにおける降水量と, 対象サイト全てを用いて計算された流域平均降水量の相関をとり, 年最低相関係数及び Bias を計算することで, 選ばれた No.9, No.13 が流域平均値と近い降水量を観測しているかどうかを検証した. 解析対象期間は各サイトでデータがよく得られている 2007/5/1~同年 10/31 とし, サンプルとして 0.1mm 以上のデータのみを対象とした. 得られた結果を Table 3 に示す. なお表中においてサンプル数を Num, 年最低相関係数を Cc と表す. Table 3 より, 基準内に属する観測点は流域平均降水量とよい相関関係にあることが見て取れる. 決して「最適」な観測点が選ばれているわけではないが, 相関係数が比較的高く, Bias も極端に大きいわけ

ではないため, 設置基準の範囲は妥当であると考えられる. なお, 今回はタイ北部の 2 つの流域において検討したにとどまり, 例えば異なる気候帯に属する流域などでの妥当性は示していないため, こういった流域での検討も進めなければならぬものの, 地形標高と流域形状という非常に利用しやすいデータだけで設置位置をある程度絞り込めることが示されたのは大きな成果であると言える.

Table 3 Evaluation of each site in MaeWang basin

Site	Num	Cc	Bias
1	470	0.4817	0.8440
2	299	0.4065	0.4950
3	494	0.7118	1.0351
4	822	0.4892	1.4421
5	422	0.565	0.9780
7	496	0.7976	0.9887
8	524	0.7299	1.2198
9	522	0.7847	1.0012
10	1105	0.4136	1.8050
12	439	0.7556	1.0599
13	564	0.8521	1.2201
14	584	0.7335	1.1953

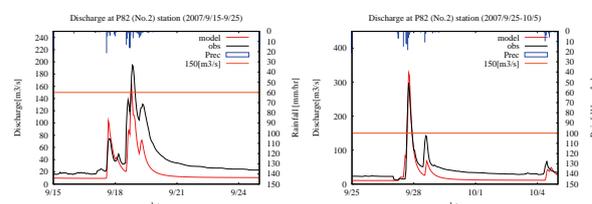


Fig.8 Estimated hydrograph using only No.9

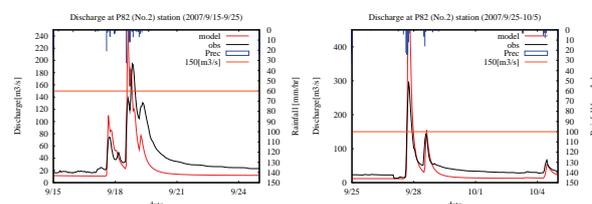


Fig.9 Estimated hydrograph using only No.13

続いて, 選ばれた 1 サイトで観測された降水量データのみにより流出計算を行い, 洪水再現性を調べる. 結果を Fig.8, Fig.9 に示す. 計算対象期間には, 2 回の大きなイベントが発生しているが, 2 サイトの降水量データはいずれもこの洪水流出イベントを再現できている. これより, 流域平均値を捉える雨量計配置を行うことで洪水対策には大きく貢献しうると言える. しかし詳細な降水分布を与える場合と流域一様に

降水データを与える場合に流出にどのような差が見られるかについてはまだ評価できておらず、過大評価や過小評価も無いとは言い切れない。そこで次節では降水の空間分布が流出に与える影響について検討を行う。

3.4 洪水流出計算に対する降水分布の有効性

本節では入力降水の空間分布形状を変えた感度実験と、一様な降水に外的に分布形状を与えた感度実験を行い、流域平均降水強度と降水空間分布が洪水流出に与える影響を検討する。

(1) 感度実験の設定

本稿では降水量データを以下の3種類の方法で作成し感度実験を実施した。

- **RnS 実験**：流域内降水量を平行移動させる
→流域をメッシュ数が等しくなるように5つの緯度帯に分割し、順次北側にスライドさせる。ただし最北端に属していたメッシュは最南端に移動させる。
- **RnP 実験**：各メッシュ降水量を累乗
→各地点の降水量を、1:0.25 乗, 2:0.5 乗, 3:1.5 乗, 4:2.0 乗することにより分布の度合いを変化させる。
- **RnE 実験**：メッシュ標高に応じた分布形状を外的に与える。
→メッシュ標高 $H[\text{km}]$ に対し
- のように重みを計算し流域平均値にかけることで降水分布を作成する。

