

線状降水帯及びマルチセルのリアルタイム検出 や定量的降雨予測を考慮した洪水予測について (中間報告)

渡壁 守

近畿地方整備局 淀川ダム統合管理事務所 防災情報課 (〒573-0166 大阪府枚方市山田池北町10-1)

近年、台風性の降雨だけでなく、前線性や線状降水帯、マルチセル（組織化した積乱雲）による集中豪雨により、洪水等の災害が頻繁に発生している状況下の中、より効果的なダム操作やダムの有効活用が求められている。そのためには、気象庁から提供される数値予報だけでは無く精度の高い定量的降雨予測が必要となる。今回は、予測が難しい線状降水帯及びマルチセルについて、予測手法の確立及び定量的降雨予測を考慮した洪水予測システムの開発・構築を目指し、検討したので中間報告を行うものである。

キーワード 局地的豪雨, 線状降水帯, マルチセル, 洪水予測

1. 局地的豪雨探知システムの概要

(1) 背景, 目的および範囲

急激に発達する局地的な豪雨による災害を防止するために、数分から10分程度先に豪雨となる可能性を予測する試験システムを整備し、発生から30分以内に地上付近の降水強度が50mm/h以上に急発達する孤立した積乱雲（以下、豪雨セル）を対象とする。対象範囲は、大阪、神戸、京都、堺の重点監視地域を含み、4台以上のXバンドMPレーダおよびCバンドMPレーダによって観測可能な範囲を探知範囲（図-1）とする。なお、探知を行う高度は、積乱雲の発生とその後の発達過程を追跡できる地上から上空10kmまでとする。

(2) 豪雨の危険度判定の手順

本システムは、中北ら2), 3), 4), 5)の手法に基づき、上空で発生する積乱雲をレーダで早期探知し、その内部の反射強度やドップラー風速から計算される渦などの情報（図-2）から、豪雨セルに発達する危険度を3ランクで判定して通知する。危険度ランク判定の流れを以下に示す。

a) 等高度面データ（CAPPI）の作成

5台のX-MPレーダ（田口（たのくち）、六甲、鷲峰山（じゅうぶさん）、葛城、鈴鹿）から水平・鉛直ともに500mメッシュの等高度面データ（CAPPI）を上空10kmまで1分毎に作成する。

b) 降水セルの抽出および追跡

京都大学防災研究所で開発されたプログラムを基に、反

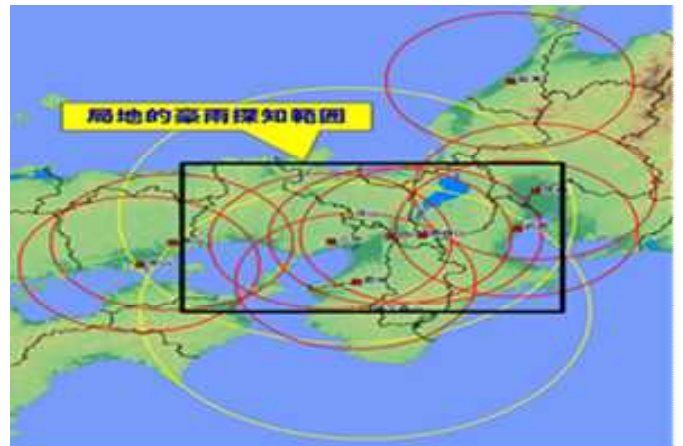


図-1 局地的豪雨探知システムの対象範囲

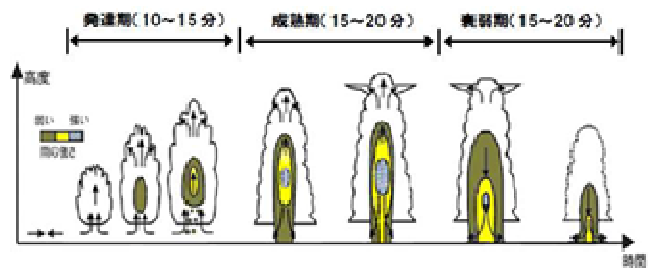


図-2 積乱雲の一生と本システムのターゲット

射強度20dBZ（降水強度1mm/h相当）以上の閉曲面を1つの降水セルとして抽出する。抽出された各降水セルについて、1分前に抽出した降水セルの体積と重心位置が最も近いものを検索し、紐付けすることで追跡を行う。

