

東京大学大学院新領域創成科学研究科
環境学研究系自然環境学専攻
自然環境構造学分野
平成 18 年度 修士論文

インドシナ半島東部における 降水特性に関する研究

Research on precipitation characteristic
in east part of Indo-China peninsula

提出 2007 年 2 月 28 日

2007 年 3 月修了

指導教官 大森博雄教授

学籍番号 56704 氏名 池田雄一

目次

第 1 章 研究の背景と目的	5
1.1 モンスーンとは?	5
1.2 環境学的背景	9
1.3 研究の目的	12
第 2 章 使用データと解析手法	14
2.1 使用データ	14
2.2 雨季の開始・終了と Onset・Withdrawal の定義	15
2.3 解析手法	18
第 3 章 結果	19
3.1 雨季の開始・終了の地域性	19
3.2 自記雨量計による降水量分布	23
3.3 JRA-25 による Onset・Withdrawal の時期と地域性	27
3.4 雨季の開始・終了と Onset・Withdrawal の関係の地域性	30
3.5 水蒸気輸送量の解析	32
3.6 対流性雨・層状性雨ヒストグラム解析	36
第 4 章 考察	39
まとめ	41
謝辞	43
参考文献	44

目次

図 1	東南アジアとその周辺における冬と夏の 850hPa 面でのベクトル平均風	6
図 2	東南アジアとその周辺における冬と夏の OLR の分布	7
図 3	半月平均降水量の指数にもとづく雨季の開始時期と終了時期	8
図 4	世界全体における自然災害の件数と被災者数の推移	10
図 5	自記雨量計設置の様子	11
図 6	水位観測点の様子	11
図 7	気象観測所の様子（外観）	11
図 8	気象観測所の様子（圃場）	11
図 9	ベトナム東海岸中部（ダナン）における降水量	11
図 10	インドシナ半島広域画像	12
図 11	インドシナ半島東部における自記雨量計観測地点	15
図 12	バンコクにおける半月平均降水量の年変化と雨季の開始・終了	16
図 13	ホーチミンにおける U850hPa における zonal wind の変化	17
図 14	ホーチミンにおける U200hPa における zonal wind の変化	17
図 15	ホーチミンにおける鉛直シヤーの変化	18
図 16	自記雨量計による雨季の開始時期	22
図 17	自記雨量計による雨季の終了時期	22
図 18	自記雨量計を用いた雨季の開始・終了の地域区分	22
図 19	インドシナ半島東部における降水量分布	25
図 20	インドシナ半島における年平均降水量分布	26
図 21	TRMM-PR データを用いた年平均降水量	26
図 22	TRMM-TMI データを用いた年平均降水量	27
図 23	JRA-25 によって定義された Onset の地域区分	30
図 24	JRA-25 によって定義された Withdrawal の地域区分	30
図 25	ホーチミンにおける雨季の開始・終了と Onset・Withdrawal の関係性	31
図 26	雨季の開始と Onset の関係の地域性	32
図 27	雨季の終了と Withdrawal の関係の地域性	32
図 28	$P_n=25 \sim P_n=32$ の水蒸気輸送量の解析	34
図 29	$P_n=54 \sim P_n=61$ の水蒸気輸送量の解析	35
図 30	A 領域：対流性雨・層状性雨の比率	37
図 31	B 領域：対流性雨・層状性雨の比率	37
図 32	C 領域：対流性雨・層状性雨の比率	38
図 33	D 領域：対流性雨・層状性雨の比率	38

表目次

表 1	自記雨量計によって定義された雨季の開始・終了の時期	21
表 2	インドシナ半島東部における降水量分布	25
表 3	JRA-25 による Onset・Withdrawal の時期	29

第1章 研究の背景と目的

1.1 モンスーンとは？

「モンスーン」の語源は、アラビア語の「マウスィム(mawsim)」に由来しており、マウスィムは本来、1年のうちの限られた期間や季節、またはその期限内に行われる特別な行事を意味するが、アラビア語・インド洋西側の船乗り・商人たちにより、一年のうちで一定の期間と方向を持って交替する季節の風、またはその風を利用する航海シーズンの意味で使われるようになった(家島, 2000)。

モンスーンがもたらす降雨は、東南アジアの人々の生活を支えるだけでなく、洪水・土砂災害などの自然災害を引き起こすものであり、人々の暮らしと密接に関わっている。それだけでなく、モンスーンは海洋と大陸のコントラストが生み出す強力な水と大気の循環系であり、グローバルな水とエネルギーの循環に重要な役割を果たしている(安成, 1994)。

モンスーンに関する研究は古くから行われており、Khromov(1957)は、モンスーン気候のグローバル分布を示した。Alissow(1954)も同様に、卓越気団の季節的南北移動によって世界の気候区分をした。Koppen(1918)は、世界の気候区分を植生区分に当てはめ、熱帯モンスーン気候区とは、短い乾季をもつ熱帯多雨気候であることを示した。現在の、気象・気候学では、モンスーンとは、1年周期で卓越風向が反対となる「季節風」を意味する(Matsumoto, 1997)。図1に、アジアモンスーンの冬と夏における風系の実態を示すために、850hPa面での平均的な風の分布を示す。

冬の場合では、赤道から北緯20°にかけて東風が卓越している様子が見える。しかし、ベンガル湾北部からインド北部地域では北西風が卓越し、インドシナ半島北部から中国の華南地域では南西風が見られる。この要因として、Matsumoto(1997)は、この地域は、亜熱帯高気圧の高圧軸よりも北に位置し、偏西風にあたるためであると論じている。中田(1991)は、華南から南シナ海にかけての地上の主風向は北東で、大陸からの北東風の寒気の上に亜熱帯からの南西風の暖気が乗上げるため、この地域では、広い範囲にわたって雲頂高度が低い層雲に覆われることが多いと論じている。

次に夏の場を見ていく。夏は、冬とは様相が一変する。インドシナ半島全体は、南西風に覆われ、雨季が最盛期をむかえている様子が伺える。赤道以南では、東風が卓越している様子が確認できる。一般的に、夏季モンスーンがOnsetする際は、中緯度偏西風・インド洋起源の西風及び西太平洋からの東風が入り混じり、複雑な様相を呈することが知られている。

以上のように、冬と夏では、風系の様子が大きく変化する。このように、モンスーンとは、大陸と海洋との比熱の差によって生じる大規模な循環系であると言える。

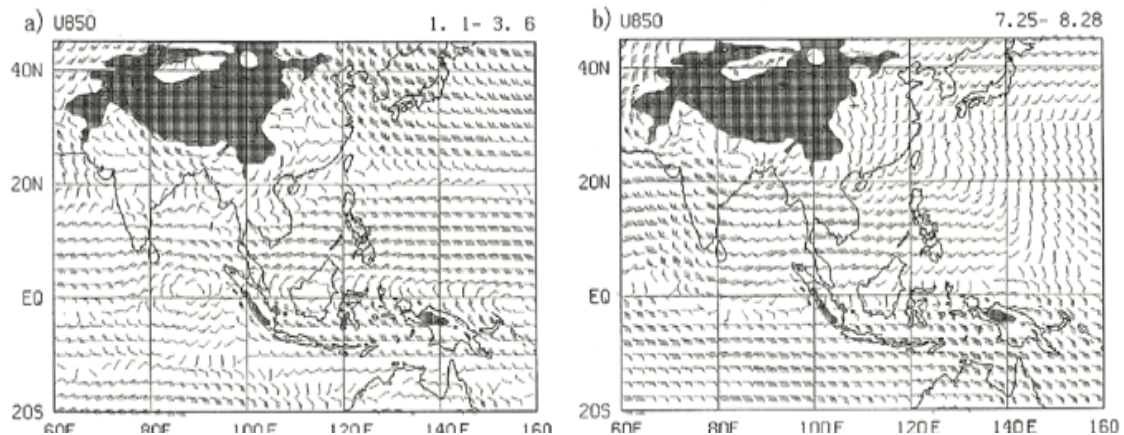


図1 東南アジアとその周辺における冬と夏の850hPa面でのベクトル平均風(1980～88)
 左図：冬の様子、右図：夏の様子 Matsumoto(1992)より引用

次に、モンスーンの対流活動の活発度合いを探るために、OLR (out going long wave : 外向き長波放射量)を見ていく。OLRは、気象衛星NOAAから得られたデータであり、物体から跳ね返ってきた放射の強さを観測することによって、対流活動の強弱を把握している。つまり、雲量が多い部分は、放射量は弱く、間接的に降雨量が多いということを示している。

図2に、東南アジアとその周辺地域における冬と夏のOLRの分布を示す。冬では、赤道近辺のジャワ島・カリマンタン島・ニューギニア島などの南半球の島々でOLRが最小の様子が見られる。これらの地域では、夏の雨季にあたり、「オーストラリアモンスーン」と呼ばれ、Murakami and Matsumoto(1994)は、このモンスーン地域をNAIM(Northern Australia and Indonesian Monsoon)と呼んだ。しかしながら、インドシナ半島及びインド一体では、OLRの値は高く、乾季である様子が伺える。チベット高原において、OLRが非常に小さな値を示しているが、これは対流活動が活発なのではなく、高標高域の降雪の影響によるためである。

夏は、冬とは様相が一変し、インド東部・インドシナ半島・フィリピン付近及び西太平洋の部分でOLRの値が低い。これらの地域では、活発な対流活動が生じており、多大な降水がもたらされていることが示唆される。

Matsumoto(1997)は、東南アジアのモンスーン地域では、季節による風系の変化が著しいだけでなく、雨の降り方も季節によって大きく変化する。これらは密接に関わっているが、両者は同時に起きる現象ではないと論じている。

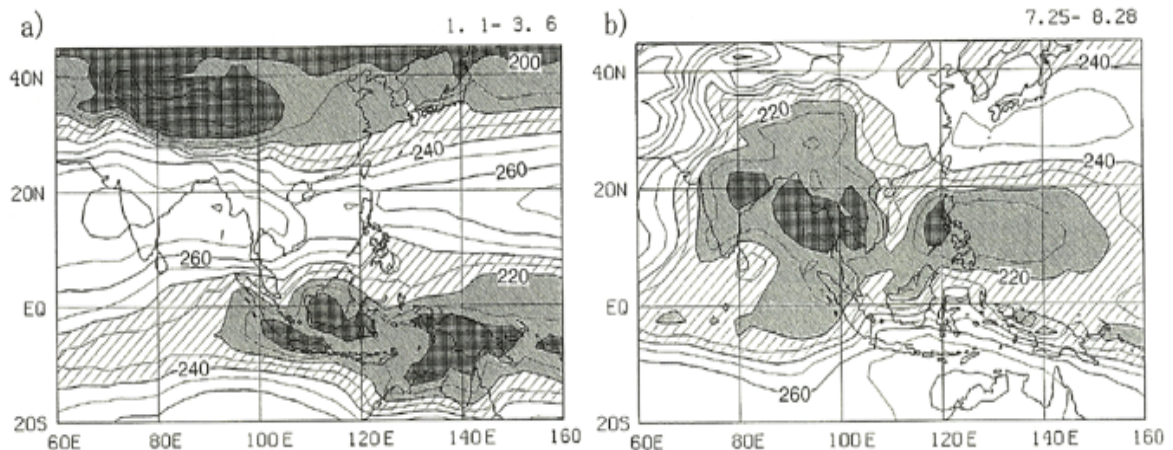


図2 東南アジアとその周辺における冬と夏のOLRの分布 (1975~87)

左図：冬の様子、右図：夏の様子 Matsumoto(1997)より引用

次に、夏の雨季のモンスーンの開始・終了についての既往研究をレビューしていく。モンスーン圏に住む人々にとって、モンスーンの開始時期・終了時期を知ることは、農業生産や生活に関わるため重要なものである。

このような背景のもと、特に雨季の開始時期に着目して数多くの研究が行われてきた。インドでは、古くから雨季の開始がモンスーンの開始とされ、モンスーンの開始・終了時期の分布図が、半世紀以上も前に作られていた(India Meteorological Department, 1943)。Yin(1949)は、高層データを使った研究によって、インドよりも夏のビルマで夏のモンスーンにともなう雨季が早く始まることを示した。Orgill(1967)は、インドシナ半島における夏の南西モンスーンの平均開始日は5月17日であり、その変動幅は1936~64年の28年間で33日であるとした。また旬降水量と天気図上での下層モンスーン西風の侵入から1951~79年の各年におけるインドシナ半島西部のモンスーン入りを検討したEguchi(1996)は、北緯17°付近のモンスーン開始は、年々変動は大きいものの平均すると5月中旬であるとした。タイ(バンコク)の自記雨量計を用いて、モンスーンアジア地域一体の、夏の雨季の入り进行を考察したMatsumoto(1997)では、アッサム地方やタイの内陸部では4月下旬以前、インドシナ半島ではほぼ全域が5月上・中旬が雨季の始まりであり、経度-東西風断面図及び経度-OLR断面図の結果により、OnsetはWithdrawalと比較して急激に始まるということを示した。Onsetの急激な進行に関しては、Shinoda et al. (1986), He et al. (1987), Yanai et al.(1992)において、1979年のMONEX(Monsoon Experiment)のデータを基に、東南アジア及び南アジアモンスーンの開始は、徐々に進行するのではなく5月中旬の東南アジアモンスーン開始と6月上旬のインドモンスーンの開始という2段階で急激に進行することを示した。

最近の研究では、客観解析データ・衛星データ等の整備により、多くの先端研究が見られるようになってきた。Wang and Ho(2002)は、CMAPの降水量データを用いてモンスーンの開始を、1月の月平均日降水量との差が5mm以上になる日平均降水量を示す最初の半月と定義し、アジア

ア全域でのモンスーンによる雨季の開始時期と終了の時期の分布を示した(図 3)。この図では、広域におけるモンスーンの推移が明らかになり、地域によって差はあるものの、比較的緯度方向の季節推移が、雨季の開始・終了ともに顕著に見られる。

Matsumoto(1997)は、850hPa 面での風系を解析し、インドシナ半島内陸部でのモンスーン開始は中緯度偏西風帯で生じる擾乱によるものであると論じている。

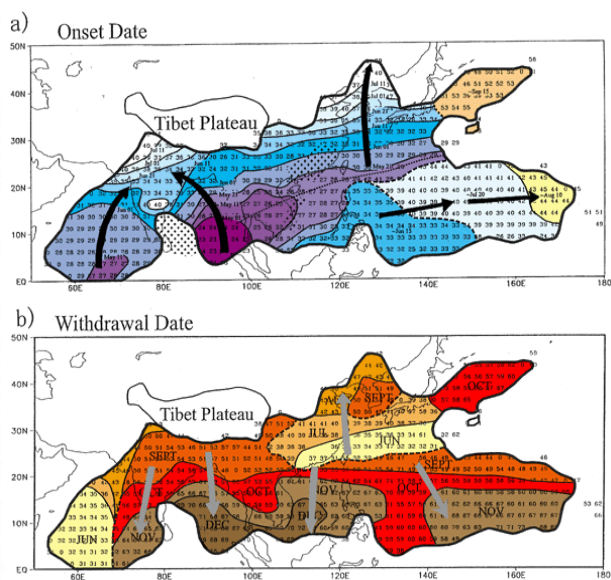


図 3 半旬平均降水量の指数にもとづく雨季の開始時期（上図）と終了時期（下図）

太い点線は 3 本以上の線が重なるような不連続的变化を示す。矢印は降雨帯の進行方向を示す。細い点線は亜熱帯と熱帯の海洋性モンスーン地域の境界(Wang and Ho, 2002)より引用

