

水平領域規模を考慮した気象要素と降雨の抽出

EXTRACTION OF METEOROLOGICAL ELEMENTS AND RAINFALL CONSIDERING A HORIZONTAL SCALE OF A TARGET AREA

西山浩司¹・神野健二²

Koji NISHIYAMA and Kenji JINNO

¹正会員 理修 九州大学助手 工学研究院 (〒812-8581 福岡市東区箱崎6丁目10-1)

²正会員 工博 九州大学教授 工学研究院 (〒812-8581 福岡市東区箱崎6丁目10-1)

Rainfall prediction technique based on short-range forecasts requires the construction of physically meaningful relationships between numerical model outputs and rainfall. However, it is questionable whether conventional rainfall prediction models incorporate the physically meaningful relationships because inherent horizontal scale in a meteorological field inducing a rainfall is not fully considered. Therefore, in our study, in order to relate meteorological elements (Precipitable water, Convergence, CAPE) to rainfall, a horizontal scale of a target area for extracting them was considered. As a result, a larger target area led to the construction of physically meaningful relationships between meteorological elements and rainfall. Therefore, it should be emphasized that the specification of the horizontal scale of target area, considering horizontal features of meteorological fields, plays an important role in constructing a reliable rainfall prediction model for practical use.

Key Words : Precipitable water, Convergence, CAPE, Rainfall prediction

1. はじめに

降雨予測の基本は、過去の数値予報結果と雨量との因果関係を統計的に関連づけるMOS (Model Output Statistics) と呼ばれる手法¹⁾に基づいている。その因果関係は、重回帰式によって表現される場合や、ニューラルネットワークによる学習によって構築される場合もある。このようにして構築された降雨予測モデルに、新しい数値予報結果が入力されて、雨量や降水確率が出力される。この手法は、気象庁の予報システムの中では、半日~1日程度先を対象にした短期予報に利用されている。その予報結果は、半日~1日程度先に大雨が発生する恐れがある場合に発令される大雨注意報のための情報源の一つである。この予報は、現況から数時間先までを対象にした短時間降水予報²⁾ (大雨洪水警報発令のための情報源の一つ) と並んで、防災上極めて重要な気象情報を与える。従って、信頼性のある防災気象情報を提供するためには、当然、降雨予測モデルの信頼性を向上させることが必要不可欠である。

降雨予測モデルを構築する際、精度を向上させることが最も重要であることは言うまでもないが、前提条件として、数値予報結果と降雨の対応関係が、物理的な因果

関係を十分反映していることが望まれる。しかし、多くの降雨予測モデル^{3), 4), 5)}では、単に、観測点の雨量と近傍格子の気象要素を対応させてデータを抽出し、重回帰分析の手法の一つである変数選択法を使って、気象要素を選択する方法が採用されている。この方法では、観測点の雨量をその近傍の気象要素と対応させている点に問題があり、降雨を引き起こす物理的な因果関係を説明することが難しいと考えられる。即ち、2節、5節の述べるように、各気象要素から構成される気象場や雨量分布には特徴的な分布があり、広範囲な分布、局地的な分布、或いは、バンド状の分布を示したりする。また、気象要素自体にも独特な性質を持っている。例えば、安定度に関連する指標で考えると、夏季日射の影響で積乱雲が発生する場合には、発生前の成層状態は不安定である。一方、前線帯では、既に降雨を伴っているため、不安定が解消され、中立成層が支配的になり、その前面で不安定成層になっている場合が多い。この場合は、‘観測点の雨が激しいから直上は不安定’とは言えない。以上のような特性を十分に考慮しておかないと、降雨を引き起こす物理的な因果関係が、降雨予測モデルに十分に反映されず、予測結果に対する信頼性が低下することが懸念される。

以上の問題は、気象要素と雨量の関係を抽出する領域の規模を考慮することによって、改善が可能であると

考えられる．そこで，本論文では，従来の降雨予測モデルのように，一つの格子点を含む狭い領域（約20km幅）の場合と，さらに領域を拡大した場合を考慮して，気象要素と雨量との対応関係を構築し，領域の規模に従って，その関係がどのように変化し，どの程度まで，物理的に意味のある因果関係を説明することができるようになるか調べる．ここでは，豪雨による災害が多発する梅雨期を対象に解析が行われる．

