

# MTSAT の輝度温度情報による雲分類手法を用いた インドシナ半島周辺域における雲の気候特性

The Cloud Climatology over Indochina Peninsula by using Cloud Classification based on MTSAT Brightness Temperature

北海道大学大学院工学院 ○学生員 渡部大和 (Yamato Watanabe)  
北海道大学工学研究院 正員 山田朋人 (Tomohito Yamada)  
北海道大学大学院工学院 学生員 Dwi Prabowo Yuga SUSENO

## 1. はじめに

近年世界各地では大雨による洪水や、熱波による干ばつなどの極端現象が多発している。2011年、タイ国で発生した大洪水もそのひとつである。この洪水の原因は、雨季(5~10月)の総雨量が過去30年平均の143%に上り、とりわけ7月及び9月の月雨量が過去30年で最も多かったこと、例年約1.5個の台風や熱帯低気圧が来襲していたタイ国において同年は5個の台風、熱帯低気圧の影響を受けたことが挙げられる<sup>1)</sup>。周知の通り、海水は太陽熱によって温められ、蒸発し雲となり、雨を降らせ、川を流れて再び海へと戻る地球水循環システムにおいて、雲は地表と大気の情報繋ぐ、大気陸面相互作用の中心的役割を担っている。例えば、モンスーン地域では巻雲の地域分布が放射収支に対して重要な役割を果たすとの指摘がなされている<sup>2)</sup>。また、地表面下数センチの土壌水分量は、雲の生成過程の早期の段階に影響を与えると指摘されている<sup>3)</sup>。さらに、雲の生成過程のみではなく、降水量と土壌水分の偏差との間の相関関係も見出されている<sup>4)</sup>。

一方、これらの雲に関する水文気象の研究を実施するためには広域スケールをカバーする高時空間分解能を有する雲情報が必要不可欠であるが、タイ国を含むインドシナ半島において頻繁に発生する、積乱雲の発達に伴ってもたらされる突発的豪雨など、局所的スケールを議論するには現在適当なデータは存在しない。定点観測によって雲量の推定は世界各地で実施されてきたが、雲の種類、とりわけ豪雨イベントをもたらす積乱雲の抽出は困難であり、かつ観測の困難な地域においては雲に関する長期トレンドの研究は不可能である。そこで、人工衛星によるリモートセンシング技術を用いた雲分類の研究が1980年代から開始された。中でもNASAの主導で開発されたISCCP(International Satellite Cloud Climatology Project)では、1983年から2008年の25年分の雲分類データが作成され<sup>5)</sup>、現在でも広く使用されている。ISCCPデータは全球をカバーするものであるため、全球スケールにおける放射収支の長期トレンド等の研究には極めて有用であるが、空間解像度は200~300km、時間解像度は3時間であり、局所的スケールを議論するには時空間解像度が十分であるとは言い難い。

Inoue や Feidas は複数波長の近赤外放射データによるダイアグラムを用いた雲分類手法を提案している<sup>6), 7)</sup>。それらは衛星画像の分類に関して多くのデータを必要と

する。そこで Suseno and Yamada は静止気象観測衛星 MTSAT(Multi-functional Transport Satellite)の近赤外放射データを用い、上記研究よりも少ない情報で雲分類を可能とする手法を提案した<sup>8)</sup>。これらの雲分類データを用いて前述のタイ国で大洪水を起こした2011年のインドシナ半島周辺地域において、雲という観点からみた同年の気候特性を明らかにする。本研究では、インドシナ半島周辺地域における積乱雲の日内特性について解析を行う。

## 2. 使用データと雲分類手法

### 2.1 使用データ

本研究で使用したデータは、気象衛星ひまわり MTSAT の IR1(Infra-red 1 10.8  $\mu\text{m}$ )と IR2(Infra-red 2 12.0  $\mu\text{m}$ )のデータである。対象期間は1996年から2011年までの5月から11月までである。MTSATの観測範囲は、東経80.02度~西経160.02度、北緯59.98度~南緯59.98度である。MTSATは1時間に1回のデータを取得する。尚、1996年から2003年まではMTSATの前身であるGMS(Geostationary Meteorological Satellite)のデータを、2003年から2005年まではGOES(Geostationary Operational Environment Satellite)のデータを用いた。これら3種類のキャリブレーションデータは全て高知大学のデータベース <http://weather.is.kochi-u.ac.jp/>より取得した。

