

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 2 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25820222

研究課題名(和文) 高層気象観測と大気陸面データ同化によるカンボジア局地循環性降水のメカニズム解明

研究課題名(英文) Toward better understanding of the mechanism of the locally-induced precipitation in Cambodia through radiosonde observation and its data assimilation for regional climate model simulation

研究代表者

辻本 久美子(Tsujimoto, Kumiko)

東京大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：80557702

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、定常的な高層気象観測が実施されていないカンボジアにおいて、独自に2地点、同時に高層気象観測を実施し、その観測結果と領域気象モデルを併用することにより、季節的に湖面積が大きく変動する巨大湖・トンレサップ湖とその周辺陸域との間で形成される乾季前半の局地循環性降水のメカニズムについて検討した。

衛星及び地上で観測された降水量との比較により、2地点での昼間の高層気象観測データを同化するだけでも、当該降水の推定精度が向上することが示された。既往研究では夜間特有の現象に着目していたが、それに加え、昼間の湖風循環の発達や、それに寄与する昼間の陸域地表面フラックスの推定精度が重要であることがわかった。

研究成果の概要(英文)：Radiosonde observation in Cambodia was conducted in this project, since there is currently no operational one. The sondes were released simultaneously from two stations in Cambodia, from paddy and from the Tonle Sap Lake. The observed data were used for the data assimilation for the regional climate model simulations with WRF, in order to clarify the mechanism of the locally-induced nocturnal precipitation over the rain-fed agricultural area at western country.

Through the comparison with the observed precipitation both from satellite and ground, it was shown that the simulated precipitation by WRF with data assimilation has been improved even only with day-time observation data. The simulated results also showed that not only night-time phenomena but also the development of the day-time lake-breeze circulation as well as the surface heat fluxes from various land-use types over land during daytime are the key for the better estimation of the nocturnal local precipitation in this region.

研究分野：水文学

キーワード：降水予測 領域気象モデル データ同化 ゾンデ観測 大気陸面相互作用 湖陸循環 カンボジア

1. 研究開始当初の背景

カンボジアの中央には、東南アジア最大の淡水湖と言われるトンレサップ湖という巨大湖が存在する。この湖面積は、乾季には琵琶湖の約3.3倍(約2,400km²)であるが、メコン川およびカンボジア平原の自然氾濫原としての役割を果たしているため、雨季の終わりには乾季の5倍程度まで拡大する。季節によって1年の中で大きく湖面積が拡縮するのは、世界でも稀に見る特徴である。

一方、カンボジアにおける農地灌漑率は1~2割と低く、農業用水のほとんどは雨水や湖水に依存している。その中で、トンレサップ湖の氾濫水を乾季農業に利用している実態は従来から広く注目を集め、国内外の研究者らにより研究されてきた(図-1)。これに対し、本研究が着目するのは、湖から離れた地域における間接的利用形態である。これは、湖の存在によって局地循環流で発生する降水を、湖から直接取水できない、遠く離れた地域の住民が利用している可能性を指す。実際に、カンボジア西部山岳域では乾季にも雨が降ることが知られており、現地語で「乾季の雨」は、「幸福」を表すシンボルとして使われている。さらに、筆者がこれまで数値モデル出力解析によって行った検討結果からは、湖の存在によって局地循環流が形成され、それによって湖西~100km範囲で乾季前半に降水が生じやすいことが示されている。この地域がちょうど穀倉地帯に該当していることから、「湖の存在→局地循環流生成→降水生起」という間接形態でも湖が農業に貢献していることが示唆される。

しかしながら、カンボジアではラジオゾンデによる現業での高層気象観測が実施されておらず、全球客観解析データに当該域上空の地上由来データが含まれていないという問題点がある。上記の湖の存在やその季節変化に伴う多様な独特な地表面が広範囲にわたって存在していることを考えると、周辺地域とは異なる大気場が形成されている可能性が高く、周辺国の高層気象観測のみでは捉えきることができない現象が存在している可能性がある。そこで本研究では、独自に高層気象観測を実施し、それに基づいてデータ同化した領域気象モデル計算値を用いて、当該域の降水メカニズムに関して検討した。

