

Xバンドマルチパラメータレーダネットワーク

—局地的気象災害の監視と予測を目指して—

真木 雅之

災害の発生機構の研究や予測技術の高度化のため、防災科学技術研究所は2006年から他の研究機関や大学と連携して、Xバンド気象レーダネットワーク(X-NET)の構築を進めている。X-NETは、防災科学技術研究所、中央大学、防衛大学校、気象協会、電力中央研究所が所有する研究用レーダをネットワークで結び、降水と風に関する情報をリアルタイムで配信する技術を確認することを目指す研究用レーダネットワークである。X-NETから得られる情報は、災害をもたらす激しい大気現象の理解やその予測技術の向上、都市型風水害の軽減に向けた研究に役立つ。X-NETは新しい都市防災システムとして位置付けられ、その特徴として、(1)都市の優れた通信インフラを活かしたレーダネットワーク、(2)既存の研究施設の利用による即効性と経済性、(3)3000万人の住民が生活する首都圏が試験地、(4)エンドユーザ(研究者、国、地方公共団体防災担当者、民間気象関連会社など)とのやりとりを通じた研究開発、などが挙げられる。

キーワード：マルチパラメータレーダ、MPレーダ、レーダネットワーク、都市型水害、豪雨、強風、ナウキャスト、X-NET

1. はじめに

高度に発達した交通網や通信網を有し、数百万の人が生活する大都市には、集中豪雨、落雷、突風などの局地的な気象擾乱に対する脆弱性が内在している。例えば、アスファルト舗装の道路や密集したコンクリート建物のために、局地的な豪雨があると雨水が一気に下水道へ流れ込む。排水処理機能がこれに追いつかない場合には雨水が下水道からあふれ出し、道路や鉄道の冠水、繁華街や地下街での浸水による被害が発生する。また、都市への人口集中に伴い丘陵や山麓に開発された住宅地は、局地的な豪雨による土砂災害の危険をはらんでいる。落雷や竜巻等の突風による通信・電力施設や交通機関の被害は、都市機能を麻痺させ、都市経済や人間生活に多大な被害をもたらす。このような、都市特有の環境が素因として特徴づけられる災害を本論文では都市型気象災害と呼ぶことにする。

一般に、気象災害をひきおこす気象擾乱の発生や発達を監視するには気象レーダが有効な観測機器である。気象庁は全国を20台のCバンドの気象レーダ(一部はドップラーレーダ)でカバーし、その情報を利用して豪雨の監視と短時間予測をおこなっている。また、国土交通省河川局と道路局は全国を26台のCバンドの在来型レーダでカバーし、その情報を河川管理に用いている。

しかしながら、現業レーダにはいくつかの問題点がある。第一は空間分解能の問題である。レーダは半径240km程度の探知能力があるが、ビーム幅の広がりのためにレーダから離れるほど方位角方向の空間分解能は悪くなる。第二は、地球の曲率のために遠方では地表付近の現象を観測することができないという問題である。第三は、レーダから得られる雨量情報の精度の問題である。現業レーダの降雨情報はZ-R関係式を用いて推定されるが、Z-R関係式は雨滴粒径分布の変動に敏感であるために、時々刻々と変化する降雨現象の場合には推定誤差が生じる。そこで、レーダ推定雨量を地上雨量計の測定値で補正することで精度を向上させている。しかしながら、この処理のために気象レーダが本来持っている瞬時性が犠牲にされる。例えば、最も高精度の雨量情報である国土交通省解析雨量の更新間隔は30分である。このように、現業の気象レーダネットワークは、急速に発達し、しばしば局所的に集中する豪雨や強風を監視するために必要な時間・空間分解能を有しているとは言えない。

上述した現業レーダの問題点を解決するシステムがXバンドマルチパラメータレーダネットワークである。マルチパラメータレーダとは、水平偏波と垂直偏波の二種類の電波を送信し、降水に関する様々な偏波パラメータ(反射因子、反射因子差、比偏波間位相差