### 2.2 分類手法の概要

本研究における雲分類はMTSATのIR1とIR2から得られる輝度温度情報を元に、二次元アルゴリズムを作成し、それに基づいて行われる。雲を含めた地表面の輝度温度はおおよそ288K前後であり、ウィーンの法則より求められる卓越波長はおおよそ10 $\mu\text{m}$ となる。さらに、split window と呼ばれるIR1とIR2との間に存在するに氷と水への吸収特性の差を利用することで、より容易に雲の分別することが可能となる。これらの理由から、MTSATに搭載されている5つの波長帯(可視波長(0.55~0.9 $\mu\text{m}$ )、近赤外1波長(IR1; 10.3~11.3 $\mu\text{m}$ )、近赤外2(IR2; 11.5~12.5 $\mu\text{m}$ )、近赤外3(IR3; 6.5~7.0 $\mu\text{m}$ )、近赤外4(IR4; 3.5~4.0 $\mu\text{m}$ ))のうち、本研究ではIR1とIR2を使用した。そして、IR1とIR2によって得られた輝度温度情報を使用し、雲頂高度によって輝度温度が異なるという特性から雲の種類を分類する。

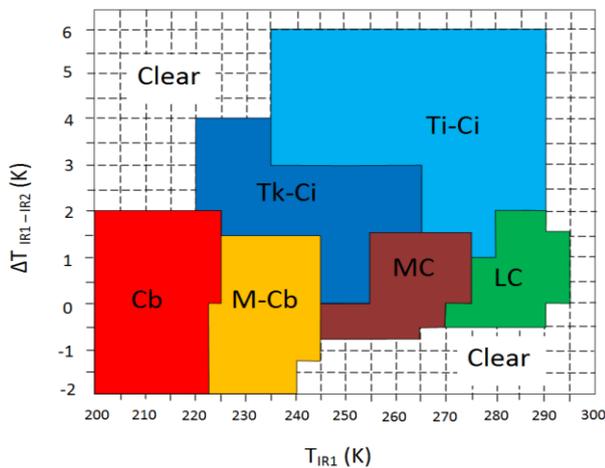


図-1 本研究において使用する雲分類ダイアグラム<sup>8)</sup>  
 横軸は近赤外 1 波長により得られた輝度温度を、  
 縦軸は近赤外 1 波長と近赤外 2 波長で得られた輝  
 度温度の差を示す。

本分類手法は 2010 年 6 月から 9 月の日本並びに日本近海を対象に作成されたものである。可視画像と、IR1 と IR2 による輝度温度画像を照らし合わせ、可視画像中に積乱雲を観察できた同じ地点の IR1 による輝度温度情報を読み取り、同地点における IR1 と IR2 の輝度温度の差を読み取る。これを積乱雲以外にも巻雲、低層雲、中層雲、晴天など 6 種類の雲と快晴の計 7 種類全てにおいて行った。それぞれの雲を伴うイベントを 41 事例選び、1 枚につき 54 万個の格子点を抽出し、最尤法分類を用いて各グリッド内で最も多い割合を占める値をそのグリッドの代表値として扱うこととした。以上より得られた代表値の結果を雲毎に示したものが図-1 である<sup>8)</sup>。尚、図-1 中の Cb は積乱雲(cumulonimbus)、M-Cb(Mutual Cumulonimbus)は積雲、Tk-Ci(Thick Cirrus)は厚い巻雲、Ti-Ci(Thin Cirrus)は薄い巻雲、MC(Middle level cloud)は中層雲、LC(Low level cloud)は低層雲、Clear は晴天を表す。この雲分類手法を低緯度地域にも適用し、得られた結果の一例を図-2 に示す。本研究の成果のひとつは、人工衛星 MTSAT の複数の近赤外放射データから得られる輝度温度情報を元に、Suseno and Yamada<sup>9)</sup>により開発された雲分類アルゴリズムを用いて、東・東南アジア地域において 1996~2011 年の 16 年分の 5 月~11 月までの 7 カ月分、1 時間毎の雲分類データを作成したことである。