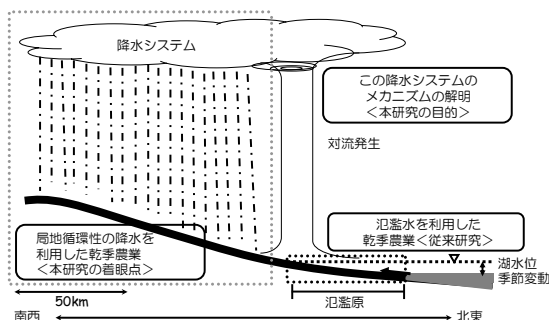


図-1 湖水の直接的利用形態(従来研究)と間接的利用形態(本研究の着眼点)の概念図。

2. 研究の目的

本研究では、まず、カンボジア現地において、ラジオゾンデによる高層大気場の現地観測を湖陸で同時に行う。当該地域の現業観測データがないことから、このデータは、本研究課題に限らず、今後様々な研究を進めていく上で、現状を知るための貴重なデータセットとなると考えられる。

そして、観測したデータを用いて現地の状況を解析・検討するとともに、データ同化手法を用いて数値領域気象モデルと併用することで、この地域の局地循環性降水をもたらしているメカニズムについて検討し、その理解を深める。

その上で、当該地域の水資源管理や農地管理、防災対策の上で、今後、どのような現地データがあれば、本地域の降水量をより高い精度で予測することができるか、検討する。

3. 研究の方法

本研究では、数値領域気象モデル、現地観測、衛星観測を相補的に併用しながら、大量域の降水メカニズムについて検討を行った。具体的には、次のようである。

まず、対象域であるカンボジア上空について、数値領域気象モデルで大気場の計算を行った。この際、入力に用いた主なデータは、領域計算の初期値・側方境界値としての全球大気モデル出力結果と、下部境界としての湖域に関する衛星観測データ、湖面温度に関する現地観測データである。

次に、同様の計算を、ゾンデ観測データで大気場をデータ同化しながら実施した。この際、データ同化対象は、本研究で集中観測として実施した2地点のデータのみ、とした。

その上で、2つの計算結果について、地上観測による降水量および衛星観測による降水量と比較しながら、その違いをもたらす原因について検討した。

(1) 数値領域気象モデル

対象域における大気の状態(の推定値)を3次元空間で時系列として得るために、数値領域気象モデルを用いた。モデルとしては、アメリカ大気研究センター(NCAR)が開発・公開しているWeather Research and Forecasting Model(WRF)(引用文献①)を用いた。このモデルを用い、対象域について、大気場の計算を行った。領域計算に用いる初期値・側方境界としては、米国立環境予測センター(NCEP)が作成・公開している全球客観解析データFNL(水平解像度:経度1.0度、緯度1.0度)(引用文献②)を用いた。

(2) 現地観測

① 降水量データ:2009年以降、筆者らがカンボジア水資源気象省と連携して整備・維持管理を行ってきたカンボジア国内の自記雨量のうち、27地点について、対象期間の降水量データが利用可能である(図-2)。

- ② 高層気象データ：2013年11月8日から2013年11月19日にかけて、カンボジア国内の2地点で同時に、計34回のラジオゾンデによる高層気象観測を行った。安全管理上の問題から、昼間を中心に行ったが、1日のみ、終夜連続して観測を行った。ゾンデ放球地点は図-2の星印で示した2地点であり、トンレサップ湖の湖上 Chong Khneas 地点(北緯 13.2 度, 東経 103.8 度)と湖西部の水田上 Pursat 地点(北緯 12.5 度, 東経 103.9 度)である。
- ③ 地表面乱流フラックスデータ：2地点のゾンデ放球地点では、渦相関法による乱流フラックスも測定した。
- ④ 湖水温データ：ゾンデを放球した Chong Khneas 地点では、湖面温度及び湖水温度も観測した。前節(1)で記載した領域気象モデルでの計算時には、ここで観測した湖面温度を湖面全体に均一に与えた。