2．梅雨期の気象場の基本的特徴

雨量と気象要素の対応関係を，梅雨期の気象場の基本的な特徴⁶⁾に基づいて抽出する．梅雨期の豪雨は，下層ジェットと呼ばれる強風帯を伴って現れる湿舌（水蒸気を多く含む領域）の領域で発生することが多い．湿舌は，梅雨前線帯と一致し，常に大量の水蒸気の供給を受ける．従って，不安定化した成層状態は，収束に伴う上昇流の影響を受けると，対流活動の結果として解消され，中立化する特徴を持っている．一方，雨量分布の特徴としては，梅雨前線の近傍で，1993年の鹿児島豪雨⁷⁾や1982年の長崎豪雨⁸⁾を代表として，幅50～100km程度の規模を持つバンド状，或いはそれと同規模の塊状の降雨分布⁹⁾¹⁰⁾が現れ，その通過に伴って，短時間スケールで大量の降雨がもたらされることが多い．

梅雨前線帯の降雨発生メカニズムは，以上の特徴を含め，実際は，さらに複雑である．しかし，基本的には，水蒸気が十分含まれることによって，深い対流活動を引き起こすほどの不安定成層が形成されるか否か，また，対流活動を引き起こす引き金があるか否かといった特徴が，降雨の発生を説明する指標を決定するための基本的な基準となると考えられる．そこで本論文では，水蒸気量と関連する指標として，水蒸気量の鉛直積算量を表す可降水量（PW），対流活動の引き金となる指標として，空気の収束（CONV），対流活動の状況を説明する安定度指標として，気塊を1000hPa面から持ち上げて得られる対流有効位置エネルギー（CAPE）が用いられる．

3．気象要素と雨量の領域別抽出方法

本論文では，気象要素に対しては，日本を含む東アジア域の気象庁領域客観解析データを使用する．一方，雨量に対しては，レーダーアメダス解析雨量を用いる．領域客観解析データ（GPV（Grid Point Value））は，1日4回（日本時間3，9，15，21時）作成され，水平20km間隔，鉛直方向に21層（地表面-10hPa）からなる．データは，気圧面ごとに，ジオポテンシャル高度，気温，湿度（湿数），風向・風速によって構成される．一方，レーダーアメダス解析雨量は，気象レーダーによる反射因子

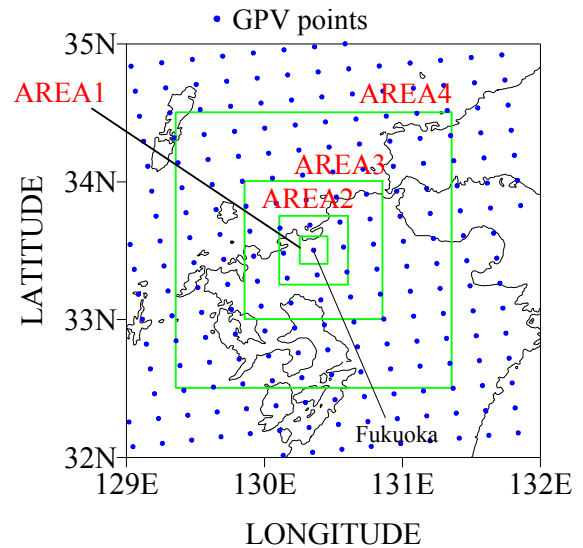


図 - 1 気象要素と雨量を抽出するための4つの対象領域．各領域の中心は福岡市近傍のGPV点．

表 - 1 各領域の大きさとそれに含まれるGPV点とレーダーアメダス点の数．

領域	領域の大きさ (緯度経度幅)	GPV点 の数	レーダーアメ ダス点の数
AREA1	0.1°	1	12
AREA2	0.5°	9	80
AREA3	1.0°	25	320
AREA4	2.0°	101	1280

表 - 2 気象要素と雨量の抽出方法．

PW(mm)	領域内最大値
CONV(s ⁻¹)	領域内の4気圧面（850, 900, 925, 950 hPa）から選ばれた最大の収束量
CAPE(m ² /s ²)	領域内最大値
雨量(mm/h)	GPV時間（0900,2100JST）から3時間以内に得られる領域内最大時間雨量

から見積もられる2.5km格子のレーダー雨量と，アメダス点で観測される実際の雨量を合成して得られる5km間隔の格子雨量データである（2001年4月以降2.5km格子）．時間間隔は，1時間間隔（2003年6月以降30分間隔）である．ここでは，1996年から99年までの4年間を対象にして，各年6，7月のGPVが利用される．この際，1日2回（日本時間の9時と21時）のGPVを利用し，合計484ケース（4つの欠損ケースを除く）のGPVが使われる．

