

データ統合活用による 夏季インドモンスーン形成過程の研究

A PROCESS STUDY OF THE ONSET OF THE INDIAN SUMMER MONSOON
BY USING DATA INTEGRATION

谷口健司¹・小池俊雄²・生駒栄司³・喜連川優⁴

Kenji TANIGUCHI, Toshio KOIKE, Eiji IKOMA and Masaru KITSUREGAWA

¹学生会員 工修 東京大学大学院工学系研究科 博士課程 (〒113-8656 東京都文京区本郷七丁目3-1)

²正会員 工博 東京大学大学院工学系研究科 教授 (〒113-8656 東京都文京区本郷七丁目3-1)

³非会員 工博 東京大学空間情報科学研究センター 助手 (〒153-8904 東京都目黒区駒場四丁目6-1)

⁴非会員 工博 東京大学生産技術研究所 教授 (〒153-8505 東京都目黒区駒場四丁目6-1)

The formation of the strong westerly over the Arabian Sea, which is characterized as the onset of the Indian summer monsoon provides the monsoon rainfall in India. By integrating the data sets of precipitation, outgoing long-wave radiation, cloud amount and sea surface temperature, the seasonal march of the atmospheric and earth surface conditions are examined. Based on the detail investigation of the case of 1999 and 2001, two patterns of process of the monsoon onset are identified; one associated with a cyclone event and the other with the southwest advection into the Arabian Sea but not any cyclone. For the latter cases, this paper shows that a monsoon onset is controlled by the potential temperature gradient between the Arabian Peninsula and the Arabian Sea, and between the Iran-Pakistan region and the Arabian Sea.

Key Words : *Indian summer monsoon, Asian summer monsoon, interannual variability, data integration*

1. はじめに

近年注目されつつある様々な水危機問題の解決のためには、安定で効果的な水資源計画の実現が必要である。そのためには、中長期的な気候変動予測及び短期の気象予報においてもより高い精度が不可欠である¹⁾。また、アジア域においては夏季アジアモンスーンが社会・経済に大きな影響を与えるが、その季節進行あるいは年々変動の物理過程の大部分は明らかではない。夏季インドモンスーンに関しては、早くから、インド洋およびアラビア海上を通りインド亜大陸に吹き込む強い西風によって、インド亜大陸に水蒸気が運ばれ、降水がもたらされると考えられてきた。しかし、この強い西風の形成過程に関する詳細な理解は未だなされていない。

一方で、近年の観測技術の向上に伴い、様々な種類の有用な地球環境データが提供されるようになってきた。本研究では、これら多くの有用なデータを十分に活用し

ながら、先に述べたインドモンスーン開始期に着目してその形成過程の記述を行った。

2. データ統合活用

(1) データ

本研究では、夏季インドモンスーンの開始にあたる風系の形成に至る大気場の季節進行を詳細に追うために様々なデータを用いている。

夏季モンスーン期間における降水分布と季節変化をみるために全球降水気候計画 (Global Precipitation Climatology Project : GPCP) のデータを用いた。GPCPでは衛星搭載の赤外およびマイクロ波放射計等によって算定された降水データと現地観測による降雨量データとを合わせて作成した全球降水データを提供している。1979年から現在に至るまでの月平均降水量と、1997年から現在までの日平均降水量が入手可能である。また、熱

帯域における対流活動の指標として外向き長波放射（Outgoing Long-wave Radiation：OLR）も夏季モンスーンの記述に関して有用である²⁾。米国大気海洋庁（National Oceanic and Atmospheric Administrator：NOAA）では1975年から現在に至るまでのOLRデータが提供されている³⁾。日単位の季節変化を詳細に調べるためにこれらのデータを用いることとした。なお、空間解像度はGPCP降水データが1度×1度、NOAA OLRデータが2.5度×2.5度である。