1.2 環境学的背景

前節で述べたように、モンスーンは風系が大規模に変化するだけでなく、降雨量も季節によって大きく変化する。モンスーンがもたらす多大な降雨は、現地における農業生産(主に、第一産業である米の生産)も支えている。Orgill(1987)は、米の生産量と降水量に正の相関があることを明らかにした。インドシナ半島周辺諸国は、世界の米の主要な産出国(4位:バングラディシュ、5位:ベトナム、6位:タイ、7位:ミャンマー)が分布している。つまり、インドシナ半島は、世界の食料問題の重要な鍵を握る地域であると言える。時としてモンスーンは変調をきたし、アジアモンスーン地域に洪水や旱魃といった自然災害をもたらす。最新の地球白書2006-07の報告(図4)によると、昨今、世界的規模で風水害による死者及び被害が顕著に増加していることが伺える。ベルギーのルーバン・カトリック大学疫学研究所(CRED)の自然災害に関する統計では、近年ではインド、アフガニスタン、中国などアジア地域における地震や風水害によって大規模な被害が発生する傾向があると報告されている。アジアモンスーン地域は、世界の50%を越す人口が集中し、災害に脆弱な地域であり、その災害を軽減させるために、モンスーンの変動メカニズムの解明と変動予測の進歩が求められている。このような背景から、現在、東京大学(リーダー首都大学東京松本淳教授)が中心となって、「東南アジアにおける降雨観測システムの構築」というプロジェクトが進行されている。このプロジェクトは、インドシナ半島を中心とする熱帯東南アジア地域を対象として、モンスーンに伴う水循環および気候変動の実態を把握するための降雨観測システムを構築することを目的としている。そのために地上自記雨量計観測網を展開し、衛星およびレーダー観測の併用によって準リアルタイムで1時間単位での広域的雨量分布の把握を可能にするシステム「東南アジア・レーダーアメダス(仮称)」を現地気象機関と共同で構築し、その延長として、広域雨量の予測にも取り組む試みがなされている。さらに、その成果物を洪水予測と水資源マネジメントへと適用することを主な目標としている。

アジアモンスーンの変動は、熱帯太平洋の ENSO(El Nino-Southern Oscillation)と密接に相関があることが明らかにされつつあるが(e.g., Yasunari and Seki, 1992)、1970年代以降はその関係が不明瞭になっていることが指摘されており、まだその変動メカニズムは十分に分かっていない。そのような背景を踏まえ、近年、1990年代半ばより実施された「アジアモンスーンエネルギー・水循環研究観測計画(GEWEX(Global Energy and Water Cycle Experiment; GAME, 安成 1994))」の功績などにより、インドシナ半島各国での地上観測データ(特に、地点日降水量データ)を世界のモンスーン気象研究者が扱えるようになった。さらに、1998年雨期には GAME や「南シナ海モンスーン計画(South China Sea Monsoon Experiment; SCSMEX, Lau et al. 2000)」などの複数の国際プロジェクトがインドシナ半島や南シナ海をはじめとするアジアモンスーン域で集中観測を行っており、その結果得られた良質なデータが蓄積された。このような状況のもと、モンスーン気象学に対する研究者の関心が高まってきている。

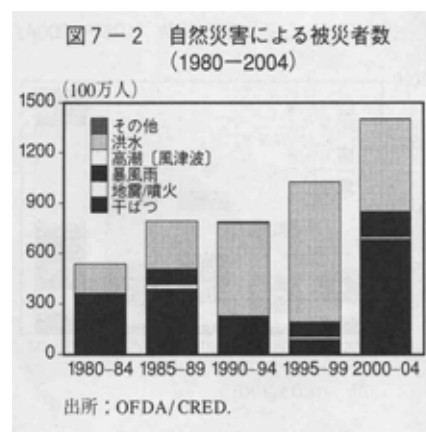
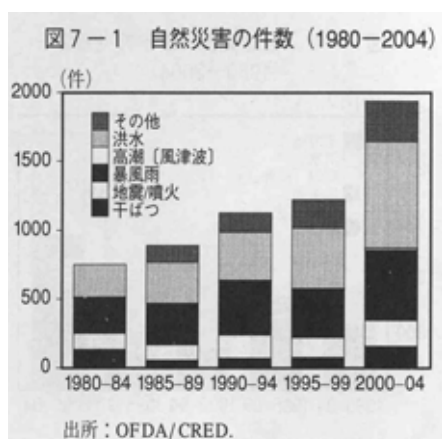


図 4 世界全体における自然災害の件数と被災者数の推移(左図:自然災害の件数、右図:自然災害による被災者数)地球白書 06-07 より引用

本研究では、研究対象地における環境学・社会学的背景を探る目的の一環として、2006年1月16日から2006年1月23日にかけて、ベトナムにおいて現地視察を行った(図5~8)。視察の目的として、ベトナムのダナンに自記雨量計を設置した(図5)。ベトナムはインドシナ半島の東岸に位置する南北に細長い国で、DaNangはちょうどその中央部に位置する同国第三の都市である。海岸沿いには南北に細長い低地が広がる国であり、DaNangのすぐ北のみ山岳が海岸にまで達している。そのため、この地域では北東モンスーンによる多大な降雨の集積地域であり(図9)、防災の観点から脆弱な土地であると考えられる。東に張り出した山岳を主要道路が越える峠がHaiVan峠である。HaiVanは「雲の海」といった意味らしく、この周辺の山岳は周囲より湿潤で降雨量が多い。このように山岳地が市街に迫っていることが雨量予測・洪水予報を難しくしていると思われる。また、このHaiVan峠を境にして気候が大きく変わると言われている(安形ほか, 2005)。図10にインドシナ半島の広域画像を示す。ベトナム東海岸沿いにあるのが、アンナン山脈である。



図 5 自記雨量計設置の様子



図 6 水位観測点の様子



図 7 気象観測所の様子（外観）



図 8 気象観測所の様子（圃場）

Danag 半旬降水量(97-02year)

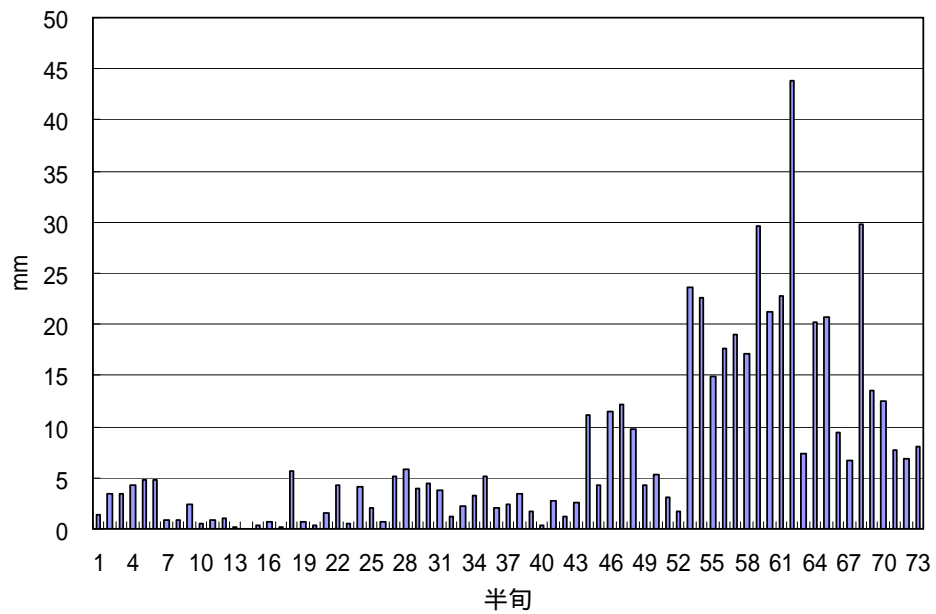


図 9 ベトナム東海岸中部（ダナン）における降水量（97-02year）
横軸：半旬（Pn：五日平均）、縦軸：降水量（mm）

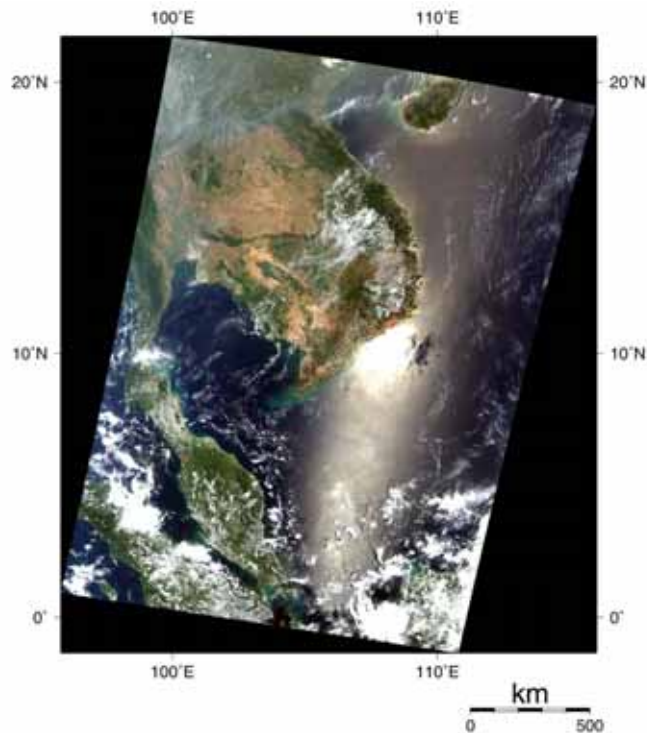


図 10 インドシナ半島広域画像
JAXAHP より引用

1.3 研究の目的

モンスーンに関する研究は、インドシナ半島広域を中心に進んできた。Matsumoto(1995,1997)は、半旬降水量を用いた Onset・Withdrawal の定義を行い、大気場の考察を行った。Orgill(1967)は、インドシナ半島における平均的な Onset 開始時期は、5月17日 (Pn=27)であるとした。最近の研究では、TRMM 衛星を使った研究も行われ、Kodama et al.,(2005)では、プレモンスーン期に対流性降雨の寄与が大きいことを確認した。以上のように、インドシナ半島におけるモンスーン研究は数多くの研究が盛んに行われ、多くの知見が得られてきた。

一方で、ローカルスケール、特にインドシナ半島東部における降水特性に関する研究は、不十分であり未解明な点が多い。くわえて、インドシナ半島東部は、モンスーンに伴う降雨及び台風の襲来による風水害が社会的問題として顕在化している。つまり、ローカルスケールにおける、詳細な降水特性に関する研究は、将来的な洪水予測・防災システムに応用される可能性があるという点において社会的意義が大きいと考えられる。

また、インドシナ半島は、最も Onset が早く、インドモンスーンと東アジアモンスーンに挟まれた地域であるが、インドや中国のような大国が無いことや戦乱（カンボジアにおけるポト政権下における社会的情勢など）の影響で他の地域に比べてモンスーン研究は非常に遅れ

ている。さらに、これまでのインドシナ半島に関する研究の多くは、データの制約により、対象地域がタイやミャンマーだけに限られており（e.g., Eguchi, 1996 ;Zhang et al., 2002）、インドシナ半島東部のローカルスケールにおける研究は、ほとんど行われてこなかった。しかし、東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻の気候学研究室による長年のデータ収集活動により、インドシナ半島の大部分の地域で長期データが利用可能となった。とりわけ、今まで内戦や戦乱及びそれに付随する経済的諸事情により、質の良いデータが得られなかった、カンボジア・ラオス・ベトナム地域の自記雨量計データが使えることになった功績は大きい。また、ローカルスケールにおける詳細な研究を行えるようになった背景には、1998年から運用が始まった、TRMM（熱帯気象観測衛星）の登場による降水特性の把握・高精細の客観解析データである JRA-25 データが整備された点もある。

そこで、本研究は、自記雨量計データと客観解析データを元に、雨季・乾季・Onset・Withdrawalを定義し、そこから得られた結果を元にして、インドシナ半島東部における降水特性について、考察することを目的とする。

第 2 章 使用データと解析手法

2.1 使用データ

まず、自記雨量計データは、東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻の気候学研究室による長年のデータ収集活動によって集められた GAME-T2 データ(安形康氏データベース化) (図 11 参照)を使用した。データは、インドシナ半島東部のラオス(11 地点)、カンボジア(13 地点)、ベトナム(70 地点)のうち、97-00 年のデータにおいて欠測値のない、ラオス(11 地点)、ベトナム(55 地点)を利用した。当初、カンボジアのデータも利用する予定であったが、欠測値があまりにも多いため、データ解析がほぼ不可能であり、本研究では使用していない。ベトナムの一部やカンボジアの大部分のデータの質が悪い点に関しては、上述したように社会的情勢が関係していると思われる。

また、850hPa 東西風・鉛直シヤーによるモンスーンの Onset・Withdrawal の定義及び水蒸気輸送量の解析のために、JRA-25 を使用した。長期再解析(JRA-25 = Japanese Re-Analysis 25 years) プロジェクトは季節予報モデルの高度化や気候研究のための高精度の気候データセットを作成し、気候の推移を正確に把握することを目的に、気象庁と電力中央研究所との共同研究を核に 2001 年度より 5 力年計画でスタートしたものであり(JRA-25 HP より)、空間分解能が $1.25^{\circ} \times 1.25^{\circ}$ と、従来の NCEP-NCAR 再解析データ($2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$)・無料配布の標準の ECMWF(ERA-40)データ($2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$)と比較すると非常に高精度の解析が行えることが特徴の一つとして挙げられ、本研究のようにローカルな地域に特化した場の現象を理解するには、非常に有効なデータであると考えられる。

また、任意の領域における層状性雨・対流性雨を把握するために、本研究では、TRMM(熱帯気象観測衛星)を使用した。TRMM データは、プロダクト 3G68 の PR($0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$)を利用した。TRMM は、地球全体の降雨量のうち約 2/3 を占める熱帯地域のデータを得て、地球規模の気候変動や環境保全に役立てることを目的として 1997 年に打ち上げられた熱帯降雨観測衛星である。これまでは、マイクロ波観測装置のみを搭載した衛星による観測が多く行われてきたが、TRMM は TMI の他に降雨レーダー(PR)、可視赤外観測装置(VIRS)などを搭載しているため、データを組み合わせることによりデータの信頼性の検討ができる。また PR により降水の三次元分布の観測や海上と陸上の均質的な降水データの取得が可能である。特に、サハラ砂漠域のように地上観測点の少ない地域では、このような広域的に連続したデータは貴重である(Harada, 2001)。本研究で使用したのは、98-02 年までのデータである。計算には、Fortran(Formula Translation 77,90)、作図には、気象データ解析ソフト Grads(Grid Analysis and Display System)、GMT(The Generic Mapping Tools)、EXCEL、文章作成には WORD、表作成には EXCEL を使用した。

