

平成20年度 新規委託研究  
「次世代ドップラーレーダー技術の研究開発」  
研究計画書

## 1．研究開発課題

「次世代ドップラーレーダー技術の研究開発」

## 2．研究開発の目的

気象災害の原因となる突発的局所現象（集中豪雨、竜巻突風等）の観測を行い、災害を引き起こす大気現象の予測、発生状況の把握を迅速・的確に行うための次世代ドップラー気象レーダーシステムの研究開発を行う。本研究開発では、現在のところ有効な観測技術が存在しない局所的で急激に変化する大気現象を観測するために、30 km 四方の範囲を空間分解能 100 m 以下で 10 秒以内に立体的にスキャンし、降水強度や風速などの気象要素を観測可能な気象レーダーシステムを開発し、実運用を想定した実証実験を行うことで、開発終了後速やかな実用化を目指すことを目的とする。将来的には、本レーダーシステムの観測データが数値予報モデルに入力されることでこれまで困難であった局所的大気現象の予測が可能となり、多数のレーダーによるネットワーク運用が実現化されることで突発的局所気象災害の被害軽減につながることを期待される。

## 3．研究開発期間及び予算

研究開発期間：平成 20 年度から平成 24 年度までの 5 年間。

予算：平成 20 年度は総額 162 百万円程度を上限とする。

なお、平成 21 年度以降の予算については、対前年度比で 6% 減額した金額を上限として提案を行うこと。

## 4．研究開発課題選定の背景および必要性

安心・安全な社会の実現に向けて、自然災害の予測および被害軽減に対する社会的ニーズは非常に大きい。日本における気象災害については、風水害、土砂災害、雪害等の大きな被害が毎年のようにもたらされており、その原因となる台風、大雨（大雪）、強風などの予測精度の向上、および災害被害の軽減に必要な情報の収集・配信が、緊急の重要な研究開発課題となっている。近年、数十年に一度の確率と言われる豪雨による洪水被害や竜巻突風等による人的被害および交通機関への被害が増えているが、それらの災害をもたらす大気現象は直接観測されることも少なく、予測が困難である以前にその現象が十分に解明されているとは言えない状況である。このような局所的気象災害を引き起こす現象は降水を伴うことが多く、それらを直接観測できる気象レーダーの果たす役割は大きいと考えられる。

現在、日本における気象レーダー観測は、気象庁の現業レーダー 20 台（2007 年度中に 11 台がドップラー化）および国土交通省のレーダ雨量計 26 台が日本全国をカバーしているのに加え、空港ドップラーレーダーや大学や研究機関が所有する研究用マルチパラメータレーダーなどによる観測が行われている。しかしながら、これらの気象レーダーで

は、局所的で時間変化の激しい大気現象（集中豪雨、竜巻突風等）を高精度で詳細に観測することは困難である。まず、従来の気象レーダーで用いられるパラボラアンテナを機械的に回転させるボリュームスキャン方式（仰角を 10～30 段階に変化させながら 360° のコニカルスキャンを行う方法）では、3次元空間の観測を行うために 5～10 分の時間を必要とするため、秒単位でその構造が変化する竜巻やダウンバースト等の現象を時空間的に正しく捉えることはほとんど不可能である。さらに、現業用レーダーでは 200～300 km の観測レンジで広い面積をカバーするための観測を実施しているが、観測レンジが数 10 km 以上になると、レーダービームの広がりによって空間分解能が悪くなり局所的な大気現象が解像できなくなることに加え、地球の曲率により低層に不可視領域が生じるため、雲底下のごく下層で発生する竜巻やダウンバースト、あるいは豪雨をもたらす降水粒子の成長過程などを直接観測することはできない。

