

4-1-2 降雨情報システム(東京アメッシュ)の観測精度の向上について

施設管理部 施設管理課 藤田 悠樹
岡島 哲也

キーワード

東京都下水道局、ポンプ所、水再生センター、ポンプの運転管理、降雨情報システム、東京アメッシュ、気象レーダー、XバンドMPレーダー、地上雨量計

要旨

東京都下水道局では、局地的な雷雨や豪雨などの気象情報を迅速に把握し、ポンプ所や水再生センターでポンプの運転管理に活用することを目的に、気象レーダーを使用した降雨情報システム(東京アメッシュ)を導入している。降雨情報システム(東京アメッシュ)は、稼働から10年以上が経過し、気象レーダーや中央処理装置等の主要機器が老朽化していたため、平成24年度から平成27年度末までに再構築を行った。

この再構築にあわせて、従来の気象レーダーより、多くの観測情報が得られる新型の気象レーダーを採用することにより、信頼性を確保した。具体的には、水平方向と垂直方向、二つの偏波での観測が可能なXバンドMPレーダーを導入する等、観測精度の向上に取り組んだ。また、今後の取り組みとして、ブライツバンド対策を検討するなど、継続的な観測精度の向上に努めていく。

1. イントロダクション

下水道は、日常生活や都市活動で発生する汚れた水をきれいにして川や海に戻し、安全で快適な生活環境の確保を担っているほか、道路や宅地に降り下水道管渠に流れ込んだ雨水を雨水ポンプにより速やかに排除するなど、浸水防除の役割を担っている。特に東京都区部の下水道は、その大部分が合流式下水道を採用しており、都市化により地面の舗装化が進んだことで、雨水は地面に浸透せず、そのほとんどが下水道管渠を通り、ポンプ所や水再生センターに急激に流れ込む。

そこで、時間と共に激しく変化する雨に対して、適切なポンプ運転を行うためには、リアルタイムの正確な降雨情報の把握が必要不可欠である。

さらに、都内のポンプ所の多くは、離れたポンプ所や水再生センターの監視室から遠方監視制御されている。遠方監視制御システムは、少ない運転員でポンプ運転が可能となる一方、運転員は遠方監視しているポンプ所の降雨情報を把握しなければならない。

そのため、当局では、気象レーダーを使用した降雨情報システム“東京アメッシュ”を用いて、局地的な雷雨や豪雨などの気象情報をきめ細かくリアルタイムに把握し、雨水ポンプ等の運転による雨水排水の信頼性及び安全性の向上を図っている。

また、浸水被害の軽減のためには、都民自ら浸水に備える取組みも重要であるため、「東京アメッシュ」と命名し、平成14年度から、降雨状況をリアルタイムでインターネットに配信している。

しかし、東京アメッシュは、稼働から10年以上が経過し、気象レーダーや中央処理装置等の主要機器が老朽化していたため、平成24年度から平成27年度末までにレーダー基地局及び中央処理局の再構築を行った。この再構築にあわせて、水平方向と垂直方向、二つの偏波での観測が可能なXバンドMPレーダーを導入し、東京アメッシュの信頼性を確保するとともに観測精度を向上させる、再構築工事を行った。

また、近年狭い地域に短時間で多量の降雨をもたらす、局地的な雷雨や豪雨などの発生頻度が増

加しており、浸水のリスクも高まっているため、当局は、新型レーダーを使ってこれまで分からなかった降り始めの僅かな雨も表示することにより、急な雨の予兆も察知できる取組みを進めている。この論文では、東京都下水道局の浸水対策として、東京アメッシュの再構築の取組みを紹介する。

2. 東京アメッシュの仕組み

東京アメッシュは、東京都内2箇所の気象レーダーと地上雨量計で構成されている。

レーダーは、電波がまっすぐ進む特性と雨粒に当たると跳ね返ってくる特性を利用して、雨粒の大きさなどを観測している。この原理を利用して、レーダー雨量計システムを構築している。レーダー雨量計システムは、その反射波の中から、ビルや山岳などにぶつかった不要な部分を除去し、降雨からの反射波だけを抽出する能力を持たせたもので、探知した降雨の強さや分布状態を計算機で算出し、これを運転管理に適したデータに加工して表示している（図1参照）。

