

## 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 25 年 6 月 11 日現在

機関番号：16401

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22580288

研究課題名（和文） GPS 支援型流域水循環モデルの開発とその適用による四国地域の水循環機構の解明

研究課題名（英文） Development of the GPS-aided water cycle model over the Shikoku Island and its application to hydrological phenomena using the GPS data

研究代表者

森 牧人（MORI MAKITO）

高知大学・教育研究部自然科学系・准教授

研究者番号：60325496

研究成果の概要（和文）：

本研究では四国地域を対象に、GPS（Global Positioning System）の測位データを活用可能な GPS 支援型流域水循環モデルが開発されると共に、GPS 可降水量データを用いることにより対象域の水循環について調べられた。また、大気中-地表間の水の滞留時間が計算され、GPS 可降水量と降水の関係について解析された。さらに、同モデルの流域への適用例が示され、併せてモデルの基盤となる、地形・蒸発散量・日射量の広域分布が推定された。

研究成果の概要（英文）：

In this study, a model was developed to investigate the regional water cycles over the Shikoku District in Japan using the global positioning system (GPS) data. Data of GPS-derived precipitable water vapor were analyzed to estimate the time-scale on which the water is exchanged between lands and the atmosphere. Relation of GPS-PWV to precipitation was also analyzed as a case study. Spatial distribution of potential evapotranspiration was clarified along with topographic elevation and solar radiation over the study area.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	3,000,000	900,000	3,900,000
2011 年度	200,000	60,000	260,000
2012 年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,700,000	1,110,000	4,810,000

研究分野：農業気象学・環境水文学

科研費の分科・細目：農業工学・農業環境工学

キーワード：GPS、GPS 可降水量、水循環

## 1. 研究開始当初の背景

近年、世界中の多くの流域で大雨や渇水という相反する水文気象事象が顕在化しつつ

ある。流域水循環という視点から見れば、大雨は水循環過程の収束、渇水は切断とみなすことができる。循環経路の収束や切断を可能

な限り抑え、「流域水循環を健全に維持すること」は人間生活を持続的なものとする。世界的な人口・水需要増加の背景の下、水循環維持の重要性は以前にも増して高まりつつある。

さて、最近の流域を特徴づける主要な要素として、「都市化」と「地球温暖化」が挙げられる。前者は都市型洪水を直接誘発し、他方、後者は大雨・渇水の頻発の遠因であることは今や世界の共通認識である。もはやその進行を止めることができない都市化や温暖化を尻目に、流域の水循環は確実に変調を来しており、現在はまさに流域危機の時代と呼ぶことができる。そのような中、流域の水循環機構の実態解明は学術的に要請される急務の課題といつてよい。

流域の水循環は第一近似的に降水-流出-蒸発の過程で説明される。地上部には気象観測点や河川の水位・流量観測点が設けられていることが多く、地表水の挙動は十分に理解されていると言つてよい。

しかし、その反面、降水の元となる大気中の水蒸気の動態はあまり知られておらず、加えて、降水と水蒸気の関係は測定が困難なことも手伝ってその詳細が完全に解明されているわけではない。

Bevisら(1992)による先駆的研究から約17年、全球測位システム〔GPS(Global Positioning System)〕の測地データを基に「GPS可降水量」(例えば、森ほか、2006)が十分な精度で評価可能になった。「GPS可降水量」とは、単位面積当たりの大気柱(対流圏スケールの高さを持つ)に含まれる水蒸気(単位はmm)のことであり、GPS観測点毎にその値を求めることができる。

四国地域のみならず国内にはGPS観測点(国土地理院設置)が多数配置され、同観測点の配置密度はアメダス気象観測点(気象庁)に匹敵し、対流圏スケールの水蒸気量と地上における降水量の関係が高い空間分解能で観測できる体制が整っている(2009年10月現在、全国で約1200点)。