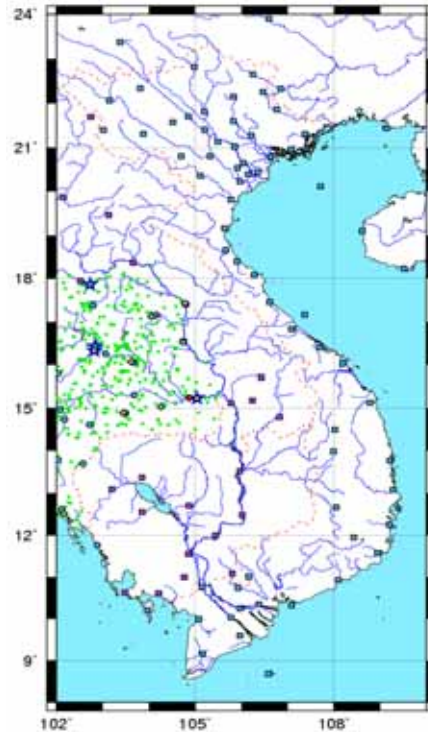


図 11 インドシナ半島東部における自記雨量計観測地点
ドット（点）が自記雨量計観測地点を示している。（安形康氏の HP より抜粋）

2.2 雨季の開始・終了と Onset・Withdrawal の定義

本研究では、降水特性を把握する前段階として、自記雨量計データ・客観解析データを用いて、インドシナ半島東部におけるモンスーンの雨季の開始・終了と Onset・Withdrawal をそれぞれ定義することから始めた。これらの時期を雨量計のある地点ごとに厳密に解析することによって、地域差を詳細に考察することができる。

モンスーンの定義については、既往研究の中で数多くの手法が用いられてきたが、本研究では、雨季の開始・終了の定義と風によるモンスーンの Onset・Withdrawal の定義を区別し、もっともシンプルかつ代表的な手法を用いることにした。雨季の開始・終了の定義では、Matsumoto(1997)を参考にした（図 12）。この手法は非常シンプルなものであり、1年間仮に均等に雨が降ったと仮定した場合の半旬平均降水量(P_m : 年平均降水量を年間の半旬数 73 で割った値)を基準とし、この降水量を 3 半旬続けて越えた最初（最後）の半旬を雨季の開始（終了）とみなすことにより、客観的に広域的な雨季の開始・終了を定義することができる。この定義は降水量の地域差が大きく、しかも雨季・乾季の交替が明瞭なインドシナ半島のような地域では、大部分の地点で客観的に雨季の開始・終了を決定することができる有効な方法である

(Matsumoto, 2002)。

Onset・Withdrawalの定義では、850hPaにおけるzonal wind(東西風)と鉛直シアー(U200-850 < 0)を用いて解析した。Onset (Withdrawal)は、850hPaにおける東西風が東風(西風)から西風(東風)に変化し、かつ、鉛直シアー(U200-U850)が、東風シアー(西風シアー)の条件を同時に満たした最初の半旬(最後の半旬)をOnset (Withdrawal)と定義する。なお、東風シアーとは、東西風が上層ほど、東風(U200-U850<0)の状態を指す。西風シアーとはその逆である。従来のOnset・Withdrawalを定義する解析において、下層の850hPaの東西風の変化を利用した研究は、Kiguchi and Matsumoto(2005)に代表されるように非常に多い。本研究において850hPa東西風だけでなく鉛直シアーも用いる理由は、インドシナ半島特有の風系に理由がある。インドシナ半島東部は、中緯度偏西風・インド洋海上から卓越する南西風・西太平洋から卓越する東風が複雑に入り混じるため、下層の850hPaの東西風だけでは、偏西風の影響下の西風とモンスーン西風とを区別できず、厳密にOnset・Withdrawalを定義することは難しい。しかしながら、東西風鉛直シアーを見ると、偏西風帯では西風シアー、モンスーン西風では東風シアーになっているはずである。そのため本研究では鉛直シアーによる解析手法を用いた。図13~15にそれぞれ、ベトナム(ホーチミン)におけるU850・U200・U200-U850(鉛直シアー)の解析例を示す。U850では、東風から西風に変化し、東風に戻る様子が見られる。U850のみで、Onset・Withdrawalを定義すると、Onset:Pn=28・Withdrawal:Pn=56となる。鉛直シアーでは、西風シアーから東風シアーに変化し、西風シアーに戻る様子が見られる。鉛直シアーのみで、Onset・Withdrawalを定義すると、Onset:Pn=25、Withdrawal:Pn=64となる。U850・鉛直シアーどちらも満たす条件が必要であるため、ホーチミンにおけるOnset・Withdrawalはそれぞれ、Pn=28・Pn=64となる。

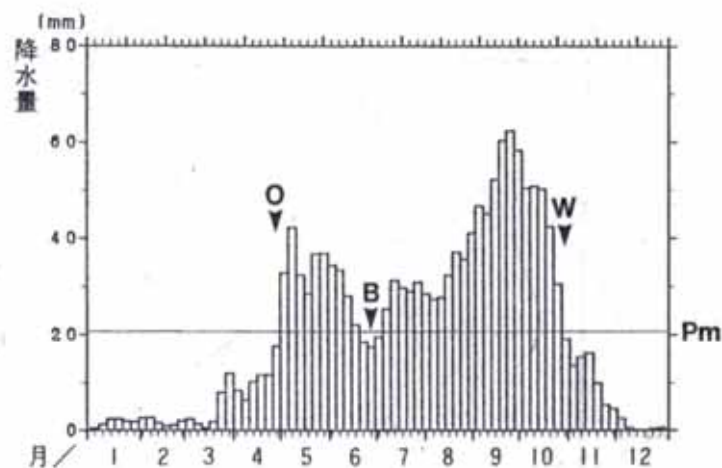


図12 バンコクにおける半旬平均降水量の年変化と雨季の開始・終了
水平な線は年間均等に降雨があった場合の平均半旬降水量(Pm)を示す。
O:雨季の開始、W:雨季の終了、B:雨季の中断 (Matsumoto,1997)より引用

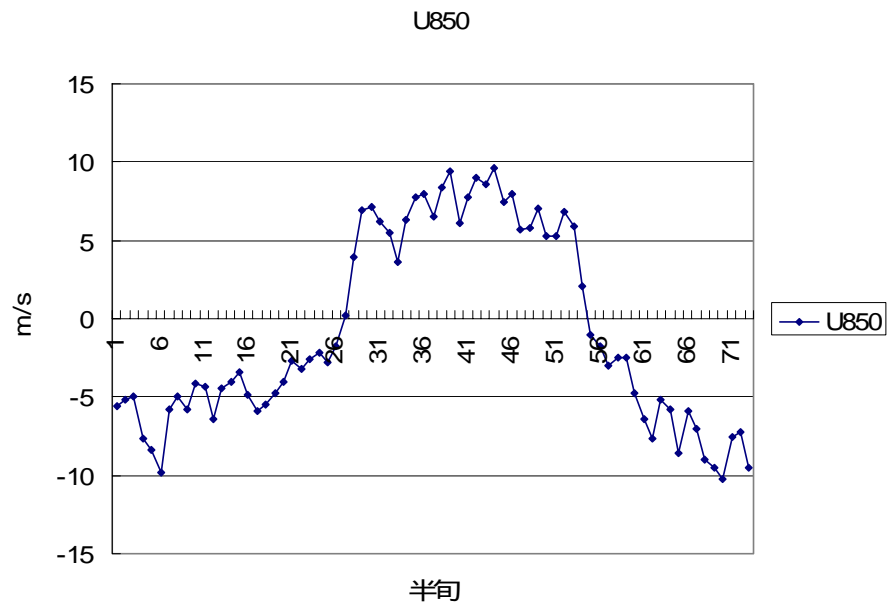


図 13 ホーチミンにおける U850hPa における zonal wind の変化(97-00year)

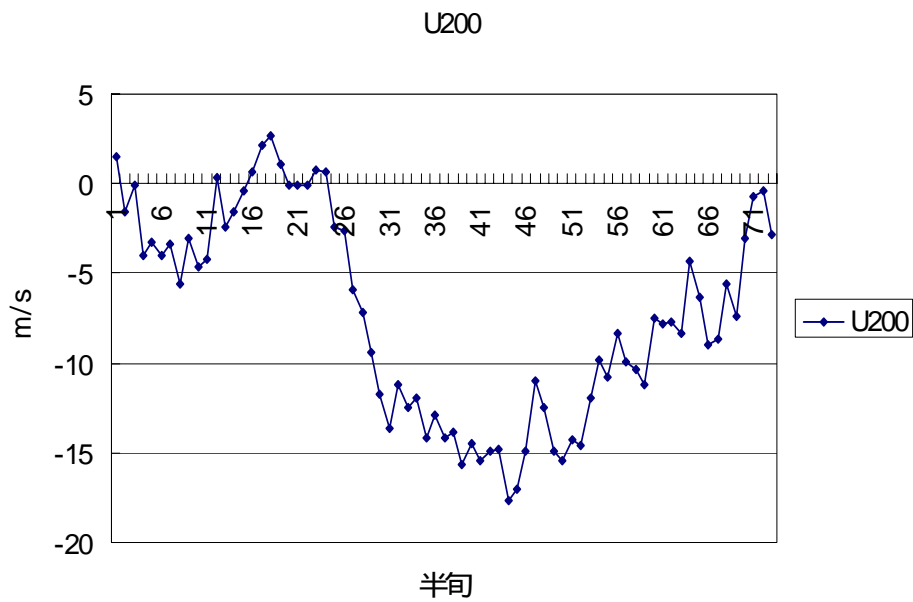


図 14 ホーチミンにおける U200hPa における zonal wind の変化(97-00year)

鉛直シヤー(U200-U850) 97-00year

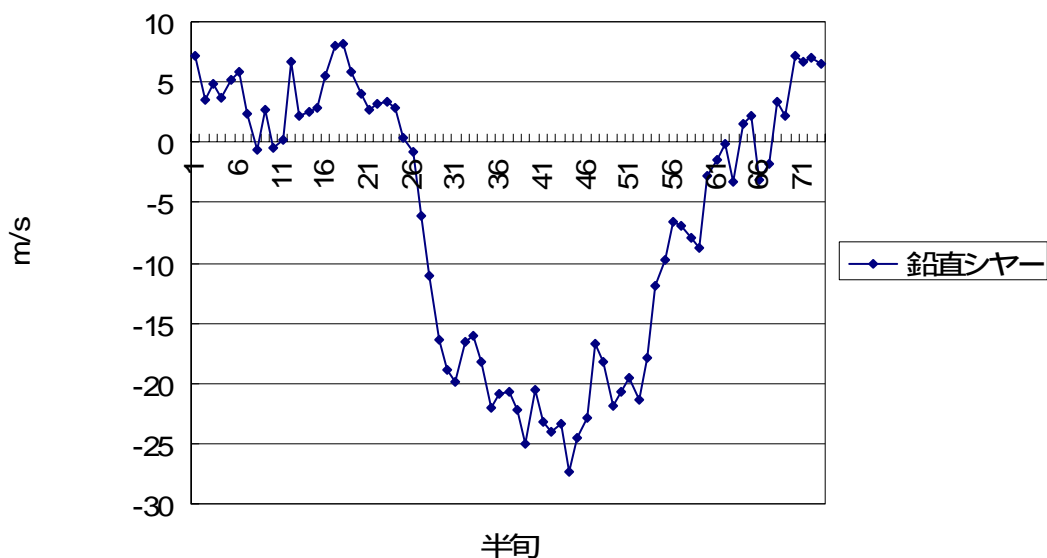


図 15 ホーチミンにおける鉛直シヤーの変化(97-00year)

2.3 解析手法

まず、自記雨量系データを用いて、Matsumoto(1997)の定義を参考に、インドシナ半島東部における、雨季の開始・終了の地域区分及び降水量分布を把握した。次に、JRA-25 を用いて、自記雨量計データある地点ごとに、850hPa 東西風・鉛直シヤー (U200-U850<0) を計算し、Onset・Withdrawal の時期を決定した。

次に、自記雨量計データと客観解析データによってもたらされた結果から、雨季の開始・終了と風系の関連性についての考察を行った。雨季の開始が Onset より先行する地域・Onset が雨季の開始より先行する地域・雨季の終わりが Withdrawal より先行する地域・Withdrawal が雨季の終わりより先行する地域の、計 4 タイプの領域区分を行った。

この 4 タイプの領域ごとに、降水特性を考察するために、TRMM データを用いて層状性雨・対流性雨の比率を計算し、ヒストグラム解析を行った。

最後に、以上の解析から得られた結果の考察を補うために、JRA-25 を用いた 850hPa における水蒸気輸送量の解析を試みた。

第3章 結果

3.1 雨季の開始・終了の地域性

1.3 節に記述したように、インドシナ半島全域の自記雨量計を用いて、ラージスケールにおける雨季の開始・終了を定義したものは多かった。本研究では、ローカルスケールにおける雨季の開始・終了の地域性を把握するために、自記雨量計がある地点（緯度・経度）ごとに雨季の開始・終了を定義した。結果は表1・図16・17に示す通りである。雨季の開始(図15)は、雨季の終わりと比較すると、顕著な地域性は見られず、細かい地域差はあるものの概して $P_n=20 \sim 30$ の範囲で推移している。Matsumoto(1997)の自記雨量計を用いた研究(図18)と比較すると、インドシナ半島東部の雨季の始まりは、5月6日($P_n=26$)であり、全地域を平均するとほぼ同様ではあるが、地点ごとのばらつきが多いことが分かった。なお、カンボジア地域が空白地帯である理由は、前述したように、データの欠測値の影響によるためである。インドシナ半島東部中央の海岸沿いの地帯が空白である理由は、アンナン山脈による地形的影響を受けることによって、夏季モンスーンの影響を生じず、北東モンスーンの寄与が大きくなるため、 $P_n=40$ 以上の事例については、夏季モンスーンの雨季開始と呼ぶには不適當であると判断し除外した。

雨季の終了に関しては、雨季と比べると明瞭な結果が得られた(図17)。大まかに見ると、低緯度で遅く、高緯度で早いという結果が得られた。また、ベトナム海岸沿い中央部は、相対的に遅いという結果が得られた。Matsumoto(1997)と比較すると、東海岸沿いで最も遅いという点が類似している。

地点	経度	緯度	雨季の開始	雨季の終了
Kongplong	108.42	14.65	30	59
TpHoChMinh	106.66	10.76	26	57
Laichau	103.16	22.07	28	51
Sapa	103.84	22.34	28	50
Hagiang	104.98	22.83	29	57
Sonla	103.92	21.32	29	57
Thatkhe	106.47	22.25	25	60
Caobang	106.26	22.67	28	50
Bacgiang	106.19	21.27	19	52
Baccan	105.83	22.15	25	46
Dienbien	103.01	21.37	28	50