風速、ジオポテンシャル高度、大気温度といった大気データに関してはNational Center for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research (NCEP/NCAR)の再解析データ⁴⁾を用いた。これらは空間解像度が2.5度×2.5度の日平均データである。

雲の季節変化には国際衛星雲気候計画（International Satellite Cloud Climatology Project：ISCCP）のデータ⁵⁾を用いた。時間解像度は3時間であり、日平均OLRデータでははっきりと示されない雲の存在をみることも可能である。空間解像度は2.5度×2.5度である。

海面水温は熱帯降雨観測衛星（Tropical Rainfall Measuring Mission：TRMM）搭載のマイクロ波放射計（TRMM Microwave Imager：TMI）による観測データを用いた。空間解像度は0.25度×0.25度であり、3日平均値が1997年12月からの各日に対して提供されている。

(2) データ統合活用

衛星観測技術の発達に伴い、雲水量、海面水温、降水、積雪など多くの地球環境データが高時間解像度・高空間分解能で得られるようになってきている。また、NCEP/NCAR再解析データ等の長期にわたる客観解析データが整備されてきている。これらのデータは年間数十テラバイトにも上る。膨大なデータから現象理解につながる知見を効率的に得るためには、従来気象学において行われてきた以上の統合活用を実現する必要がある、自然科学分野と情報学分野の融合が不可欠である。統合強化観測期間（Coordinated Enhanced Observing Period：CEOP）では、現地観測データ、衛星観測データ、数値モデルの出力を収集、保存し、時空間解像度の異なるデータを統合活用する研究を行い、両者の協力の下、高次の情報抽出を目指した研究環境の構築、解析手法の開発を行っている。このための大きな課題のひとつは、膨大なデータの使用と処理である。年間数十テラバイトに上るデータの蓄積は個人の計算機環境に収まるものではない。また、膨大なデータは利用されてこそ価値のあるものであり、広く利用が可能な環境の構築が望ましい。こうした要求から、データ処理はウェブブラウザを介しリモートサーバで行われ、全データ処理が終了すると、電子メールによって解析結果を公開したURLが通知されるよう設計された。たとえば、全球データに対する相関係数の計算時間は、対象となるデータの種類、期間が長期化すると

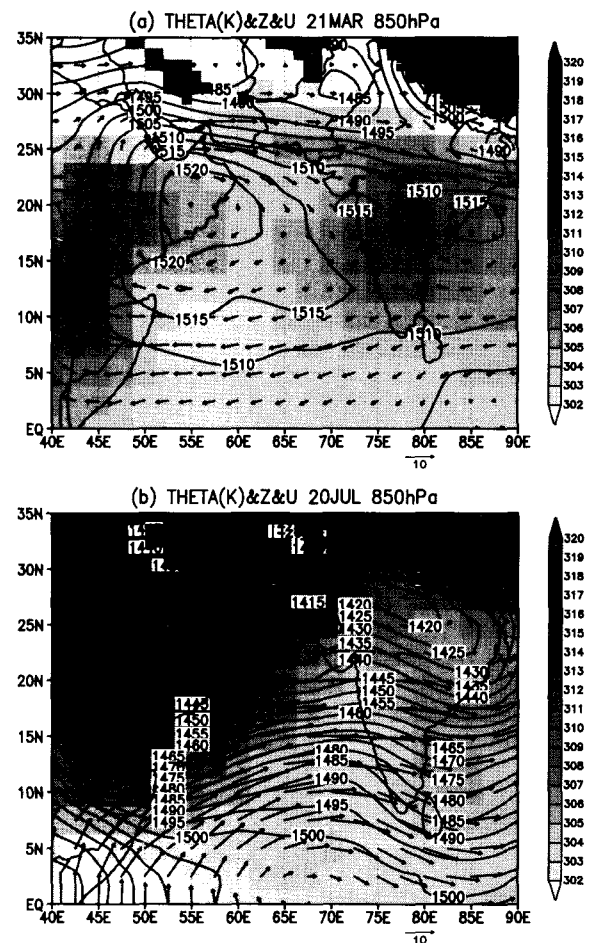


図-1 NCEP/NCAR再解析データ気候値による850hPa温位，風系，ジオポテンシャル高度。(a) インドモンスーン開始以前，(b) インドモンスーン成熟期。等値線がジオポテンシャル高度 (m) である。