### 3. インドシナ半島域における積乱雲の出現特性

1 章で紹介した通り、2011 年のタイ国は度重なる豪雨によって大洪水が発生し、未曾有の被害となった。著者らは、本研究で使用する雲分類手法を 6 月~8 月のインドシナ半島域に適用し、2011 年のインドシナ半島域における積乱雲の出現特性について平年値(1996~2010 年)との比較を行った<sup>9)</sup>。ここではその結果に加え、同年の出現特性を台風という組織的に出現する積乱雲と取り除き、熱雷的な積乱雲のみを対象とした出現特性とを比較

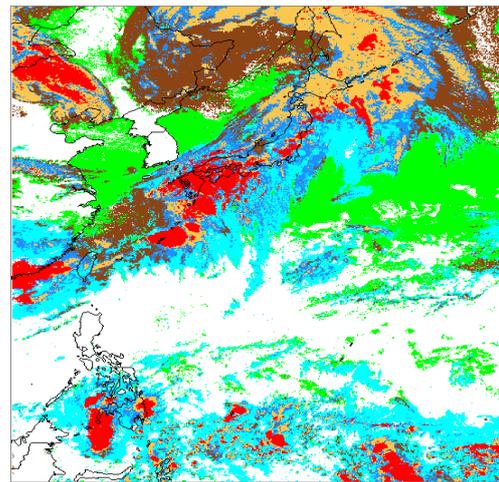


図-2 雲分類結果の一例 (赤色は Cb、オレンジ色は M-Cb、水色は Ti-Ci、青色は Tk-Ci、茶色は MC、緑色は LC、白色は晴天を示す。)

し、考察する。尚、2011 年 6 月から 8 月の期間にインドシナ半島域に來襲した台風はハイマー及びノックテンであり、対象とする範囲内で観察された期間は、ハイマー(台風 4 号)が 6 月 23~25 日、ノックテン(台風 8 号)が 7 月 29~31 日である。2011 年の 1 時間毎に得られた雲情報を調べたところ、インドシナ半島東側の海上から時間的に大きな形状を維持したまま同半島に上陸した組織的な積乱雲を観察したのはこの期間のみであった。以後、台風を取り除いた積乱雲とは、上記の期間を考慮しない、すなわち 86 日間の情報を解析した結果を指す。

### 3.1 積乱雲の発生頻度

ここで積乱雲の発生頻度とは、1 時間毎に得られた雲分類結果の各グリッドにおいて積乱雲の判別した回数を足し合わせ、そのグリッド毎の回数を対象とする期間(92 日×24 時間)で割ったものである。著者らの研究によると、2011 年のタイの雨季は概ね 0.8~1.2 割の頻度で積乱雲が発生していたこと、2011 年は平年に対してチャオプラヤ川上流域からラオス中部にかけて 2~6 割程度積乱雲の発生頻度が高かったことが指摘されている。これらの理由として 2011 年は La-Niña 年であり、同海域の海面水温が平年よりも高く、海面からの水蒸気量供給の多さが積乱雲を頻発させていたことが考えられる<sup>9)</sup>。さらに、図-3a に同年インドシナ半島域に出現した積乱雲の発生頻度を示し、図-3b は図-3a と同領域に來襲した台風発生時を除いた期間を対象とした、積乱雲の発生頻度との差を示す。これより、同年にインドシナ半島域に出現した台風によって、南シナ海東部、ベトナム北部沿岸、メコン川上流域、タイ国ナコンサワン周辺で 1~3%程度同地域に出現した積乱雲を増加させていたと解釈することが可能である。すなわち、ハイマー及びノックテンが対象とする期間、領域においてもたらした積乱雲の出現は、同期間に出現した積乱雲のうちおよそ 12~30%程度を占めたとと言える。加えて、上記の地域は、台風ハイマーとノックテンの通過時の経路を明瞭