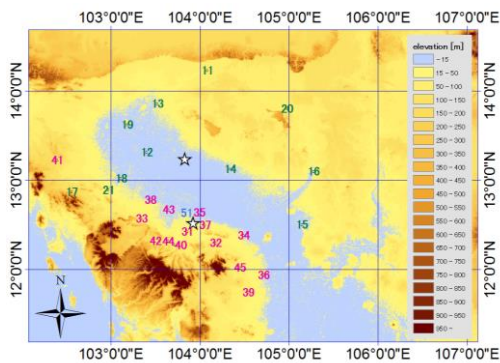


図-2 現地観測地点。図の左下の水色部分は海洋(タイ湾)、中央の水色部分はトンレサップ湖。☆印がラジオゾンデ放球および地表面乱流フラックス観測地点、数字が地上雨量観測地点で、緑色地点は0.2mm/count、桃色地点は0.5mm/count、青色地点は1.0mm/countの転倒ます自記雨量計。

(3) 衛星観測

① 湖域の特定：前述のように、トンレサップ湖の湖面積は大きな季節変化を示すため、既存の土地利用データセットを用いることは適切ではない。本研究では、水循環変動観測衛星「しずく」(GCOM-W)に搭載される高性能マイクロ波放射計2(AMSR2)の高周波(89GHz 分解能:5km×3km)観測データから推定したデータを、WRFの下部境界条件として用いた(図-3)。

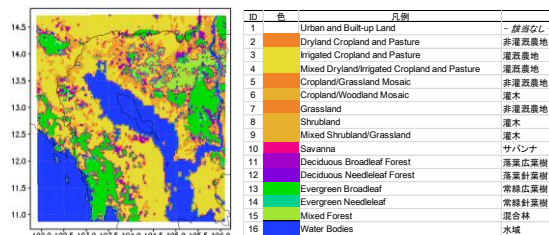


図-3 AMSR2により推定したこの時期の湖水域。湖域中の黒色閉曲線が地図上で定義される湖域。その他の土地利用はアメリカ地質調査所(USGS)作成データ(引用文献③)。

- ② 海面温度データ：海面温度については、米国国立環境予測センター(NCEP)海洋モデリング・解析部(MMAB)が全球客観解析データとして提供しているデータセット(水平解像度:経度0.5度,緯度0.5度,日単位)(引用文献④)を用い、海上については、WRFの下部境界条件として外的にこれを与えた。
- ③ 降水量データ：宇宙航空研究開発機構(JAXA)が作成・公開している衛星降水量プロダクト(GSMaP)の再解析データ(MVK, ver.6)(引用文献⑤)を、地上降水量データ((2)①)と併せ、計算結果の検証に用いた。
- (4) データ同化

NCAR作成・公開の3次元変分法に基づくデータ同化システムWRF 3DVARを用いた。

4. 研究成果

(1) 研究の主な成果

筆者による数値計算でこれまで示唆されていたように、乾季前半(11月頃)にトンレサップ湖西部の平野部で、深夜から早朝にかけて降水が発生しやすいことが、地上観測および衛星観測降水量データから確認された。

この降水現象について、対象期間内のある1日について、2:00, 3:00, 4:00, 5:00(現地時刻)の結果を図-4に左から順に示す。上段から、WRF計算結果-同化なし、WRF計算結果-同化あり、衛星観測降水量を示す。

図-2に示した標高データと照らし合わせてみると、データ同化をせずにWRFで計算した場合には、湖南西部の山岳部で降水が生じる一方、データ同化を行うと、降水域がより南東に移動し、湖岸の山麓平野部で降水が生じている。計算領域全体(約450km四方)の中では位置の差異は小さく見えるものの、現地住民にとっては、より多くの人々が暮らし、農業を営んでいる山麓平野部の農村地帯で降水が卓越するか、人々が少ない山岳域で降水が卓越するか、ということは、乾季の貴重な水資源管理にとって、重要であると考えられる。また、本地域の実際の降水現象が、南西山岳部ではなく山麓平野部で生じていることは、衛星降水量データからも支持される。

