

報告書概要

技術研究開発課題名	XバンドMPレーダ等の観測情報の活用に関する技術開発
技術研究開発テーマ名	MPレーダネットワークによる雨と風の3次元分布推定手法の開発
研究代表者	
氏名	所属・役職
眞木 雅之	防災科学技術研究所 水・土砂防災研究部長 (2013年3月より鹿児島大学)
共同研究者	
氏名	所属・役職
前坂 剛	防災科学技術研究所 主任研究員
加藤 敦	防災科学技術研究所 主任研究員
平野 洪賓	防災科学技術研究所 研究員
清水 慎吾	防災科学技術研究所 研究員
Kim Dong-Soon	防災科学技術研究所 契約研究員
Lee Dong-In	釜慶国立大学教授
V.N. Bringi	防災科学技術研究所 招聘研究員 (コロラド州立大教授)
Shakti P.C.	防災科学技術研究所 有期雇用職員
濱田裕美	防災科学技術研究所 有期雇用職員
【1】背景・課題	
<p>国土交通省のXバンドMPレーダネットワークが有するポテンシャルの一つに、降雨と風の3次元分布情報の取得がある。これまで、Cバンドのレーダ降雨観測は広範囲を対象とした河川管理のために、低仰角の観測に限られていた。しかしながら、2008年の神戸の都賀川や東京都豊島区雑司が谷の局地的大雨の解析結果から、上空の雨の発達の監視は、局地的大雨の直前予測に有効であることが指摘されている。また、降雨と風の3次元情報を数値モデルにデータ同化することにより、局地的な大雨の数時間先の予測精度を向上させることも期待される。このためには、リアルタイムで雨と風の3次元的な分布を求める手法の開発が必要であった。</p>	
【2】技術研究開発の目的	
<p>本研究は、国土交通省のMPレーダネットワークで利用可能な技術を開発し、ゲリラ豪雨、都市型水害、土砂災害の予測に有効なパラメータを算出し有効性について検討することを目標とする。</p>	
【3】技術研究開発の内容・成果	
<p>以下の3つの項目について技術開発を行った。</p>	
(1) ネットワークレーダ観測シミュレータ	
<p>複数台のMPレーダから雨と風の3次元分布情報を求めるための最適なボリュームスキャンモードを検討するための、ネットワークレーダ観測シミュレータを開発した。シミュレータは、アンテナスキャンモード決定、降雨モデルの設定、レーダ観測シミュレーション、レーダデータ合成の計4つのプログ</p>	

ラムから構成され、コンソーシアムを通じて公開した。

ネットワークレーダ観測シミュレータの概要は以下のとおりである。

- 1) Microsoft WINDOWS (XP, Vista, 7) 上で動作するソフトウェアである。
- 2) 開発言語は Visual Basic であり、windows 上で容易に実行できる。
- 3) 入力インプットは、レーダの位置情報、格子分解能である。
- 4) 地形遮蔽率は任意の仰角、方位角で求めることができる。
- 5) レーダの観測仰角、格子分解能および三次元格子点に内挿するための内挿半径を設定し、地形による遮蔽を考慮し、観測範囲、最大・最低観測高度、グリッド値作成に使用したデータ数、地形などの障害物によるビーム遮蔽率、ネットワーク効率、および観測にかかる時間が計算できる。
- 6) 重点観測地域の設定は、従来の「短形」に加え、「セクター」及び「主要な都市部の地域名（東京23区など）」の設定が行うことが可能である。
- 7) 疑似降雨域を複数サイトから観測するシミュレーション機能を有する。シミュレーションの中で、降雨域によるレーダ送信電波の減衰を考慮し、それぞれのレーダによる降雨分布と複数レーダによる降雨分布の合成図を表示することが可能である。
- 8) 本ソフトウェアは上記5)、6)、7)の結果を地図上に表示する機能をもっている。また、ユーザが表示する高度や鉛直断面をGUIで選択できる機能を持つ。具体的には、以下の11の項目について、表示機能を有する。
 - ① 地形分布
 - ② 地形遮蔽状況（平面、鉛直）
 - ③ グリッド値作成に使用したデータ数密度分布図
 - ④ レーダ観測最低高度
 - ⑤ レーダ観測最高高度
 - ⑥ 雨量算出可能グリッド分布図
 - ⑦ 風向風速算出可能グリッド分布図
 - ⑧ 観測所要時間
 - ⑨ 入力した疑似降雨分布
 - ⑩ 降雨減衰を考慮した疑似降雨分布（各レーダ毎の疑似観測結果）
 - ⑪ 降雨減衰を考慮した疑似降雨分布（複数レーダの合成疑似観測結果）