c) 各降水セルの指標計算

反射強度、渦度、収束量のCAPPIから、図-3のようにエコー頂高度差、鉛直発達速度、鉛直積算エコー強度、渦度、収束量の5指標を各降水セルで計算する。各指標値が大きいほど、豪雨セルに発達する可能性が高い。

d) 危険度判定

c)の各指標について、指標値と豪雨セルになる確率(%)の関係はメンバーシップ関数で表される。これらの関数を用いて確率値を計算し、それらを加重平均することで、豪雨の危険度を0~100の数値で表現する統合指標値Gを算出する。続いて、図-4に示す3つのしきい値から、危険度ランク1~3、危険性なしを判定する。

(3) Webによる表示

局地的豪雨探知システムの表示画面を図-5に示す。Web表示システムは、降水セルごとに判定された危険度ランクをXRAINの降水分布に重ねて表示する。危険度ランクは色分けした円で降雨域を囲むことにより表現し、追跡終了した降水セルは追跡終了時のランク円を同じ位置に点線で残すようになっている。また、過去1ヶ月程度の履歴表示やGIFアニメの作成も可能である。

豪雨危険度指数

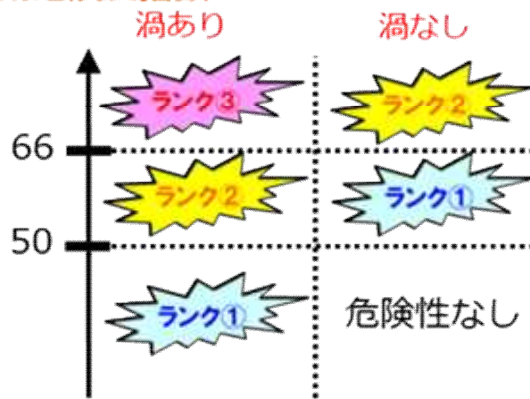


図4 統合指標値（豪雨危険度指数）と危険度ランク



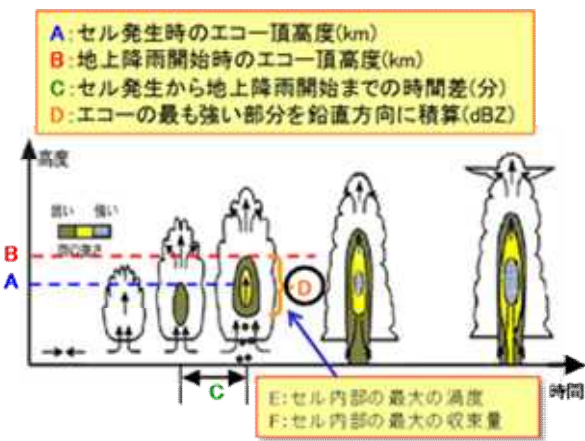
図5 局地的豪雨探知システムの表示画面

2. 線状降水帯及びマルチセルのリアルタイム判定

(1) 拡張に関するA案とB案

線状降水帯やマルチセルのリアルタイム判定では、偏波パラメータから推測する降水粒子の判別結果を用いて、積乱雲のライフステージを判定する必要がある。既往研究では、XバンドMPレーダで観測される偏波パラメータのみを用いて粒子判別を行っているため、新たにCバンドMPレーダを追加するための合成手法を検討した。