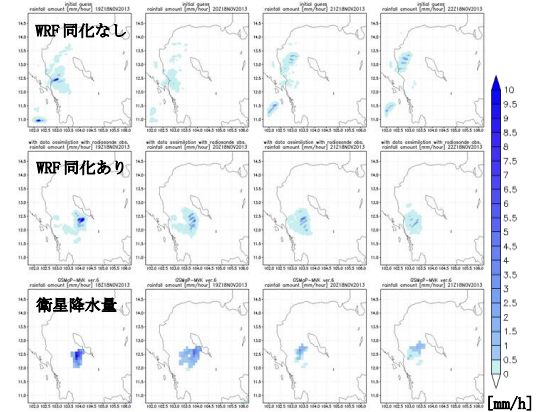


図-4 2013年11月19日深夜～早朝の降水量。左より、2:00, 3:00, 4:00, 5:00(現地時刻)。上段より、WRF計算結果-同化なし、WRF計算結果-同化あり、衛星観測降水量の結果。

特筆すべきこととして、この日の夜間にはゾンデ観測を実施しておらず、前日(11月18日)の昼間に3時間毎に実施したのみである。18日18時(現地時刻)にゾンデ観測を行い、この時刻についてデータ同化を行った以降は、翌日19日6時のゾンデ観測実施まで、データ同化は実施していない。また、本研究で実施したデータ同化手法は3次元変分法であり、ゾンデ観測時刻の解析値のみに対して修正を加えており、4次元変分法のように同化期間を与えているわけではない。それにもかかわらず、18日~19日にかけての深夜~早朝の降水域の推定結果に違いが出た原因について、検討した。

当該夜間の降水生起プロセスについて詳しく解析してみた結果、湖東側の陸域から流入する東風の影響を強くうけていることがわかった。図-5に深夜1:00における地表面付近の水平風ベクトルと温位の分布を示しているが、同化を行わない場合には湖上も含めて強い東風が卓越する一方、同化を行った場合には、東風の流入は東部湖上のみで止まり、西部湖上は北東風が吹き、その風速は同化なしの場合の東風に比べてかなり小さくなっている。その結果、同化を行わない場合には、湖上を吹走した強い東風が北緯13度、東経103度付近で北東風と収束し、地形の影響を受けながら、山岳部で降水をもたらしている。一方、同化を行った場合には、湖上を吹走した北東風が、湖西部湖上で発達した上昇流(引用文献⑥)と収束合体し、風下側の湖西部平野で降水をもたらしている。その結果、図-4に示すような同化の有無による降水域の違いが生じたと考えられる。

そこで次に、この東風の強さが同化によって変化する原因について検討した。図-6に前日の夕方17:00の状態を示す。同化を行うことによって、昼間の湖風がより強くなり、湖風循環が強まっている様子がみられる。