など)を測定するレーダである¹⁾。防災科学技術研究所は、マルチパラメータレーダを用いて、定量的降水量推定手法の開発をおこなってきた^{1)~5)}。偏波パラメータを用いた手法の優れた点は、在来型レーダが被る様々な誤差の要因、例えば、雨滴粒径分布の変動、レーダのキャリブレーション誤差、地形によるビームの一部遮蔽、降雨減衰、雹の混在などの影響をほとんど受けない点である。これにより、地上の雨量計で補正しなくても、降雨量を精度良く求めることが可能になり、レーダが本来持つ高い時間分解能を活かすことができるようになった。

残された問題は、空間分解能と観測高度である。本研究では、この問題を解決するために複数台のマルチパラメータレーダによる観測システムを提案し、2006年から他の研究機関や大学と連携して、XバンドMPレーダネットワーク(以降、X-NET)の構築を進めている。以下では、X-NETの概要、主な研究トピック、X-NETを利用した災害発生予測システムについて述べる。

2. X-NETの概要

(1) 目的

X-NETの目的は、局地気象擾乱の発達の理解やその予測精度の向上、都市型災害の警報や予測システムの開発に役立てるために、高精度・高空間分解能の降水と風の3次元分布情報を取得することである。

(2) 参加研究機関

X-NETには多くの研究機関、研究者、技術者が参加している。X-NETは緩やかな連携を基本にする。このために、参加する研究機関や人は年によって変動がある。2009年7月時点での参加研究機関は、防災科学技術研究所、中央大学、防衛大学校、日本気象協会、電力中央研究所、山梨大学、国土技術政策総合研究所、東京消防庁、JR東日本開発センター防災研究所、釜慶国立大学、コロラド州立大学である。X-NETの運用とデータ利用に関しては、「次世代気象災害監視レーダネットワーク(X-NET)の構築と利用に関する検討委員会(防災科研内)で議論している。

(3) レーダの配置と観測範囲

X-NETが設定しているテストベッドは東京都庁を中心にして半径50kmのエリアである(図-1)。便宜上、このエリアを東京首都圏と呼ぶことにする。このエリアの中には東京23区(人口850万)、横浜(360万)、川崎(130万)などのいわゆるメガシティ5都

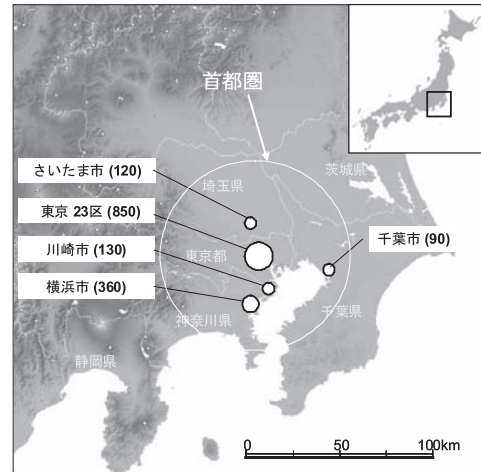


図-1 X-NETのテストベッドである首都圏と5つのメガシティ。東京都庁を中心として半径50kmの範囲を首都圏と定義した。市の名前の後の()内の数値は人口(万人)である。

市が含まれている。円内の全人口は約3000万人で、カナダの総人口に匹敵する。毎朝の通勤・通学で交通機関を利用している人は約1000万という、世界でも特異な人口密集地帯である。

X-NETを構成するレーダは、防災科学技術研究所の3台のMPレーダ、2009年に新たに製作された、電力中央研究所と山梨大学の各MPレーダ、中央大学、防衛大学校、(財)日本気象協会の各ドップラーレーダの計8台である。なお、電力中央研究所と山梨大学の各MPレーダは試験運用の後、2009年末にネットワークに接続される予定である。X-NETの各レーダの配置と観測範囲を図-2に示す。X-NETにより、ほぼ250km四方の領域が観測範囲となる。この観測範囲