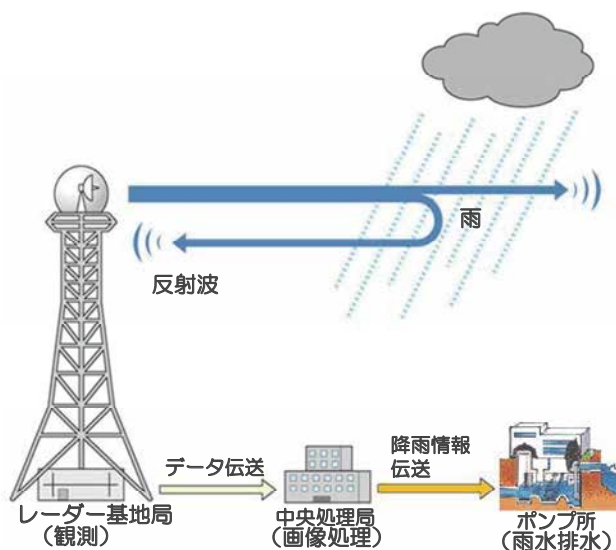


図1 システム概要

このシステムでは、雨粒で反射された電波をレーダーがとらえ、反射波の強度から雨の強さを推定しているため、地上雨量計の実測値により補正し、誤差を最小限に抑えている。

また、レーダーの観測範囲は半径50 kmであり、二つのレーダーで東京都全域をカバーすることができる。

平成19年より、気象庁や近隣自治体と降雨情報を互いに共有することで、観測精度の向上と観測範囲の広域化を行っている。レーダーによる降雨の観測では、電波が雨域を通るときに減衰するため、レーダーの近くに強い降雨があると、反射波が減衰し、遠くの降雨の観測精度が低下する。近隣自治体と協力し、各データを補完することで、降雨減衰による影響を最小限に抑えている。

東京アメッシュは、中央処理局にある降雨情報中央処理装置を中心に、東京の2箇所のレーダー基地局（港レーダー、稲城レーダー）と、近隣自治体2つのレーダー、約130台の地上雨量計（下水道局、建設局、近隣自治体）、119台の降雨情報端末から構成されている（図2参照）。

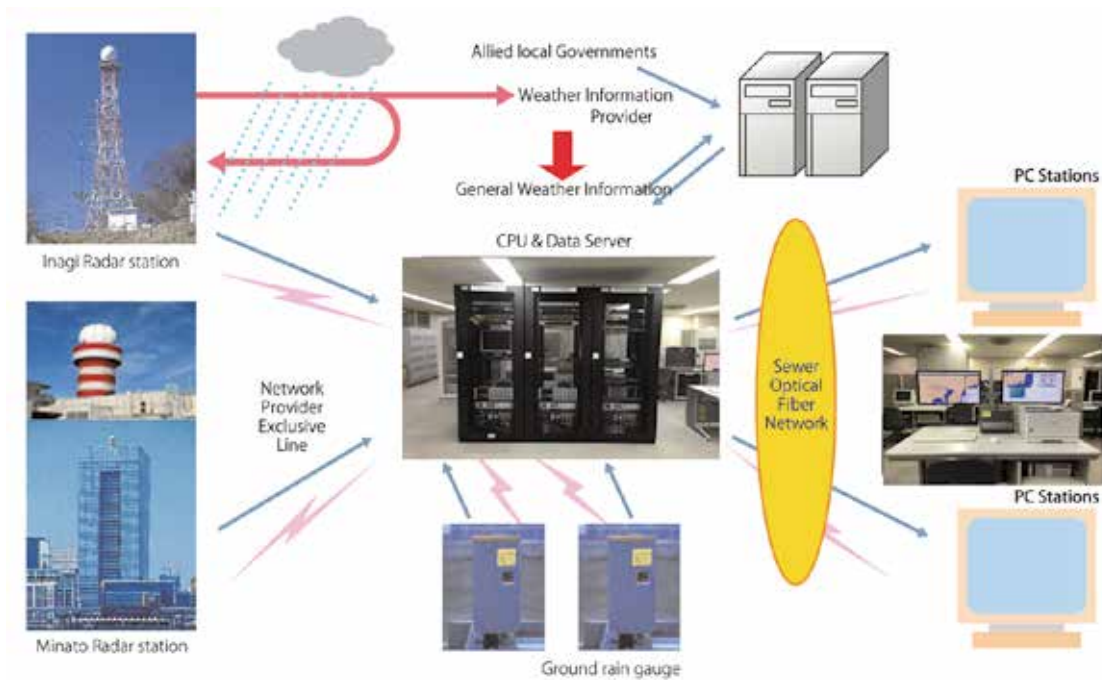


図2 システム構成

気象レーダーと地上雨量計で観測されたデータを、降雨情報中央処理装置で処理し、下水道管内に敷設した当局独自の光ファイバー通信網で各端末に送信している。各降雨情報端末では、降雨情報を運転管理に適した画面で見ることができる（図3参照）。