このように突発的局所的な大気現象の観測を可能とするためには、従来にない高時間分解能・高空間分解能の気象レーダーの研究開発が必要となる。まず、高時間分解能を実現するためには、従来の機械式のアンテナ駆動では抜本的な時間分解能の向上は困難であり、電子的にビーム走査を行うフェーズドアレイ・レーダー方式が最有力候補となる。フェーズドアレイ・レーダーでは、複数のアンテナ素子それぞれにおいて電波の位相を制御することにより、アンテナを固定したままで瞬時にビーム方向を切り替えることができるので、10 秒以内の 3次元スキャンが可能となる。次に、空間分解能の向上および低層の不可視領域の削減のためには、観測レンジの短い多数のレーダーを密に配置し、ネットワーク観測を行うことが解決策となる。米国でも同様の考え方から、産学官の連携組織による CASA（Center for Adaptive Sensing of the Atmosphere）プロジェクトが 2003 年から開始されており、米国全土をカバーするレーダー観測網（NEXRAD）の中に、多数の小型ドップラーレーダーを展開する計画が進行中である。ただし、まだオクラホマ州などの一部の地域で従来型小型レーダーによるネットワーク試験観測が開始されただけの状況である。CASA の次の研究フェーズでは安価なフェーズドアレイ・レーダーも開発する計画になっているが、その内容は未だ公表されていない。一方、米国オクラホマ州の National Weather Radar Testbed では、イージス艦搭載用フェーズドアレイ・レーダー（SPY-1A）を気象観測用に改造することで、はじめての地上設置型フェーズドアレイ・気象レーダーの試験観測が開始された。しかし、飛翔体検出等のために開発された軍事目的のフェーズドアレイ・レーダーは非常に高価であり、気象レーダーネットワークとして普及するとは考えられない。日本においても、複数の研究機関が有する既存の研究用 X バンド気象レーダーを複数持ち寄って、関東平野におけるネットワーク観測を行う X-NET という計画が防災科学研究所を中心として開始された。しかし、X-NET は研究目的の観測実験であり、実用化を目指したものではない。

以上述べたように、突発的局所現象を観測し、災害発生予測・発生状況把握を迅速・的確に行うためには、高時間分解能のフェーズドアレイ・気象レーダーを開発し、多数のレ

レーダーを展開して高空間分解能のネットワーク観測を行うことが解決の道筋である。しかし、実際に密な気象レーダーネットワークを構築するためには、気象レーダーの導入および運用・保守コストの削減、周波数割当と混信低減問題、レーダー設置場所の確保、災害担当部署等のユーザが必要とする情報のインテリジェンス化などの課題が考えられる。本研究開発課題では、民間資金による開発リスクが最も大きいフェーズドアレイ・ドップラーレーダー・ユニットの研究開発を行うものであるが、上記の課題の解決方法も最大限考慮した上で、早期の実用化を目標とする必要がある。

## 5. 個別課題

本研究開発では、以下の2つの課題ア、イのそれぞれに対して、相互に連携した研究提案を行うこと。本章では本研究開発課題の個別課題について概要を記す。実際の研究開発の実施にあたっては次章の到達目標を達成できるようにすること。

### 課題ア フェーズドアレイ・レーダーの開発

本課題では、将来のネットワーク運用を想定したフェーズドアレイ・ドップラー気象レーダーシステムを開発する。本レーダーシステムは、突発的局所的な大気現象を観測することを目的としたものであるから、観測範囲は数10 km程度として、できる限りの高時間・高空間分解能を目指す必要がある。その他に要求される性能・機能として、実用的な受信感度、実利用にあたって障害となる地表面クラッタエコーおよび2次トリップエコーの除去機能、ドップラー速度の自動折り返し補正機能、リアルタイムのデータ処理機能などがある。

複数台のレーダーのネットワーク運用を行うにあたっては、周波数割当と混信低減の問題に対する実効的な解決策が必要となる。提案される混信低減技術によっては、実際に2台のレーダーを用いた実証実験を行うことが必要になることも想定されるが、それができない場合でも混信低減機能を実装した簡易送受信装置などを使って、実証実験を行うことが望ましい。また、複数台のレーダー設置場所を考えた場合、都市部ではビルの屋上などが有力な設置場所となる。そのためビルの屋上にも設置できるように重量を抑え、分解運搬が可能な設計を考慮する。

本研究で開発されたフェーズドアレイ・ドップラーレーダーが実用化・普及して、多数のレーダーによるネットワーク運用が実現されるためには、製造コストおよび運用・保守コストの低減が最重要の課題になると考えられる。そのため、本レーダーのシステム設計にあたっては、確実な開発実施計画に加えて、低コスト化の方法に関する検討を重ねる。

