

セミナー「小型気象用レーダーの活用法と課題」
平成27年11月27日：広島大学中央図書館ライブラリーホール

気象レーダーを利用した 防災・減災について

広島大学大学院工学研究科
社会基盤環境工学専攻

河原能久



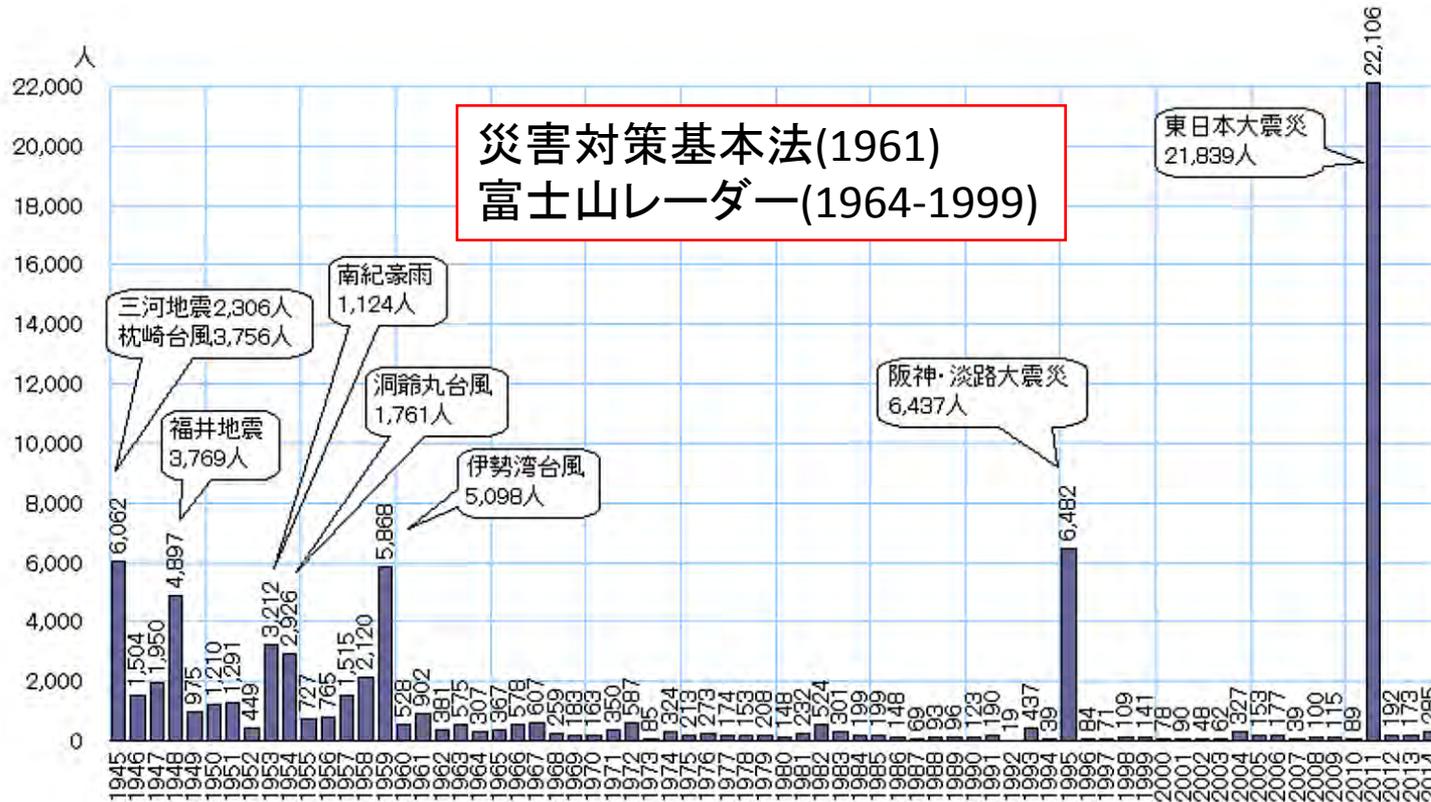
内容

はじめに

- 1.最近の豪雨災害とその特徴
- 2.防災気象情報
- 3.気象レーダーとは
- 4.気象レーダーから見た平成26年8月
広島豪雨
- 5.Xバンドレーダーの利活用



自然災害での死者・行方不明者数の変化



- 防災インフラの整備, 災害情報の伝達, 建造物の強度増加等により被害は減少してきた。
- それでも水害による死者数は年間100名程度で減少していない。



自然災害の特徴

自然災害

危険な**自然現象**によって、**人命や人間の社会的活動に被害**が生じる現象。

自然災害の種類や規模を決める要因

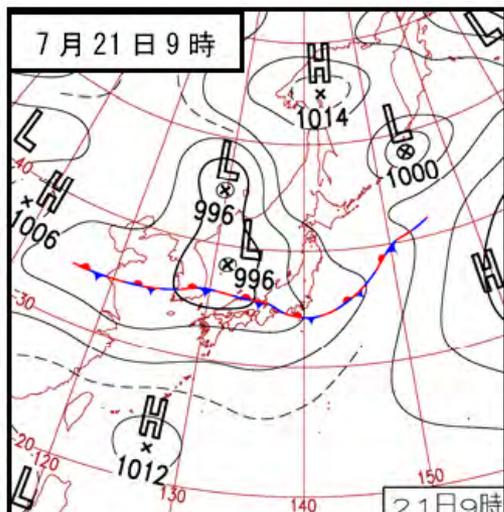
- ① **自然の外力の種類と規模**
- ② **防災・危機管理技術（ハード、ソフト）**
- ③ **生活様式，社会・経済活動の様相**



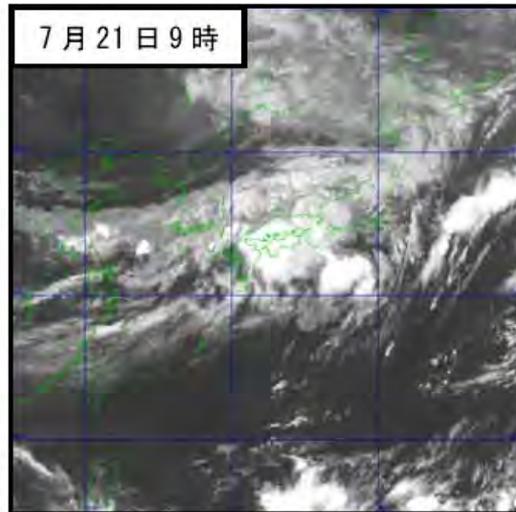
1. 最近の豪雨災害とその特徴 ～中国地方を中心として～



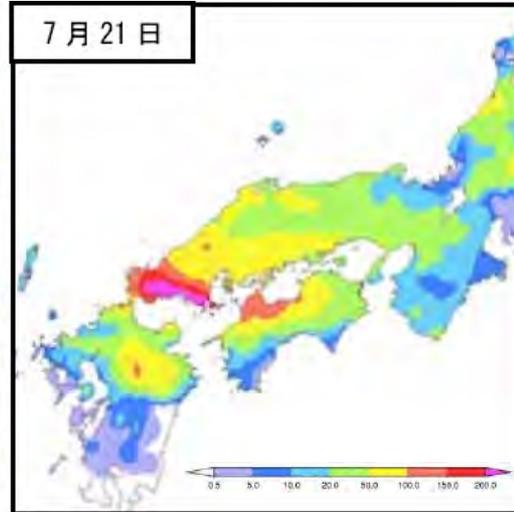
平成21年7月中国・九州北部豪雨



地上天気図



気象衛星画像(赤外)



日雨量分布

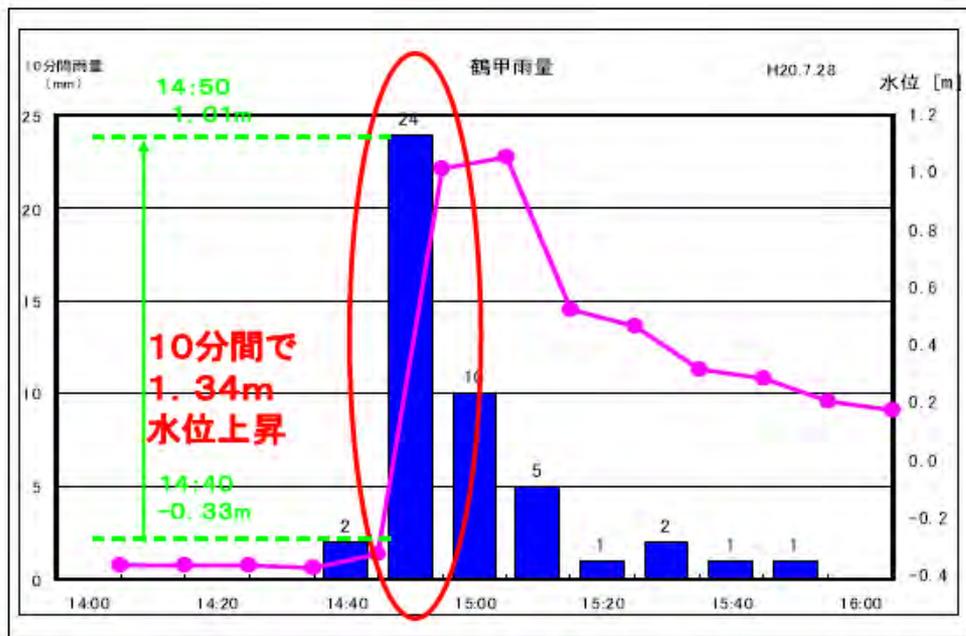


特別養護老人ホーム
で土石流により入居者
7名が死亡するなど、
防府市で計14名が土
砂災害により死亡。
災害関連情報が施設
に伝達されなかった。

全国では土砂災害の危険
がある地区に建てられてい
る老人福祉施設や幼稚園、
病院の数が約1万3800件。
そのうち、防災工事(砂防
工事など)が行われている
のは約1/3に限られている。

平成21年7月末の豪雨：兵庫県都賀川

10分間で1.34m水位上昇
→ 死者5名



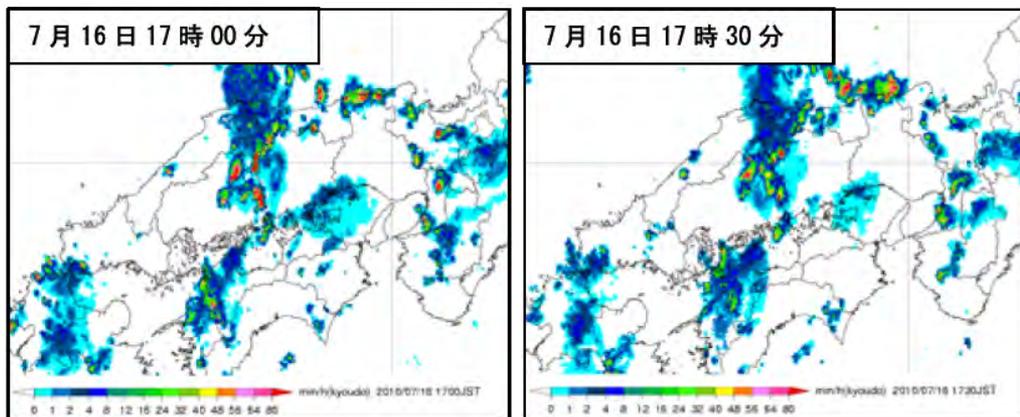
都賀川甲橋 水位上昇状況 (神戸市モニタリングカメラ画像)



積乱雲の発達を迅速に捉えるレーダーが必要。

XRAIN

平成22年庄原市のゲリラ豪雨



平成22年7月16日17時43分までの1時間に64.0 mm



庄原格致高の中庭から見た庄原市川西町方面を襲った豪雨。16日午後4時35分ごろ（金山一宏さん撮影）



土石流被害が広がる庄原市川北町。流された民家が土砂に埋まった。



集中豪雨の観測はできても
予測は困難。

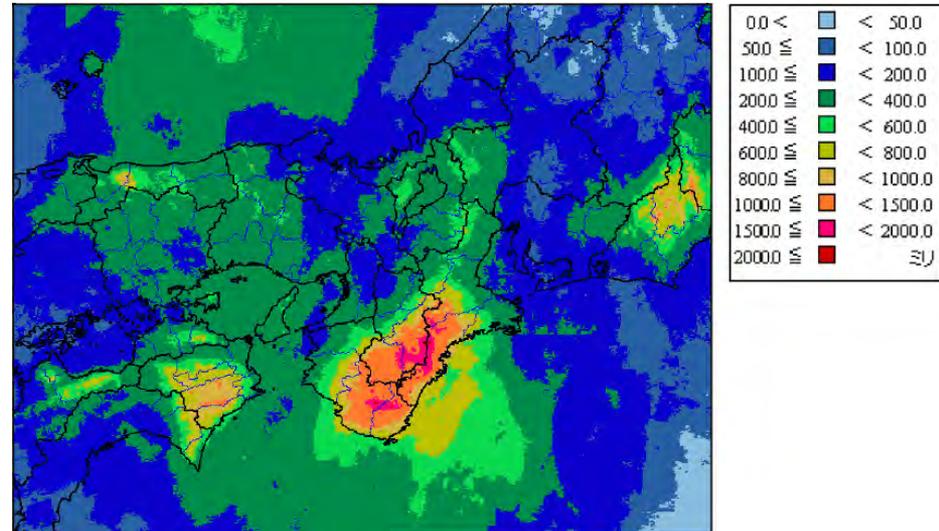
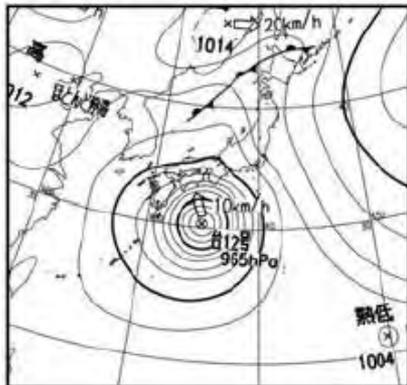
土石流の被害で壊れた建物や埋まった車＝17日午前6時56分

出典：気象庁災害時気象速報，中国新聞



平成23年台風12号による大雨

2日 09時



降水量(解析):8月30日17時～9月6日24時

奈良県上北山村上北山では最大72時間降水量が1652.5mm(日本新記録)。

大台ヶ原(奈良県)では2433mm。

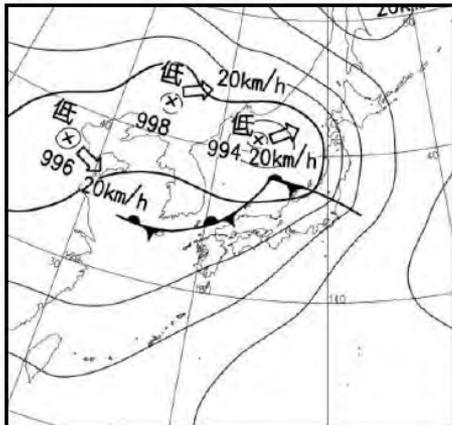
和歌山県,奈良県,三重県などで死者82名, 行方不明者16名. 深層崩壊の多発. 天然ダムの形成。