シミュレーション結果の一例を図-1及び図-2に示す。

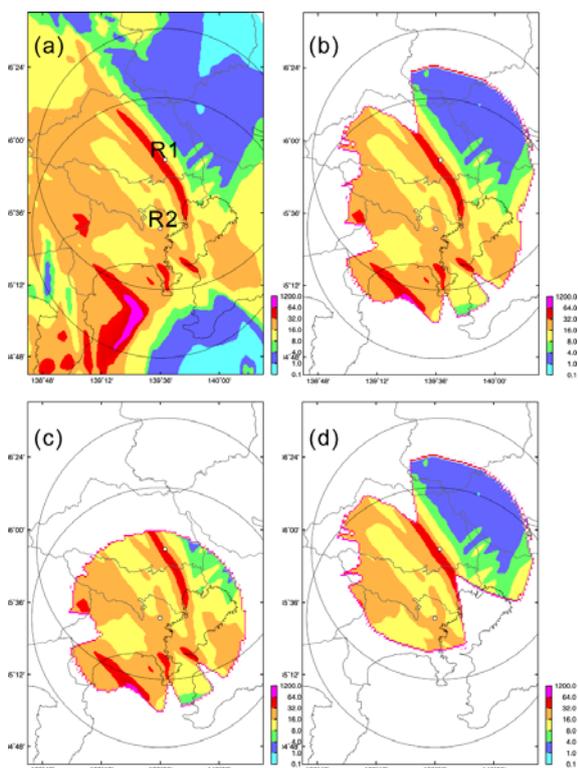


図-1:

(a) 数値シミュレーションで作成した高度 250 m における降水強度 (mm/hr), (b) さいたま市(R1)と新横浜市(R2)に設置した2台のMPレーダによる合成降水強度 (mm/hr), (c) R2 による降水強度, (d) R1 による降水強度

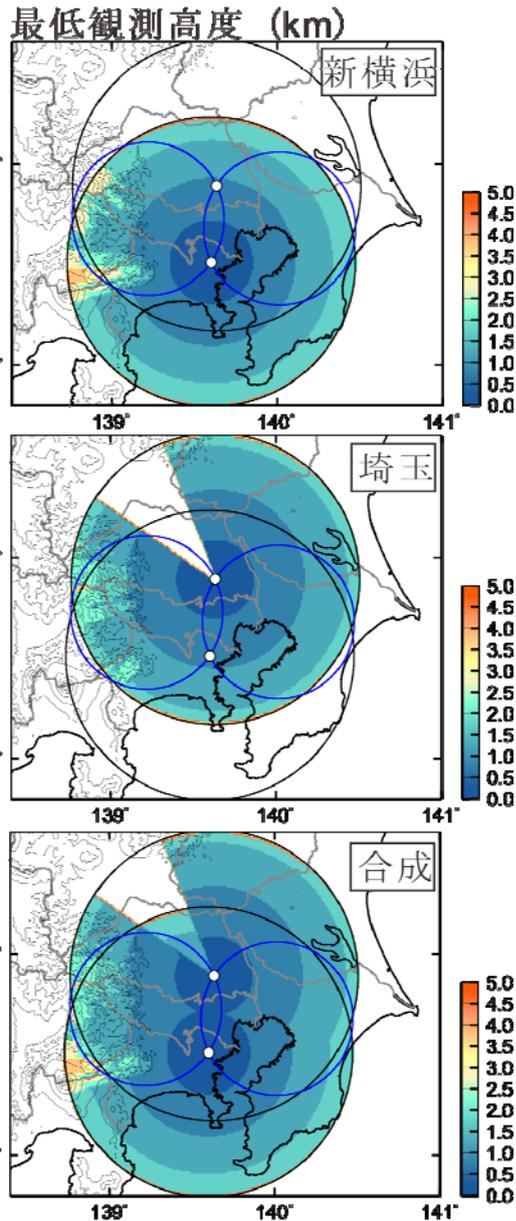


図-2 :
新横浜、埼玉に設置された MP レーダの最低観測高度 (上図、中図) と 2 台を合成したときの最低観測高度 (下図)。細い実線は 500m 毎の標高を示す。
黒い太い実線はレーダの観測範囲 (80km) を示し、青色の実線は気流を計算できる領域を示す。

開発したネットワークシミュレータは Windows 環境で作動するため、国交省を始め大学や研究機関でも容易に利用が可能である。地形によるビームの遮蔽率を始め、観測に要する時間や最適なスキャンモードの検討に利用可能である。今後、国交省が C バンド MP レーダ網を整備する場合、C バンド MP レーダと X バンド MP レーダの両者を組み合わせた最適スキャンモードを検討することを提案する。レーダシミュレータの詳細は H22 年度の研究報告書に記載したほか、気象研究ノート (日本気象学会) で発表予定である。

(2) 雨と風の 3 次元分布作成アルゴリズム

降雨量推定アルゴリズムを高度化し、鉛直方向が 500 m~1 km、水平方向が 500 m の分解能の雨と風の 3 次元分布を求めるアルゴリズムを開発した。

1) 降雨量推定アルゴリズムの高度化

本研究で最も力を入れた研究項目であり、いくつかの新たな手法を開発した。精度検証が済み、実運用に利用できるものもあるが、実用化に向けたさらなる取り組みが必要なものもある。以下、それぞれの開発した手法について概説する。

① 降雨強度推定式

アンテナ観測仰角と気温情報を考慮した降雨量推定式 (R-KDP 関係式と R-Z 関係式のコンボジット法、

水文・水資源学会および防災科学研究報告に掲載) や降雨減衰による信号消散エリアの検出手法を提案し、国交省 MP レーダシステムで実運用されている。国交省の精度検証によれば雨量計による補正なしでも、現状の C バンド降雨情報を同等かそれ以上の精度であることが確かめられている。これらの手法は防災科研が特許を取得しているが、公的な目的についてはその使用を認めている。