研究代表者らは最近、北部九州におけるGPS可降水量と大雨の関係に関する事例解析を行い、可降水量の変動に基づいた大雨の予測手法について検討した(森ほか、2007a)。また、GPSを活用したいくつかの研究成果も同時に得られている(森ほか、2006;森ほか、2007b、c)。しかし、他の研究者の成果を含めても、「流域の水循環」という観点からGPSを応用した研究例は多くない。また、既述の国内GPS観測点のデータについても、測地学分野における解析は活発に進められているが、GPS可降水量の水文学的利用はそれに比べれば少ない。

本研究では四国地域を対象に、GPSの測位データを活用可能なGPS支援型流域水循環モ

デルを開発すると共に、GPS可降水量データを用いることにより対象域の水循環について調べた。また、同モデルの流域への適用例を示すとともに、併せて同モデルの基盤となる、地形・蒸発散量・日射量の広域分布の推定を行った。

## 2. 研究の目的

流域の水循環は概念的に理解されているが、地域性も手伝って十分な理解までは至っていない。流域における大気中の水蒸気に関する知見の不十分なことが主な原因である。近年、地殻変動のモニタリングに整備されている国内GPS観測網から大気中の水蒸気量に関する情報(GPS可降水量)が抽出できるようになった。

本研究ではこの点に着目し、大気中の水蒸気の動態や水蒸気と降水量の関係を高い時空間密度で明らかにするとともに、GPSデータの活用可能なGPS支援型流域水循環モデルの開発を行うことを目的とする。また、同モデルを実際の流域に適用し、流域の水循環について検討するとともに、水文現象に関わりの深い、流域内の地形・蒸発散量・日射量の空間分布についてGPSデータを援用して推定する方法も併せて開発する。

## 3. 研究の方法

本課題は四国地方を研究対象流域とする。その理由としては、まず、同地域が国内においても稀にみるほど大雨と渇水の両事象の発生頻度が高い点が第一に挙げられる。すなわち、流域水循環の収束や切断が極めて発生しやすい地域という理由で設定する。

第二の理由は四国地域の地形が閉じていることである。多くの河川から成る同地域は一種の複合流域といつてよい。一般に地域の水循環を明らかにする上では、閉鎖系であることが望ましい。周囲を海に囲まれた四国地域はそれを近似的に満たし、本研究の対象地域として適当と判断される。

本研究では対象域に高密度で点在するGPS観測点(電子基準点;図1)の測位データを解析することにより、各点のGPS可降水量を算出した。また、併せてアメダス観測点で得られる気象データ(風速・気温・降水量)を用いた(図2)。また、GPS可降水量と降水の関係についても事例的に詳細に調べた。本研究では対象地域の流出現象が地表面上を流れる地表流と地下を流れる地下水流の2種類の水流により駆動されると見なすことにより、流域内の洪水現象をモデル化した。水の流れについては、前者はキネマテックウェーブ則に、後者はダルシー則により規定されると仮定した。いずれについても、流れを水頭で表現し、それを時間に対する予報変数とすることにより、地表流と地下水流に関する

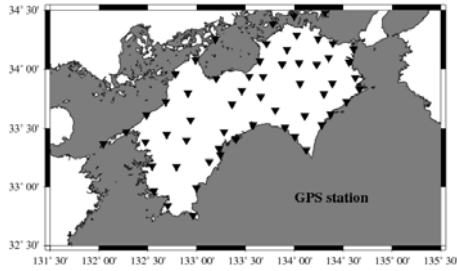


図1 四国地域におけるGPS観測点(電子基準点)の配置

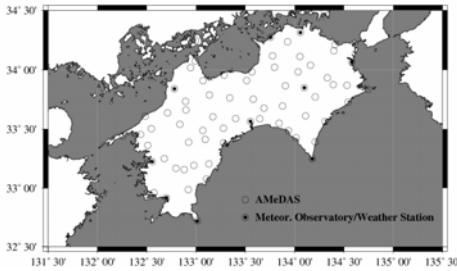


図2 四国地域におけるアメダス気象観測点(気象庁)の配置

計算を行った。モデルの基礎式には、入力と出力に相当する降水量と蒸発量を含み、地表水と地中水の流れを明確に区別するために、両者を分離する係数をパラメータとして導入した。なお、基盤データとして国土地理院による標高データセットおよびGPSと関連の深いジオイド高データを用いた。