日本気象協会(2011年9月7日):総雨量2000mmの大雨が「想定外」の事象とは言えない時代に入った。

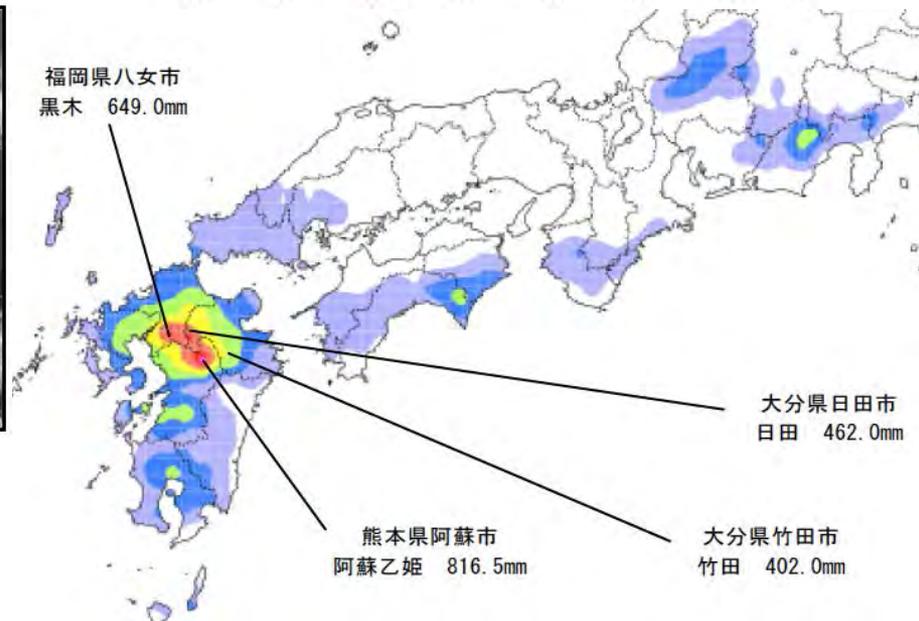
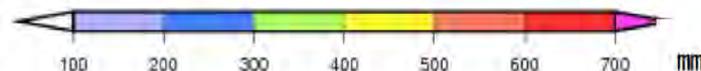
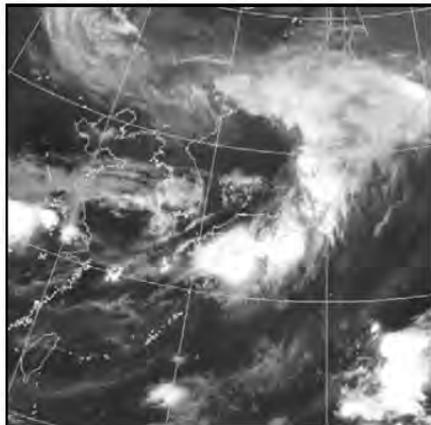
特別警報

平成24年7月九州北部豪雨

12日 09時



12日 09時



天気図の梅雨前線よりも南側に複数の線状降水帯が停滞。破堤による浸水，土砂災害の多発。気象庁は「**これまでに経験したことのないような大雨**」と発表。
死者：26名，行方不明：6名（未確定）

特別警報



平成25年山口島根豪雨



山口・島根豪雨の主な被害状況

24時間の降水量
24時間、1時間ともに観測史上最多の雨量となった地域

死亡

行方不明者

住宅倒壊救出

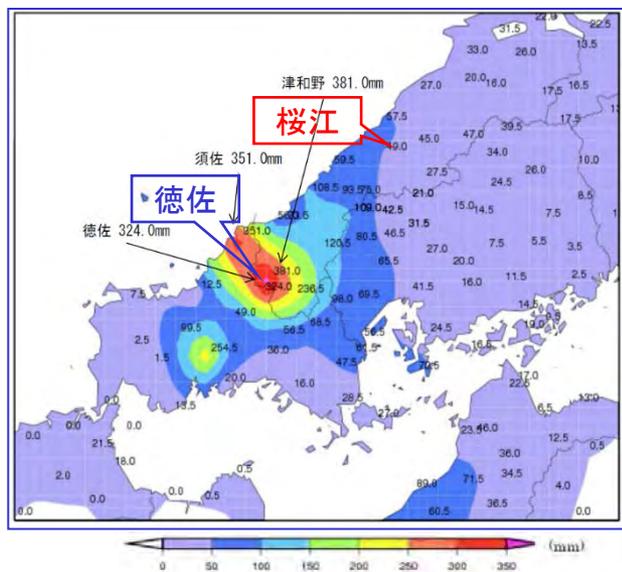


2013年7月28日
 最大日雨量: 381mm
 (津和野)
 最大時間雨量: 143mm
 (山口)
 死者・行方不明: 4名
 全壊家屋: 6棟
 床上浸水家屋: 223棟

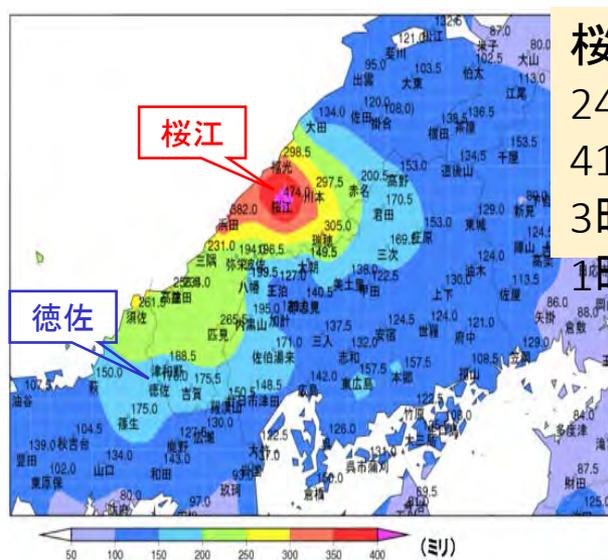


特別警報に準ずる対応
 これまでに経験したことのないような大雨となっている所があります。この地域の方は最大級の警戒をしてください。

平成25年8月島根県西部豪雨



7月28日の降水量



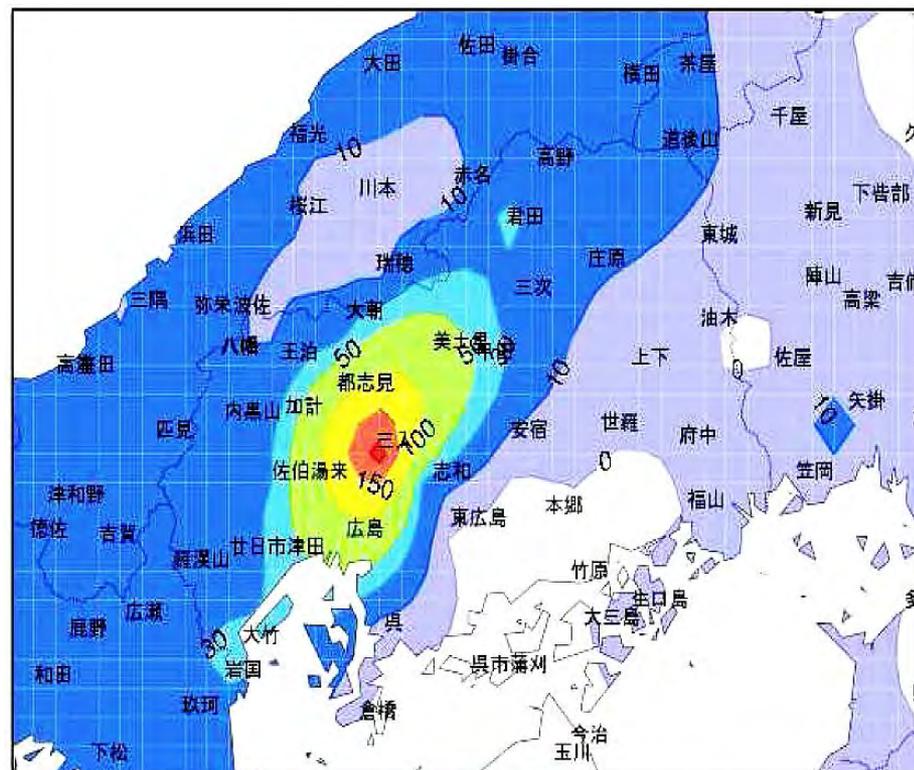
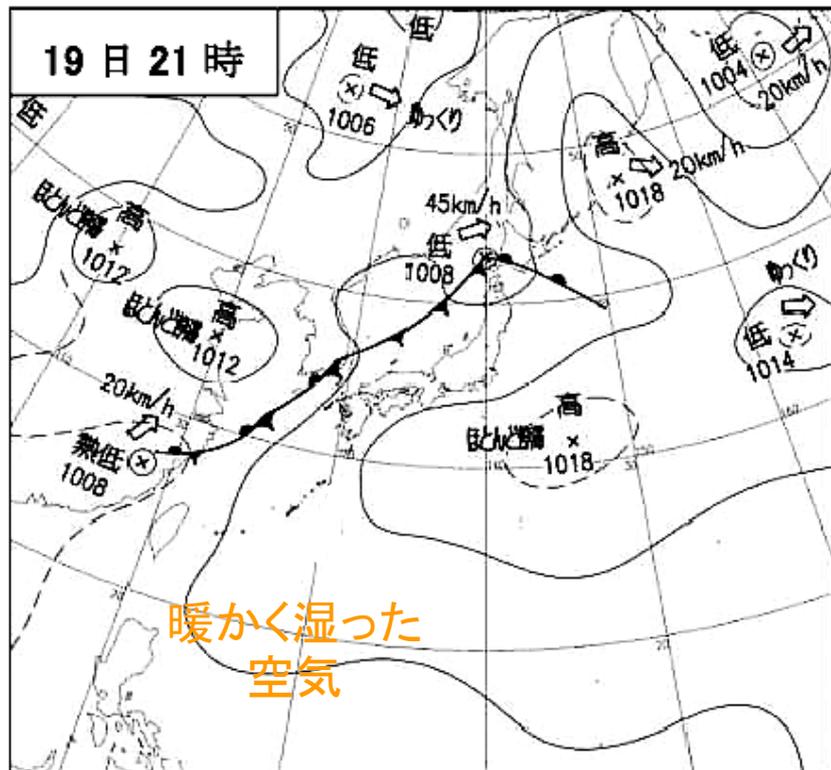
8月23日8時～25日15時の降水量

桜江(観測史上第一位)
24時間降水量:
413.5mm
3時間降水量:201mm
1時間降水量:92.5m

7月末の豪雨から1ヶ月後に再度集中豪雨が発生。
総降水量が400mmを超える地域の拡大。
中小河川での洪水の氾濫や護岸の被災。低平地での浸水。
切り土斜面の崩壊や土石流の発生。
交通インフラの被災。



平成26年8月豪雨(広島豪雨)



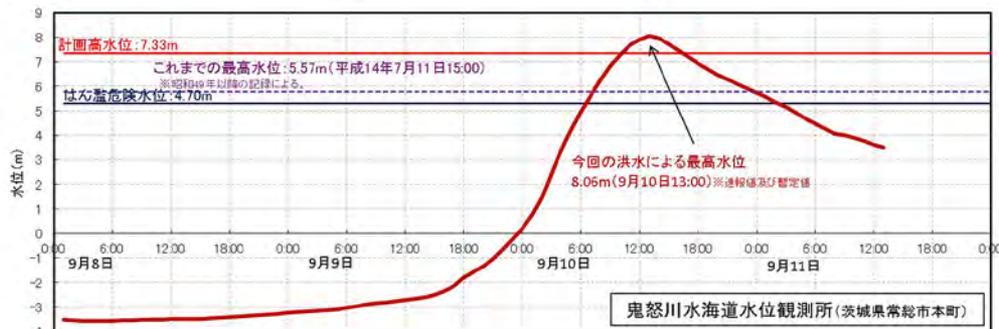
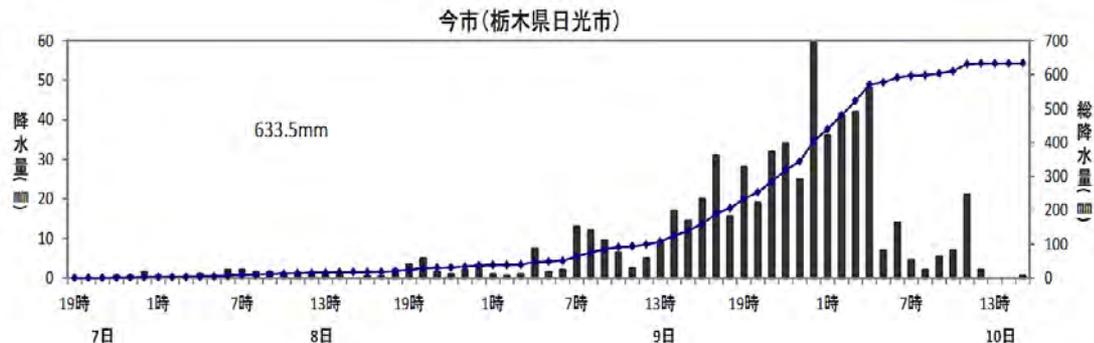
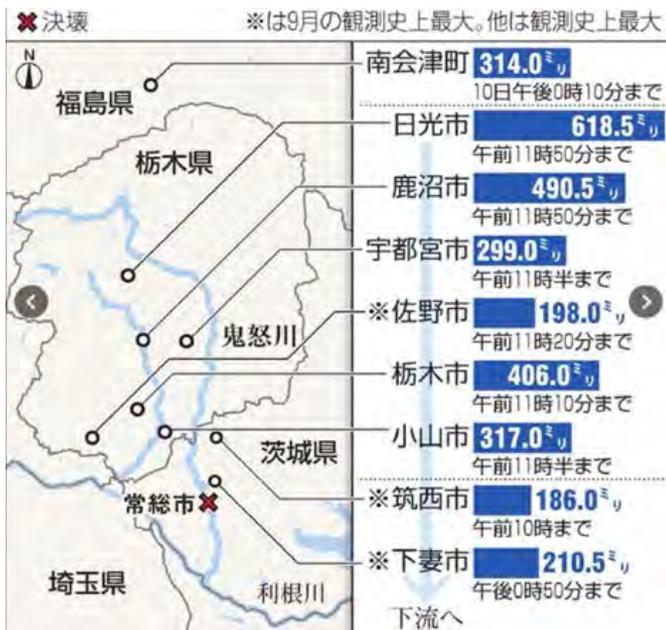
死者:75名。
夜間に土石流が同時多発的に発生。

8月19日11時～20日9時までのAMeDAS
期間降水量

出典:広島地方気象台



2015年関東・東北豪雨(鬼怒川)



48時間積算雨量が最大値が観測された主な地点

- 下流域での特別警報は上流流域よりも遅れた。
- 上流域での豪雨は下流域の洪水となる。



最近の豪雨災害の特徴(1)

- 既往最高の降水量を記録
- 局所的な集中豪雨の発生
- 地下空間の浸水被害の発生



- 中小河川の外水氾濫
- 都市域での内水氾濫
- 土砂災害の多発

- 災害情報の効果的な発信
- 住民の危機意識の低下
- 高齢者等の被災の顕在化
- 避難中, 避難先での被災



- 災害対策基本法の改正
- 特別警報の運用
- 水防法等の一部改正
- 「避難勧告等の判断・伝達マニュアル作成ガイドライン」の見直し



最近の豪雨災害の特徴(2)