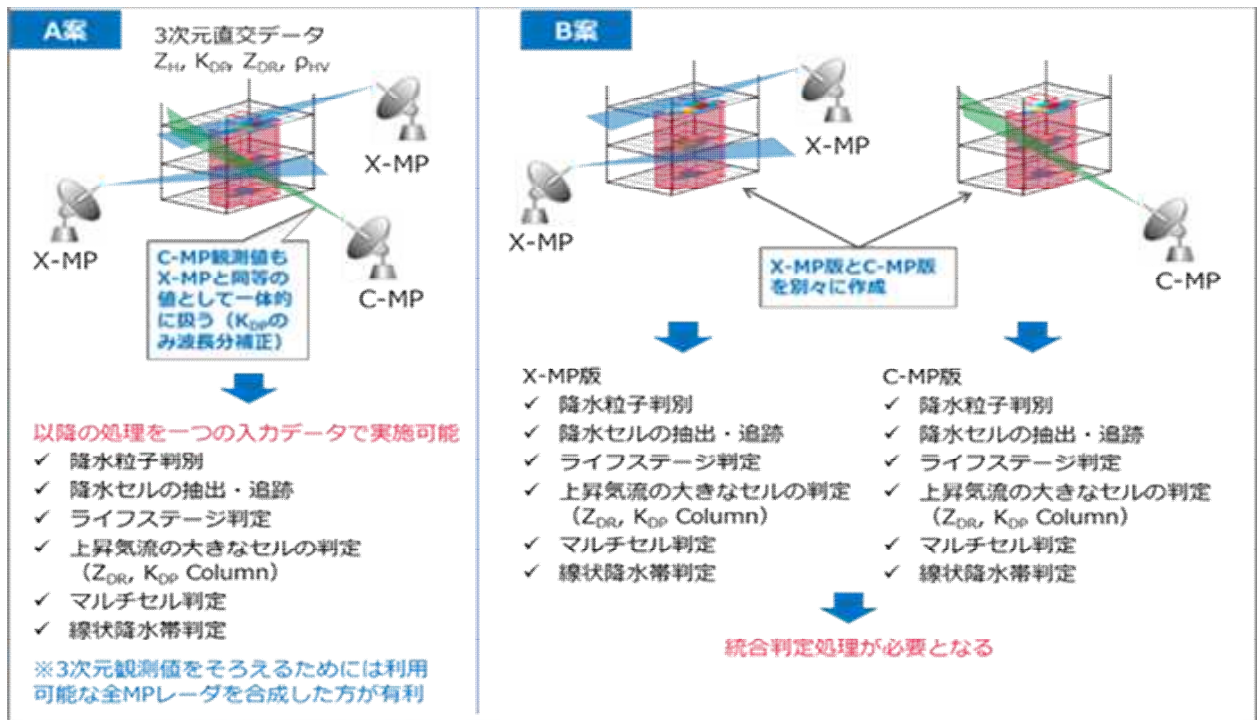
CMPとXMPを同等の値として一体的に扱い、偏波パラメータを算出し粒子判別等を行う方法をA案、CMPとXMPについて別々に粒子判別等を行い、総合判定処理を行う方法をB案とし、両者の比較検討を実施した。



積乱雲（降水セル）が発達するか否かは、渦を含めた以下の5指標で判定

- ① エコー頂高度差 [km] ... $B-A$
- ② 鉛直発達速度 [km/分] ... $(B-A) / C$
- ③ 鉛直積算エコー強度 [dBZ] ... D
- ④ 渦度 [0.001/s] ... E
- ⑤ 収束量 [0.001/s] ... F

図-3 豪雨の危険度判定に用いる各指標



(2) マルチセル及び線状降水帯データベースの整理

「マルチセルや線状降水帯と環境パラメータの関係性評価」、「リアルタイム検出手法の評価」等を実施するにあたり、マルチセルや線状降水帯の“正解データ”として、2015～2019年におけるマルチセル及び線状降水帯のデータベースを作成した。

図-6はマルチセルとして自動判定された領域を示している。マルチセルが発生している事例は前線が存在しない大気不安定事例か、近畿地方が前線の南側に位置していることが多いことがわかった。