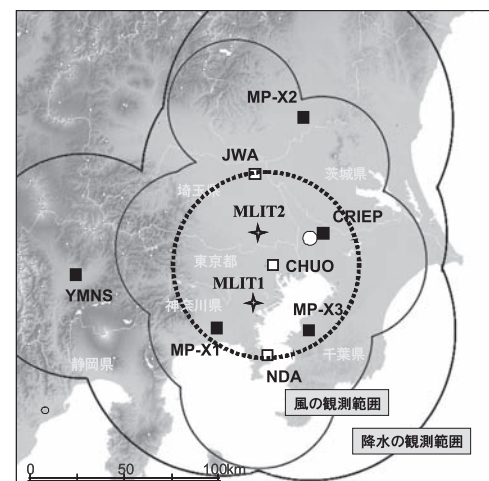


図-2 X-NETを構成するレーダの配置と観測範囲。MP-X1: 防災科研 MP レーダ(神奈川県海老名市), MP-X2: 防災科研 MP レーダ(千葉県木更津市), MP-X3: 防災科研 MP レーダ(栃木県真岡市), CHUO: 中央大学ドップラーレーダ(東京都文京区), NDA: 防衛大学校ドップラーレーダ(神奈川県横須賀市), JWA: 日本気象協会ドップラーレーダ(埼玉県羽生市), CRIEP: 電力中央研究所 MP レーダ(千葉県我孫子市), YMNS: 山梨大学 MP レーダ。

内には東京都，神奈川県，千葉県，埼玉県の全域と茨城県，静岡県，山梨県，栃木県，群馬県の一部が含まれる。全てのレーダはドップラー機能を有しており，複数台のドップラーレーダの解析から風向風速分布を求めることができる。その領域は図-2の内側の円弧内の領域である。アンテナのスキャンモードは5分毎のボリュームスキャンを基本とするが，各研究機関独自の観測モードでのスキャンで観測することもある。空間分解能は，レンジ方向が100 m～250 m，方位角方向が1.3°前後である。

(4) 空間分解能と観測高度

局地気象擾乱の発達の理解や都市型災害の予測のためには，高空間分解能の3次元レーダ情報が要求される。X-NETの利点の一つに高い空間分解能がある。レーダの空間分解能はパルス幅とビーム幅によって決まる。パルス幅は，レンジ方向の空間分解能を規定し，通常100 m程度でレーダからの距離によって変わることはない。一方，ビーム幅はレーダから遠ざかるほど広がる。例えば，1°のビーム幅の場合，

レーダから10 km先でのビーム幅は約170 mであるが，100 km先になるとビーム幅は約1.7 kmに広がる。図-3に，千葉県柏市に設置された気象庁レーダとX-NETのビーム方向の空間分解能の違いを示す。気象庁レーダの場合，500 m以下の空間分解能で観測できる範囲はレーダから半径約30 km以内に限られるのに対して，X-NETは，観測対象域である首都圏を500 m以下の空間分解能で観測することができる。

災害は地上で発生するためには，気象災害の監視や予測にはできるだけ地上付近のレーダ情報を得る必要がある。図-4aは1台のレーダの場合のビーム高度の水平分布を示した図である。計算では地球を球とみなし，標準大気の屈折率を考慮している。観測仰角はグラウンドクラッターの影響も考慮して1°としている。図-4aによれば，1台のレーダの場合，例えば，高度1 kmの現象を検出できるのは半径60 km以内に限られる。この制限は，空間分解能の場合と同様に，複数台のレーダによる観測により改善することができる。図-4bに示したように，X-NETでは，高度1 kmを観測できる範囲は東西約100 km，南北約