- 巨大台風への備えの必要性

ハリケーン・カトリーナ(2005.8, ニューオーリンズ)

ハリケーン・サンディ(2012.10, ニューヨーク)

スーパー台風・ハイエン(2013.11, パラオ, フィリピン等)

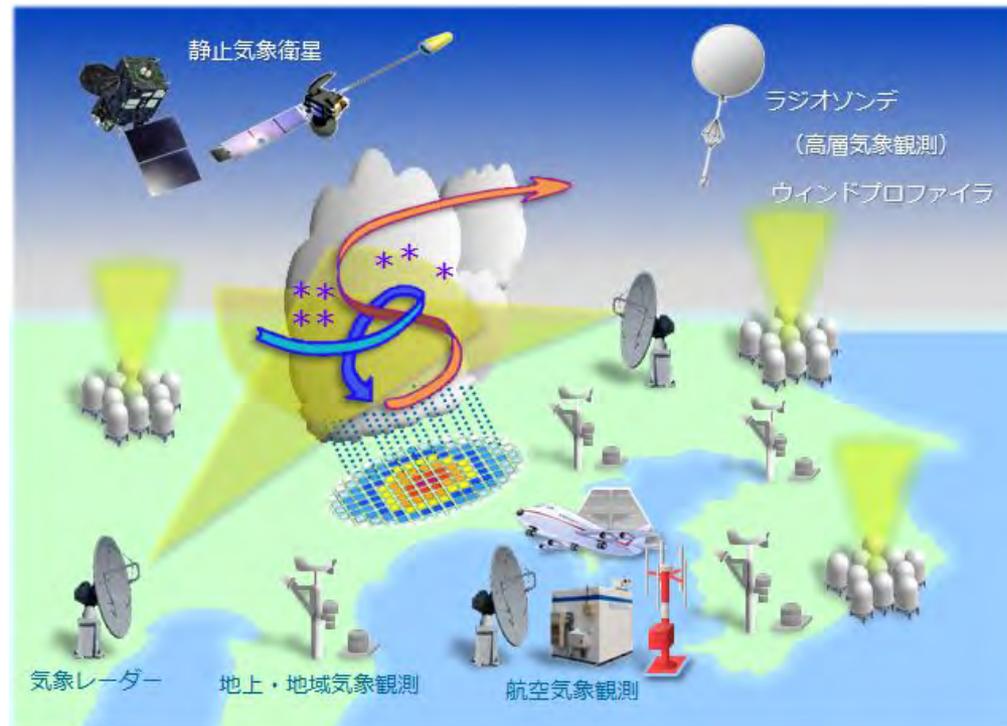
サイクロン・パム(2015.3, バヌアツ)等

「**タイムライン**(時系列の防災行動計画)」

災害が発生することを前提として、対応に従事する関係者間で、「いつ」、「誰が」、「何をするか」を時間軸に沿って整理し、予め合意して文書化。



2. 防災気象情報



気象観測機器

気象観測の三種の神器

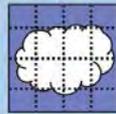
● 静止気象衛星：ひまわり8号

実質的に雲とその表面の観測

● AMeDAS

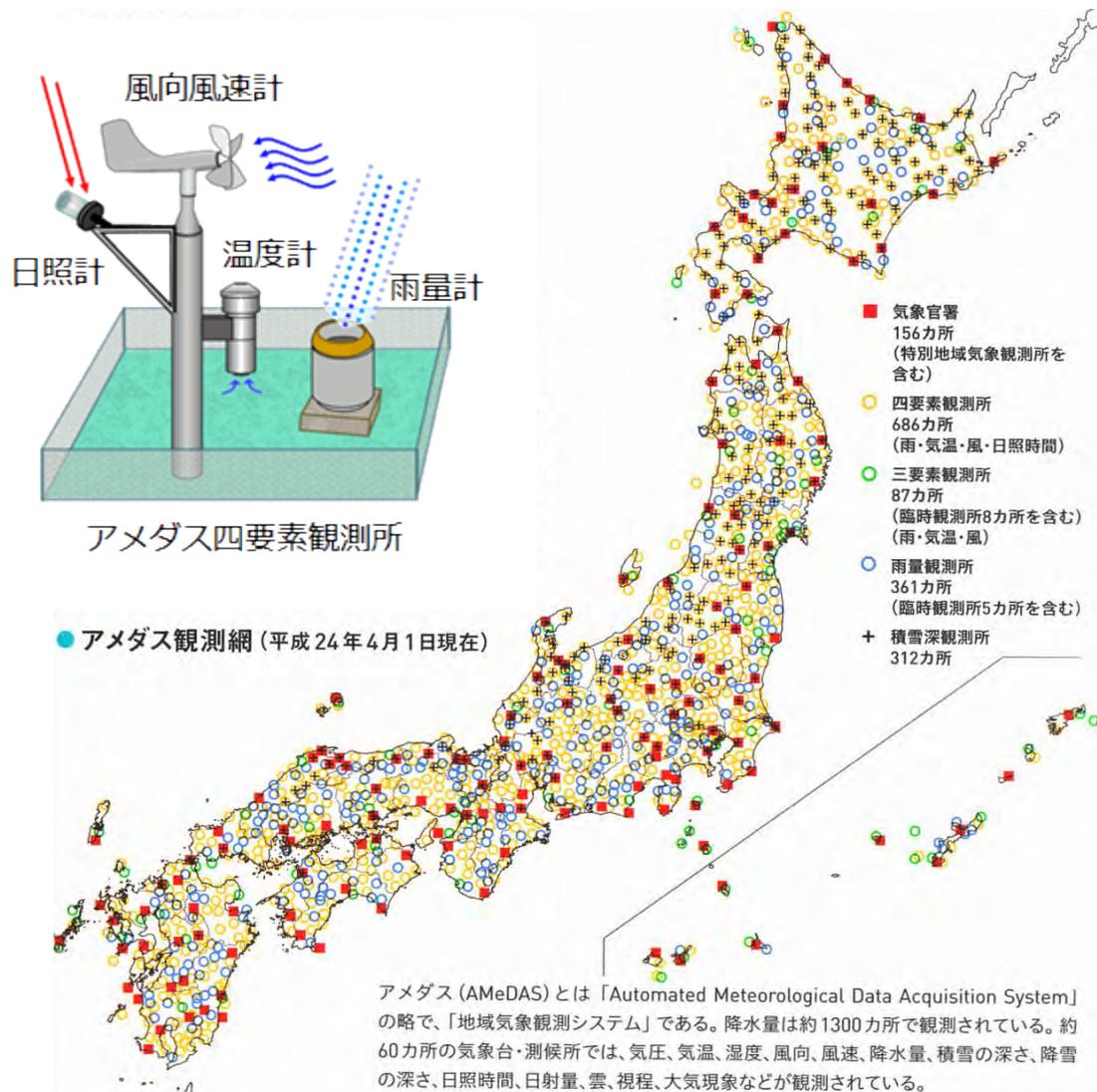
● 気象レーダー

大気中の降水粒子の3次元的な分布

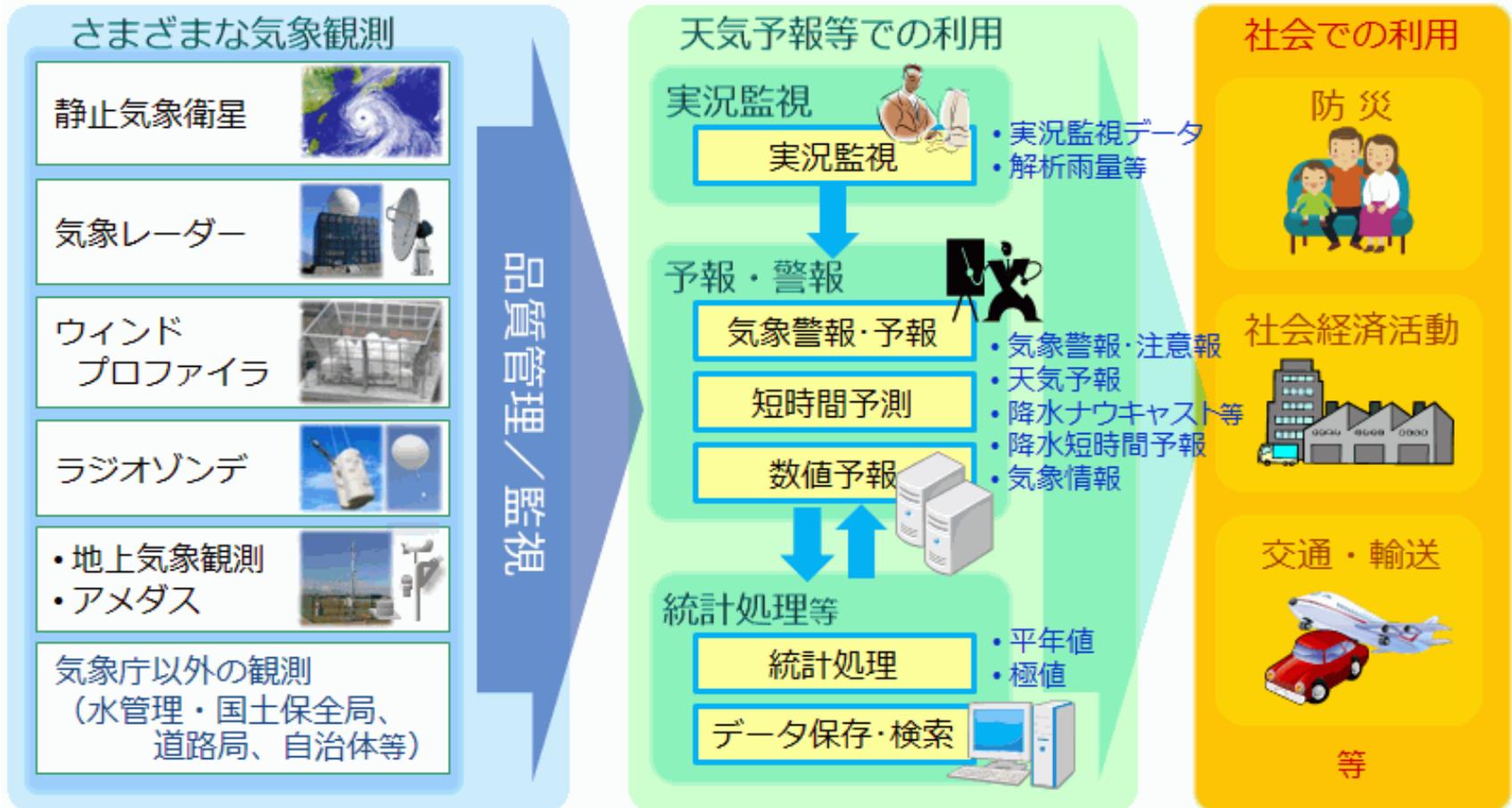
水平分解能 Spatial resolution	バンド(波長帯)数 Spectral bands
可視 (VIS) 0.5 - 1 km 近赤外・赤外 (NIR/IR) 1 - 2 km 	可視 (VIS)  3バンド(3 bands) 合成カラー画像 (True-color composite) 近赤外 (NIR)  3バンド(3 bands) 赤外 (IR)  10バンド(10 bands) 計16バンド (total 16 bands)
観測時間・観測領域 Observational intervals and areas	
 10min. 10min. & 10min.	日本付近を常時2.5分毎 Every 2.5 minutes around Japan



気象観測システム(AMeDAS)



気象観測・予報とデータの配信（気象庁）



災害情報の伝達手段

手段	種類	送信対象	課題
住民向けの 自動配信 (プッシュ型)	防災行政無線	市区町村全域 (分割可能)	戸別受信機の 設置は高価, 普及率が低迷
	緊急速報メール	市区町村全域	配信地域の 細分化が難しい 場合がある
	登録制メール	メール登録者	登録者に限定
住民の意思 で視聴 (プル型)	市町村HP	どこからでも 閲覧可能	関心がなければ 閲覧・聴取しない
	ソーシャル・ネット ワーキング・サービ ス(SNS)		
	コミュニティーFM	放送範囲全域	

出典：読売新聞2015年8月19日



気象警報・注意報（気象庁）

記録的短時間大雨情報：大雨警報発表時に、現在の降雨がその地域にとって災害の発生につながるような、数年に一度しか観測しない雨量であることを知らせる。

特別警報	重大な災害が起こるおそれ著しく大きいとき	大雨, 暴風, 暴風雪, 大雪, 波浪, 高潮
警報	重大な災害が起こるおそれのあるとき	大雨, 洪水, 暴風, 暴風雪, 大雪, 波浪, 高潮
注意報	災害が起こるおそれのあるとき	大雨, 洪水, 強風, 風雪, 大雪, 波浪, 高潮, 雷, 融雪, 濃霧, 乾燥, なだれ, 低温, 霜, 着氷, 着雪



特別警報(気象庁)

特別警報の運用

- 2013年(平成25年)8月30日から開始。
- 府や県程度の広がりを持って、50年の1回レベルの気象状況と判断された場合に、特別警報が発表される。

特別警報の基準(50年に1回程度):

現象の種類	基準	
大雨	台風や集中豪雨により数十年に一度の降雨量となる大雨が予想され、若しくは、数十年に一度の強度の台風や同程度の温帯低気圧により大雨になると予想される場合	
暴風	数十年に一度の強度の台風や同程度の温帯低気圧により	暴風が吹くと予想される場合
高潮		高潮になると予想される場合
波浪		高波になると予想される場合
暴風雪	数十年に一度の強度の台風と同程度の温帯低気圧により雪を伴う暴風が吹くと予想される場合	
大雪	数十年に一度の降雪量となる大雪が予想される場合	



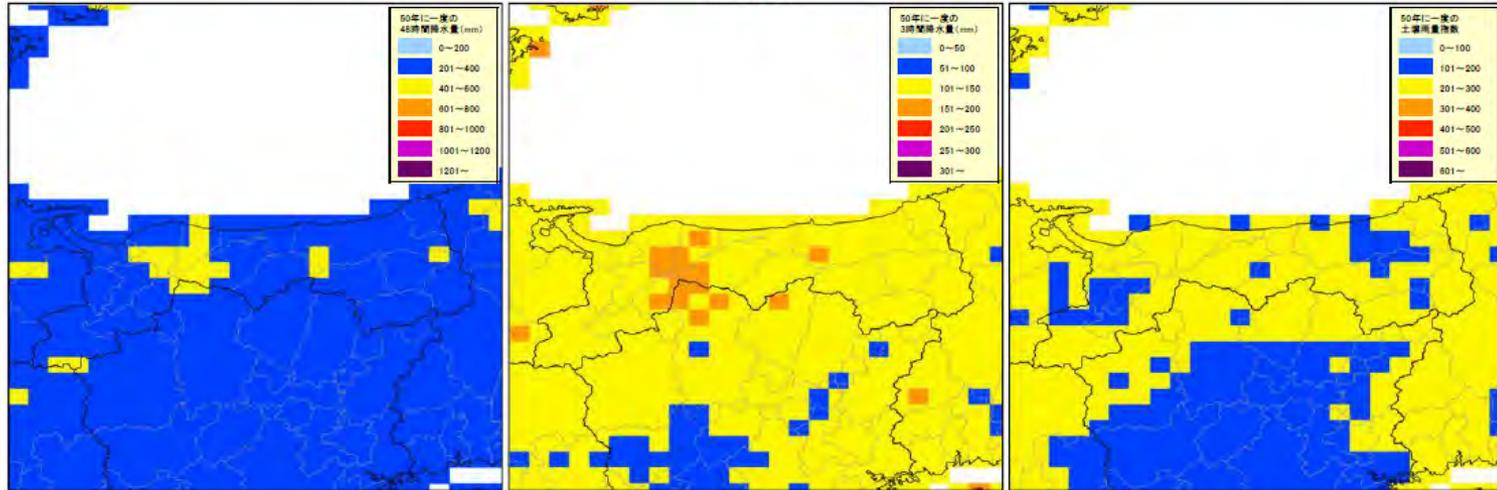
50年に1回の降水量(鳥取県, 島根県)