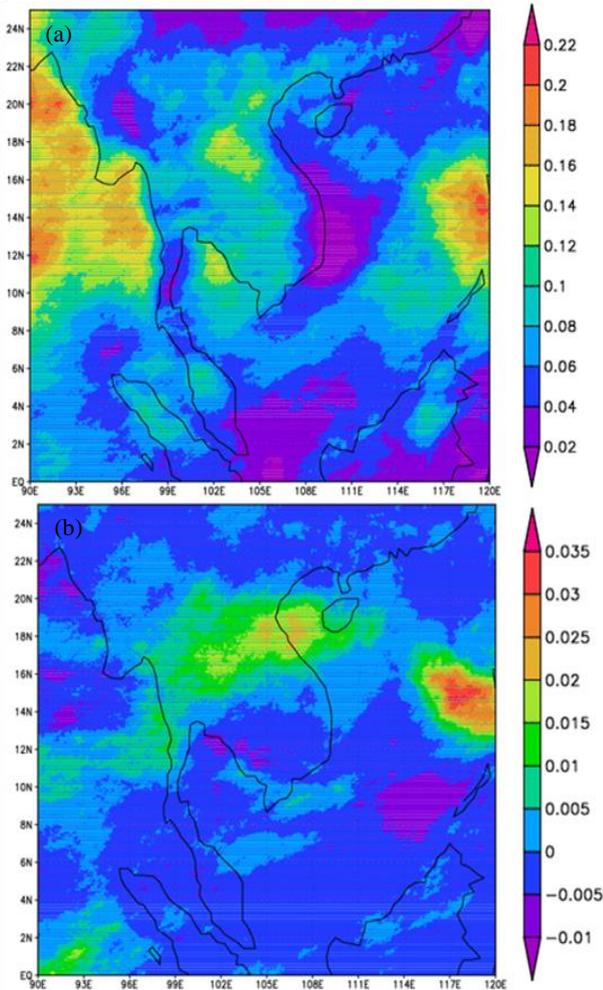


図-3 東経 90～120 度、赤道～北緯 25 度、2011 年の 6～8 月を対象とした、(a)積乱雲の発生頻度と(b)同期間における積乱雲の発生頻度と台風を除いた積乱雲の発生頻度の差。

に表わすものである。

### 3.2 積乱雲の卓越時刻

図-4a,4b,4c はそれぞれ対象期間を異とする積乱雲の卓越時刻を示す。卓越時刻とは図-4a は平年（1996～2010年）を対象とし、図-4b は 2011 年、図-4c は 2011 年のうち、台風イベントを取り除いたものである。いずれも対象とする月は 6～8 月で、表示する時刻は全て現地時刻(LST)である。図-4a からインドシナ半島東部のメコン川流域では夜中から夜半にかけて積乱雲が卓越するのに対して、半島西部のチャオプラヤ川流域ではメコン川流域に比べおよそ 2 時間早い時間帯に積乱雲が卓越することがわかる。また、インドシナ半島南部やインドネシアのスマトラ島北部では島を横断するように積乱雲の最も発生する時刻が夕方から早朝に遷移している。これは半島の地形と海陸熱コントラストに起因する日内変動であろう。Takahashi らは、1998～2007 年の 6～8 月の TRMM(Tropical Rainfall Measuring Mission)による降雨強度のデータを元に検証した結果、平年値においてベンガル湾とタイ湾の東側の海域では、早朝に強降雨の雨が多いとの指摘がなされている<sup>10)</sup>。また原田らによって積乱雲を含む全ての雲の発生する日内特性について GMS を用いて検証した結果、タイ湾上では日の出頃(6LST)に雲の発生の最盛期となることを指摘しているが<sup>11)</sup>、図-5a においてバンコク南方のタイランド湾やアンダマン海では、積乱雲の発生数が卓越する時刻がこれらの結果と同様であることが明白である。

一方、図-4b は図-4a と同じ方法で 6～8 月の 2011 年のみを解析した結果を表す。前節で述べたように、2011 年にインドシナ半島に積乱雲が発生した頻度は、平年に対し 2～6 割多かったが、図-4a と図-4b を比較すると、積乱雲が最も多く出現する時刻の地域分布には明瞭な違いがないことが明らかである。さらに、図-4b 及び図-4c から明らかなように、2011 年のインドシナ半島に襲った台風を除いた積乱雲のみの卓越時刻と、台風を含む