Tuyenquang	105.21	21.82	24	50
Yenbai	104.85	21.72	28	58
Sontay	105.51	21.14	23	50
Hoabinh	105.34	20.83	28	58
Lang	105.85	21.03	28	50
Hanam	105.92	20.54	32	58
Hungyen	106.05	20.65	28	54
Ninhbinh	105.97	20.25	28	58
Phulien	106.62	20.81	28	52
Langson	106.76	21.85	18	56
Thainguyen	105.87	21.55	29	52
Baichay	107.07	20.97	28	52
Thaibinh	106.34	20.45	28	58
Tienyen	107.4	21.33	35	56
Bachlongvy	107.73	20.13	46	52
Thanhhoa	105.78	19.81	28	58
Hoixuan	105.1	20.38	28	52
Vinh	105.67	18.67	23	58
Hatinh	105.9	18.4	51	63
Donghoi	106.62	17.47	53	68
Dongha	107.18	16.85	53	70
Hue	107.58	16.46	53	71
Danang	108.2	16.03	53	68
Quangai	108.81	15.12	53	70
Kontum	108.02	14.5	34	59
Playku	108	13.98	25	59
Quynhon	103.57	21.83	53	70
Tuyhoa	109.3	13.09	52	70
Buonmathuot	108.04	12.68	28	59
Dalat	108.44	11.95	21	57
Phanthiet	108.11	10.92	27	60
Phanrang	108.99	11.57	53	70
Tayninh	106.13	11.28	30	62
Vungtau	107.08	10.34	27	62

Mochoa	105.94	10.78	28	64
Rachgia	105.08	10.01	27	64
Chaudoc	105.12	10.71	25	64
Cantho	105.78	10.03	30	63
VinhLong	105.97	10.25	30	65
Mytho	106.38	10.35	36	62
Soctrang	105.97	9.6	21	62
Camau	105.15	9.18	30	63
Phuquoc	103.96	10.22	39	62
Condao	106.6	8.68	28	62
Attapeu	106.5	14.48	30	54
Pakse	105.47	15.7	26	55
Paksong	106.14	15.11	27	51
Saravane	106.26	15.43	28	55
Savannakhet	104.45	16.33	26	54
Vientiane	102.3	17.57	24	54
Takhek	104.48	17.25	26	53
PakSane	103.4	18.22	28	51
LuangPrabang	102.8	19.53	26	52
Xiengkhuang	103.8	19.28	17	50
Phongsaly	102.45	21.42	24	53

表1 自記雨量計によって定義された雨季の開始・終了の時期（97-00year）
赤色のハッチがかかっている部分は、 $P_n=40$ 以上で、夏季モンスーンによる
雨季の開始としては不当であると判断したもの。

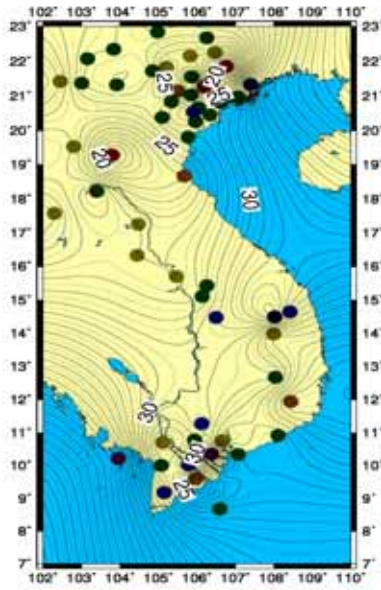


図 16 自記雨量計による雨季の開始時期
 円は、赤(Pn=17181920)、オレンジ(Pn=212223)
 黄(Pn=242526)、緑(Pn=272829)、青(Pn=303132)、
 藍(Pn=333435)、紫(Pn=36373839)を示す。

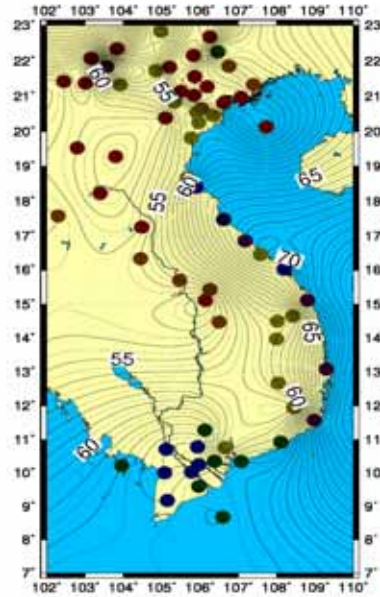


図 17 自記雨量計による雨季の終了時期
 円は、赤(Pn=46 ~ 53)、オレンジ(Pn=545556)、
 黄(Pn=575859)、緑(Pn=606162)、青(Pn=636465)、
 藍(Pn=666768)、紫(Pn=697071)を示す。

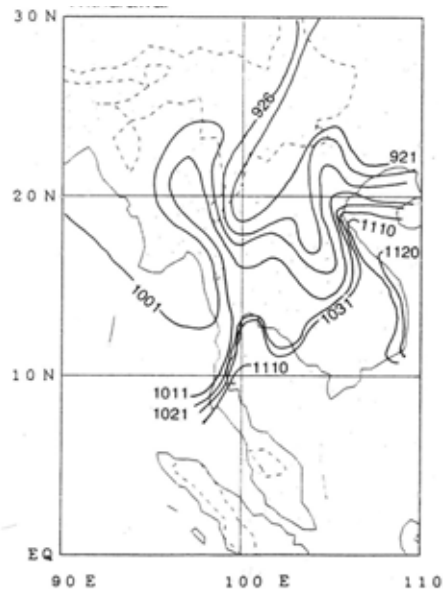
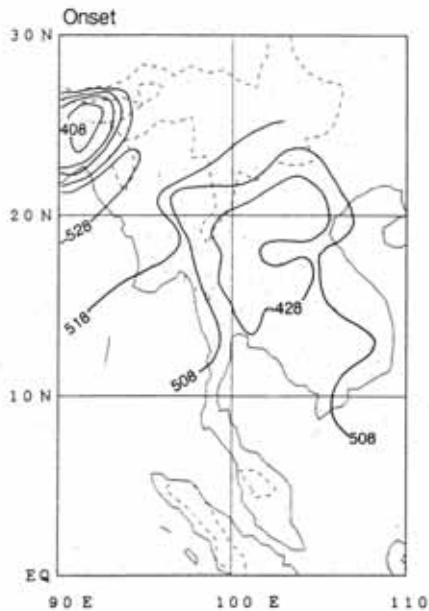


図 18 インドシナ半島における自記雨量計を用いた雨季の開始(左図)・終了(右図)の地域区分
 Matsumoto(1997)より引用

3.2 自記雨量計による降水量分布

次に、雨量計のある地点ごとの年間平均降水量(97-00年)を計算した。結果を表2・図19に示す。降水量の地域差は大きいものの、ベトナム東海岸中央部・メコン川上流域・中流域、そしてメコンデルタ域に2700mmを超える非常に大きな降水量を確認した。Matsumoto(1997)の結果(図20)と比較すると、ベトナム東海岸中央部に大きな降水量と類似点が見られた。しかし、本解析で2700mm以上の降水量を確認したメコン川上流・中流・メコンデルタはMatsumoto(1997)では不明瞭である。地点ごとの詳細な解析による図19の結果は、メコン川上流・中流・メコンデルタにおける多雨域がlocalizeされたものであることを示している。このことを確認するために、TRMM-3G68のPRとTMIの5年分のデータを用いて、インドシナ半島域の年間平均降水量を計算した(図21・図22)。その結果、メコン川上流・中流・下流域に局所的な多雨域を確認した。しかしながら、ベトナム東海岸中央部分の多雨域は、確認することができなかった。

地点	経度	緯度	降水量 mm
Baccan	105.83	22.15	1,465
Bacgiang	106.19	21.27	1,595
Bachlongvy	107.73	20.13	1,026
Baichay	107.07	20.97	1,836
Buonmathuot	108.84	12.68	2,043
Camau	105.15	9.18	2,833
Cantho	105.78	10.03	1,867
Caobang	106.26	22.67	1,445
Chaudoc	105.12	10.7	1,543
Condao	106.6	8.68	2,193
Dalat	108.44	11.95	2,109
Danang	108.2	16.03	2,770
Dienbien	103.01	21.37	1,548
Dongha	107.18	16.85	2,257
Donghoi	106.62	17.47	1,986
Hagiang	104.98	22.83	2,344
Hanam	105.92	20.54	1,748
Hatinh	105.9	18.4	2,077
Hoabinh	105.34	20.83	1,842

Hue	107.58	16.46	3,837
Hungyen	106.05	20.65	1,459
Kongplong	108.42	14.65	1,378
Kontum	108.02	14.5	1,802
Laichau	103.16	22.07	2,217
Lang	105.85	21.03	1,522
Langson	106.76	21.85	942
Mochoa	105.94	10.78	1,827
Mytho	106.38	10.35	1,578
Ninhbinh	105.97	20.25	1,658
Phan rang	108.99	11.57	1,020
Phanthiet	108.11	10.92	1,330
Phulien	106.62	20.81	1,524
Phuquoc	103.96	10.22	3,593
Playku	108	13.98	2,098
Quangai	108.81	15.12	3,336
Quynhon	103.57	21.83	2,268
Rachgia	105.08	10.01	2,448
Sapa	103.84	22.34	2,489
Soctrang	105.97	9.6	2,299
Sonla	103.9	21.32	1,298
Sontay	105.51	21.14	1,736
Tayninh	106.13	11.28	2,028
Thaibinh	106.34	20.45	1,405
Thainguyen	105.87	21.55	1,721
Thanhhoa	105.78	19.81	1,539
Thatkhe	106.47	22.25	1,334
Tienyen	107.4	21.33	2,223
Tp Ho Chi Minh	106.66	10.76	1,491
Truongsa	111.92	8.65	2,461
Tuyenquang	105.21	21.82	1,477
Tuyhoa	109.3	13.09	2,543
Vinh	105.67	18.67	1,617
Vinh Long	105.97	10.25	1,627
Vungtau	107.08	10.34	1,687

Attapeu	106.5	14.48	1,999
Luang Prabang	102.8	19.53	1,293
PakSane	103.4	18.22	3,641
Pakse	105.47	15.7	2,312
Paksong	106.14	15.11	3,575
Phongsaly	102.45	21.42	1,585
Saravane	106.26	15.43	2,256
Savannakhet	104.45	16.33	1,424
Takhek	104.48	17.25	2,328
Vientiane	102.31	17.57	1,689
Xiengkhuang	103.8	19.28	1,426

表2 インドシナ半島東部における降水量分布(97-00year)

インドシナ半島東部における降水量分布 97-00年 赤のハッチがかかっている部分は、年平均降水量が 2700mm 以上。

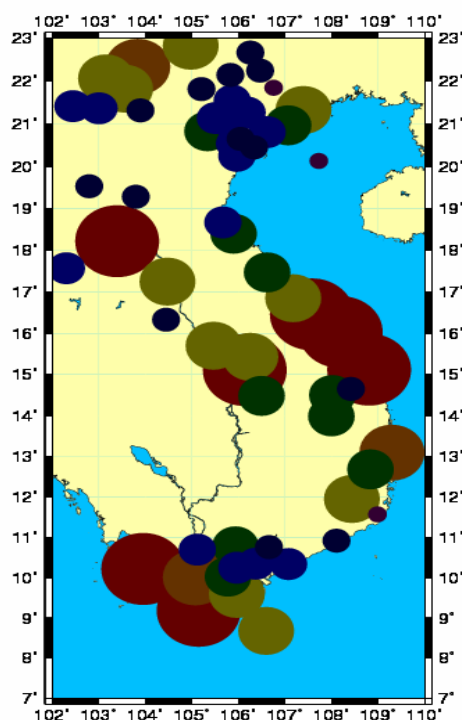


図19 インドシナ半島東部における降水量分布(97-00year)

円の大きさは、降水量の増大を示す。色の区分は、赤 (2700mm 以上)、オレンジ (2400-2699mm)、黄 (2100-2399mm)、緑 (1800-2099mm)、青 (1500-1799mm)、藍 (1200-15499mm)、紫(899-1199mm)となっている。

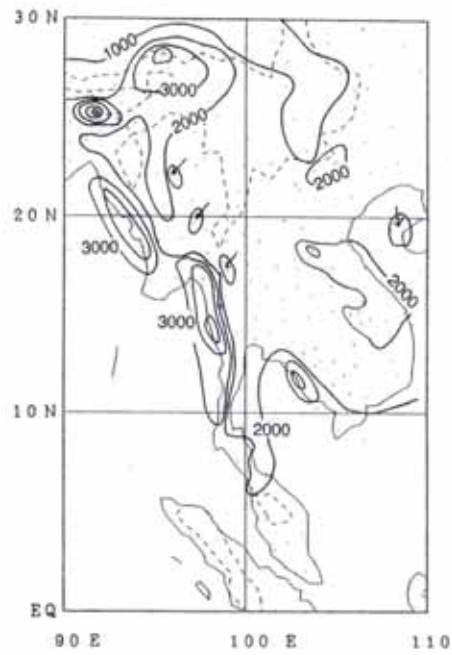


図 20 インドシナ半島における年平均降水量の分布。

等降水量間隔は 1,000mm、矢印は周辺よりも値が低いことを示す。Matsumoto(1997)より引用

*TRMM PRRAIN*24*365 1998-2002mean ANN*

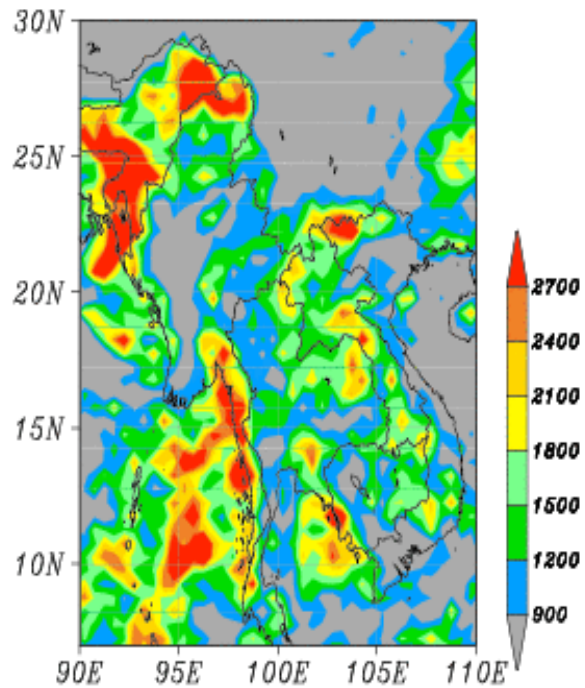


図 21 TRMM-PR データを用いた年平均降水量(98-02year)

TRMM TMIRAIN*24*365 1998-2002mean ANN

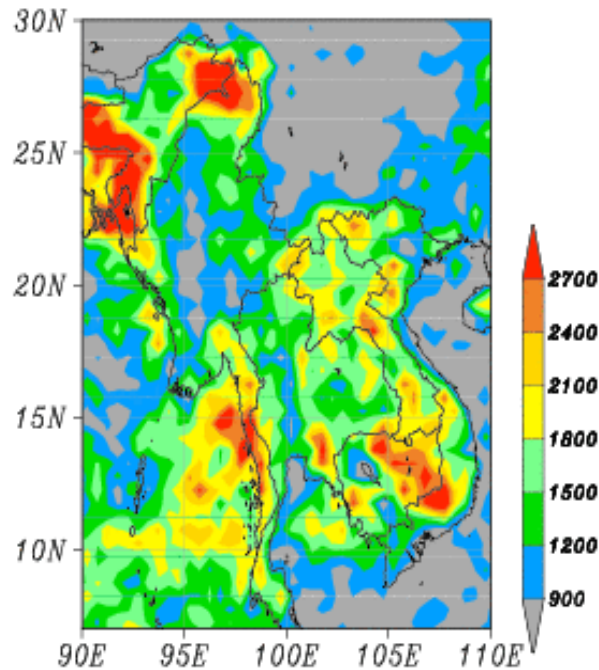


図 22 TRMM-TMI データを用いた年平均降水量(98-02year)