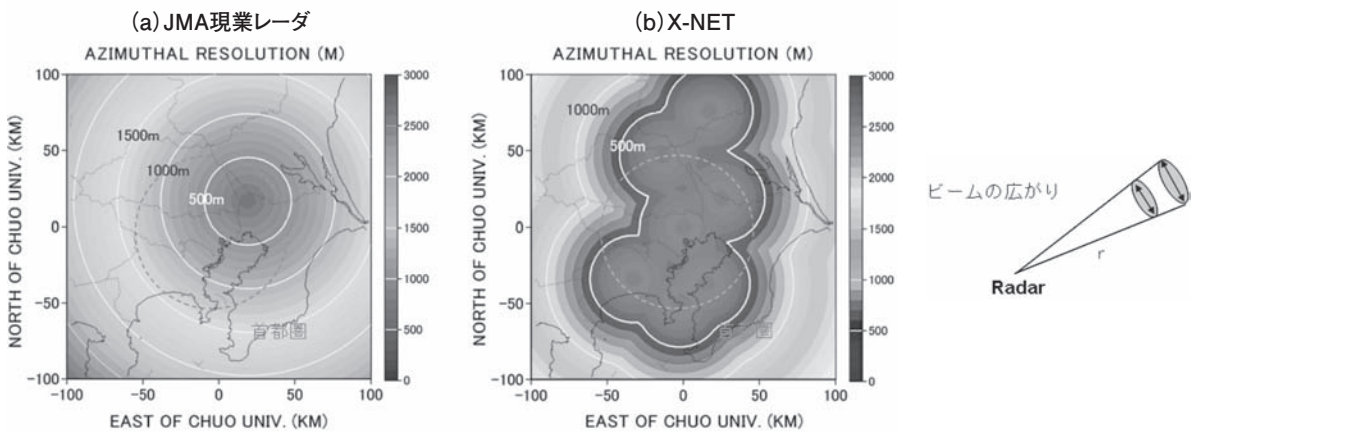


図-3 観測空間分解能。(a) 1台のレーダ，(b) X-NET。

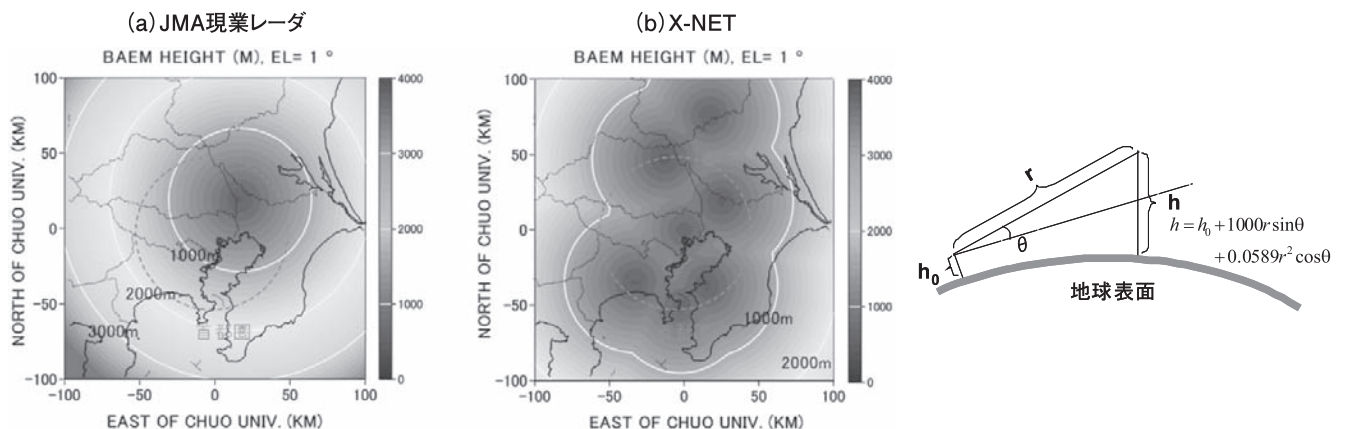


図-4 観測最低高度。(a) 1台のレーダ，(b) X-NET。

200 km の範囲と広がる。

(5) データ収集と処理

X-NET のレーダデータは、商用の光ファイバー通信回線により防災科学技術研究所に転送されリアルタイムで処理される。その際、レーダ毎に異なるデータフォーマットは、米国 UCAR で開発された NetCDF と呼ばれるネットワーク透過・自己記述型データフォーマットに準拠したフォーマットに変換される。NetCDF はデータ交換が比較的容易であるという利点があり、気象学・気候学などで広く採用されているフォーマットである。その後、座標変換、ノイズ除去処理、降雨減衰補正、ドップラー速度の折り返し補正などが施され、雨量と風の情報が求められる。