50年に一度の48時間降水量

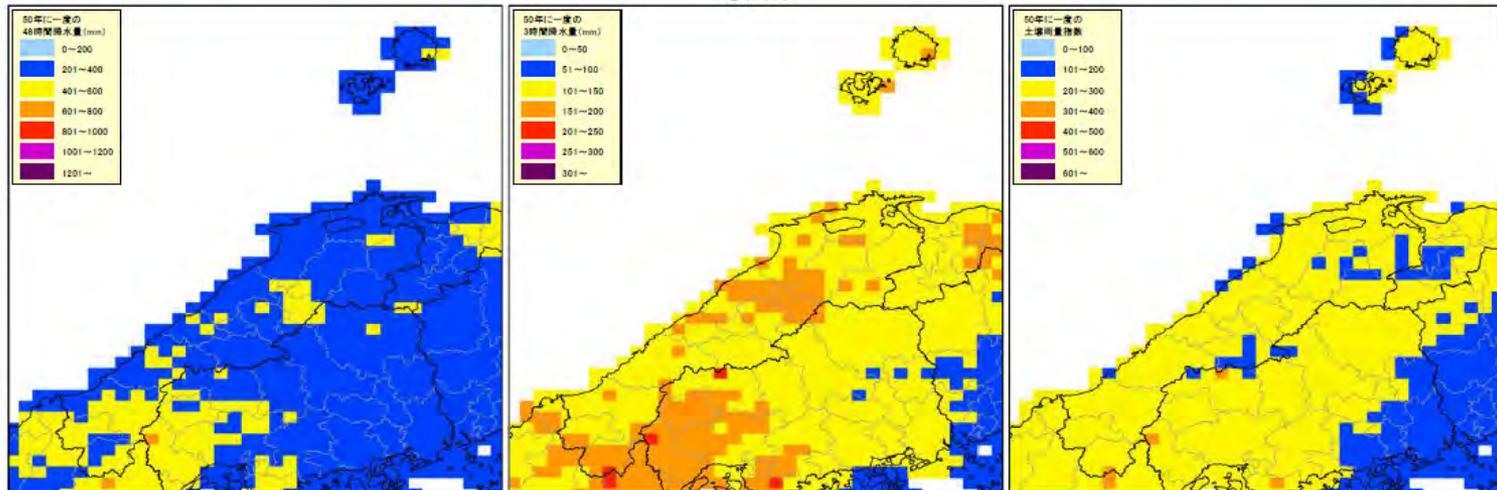
50年に一度の3時間降水量

50年に一度の土壌雨量指数

鳥取県



島根県



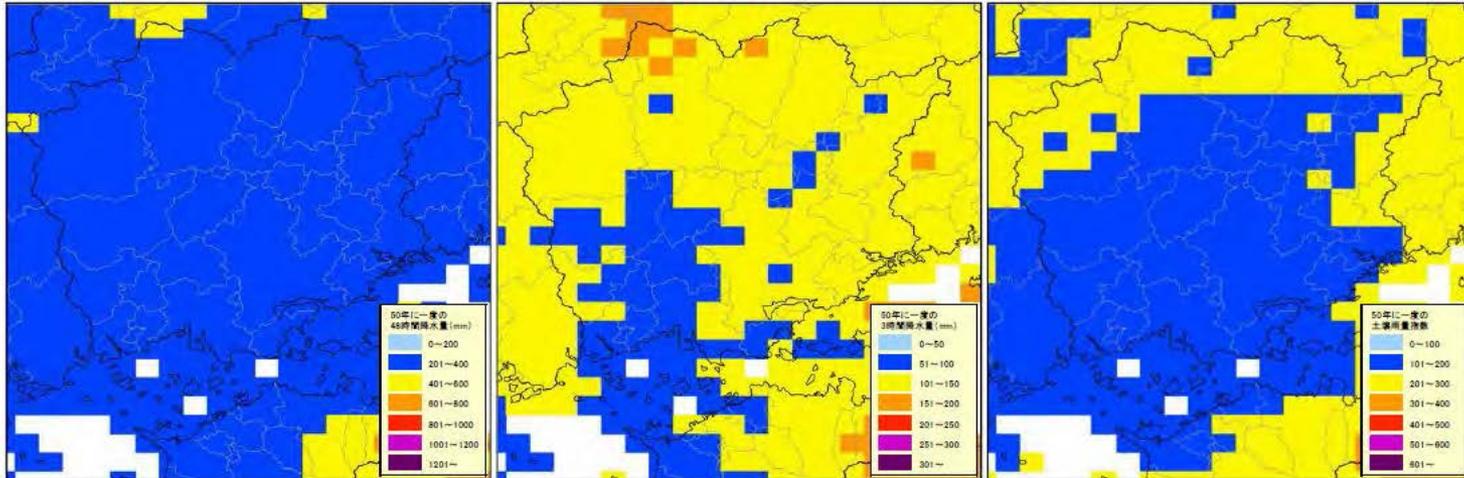
50年に1回の降水量(岡山県, 広島県)

50年に一度の48時間降水量

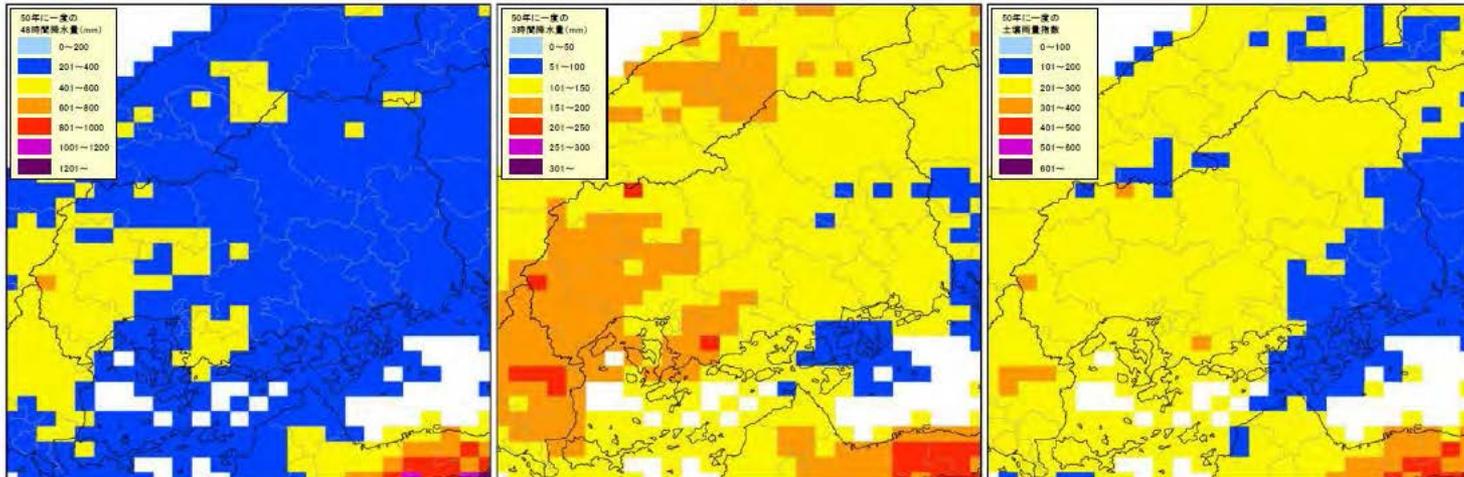
50年に一度の3時間降水量

50年に一度の土壌雨量指数

岡山県



広島県



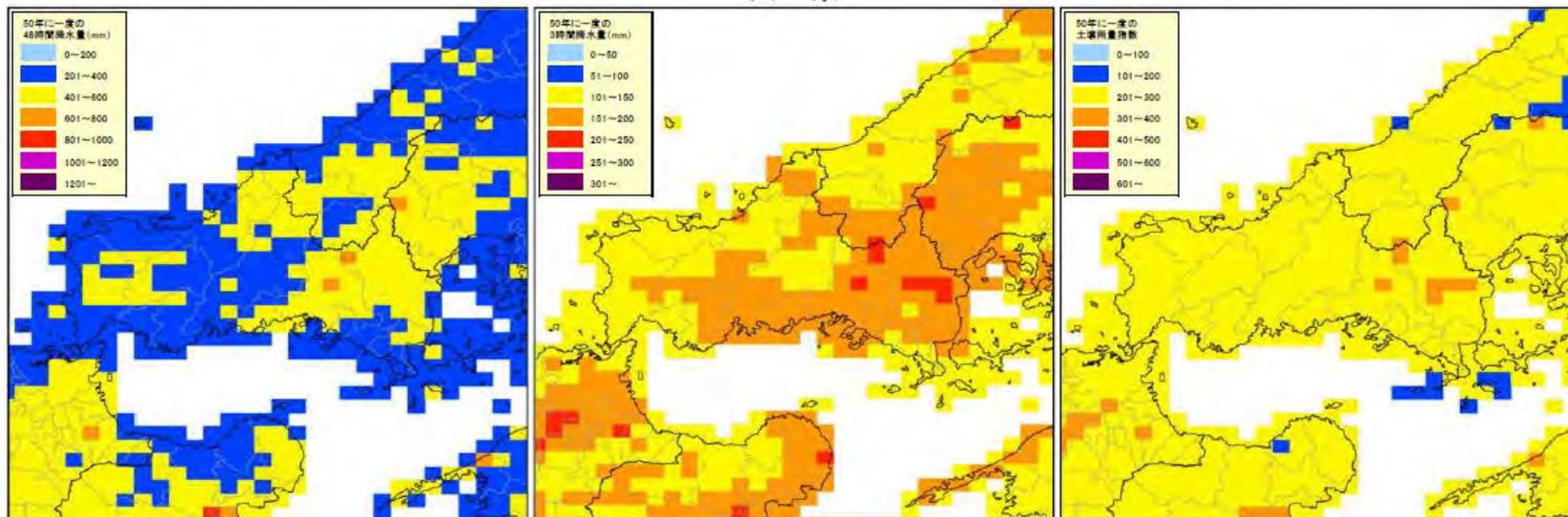
50年に1回の降水量(山口県)

50年に一度の48時間降水量

50年に一度の3時間降水量

50年に一度の土壌雨量指数

山口県



避難情報の種類と内容

種類	拘束力	内容	住民に要請すること
避難指示	強	被害の危険が切迫したときに発せられるもので、「避難勧告」よりも拘束力が強い。	避難していない人に、ただちに避難行動に移ること、避難行動をとる時間的余裕がない人には生命を守る最低限の行動をとることを要請。
避難勧告	中	居住者に立ち退きを勧め促す。強制力はない。	避難場所への避難することを要請。
避難準備情報	弱	事態の推移によっては避難勧告や避難指示を行うことが予想されるため、避難の準備を呼びかけるもの。	要援護者は、避難場所への避難を開始することを要請。 要援護者以外の人、家族等への連絡、非常用持出品の用意等、避難準備を開始することを要請。

早期避難情報、予防的避難情報を設けている自治体もある。

- 特別警報が発令されたとき、すでに危険な状態に至っている可能性が高く、今置かれている環境の中で「できるかぎり安全を確保する」ことが必要。
- 警報や勧告・指示が発表された段階から、早めに安全な場所に避難しておく。
- 「まだ特別警報じゃないから大丈夫」という誤解は非常に危険。



特別情報の課題

- 大雨警報は住民の気象情報への注意を促すが、具体的な安全確保行動をとる(家の中でできるだけ安全な場所で待避する, 避難所に避難する等)ことには結びついていない。
- 2013年10月の台風第26号による伊豆大島豪雨災害では特別警報が発令されなかった。島嶼部では「府県程度の広がり」の条件を満たさないことが多い。

➡ 該当する市町村に気象台からホットラインで緊急で通報。

- 2014年7月の台風第8号では「台風等の強度による指標」をもとにして特別警報が発表されたが、その警報の解除後に「雨による指標」に基づき再度特別警報を発令。基準に「予想」と「実況解析」が混在している。
- 特別警報「解除」(警報に「切替」と聞くと「もう大丈夫」と勝手に判断しかねない。

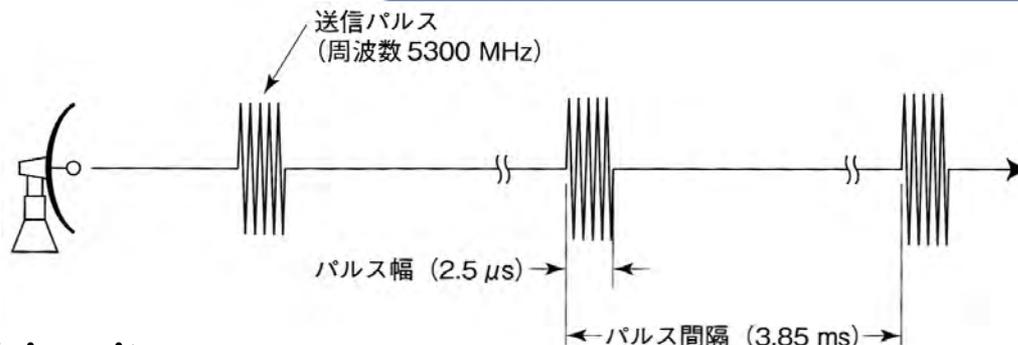
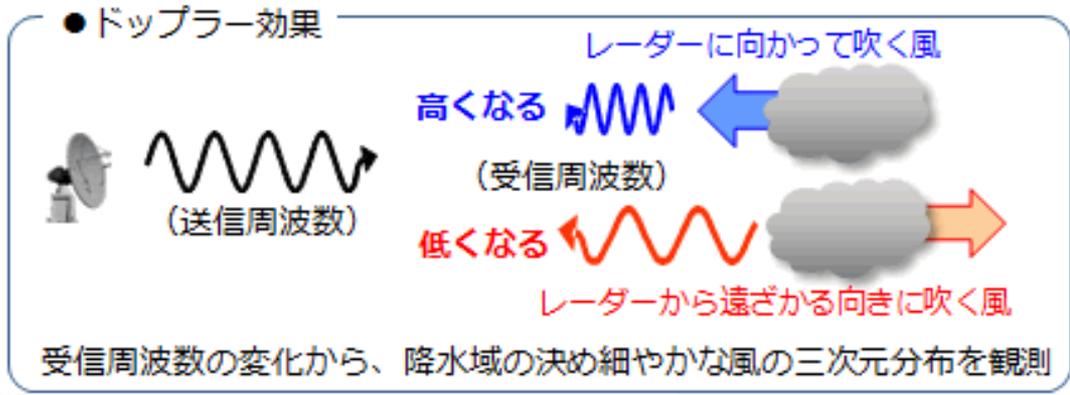
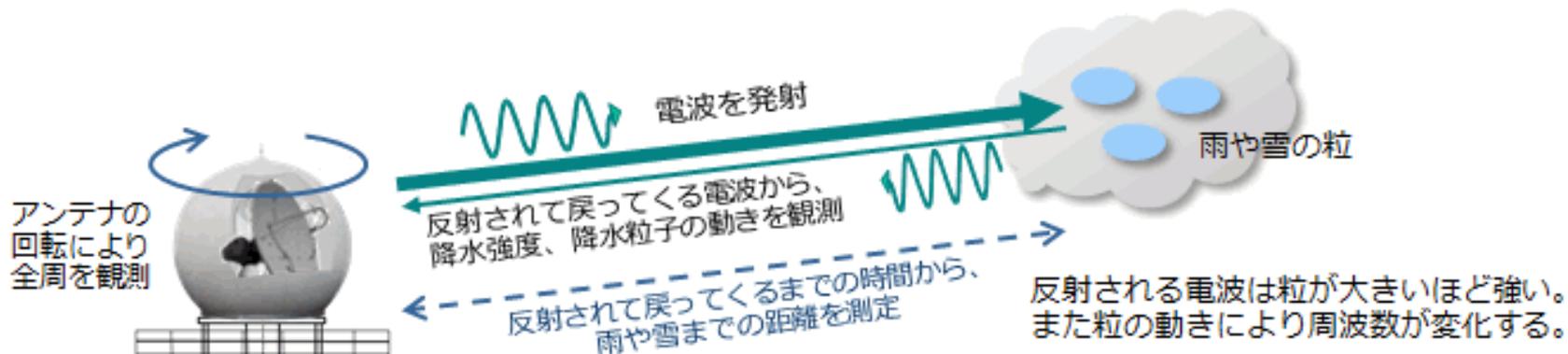