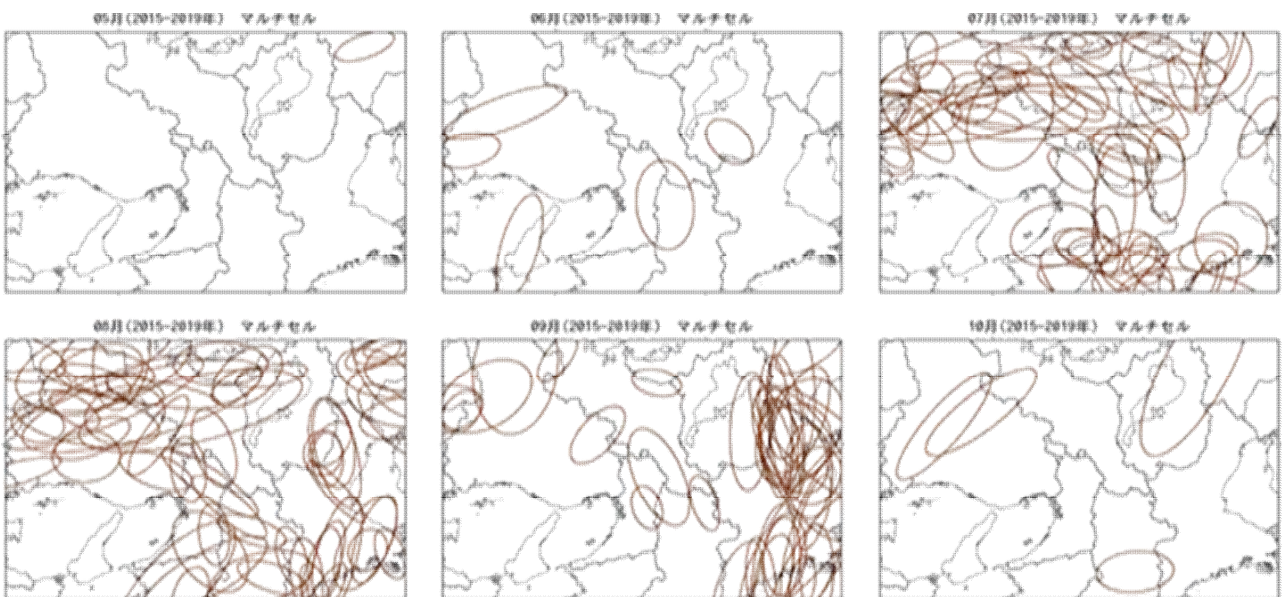


図-6 マルチセル (月別)

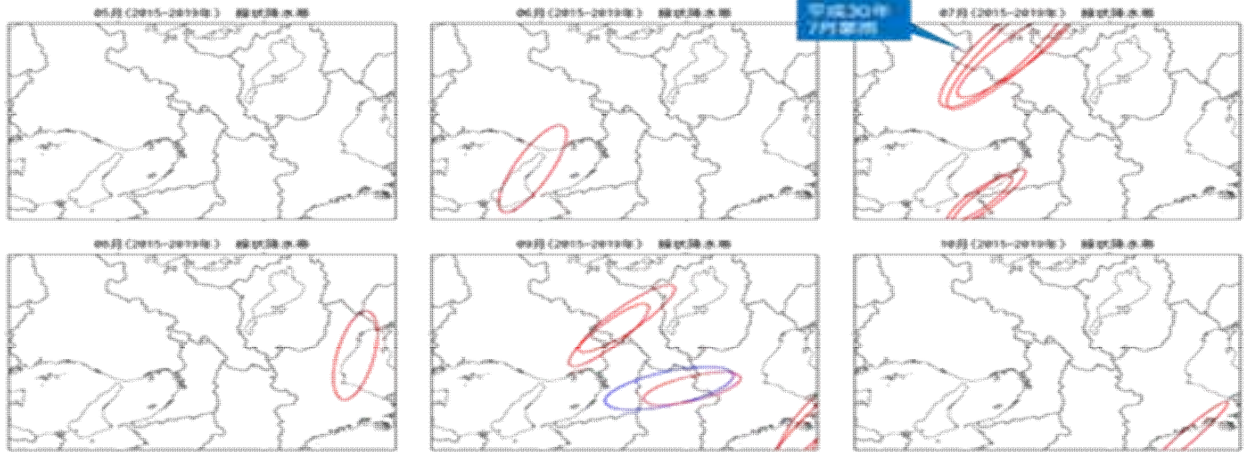


図-7 線状降水帯 (月別)

線状降水帯の発生時期や発生位置の特徴を整理するために、線状降水帯を楕円で近似して地図上(図-7)に表示した。近畿における線状降水帯の特徴を整理した。

- ・マルチセルと比較すると線状降水帯の発生数は非常に少ない。
- ・近畿における線状降水帯の走向は南西から北東の方向で一致している
- ・近畿において線状降水帯が発生しているのは7月から9月である。