3.3 JRA-25 による Onset・Withdrawal の時期と地域性

ここでは、JRA-25 を用いた 850hPa 東西風・鉛直シヤーによる、モンスーンの Onset・Withdrawal の時期を解析した。鉛直シヤーとは、あるベクトル量の鉛直方向のズレを意味する。本研究では、偏西風とモンスーン西風との区別をつけるために、鉛直シヤーにも着目した。

結果(表 3・図 23・図 24)を見ると、自記雨量計の雨季の開始・終了の結果と比較して、明瞭な Onset・Withdrawal の季節推移が見られた。Onset(図 23)では、北緯 11° - 13°・東経 103° - 106° における内陸部はもっとも Onset が早く (Pn=2324)、次に、内陸部から北東へ向かって Onset (Pn=2526) が始まっていく様子が見られる。低緯度では、Pn=2728。中緯度以降は、北北西に推移している様子(Pn=27 ~ Pn=32)が見られた。Withdrawal(図 24)では、高緯度から低緯度に向かって(南南東)推移 (Pn=50 ~ 65) している様子が見られ、メコンデルタ域で最も遅い (Pn=65) ということが分かった。よって、850hPa 東西風・鉛直シヤーの解析により、Onset・Withdrawal は、経度よりも緯度方向による推移が強いということが明らかになった。

地点	経度	緯度	Onset	Withdrawal
Kongplong	108.42	14.65	27	60
TpHoChMinh	106.66	10.76	26	64
Laichau	103.16	22.07	32	52
Sapa	103.84	22.34	32	52

Hagiang	104.98	22.83	32	49
Sonla	103.92	21.32	31	52
Thatkhe	106.47	22.25	32	49
Caobang	106.26	22.67	32	49
Bacgiang	106.19	21.27	31	50
Baccan	105.83	22.15	32	49
Dienbien	103.01	21.37	31	52
Tuyenquang	105.21	21.82	31	52
Yenbai	104.85	21.72	31	52
Sontay	105.51	21.14	31	52
Hoabinh	105.34	20.83	31	52
Lang	105.85	21.03	31	50
Hanam	105.92	20.54	30	52
Hungyen	106.05	20.65	31	50
Ninhbinh	105.97	20.25	30	52
Phulien	106.62	20.81	31	50
Langson	106.76	21.85	31	50
Thainguyen	105.87	21.55	31	50
Baichay	107.07	20.97	31	50
Thaibinh	106.34	20.45	30	52
Tienyen	107.4	21.33	31	50
Bachlongvy	107.73	20.13	30	52
Thanhhoa	105.78	19.81	30	52
Hoixuan	105.1	20.38	30	52
Vinh	105.67	18.67	29	52
Hatinh	105.9	18.4	29	52
Donghoi	106.62	17.47	28	56
Dongha	107.18	16.85	28	59
Hue	107.58	16.46	28	59
Danang	108.2	16.03	27	60
Quangai	108.81	15.12	26	60
Kontum	108.02	14.5	27	59
Playku	108	13.98	26	60

Quynhon	103.57	21.83	31	52
Tuyhoa	109.3	13.09	26	60
Buonmathuot	108.04	12.68	26	60
Dalat	108.44	11.95	26	60
Phanthiet	108.11	10.92	26	63
Phanrang	108.99	11.57	27	63
Tayninh	106.13	11.28	25	63
Vungtau	107.08	10.34	27	67
Mochoa	105.94	10.78	25	63
Rachgia	105.08	10.01	25	67
Chaudoc	105.12	10.71	25	67
Cantho	105.78	10.03	26	64
VinhLong	105.97	10.25	25	63
Mytho	106.38	10.35	26	64
Soctrang	105.97	9.6	26	64
Camau	105.15	9.18	25	67
Phuquoc	103.96	10.22	25	61
Condao	106.6	8.68	27	67
Attapeu	106.5	14.48	26	60
Pakse	105.47	15.7	28	59
Paksong	106.14	15.11	28	59
Saravane	106.26	15.43	28	59
Savannakhet	104.45	16.33	28	52
Vientiane	102.3	17.57	29	52
Takhek	104.48	17.25	28	52
PakSane	103.4	18.22	29	52
LuangPrabang	102.8	19.53	30	52
Xiengkhuang	103.8	19.28	29	52
Phongsaly	102.45	21.42	32	52

表3 JRA-25 による Onset・Withdrawal の時期(97-00year)

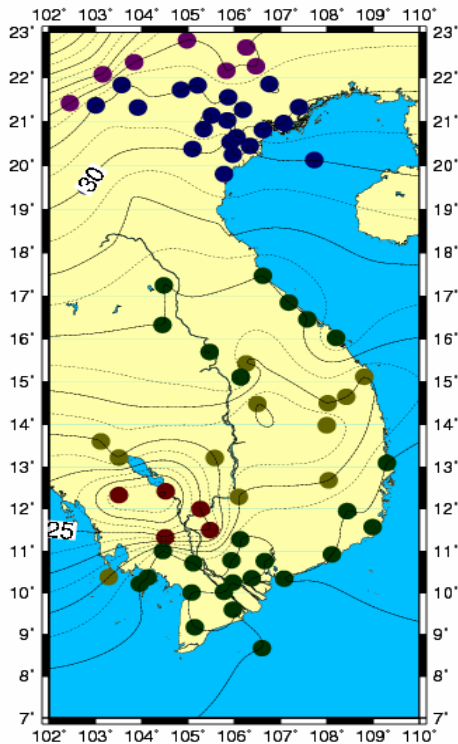


図 23 JRA-25 によって定義された Onset の地域区分。円は、赤(Pn=2324)、茶色(Pn=2526) 緑 (Pn2728) 青(Pn=2930)、紫(Pn=3132)を示す。

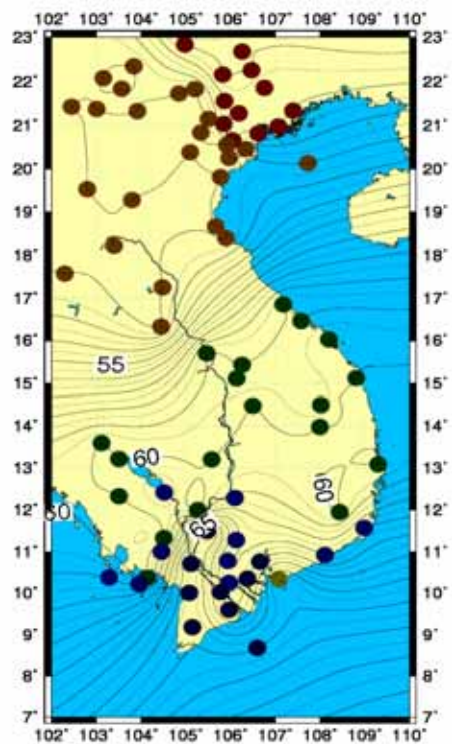


図 24 JRA-25 によって定義された Withdrawal の地域区分。円は、赤 (Pn=495051) オレンジ (525354) 黄(Pn=555657)、緑 (Pn=585960) 青 (Pn=616263) 藍 (Pn=64656667) を示す。

3.4 雨季の開始・終了と Onset・Withdrawal の関係の地域性

今までの結果から、自記雨量計データ・JRA-25 データそれぞれにおいて、雨季の開始・終了、Onset・Withdrawal を定義することができた。既往研究で、Onset・Withdrawal を定義する際において、雨量を基準にすべきか？風を基準にすべきか？について多くの議論がなされてきた。Matsumoto(1997)では、基本的に、モンスーンの Onset・Withdrawal に関しては、風系の違いを意味し、雨の季節性に関しては、雨季・乾季という意味を持つ。本研究においても、Matsumoto(1997)を踏襲し、モンスーンの Onset・Withdrawal に関しては、850hPa 東西風・鉛直シヤーの結果を元にし、雨季の開始・終了に関しては、自記雨量計データの結果を元にしていく。本研究では、自記雨量計データと JRA-25 データによって示されたそれぞれの雨季の開始・終了、Onset・Withdrawal を元にして、雨季の開始が Onset より先行する地域・Onset が雨季の開始より先行する地域・雨季の終了が Withdrawal より先行する地域・Withdrawal が雨季の終了より先行する地域の 4 タイプに分類した。図 25 にホーチミンにおける解析例を示す。こ

の例では、850hPa 東西風・鉛直シヤーによる結果から、Onset が Pn=28、Withdrawal が Pn = 64 となる。自記雨量計の結果から、雨季の開始は Pn = 26、雨季の終了は Pn = 57 となる。よって、この地域は、雨季の開始が Onset より先行し、雨季の終了が Withdrawal に先行する地域であると判断できる。

以上のように、雨季の開始・終了とモンスーンとの関係からインドシナ半島を4領域に区分することができた。解析結果を図 26・図 27 に示す。まず、Onset と雨季の開始との関係(図 26)は、緯度 15° - 23°、経度 102° - 107° (図 26: A 領域)において、Onset が雨季の開始よりも先行する地点が多く見られ、緯度 8° - 15°、経度 105° - 109° (図 26: B 領域)において、雨季の開始が Onset よりも先行する地点が1地点を除いて多く見られた。

Withdrawal と雨季の終わりとの関係緯度(図 27)では、16° - 23°、経度 104° - 109° (図 27: C 領域)において、Withdrawal が雨季の終了に先行している地点が多く見られ、8° - 16°、経度 103° - 109° (図 27: D 領域)において、雨季の終了が Withdrawal に先行している地点が多く見られた。

降水量とOnsetWithdrawalの関係性

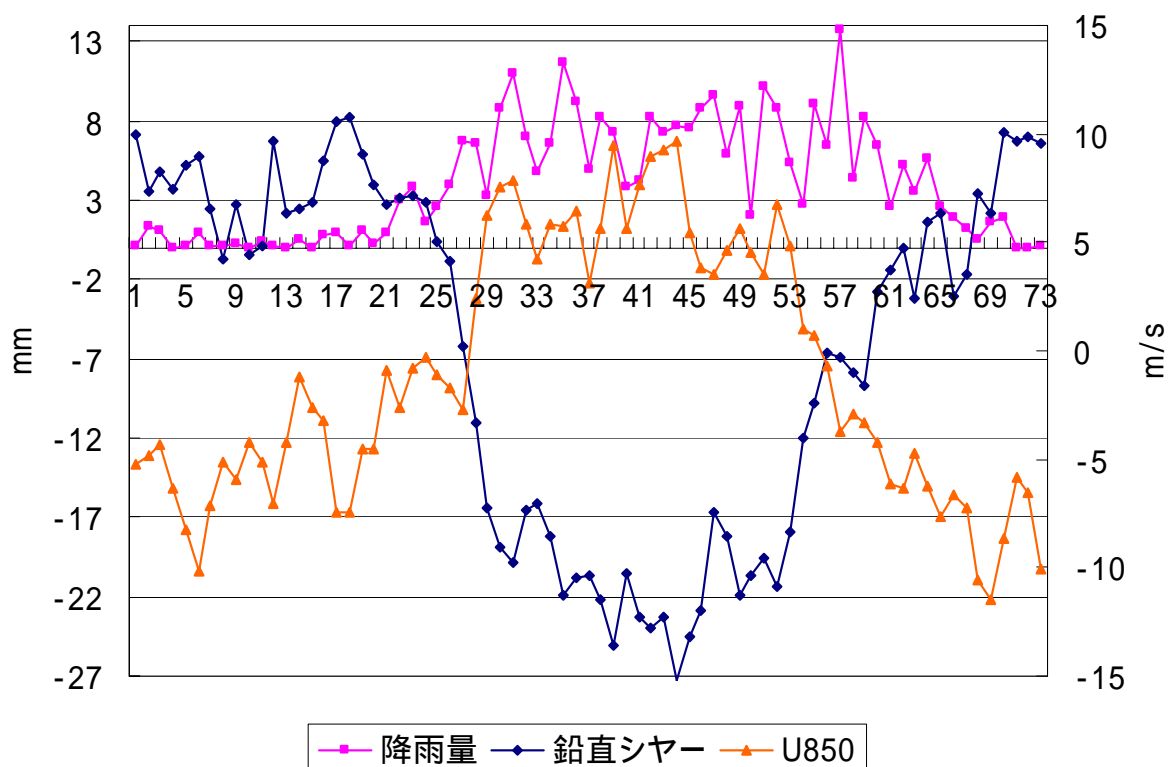


図 25 ホーチミンにおける雨季の開始・終了と Onset・Withdrawal の関係性(97-00year)

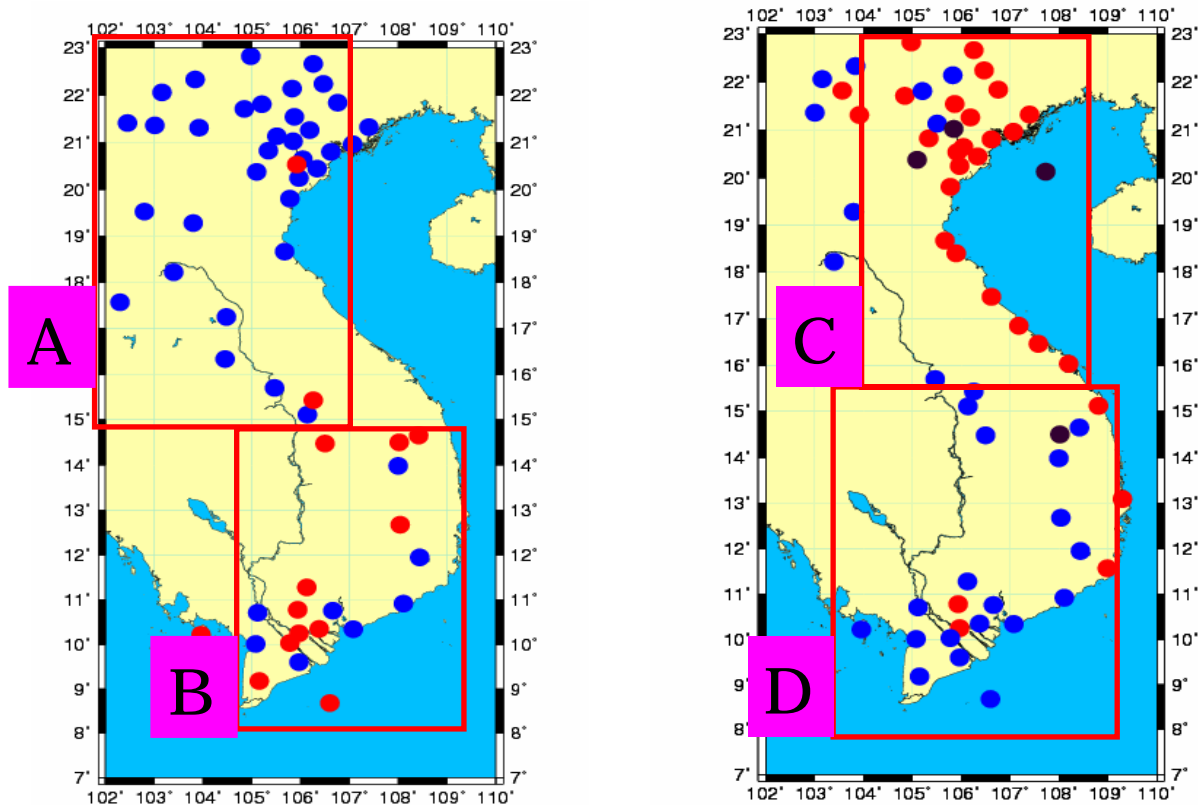


図 26 雨季の開始と Onset の関係の地域性(赤：雨季の開始より Onset が先行する地点：B 領域。青：Onset より雨季の開始が先行する地点：A 領域。)