なお、降水のばらつきの影響を評価するために、いずれの実験においても流域平均降水量が一致するよう補正している。すなわち、各実験で作成されたデータは観測データと平均値が同じで分布形状のみが異なるデータということになる。

(2) 降水のばらつき度合いの評価

各実験において降水量の変動度合いを定量的に評価するため、変動係数を一部改良した、(8)~(10)に示す2つの指標を用いる。

$$CV = \frac{\sqrt{\sum_i (\text{var}(i) - \text{ave})^2 * \text{area}(i)}}{\text{ave} * \sum_i \text{area}(i)} \quad (8)$$

$$CV_d = \frac{\sqrt{\sum_i (\text{var}(i) - \text{ave})^2 * \text{area}(i) * pt(i)}}{\text{ave} * \sum_i \text{area}(i)} \quad (9)$$

$$pt(i) = 1 - \frac{pdis(i)}{pdis_{\max}} \quad (10)$$

ここに、 $\text{var}(i)$ ：メッシュ i における降水量、 ave ：流域平均降水量、 $\text{area}(i)$ ：メッシュ i の面積、 $pdis(i)$ ：P82 地点からメッシュ i までの流下距離、添え字 \max ：最大値を表す、である。単なる空間変動のみではなく、降水発生源が流量評価地点に近いかどうかを考慮する。

Table 4 Weights in each case of RnE simulation

RnE1	weight	RnE2	weight
1	$H^{0.25}$	1	$\exp(H)$
2	$H^{0.5}$	2	10^H
3	$H^{1.5}$	3	$\exp(H^2)$
4	$H^{2.0}$	4	10^{H^2}

Table 5 Variation Coefficient of precipitation in each flood event

Event	ave	CV	CV _d	PDful
1	53.35	0.115	0.077	209.21
2	35.78	0.258	0.203	198.66
3	78.75	0.250	0.178	495.05

(3) 結果と考察

HydroBEAM による流出解析を実施し、降水の空間変動とピーク流量の再現性の関係について考察を行う。解析対象期間中に発生した3つの洪水イベントについて、流域平均降水量 $\text{ave}[\text{mm}]$ 、 CV 、 CV_d 、計算ピーク流量 $PDful[\text{m}^3]$ を Table5 に示す。なお、降水の変動係数については、ピーク前6時間積算降水量分布について計算した。

Event2 について、他の2イベントに比べて降水の変動が大きいことが見て取れる。さらに CV_d の値も大きめに算出されていることから、この降水は流量評価地点の近くで強い降水が発生した、局所性の高いイベントであったと考えることができる。一方で Event1 は CV 、 CV_d が共に小さく算出されており、降水が流域全体に渡って降っていたケースであると考えられる。よって降水の空間分布の影響がより強く表れるケースが Event2 であると考えられるため、以降は Event2 における各感度実験の結果について考察を行う。Table 6 にピーク流量比 PDR_p (全サイトを用いて計算されたピーク流量と感度実験によるピーク流量の比)及び降水の変動係数をまとめ、Fig.10 に感度実験のハイドログラフを示す。また、Table 7 に AVE 実験(流域平均降水量を流域全体に一樣に与えた計算)の3つの洪水イベントにおける PDR_p を示す。これより、変動を全く除去した場合には流出を過小評価

しているのが見て取れる。

Table 6 PDR_p, CV and CV_d in each simulation

CASE	PDR _p	CV	CV _d
RnS-1	0.845	0.372	0.228
RnS-2	0.723	0.411	0.295
RnS-3	0.766	0.445	0.336
RnS-4	0.882	0.208	0.328
RnP-1	0.703	0.152	0.092
RnP-2	0.806	0.277	0.172
RnP-3	1.156	0.650	0.427
RnP-4	1.271	0.812	0.549
RnE1-1	1.000	0.476	0.295
RnE1-2	1.015	0.483	0.295
RnE1-3	1.153	0.596	0.358
RnE1-4	1.246	0.689	0.404
RnE2-1	0.997	0.529	0.308
RnE2-2	1.041	1.055	0.461
RnE2-3	1.035	0.856	0.413
RnE2-4	0.887	5.933	1.321