#### 4. 研究成果

##### (1) 流域水循環に関する時間スケールの大局的把握

対象域の水循環機構を大局的に把握するために、まず、GPS衛星の測位データから得られるGPS可降水量の季節変化について調べられた。南国として知られ、年間を通じて温暖な気候下であり、四国を代表する高知市を

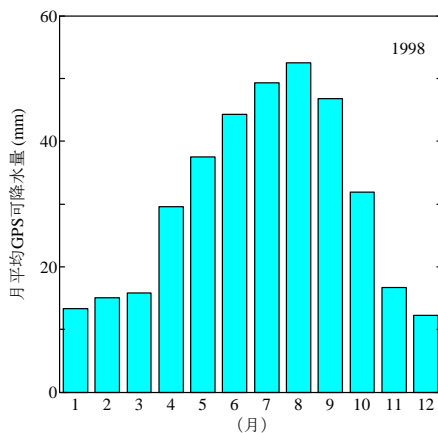


図3 高知市におけるGPS可降水量の月別変化(平均値)

解析対象地点に選定した。また、いわゆる「高知豪雨」に見舞われ、同市が甚大な被害を被った1998年を対象年とした。図3は月別のGPS可降水量の変化を表す。同降水量は明瞭な季節変化を示し、最小値は12月(12mm)、最大値は8月(53mm)であり、各月の値から計算される年間の平均値は30.4mmである。1998年の降水量は9月の豪雨の影響を受け4383mmであった。後者の前者に対する割合(144.1)から換算される水蒸気の平均滞在時間は約2.5日(降水量の平年値に対しては約4.3日)であり、対象域のこれが水循環の代表的な水循環のスケールと見なすことができる。

##### (2) 大雨と可降水量の応答

降水は水循環を主として支配する重要な要素である。他方、水蒸気は降水の源であるが、両者の関係は必ずしも明白ではない。ここでは、日降水量が120mmに達した1998年10月7日およびその前後を対象期間として、GPS可降水量と降水量の時間変化及び両者の関係について調べた。その結果、GPS可降水量は大雨日の前日に徐々に増加し、10月7日当日及びその翌日にかけて、むしろ徐々に減少する様子が明らかとなった。大雨の発生には事前の可降水量の連続的増加、すなわち、水蒸気の蓄積が重要になることを事例的に明らかにした(図4)。

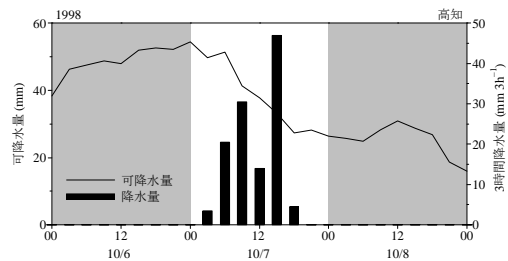


図4 高知市におけるGPS可降水量と3時間積算降水量の関係(1998年10月6~8日)

##### (3) 降水量とGPS可降水量の気候学的関係

図5は1996~2002年にかけての月別の降水量とGPS可降水量の関係を表す。降水量は月ごとの変動が激しく、また、多雨年(1998-2000年)と少雨年(1996, 1997, 2001, 2002年)に区別できるほど年ごとの年降水量の差も大きい。他方、可降水量は規則正しい季節変化を示し、7ないし8月に最大値をとる。水循環システムにおいて降水の供給側(水蒸気)と受給側(地上)では同じ水であっても状態が異なればそれらの振る舞いも大きく異なることが明らかとなった。