もに急激に増加する。格納すべきデータ量からも高い計算機能力が必要とされ、膨大なデータの高速処理を行うには市販のパーソナルコンピュータでは追いつかない部分も大きい。そうした意味でも、こうしたシステムをネットワークを介して利用できる環境の構築は重要である。また、解析結果の可視化及び閲覧は無料で配付されているソフトウェアで可能である。

本研究はそのような研究の一環として、多様なデータを用いてひとつの現象解明に取り組んだものでもある。

3. 事例解析

(1) インドモンスーン

インドモンスーンの開始前後には明確な場の変化が生じる。図-1aはモンスーン開始以前の850hPaにおける温位，風系，ジオポテンシャル高度の分布である。なお、NCEP/NCAR再解析データによる気候値を用いた。一方、図-1bはインドモンスーン開始直後の大気場の様子である。図-1aではアラビア海の温位は周囲の陸域よりも低

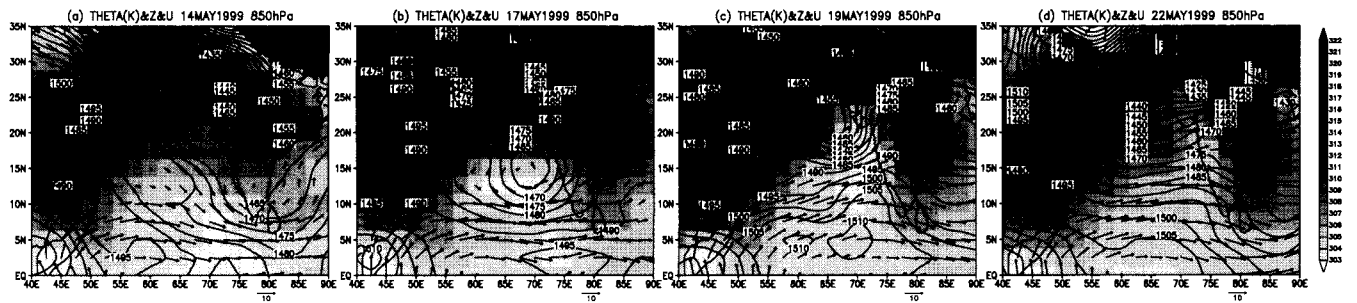


図-2 1999年における大気場の様子。

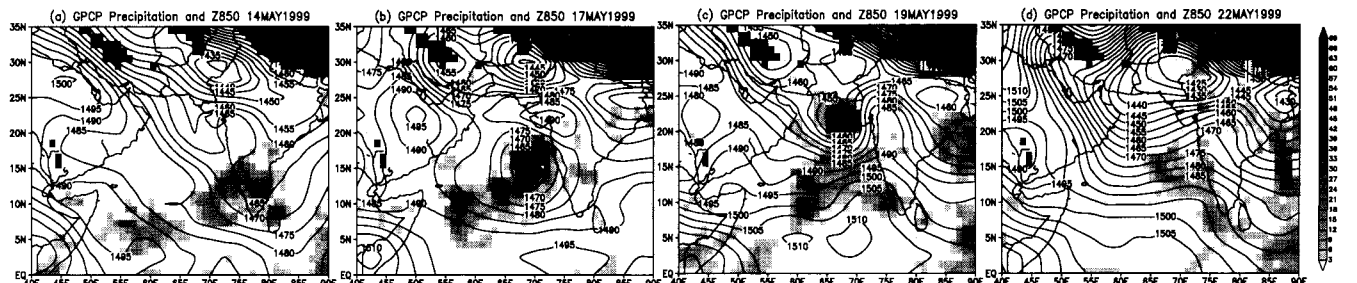


図-3 1999年のGPCP日平均降水量 (mm/日) と NCEP/NCAR再解析データの850hPaジオポテンシャル高度。

くアラビア半島からアラビア海にかけては高圧性循環場が存在している。この高圧性循環は、この領域が亜熱帯高圧帯に位置していることによって形成されるものと考えられる。一方、図-1bではアラビア海からインド亜大陸にかけて、等ジオポテンシャル高度線に沿って強い西風が吹き抜けており、これによってインド洋からアラビア海上の水蒸気がインド亜大陸に運ばれ、降水をもたらす。この強い西風の形成は夏季インドモンスーンの開始と同等のものといえる。温位の分布はアラビア半島からイラン、パキスタンといった陸域で高く、アラビア海やインド洋、そしてインド亜大陸西岸に低温領域が位置している。このような温位分布がモンスーンの西風を吹かせる気圧傾度を形成するのに不可欠と考えられる。

図-1aから図-1bに至る過程が夏季インドモンスーン形成までの季節進行である。この季節進行の詳細な事例解析を行った結果を次に示す。

(2) 1999年：サイクロンによる西風の形成