### 課題イ フェーズドアレイ・レーダーの性能評価と実証実験

本課題では、課題アで開発するフェーズドアレイ・ドップラー気象レーダーシステムが所望の性能・機能を満たすことを示すための性能評価および実証実験を行う。まず、本レ

レーダーシステムでは下層の大気現象を精度良く観測することが重要であるが、一般にアレクシアンテナではパラボラアンテナと比べてアンテナサイドローブを抑えることが困難であり、地表面クラッタ（山岳やビルなどのクラッタを含む）の影響が大きくなることが予想されるため、実用化に耐えられる地表面クラッタエコーの除去方法についての検討を行う。次に、空間分解能を向上させるためのオーバーサンプル等の検討、および開発されたレーダーシステムが所望の性能を満たすことを評価するために、疑似降雨エコーを用いたシミュレーション実験を行う。これらの結果は、必要に応じてシステム設計に反映させる。

システム設計が固まった後は、想定される現象に応じてレーダーパラメータを最適化した観測シーケンスを検討するとともに、実際のレーダーシステムの運用方法についての検討を行う。大容量の観測データは研究目的には全てを保存することが好ましいが、気象災害の予測や軽減に利用するためには、必要なデータだけを最短時間でネットワーク配信することが重要である。無降雨時の運用方法や観測データの扱い、降雨イベント発生時のリアルタイムデータ解析処理および配信方法について、ユーザーズを考慮した検討を行う。

レーダーシステム完成後には、まず所望の性能・機能を満たすことを実証するため現地試験を行う。次に、降雨観測に適した場所と季節を選定し、少なくとも数ヶ月間の実証実験を実施することで実際の降雨観測データを取得する。実証実験では、竜巻・ダウンバースト（ガストフロント）や集中豪雨などの観測に努め、既存のシステムと比較し、本システムの有用性を示す。また、検討したシステム運用方法およびデータ処理・配信の試験を行う。

本研究開発を実施するにあたり、受託者は研究開発進捗を報告しその時点での課題についての議論を行うために、定期的（約1ヶ月毎）に連絡会議を開催すること。連絡会議メンバーは原則としてNICTと受託者とするが、必要な場合は外部有識者を含むことも可能とする。また、本研究開発で得られた公開可能な気象観測データについては連絡会議メンバー等に公開するとともに、積極的に研究成果の公表に努めること。

## 6．研究開発の到達目標

本研究開発では、2つの課題ア、イのそれぞれに対する到達目標を以下に示す。なお、当該到達目標は最低限の目標であり、提案に際しては、当該到達目標を超える目標の設定が望ましい。また、当該到達目標は、本委託研究に関する技術や利用動向を勘案しつつ、必要に応じて計画実施の途中でも見直しを行うものとする。なお、詳細な設計検討や試作を実施しないと決められない項目については、その検討方法あるいは試作内容とスケジュール案を提案すること。また、以下の到達目標の実現が最初から困難と考えられる場合は、その趣旨を損なわないような代替案を提案すること。

## 課題ア フェーズドアレイ・レーダーの開発

以下の項目にあげる性能・機能等を有するフェーズドアレイ・ドップラー気象レーダーシステムを開発する。

ア-1) 実用化に耐えることができユーザニーズを満足できる、可搬型もしくは容易に移動・設置が可能な地上設置型フェーズドアレイ・ドップラー気象レーダーシステムとする。

(備考：モノスタティック型/バイスタティック型は問わない。)

ア-2) 複数台のフェーズドアレイ・レーダーのネットワーク運用を行うための周波数割当と混信低減の問題について、実効的な解決手段を有すること。使用する周波数および占有帯域の選択もその問題解決に適したものとする。

ア-3) 水平 30 km 四方、地表面から高度 14 km までの範囲を 10 秒以内に観測可能なこと。(備考：パルス圧縮による不可視領域が生じる場合などは、上記の範囲をレーダーを含む領域で定義しなくても構わない。)

ア-4) 空間分解能については、直交座標系に変換後の水平および鉛直格子間隔がそれぞれ 100 m 以下となるように設計する。ただし、100 m 以下の空間分解能を得るためのオーバーサンプリングは、例えばモノスタティック型の場合、スキャン方向にはアンテナビーム幅の 1/5 まで、視線方向にはレンジ分解能(送信パルス幅)の 1/2 までを限度とする。(備考：パルス圧縮を用いる場合にはその変調方式等は問わない。)