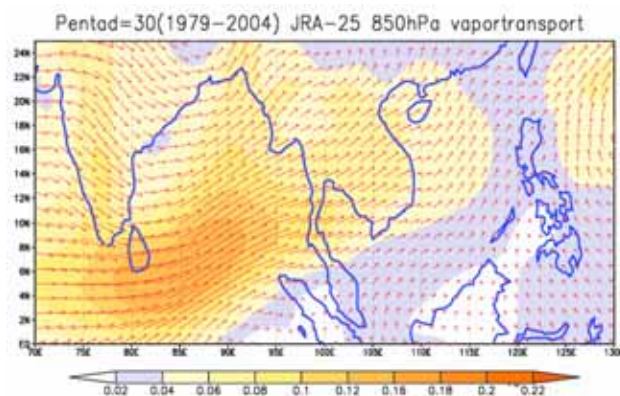
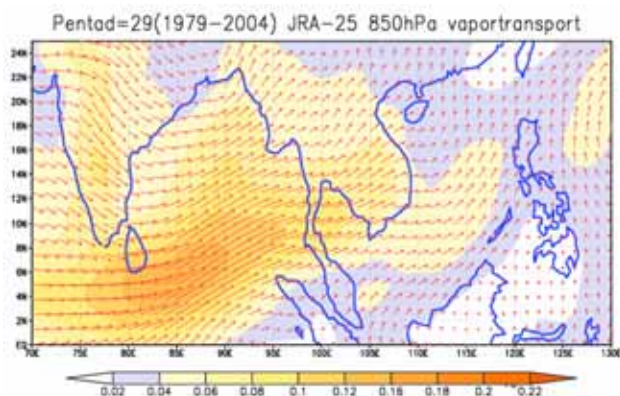
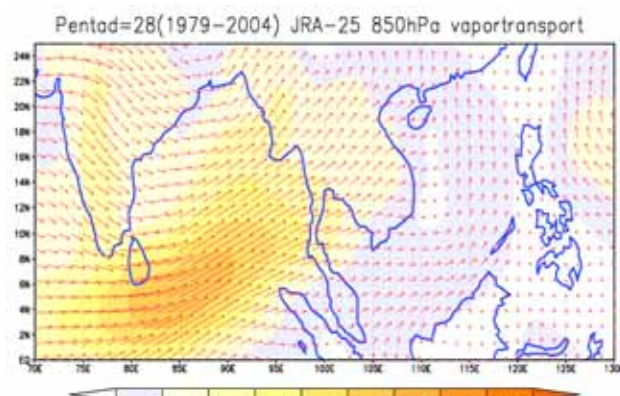
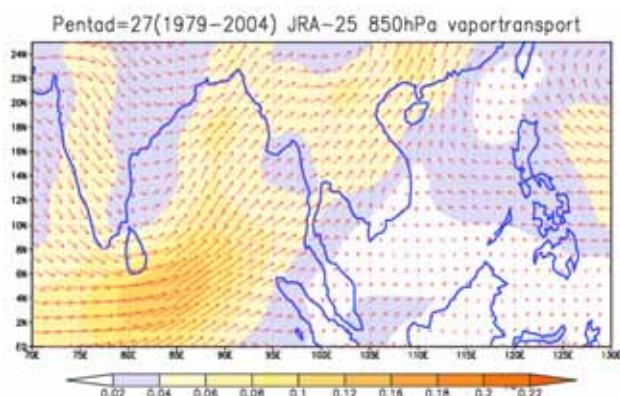
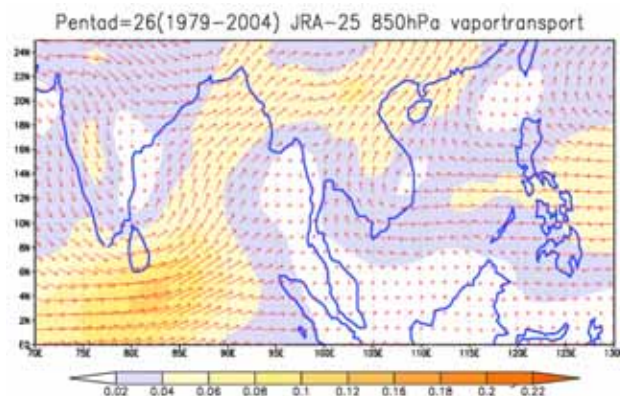
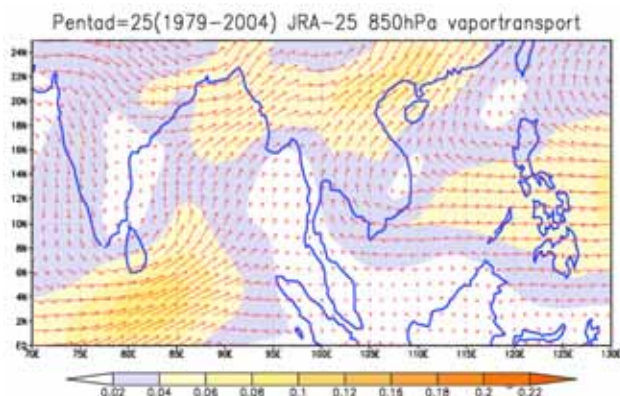
図 27 雨季の終了と Withdrawal の関係の地域性 (赤：雨季の終了より、Withdrawal が先行する地点：C 領域。青：Withdrawal より、雨季の終了が先行する地点：D 領域。紫は、同時に起きた地点。)

3.5 水蒸気輸送量の解析

今までの解析は、インドシナ半島東部に特化したローカルな現象に着目していたが、本節では、JRA-25 を用いて、850hPa における水蒸気輸送量の解析を試みた。図 28 は、1979 年から、2004 年までの半旬ごとの気候値を示している。水蒸気輸送量を見ることによって、大まかな降水をもたらす起源を探ることができると同時に、風系の変化に着目することで、モンスーンの Onset・Withdrawal の推移を把握することが可能である。

まず、850hPa 東西風・鉛直シヤーによって定義された、Onset の結果を基に、前後の $P_n=25 \sim P_n=32$ を解析した(図 28)。 $P_n=25$ から $P_n=26$ の変化を見ると、インドシナ半島で北部～中部で西風が吹いているが、北部ではまだ中緯度偏西風の影響下にある。中部の西風は、フィリピンからの東風がインドシナ半島中西部で北～北東に向かって回りこんでいる。このインドシナ半島中西部は、前節での解析で最も早く Onset が解析された地域(図 23)であり、インドシ

ナ半島中西部の早いオンセットは、インド洋からの西風が未だ到達していない時期に、熱帯太平洋からの風系によって開始していることが分かる。Pn=27になると、インド洋起源の南西風はインドシナ半島に到達している様子が見られる。しかし、この時点で、インドシナ半島東部の低緯度は南西風が吹いていない様子が見られる。そして、Pn=29になると、インドシナ半島東部の低緯度部分も南西風の支配下に入る。



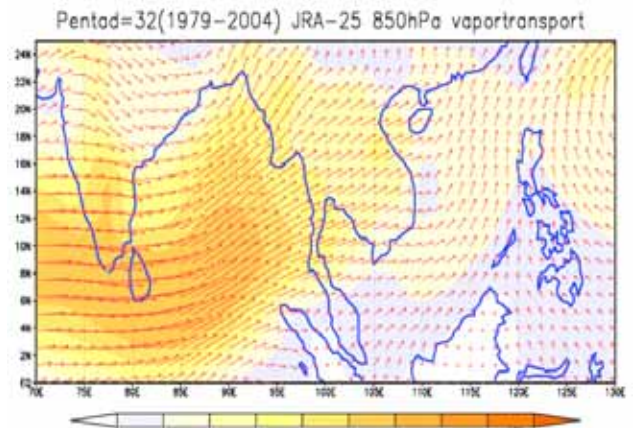
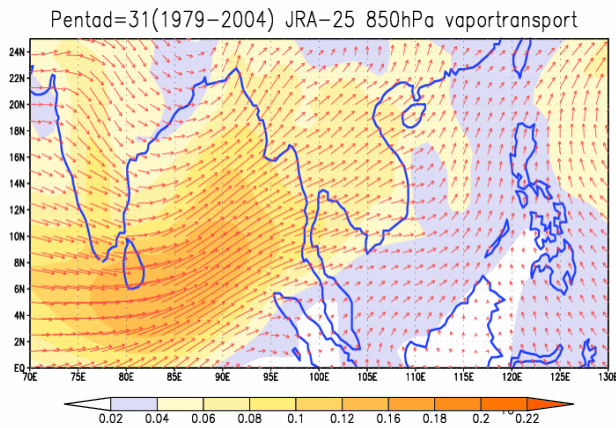
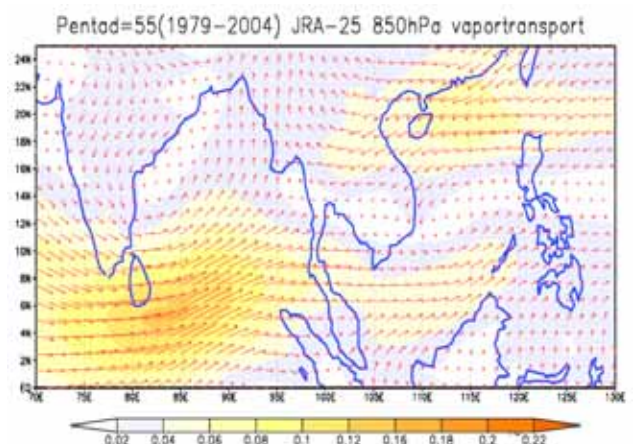
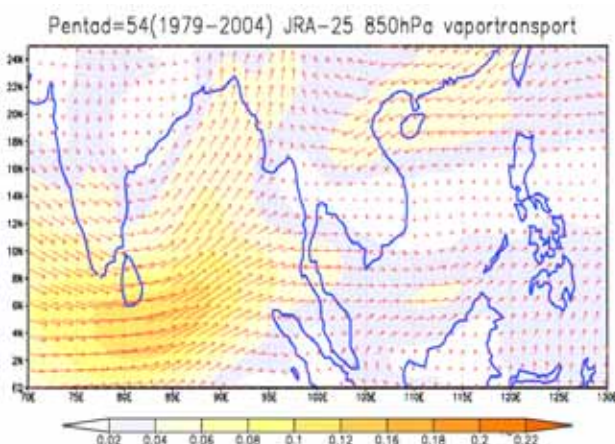


図 28 Pn=25 ~ Pn=32 における水蒸気輸送量の解析(79-04year)

次に、Withdrawal の結果を見ていく、Onset と同様に、インドシナ半島東部の Withdrawal 前後の Pn=54 ~ Pn=61 を解析した。インドシナ半島東部の高緯度域の Withdrawal 前の Pn=54 を見ると、Onset で半島全体を覆っていた南西風は衰退し、インドシナ半島東部に北東風が進入し始めている様子が見られる。この北東風は、徐々に勢力を増していき、Pn=60 になると、インドシナ半島東部全域が、北東風に覆われる様子が見られる。Pn=61 になると、インドシナ半島全体は、東風の支配下になる。このとき、Onset で卓越していた南西風は、完全に衰退し、夏季の終焉を示していることが伺える。Withdrawal は、Onset に比べて南北にスムーズに起こっていることが分かる。

以上のように、インドシナ半島上での Onset(図 23)に示したように、入り組んだ開始を示すのは、複雑な風系に入れかわりによって起こっていることから理解できる。一方、Withdrawal が南から北にスムーズに移行するのは、東西帯状の風系に入れかわりが起こっているからであることが確認できた。



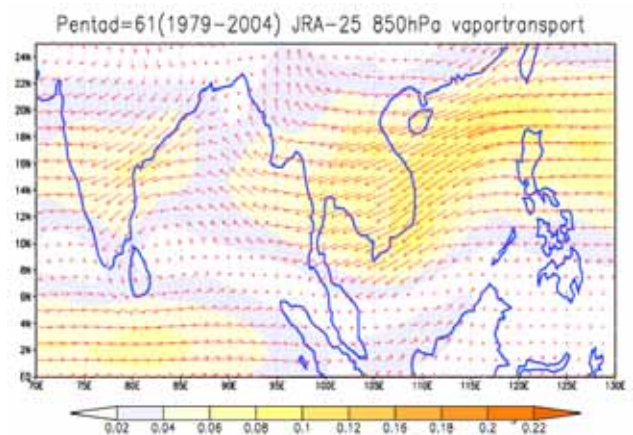
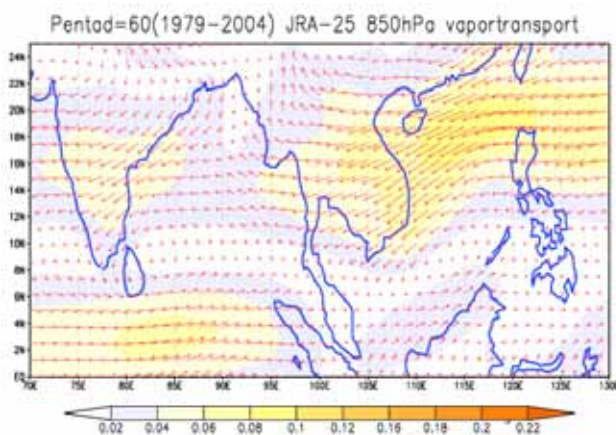
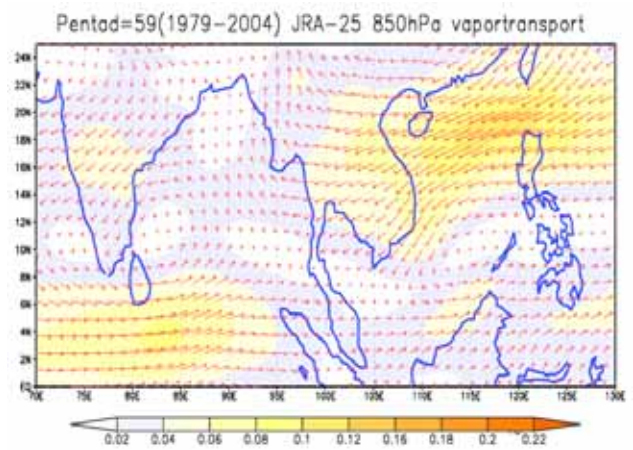
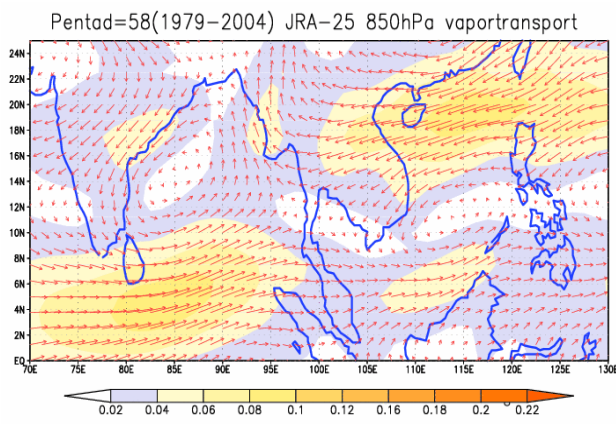
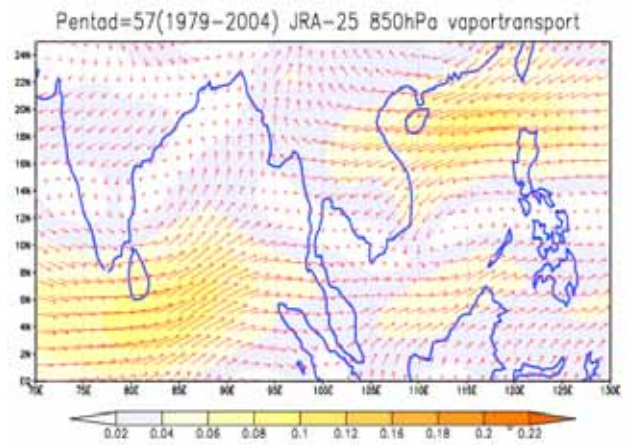
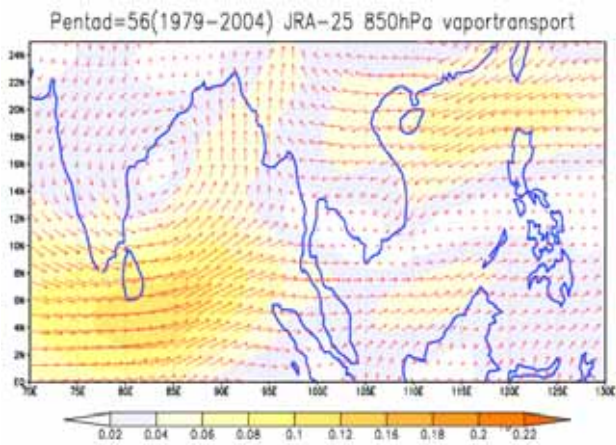