②偏波間位相差の算出

降雨量推定の鍵となる偏波パラメータである比偏波間位相差について、MKDP という新たな計算方法 (図-3) を開発した (特許申請中)。この手法では、単調増加特性を満足するように最適な偏波間位相差のレンジプロファイルを変分法により求める。これにより、従来の手法で問題となっていた後方散乱位相差による負の偏波間位相差の発生がなくなることに加えて、降雨強度が弱い場合でも偏波間位相差を求めることができるようになった。このことは、すべての降雨について R-KDP 関係式のみで降雨量推定が可能であることを示唆する。現在、地上のディストロメータや雨量計による精度検証を実施しており、その結果がまとまった段階で、国交省 X バンド MP レーダへの適応可能性について判断したい。

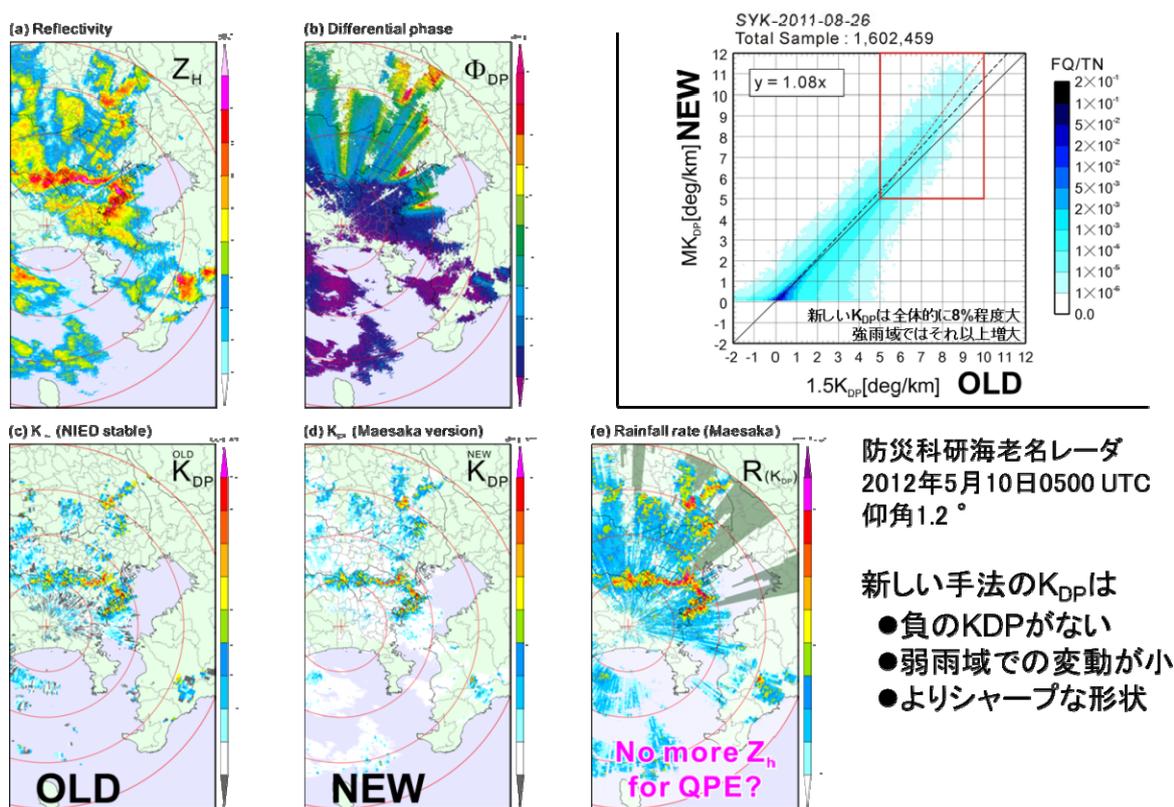


図-3 新たな計算方法 (MKDP 法 : NEW) と XRAIN 実装済みの手法 (OLD) の比較

③降雨減衰補正

降水量推定や降水の微物理特性に使われる MP レーダ情報のうち、反射強度と反射因子差は降雨減衰の影響を受けるためにその補正が必須である。本研究では減衰係数のレンジプロファイルを動的に求める新しい手法を開発した (米国気象学会誌に掲載)。反射因子に関してはレンジ方向の減衰係数のプロファイルを一定とした手法 (現国交省 X バンド MP レーダで実運用中) と同等程度の精度であったが、反射因子差に関してはレンジプロファイルを考慮する必要があることが示された。これは、反射因子差が局所的な雨滴粒径分布の影響を受けるためである。反射因子差の情報は雨と雪の判別や雨滴粒径分布の推定などの鍵となるパラメータであり、今後の実利用に向けた実証研究が必要であろう。