3. 気象レーダーとは

- Cバンドレーダー
- XバンドMPレーダー
- XRAIN



気象レーダーの概要



電磁波の周波数と気象レーダー



Sバンド:
波長: 10cm

Cバンド:
波長: 5cm

Xバンド:
波長: 3cm

気象レーダー

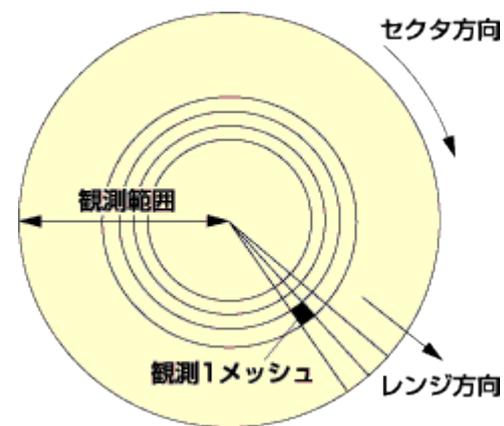
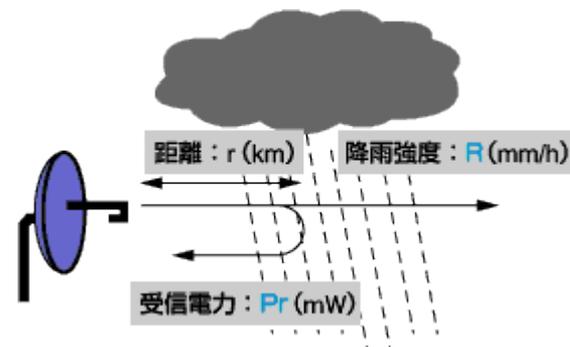
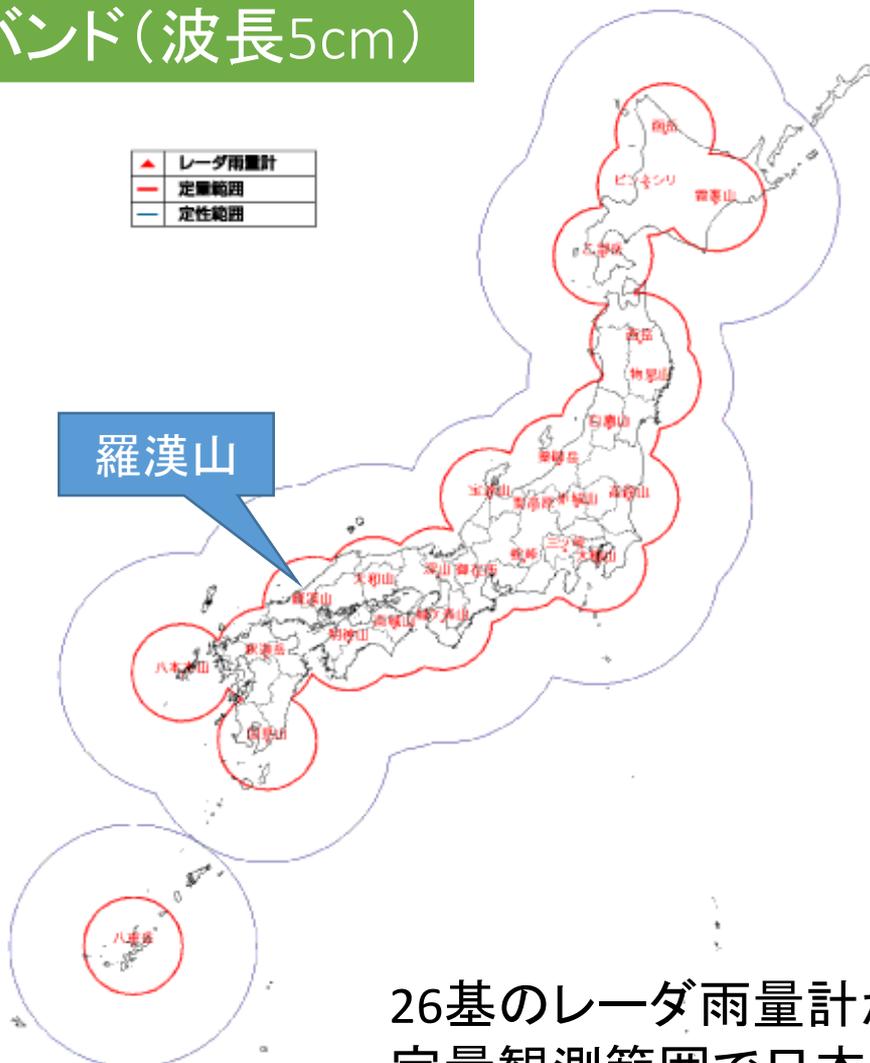
マイクロ波を利用して大気中の水滴や氷晶など水の粒子の集団を観測する測器。



国土交通省のCバンドレーダー

Cバンド(波長5cm)

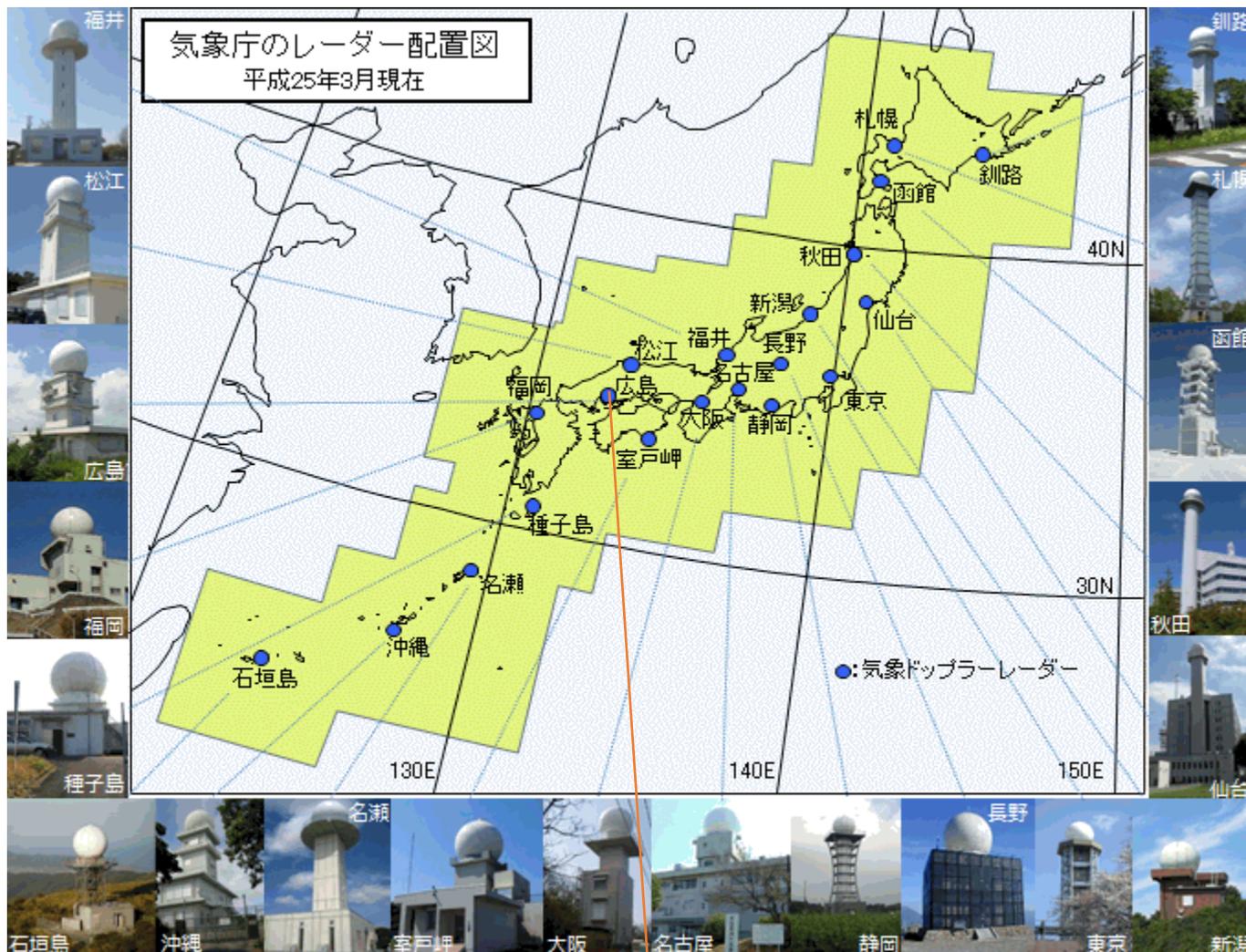
▲	レーダ雨量計
— (赤)	定量観測圏
— (青)	定性観測圏



26基のレーダ雨量計が全国に配置され、半径120kmの定量観測範囲で日本全土を覆っている。

気象庁のCバンドレーダー

Cバンド(波長5cm)



広島県呉市(灰ヶ峯)



単偏波レーダーの降水量の算定(1)

雨滴の直径: $D < 0.8 \text{ cm}$, レーダーの波長: $\lambda = 3 \text{ cm}$

➡ $D \ll \lambda$ レーリー散乱

レーダー方程式

$$P_r = \frac{\pi^3 P_t g^2 \ell^2 \theta^2 c \tau}{2^{10} (\ln 2) \lambda^2 r^2} \left| \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2} \right|^2 Z$$

➡ $P_r \Rightarrow Z$

P_r : 受信電力, P_t : 送信電力, g : アンテナ利得

ℓ : 大気による減衰, θ : ビーム半値幅

c : 光速度, τ : パルス幅, λ : 波長

r : レーダーから雨滴までの距離

ϵ : 複素誘電率

Z : レーダー反射因子

受信電力は送信電力に比例する。

受信電力はレーダーから雨滴までの距離 r の2乗に反比例する。

受信電力は発信するパルス波のパルス幅 τ に比例する。

受信電力はレーダー反射因子 Z に比例する。

受信電力は電磁波の波長 λ が短いほど大きくなる。

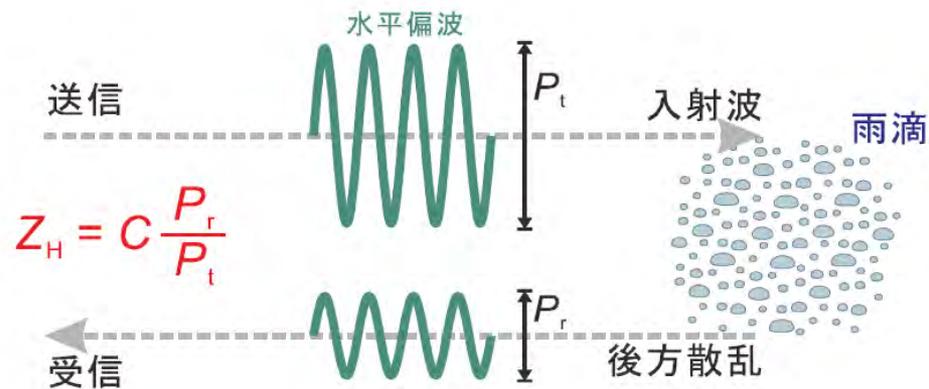
ただし、波長が短くなると電磁波が減衰される効果が大きくなる。

単偏波レーダーの降水量の算定(2)

レーダー反射因子Z

仮定: 雨滴は完全な球形,
空間にランダムに分布

$$Z = \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} N(D) D^6 dD$$



降水強度R

$$R = \frac{4}{3} \pi \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} \left(\frac{D}{2} \right)^3 \cdot N(D) \cdot V_f(D) dD$$

$V_f(D)$: 粒径Dの雨滴の落下速度

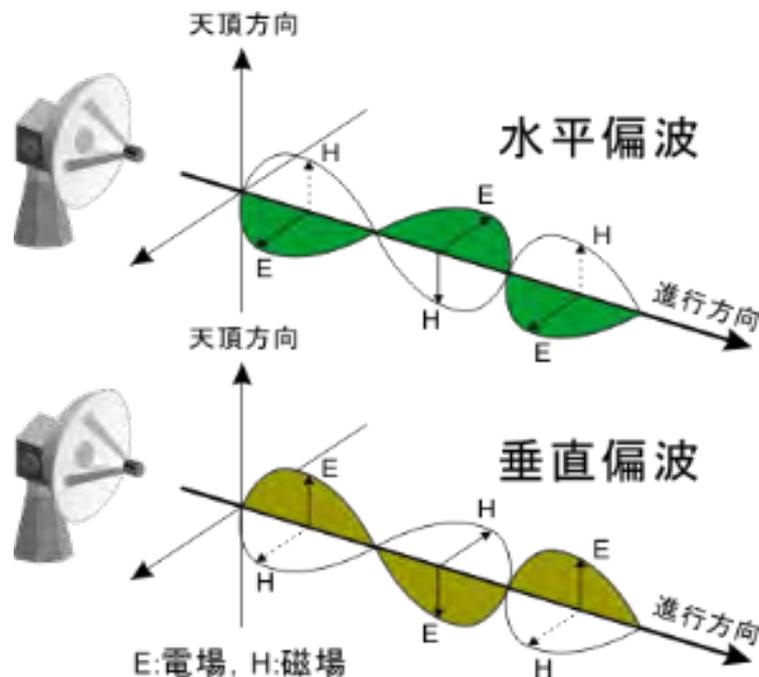
粒径分布 $N(D)$: Γ 分布, 降雨毎に変動。

→ $Z = BR^\beta$ B, β は降水ごとに変化
($B \approx 80-1000, \beta \approx 1-2$)