a) 5月14日：アラビア半島上の高圧性循環の弱まり

図-2aは1999年5月14日の大気場の様子である。インド亜大陸とイラン-パキスタン領域上の大気は加熱しており、アラビア海北部には陸域から北西風が吹き込んでいる。これによって陸域の暖かな空気がアラビア海上に運ばれることによって、同海上の温位が上昇している。アラビア半島上の温位も上昇し、同領域の高圧性循環場が弱まっている。北緯5度から10度においては西風が吹いているが、先に述べた北西風によって、アラビア海への吹き込みは妨げられている。

一方、図-3aは同日のGPCPの日平均降水量およびジオポテンシャル高度の分布であり、インド亜大陸南端に弱い降水域が見られる。

b) 5月17日：サイクロンの発生

アラビア海東部に降水域が発達しサイクロンが形成され、北上を始める (図-3b)。アラビア海およびインド南端付近の温位はやや低下するが、図-1bにみられたモンスーンの西風を吹かせるような大きな温度傾度を形成されるほどのものではない (図-2b)。

c) 5月19日：アラビア海東部の温位の低下

北上したサイクロンは非常に強い降水を伴ってアラビア海北端に達する。図-2cでは、アラビア海東部の温位が低下しているのが認められ、北緯5度から10度に吹く西風はサイクロン周辺の循環場を強化し、アラビア海およびインド亜大陸へ南西風が吹込むようになる。

d) 5月22日：インドモンスーンの開始

サイクロンは消滅し、降水も弱まる。アラビア海東部およびインド亜大陸西岸の温位は低いままとなっている。アラビア半島の温位は夏季インドモンスーンの成熟期におけるほど高くなっていないが、陸域と海域との温度傾度は大きくなっており、モンスーンの西風を吹かせる。

みてきたように、1999年5月14日はモンスーンの西風を形成するのに十分な大気状態ではないが、サイクロンによって温位の低下がもたらされ南西風が強化されるようになり、やがてモンスーンの西風を形成する。

(3) 2001年：サイクロンによらない西風の形成

(2)では1999年にサイクロンの通過に伴うアラビア海東部の温位低下による西風の形成を季節変化とともにみていった。ここではサイクロンの通過といったイベントを伴わない場合の季節進行について述べる。