④地形によるビームの一部遮蔽

降雨強度推定精度の向上に関する他の問題点として地形によるビームの一部遮蔽がある。山岳域における雨量情報は水資源管理や河川管理に不可欠なものであるが、従来は幾何学的な形状から電力損失を補正する方法が用いられてきた。本研究では地形に加えて地形除去フィルター等による電力損失を考慮した「改良 DEM 法」を提案した。(図-4) 箱根山地を試験地に防災科研の MP レーダ、地上雨量計、ディストロメータによる観測をおこなった。地上の観測データによる検証結果は「改良 DEM 法」を支持するものであった(米国気象学会誌に掲載予定)。本手法は、補正式を求めるための特別なアンテナスキャンをある期間実施することで、国交省の X バンド MP レーダシステムでも利用できることが確かめられている。レーダの定期点検の際に実施することを提案する。偏波間位相差や反射因子差のビームの遮蔽補正の手法開発については、今後の課題であろう。

山岳域におけるレーダ降雨観測の模式図

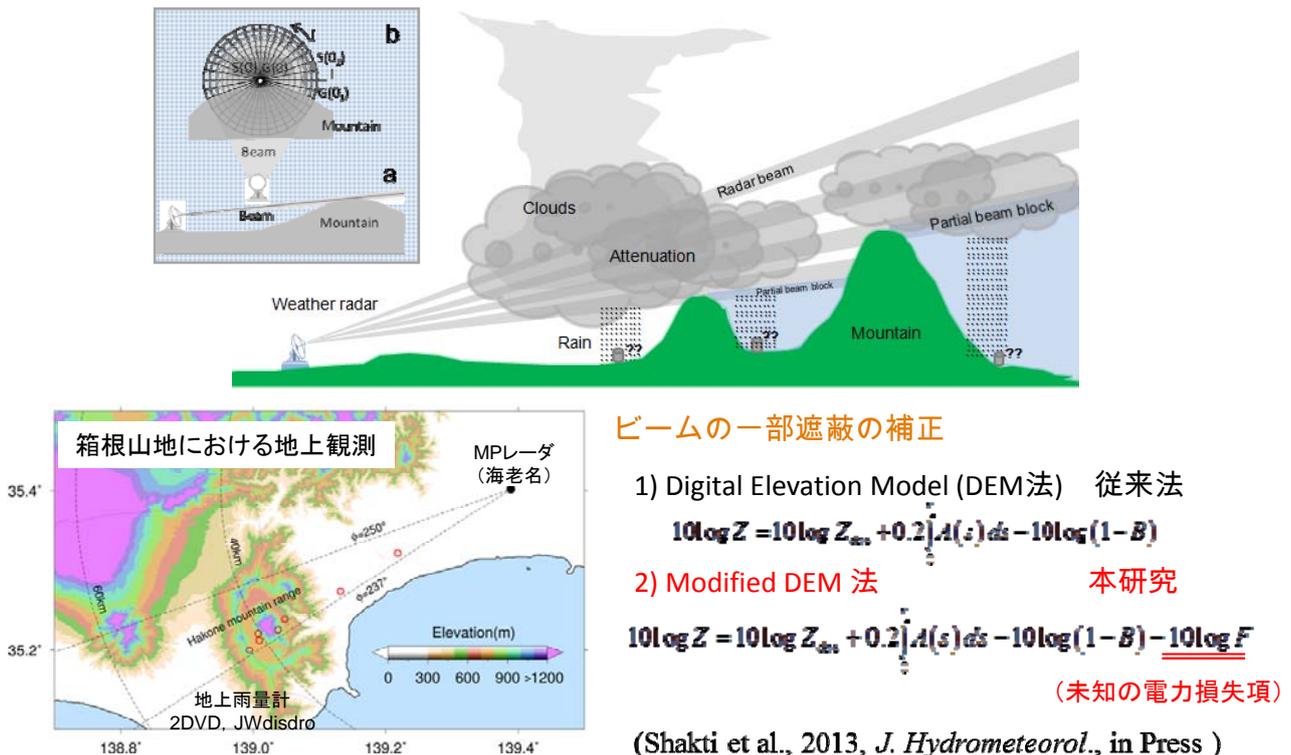


図-4 山岳域におけるレーダ降雨観測のイメージとビームの一部遮蔽の補正

⑤レーダネットワーク

複数台のレーダ情報の合成に関しては、最終アウトプットである雨量情報だけではなく、偏波レーダパラメータ自体を合成する手法を開発した(水文・水資源学会掲載)。反射因子や反射因子差の合成は各レーダの観測値と整合性があり、バイアス補正や偏波間位相差を用いた減衰補正がうまくいっていることを示唆している。比偏波間位相差については概ね良い結果を得たが、強い降水域のエッジ付近で各レーダの値が異なる場合があった。これは、比偏波間位相差がレンジ方向の偏波間位相差の距離微分から計算されるため、特に、電波消散領域近傍では顕著になる傾向がある。現在、国交省 X バンド MP レーダシステムでは降雨強度のみの合成をおこなっているが、将来的には降水粒子の判別や粒径分布などの情報を得るためにはレーダパラメータそのものの合成が必要となってくるであろう。