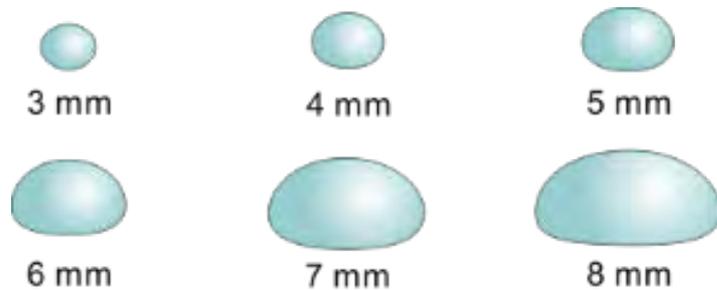
マルチパラメータ(MP)レーダー(1)

MPLレーダーでは水平偏波(電場が水平方向に振動する電波)と垂直偏波の2種類の電波を同時に送信・受信する。そのため、**二重偏波レーダー**とも呼ばれる。

従来の気象レーダーは水平偏波のみを用いて観測する。



マルチパラメータ(MP)レーダー(2)



雨滴の形状(真横からみた形)

大気中の雨滴はつぶれた形をしているため、水平偏波での観測と垂直偏波での観測に差が生じる。大きな雨粒の多い雨の場合、水平偏波の受信電力の方が垂直偏波の受信電力に比べて大きくなる。

電波が降雨中を通過するとき、その伝搬速度は降雨のない大気中を通過する場合に比べてわずかに遅くなる。この場合、水平偏波の方が垂直偏波に比べてその伝搬速度は遅くなる。そして、この遅れは大きな雨粒が多く含まれる強い雨ほど大きくなる。水平偏波と垂直偏波の遅れの差を電波の位相差(偏波間位相差 Φ_{DP})として検出する。そして、比偏波間位相差(あるいは偏波間位相差変化率)を算出する。

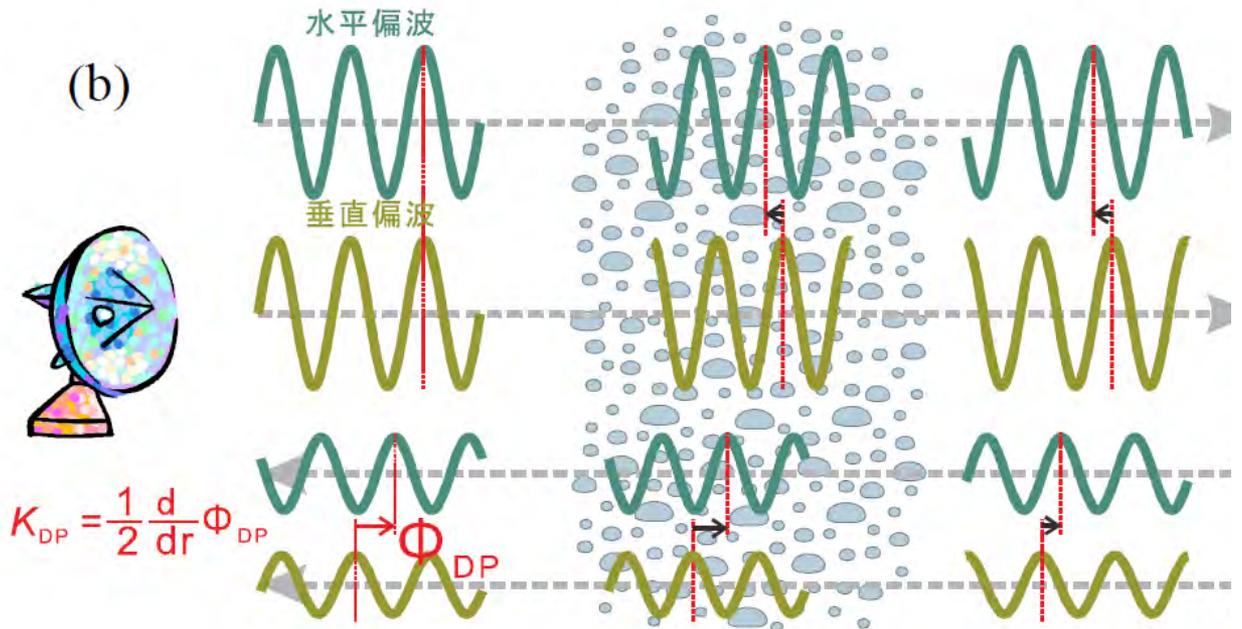
マルチパラメータ(MP)レーダーでの降水量の算定

比偏波間位相差と降雨強度との対応関係が，雨滴粒径分布の影響を受けにくい。また，降雨減衰の影響を受けにくい。

このため，雨量計による補正を必要とせず，気象レーダーが本来持つ一瞬にして広範囲の雨を捉える利点が活かせる。

$$K_{DP} = \frac{1}{2} \frac{d\Phi_{DP}}{dr}$$

$K_{DP} \sim R$ 方式



国土交通省のXRAIN(1)

XRAIN : X-band polarimetric (multi parameter) RAdar Information Network

1. 高い分解能

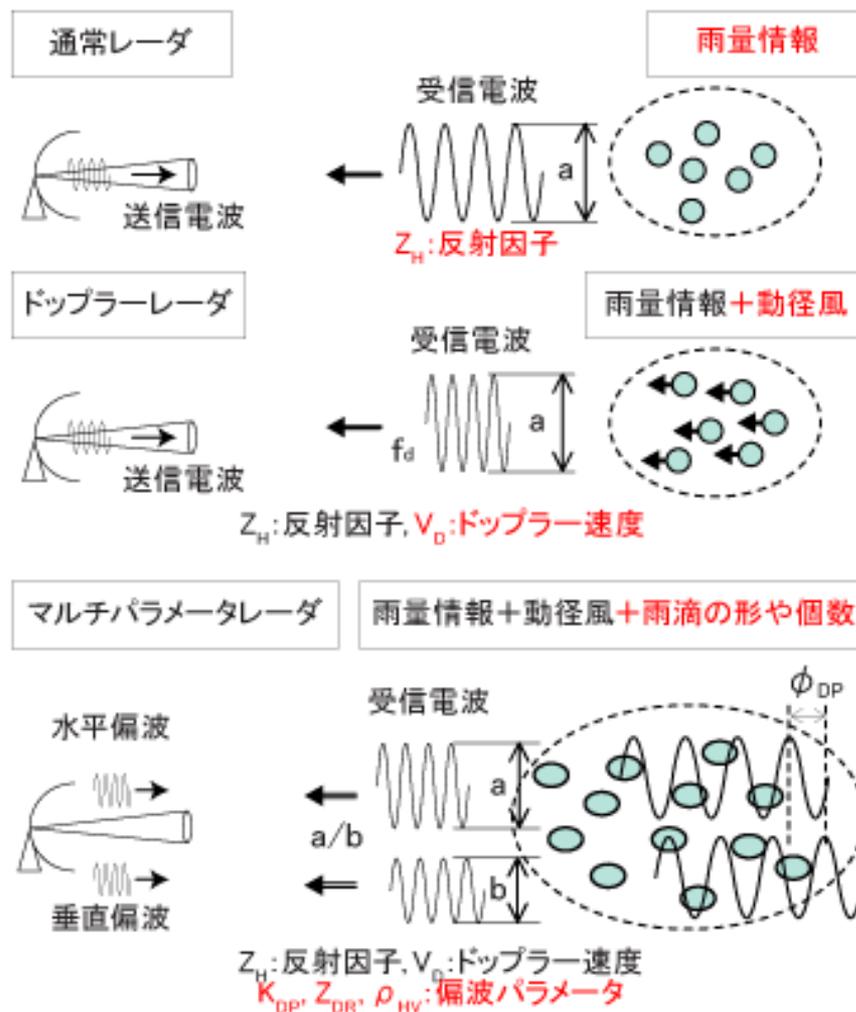
250m解像度。

2. 高いリアルタイム性

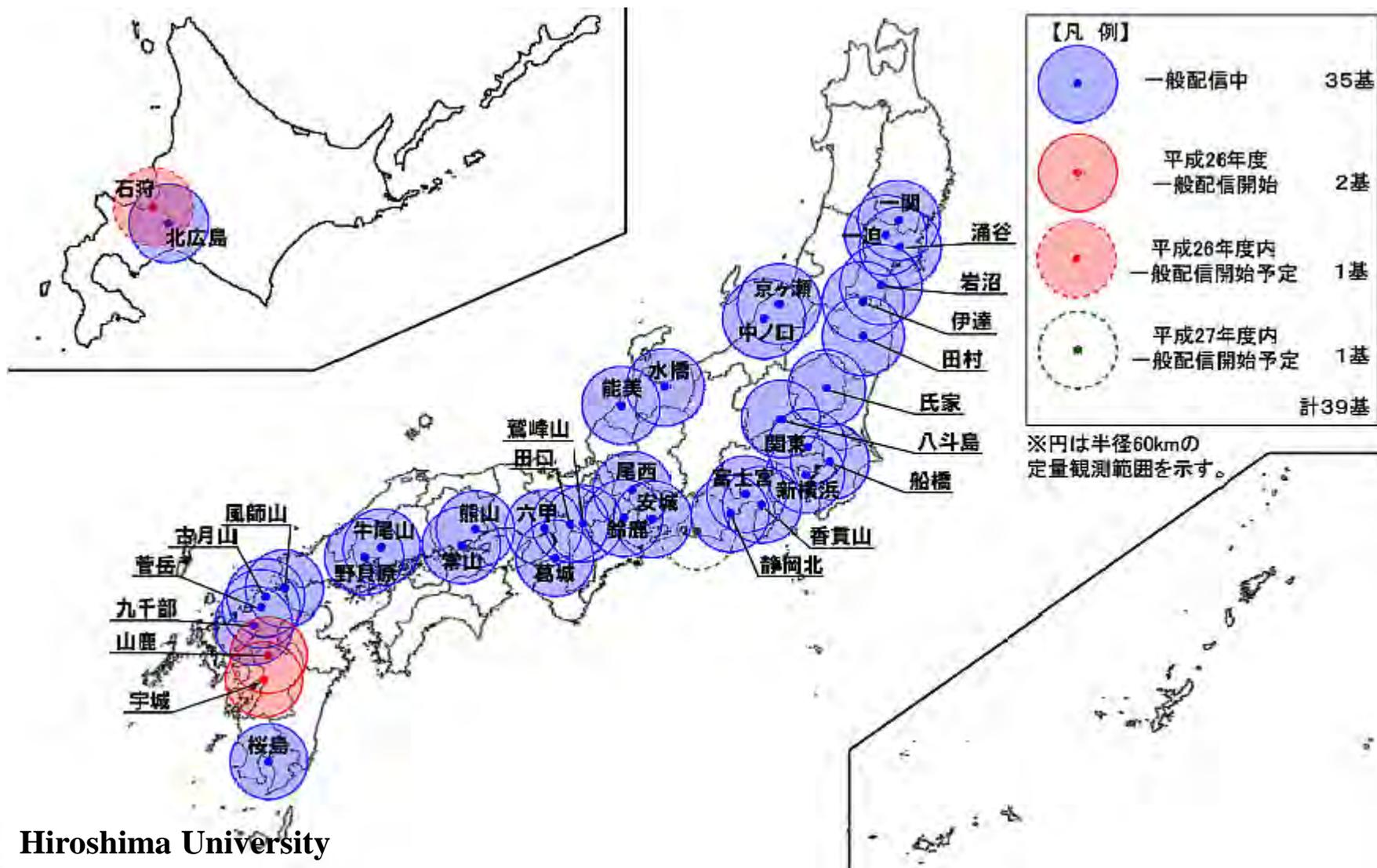
雨滴の形状を計測。

3. 風の観測も可能

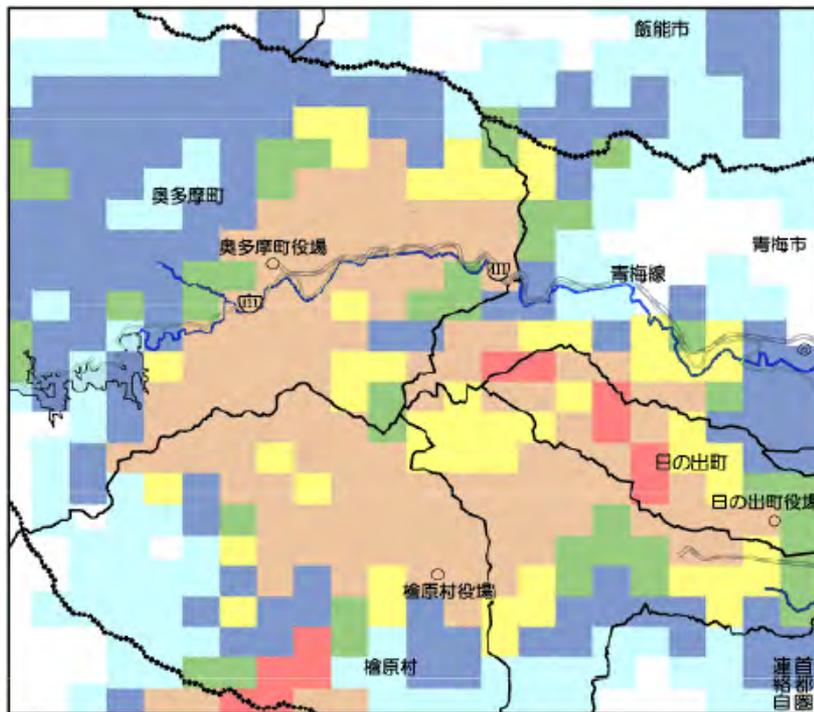
ドップラー機能により、雨滴の移動速度を計測することが可能。



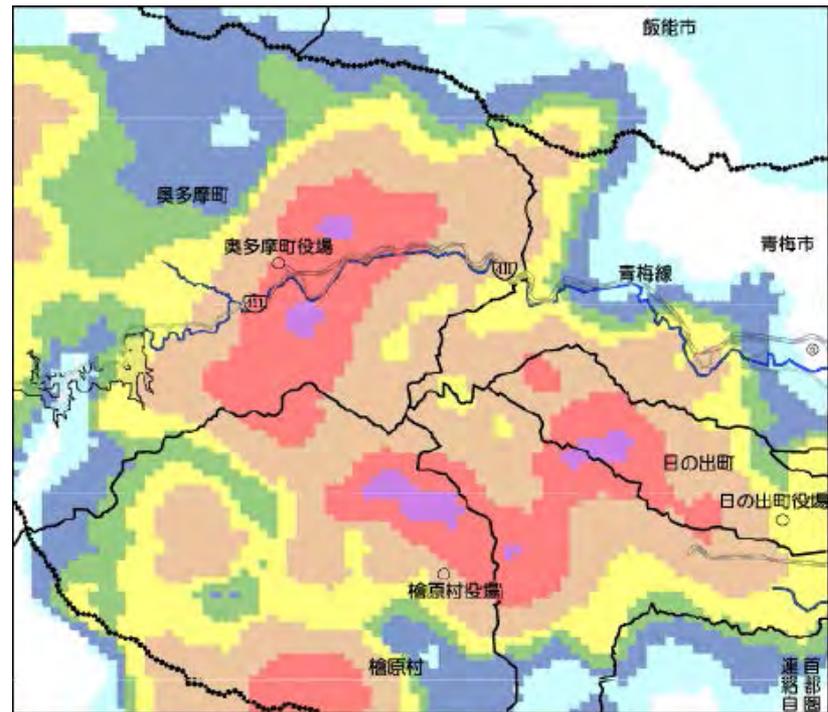
国土交通省のXRAIN(2)