a) 4月22日：モンスーン形成前の状態

図-4aは2001年4月22日の大気状態である。モンスーンの西風形成過程の始まる以前の状態であり、アラビア海

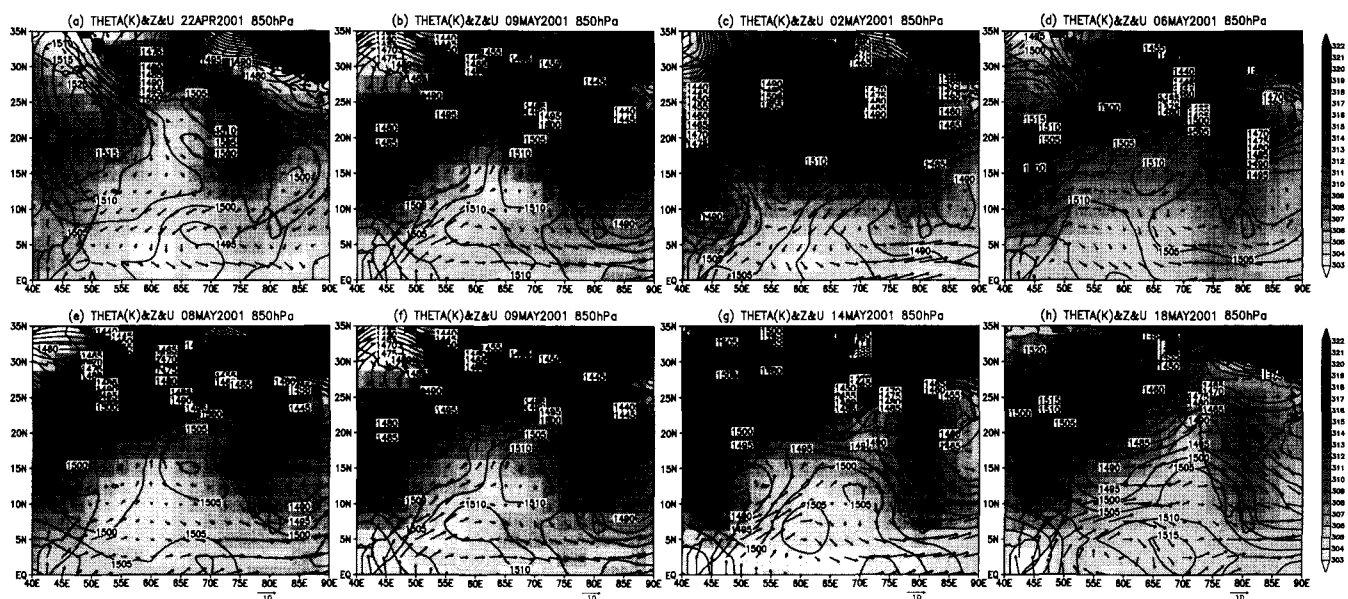


図-4 2001年の850hPa大気場の季節進行。

北部周辺において陸域の温位のほうが海洋上より高い。等ジオポテンシャル線および風系に着目すると、アラビア半島上には高圧性の時計回りの循環場が存在している。

b) 4月29日：アラビア海の温位上昇

陸域の加熱が進む。インド亜大陸およびイラン-パキスタン領域の加熱も進行し、その領域の気圧が低くなる。これによってイラン-パキスタン域では低圧場の等高線に沿った西風が吹き、インド亜大陸では熱的低気圧のような状態が形成されインド西岸に沿った北風が形成される。アラビア半島からアラビア海に広がっていた高圧場は弱まっている。

アラビア海では北部の温位が上昇する。これは、陸域の暖まった空気塊がイラン-パキスタン域の西風やインド西岸の北風によって海洋上に運ばれ、気温が高くなっているためと考えられる。

c) 5月2日：高圧性循環の影響

4月29日に弱くなっていたアラビア半島からアラビア海にかけての高圧性循環場が再び強くなる。この高圧性循環の東側の北風成分によって陸域の暖かな空気が海洋上に運ばれ、アラビア海の温位はさらに上昇する。