Table 7 PDR_p in AVE simulation

Event	Peak Discharge[m ³ /s]	PDR _p
1	203.6	0.973
2	121.0	0.609
3	413.7	0.836

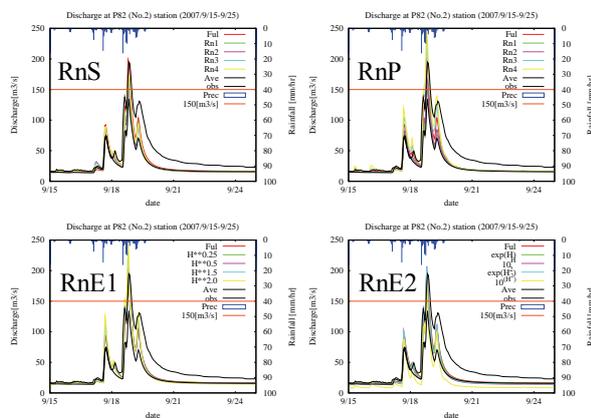


Fig.10 Results of each sensitivity experiments

感度実験の結果を順に見ていくと、RnS 実験ではケース 2,3 でピーク流量大きく過小評価している。これらのケースは降

水分布が南北でほとんど入れ替わった条件での計算であることから、単に分布を与えるだけではなく地形に適合する分布を与えないと流出を過小評価することが言える。RnP 実験の結果はそれを裏付けており、例えばケース 2 では降水の空間変動は RnS-2 より小さいものの、流出の過小評価の度合いは小さい。また変動の度合いが大きくなればなるほど降水の変動係数は単調増加していることから、ここからも降水の空間変動の程度が洪水流出に寄与していることが示唆される。そして AVE, RnS, RnP いずれの結果でも共通するのは、ハイドログラフの波形自体はうまく再現できていると言うことである。各感度実験と同定されたハイドログラフの相関係数はいずれも 0.9 を超えている。以上の考察をまとめると、

- 流域平均降水強度によりハイドログラフの波形を再現できる。
- 流域内の降水分布の度合いによりピーク流量が変動し、それは地形形状に依存している。

の 2 点が言える。そこで次に標高に依存する降水分布を与えた流出計算結果が RnE1, RnE2 である。

RnE1-1, RnE1-2, RnE2-1, RnE2-3 は (エラー! 参照元が見つかりません。に示していない他の 2 イベントにおいても) ピーク流量の差が数%に収まっており、比較的良好な洪水再現ができてい一方、RnE1-3, RnE1-4, RnE2-2 は過大評価傾向、さらに RnE2-4 にいたっては過小評価をしている。後者のケースは現実の降水イベントと比較して降水変動が極端すぎる、すなわち現実では起こりえないような局所的な降水が発生しており、分布を与えたとしてもうまく流出再現ができなかったと考えられる。実際どのような分布形状を与えると再現性が良くなるかと言う議論は今後さらに検討を進めて行く必要があるが、ピーク流量の差が数%に収まった RnE1-1, RnE1-2, RnE2-1, RnE2-3 などの標高依存関係は、1 地点の観測情報を空間分布させるのに有効な手段となる可能性を持つと言える。

4. 全球降水プロダクト GSMaP の有効性

本章では日本で開発された衛星降水マップ GSMaP プロダクト (<http://www.radar.aero.osakafu-u.ac.jp/gsmmap>) を用いた洪水流出計算を行い、その有効性を検証していく。本稿では複数の GSMaP プロダクトのうち、時間・空間解像度が最も高い GSMaP_MVK を用いる。GSMaP_MVK は 1 時間・0.1 度 (役 10km) の高解像度を持つ衛星降水マップである。以下 GSMaP_MVK を単に GSMaP と呼ぶ。