図 29 Pn=54 ~ Pn=61 における水蒸気輸送量の解析(79-94year)

3.6 対流性雨・層状性雨ヒストグラム解析

前節において、雨季の開始・終了とモンスーンの関係の地域性の結果から得られた4つの領域（A領域～D領域）ごとに、TRMMデータを用いて、対流性雨・層状性雨の比率のヒストグラム解析を行った。この解析は、任意の領域における層状性の雨と対流性の雨の頻度分布を示す。結果を図30～図33に示す。dBRとは、降水の強度のことである。解析時期は、それぞれの領域におけるもっとも卓越したPentad(半旬)を基準として、9半旬(約1.5ヶ月)ごとに解析を行った。9半旬とした理由は、モンスーンによるOnset・Withdrawalにおける大気場の変化は、短期間に急激に起きる現象ではあるが、TRMM衛星が同一地点のデータをサンプリングするために約1.5ヶ月かかるためである。それぞれの領域平均のOnsetは、A領域(図30)では $P_n=30$ 、B領域(図31)では $P_n=27$ 。Withdrawalは、C領域(図32)では $P_n=55$ 、D領域(図33)では $P_n=60$ となった。さらに、その半旬を元に、プレモンスーン期・フルモンスーン期・ポストモンスーン期の3つの時期に区分し詳細な解析を行った。

まず、A領域とB領域の結果から見ていく。A領域は、雨季の開始がOnsetよりも先行する領域である。この領域は、プレモンスーン・フルモンスーンともに、大きな差異は見られなかった。B地区は、Onsetが雨季の開始よりも先行する領域である。この領域では、プレモンスーン期において、 $dBR=-3$ から8の領域において大きな対流性雨の寄与を確認した。フルモンスーンになると、対流性雨の寄与は減少していくことが分かった。以上の結果から、雨季は乾季よりも層状性降水の寄与が大きいこと、また、雨季が開始してしまうと、Onsetの開始時期にかかわらず、対流性雨・層状性雨の比率は大きな変化はないことが推察される。

次に、C領域とD領域の結果から見ていく。C領域は、Withdrawalが雨季の終わりよりも先行する地域である。D領域は、雨季の終わりがWithdrawalよりも先行する地域である。C領域・D領域ともに、フルモンスーン期よりもポストモンスーン期に弱い対流性の寄与が、 $dBR=-15$ から3の領域で見られた。以上の結果から、C領域・D領域では、雨季の終わり・Withdrawalの時期を問わず、ポストモンスーン期はフルモンスーン期と比較して、弱い対流性雨の寄与が比較的多いことが明らかになった。このことは、南西モンスーンと、北東モンスーンの降雨特性に違いがあることを顕著に示している。

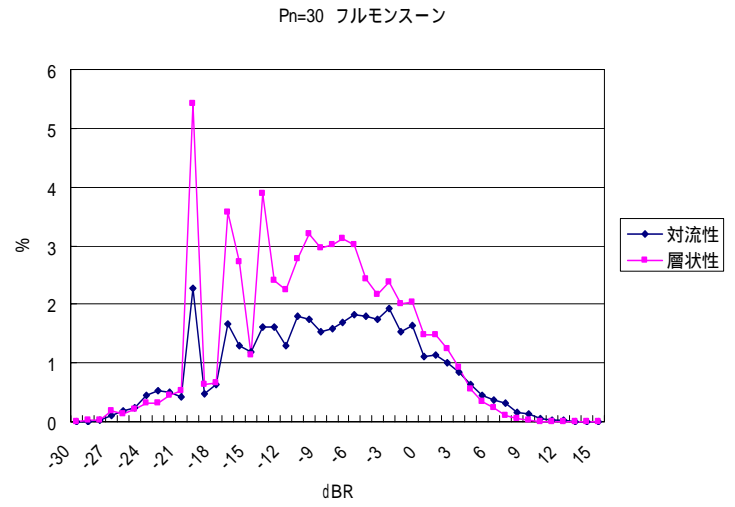
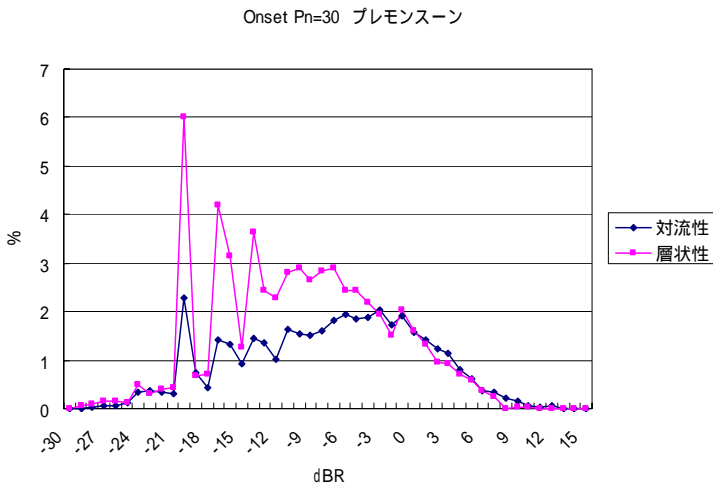


図 30 A 領域：対流性雨・層状性雨の比率（左図：プレモンスーン、右図：フルモンスーン）

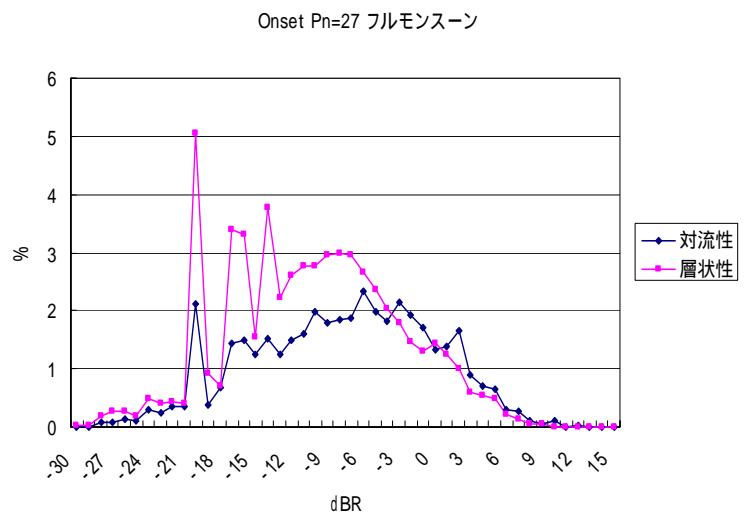
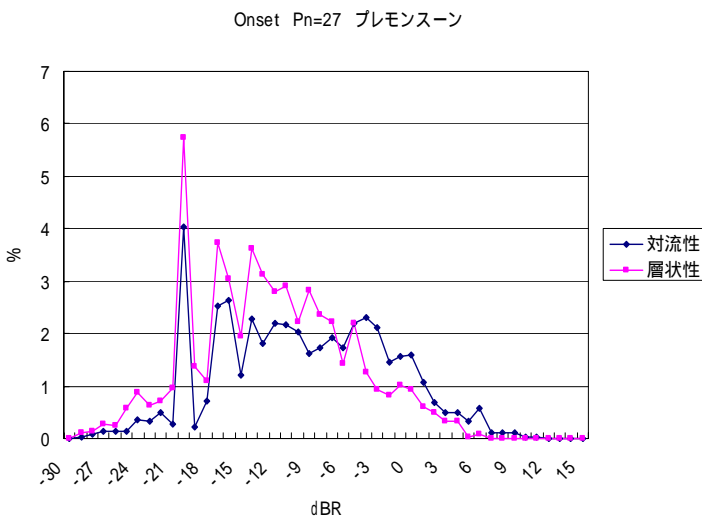


図 31 B 領域：対流性雨・層状性雨の比率（左図：プレモンスーン、右図：フルモンスーン）

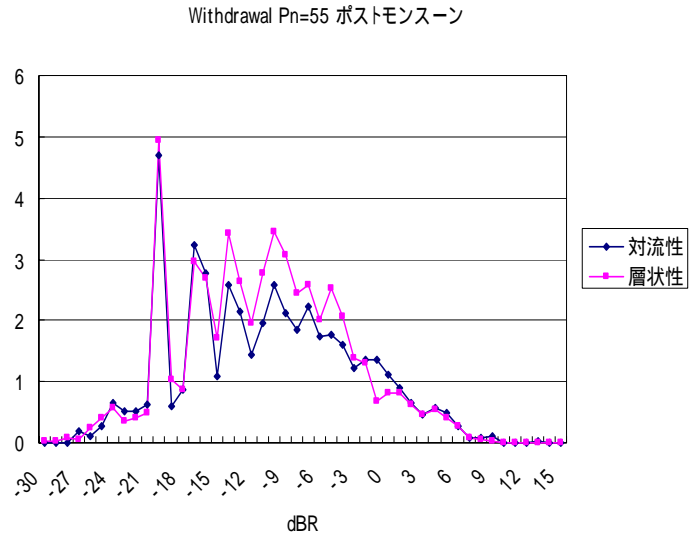
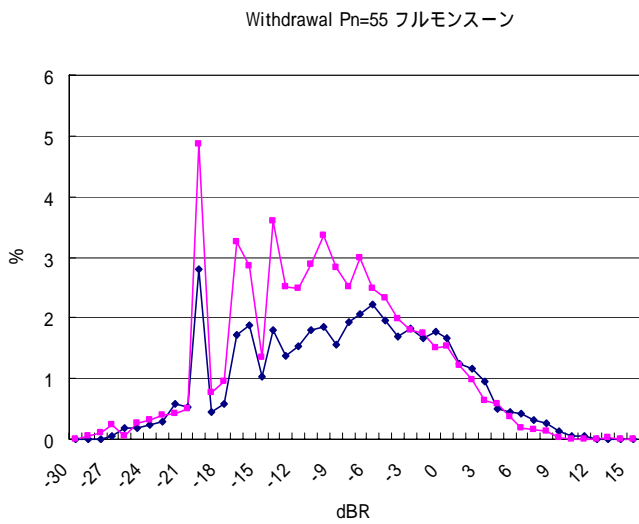


図 32 C 領域：対流性雨・層状性雨の比率（左図：フルモンスーン、右図：ポストモンスーン）

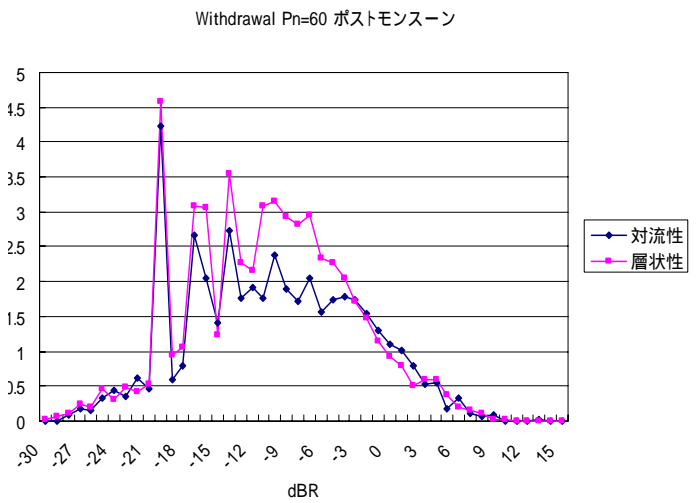
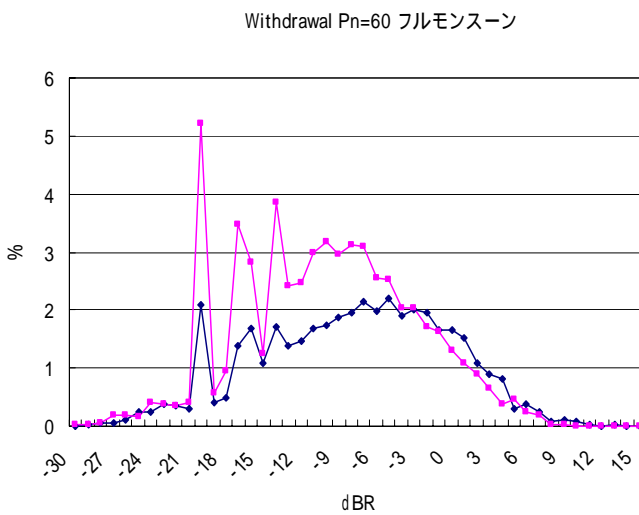