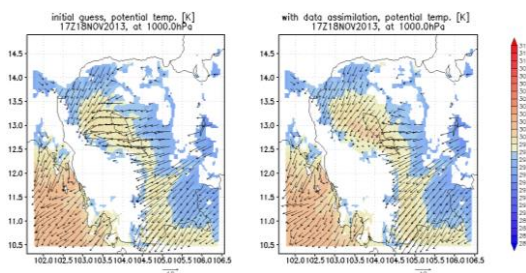


図-5 水平風と温位の分布。深夜0時。1000hPa面。同化なし(左)と同化あり(右)。

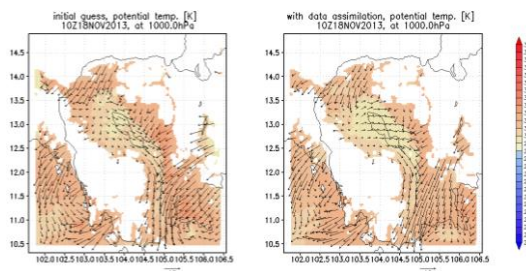


図-6 図-5と同様。ただし、前日夕方17時。

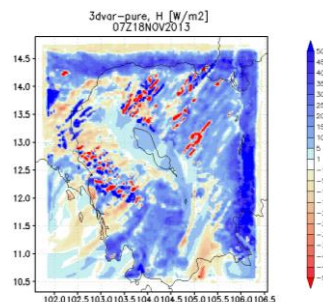


図-7 前日昼間14時の顕熱フラックス計算値の差分(同化あり-同化なし)。

昼間の湖風循環の強さに差異が生じる原因について検討した結果、昼間の地表面からの顕熱フラックスの計算結果が同化の有無によって大きく異なることがわかった。図-7に、前日の昼間14時における顕熱フラックスの計算値の差異を示す。同化をすることによって、湖西側陸域(図-3参照、水田域)では顕熱が減り、湖東側陸域(図-3参照、森林域)では顕熱が増えている様子が見られる。水田地帯では、この時期には稲の生育期であり、湛水を行っている。WRFで用いている陸面過程モデルでは、湛水を前提とした水田モデルは組み込まれておらず、畑地灌漑を前提としているため、実状よりも顕熱を過大評価してしまった可能性がある。なお、同化あり計算時に推定された水田および湖面上の顕熱・潜熱フラックスは、第3章(2)節③項に記載した現地観測フラックスとよく合致していた。一方の東側森林域では、同化を行わない場合には、何かしらの原因によって、顕熱を小さめに算定してしまった結果、東側での昼間の湖陸間の熱的差異が小さくなり、湖風循環が弱まってしまったと考えられる。

以上から、同化を行わない場合には、湖東側陸域の昼間の湖風循環が比較的弱く計算される結果、夕方以降の東風の流入が比較的容易になり、比較的大きな風速で夜間に湖上に侵入していると考えられる。

昼間のゾンデ観測と気象データ同化のみによって夜間の降水域推定に改善がみられたのは、以上の原因によると考えられる。これまで、当該域の夜間の降水現象については、夜間の湖陸の熱的差異のみに着目して解析を行ってきたが、昼間の湖風循環の生成強度によって夜間降水プロセスが大きな影響を受けることを見出したのは、本研究から得られた大きな成果の一つである。

(2) 得られた成果の国内外における位置づけとインパクト

低緯度熱帯地域における湖陸循環の実態について、特に現地観測に基づく既往研究は国際的にも少なく、コリオリ力の影響が小さい中でどのような環境が形成されるのか、明らかになっていない部分も多い。その中で本研究では、地上観測の中でも実施が比較的困難な高層気象観測と地表面乱流フラックス

観測を湖陸同時に実施し、貴重なデータを収集した。また、そのデータを用いて、領域気象モデルと併用することによって、全球データセットや数値モデル計算だけでは十分に明らかにできない当該地域の湖陸循環の実態と降水への影響について検討し、理解を深めた。熱帯地域の水循環は、深い対流活動を通して水とエネルギーを大気高層に輸送することで、その地域の水循環のみならず、広域の大気水循環に影響を与えているとも指摘されていることから、この地域の独特な湖陸循環に伴う大気水循環の様相を明らかにすることは、この地域の水資源管理のみならず、より広域の降水予測や水資源管理、防災にも寄与することができると思われる。

一方で、ラジオゾンデによる気象観測を本地域で定常的に実施するにはいまだ多くの困難が存在しているが、本研究の成果から、風速場の実態把握が重要であることが示されたことから、カンボジア国において近年導入された地上レーダーのデータを用いて風速場をデータ同化するだけでも、当該降水の予測精度を向上させることが期待できる。