本論文では，気象要素と雨量の対応関係を抽出するため，図 - 1に示されるような4つの対象領域を設定し，表 - 1で示される4つのケースについて，雨量と気象要素の対応関係を調べる．図 - 1の各領域は，福岡市に最も近いGPV点を中心として領域の大きさが設定されている．

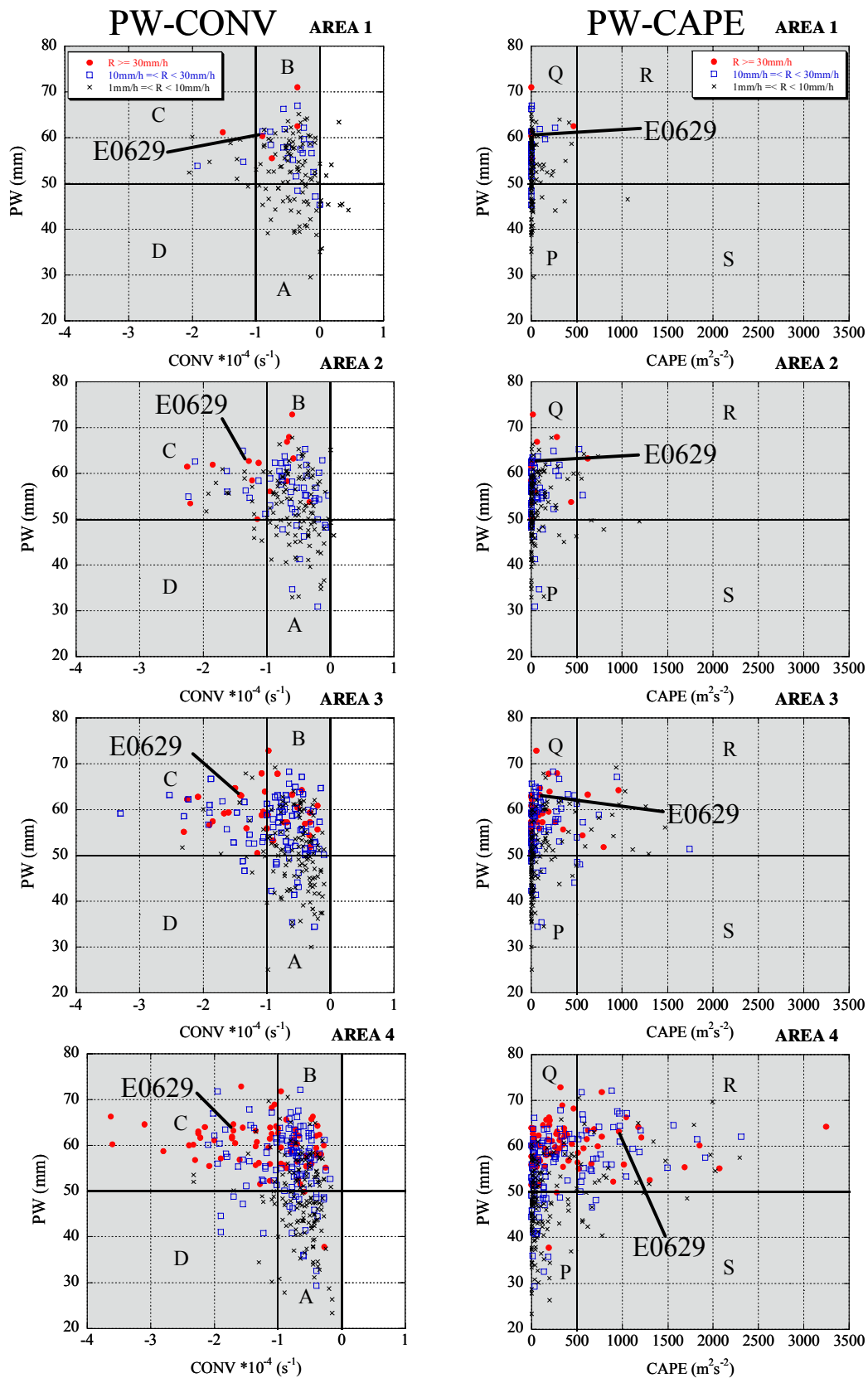


図-2 左側の図は、雨量のPWとCONVに対する依存性が、そして、右側の図は、PWとCAPEに対する依存性が領域規模別に示されている。前者では、50mmのPW、 $-1.0 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$ のCONVを境にして、4つの変数範囲(A, B, C, D)を設定し、一方、後者では、50mmのPW、 $1000 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ のCAPEを境にして、4つの範囲(P, Q, R, S)を設定する。また、撒布図上の各点は、 $1 \leq R < 10 \text{ mm/h}$ 、 $10 \leq R < 30 \text{ mm/h}$ 、 $R \geq 30 \text{ mm/h}$ の3つの雨量カテゴリーに分けてプロットされている。また、E0629は、1999年6月29日0900JSTに北部九州を襲った豪雨ケースを示す。