⑥C バンドレーダとの合成

(1) でも述べたが、今後、国交省や気象庁の C バンドレーダと国交省の X バンド MP レーダネットワークとの合成雨量を作成することは魅力的である。合成方法については防災科研が提案した動的な手法(特許申請中、水文・水資源学会誌掲載)や土木研究所が提案している降水粒子の粒径分布の情報に基づく手法が提案されている。いずれの手法も、X バンド MP レーダの欠点である短い観測範囲、電

波消散領域の発生を解決する手段として有効である。

2) 雨の3次元分布情報

降水の3次元分布情報は豪雨の発生・発達メカニズムの調査のみならず風水害の発生予測にも必要不可欠な情報である。3次元分布を求める手法自体は新しくないが、本研究ではリアルタイムでの運用が可能なアルゴリズムを開発した。

局地的豪雨の詳細な構造の解析例は、図-5に示す2008年の雑司が谷豪雨について防災科研の2台のMPレーダ観測の解析がある(日本気象学会誌掲載)。解析の結果、雑司が谷付近の豪雨は約100分の寿命を持つマルチセルタイプだった。この対流セルは発達期(約15分間)、最盛期(約45分間)、衰弱期(約25分間)に分けられる。最盛期には、高度約4kmに最初の降水コアが発生し、計4つの降水コアが発達して落下し地上に豪雨をもたらしたことがわかった。手法のリアルタイムでの運用は関東に展開している研究用レーダネットワーク(X-NET)で試験された。災害につながるような豪雨が発生した場合には、その日のうちに事例解析を行い、その結果をweb上で速報することが出来るようになっている。

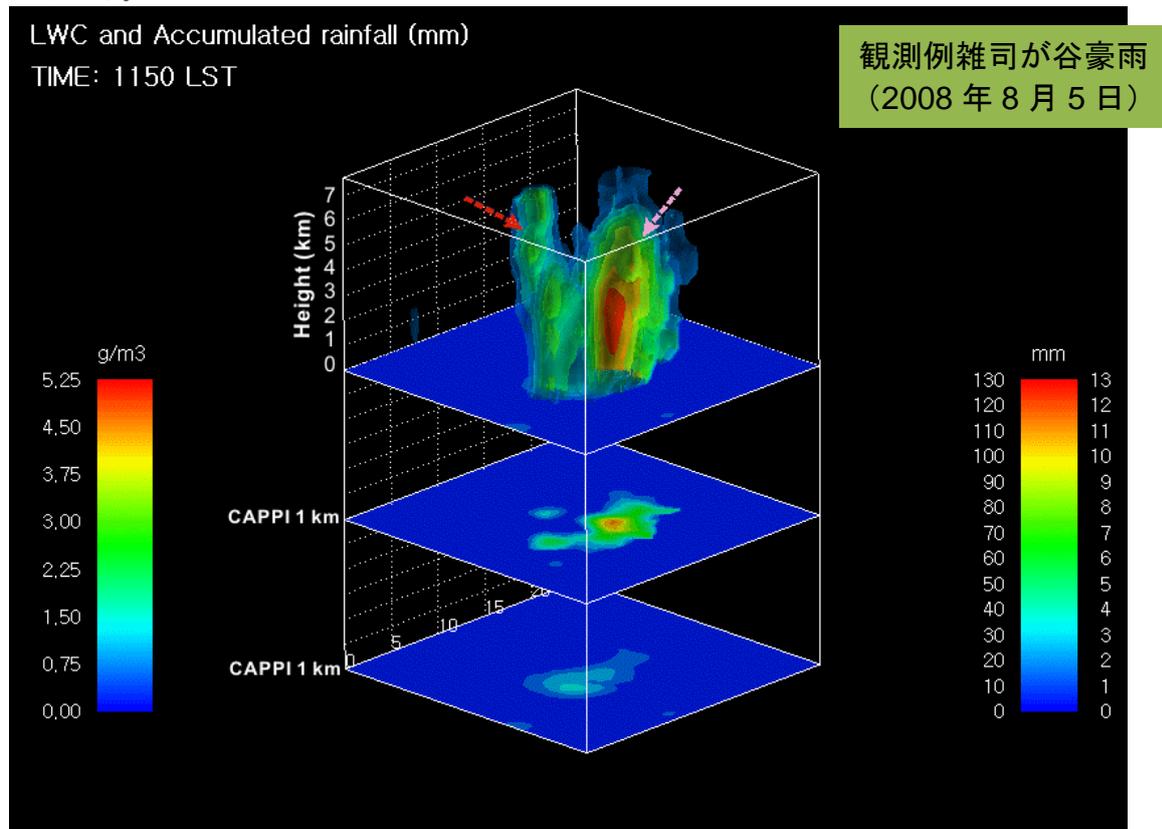


図-5 豪雨解析の事例 (2008年8月5日の雑司ヶ谷豪雨)

3) 風の3次元分布情報

国土交通省のXバンドMPレーダの3次元観測データから降水内の風の3次元分布を計算するプログラムを作成した。計算手法は、Gao et al. (1999)に準拠し、国土交通省XバンドMPレーダのスキャンモードに合うように改良した。風向・風速の計算には鉛直ストレッチ座標系を採用し、下層は高い鉛直格子解像度で計算し、上層ほど鉛直格子解像度を粗くなるように設定した。開発した手法は、2012年6月のつくば竜巻の解析にも利用され、親雲の低気圧性の回転を捉えることに成功した。更に解析では竜巻の親雲の周りで反射因子差が特徴的な分布パターンを示すことも明らかにした。推定した風系から、この特徴的な分布パターンは、ソーティングによる大きな雨粒と小さな雨粒のふり分けによる結果であろう。