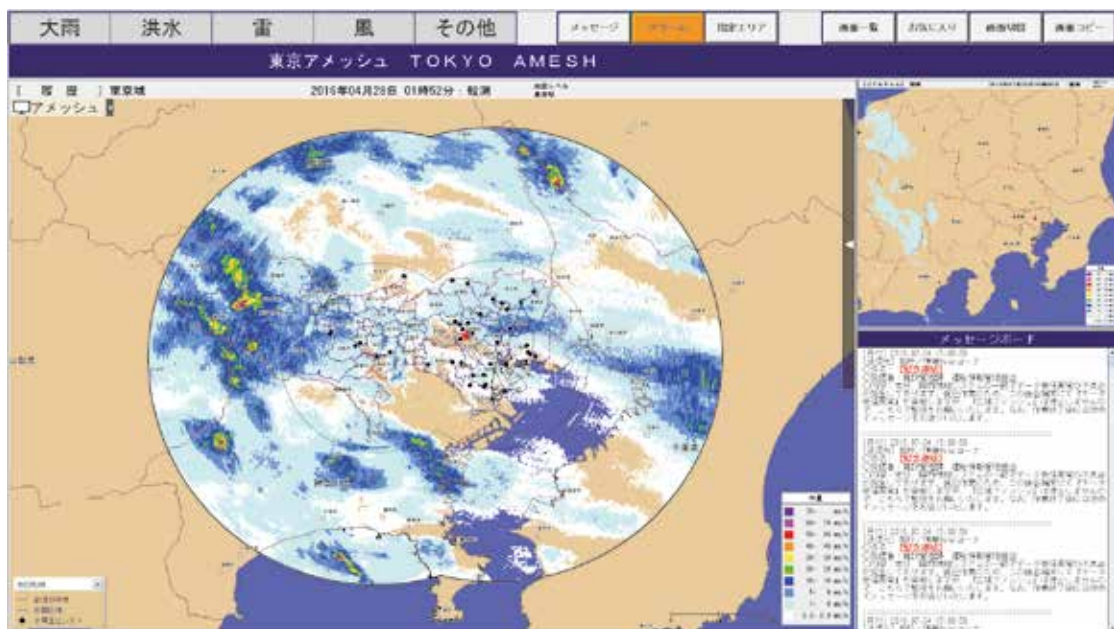


図3 端末画面表示例

また、当局では東京アメッシュをインターネットに配信し、パソコンやスマートフォンからアクセスできるようになっている。都民には人気のコンテンツとなっており、平成27年度には約6,000万件ものアクセスがあった。



図4 英語版東京アメッシュ画面表示例

3. レーダーの再構築

従来のレーダーは、稼働から10年が経過し、機械的な突発故障によるシステム停止などのトラブルが発生するようになっていた。東京都下水道局の事業計画である経営計画2013において、浸水対策の取組みの一つとして、老朽化したレーダーを更新することを事業計画として定めた。経営計画では、局地的な大雨などに対するポンプ運転の安全性を高めるため、新型のXバンドMP（マルチパラメータ）レーダーを導入し、観測精度の向上を図ることとした。次に新型レーダーの特徴と利点を紹介する。

3.1 XバンドMPレーダーの原理

従来のレーダーは、水平偏波のみから降雨強度を算出する手法で観測を行っていた。対して、新たに導入したXバンドMPレーダーは、水平と垂直の2つの偏波を用いて雨量を観測することにより、雨粒の形状や大きさの推定が可能となり、より精密なレーダー雨量の観測ができる（図5参照）。表-1にXバンドMPレーダーで利用可能な主な情報を示す。