(3) 偏波パラメータの比較

CMP深山とXMP六甲、XMP田口の偏波パラメータを比較した。(図-8) 比較方法として、レーダ別に1分間隔のCAPPIデータ(鉛直250m, 水平500m格子)を作成し、同一メッシュの偏波パラメータを散布図で比較した。

- ・CMPとXMPのZHはよく一致している。また、相関係数やRMSEの値も、XMP同士の値と同程度である。
- ・KDPについては、CMPの観測値を波長比補正することで、XMPの観測値と同程度になる
- ・CMPとXMPのZDRや ρ_{HV} は相関が低いが、元々レーダ間の相関が低いパラメータである

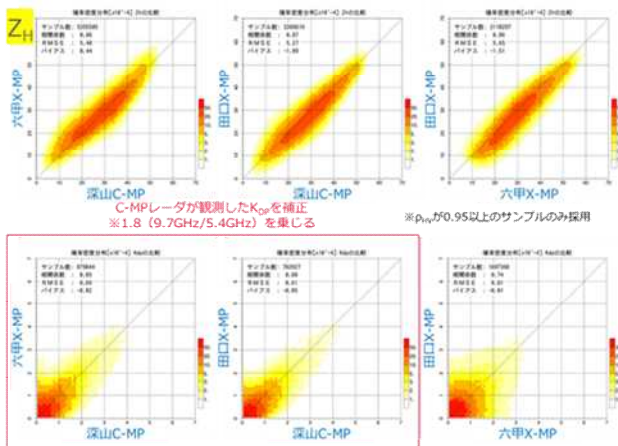


図-8 偏波パラメータ

(4)リアルタイム判定結果の比較

A案およびB案(図-9)についてマルチセル、線状降水帯事例の判定を行い、判定精度と処理時間について比較を行った。

- ①波長による偏波パラメータの特性に明確な違いがない
- ②マルチセルや線状降水帯の判定精度に大きな違いはなく、CMPのみの場合(B案)に誤判定事例が存在。
- ③A案の方がB案より35秒計算時間が短い
⇒A案が望ましい

マルチセル(上段)と線状降水帯(下段)の判定比較

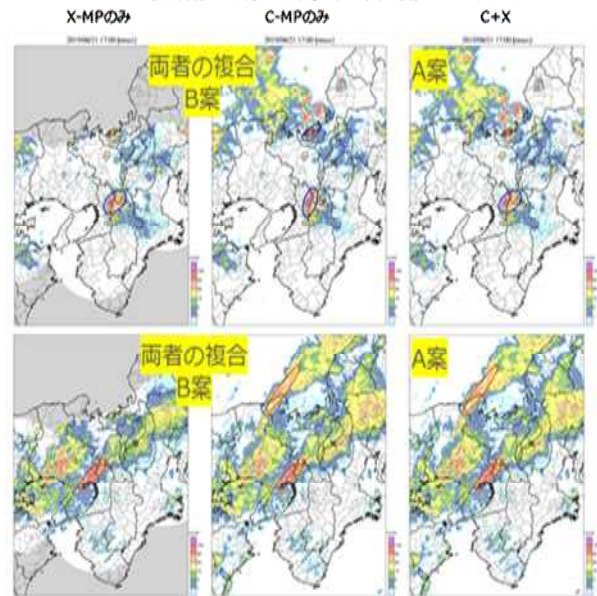


図-9 A案及びB案の比較

3. リアルタイム抽出アルゴリズムの開発

前項の検討結果を踏まえA案を対象として、以下の機能を有するリアルタイムプログラムを開発した。

- CAPPIデータの作成
- 鉛直最大降雨強度算出
- 降水粒子判別
- 降水セルの追跡
- 降水セル群の追跡
- マルチセル、線状降水帯の判定

4. リアルタイム検出システムの表示画面の検討

線状降水帯およびマルチセルのリアルタイム検出システムの表示画面およびレーダ観測値の3次元表示方法について検討を行った。また、リアルタイム処理に必要なサーバの仕様を検討した。

5. マルチセル・線状降水帯の発達・持続レベル

の予測可能性検証

(1)目的と検討フロー

マルチセル・線状降水帯の発生情報を防災業務に活用するにあたり、現況だけでなく、今後の発達・持続可能性に関するレベル情報が重要となる。そこで、気象庁GPVから計算される大気安定度や水蒸気、風の情報を活用し、発達・持続レベルの判定に有効な指標に関する検討を行う。