X-NET のレーダデータは、レベル 0 からレベル 4 に分類され管理される。レベル 0 は各レーダに特有な生データ（通常は極座標）である。レベル 1 は NetCDF に変換された極座標データである。レベル 1.5 は、減衰補正や折り返し補正などの処理がなされたデータである。ここでの処理の精度が後の処理の精度を左右する。レベル 2 は降雨強度や風速などの気象要素の変換された緯度・経度座標データである。レベル 3 は、解析がさらに進んだデータで、例えば、客観解析データや時間積算雨量などが該当する。レベル 4 は降雨強度や強風のノウキャスト情報や数値モデルによる予測結果などである。

3. 主な研究トピック

(1) 概要

X-NET からリアルタイムで配信される雨と風の 3 次元情報は、対流スケールからメソ β スケールの大気現象の発達過程を把握しそのメカニズムを調べるために利用することができる。更に、定量的降水量予報 (QPF) や強風の定量的な予報 (QWF) の入力データとしても利用できる。これらの予報手法には、大きく分けて、相関法による方法と数値モデルを用いる方法がある。相関法による予報手法は、計算時間が短くて済むために、1 時間先程度までの予報に有効である。一方、数値モデルによる方法は、計算時間はかかるが、物理法則に基づいた、豪雨や強風の発達、衰弱過程を予測できる。近年、データ同化手法により、レーダデータを数値モデルの初期値として利用することが可能になり、降雨の予測精度の向上が期待されている。以下では、各研究テーマの技術面について説明する。

(2) 降水量の観測と予測

X-NET は、MP レーダ観測から得られる比偏波間位相差 (K_{DP}) を利用して降雨量を推定する。 K_{DP} は、従来の方法が被る様々な誤差要因の影響を受けにくいために、定量的降雨量推定の鍵となるパラメータである。Xバンド波長はCバンド波長やSバンド波長と比べて、 K_{DP} の降雨強度に対する感度が高いために、弱い雨に対しても K_{DP} を用いた降雨量推定が可能という利点がある。図-5 右は、MP レーダによって求められた降雨量分布の一例である⁶⁾。気象庁の在来型レーダから得られた降雨量分布と比べて (図-5 左)、MP レーダは局所的な激しい雨の領域を捉えていることがわかる。欠点としては、大きな雨滴によるミー散乱の影響を受け、後方散乱偏位が発生することがある。後方散乱は K_{DP} を求める時の大きな誤差となるために、それを除去するためのフィルタリング処理が必須である。また、 K_{DP} を利用できない弱い雨の場合には反射因子や反射因子差を使って降雨量を推定するが、この時、反射因子と反射因子差の降雨減衰補正をおこなう必要がある。激しい降雨の後方では、受信信号がノイズレベル以下になる領域 (電波消散域) が発生することもある。本研究テーマでは、これらの課題を解決するための研究をおこなっている^{7)~9)}。改良したアルゴリズムは、雨滴粒径分布測定装置 (ディストロメータ) や国土交通省、地方公共団体等の地上雨量計観測と比較検証をおこなっている。

降雨量予測については、1 時間先までの予測手法と 3 時間先までの予測手法を開発する。1 時間先の予測は、外そう法に基づく手法を用いる。外そう法は、過去の降水域の動きから移動ベクトルを求め、将来を予測する方法である。X-NET の精度良い雨量情報を用いることにより予測精度の改善が図られているが¹⁰⁾、この方法は、定常性を仮定しているために、時間変化の激しい降水の場合には予測精度が悪化する。これを