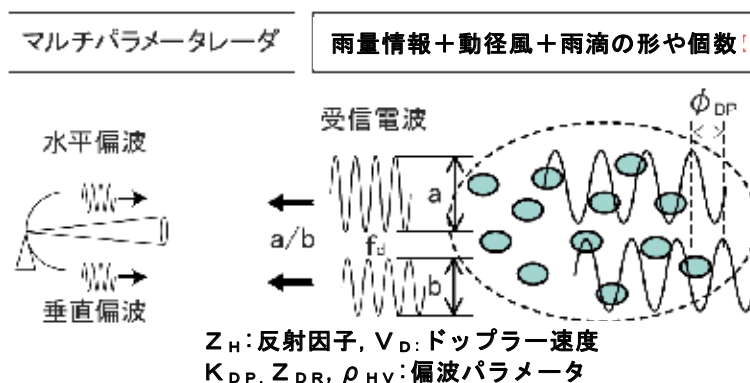


図5 観測原理

表1 XバンドMPレーダーで利用可能な主な情報

名称	記号	概要
水平偏波反射因子	Z_H	水平偏波から降雨強度を推定する。
直交偏波比	Z_{DR}	水平偏波反射因子(Z_H)と垂直偏波反射因子(Z_V)の比率によって、雨滴が球状なのか扁平状なのかを判別可能。
偏波間位相差	ϕ_{DP}	水平偏波と垂直偏波の位相差から、降水粒子の扁平度合いを判別可能。
偏波間相関係数	ρ_{HV}	水平偏波と垂直偏波の受信波の相互相関係数から算出される。直交偏波比(Z_{DR})との組合せで、雨滴の性状(雨、雪、雹)の判別が可能。
比偏波間位相差	K_{DP}	単位距離当たりの偏波間位相差(ϕ_{DP})から算定される。比偏波間位相差(K_{DP})から算出される降雨強度推定は、降雨減衰の影響を受け難い特徴がある。
ドップラー速度	V_D	雨滴の動径方向の移動速度から風向・風速観測が可能。
速度幅	W	ドップラー速度の観測品質を示す指標
折り返し補正速度	V_H	ドップラー速度(V_D)を折り返し補正したもの
折り返し補正速度幅	W_H	折り返し補正された速度幅

3.2 半導体レーダーの採用

従来のレーダーでは、送信機にマグネトロンを使用していた。マグネトロンは、高出力を得ることが容易であり、実績も多いが、寿命が1年程度と短いことや、突発故障による停止が多く、維持管理費用が高くなることが問題だった。

そこで、新しいレーダーには、半導体素子による送信機を採用することとした。半導体素子は寿命が長く、維持管理費用の削減が期待でき、安定した降雨観測を続けることが可能になる。また、半導体素子による送信機は、1台で高い出力が得られないため8台を合成すると共に、パルス圧縮技術を採用して、従来と同等以上の観測精度を得ることを可能とした。表2にマグネトロン式と半導体式の送信機の比較を示す。

表2 マグネトロン式と半導体式の送信機比較

項目	マグネトロン式	半導体式
形式	同軸形マグネトロン	半導体(GaN)素子
交換時期	約1年	定期的交換なし
送信出力	70kW	1.2kW (200W素子を8合成)
パルス幅	2 μ s	0~7.5km 1 μ s 7.5~80km 48 μ s
パルス圧縮	無し	適用
最小受信電力	-109dBm	-110dBm