風の3次元情報は降水のナウキャストの際の降雨セルの移動ベクトルの算出にも利用できる。無降水域での風はレーダでは観測出来ないため、データ同化などの手法によりこの問題を解決する必要がある。また、強風による建物や交通手段の被害を軽減するためには地上付近の風を推定する手法を確立することが必要であろう。

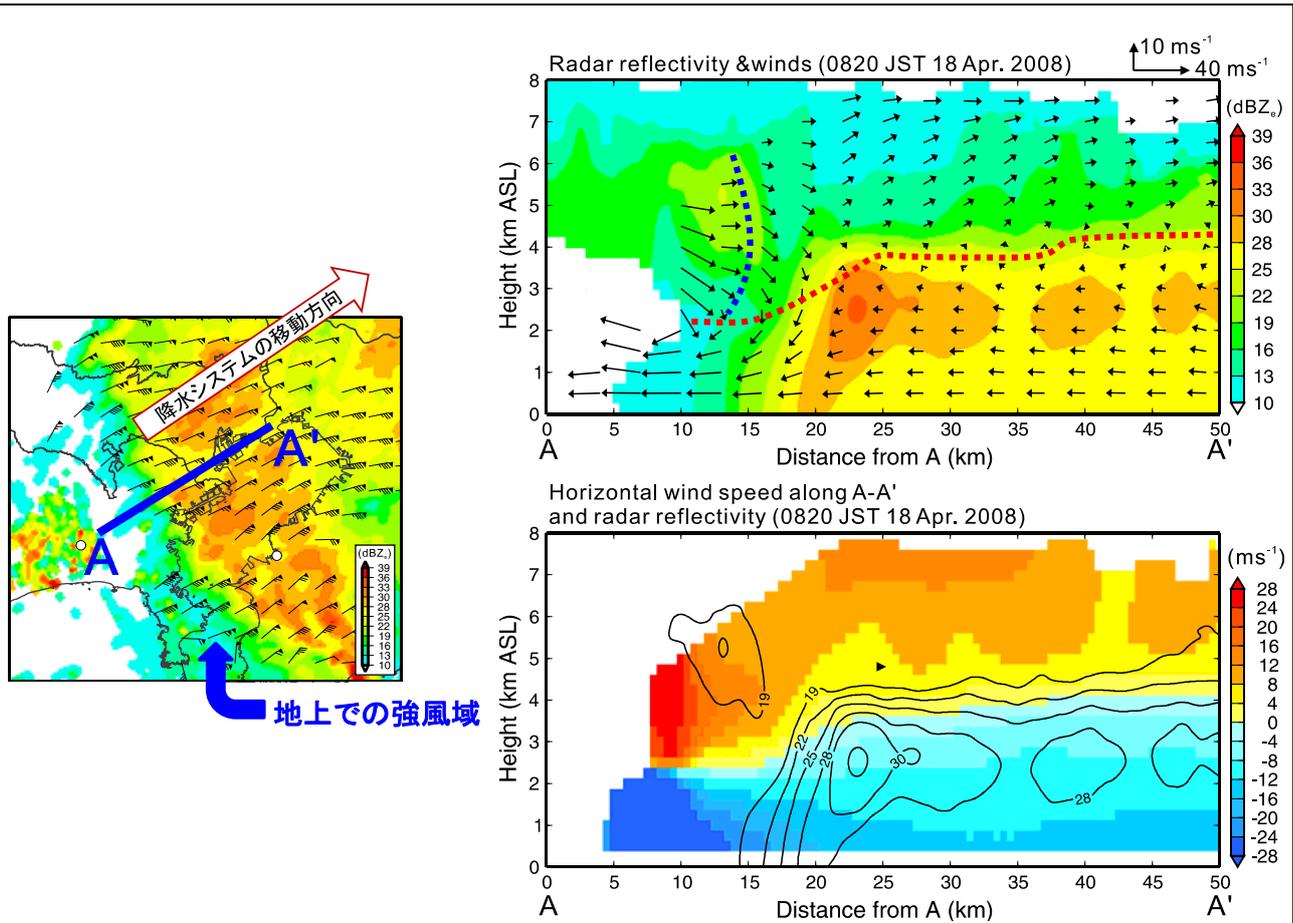


図-6 風の3次元分布の例 (2008年4月18日午前中に、前線を伴った低気圧が関東地方を通過。防災科研の海老名・木更津に設置したMPレーダで観測されたドップラー速度を合成し、三次元風向・風速を求めた。)

(3) 風水害等の発生予測に有効なパラメータの算出

風水害の発生予測に有効であると言われている「鉛直積算雨量(VIL)」、「流域面積雨量」、「実効雨量」についてマルチパラメータレーダデータを用いた推定アルゴリズムを開発した。