(2) 環境パラメータ

積乱雲の発生・発達や組織化に関する気象条件として、大気不安定、多量の水蒸気流入、鉛直方向の風のシアが知られている。そこで、これらの度合いを表す環境パラメータとして以下の9指標を検討した。

種類	環境パラメータ
大気の安定度	K指数 (KI) 、対流有効位置エネルギー (CAPE)
水蒸気流入	下層の水蒸気フラックスの収束量 (CFLX)
風の鉛直シア	下層鉛直シア (MS) 、ストームに相対的なヘリシティ (SREH)
合成指標	バルクリチャードソン数 (BRCH) 、エネルギーヘリシティ指数 (EHI) 、Kヘリシティ指数 (KHI) 、過度生成指標 (VGP)

(3)環境パラメータに用いるGPV

気象庁GPVのうち、環境パラメータの算出に必要な要素が揃うものは、GSM,MSM,LFMとなるが、線状降水帯やマルチセルの水平スケールが20~100km程度であるこ

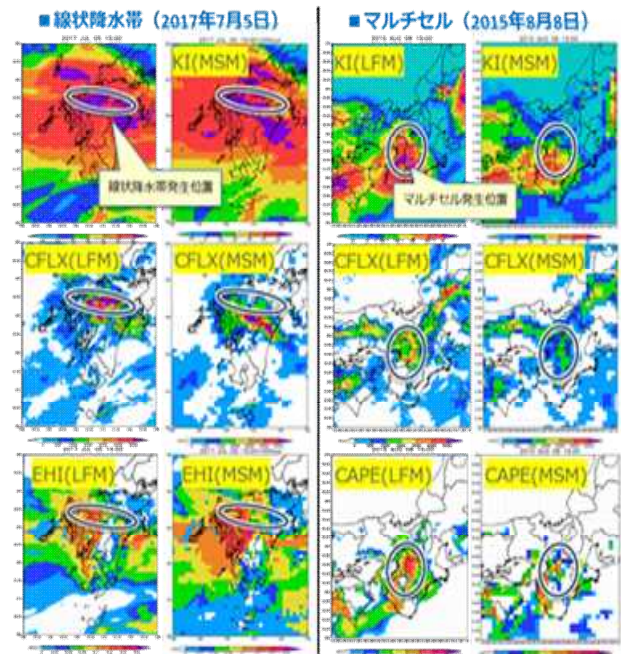
とを踏まえると、MSMとLFMが候補となる。

モデル	水平格子間隔	更新間隔	予報時間	初期時刻からの配信遅れ	上空データの要素
毎時大気解析	5km	1時間	30分以内	30分以内	風、気温
GSM	50km	6時間	132 時間	約3~4 時間	風、気温、湿度など
MSM	10km	3時間	39時間	約2~3 時間	
LFM	4km	1時間	10時間	約 1 ~ 1.5時間	

(4)環境パラメータの分布図による検証

線状降水帯やマルチセル事例に加え、台風や低気圧事例についても分布図 (図-10) を作成し線状降水帯・マルチセル事例との差を検証した。

- 線状降水帯は、KI、CFLX、SREH、KHI等の指標、マルチセルはKI、CFLX、CAPE、BRCHが高い傾向
- 線状降水帯やマルチセルの発生地域・時間を大まかに把握する際には、MSMとLFMの差は小さい。
- 台風や低気圧ではCAPEが低い。



(図-10) 分布図

(5) 環境パラメータの頻度分布の検証

- 対象期間：2015年~2019年の5月~10月 (暖候期)
- 環境パラメータ：上記期間の3時間毎のMSM-GPVから各環境パラメータの値を算出
- データベースの事例数 (近畿のみ) 線状降水帯の数：