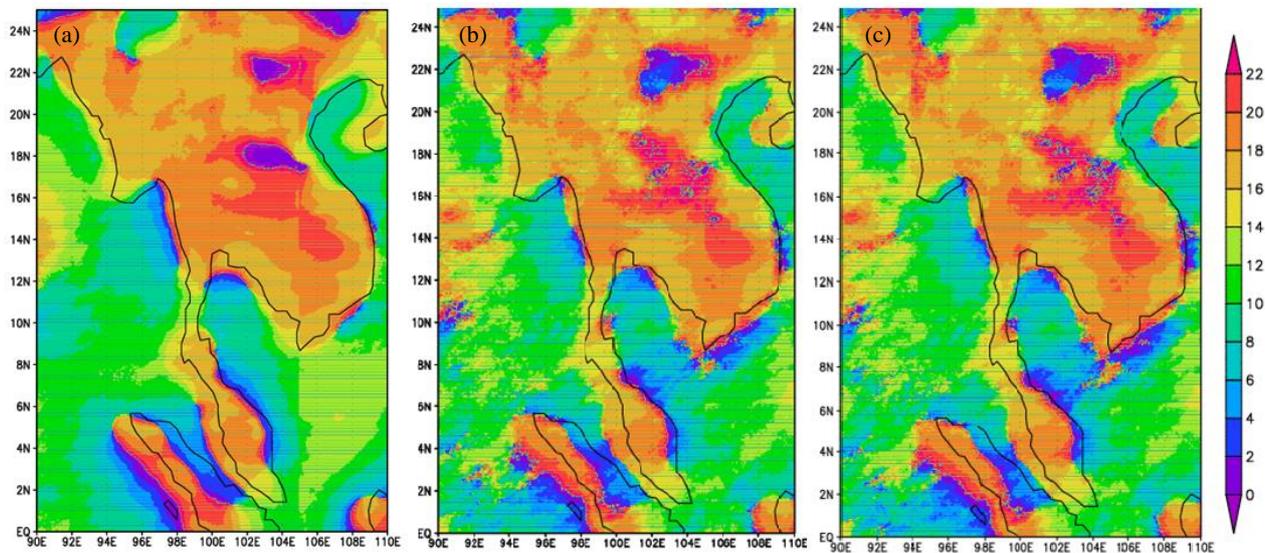


図-4 東経 90 度～110 度、赤道～北緯 25 度、6～8 月を対象とした、積乱雲の卓越時刻(LST) (a)は平年(96-10年)、(b)は 2011 年、(c)は 2011 年のうち、台風を取り除いた結果を示す。

全ての積乱雲の卓越時刻とでは、タイランド湾南部、マラッカ海峡、メコン川上流域で多少の変化が確認できるものの、上記の地域を除く領域では、とりわけ前節で議論を行った台風の影響で積乱雲の発生頻度が増加した南シナ海東部、ベトナム北部沿岸、メコン川上流域、タイ国ナコンサワン周辺地域において、卓越時刻に大きな差はみられなかった。すなわち、タイ国において大洪水を起こした 2011 年は、積乱雲の発生頻度自体は平年よりも高かったが、豪雨をもたらす要因である積乱雲の出現サイクルの日内変化には、2011 年と平年との間に大きな変化は存在せず、台風による日内変化への影響も存在しなかったと推測される。この結果は、日射により大気下層が温められ、大量の水蒸気と熱を持った小気塊によって強い鉛直不安定を引き起こすことで雲の発現を伴う対流が起り、季節平均で見るとまさに極端な積乱雲の発生頻度であっても日内サイクルは強い定常性を維持していることを示すものである。バンコク西方アンダマン海では、数キロ毎に卓越時刻の遷移がみられるが、これは、海陸風の影響を如実に表わす結果と言える。