(3) 今後の展望

カンボジアの地上レーダーによって観測される風速場をWRFで同化することによってどの程度の降水予測精度向上が期待できるか、検討したいと考えている。

また、本研究では、水田と湖上の地表面乱流フラックスのみに着目したが、検討結果から、湖東部の森林上での地表面フラックスの影響も大きいことが示されたため、この地域の森林地帯の地表面フラックスについて、現状を把握することに努め、水田モデルと併せて、WRFにおける陸面過程モデルの改良を実施したいと考えている。

<引用文献>

- ① Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, M. G. Duda, X.-Y. Huang, W. Wang, and J. G. Powers, 2008: A Description of the Advanced Research WRF Version 3. NCAR Tech. Note NCAR/TN-475+STR, 113 pp. doi:10.5065/D68S4MVH (<http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/>)
- ② National Centers for Environmental Prediction, National Weather Service NOAA U. S. Department of Commerce, 2000, NCEP FNL Operational Model Global Tropospheric Analyses, continuing from July 1999, doi: 10.5065/D6M043C6, (<http://rda.ucar.edu/datasets/ds083.2/>)
- ③ USGS Products, (https://lta.cr.usgs.gov/glcc/globaloc2_0#app3)
- ④ NCEP, Real-time, global, sea surface

temperature (RTG_SST) analysis, (<http://polar.ncep.noaa.gov/sst/operator/Welcome.html>)

- ⑤ JAXA, (http://sharaku.eorc.jaxa.jp/GSMaP/index_j.htm)
- ⑥ Tsujimoto, K. and T. Koike, Land-lake breezes at low latitudes: the case of Tonle Sap Lake in Cambodia, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 118, pp. 1-12, 2013.

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2件)

- ① 玉川 勝徳, Mohamed RASMY, 小池 俊雄, 辻本 久美子, 会田 健太郎, 藤井 秀幸, 増本 隆夫, 陸面データ同化手法を用いたカンボジア・プルサット観測点での土壌水分推定手法の検討, 土木学会論文集B1(水工学), 査読有, Vol.71-4, 2015, pp. I_409-I_414, <http://ci.nii.ac.jp/naid/130005123603>
- ② 辻本 久美子, 小池俊雄, インドシナ半島における夏季アジアモンスーン開始と大気-陸面相互作用, 土木学会論文集B1(水工学), 査読有, Vol.70-4, 2014, pp. I_295-I_300, <http://ci.nii.ac.jp/naid/130005070229>

[学会発表] (計3件)

- ① 辻本久美子, 小池俊雄, 田中健路, 会田健太郎, 玉川勝徳, カンボジア・トンレサップ湖周辺域における湖上と水田地帯での乱流フラックス観測, 日本農業気象学会, 2016年3月15日, 岡山大学津島キャンパス(岡山市北区津島中)。
- ② Kumiko Tsujimoto, Toshio Koike, Kenji Tanaka, Kentaro Aida, Katsunori Tamagawa, Tetsu Ohta, Koki Homma and So Im Monichoth, Observation and numerical modelling of surface fluxes over paddy around the Tonle Sap Lake Area in Cambodia, International Symposium on Agricultural Meteorology, Okayama, 16 March 2016, Okayama University, Tsushima-naka, Kita-ku, Okayama.
- ③ Kumiko Tsujimoto and Toshio Koike, Effect of lake area change by basin development on the rainfall at the environs of Tonle Sap Lake in Cambodia, American Meteorological Society (AMS) 94th Annual Meeting, 3 February 2014, Atlanta, USA.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

辻本 久美子 (TSUJIMOTO, Kumiko)
東京大学・大学院工学系研究科・助教
研究者番号：80557702

(4) 研究協力者

小池 俊雄 (KOIKE, Toshio)
田中 健路 (TANAKA, Kenji)
玉川 勝徳 (TAMAGAWA, Katsunori)
会田 健太郎 (AIDA, Kentaro)
太田 哲 (OHTA, Tetsu)
増本 隆夫 (MASUMOTO, Takao)
SO IM Monichoth