d) 5月6日：アラビア半島上の高圧性循環の弱まり

アラビア半島からアラビア海に広がっていた高圧性循環が弱まっている。また、アラビア半島とインド洋北部周辺域との間の温度傾度によって、アフリカ東部に南西風が形成されアラビア海へ吹き込む風系ができる。

e) 5月8日：アラビア海西部の温位低下

アフリカ東部からアラビア海北端に至る弱い南西風が形成されている。これによって海洋上の冷たい空気塊が北へと運ばれ、アラビア海西部では温位の低下がみられる。アラビア海東部ではインド西岸に沿う北からの風が残っているため、そちらからの暖かな空気塊が温位を高いままに維持している。

f) 5月9日：南西風の強化

アフリカ東部からアラビア海へ吹き込む南西風が強くなる。北緯5度から10度付近の西風も強まっている。南西風の強化とアラビア海上の温位の低下によって、海洋上の暖かくない空気がさらに北東方向へと広がっている。

g) 5月14日：低温位域の拡大

陸域の加熱が進み、温度傾度が大きくなることによって、南西風がさらに強化しアラビア海に温位の低い領域が拡大する。アラビア海だけではなくインド西岸の温位も低下し、弱い西風がインド亜大陸に吹き込み始める。

h) 5月18日：モンスーンの西風の形成

アラビア半島やイランといった陸域の温位がさらに上昇することによって、図-1bのような温位分布となる。これによってアラビア海全域に強い南西風あるいは西風が形成されインド亜大陸に吹き込みを開始する。

2001年の西風形成までの過程はサイクロンの突発的な大気場の変化が生じるというものではなかった。この場合、はじめ小さな温度傾度によって形成された南西風によってアラビア海に温位の低い領域が広がり、陸域の加熱と相まってさらに温度傾度が大きくなり南西風が強まり、温位の低い領域が広がるというフィードバックによって徐々にモンスーンの西風が形成されるというものであるということが出来る。

(4) 海面水温の影響

本節の(2)および(3)では温位の変化はサイクロンや水平移流によってもたらされると説明した。しかし海洋上では、海面水温 (Sea Surface Temperature : SST) の変化が大気海洋相互作用を通じて大気場の状態に影響を与える可能性がある。

図-5は1999年5月1日の大気場の様子とTMIによるSSTの分布を比較したものである。これはアラビア海の温位

上する強いサイクロンによってアラビア海に西風が励起され、そのままモンスーンの開始となった。イベントによって西風が形成されたものだが、アラビア海周辺域やインド亜大陸を通るサイクロンによるものではないため※をつけてNon-Cycloneとした。

22年の対象年のうち、9年がサイクロンによって西風形成に至ったものである。サイクロンは急激な大気場の変化をもたらすが、その発生時期や場所は年によって異なる。一方、Non-Cycloneとした場合は2001年の季節進行に共通する点が見出された。その季節進行を要約すると、インド亜大陸およびイラク-パキスタン領域の加熱によって中東域からインド亜大陸の西岸に沿った北西風が形成され、それによって運ばれる陸域の暖かい空気がアラビア海を暖める。アラビア半島の加熱が十分に進行すると、アラビア海との間の温度傾度によってアフリカ東部からアラビア海に吹き込む南西風が形成され、再びアラビア海の温位が低下する。アラビア半島とイラク-パキスタン領域の高温位域とアラビア海の低温位域との間の温度傾度が大きくなることによって、アラビア海に強い西風が形成される。すなわち、アラビア半島とアラビア海の温度傾度と中東域とアラビア海との温度傾度が形成されることがモンスーンの西風形成に必要である。