4.1 GSMaP と地上雨量データの比較

2006 年に MaeWang 流域の雨量計で観測されたデータに

よる流域平均降水量(OBS)と, GSMaP による流域平均降水量(GMP0)の比較した結果を Fig.11, Fig.12 に示す. 図より, 波形として GSMaP は時間雨量スケールでは差が見られるものの, 日雨量やイベント雨量のタイミングとしてはある程度

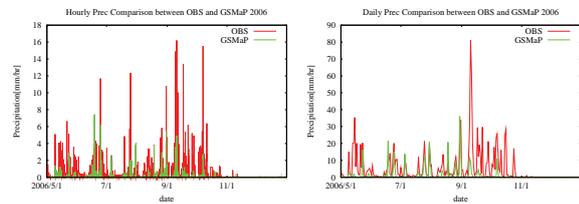


Fig.11 Comparison between OBS and GMP0 (left : hourly, right : daily)

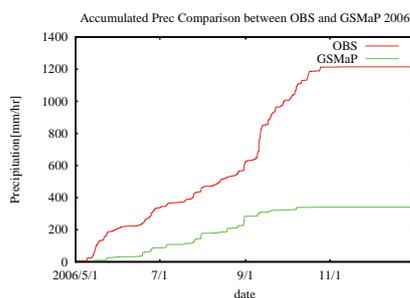


Fig.22 Comparison between time integrated OBS and GMP0

捕らえているように思われる. しかし降水量の絶対値については明らかな過小評価傾向が見取れる. 特に9月に発生した大きなイベントにおいて GSMaP は空振り (ほとんど反応していない) であり, このイベントが洪水につながった大イベントであることからこの空振りは深刻な問題である.

そこで, 空振りした9月の大イベントについて, 静止気象衛星 MTSAT-IR1 (通称ひまわり 6号) の赤外画像データを用いて詳細に観察したところ, Fig.13 のような雲画像が得られた. 図中の'Entire Grid Undefined'はマイクロ波の観測が行われなかったことを意味する. これより, 空振りの可能性はマイクロ波観測の時間間欠性にあることが示唆される. GSMaP プロダクト作成に使用しているマイクロ波観測データはおよそ6時間ごとの観測であり, 今回の豪雨はこの観測間隔の隙間に発生したため見逃した可能性がある. 現在日米を中心とした全球降水観測 (GPM ; Global Precipitation Measurement) 計画が進められており, マイクロ波による全球3時間毎の観測が目指されている. これが実現すれば今回のような見逃しも大きく減少すると考えられる.

4.2 補正された GSMaP を用いた洪水流出計算

(1) 補正に用いたデータセット

前節で述べたように, GSMaP は明確な過小評価をしており, これにはアルゴリズム的な解決が求められるとともに,



Fig.13 Time series of GSMaP_MVK, microwave observation (GSMaP_MWR), observed precipitation(OBS), GSMaP, and infrared observation (MTSAT)

地上観測データを用いた補正が必要となると考えられる。本稿では瀬戸ら(2007)にならい、GSMaPの月積算降水量が地上観測データと一致するように補正(GMP-Mn)することで洪水の再現精度を向上させることを目指した。またより荒い雨量計データだけが利用可能であった場合を想定し、年積算降水量を一致させるような補正も行った(GMP-Yr)。