XバンドMPLレーダーの特徴 (1)



Cバンドレーダ
空間分解能: 1 km×1 km
観測・配信時間: 5+5分



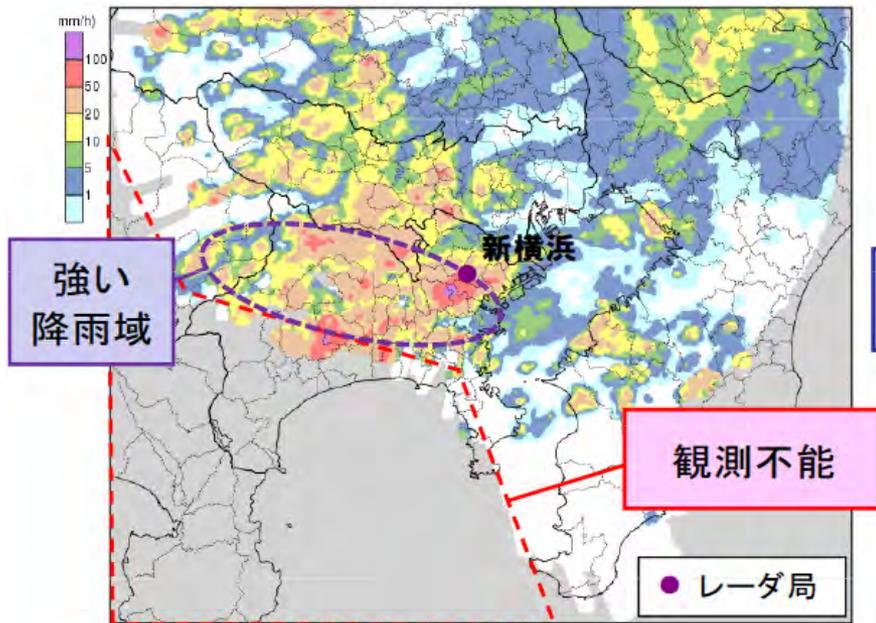
XバンドMPLレーダ
空間分解能: 250 m×250 m
観測・配信時間: 1+1分

高解像度ナウキャストに活用

XバンドMPLレーダーの特徴 (2)

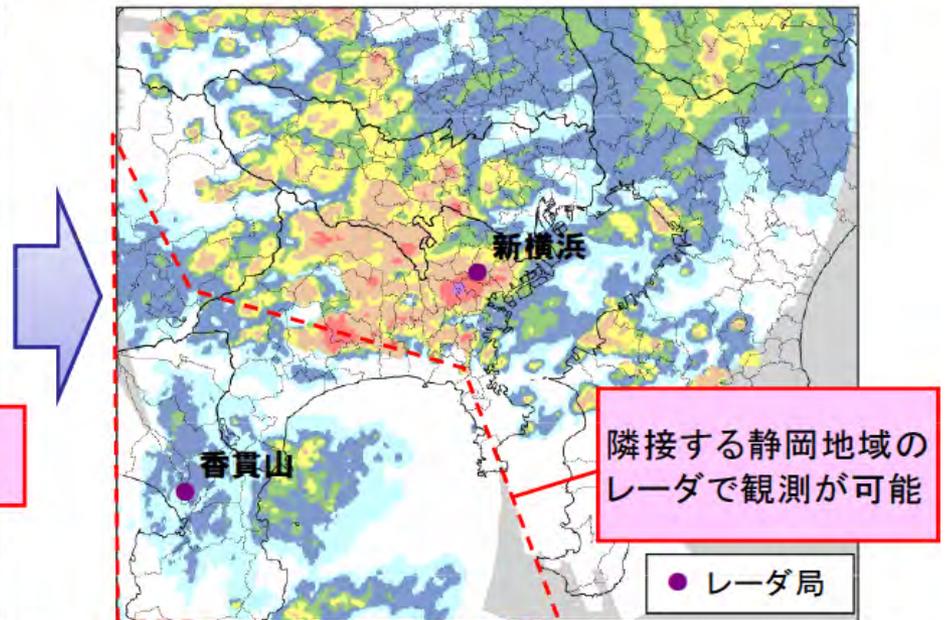
関東地域(平成23年8月19日の降雨)における観測事例

関東地域のレーダーのみによる観測



新横浜局からの観測では強い降雨域の後方が観測不能

関東地域と静岡地域のレーダーを組み合わせた観測



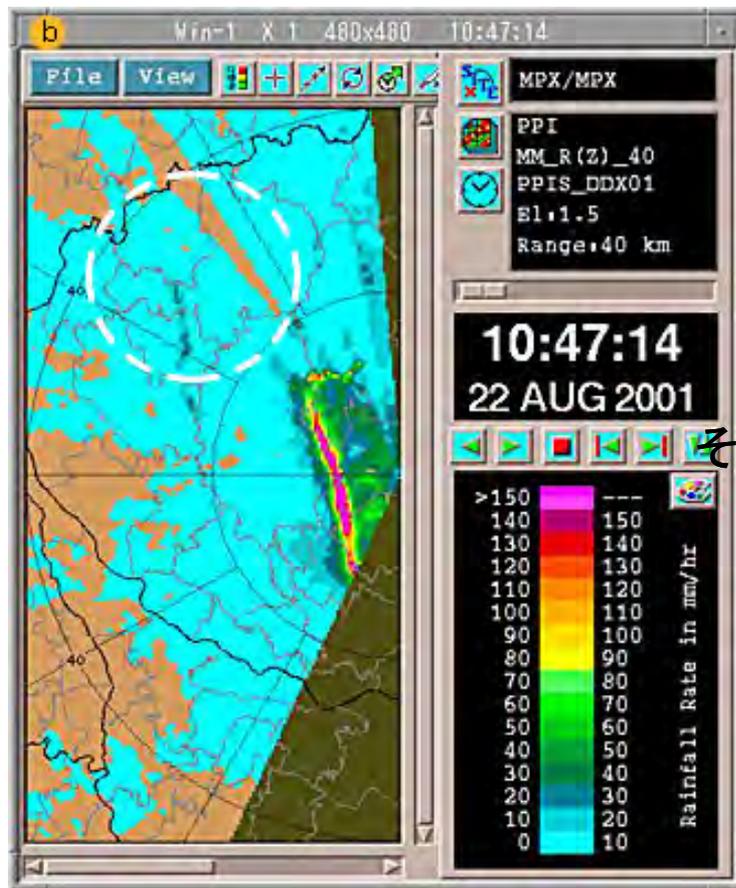
複数基で観測することにより、観測不能領域が解消

XバンドMPLレーダーは非常に強い降雨域の後方において、電波が減衰・消散してしまう。

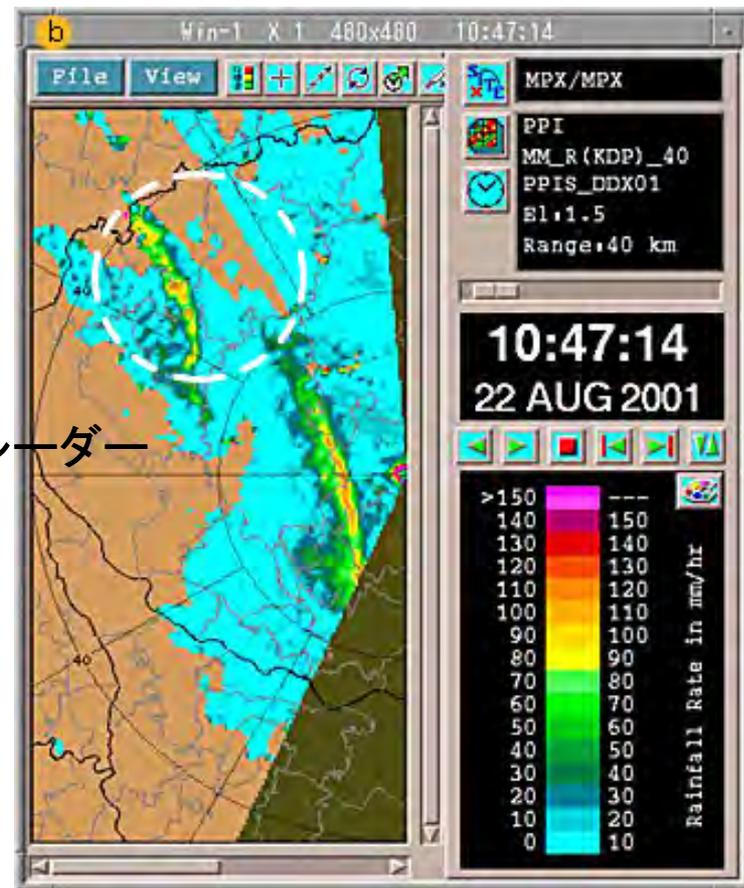
→ XバンドMPLレーダーを複数基設置することにより、この観測不能域を補う。



XバンドMPLレーダーの特徴 (3)



従来の手法



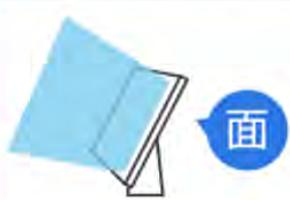
新しい手法

偏波間位相差を使用した降雨強度の推定

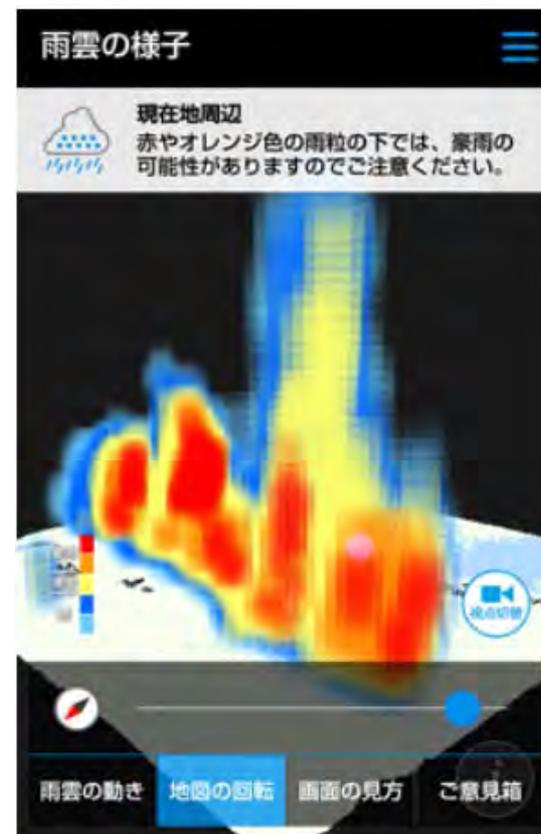
そらレーダー



フェーズドアレイ気象レーダー

3Dの観測での比較		
レーダーの種類	フェーズドアレイ 気象レーダー	従来型レーダー (MPレーダー)
探知範囲	 面	 線
観測時間	30秒	5分
観測精度	広い	狭い

実証実験期間	2015年7月21日(火)～2015年10月30日(金)
対象地域	大阪府吹田市を中心とする80 km×80 km 領域 (大阪府、兵庫県、京都府、奈良県、それぞれの該当地域)
対象端末	Android 4.4以上推奨 (WebGL非対応端末一部あり) iOS 8以上推奨、Apple Watch (ポップアップ表示のみ) ※
課金額	無料
アクセス方法	Google Play、App Storeで『3D雨雲ウォッチ』で検索 又は http://pawr.life-ranger.jp にアクセス

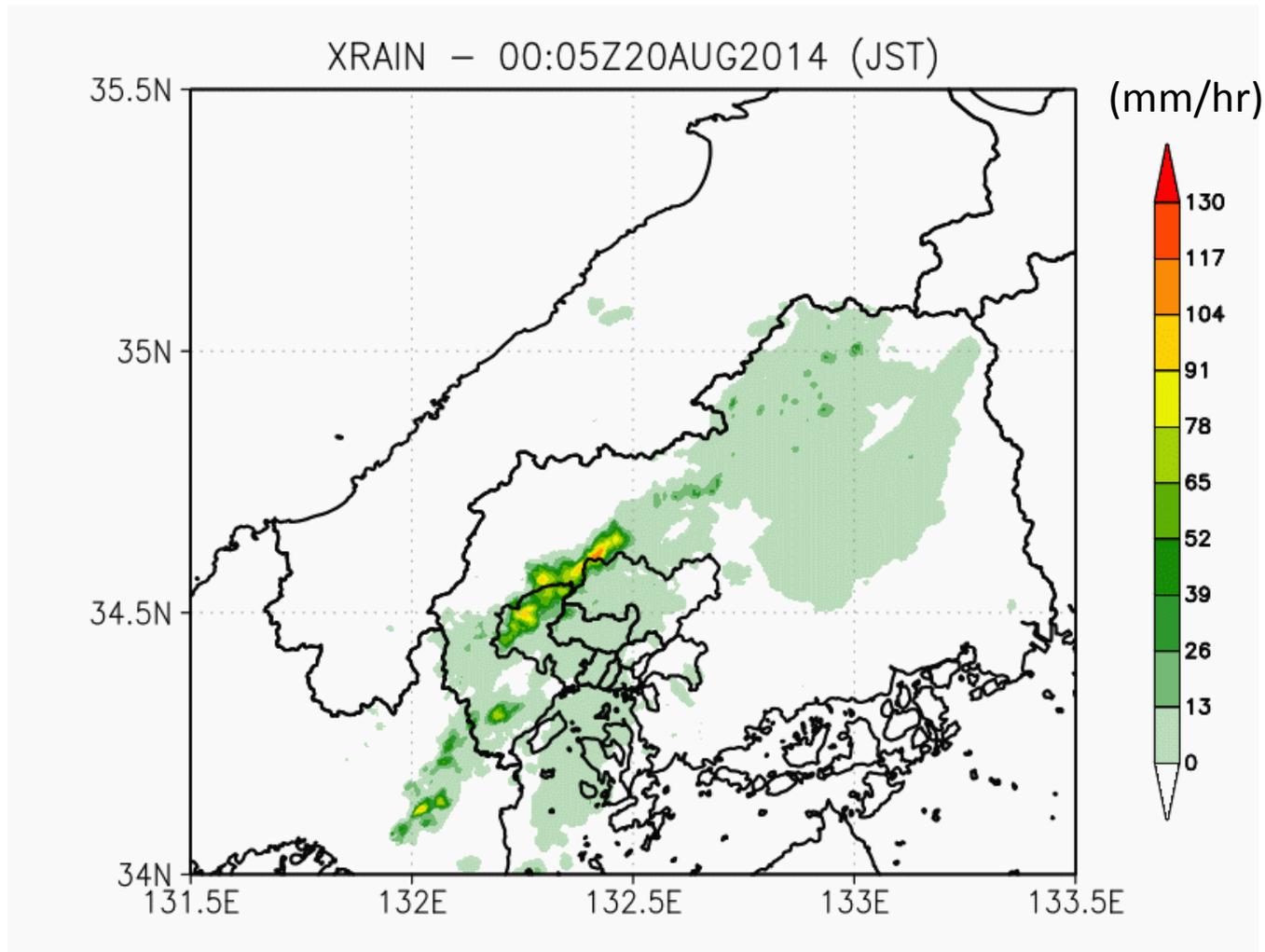


3D降雨分布のアニメーション表示と現在地における上空の雨雲の目安(過去10分間の雨雲の動画再生、地図の回転、視点の切替えが可能)