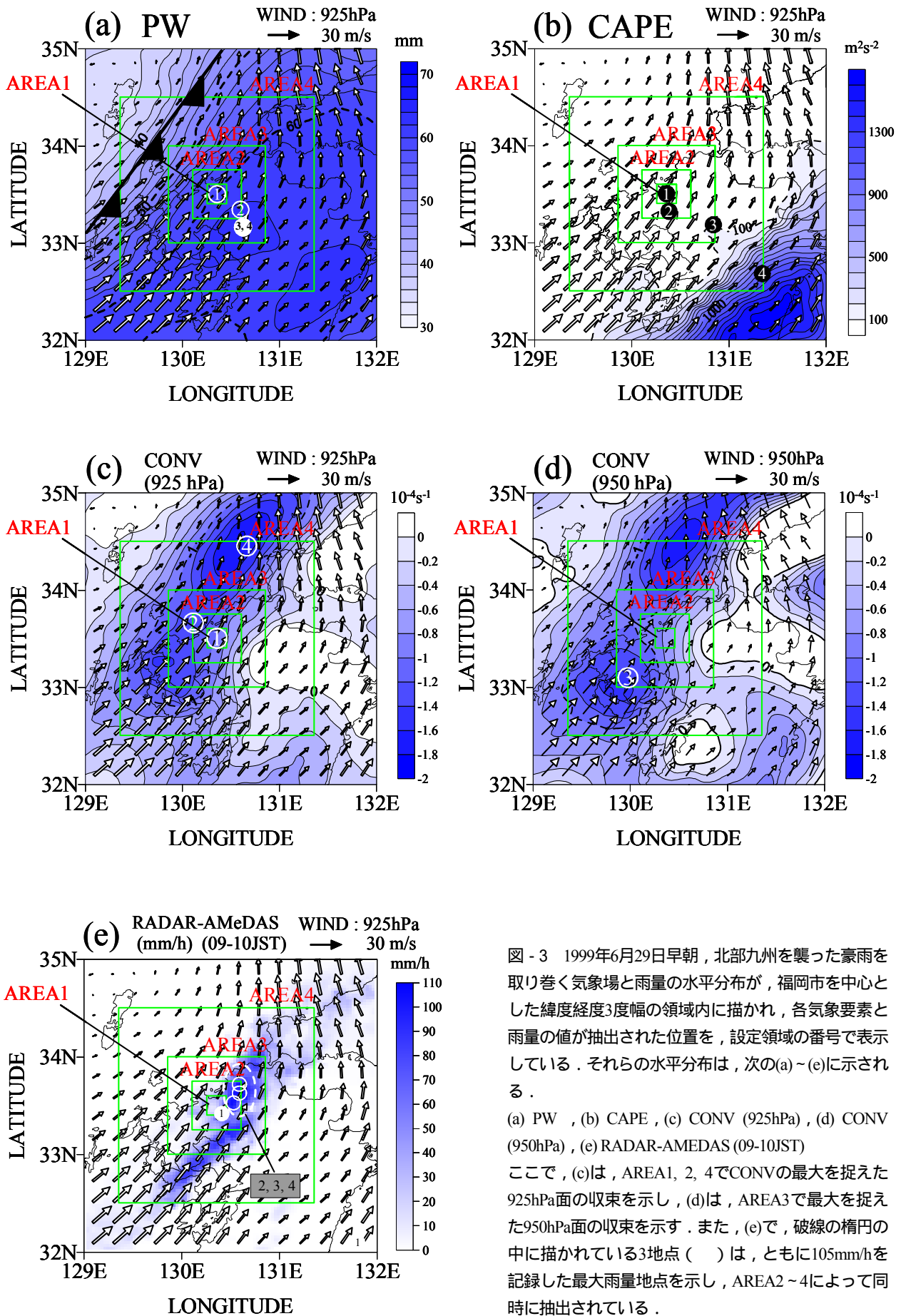


図 - 3 1999年6月29日早朝、北部九州を襲った豪雨を取り巻く気象場と雨量の水平分布が、福岡市を中心とした緯度経度3度幅の領域内に描かれ、各気象要素と雨量の値が抽出された位置を、設定領域の番号で表示している。それらの水平分布は、次の(a)~(e)に示される。

(a) PW , (b) CAPE , (c) CONV (925hPa) , (d) CONV (950hPa) , (e) RADAR-AMEDAS (09-10JST)

ここで、(c)は、AREA1, 2, 4でCONVの最大を捉えた925hPa面の収束を示し、(d)は、AREA3で最大を捉えた950hPa面の収束を示す。また、(e)で、破線の楕円の中に描かれている3地点()は、ともに105mm/hを記録した最大雨量地点を示し、AREA2~4によって同時に抽出されている。

AREA1では、緯度経度幅 0.2° ($\sim 20\text{km}$) の水平規模を持ち、福岡市近傍のGPV点のみ含む。一方、AREA2 ($0.5^\circ\sim 50\text{km}$)、AREA3 ($1.0^\circ\sim 100\text{km}$)、AREA4 ($2.0^\circ\sim 200\text{km}$) のように領域が拡大するに従って、内部に含まれるGPV点とレーダーアメダス点は増加する。また、気象要素と雨量の抽出方法は、表-2に従う。PWとCAPEは、各領域で最大値を抽出する。一方、CONVは、下層の4気圧面 (850, 900, 925, 950hPa) から最大の収束 (マイナス値の絶対値の最大) を抽出する。雨量の抽出については、降雨システムが、どの程度の時間内に対象領域内を通過するかについて十分な検討が必要であるが、今回は、GPVの設定時間 (09, 21JST) から3時間以内に、対象領域内にもたらされる最大1時間雨量を抽出する。