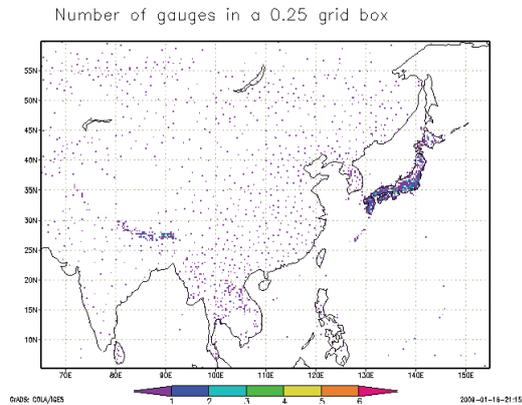


Fig. 14 Rain gauge distribution used for APHRODITE products

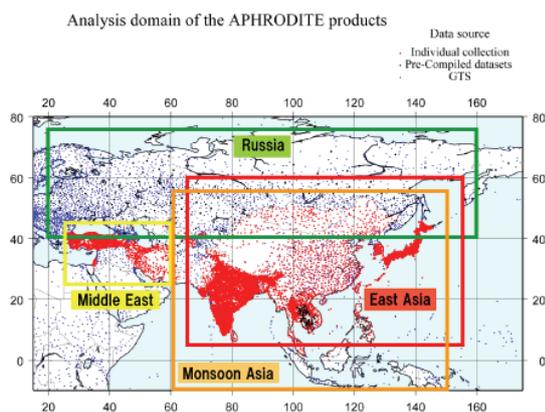


Fig. 15 Other APHRODITE's products

用いた地上観測データは、MaeWang流域に展開された雨量計による観測データと、APHRODITE's Water Resources (Asian Precipitation – Highly Resolved Observational Data Integration Towards Evaluation of the Water Resources ;以下 APHRODITE プロダクト)による1980年から2002年までの23年間の日降水量プロダクトにより計算した気候値データセットである。APHRODITE プロダクトは地上雨量計観測データをベースとしてアジア域において作成された降水プロダクトであり、0.25および0.5度グリッドデータとして格納されており、本稿ではタイを含む東アジアのプロダクトであるAPHRO_EA_V0804をダウンロードして用いた。Fig. 14に2002年時点での解析に用いられた雨量計の分布を示す。またAPHRODITEプロダクトはFig. 15にも

見られるように、東アジア (Pingping et al, 2007), 中東 (Yatagai et al, 2007), ロシア(Takashima et al, 2008)においてそれぞれプロダクトが公開されている。

(2) 補正結果と流出シミュレーション

補正されたGSMaP降水量をFig. 16に示す。また流出シミュレーション結果をFig. 17に、特に洪水時のハイドログラフを拡大したものをFig. 18に示す。気候値による補正でもほとんどの降水イベントを再現しており、多くの流出イベントでハイドログラフが反応していることが見て取れる。しかし2006年9月に起こった降水イベントを明らかに過小評価しており、このイベントはMaeWang流域の雨量計観測値を用いた補正でのみ再現されている。以上より、マイクロ波や赤外線観測でとらえられる降水、すなわち降雨継続時間が長いイベント、あるいは背の高い雲からの降水イベントである場合にはGSMaPを月単位の気候値で補正することで洪水対策に有効な情報となりえるため、まったくの未観測流域での洪水対策には大きく貢献しうる情報であるといえる。一方でGSMaPデータには降水の空振りが含まれる可能性もあり、その補正を行ううえでも最低限の地上雨量計の設置が必要不可欠であるといえる。

5. おわりに

低密度観測地域に新規に雨量計を設置する場合に、流域平均的な降水量を捉えるために効率的な雨量計配置を行うための指標について考え、さらに流域平均値が得られた場合にそれが洪水計算にどのような影響を与えるかについて検討し、以下の知見が得られた。

- 標高と重心からの距離を用いて、流域代表性の高いメッシュの存在範囲を推定する指標を開発した。
- 実流域で指標の妥当性を検証した。
- 流域平均降水量が得られた場合、それを用いた流出計算を行うと過小評価傾向を示すことが分かった。
- 地形標高に応じて降水分布を外的に与えて流出計算を行うことで、洪水計算精度が向上することが示された。
- GSMaPはそのままでは過小評価傾向にあり、気候値による月単位の補正で一定の洪水検出能力が得られる。
- マイクロ波の観測間隔の長さに伴う降水イベントの空振りが存在し、その補正には最低限の地上雨量計データが必要不可欠である。