14 マルチセルの数 : 175

□比較対象格子数 全期間の近畿全体 : 9851193 線状降水帯楕円内 : 74 マルチセルDBの楕円内 : 499

□データベースとの比較方法

線状降水帯、マルチセル内の格子について、当該格子±1格子(30×30km四方)の環境パラメータ最大値を抽出

各環境パラメータについて、線状降水帯またはマルチセル事例と近畿全期間の頻度分布を区別するためのしきい値と各しきい値を満足する割合を検証した。

近畿全期間の割合が低く、線状降水帯やマルチセルで割合の高い指標を組み合わせることで、有効なレベル情報の作成が可能と考えられる。

(6) レベル情報の作成方法の検討

状降水帯およびマルチセルの発生・持続ポテンシャルを予測するレベル情報の作成方法を検討した。

① 複数条件の組み合わせによる判定方法

有効な環境パラメータとしきい値を組み合わせ、複数条件により判定を行う

② 加算方式による判定方法

有効な環境パラメータとしきい値について、各しきい値を超過した場合に加算していき、その合計点で発生・持続ポテンシャルを評価する

③ ファジー理論を用いた判定方法

局地的豪雨探知システムにおける豪雨のタマゴ判定と同じく、環境パラメータごとにメンバーシップ関数を設定し、関数値を加重平均した統合指標を用いてレベル情報に変換する

④ 機械学習による方法

環境パラメータを説明変数、線状降水帯・マルチセル・その他の出現確率を目的変数として、機械学習による確率予測を行う

(7) 気象庁メソアンサンブルGPVの検討

定量予測の実現性に関する予備調査として、2019年に発生した線状降水帯およびマルチセル事例について、気象庁メソアンサンブルGPVの予測結果を検証した。

線状降水帯

100mm以上の降雨を予測しているメンバーは21、メンバー中2メンバーのみであり、MSMは予測できていない。線状降水帯の位置と量を正確に予測することはできていないものの、九州北部で線状降水帯が発生する可能性は表現されている。

マルチセル

20mm以上の降雨を予測しているメンバーは21メンバー中7メンバーである。MSMよりも強雨域の位置や量の再

現性が高いメンバーが存在する。

5. 今後の取組

1. 3次元偏波情報を活用したリアルタイム検出情報の検討

3次元偏波情報を活用しマルチセルの停滞・持続性の判断を行う。線状降水帯はこれまで国土政策総合研究所にて検討された方法等が存在するが、マルチセルは過去に検討されたものがなく、新たな検討が必要である。

2. 線状降水帯およびマルチセルの発生・持続ポテンシャルの検討

気象庁LFMを用いて、線状降水帯およびマルチセルの発生・持続に関連の深い環境パラメータを検討し、レベル情報作成のためのしきい値を検討する。MSMによる結果との比較を行う。

環境パラメータの組み合わせ方法の検討

線状降水帯およびマルチセルの発生・持続に関連の深い環境パラメータを組み合わせたレベル情報を検討し、精度評価を実施する。

3. 定量的降雨予測の検討

気象庁メソアンサンブル予報を用いて、ダムの予備放流、事前放流、特別防災操作を想定した予測雨量の活用方法を検討する。

① 全国を対象に線状降水帯及びマルチセルの発生事例に加えて台風事例を抽出し、淀川管内のダム流域面積相当の領域で各アンサンブルメンバーの予測雨量や α 値の検討を行う

② アンサンブルメンバーのばらつき情報を基に α 値を求める手法(山口・黒田・中北2019,線状降水帯豪雨予測に向けた水蒸気のアンサンブル予測情報の更新履歴解析)を適用し、線状降水帯等の予測への有効性を確認する。

謝辞: 本研究において、京都大学防災研究所の中北研究室の皆様にご多大なご協力いただきました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

1) 中北英一・山邊洋之・山口弘誠: ゲリラ豪雨の早期探知に関する研究, 水工学論文集, 第54巻, 2010 2) 中北英一・山邊洋之・山口弘誠: XバンドMPレーダーを用いたゲリラ豪雨の早期探知と追跡, 京都大学防災研究所年報, 第54号B, 2011 3) 中北英一・西脇隆太・山邊洋之・山口弘誠: ドップラー風速を用いたゲリラ豪雨のタマゴの危険性予知に関する研究, 水工学論文集, 第57巻, 2013 4) 中北英一・西脇隆太・山口弘誠: ゲリラ豪雨の早期探知・予報システムの開発, 河川技術論文集, 第20巻, 2014