1) 積算雨量

(2)により、レーダエコーの3次元分布をリアルタイムに高い時空間解像度で作成できるようになり、上空にある降水粒子の情報も予測に取り入れることが可能となった。鉛直積算雨量量 (Vertically Integrated Liquid water content ; 以下 VIL という) は降水粒子の3次元分布を2次元に投影したものであり、計算負荷を増やさずに上空の降水粒子も考慮できるといった特徴を持っているので、急激に発達する積乱雲の直前予測に有効なパラメータと言われている。(図-7)

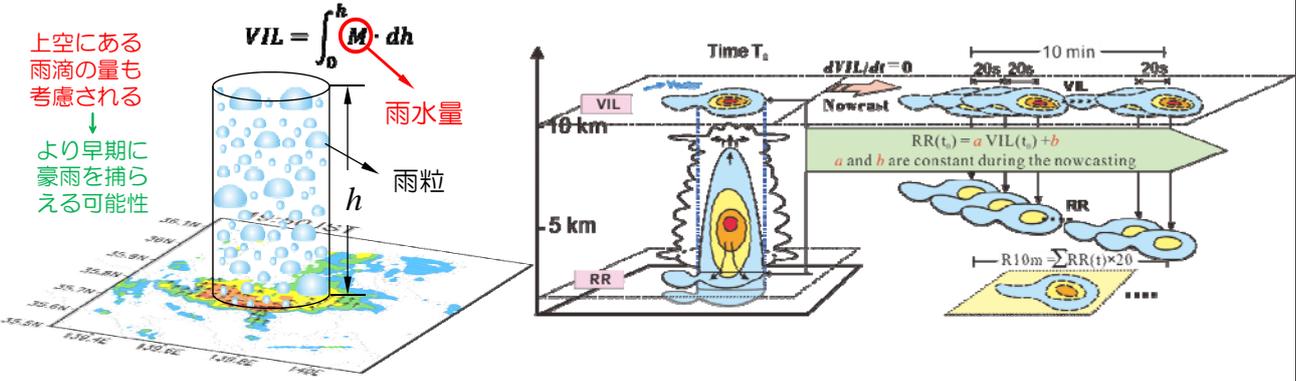


図-7 鉛直積算雨量(VIL)

本研究では、雹の影響や降雨減衰の影響を受けない比偏波間位相差を利用して高精度に VIL を算出し、VIL の時間変化から 1 時間先までの降水量を 10 分毎に予測するナウキャストを開発し、試験運用を実施した。(表-1 及び図-8)

3 種類の雨量情報 (VIL で観測された雨量及び従来の降雨強度を用いた短時間雨量推定システムにより推定した雨量と比較し、推定精度及びリードタイムの評価を実施した。3 種類の雨量情報 (VIL 降雨量、MP レーダ観測雨量、C バンドレーダ観測雨量) を入力情報としてナウキャストを実施し推定精度及びリードタイムの評価をおこなった。その結果、いずれの入力情報を用いても 20 分先以上の適中率、10%以下に落ちる。また、VIL の導入により、若干のリードタイム延長が見られたが、降雨イベント全体を対象とした適中率は必ずしも向上されたとは言えない。一方、VIL が地上の雨に対して先行現象があるかどうかを 5 つの事例について調べた結果、計 31 点の観測点のうち 20 点 (約 65%) で先行現象が見られた。この結果は、急激に発達する積乱雲の直前予測の可能性を示唆するもので、今後、より多くの事例を用いて実証していく必要がある。

表-1 予測値と観測値との相関係数の比較例

2011.8.12		10分先雨量に対する 予測値と観測値との相関係数	
HH	MM	VIL_NOWCAST	RR_NOWCAST
8	10	0.636	0.165
8	15	0.746	0.433
8	20	0.767	0.679
8	25	0.906	0.845
8	30	0.939	0.882
8	35	0.892	0.893
8	40	0.822	0.797