さらに

- 熱帯流域の洪水再現において、流出率をパラメータ化することで精度の向上が見られた。

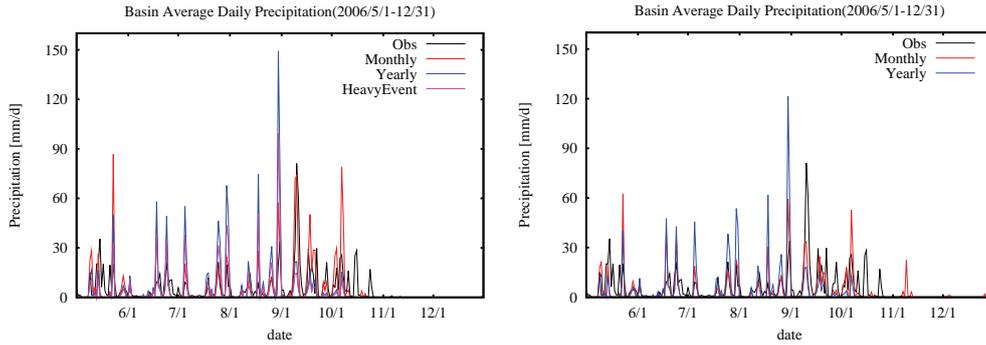


Fig. 3 GSMaP precipitation corrected with rain-gauge data (upper: in-situ rain gauge, lower: APHRODITE)

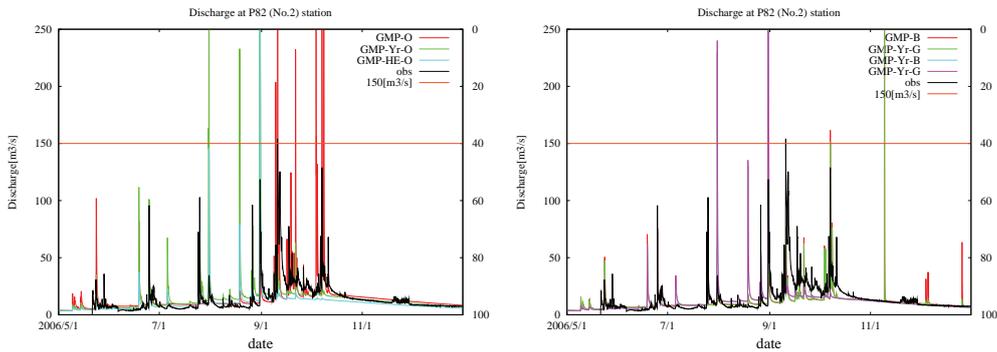


Fig. 4 Simulated Hydrograph with corrected GSMaP (upper: in-situ rain gauge, lower: APHRODITE)

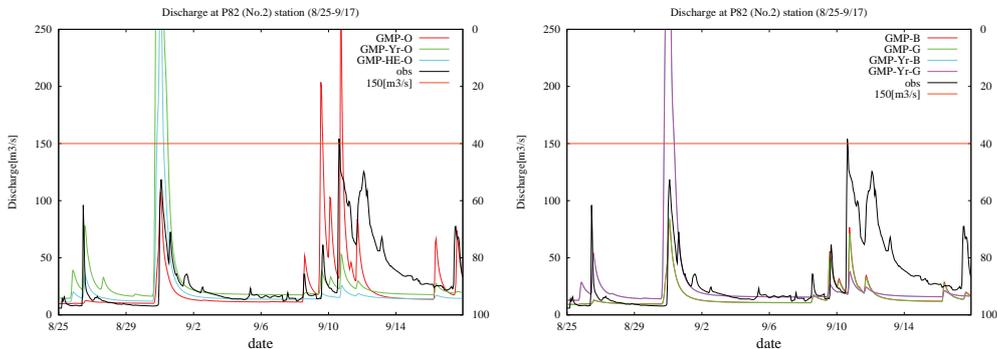


Fig. 5 Simulated Hydrograph with corrected GSMaP in September 2006 (big flood event) (upper: in-situ rain gauge, lower: APHRODITE)

謝 辞

本研究は GEOSS 採択研究 (テーマ 2-2) アジアモンスーン域での水循環・気候変動に関する観測研究又は技術開発: 「地球観測による効果的な水管理の先導的実現」(代表: 沖大幹) のサポートを得て実施されました。本稿執筆に当たり, 東京大学生産技術研究所沖大幹教授, 小森大輔研究員, 及びタイ王立灌漑局(RID; Royal Irrigation Department)の Thada Sukhapunphan 氏には, GEOSS 観測データの利