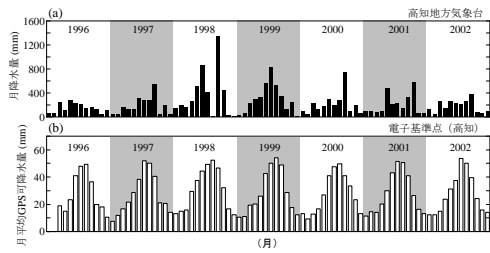


図5 高知市における降水量(上図)とGPS可降水量(下図)の月別変化(1996~2002年)

(4) 地形・ジオイド高データを用いた開空率・日射量の推定

流域内の日射量は降水とともに水循環に最も影響を与える要素であり、同時に地形により大きく制約を受け、傾斜や斜面方位によって地面が受けるエネルギー量にも差が生じる。ここでは、地形を考慮した日射量データを作成した。初めに、国土地理院の50mメッシュの地形データとジオイド高データを用い、四国の楕円体高データを作成した(図6)。そこから地形を考慮した天空率(水平面を1とした時の天空が見える割合、ただし最大を1とした(図7))。続いて、アメダス観測網のデータからメッシュ化された(水平面)日射量を直達成分と散乱成分に分離し、楕円体高から求めた地形の傾斜と方位に応じて斜面が受ける直達成分を補正した。また、散乱成分を開空率に応じて按分した。1999年7月の日平均日射量を図8に例示する。山の南側斜面で日射量が高く、北側斜面では低くなるのが分かる。また、平地と比べて雲の出現頻度の高い山地では日射量が少なく、地形を詳細に考慮することにより、四国域の日射量の分布を詳しく把握できることが示されたといえる。