#### 4. まとめ

本研究では、タイ国に未曾有の洪水被害をもたらした 2011 年 6~8 月を対象とし、タイ国を含むインドシナ半島域における積乱雲の出現特性を明らかにした。2011 年はインドシナ半島域に出現した積乱雲は平年(1996~2010 年)に比べチャオプラヤ川上流域からラオス中部にかけて 2~6 割多かったが、最も積乱雲が卓越する時刻については、2011 年と平年で大きな変化はみられなかった<sup>9)</sup>。加えて、同年同期間にインドシナ半島域に襲った台風、ハイマー及びノックテンを取り除いた積乱雲の発生頻度と、台風を含む同地域に出現した全ての積乱雲の発生頻度との間には、南シナ海東部、トンキン湾、メコン川上流域、タイ国ナコンサワン周辺で 1~3% 差が存在した。つまり、これら 2 つの台風によって、同地域で発生した積乱雲のうち約 1~3 割の積乱雲がもたらされた。一方、卓越時刻については、平年の結果と 2011 年の結果と 2011 年のうち 2 つの台風がインドシナ半島域に襲った期間を取り除いた結果との間に顕著な差異を確認することができなかった。つまり季節スケールでは 2011 年の豪雨パターンが平年とは極めて異なるパターンであっても、1 日の中の積乱雲の発生パターンは過去 16 年間と類似し、さらにその日内変化は台風という組織的な積乱雲によって影響されていなかったことが判明した。

謝辞：本研究は文部科学省気候変動適応研究推進プログラム、科研費基盤 A「雲解像モデルと詳細な陸面パラメータを用いた広域大気陸面相互作用の総合研究」、IMPAC-T(Integrated study Project on Hydro-Meteorological Prediction and Adaptation to Climate Change in Thailand)とCREST(Core Research for Evolutional Science and Technology)、RECCA(Research Program on Climate Change Adoption)の成果の一部である。また、データの取得に関して、高知大学名誉教授、菊地時夫先生に多大

なるご協力をいただいたことをここに記し、心から感謝申し上げます。

#### 参考文献

- 1) Komori, D., S. Nakamura, M. Kiguchi, A. Nishijima, D. Yamazaki, S. Suzuki, A. Kawasaki, K. Oki and T. Oki: Characteristics of the 2011 Chao Phraya River flood in Central Thailand, *Hydrological Research Letters* 6 pp.41-46, 2012.
- 2) Shukla, B. P., V. Sathiyamoorthy, P. K. and Pal, P. C. Joshi: Effects of cloud types on cloud-radiation interaction over the Asian monsoon region, *Theor Appl Climatol*, 97 pp.287-295, 2009.
- 3) Taylor, C.H., and Ellis, R.J.: Satellite detection of soil moisture impacts on convection at the mesoscale, *Geophysical Research Letters*, Vol.33 L03404, 2006.
- 4) Schlemmer L., C. Hohenegger, J. Schmidli and C. Schar: Diurnal equilibrium convection and land surface-atmosphere interactions in an idealized cloud-resolving model, *Journal of the Royal Meteorological Society*, Vol.138, I664, 2012.
- 5) Evan, A.T., A. K. Heidinger and D. J. Vimont: Arguments against a physical long-term trend in global ISCCP cloud amounts, *Geophysical Research Letters*, Vol.34 L04701, 2007.
- 6) Inoue, T: An instantaneous delineation of convective rainfall areas using split window data of NOAA-7 AVHRR, *Journal of Meteorological Society*, 65(3), pp469-480, 1987.
- 7) Feidas, H. N., C. Cartalis and A. P. Cracknell: Use of Meteosat imagery to define clouds linked with floods in Greece, *International Journal of Remote Sensing*, Vol.21, No.5, pp1047-1072, 2000.
- 8) Suseno. D. P. Y., and Y. J. Yamada: Two-dimensional, threshold-based cloud type classification using MTSAT data, *Remote Sensing Letters*, Vol. 3, No.8, pp737-746, 2012.
- 9) 渡部大和、山田朋人、D.P.Y.Suseno : MTSAT による輝度温度情報から作成した東南アジアにおける雲の気候特性、*水工学論文集*第 57 巻、2013 (受理) .
- 10) H. G. Takahashi, H. Fujinami, T.Yasunari, and J. Matsumoto: Diurnal rainfall pattern observed by Tropical Rainfall Measuring Mission Precipitation Radar (TRMM-PR) around the Indochina peninsula, *Journal of Geophysical Research*, VOL. 115, D07109, doi:10.1029/2009JD012155, 2010.
- 11) 原田周平、沖大幹、虫明功臣 : GMS-IR データを用いたインドシナ半島域における対流活動の日内変化の解析、*水文・水資源学会誌*第 11 巻 4 号、pp371-381、1998.