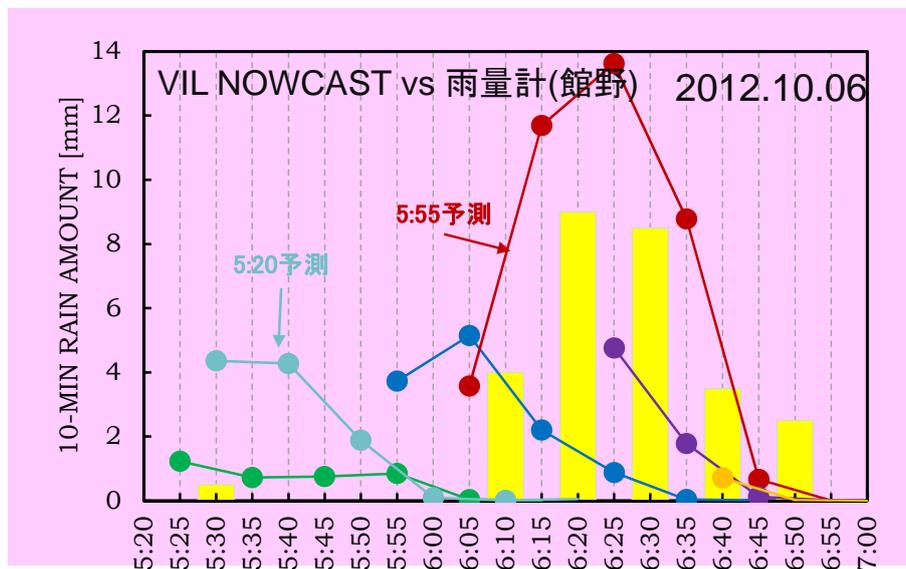


図-8 VIL 推定結果と観測雨量の比較例

2) 流域面積雨量

MP レーダを用いた流域面積雨量を求める方法として「面積 Φ dp法」を開発した。この方法は降雨強度の分布を求めることなく偏波間位相差情報から面積雨量を求める方法である。本研究では Ryzhkov 他の手法と Bringi 他の手法のそれぞれ長所を取り入れたハイブリッド推定法を提案し、横浜市早淵川流域に設置した高密度雨量計網で観測された雨量データを用いて実証実験を行った。本研究で提案したハイブリッド法は Ryzhkov 他の手法もしくは Bringi 他の手法単独で推定した雨量よりも地上雨量計観測値に近い結果が得られ、本手法の有効性を確認できた。

国交省 X バンド MP レーダシステムでの本手法の利用は可能であるが、実利用にあたっては次の 3 点

について考慮する必要がある。第一は、課題1で開発されたMKDP法により求められた偏波間位相差を用いた場合に更なる精度向上が期待できるのかどうか、第二は、様々な規模の流域での検証、第三は電波消散が発生した時の処理方法である。特に、最後の点はXバンドMPレーダでは十分考慮する必要がある。本手法は波長の長いCバンドMPレーダに効果を発揮するかも知れない。

3) 実効雨量

表層崩壊の危険度の指標の一つとして使われている実効雨量は半減期という概念を導入して前期雨量の影響を考慮した累積雨量である。従来、反射因子から計算されていたが、本研究では、より高精度の推定が可能な、偏波間位相差を用いた計算式を採用している。開発したアルゴリズムは防災科学技術研究所の極端気象監視予測システム(MPSEP)において試験運用された。(図-9) このシステムでは半減期が1.5時間と72時間の実効雨量に加えて降水強度、10分間雨量、1時間、3時間、24時間積算雨量情報をリアルタイムで見ることができる。2012年から2013年にかけていくつかの豪雨事例について、アルゴリズムは安定して動作したことを確認した。

本手法は基本的には課題2で開発された降雨量水推定アルゴリズムを用いているため、国交省XバンドMPレーダシステムへの実装にあたっての問題点は(2)で挙げたものと同じである。実効雨量は、これまでも研究や現業で多くの実績があるが、本研究は実効雨量の計算方法として従来のZ-R関係式からKDP-R関係式を中心とした方法の可能性を示すものである。

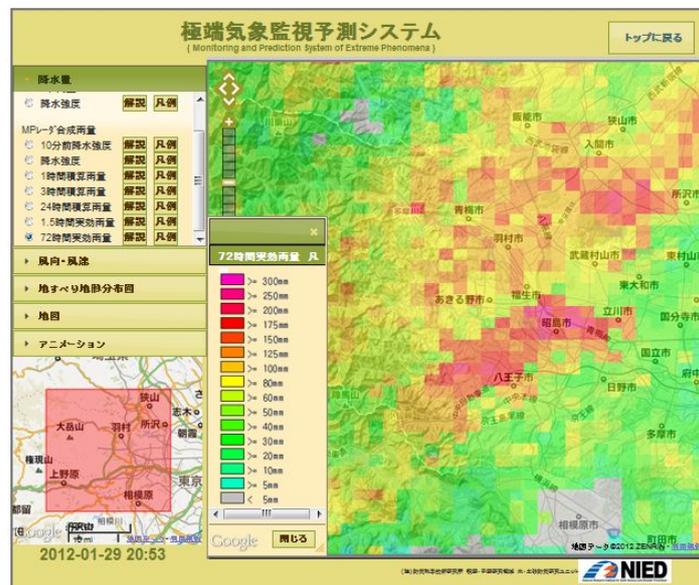


図-9 防災科研の極端気象監視予測システムの画面例

【4】今後の課題・展望

都市型水害の対策として3大都市圏(東京圏、名古屋圏、大阪圏)と主要地方都市に世界で初めてとなるMPレーダネットワーク(XRAIN)が整備され、3年間の試験運用を経て2013年の秋から本格運用が開始された。XRAINから作り出される250m、1分間隔という極めて高分解能の雨量情報は国内外の防災機関、地方公共団体、民間企業、研究機関から大きな関心と期待が寄せられており、都市型水害の軽減に向けた実利用が進められるであろう。

しかしながら、XRAINの能力はまだその一部しか発揮していないことを指摘しておきたい。今後、取り組むべき研究開発項目として、偏波パラメータによる雨雪判別、データ同化手法による降水予報、Cバンド波長との相補的利用、などが挙げられる。また、降水現象とは異なるが、竜巻・突風や火山噴煙の監視にも利用が期待される。XRAINは国際的にも最先端のレーダネットワークである。しかし、その真価を発揮するためには、XRAIN情報のいっそうのオープン化を進め、オールジャパンの体制の元で研究開発・実用化に取り組む必要がある。