4. 気象要素と雨量との領域別関連性

本節では、領域を拡大するに従って、抽出される雨量、気象要素の値がどのように変化するか調べる。図-2には、雨量のPWとCONVに対する依存性と、PWとCAPEに対する依存性が領域規模別に示されている。便宜上、前者では、50mmのPW、 $-1.0\times 10^{-4}\text{ s}^{-1}$ のCONVを境にして、4つの変数範囲 (A, B, C, D) を設定し、後者では、50mmのPW、 $1000\text{ m}^2\text{ s}^{-2}$ のCAPEを境にして、4つの範囲 (P, Q, R, S) を設定する。また、図-2の散布図の各点は、 $1\leq R<10\text{ mm/h}$ 、 $10\leq R<30\text{ mm/h}$ 、 $R\geq 30\text{ mm/h}$ の3つの雨量カテゴリーに分けてプロットされている。これ以降、それらのカテゴリーを、弱い降雨、中程度の降雨、強い降雨と呼ぶことにする。

最初に、雨量の頻度特性を見ると、領域を拡大すると、弱い降雨の頻度が減少し、中程度、強い降雨の頻度が増加することがわかる。その結果は、領域規模の拡大に伴って、領域内に中程度、強い降雨を含む降水域を捉える機会が増加することを意味する。次に、気象要素に関して見ると、CONVの場合は、領域拡大に従って、大きな値を抽出する頻度が増加する。一方、CAPEの場合は、AREA3以下の領域で、抽出される値が小さく、AREA4で、大きな値を抽出する頻度が急激に増加する。また、PWの場合は、強い降雨で、領域規模に関係なく、50mm以上の範囲に分布する。この特徴は、下層が十分湿っている場合、或いは、対流活動の結果として、下層から上層に至るまで湿度が100%に近い雲域を示す場合に現れ、梅雨期・夏季の気象場の特徴を反映している。以上より、強い降雨は、領域の拡大に伴って、図-2のB, Cの範囲と、Q, Rの範囲で、大きな頻度を示すことがわかる。