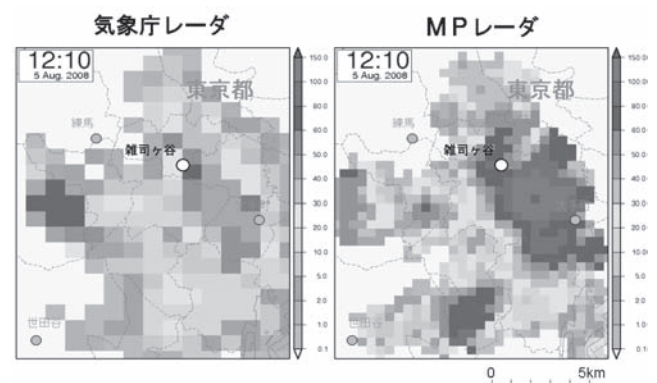


図-5 2008年8月5日12時10分の東京都豊島区雑司が谷付近の雨量分布。(a)気象庁レーダ観測値、(b)X-NETのMPレーダ観測値。

改善するために、X-NET から求まる収束・発散の情報と降水の発達や衰弱の予測に利用できないかを調べている。3時間先までの予測は、降水の発達や衰弱を予測することができる雲解像数値モデルを用いる必要がある。リアルタイムで実行可能な、3次元変分法を用いたデータ同化手法を開発することにより、3時間先の降水量予測の精度向上を目指している¹¹⁾。データ同化には、X-NET から得られる雨量や風の情報に加えて、GPS 観測から得られる水蒸気情報も利用する。

(3) 風の観測と予測

X-NET は、複数台のドップラー動径風を合成して、風向・風速の3次元分布をリアルタイムで求める。このために、次の三種類のアルゴリズムを確立する。第一は、ドップラー動径風速の自動折り返し補正アルゴリズムである。ドップラー速度の折り返しは、レーダ方向の風速成分がナイキスト周波数を超えるときに発生する。最近のレーダでは二種類のパルス繰り返し周波数を用いることでナイキスト周波数を大きくできるものもあるが、X-NET のドップラーレーダの中にはその機能を備えていないレーダもある。そこで、気象庁メソスケール数値モデルの風情報、VAD 解析結果、空間連続性を考慮した折り返し補正方法を採用している。第二はドップラー速度の合成方法である。X-NET では、観測されるドップラー風速と矛盾せず、かつ連続の式の両方を満たすような風速三成分を変分法により決定する方法を採用している。最後に、レーダから求められる上空風から地上付近の風を推定する手法で、地表面粗度を考慮した風速対数則に基づいた方法を採用している¹²⁾。

1時間先までの強風の予測手法について、相関法を用いた研究をおこなっている。予測方法の原理は、降水ナウキャストと同じで、過去の強風域の移動から移動ベクトルを求め、定常性を仮定して強風域の予測をおこなう。ただし、レーダは降水粒子を検出することによって風の情報を得るために、無降水域では風を求めることができない。そこで、3次元変分法を用いたデータ同化により無降水域の風を推定する方法を開発している。これは、不規則に分布した観測データから、規則的な格子点での大気の状態を与える客観解析にあたる。客観解析データは、ナウキャストの入力として利用できるほか、豪雨や強風などの発生・発達・衰弱の過程を調べることに有効である。

(4) 降水パラメータ

MP レーダの偏波パラメータから、降水システムの

微物理過程の理解や豪雨の予測精度の向上に必要な降水パラメータの分布を推定することができる。本研究では、雨滴粒径分布の推定手法とファジーロジックを利用した降水粒子の判別手法¹³⁾を開発している。これらの手法は、レーダ反射因子や反射因子差を用いるため、重要な前提として、これらの偏波レーダパラメータの降雨減衰補正が十分な精度でなされている必要がある。本研究では、減衰補正方法として自己無撞着法を採用している^{7)~9)}。この方法は、偏波間位相差情報を束縛条件として、レーダ反射因子や反射因子差の最適な減衰係数を求める方法である。