用にあたり, 貴重なデータと共に適切な助言と援助を頂きました。またオムコイレーダーの利用に際しては, 京都大学大学院理学研究科の里村雄彦教授, 東京大学大学院農学生命科学研究科の蔵治光一郎講師, 東京大学理学系研究科の横井寛研究員より貴重なデータと助言を頂きました。APHRODITE プロダクト利用の際には, 総合地球環境学研究所の谷田貝亜紀代助教を初めとするプロジェクトメンバーの方には, 小さな質問にも丁寧に対応していただき, 様々な助言をいただきました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 文部科学省・気象庁・環境省・経済産業省 (2007) : IPCC 第4次評価報告書統合報告書政策決定者向け要約(Summary for Policymakers), 22pp.
- 関井勝善・ポール ジェームス スミス・小尻利治(2007) : 分布型を考慮したAI手法による実時間流出予測モデルの構築, 水文・水資源学会誌, 20(4), pp.329-339.
- 立川康人・佐山敬洋・宝 馨・松浦秀起・山崎友也・山路昭彦・道広有理 (2007) : 広域分布型物理水文モデルを用いた実時間流出予測システムの開発と淀川流域への適用, 自然災害科学, pp.189-201.
- 瀬戸心太・芳村 圭・沖 大幹 (2007) : 高分解能衛星降水マップによる日本域の洪水検出能力, 土木学会水工学論文集, 52, pp.355-360.
- 小森大輔・生駒栄司・宮崎 真・沖 大幹・安形 康・鼎 信次郎・里村雄彦・白木克繁・田中賢治・中尾忠彦・根本利弘・芳村 圭 (2007) : 全球地球観測システム(GEOSS)採択研究「地球観測による効果的な水管理の先導的実現」に基づくタイ国Mae Wang 流域におけるリアルタイム水文気象観測データモニタリングの展開, 水文・水資源学会誌, 20(3), pp.235-241.
- Kojiri T, Hamaguchi T, Ode M. 2008. Assessment of Global Warming Impacts on Water Resources and Ecology of a River Basin in Japan. Journal of Hydro-environment Research, 1, 164-175.
- 立川康人・永谷 言・寶 馨 (2003) : 分布型洪水流出モデルにおける空間分布入力情報の有効性の評価, 京都大学防災研究所年報, 46B, pp.233-248.
- Kubota T, Shige S, Hashizume H, Aonashi K, Takahashi N, Seto S, Hirose M, Takayabu YN, Nakagawa K, Iwanami K, Ushio T, Kachi M, Okamoto K. 2007. Global Precipitation Map using Satelliteborne Microwave Radiometers by the GSMaP Project : Production and Validation. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 45(7): 2259-2275.
- Mapiam PP, Sriwongsitanon N. 2008. Climatological Z-R relationship for radar rainfall estimation in the upper Ping river basin. ScienceAsia, 34, 215-222.
- Tanaka K, Ikebuchi S. 1994. Simple Biosphere Model Including Urban Canopy (SiBUC) for Regional or Basin-Scale Land Surface Processes. Proc. of Intl. Sympo. on GEWEX Asian Monsoon Experiment, pp.59-62.
- Tanaka K, Fujihara Y, Watanabe T, Kojiri T, Ikebuchi S. 2006. Projection of the impact of climate change on the surface energy and water balance in the Seyhan River Basin Turkey. Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE, 50, pp.31-36.

A Study on Real-time Flood Estimation in Tropical Poorly-gauged Basins

Kenichiro NAKANISHI*, Kenji TANAKA, Daisuke KOMORI**, Taikan OKI** and Toshiharu KOJIRI

*Graduate School of Engineering, Kyoto University

**Institute of Industrial Science, the University of Tokyo

Synopsis

This study aims to develop a new installation guideline of rain-gauge networks for the flood management in poorly gauged basins, whose area is about 500 ~ 1000 km². So in this study a guideline was estimated with detailed precipitation distribution data from OmKoi radar data, and was validated with gauged data in MaeWang basin. In addition The GSMaP (Global Satellite Mapping of Precipitation) product is expected to detect flood events in un-gauged basins, but generally underestimate the amount of precipitation. So Bias in GSMaP was corrected with in-situ precipitation, and then GSMaP had a potential for flood detection.

Keywords : poorly-gauged basins, flood management, installation guideline of rain gauges, topographic features, GSMaP