図 33 D 領域：対流性雨・層状性雨の比率（左図：フルモンスーン、右図：ポストモンスーン）

第4章 考察

第3章で得られた結果を元にして、本章では考察を試みる。本研究では、まず初めに自記雨量計を用いて Matsumoto (1997) を参考に、インドシナ半島東部における雨季の開始・終了の地域性を明らかにした。雨季の開始では、顕著な地域的共通性は見られず、地点ごとのばらつきが多く、おおよそ $P_n=20\sim 30$ の範囲で推移していた。インドシナ半島の雨季の開始は、半島全体において、比較的急速に始まると考えられる。 $P_n=27$ の水蒸気輸送量の解析を見ると、突如として南西風がインドシナ半島を卓越し始めている様子が見られる。これは、インドシナ半島における急激な雨季の始まりを示唆するものである。この点については、Matsumoto (1997) における、東西風の経度 - 時間断面図において論じている。雨季の開始と同時に、東風から急激に西風に変化する (Matsumoto, 1997)。地点にばらつきが多くみられるのは、自記雨量計の設置してある地点の周囲の環境による影響が大きいのではないかと推察される。例えば、ベトナム東海岸では、アンナン山脈の影響により、Matsumoto(1997)と同様に、夏季モンスーンによる降水はほとんど確認されなかった。雨季の終わりでは、インドシナ半島東部中央で、もっとも遅かったが、これは北東モンスーン由来の雨季の終わりを示唆するものであると考えられる。それ以外の地域では、雨季の終わりは高緯度から低緯度へ推移しており、南西モンスーンが徐々に衰退している様子がローカルに確認できる。

自記雨量計データを用いた降水量分布の解析では、雨量計のある地点のごとの詳細な降水量を明らかにすることができた。Matsumoto(1997)では、インドシナ半島全体の自記雨量計データを平均した降雨量を用いているが、雨量計がある地点ごとに詳細に解析した本研究では、メコン川上流域・中流域・デルタ域及びベトナム東海岸中央部で、年平均降水量が 2700mm 以上を超えるローカルで多大な降水量があることを初めて確認した。また、TRMM 衛星の解析により、これらの多雨域は、ほぼ同地点で確認することができた。メコン川で見られた、多大な降水量は、メコンデルタ域に洪水を引き起こすことが示唆され、地域防災を考える上で重要であることが考えられる。

次に、JRA-25(850hPa の東西風・鉛直シャー)による Onset・Withdrawal の時期・地域性について論じる。鉛直シャーの結果は、自記雨量計の結果と比較すると比較的明瞭な地域区分ができた。これは、雨量計のデータと比較して、地形などの周囲の影響を受けないためであると考えられる。Onset の結果では、インドシナ半島内陸部から東海岸に向けて、周囲より Onset が早いという結果が得られた。この結果は、Kiguchi and Matsumoto(2001)で論じている、インドシナ半島内陸部(タイ)で、Onset が早いという結果を裏付けるものであり、850hPa 東西風・鉛直シャーの解析では、本研究で初めて明らかになった。水蒸気輸送量の解析により、インドシナ半島中西部の早い Onset は、インド洋からの西風が未だ到達していない時期に熱帯太平洋からの風系による影響が示唆された。Withdrawal では、高緯度から低緯度へ(南南西へ)向かう様子が見られた。この進行は、水蒸気輸送の解析により明らかになった、北東モンスーンが、

高緯度から低緯度へ南下する点と一致する。

雨季の開始・終了とモンスーンの関係の地域性に関しては、比較的明瞭に地域区分をすることができた。雨季の開始とモンスーンの関係では、インドシナ半島全体で急激に雨季が始まり、徐々に風系の変化による Onset が低緯度から高緯度に進行していく影響により、低緯度において、雨季の始まりが、Onset よりも先行する地点が多く卓越すると考えられる。ゆえに、半島全体における急激な雨季の始まりにより、高緯度において、雨季の開始が Onset に先行していると思われる。低緯度において、雨季の開始が Onset に先行する地域と Onset が雨季の開始に先行する地域の二つが混合して見られた。これは、インドシナ半島内陸部から東部にかけて Onset が早いこと、及び雨季の開始が比較的地点ごとにばらついていることによる影響であると推察される。雨季の終了とモンスーンの関係では、アンナン山脈に沿って、Withdrawal が雨季の終わりに先行する地点がはっきりと確認できた。これは雨季が終わる前に、急激な北東モンスーンの侵入がアンナン山脈に吹き付けていることを示唆すると考えられる。

次に、対流性雨・層状性雨のヒストグラム解析の考察を行う。降雨特性の解析結果から、B 領域のプレモンスーンでは、対流性の降雨の寄与が大きく、B 領域のフルモンスーン及び A 領域のプレモンスーン・フルモンスーンでは、大きな差異が見られなかった。これは、雨季が開始してしまうと、風系が変化しても降水特性は変化しないこと、また雨季は乾季よりも層状性雨の寄与が大きいことを示唆していると思われる。C 領域・D 領域では、ポストモンスーンにおいて、それぞれ相対的に対流性雨の比率が高かったが、これは北東モンスーンの侵入の影響を示唆していると思われる。以上の結果により、南西モンスーンと北東モンスーンの降雨特性に違いがあることを顕著に示された。

まとめ

インドシナ半島東部は、雨季における多大な降水及び台風の襲来により、メコンデルタに代表されるような洪水が頻発する地域である。そのような社会的背景から、洪水予測・地域防災の観点から降水特性をローカルに解明することは、社会的な意義があると考えられる。

本研究では、インドシナ半島東部を研究対象地域として、従来の研究手法を踏襲しつつ、ローカルスケールにおける雨季の開始・終了及びモンスーンの Onset・Withdrawal の時期と地域性を明らかにし、降水特性を考察することを目的とした。

まず、降水特性を考察する前提として、自記雨量計データ・客観解析データ (JRA-25) を用いてそれぞれ、雨季の開始・終了、モンスーンの Onset・Withdrawal の時期と地域性を明らかにした。雨量計の結果により、雨季の始まりは、地点ごとにばらつき ($P_n=25 \sim P_n=30$) はあるものの、半島全体で突如として雨季が始まることが示唆された。水蒸気輸送量の結果において、既往研究が示すとおり、 $P_n=27$ から半島全体を南西風が覆った様子が見られ、この結果を裏付けている。雨季の終わりでは、ベトナム東岸中央で最も遅く、この地域以外は、高緯度から低緯度へ推移している様子が見られた。以上の結果から、雨季の終了は、雨季の開始と比較して緩やかに衰退していく現象であると言える。水蒸気輸送量の結果から、雨季の終了では、半島高緯度から低緯度へ推移している様子が見られ、雨季の終了の推移 (高緯度から低緯度への移動) の結果を裏付けるものであると言える。

降水量分布の解析では、自記雨量計・TRMM データの解析により、メコン川上流・中流・デルタ域及びベトナム東海岸中央部分に、年間平均降水量 2700mm を超えるローカルに限定された多雨域を本研究で初めて明らかにした。この結果により、メコンデルタ域・ベトナム東海岸中央部では、洪水が頻発すると予想され、地域防災を考える上で最重要地点であることが伺える。

モンスーンの Onset・Withdrawal の時期に関しては、雨季の開始・終了と比較して、明瞭な結果が得られた。インドシナ半島内陸部で Onset が早いという結果は、Kiguchi and Matsumoto(2001)が示唆した結果と同様のものであり、鉛直シャーを手法として用いた本研究では初めて確認することができた。この地点以外では、インドシナ半島低緯度は、内陸部よりも遅く始まり、経度 15° 以北では、北北西に Onset が推移していく様子が見られた。Withdrawal では、高緯度から低緯度へ向けて、南南東方向に推移する様子が見られた。一部、ベトナム東海岸中央部で、 $P_n=70$ を超える Withdrawal が遅い地域が見られた。

雨季の開始終了とモンスーンの関係の地域性では、雨季の始まりが Onset よりも先行する地域 (A 領域)・Onset の始まりが Withdrawal よりも先行する地域 (B 領域)・Withdrawal が雨季の終了よりも先行する地域 (C 領域)・雨季の終了が Withdrawal よりも先行する地域 (D 領域) の 4 領域に区分することができた。B 領域では、一部の地点で雨季の始まりが Onset よりも先行する地域が見られるが、これは、インドシナ半島内陸部から東部にかけて Onset が早いこと、

及び雨季の開始が比較的地点ごとにばらついていることによる影響であると推察される。

TRMM 衛星データを元に、これらの4領域を元にプレモンスーン・フルモンスーン・ポストモンスーンに区分し、層状性雨・対流性雨の比率を計算したヒストグラムの結果では、雨季の開始とモンスーンの関係において、雨季が開始してしまうと、Onsetの開始時期にかかわらず、降水特性は変化しないということが分かった。以上の結果は、雨季は乾季に比べて層状性雨の寄与が大きいことが示唆するものである。雨季の終了とモンスーンの関係では、共にポストモンスーン期において、比較的大きい対流性雨の寄与を確認した。以上の結果から、南西モンスーンと北東モンスーンの降水特性に違いがあることを顕著に示していると言える。

謝辞

本研究を行うにあたり、ご懇篤なご指導とご高配を賜りました東京大学大学院新領域創成科学研究科自然環境学専攻の大森博雄教授に厚くお礼申し上げます。また、有益な御助言を賜りました同大学院理学系研究科地球惑星科学専攻の高藪縁助教授に心より感謝し、同大学院附属気候システム研究センター及び同大学院 新領域創成科学研究科自然環境学専攻での議論に参加された多くの院生・学生諸君にお礼申し上げます。

終始ご指導とご助言を頂いた首都大学東京の松本淳教授、自然環境学専攻の安形康助手に衷心より感謝申し上げます。特に、松本淳教授には、ベトナム現地調査の機会を頂き心よりお礼申し上げます。

また、データ提供・解析手法に関しまして、同期の濱田太郎様、博士課程の横山千恵様、山下陽介様、井上誠様、筑波大学大学院生命環境科学研究科の川瀬宏明様、大庭雅道様、NICT(沖縄亜熱帯計測技術センター)の佐藤晋介様に心よりお礼申し上げます。

最後に、私の頭脳をこれほどまでに苦しめた、FORTRAN プログラミングと気候物理学に感謝の意を示すと同時に、今後より一層の環境学的見地からのモンスーン気候学の発展に期待します。

参考文献

- Alissow,B.P., (1954): Die Klimate der Erade. Berlin, 277pp
- Asakura,T.(1971):Transport and source of water vapor in the Northern Hemisphere and monsoon Asia. Yoshono,M.M. ed. :Water Balance of Monsoon Asia.Univ. Of Tokyo Press, 131-151
- Eguchi,T.,(1996):Regional characteristics of the summer monsoon onset in the Indochina Peninsula. Research Reports of Kochi University, Humanities,45,1-12
- Kubota,I.(1971):Seasonal variation in water vapor balance over the Northern Hemisphere and Asia. Yoshono,M.M.ed.:Water Balance of Monsoon Asia. Univ. Of Tokyo press,53-73
- Khromov, S.P.(1957):Die geographische Verbreitung der Monsune. Petermanns Geogr. Mitt., 101, 234-237
- Koppen, (1918): Klassifikation der Klimate nach Temperatur, Niederschlag und Jahreslauf. Petermanns Geogr. Mitt., 64,193-203,243-248
- Yasu-Masa Kodama et al.(2005) Seasonal transition of predominant precipitation type and lightning activity over tropical monsoon areas derived from TRMM observations,geophysical research letters,vol.32,L14710.
- Masashi KIGUCHI and Jun MATSUMOTO(2004):The Rainfall Phenomena during the Pre-monsoon Period over the Indochina Peninsula in the GAME-IPO Year,1998
- Matsumoto,J.(1990):Withdrawal of the Indian summer monsoon and its relation to the seasonal transition from summer to autumn over east Asia. Mausam,41,196-202
- Matsumoto,J.(1992):The seasonal changes in Asian and Australian monsoon regions.J. Meteor.Soc.Japan,70,257-273
- Matsumoto,J.(1995):Rainfall climatology over Asian monsoon region. In Murai,S.ed. Toward Global Planning of Sustainable Use of the Earth,Elsevier,419-422
- Matsumoto,J.(1997):Seasonal transition of summer rainy season over Indochina and adjacent monsoon region advance in atmospheric sciences, Vol.14,No.2
- Murakami,T.and J.Matsumoto,(1994):Summer monsoon over the Asian Continent and western North Pacific. J. Meteor. Soc. Japan, 72, 719-745.
- Orgill,M.,(1967):Some aspects of the onset of the summer monsoon over South East Asia. Report to U.S. Army, Contract DA28-043-AMC-013038(E),Colorado State Univ.,75pp.
- Wang,B. and L.Ho(2002):Rainy season of the Asian Pacific summer monsoon.J.Climate, 17,386-398
- Yanai, M., C. Li, and Z. Song, (1992):Seasonal heating of the Tibetan Plateau and its effect on the evolution of the Asian summer monsoon. J.Meteor. Soc. Japan, 70, 319-351.

- Yongsheng Zhang et al(2002):Onset of the Summer Monsoon over the Indochina Peninsula:Climatology and Interannual Variations.J.Climate,15,3206-3221
- Yin,M.T., (1949): A synoptic-aerologic sutudy of the onset of the summer monsoon over India and Burma J.Meteorol.,6, 393-400.
- India Meteorological Department, (1943) Climatological Atlas for Airmen, India Meteorological Department, New Delhi, 100pp.
- Shinoda, M., T. Mikami, K. Iwasaki, H. Kita-jima, T. Eguchi, J. Matsumoto, and K. Masuda, (1986): Global simultaneity of the abrupt seasonal changes in precipitation during May and June of 1979. J. Meteor. Soc. Japan, 64, 531-546.
- He, H., J.W. McGinnis, Z. Song, and M. Ynai, (1987): Onset of the Asian summer monsoon in 1979 and the effect of the Tibetan Plateau. Mon, Wea. Rev., 115,1966-1995.
- 家島彦一(2000):モンスーン文化圏という世界,尾本恵一・濱下武志・村井吉敬・家島彦一編,「海のアジア 2 モンスーン文化圏」,岩波書店, -
- 藤縄龍治(2005):インドシナ半島におけるモンスーン後退期の降水量の経年変動,東京大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻修士論文,1-81pp.
- 高橋洋(2001):タイにおける降水量の季節進行について.筑波大学地球科学主専攻卒業論文,48pp.
- 吉野正敏(1973):モンスーンアジアの気候による地域区分.吉野正敏編著,「モンスーンアジアの水資源」,古今書院,245-254
- 春山成子(2004):ベトナム北部の自然と農業 黄河デルタの自然災害とその対策,古今書院,1-131
- 高橋裕ほか(1998):水循環と流域環境,古今書院,1-305
- 松本淳・安形康ほか(2005):東南アジアにおける降雨観測システムの構築,東京大学文部科学省研究開発局平成 17 年度研究成果報告書,1-47
- 松本淳ほか(2002):東南アジアのモンスーン気候学,気象研究ノート,202,57-84
- 横井覚(2006):インドシナ半島及びベンガル湾においてモンスーン雨季に見られる季節内変動の解析的研究.京都大学大学院理学系研究科博士論文,1-101
- 高藪縁(2003):モンスーンと季節内変動.気象研究ノート第 204 号「モンスーン研究の最前線」,41-67
- 安成哲三(1994):アジアモンスーン エネルギー・水循環研究観測計画(GEWEX Asian Monsoon Experiment;GAME).天気,41,459-464
- 原田千夏子(2001):サハラ砂漠域の降水形成過程,東京大学院新領域創成科学研究科環境学専攻自然環境コース地球環境モデリング学分野修士論文,8
- 朝倉正(1973):モンスーン期における水蒸気輸送と雲分布、気象研究ノート,117,511-520