3.3 新レーダー仕様諸元

表3に従来と更新後の気象レーダー仕様諸元を示す。

表 3 新旧気象レーダー仕様諸元比較

項目		従来	更新後
観測距離		0～80km (0～50km : 定量観測) (50～80km : 定性観測)	0～80km (0～50km : 定量観測) (50～80km : 定性観測)
空中線装置	アンテナ径	Φ3m 円形パラボラ	Φ3m 円形パラボラ
	偏波面	水平偏波	水平偏波、垂直偏波
	ビーム幅	1.4° 以下	0.8° 以下
	空中線利得	43dB 以上	43dB 以上
	回転数	3rpm	3rpm
送受信装置	送信尖頭出力	70kW	1.2kW
	送信周波数	港レーダー 9,710MHz 稲城レーダー 9,730MHz	港レーダー 9,710MHz 稲城レーダー 9,730MHz
	送信方式	同軸形マグネトロン	半導体
	パルス繰返し周波数	450pps	1,200/1,500pps (二重方式)
データ処理	距離分解能	250m	150m
	方位分解能	1.4°	0.8°
	更新周期	1分	1分
データ	<ul style="list-style-type: none"> ・ 受信電力水平 (Pr - NOR) ・ 受信電力水平 (Pr - MTI) ・ 水平偏波反射因子 (Z-NOR) ・ 水平偏波反射因子 (Z-MTI) ・ 降雨強度 (Rr-MTI) ・ 降雨強度 (Rr-NOR) 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 受信電力水平 (P_H-NOR) ・ 受信電力垂直 (P_V-NOR) ・ 受信電力水平 (P_H-MTI) ・ 受信電力垂直 (P_V-MTI) ・ 水平偏波反射因子 (Z_H) ・ 垂直偏波反射因子 (Z_V) ・ 直交偏波比 (Z_{DR}) ・ 偏波間位相差 (Φ_{DP}) ・ 偏波間相関係数 (ρ_{HV}) ・ 比偏波間位相差 (K_{DP}) ・ ドップラー速度 (V) ・ 速度幅 (W) ・ 折り返し補正速度 (V_H) ・ 折り返し補正速度幅 (W_H) ・ 降雨強度 (Rr) 	

注：NOR は通常(normal)の意味で、レーダー受信データのそのままの値を示し、MTI は moving target indicator の略で、移動目標からの反射波に含まれる不要な反射波成分を除去した値を示す。

3.4 XバンドMPレーダー導入による観測精度の向上

XバンドMPレーダーの導入により、誤差要因を抑えて観測精度を向上させた。

3.4.1 雨粒の形状による誤差

レーダー電波の強度は雨粒の形状に影響を受けるため、雨粒の形状を正確に把握しないと雨量の推定には誤差が生じる。XバンドMPレーダーを使って、水平方向と垂直方向の電波で雨粒の形状を特定することで、より高い精度での雨量推定が可能となる。

3.4.2 降雨減衰による誤差

Xバンド帯(9,000MHz帯)を使った従来のレーダーは、降雨減衰の影響を受けやすいため、降雨減衰により電波強度が減衰すると、算定される雨量は実際よりも小さくなってしまいます。

一方で、XバンドMPレーダーでは水平偏波と垂直偏波の位相情報から比偏波間位相差(K_{DP})を算出し、この比偏波間位相差(K_{DP})から降雨強度を推定する。電波の位相は降雨減衰の影響を受けないため、2つの偏波の位相情報をもとに雨量を算定することで、降雨減衰による観測精度の影響を抑えることができる。

さらに、従来のレーダーでは、1mm/h以下の降雨の観測が困難だったが、XバンドMPレーダーを使ってより高い精度で観測を行うことで、0.3~1mm/h程度の弱い降雨についても検出が可能となり、降り始めの僅かな雨も表示できる。

3.4.3 方位・距離分解能の向上による観測区画の細分化

従来のレーダーでは、方位分解能が1.4度であり、レーダー中心から半径20kmの地点までが250m区画、20kmから50kmまでは500m区画で観測していた。新しいレーダーでは、方位分解能を0.8度(450分割)、距離分解能を150m間隔にすることで、東京都ほぼ全域を150m区画で観測できるようになった。(図6参照)