ア-5) 地表面からのクラッタエコーをできる限り避けるために、アンテナサイドローブは-25 dB 以下とし、パルス圧縮を用いる場合のレンジサイドローブは-50 dB 以下とする。また、課題イで検討される地表面クラッタエコー除去機能および2次トリップエコー除去機能を実装する。ただし、これらの除去機能は解除可能なものとする。

ア-6) 最小受信感度は、レーダーから 30 km 離れた場所の 0.2 mm/hr 相当の降雨エコー(レーダー反射因子 11.8 dBZ)が測定できること。ただし、竜巻やダウンバーストの直接観測のために、できる限り高感度であることが望ましい。

ア-7) 2重 PRF とドップラー速度場の連続性により、速度の自動折り返し補正を行う。ただし、2重 PRF の比率は可変とし、必要に応じて折り返し補正前の速度データも記録できるようにする。

ア-8) 信号処理・データ処理は全てリアルタイム処理されるものとし、パルス繰り返し周波数(PRF)、パルス積分数、サンプリング間隔、収集レンジビン(開始、終了、間隔)、方位角/仰角の設定等は、柔軟な運用が可能になるよう可変とする。

ア-9) 収集データは、基本的に、レーダー反射因子(Z)、ドップラー速度(V)、速度幅(W)を R-座標系においてビーム毎(積分毎)に記録するものとし、それぞれに

GPS 時刻とビーム角度情報を含ませる。データは、観測パラメータ内容をヘッダー部に含む netCDF ファイル形式とし、ユーザが使いやすいサイズ（区切り）のファイルにまとめる。

ア-10) 本レーダーシステムの高度利用および将来の改良のために、必要な場合にパルス毎の IQ データ（GPS 時刻とビーム角度方向情報を含む）を連続 3 時間以上にわたってデータ収集できる機能を有する。この IQ データは、オフラインで FFT によるドップラー信号処理（FFT の計算データ数、平均化個数は可変とする）を含む各種データ処理・解析に利用可能とする。

ア-11) R- 座標系で収集したデータを、リアルタイムで 2 次元あるいは 3 次元の格子データに座標変換し、必要な画像ファイルを自動生成する。また、定量的なデータ利用ユーザのために直交座標に変換した数値データファイルも生成する。

ア-12) 本レーダーシステムの運用は、全てネットワークからのリモート操作・監視が行えるようにする。特に、観測シーケンス（観測時刻、方位角、仰角等）の設定は、外部からの情報で容易に変更可能な設計とする。また、少なくとも 7 日間の全観測データをローカルに保存できるものとする。さらに、必要な観測データおよび解析データはネットワークを通してリアルタイムで外部に供給する。

ア-13) 停電時には UPS 等により連続 1 時間以上のレーダーシステム運用が可能とする。ネットワーク切断の場合も最低限のリモート操作（システム停止など）に加えて、実効的な運用方法の検討を行う。

ア-14) 本レーダーシステムは、海岸部や山岳部で豪雨・豪雪観測を行うことも考慮した使用環境条件を設定するとともに、適切な耐風設計、落雷対策、豪雨・豪雪対策を行う。なお、レドームに関しては、その有無、タイプ、素材などは問わないが、台風などの激しい気象状況でも観測が継続できるようにする。

ア-15) 複数台のレーダー設置場所を考えた場合、都市部ではビル屋上が有力な設置場所となると考えられるため、そのための軽量化および分解運搬が可能な設計を提案する。

ア-16) 本研究開発終了後の実用化・普及のために製造コストおよび保守コストの低減対策を行い、想定される数例の製造台数に対する実際の製造費用を提示する。また、本研究で開発するレーダーシステムに対して想定される保守費用を年毎に算出する（10 年後まで）。

## **課題イ フェーズドアレイ・レーダーの性能評価と実証実験**

以下に掲げる項目を実施する。すなわち、レーダーの設計、信号処理・データ処理、およびその運用に関する検討を行い、レーダーシステムの開発に反映させるとともに、それ

らの性能評価、および製作されたレーダーシステムの実証実験を実施する。

イ-1) 地表面クラッタの影響をできるだけ低減させ、良質な下層の観測を行うための手法（例えば、アレイアンテナパターンのヌル点の自動調整、クラッタ除去の信号処理、サイドローブキャンセラーなど）および2次トリップエコー除去方法の技術検討を行い、実用化に耐えるクラッタおよび2次ドリップエコーの除去方法を検討し、課題アにおけるフェーズドアレイ・レーダーシステム設計に反映する。