5. 気象場の特徴に基づく因果関係の考察

前節で述べたように、領域規模の拡大に伴って、気象

要素と雨量との関係が明瞭になることがわかった。その因果関係は、気象場の特徴によって説明されることは言うまでもない。即ち、図-2に示された関係は、梅雨期・夏季の気象場の特徴が含まれ、梅雨前線帯や台風の影響を受けたケースや、日射による影響を受けたケースなど多くのパターンが含まれる。そこで、本節では、1999年6月29日早朝、福岡市に豪雨をもたらした気象場の特徴を例にとり、領域規模別に抽出された気象要素と雨量との関係が、実際の気象場に基づいた因果関係をどの程度まで反映することが可能になるか調べる。表-3には、図-2のE0629に対応する気象要素 (PW, CONV, CAPE) と雨量の値が領域規模別に示されている。また、図-3に、緯度経度3度幅の領域内で各気象要素と雨量の水平分布が描かれ、表-3に記載された値の抽出された位置が、設定領域の番号で表示されている。

表-3 1999年6月29日0900JSTの豪雨イベントを対象にして、4つの領域から抽出された気象要素 (PW, CONV, CAPE) と雨量の値。

	AREA1	AREA2	AREA3	AREA4
PW(mm)	60.4	62.7	63.2	63.2
CAPE(m^2/s^2)	0	27.7	92.1	961.3
CONV(10^{-4} s^{-1})	-0.9	-1.28	-1.42	-1.7
RAIN (mm/h)	51	105	105	105
PW vs CONV	B	C	C	C
PW vs CAPE	Q	Q	Q	R

このイベントで発生した豪雨は、典型的な湿舌の場で発生した。図-3aに示されるように、湿舌に相当する南東側で、風速が大きい下層ジェットを伴って、PWが50mmを超える領域になっている。一方、その北西側では、乾燥空気が流入して、PWの水平勾配が大きい領域 (地上天気図では寒冷前線が解析されている) が存在し、南西から北東に伸びる収束域に対応している (図-3c, d)。さらに、この収束域の南側には豪雨域 (図-3e) が認められ、収束による上昇流が引き金となって豪雨を引き起こすような深い対流が発達したと考えられる。この特徴は、大気成層状態にも影響する。対流が起こると中立に近い成層状態になり、理論上CAPEは小さくなる。そのため、図-3bに示されるように、豪雨域で、CAPEが $100\text{ m}^2\text{ s}^{-2}$ 以下の小さい値を示したと考えられる。実際、このイベントでは、数値モデルによる解析¹¹⁾によって、中立に近い成層状態が豪雨域に存在したことが確認されている。反対に、CAPEの大きい領域は、豪雨域から離れた領域 (豪雨域の南東側) に存在する。この領域は、前線に対して、水蒸気を供給する領域として特徴づけられる。その成層状態は、下層が湿って、対流が起こっていない状態であることから、対流不安定を示し、CAPEの値が大きい特徴を持っている。

従って、この領域の空気が収束域に流入し、対流活動を誘起し、大気を中立化することを考慮すれば、豪雨域から離れた安定度も、豪雨の指標として有効である可能性があり、十分検討する余地がある。

次に、以上の豪雨を引き起こした気象場が、設定した領域 (AREA1~4) 内で、どのように捉えられているか、気象要素別に考察する。PW (図 - 3a) の場合、AREA3, 4 で湿舌と PW の勾配が大きい前線の特徴を十分に捉えている。また、湿舌の広範囲な分布のため、領域規模に関係なく、大きな PW を抽出可能となる。一方、CONV (収束域) の場合 (図 - 3c, d) は、AREA4 によって十分捉えられ、AREA3 も強い CONV を含む領域を捉えている。しかし、収束域は、バンド状で横幅が狭いため、設定領域が小さくなると、収束域を十分に捉えられなくなる。その影響で、AREA1 は、2つの強い収束域に挟まれ、結果的に、弱い CONV の値しか抽出できないことがわかる。CAPE の場合 (図 - 3b)、AREA3 よりも小さい領域では、豪雨域の対流活動の影響で、小さい CAPE しか抽出できないことがわかる。しかし、AREA4 まで拡大すると、豪雨域の南東側に存在する大きな CAPE の領域 (豪雨域への水蒸気の流入域) を含むようになる。最後に雨量 (図 - 3e) に関しては、AREA3, 4 で、豪雨域を十分捉えている。一方、AREA2 では、豪雨域の一部しか捉えていないが、その領域内を豪雨域が通過していた影響で、大きな雨量を含む領域を捉えることができている。従って、AREA2~AREA4 で、豪雨域の最大雨量 105mm/h を抽出することができた。しかし、領域規模が小さい AREA1 では、近傍を 105mm/h の雨量を含む豪雨域が通過しているにも関わらず、105mm/h の雨量を抽出する機会を失い、51mm/h の雨量を抽出する結果になってしまった。