図-6は、西風形成日における上記二つの温度傾度をプロットした物である。 $\Delta\theta_A$ は中東域（東経60度-72.5度、北緯25度-32.5度）とアラビア海（東経65度-72.5度、北緯5度-15度）との温位差、 $\Delta\theta_B$ はアラビア半島（東経45度-55度、北緯20度-30度）とアラビア海との温位差である。白抜きでしめしたNon-Cycloneの場合には $\Delta\theta_A$ 、 $\Delta\theta_B$ ともに大きな値を示し、西風形成期には陸域と海洋との熱コントラストが大きくなっていることを示している。ただし、1984年および2000年に関しては、Non-Cycloneに関わらず温位差が小さい。2000年はモンスーン開始以前からインド亜大陸が広い範囲にわたって雲に覆われており、そのためにインド西岸が高温位とならず、周辺域の温位も上がらなかったために、アラビア半島等との熱コントラストが形成されたのではないかと考えられる。1984年に関しては、温位差は小さいが温位分布は他の年の西風形成期と同様に図-1bのようなパターンを示しており、他の年との明確な違いを示す特徴は認められなかった。温位差が小さくても西風が形成するという事実に関しては、今後の検討課題である。

Cycloneの場合の西風形成期における温位差はNon-Cycloneの場合に比べて小さい。すなわち、十分に温位差が大きくなった状況では既に西風が形成されており、そこに至る過程でCycloneが発生するか否かが二つの西風形成パターンを左右するものといえる。従って、温位差が十分でない時期にCycloneの発生・発達を予測することが、西風形成すなわちインドモンスーン開始のパターンおよび開始時期の予測につながるといえる。

5. 結論

本研究では多様な地球環境データの統合活用のための環境構築、解析ツール群の作成を行い、夏季インドモンスーン期に降水をもたらす西風の形成に着目して、大気場の季節進行を記述した。一連の解析ツール群は、現在は問題発見型のツールであるが、将来的には気象現象の物理法則の理解により資するものとして発展することが期待される。解析からは、1999年および2001年の比較から、サイクロンによって大気場の変化がもたらされる場合と特別なイベントによらず徐々に西風が吹く場が形成されるふたつの季節進行のパターンがあることがわかった。徐々に場の形成が起こる場合には、西風形成期にはアラビア半島とアラビア海および中東域とアラビア海の温位差が大きくなるが必要であることもわかった。

SSTが大気場に与える影響は、季節進行の中ではさほど大きくないが、年ごとの基本的な場の形成には寄与しており、年々変動への影響は考慮しなければならない。

今後、土壌水分等の年々変動との関連や大規模循環場との相互作用などに関する解析も行う必要がある。

謝辞：本研究では全球降水気候計画（GPCP）、NCEP/NCAR、米国大気海洋庁（NOAA）、国際衛星雲気候計画（ISCCP）とNASA TRMM Science Teamより提供されたデータを用いた。ここに記し感謝の意を表す。

参考文献

- 1) Webster, P. J., Magana, V. O., Palmer, T. N., Shukula, J., Thomas, R. A., Yanai, M. and Yasunari, T.: Monsoons: Process, predictability, and the prospects for prediction, *J. Geophys. Res.*, Vol.03, pp.451-510, 1998.
- 2) Chelliah, M. and Arkin, P.: Large-scale variability of monthly longwave radiation anomalies over the global tropics, *J. Climate*, Vol.5, pp.371-389, 1992.
- 3) Liebmann, B. and Smith, C. A.: Description of a Complete (Interpolated) Outgoing Longwave Radiation Dataset, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, Vol.77, pp.1275-1277, 1996.
- 4) Kalney, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., Iredell, M., Saha, S., White, G., Woollen, J., Zhu, Y., Leet, A., Reynolds, B., Chelliah, M., Ebisuzaki, W., Higgins, W., Janowiak, J., Mo, K. C., Ropelewski, C., Wang, J., Jenne, R., and Joseph, D.: NCEP/NCAR 40-years reanalysis project, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, Vol.77, pp.437-472, 1997.
- 5) Schiffer, R. A., and Rossow, W. B.: The International Satellite Cloud Climatology Project (ISCCP): The first project of the World Climate Research Program, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, Vol.64, pp.779-784, 1983.

(2003.9.30受付)