イ-2) 課題アで設計されるフェーズドアレイ・レーダーシステムが所望の性能・機能を満たすことを証明するために、疑似レーダーエコーを用いたシミュレーション実験を行う。その際、座標変換後の100 m空間分解能を実現するためのオーバーサンプリング手法やデコンボリューション技術、直交座標系への変換方法等について検討する。また、使用する周波数を踏まえて、降雨減衰の影響評価を行う。

（備考：疑似レーダーエコーは人為的に作成したセル状や線状のエコー、雲解像数値モデルの結果、他の気象レーダーによる観測データなどを目的に応じて使用すること）

イ-3) 課題アで設計される可変のレーダーパラメータ（PRF、パルス積分数、サンプリング間隔など）を用いて、想定される大気現象（突発的局所的災害をもたらす現象を含む）を観測するための最適な観測方法を検討し、実用化を目指した観測シーケンスや運用方法を提案する。また、その運用において、複数のユーザニーズ（災害担当官署、一般市民、研究者など）を考慮した実効的なデータ処理・保存・配信方法を提案する。

イ-4) 課題アで開発されたレーダーシステムの性能・機能を満たすことを実証するために必要な試験を行う。特に、アンテナパターン測定、実効送信出力、実効受信利得においては現地試験を行い、必要な校正を行うこと。なお、送信出力や受信利得などが変化することが想定される場合は、それを観測データの処理に反映できるような手段を講じる。

イ-5) 課題アで開発されたレーダーシステムによる実証実験を実施するにあたり、突発的局所的な降雨現象が発生する可能性が高い場所と季節を選択し、適切な観測サイトを決定する。その際、観測結果の比較検討ができるように他の気象レーダーの観測データを利用できることが望ましい。実証実験は、可能な限り連続観測を試み、延べ90日以上運用試験（データ処理・配信を含む）を行う。また、竜巻・ダウンバーストや集中豪雨などの観測事例から時間・空間分解能や観測可能性を議論し、フェーズドアレイ・ドップラーレーダーとしての性能・機能を総合的に示す。



## 7. 期待される波及効果

本研究開発課題では、突発的局所的な気象災害をもたらす集中豪雨、ダウンバースト、竜巻等の高時間・空間分解能の観測を行い、災害発生予測や被害軽減のための適切な情報がリアルタイムで配信可能であることを実証することを目的としている。本研究で開発するフェーズドアレイ・ドップラー気象レーダーが目標通りの性能を示せば、竜巻など突発的現象のリアルタイム監視は可能になる。ただし、実用化には、ある地域（都市域など）にフェーズドアレイ・レーダーシステムを複数台設置しネットワーク運用する必要があるため、自治体や研究機関が直ちに購入できる程度のコストのレーダーシステムが市場に出ることが重要である。コストの問題が解決されれば、必要な地域におけるフェーズドアレイ・レーダーネットワークの実現は遠い将来の話ではない。また、世界的に見てもフェーズドアレイ・レーダーネットワークは次世代の気象レーダーのあるべき姿であることに疑いはなく、研究開発のスタートは米国に若干遅れをとっているが、フェーズドアレイ素子の開発には日本が得意とする半導体技術が必要不可欠であることから、本研究開発が日本発の次世代気象レーダー技術の世界標準となる可能性もあると思われる。まずは、低コストのフェーズドアレイ・ドップラーレーダーを確実に開発し、突発的局所災害に対する実効性・有効性を示すことで、近い将来の普及につなげることが重要である。

## 8 . 研究開発スケジュール

本研究開発の実施期間は、平成20年度から平成24年度までの5年間であり、スケジュールは概ね以下の通りであるが、提案にあたって、より具体的なスケジュール案を示すこと。

	20年度	21年度	22年度	23年度	24年度
<b>課題ア</b>					
・ システム設計	←→				
・ フェーズドアレイ素子の試作・開発	←→				
・ レーダーシステムの開発		←→			
・ データ処理・解析部の開発			←→		
<b>課題イ</b>					
・ クラッタ除去方法の検討	←→				
・ シミュレーションによる性能評価	←→				
・ 観測シーケンス・運用方法の検討			←→		
・ 現地試験・実証実験				←→	

スタートアップ      第1回      第2回      第3回      最終評価  
ミーティング      中間評価      中間評価      中間評価