6. 結論

本論文では、従来の降雨予測手法のように、一つの格子点を含む狭い領域 (約20km幅) の場合と、さらに領域を拡大した場合を考慮して、気象要素と雨量との対応関係を構築し、領域の規模に従って、その関係がどのように変化し、実際の気象場に基づいた因果関係をどの程度まで反映することが可能になるか調べた。

その結果、領域規模の拡大によって、気象要素と雨量との関係が、実際の気象場の特徴を概ね反映するようになった。従って、領域が狭いと、豪雨に関連する気象場の特徴と強い降雨域があっても、両方とも捉えられることもあれば、どちらか一方だけ捉えられる、或いは両方とも捉えられなくなる危険性を把握しておく必要がある。さらに、気象要素と雨量との良好な関係を得るためには、それらの分布の特徴も考慮する必要がある。例え

ば、湿舌内の可降水量を捉える場合には、勾配が緩やかな水平分布を考慮すると、領域を大きく設定する必要はない。また、収束や降雨を捉える際には、前線に沿った形で横幅が狭いバンド状の特徴を示すことを考慮に入れて、領域を大きく設定する必要がある。安定度指標の場合は、前線帯の降雨域で中立、その前面で対流不安定になるように、対流の段階で大きく成層状態が異なる。このような固有な性質を考慮しつつ、どの領域の安定度指標と降雨が関連するかについて十分な考察を行い、安定度指標を抽出する領域の位置と規模を決める必要がある。このように、信頼性のある降雨予測手法を構築するためには、気象要素自体が持つ固有の性質とその分布特性を考慮に入れて、各気象要素別に、領域の位置と規模を設定すること、そして、雨量に関しても、バンド状、クラスター状の分布特性を考慮に入れて、領域規模を決めることが重要である。従って、以上示した点を降雨予測手法に十分反映させなければ、どんなに精練された手法であっても、予測結果の信頼性の低下を招く恐れがあることを十分認識しなければならない。

参考文献

- 1) Glahn, H. R., Lowry, D. A. : The use of Model Output Statistics (MOS) in objective weather forecasting. *J. Appl. Meteor.*, **11**, pp. 1203-1211, 1972.
- 2) Wilson, J. W. : Precipitation nowcasting : Past, Present and Future. Proceedings of International Symposium on Hydrological Application of Weather Radar, Melbourne, Australia, 8pp (CD-ROM), 2004.
- 3) Kuligowski, R. J., Barros, A. P. : Localized precipitation forecasts from a numerical weather prediction model using artificial neural network. *Weather and Forecasting*, **13**, pp. 1194-1204, 1998.
- 4) Hall, T., Brooks, H. E., Doswell, C. H. : Precipitation forecasting using neural network. *Weather and Forecasting*, **14**, pp. 338-345, 1999.
- 5) 気象庁 : 平成8年度量的予報資料 (2章), 気象業務支援センター, 78pp, 1996.
- 6) 吉崎正憲, 村上正隆, 加藤輝之 : メソ対流系, 気象研究ノート, 386pp, 2005.
- 7) Kato, T. : Numerical simulation of the band-shaped torrential rain observed over southern Kyushu, Japan, on 1 August 1993. *J. Met. Soc. Japan*, **76**, pp. 97-128, 1998.
- 8) Ogura, Y., Asai, T., Dohi, K. : A case study of a heavy precipitation events along the Baiu front in Northern Kyushu, 23 July 1982: Nagasaki heavy rainfall. *J. Met. Soc. Japan*, **63**, pp. 883-900, 1985.
- 9) 吉崎正憲 : メソ対流系 (), 天気, **46**, pp.783-790, 1999.
- 10) 吉崎正憲 : メソ対流系 (), 天気, **46**, pp.833-841, 1999.
- 11) Kato, T. : Structure of the band-shaped precipitation system inducing the heavy rainfall observed over northern Kyushu, Japan on 29 June 1999. *J. Met. Soc. Japan*, **84**, pp. 129-153, 2006.

(2006.9.30受付)