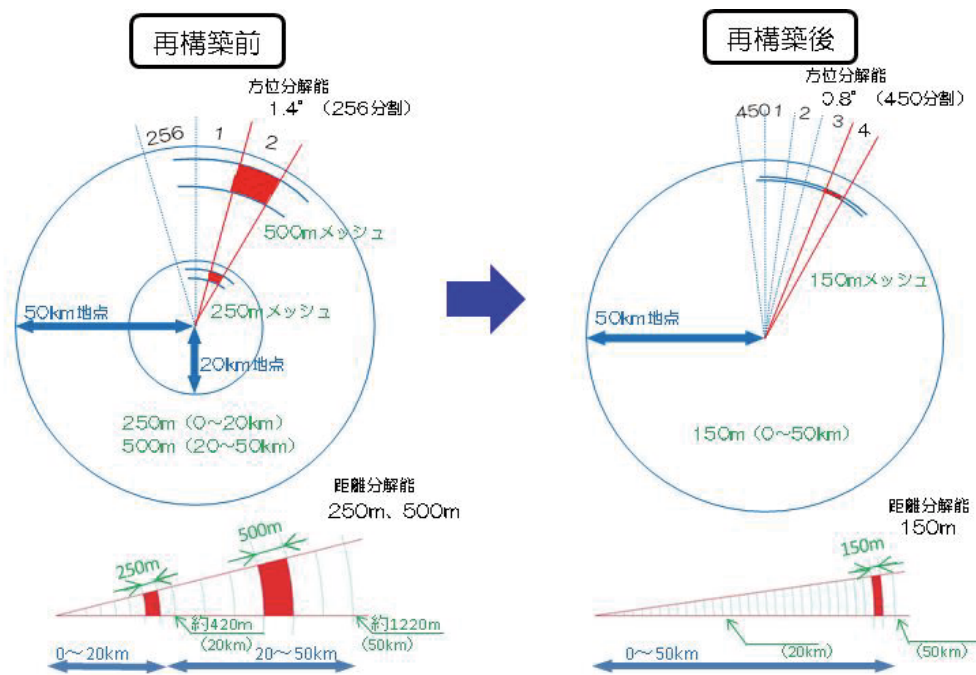


図6 観測の細分化イメージ図

3.5 高い観測精度に基づいた豪雨アラート

レーダーは降雨状況を観測するものであり、降雨が開始してから観測が可能となる。しかし、雨水ポンプの運転準備のためには、都市型豪雨が発生する兆候を早期に捉えることが必要不可欠である。

今回、任意に設定するエリア内において、前回観測値(1分前)と今回観測値とを比較し、降雨強度の差分が指定値以上となった観測区画があった場合、アラートを発するようにした。比較する観測区画は、指定エリア内の複数の区画における前回観測値の平均値と、指定エリア内の複数の区画の今回観測値としている。(図7参照)

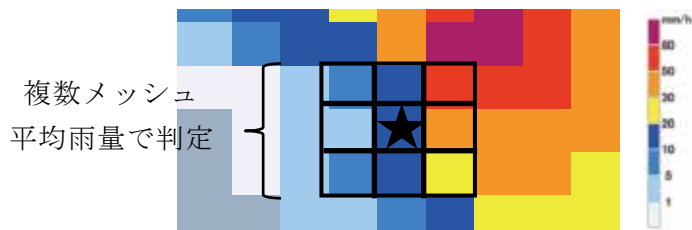


図7 イメージ図

4. 今後の取組み

東京都下水道局では、継続的に雨量観測精度を向上させる取組みを進めていく。

ブライトバンドとは、レーダーのアンテナから発射された電波が雨雲の融解層（雨雲の中で気温が0℃に近く氷の粒が溶け始める層）によって反射されることで、実際の降雨量よりも強い反射波が観測される現象である。融解層は冬季に下降することが多く、ブライトバンドが観測されると、地上に雪が降っている可能性がある。

XバンドMPレーダーにより偏波間位相差（ ϕ_{DP} ）と偏波間相関係数（ ρ_{HV} ）とを組み合わせることで、強い反射波を受信した場合、それが降雨によるものか、ブライトバンドによるものかを判別することや、融解層の高度を求めこの付近のレーダーの反射波を取り除き、周囲の反射波を重み付き内挿して反射波を推定する等、ブライトバンド低減対策を検討、実施することで、雨量観測精度の向上への取組みを進めていく。

5. まとめ

近年、局所的な集中豪雨が増えていることから、さらに東京アメッシュを重要な情報収集手段として活用している。例えば、ポンプ所周辺に降雨がなくても、その上流部で局所的な集中豪雨があった場合は、雨水が流入する前から運転が可能な先行待機型ポンプの運転を行うなど、浸水の防除に大いに役立っている。

当局では、「東京都豪雨対策基本方針」に基づき、概ね30年後の浸水被害の防止を目標に、1時間60ミリ降雨に対応する下水道施設を整備することとしている。平成28年2月に東京都下水道事業「経営計画2016」を策定し、浸水対策におけるソフト対策の一つとして、東京アメッシュの再構築にあわせ導入したXバンドMPレーダーをポンプ運転等に活用し、浸水被害防止に対する信頼性が向上するとともに、降り始めの僅かな雨も降雨情報として配信することで、都民の浸水への備えを支援していく。

6. 出典

- 1) 東京アメッシュ インターネットサイト
- 2) NIED, 2005 防災科学技術研究所パンフレット
- 3) Maki et al. 2005 (防災科学技術研究所の研究者)