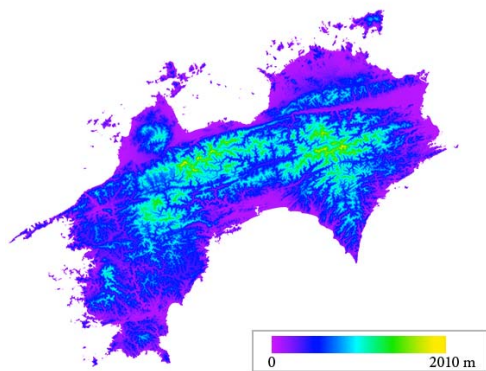


図6 四国地域の楕円体高の分布

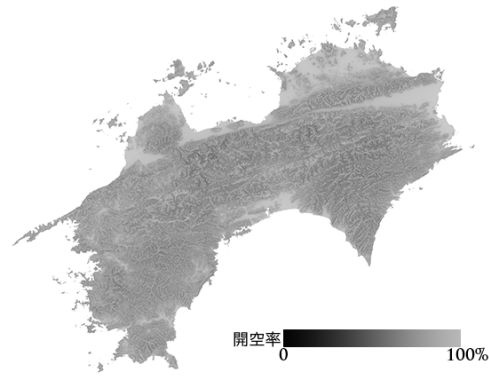


図7 四国地域の開空率の分布

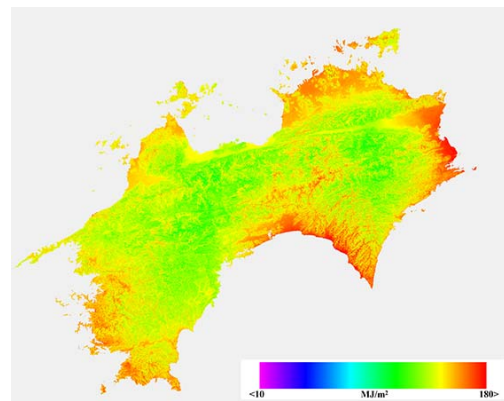


図8 四国地域の日射量分布に関する推定結果

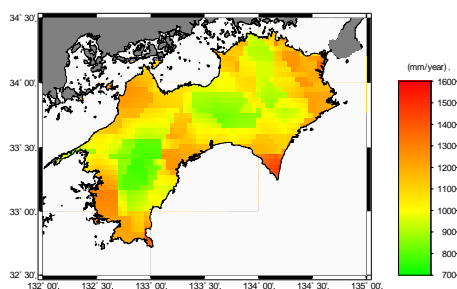
(5) GPS 可降水量を用いた広域的な蒸発散量の推定

GPS 観測点から構成される観測網(図1)はGPS 可降水量が評価可能であるが、それに基づき、地上付近の水蒸気圧や蒸発量が月単位もしくは日単位で推定可能なことが代表者らの過去の研究により示されている。アメダス観測網では湿度を測定しておらず、本来、蒸発量の評価に困難を伴うことが多かったが、GPS を使って補うことによりそれが可能となる。ここではそれを広域的に拡張し、同網から得られる気象要素データを併用することにより、日単位でポテンシャル蒸発散量を評価した。図9は各GPS 地点毎に得られた値を年間で積算した結果を表す。同蒸発散量の空間分布がよく再現されており、この結果はGPS を援用することにより、アメダス観測点のみでは難しかった蒸発散量の推定が可能なることを示すものである。

(6) 水循環モデルの開発

図10は四国地域中南部の河川を想定して計算された降水と河川水位の応答の計算

例を示す。同図は約 40 日間の計算結果であるが、降水と水深の増加がよく対応している様子が読み取れる。これまでの流出モデルでは蒸発散の過程は単純化されてモデルに取り込まれることが多かった。GPS 観測網はアメダス観測点では得られない地表近くの水蒸気情報の提供が可能である。GPS 観測網より得られる情報を適切に取り入れることにより、水蒸気の情報と顕わに組み込んだ水循環モデルの構成が可能なが示唆される。



四国地域における年蒸発散位の分布 (1998年)

図 9 四国地域におけるポテンシャル蒸発散量の広域的分布

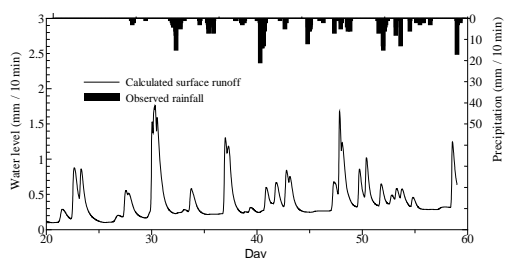


図 10 降水イベント毎の降水量の水深の対応関係 (40 日間の観測値と計算値)

## 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)

[学会発表] (計 8 件)

①森牧人ほか, 2013: Numerical Simulation of Variability of Soil Moisture Observed at a Steep Slope near the Ridge, Shikoku, Japan. International Symposium on Agricultural Meteorology (ISAM2013), 2013 年 3 月 28 日, 石川県立大学 (石川県).

②森牧人ほか, 2012: Development of the DEM system in a hydrological model to simulate the water environment in the Shikoku district. The 6th International Symposium on the East Asia Environmental Problems (EAEP2012), 2012 年 11 月 7 日, 九州大学伊都キャンパス (福岡県).

③森牧人ほか, 2012: An analysis of the

observed diurnal ranges in Shikoku District, Japan. International Symposium on Agricultural Meteorology (ISAM2012), 2012 年 3 月 17 日, 大阪府立大学 (大阪府).

④森牧人ほか, 2011: Daily estimation of relative humidity using GPS-derived precipitable water vapor. The 5th International Symposium on the East Asia Environmental Problems (EAEP2011), 2011 年 11 月 14 日, 福岡ガーデンパレスホテル (福岡県).

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

森 牧人 (MORI MAKITO)

高知大学教育研究部自然科学系・准教授

研究者番号: 6 0 3 2 5 4 9 6

### (2) 研究分担者

松岡 真如 (MATSUOKA MASAYUKI)

高知大学教育研究部自然科学系・准教授

研究者番号: 50399325

安武 大輔 (YASUTAKE DAISUKE)

高知大学教育研究部自然科学系・准教授

研究者番号: 9 0 5 1 6 1 1 3