4. X-NET を利用した災害発生予測システム

(1) あめリスク・ナウ

都市域における内水氾濫を対象とした実時間浸水予測システム「あめリスク・ナウ」を開発している^{13),14)}。このシステムは、舗装道路網を疑似河川網とみなして水理モデルを構築し、タンクモデルにより雨水の流出を計算する。現在、藤沢市と共同で、分散・相互運用型の web サイトでの実証試験をおこなっている。Web では MP レーダの雨量情報とともに、氾濫の浸水深、流速、道路網や建物を考慮した総合危険度などの情報を 10 m メッシュで表示することができる。「あめリスク・ナウ」の情報は、浸水被害発生予測箇所の早期の道路規制、地下鉄、地下室等の地下空間の浸水防止対策、要援護者の早期の避難等の、浸水被害発生直前の自助または自助・共助による早期の被害軽減活動に役立つ。現在、藤沢市を試験地として、インターネットや携帯電話などの IT 通信システムを通じて、自治体、防災 NPO や住民に試験提供している。

(2) LAPSUS

集中豪雨による土砂災害を軽減するために、MP レーダから求められる実効雨量を用いた支援ツールを開発し試験運用している。このシステムは、LAPSUS: Landslide disaster prediction support system(表層崩壊危険度予測支援システム)と名付けられている^{15),16)}。このシステムは、斜面崩壊の一つの指標である土壌水分量の変動を半減期 72 時間と 1.5 時間の実効雨量で推定するもので、500 m メッシュ毎の斜面の危険度を表示する。この方法は簡便であるため広域を対象とすることができるが、表層崩壊の素因である地形や土質に関する情報を考慮していないために、危険域を十分に絞り込むことができない。そこで、分布型流出モデルを活用したより詳細な危険度予測システムを開発し

た¹⁷⁾。現在、神奈川県鶴見川流域を対象に検証実験をおこなっている。このシステムは、分布型流出モデルにより計算した貯留量から斜面安定解析に必要な地下水位を推定し、地形勾配等を考慮して表層崩壊危険域を50m間隔で推定するものである。

(3) X-NET 強風情報

最後の例として、リアルタイム強風情報提供システムを開発している^{5), 12)}。このシステムは、高度1km付近の風向・風速、雨、運動学的なパラメータ（渦度や収束・発散）の分布を5分毎に表示する。その情報は、2008年から試験的にX-NET参加メンバーに配信されている。解決すべき課題として、災害に重要な地上付近の強風の推定がある。台風0709号接近時の事例について、高度1kmで推定された風向風速に対数則を仮定して地上風を推定したところ、風向に関してはずれがあるものの、推定風速は地上に設置された風速計の測定値とよく一致した⁵⁾。精度向上のために、詳細な地表面粗度の分布を考慮した手法に改良するとともに、地上風速計やウィンドプロファイラーなどとの比較による検証をおこなっていく必要がある。

5. まとめ

X-NETの高時空間分解能のレーダ情報は、都市型水害を始め、土砂災害、強風災害、沿岸災害などの様々な災害の予測研究を加速させる。より実用的な観点から、国や地方公共団体の防災担当機関、NPO、民間会社などの連携をはかりながら研究を進めていく必要がある。

X-NETが提案した次世代防災システムは、国土交通省により具体化されることが決まった。2008年夏の神戸市の都賀川や東京都豊島区雑司が谷での水害など、近年問題となっている局地的な大雨（いわゆるゲリラ雷雨）による水害の予測に向けて、東京圏、名古屋圏、大阪圏、北陸圏、北九州圏、山陽圏等に現業用のMPレーダネットワークを整備し、3年間の試験運用を経て2013年度から本格運用するという計画である。防災科学技術研究所は、国土交通省国土技術政策総合研究所との共同研究や委託研究を通じて、X-NETで得られた様々な知見や技術や今後新たに開発する技術を提供して行く。

J C M A

《参考文献》

- 1) Xバンドマルチパラメータレーダによる降雨観測、<http://www.

- bosai.go.jp/kiban/radar/index.htm>, 2004.
- 2) 防災科学技術研究所編：防災科学技術研究所45年のあゆみ, No. 327, pp. 78-85, 2009.
- 3) M. Maki, K. Iwanami, R. Misumi, S.-G. Park, H. Moriwaki, K. Maruyama, I. Watabe, D.-I. Lee, M. Jang, H.-K. Kim, V.N. Bringi, and H. Uyeda: Semi-operational rainfall observations with X-band multi-parameter radar, Atmos. Sci. Letters, Vol. 6, pp. 12-18, 2005.
- 4) M. Maki, S.-G. Park and V.N. Bringi, Effect of Natural Variations in Rain Drop Size Distributions on Rain Rate Estimators of 3 cm Wavelength Polarimetric Radar, J. Meteor. Soc. Japan, Vol. 83, 871-893, 2005.
- 5) 首都圏Xバンド気象レーダネットワーク(X-NET)リアルタイム風向・風速、<http://MP-radar.bosai.go.jp/>, 2008.
- 6) A. Kato, and M. Maki: Localized heavy rainfall near Zoshigaya, Tokyo, Japan on 5 August 2008 observed by X-band polarimetric radar — preliminary analysis —, SOLA, Vol. 5, pp. 89-92, 2009.
- 7) S.-G. Park, V.N. Bringi, V. Chandrasekar, M. Maki, and K. Iwanami, Correction of radar reflectivity and differential reflectivity for rain attenuation at X-band wavelength. Part I: Theoretical and eMPirical basis., J. Atmos. Oceanic Technol., Vol. 22, pp. 1621-1632, 2005.
- 8) S.-G. Park, M. Maki, K. Iwanami, V.N. Bringi, and V. Chandrasekar, Correction of radar reflectivity and differential reflectivity for rain attenuation at X-band wavelength. Part II: Evaluation and application., J. Atmos. Oceanic Technol., Vol. 22, pp. 1633-1655, 2005.
- 9) D.-S. Kim, M. Maki and D.-I. Lee: Correction of X-band radar reflectivity and differential reflectivity for rain attenuation using differential phase, Atmos. Res., Vol. 90, pp. 1-9, 2008.
- 10) 加藤敦・真木雅之・岩波越, 三隅良平, 前坂剛, マルチパラメータレーダを用いた降水ナウキャスト, 水文水資源学会誌, Vol. 22, 2009 (受理).
- 11) S. Shimizu, T. Maesaka, R. Misumi, K. Iwanami, and M. Maki, Development for a radar data assimilation procedure using specific differential phase, 5th European Conf. Radar in Meteorology and Hydrology. (CD-ROM), 5pp, 2008.
- 12) T. Maesaka, M. Maki, K. Iwanami, R. Misumi, and S. Shimizu, Surface wind estimation system by X-band radar network around Tokyo metropolitan area, 5th European Conf. Radar in Meteorology and Hydrology (CD-ROM), 5pp, 2008.
- 13) K. Iwanami, K. Kusunoki, N. Orikasa, M. Maki, R. Misumi, and M. Murakami: Hydrometeor type classification in winter clouds using X-band polarimetric radar measurements -CoMParison of X-band polarimetric radar data with in-situ measurements by HYVIS-, Preprints, 33rd International Conf. Radar Meteor. (CD-ROM), 4pp, 2007.
- 13) K. Nakane, and R. Matsuura, Real time flood risk mapping using the MP radar, Advances in hydro-science and engineering, Vol. 8, pp. 1645-1654, 2008.
- 14) リアルタイム浸水被害予測情報「あめリスク・ナウ」<http://gis.mapservice.jp/jp/go/bosai/MP-Radar/index.html>, 2007.
- 15) T. Fukuzono, H. Moriwaki, T. Inokuchi, M. Maki, K. Iwanami, R. Misumi, S. Takami, and T. Shikoku, Landslide disaster prediction support system based on web GIS, Proc. International SyMPosium on GeoInformatics for Spatial-Infrastructure Development in Earth and Allied Sciences, pp. 118-121, 2004.
- 16) 土砂災害発生予測支援システム「LAPSUS」<http://lapsus.bosai.go.jp/lapsus/dosha/top.htm>, 2004.
- 17) 三隅良平・小口高・真木雅之・岩波越, 分布型流出モデルを用いた表層崩壊危険域のリアルタイム予測システム, 自然災害科学, Vol. 23, pp. 415-432, 2004.

【筆者紹介】

真木 雅之(まき まさゆき)
(独)防災科学技術研究所
水・土砂防災研究部
部長