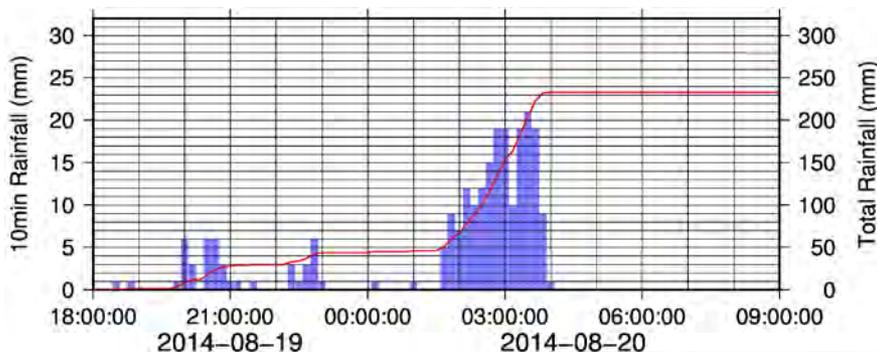


4. 気象レーダーから見た 平成26年8月広島豪雨

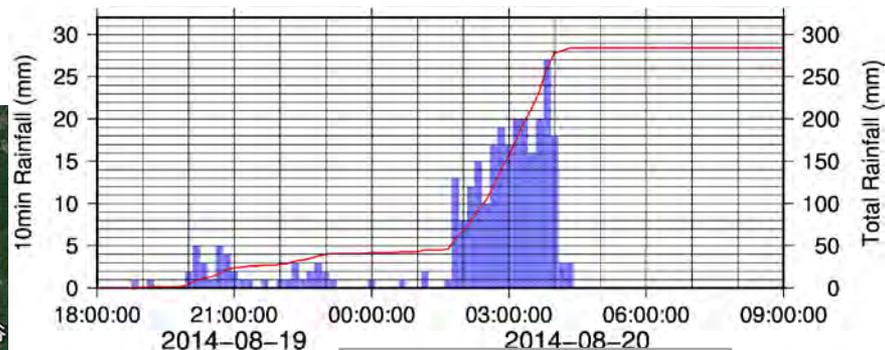
XRAINによる降水の変化



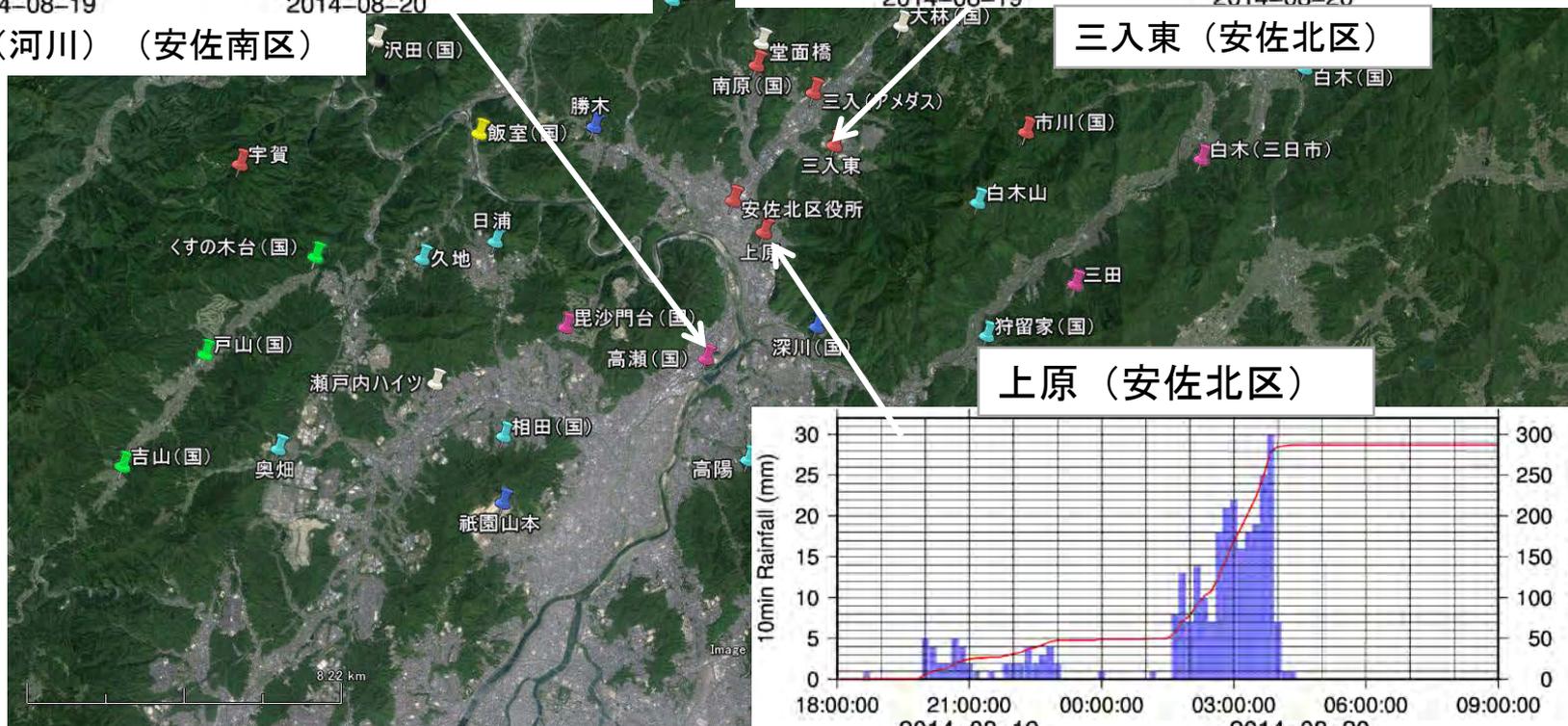
地上での降水量の時間的な変化



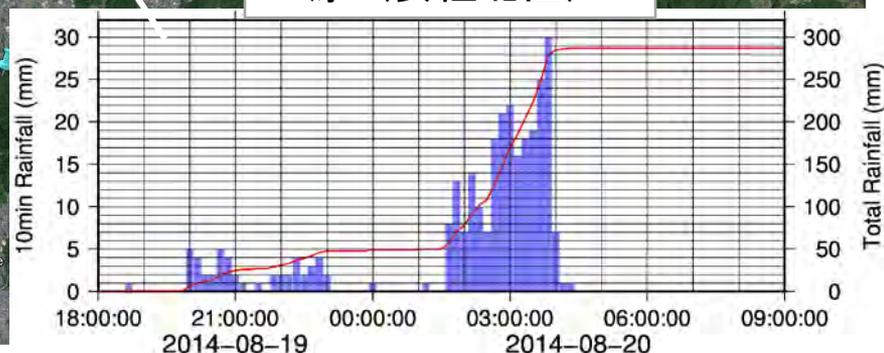
高瀬（河川）（安佐南区）



三入東（安佐北区）



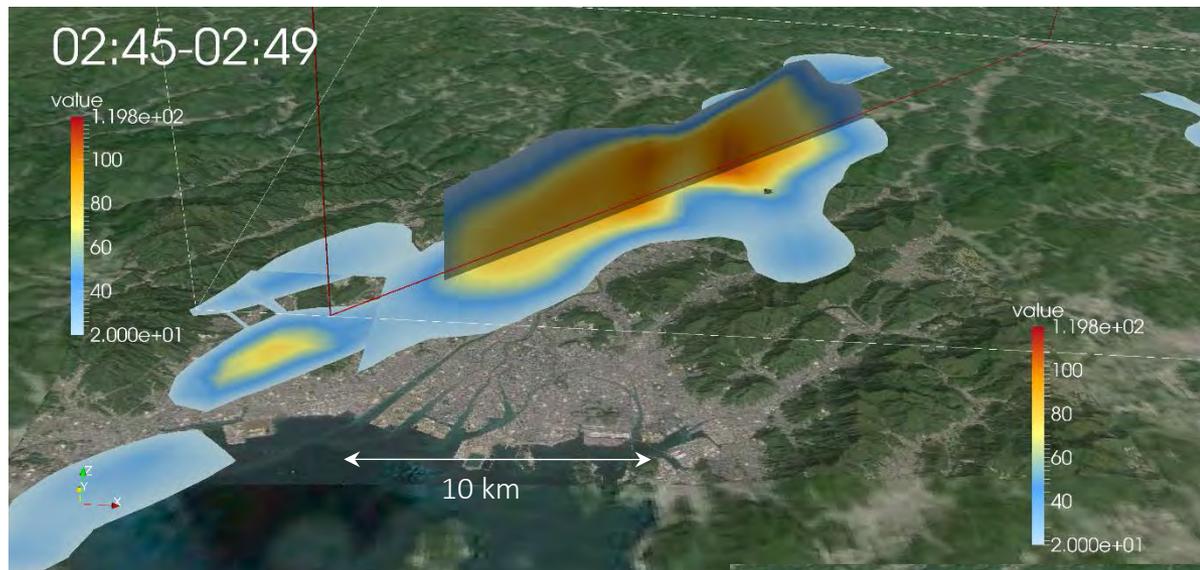
上原（安佐北区）



作成：田中健路先生

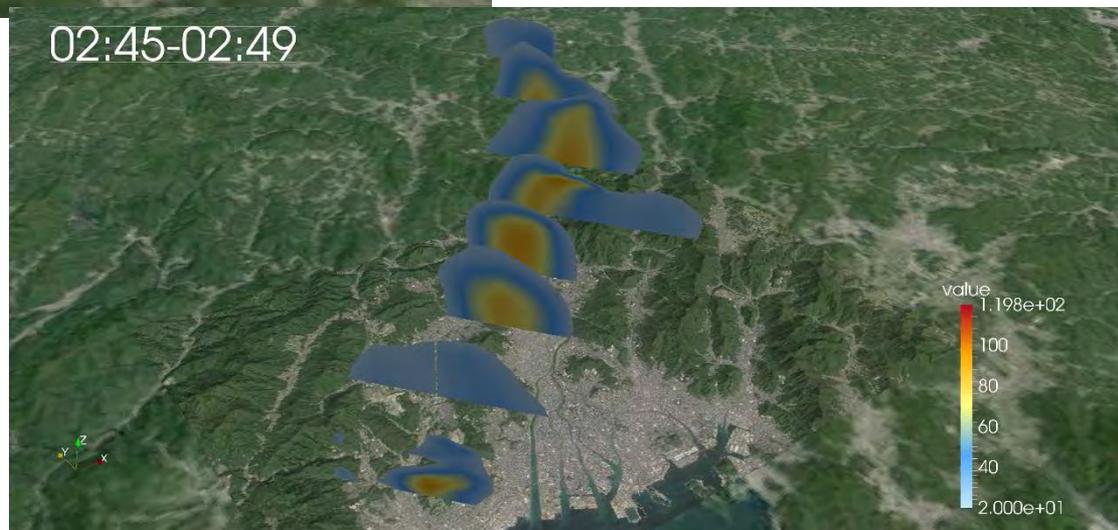


XRAIN降雨データからみた線状降水帯



高度800 m面での降水量20 mm/h以上の平面分布

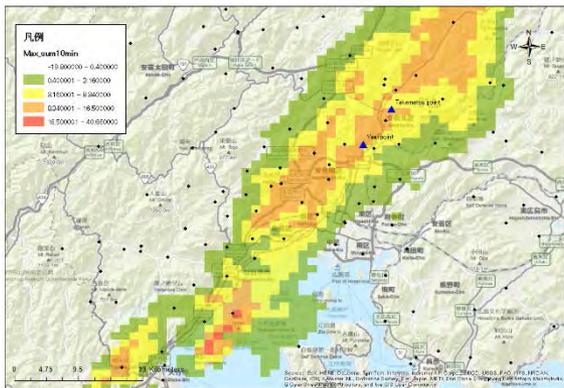
降水量20 mm/h以上の分布



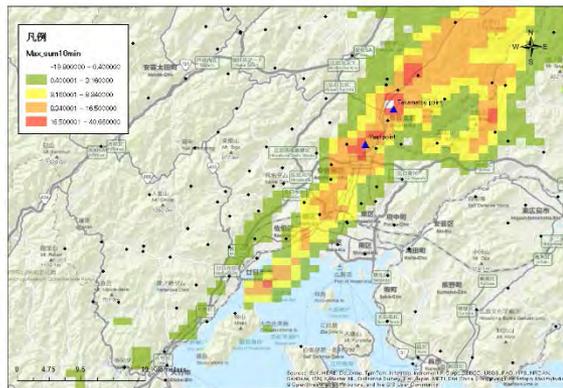
XRAIN rawデータ(国土交通省中国地方整備局提供)より作成



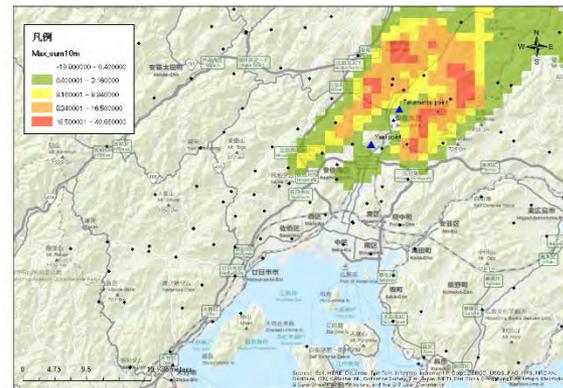
10分間降雨量の空間分布



(a) 2:00 am

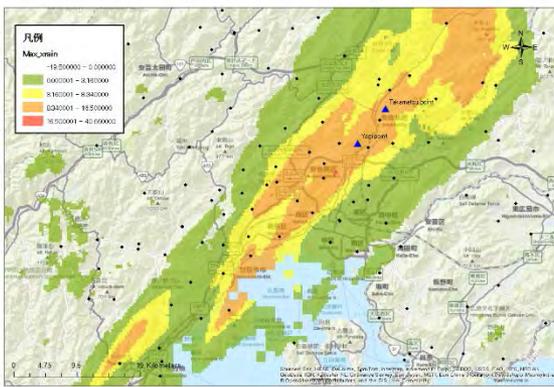


(b) 3:00 am

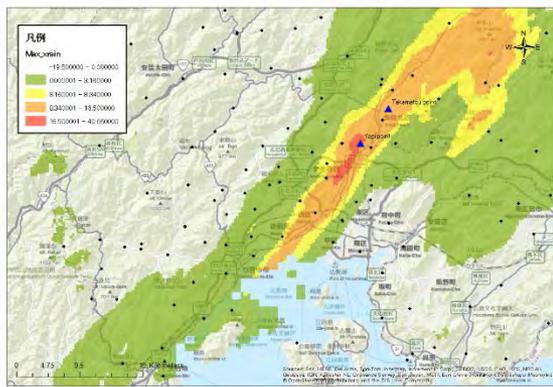


(c) 4:00 am

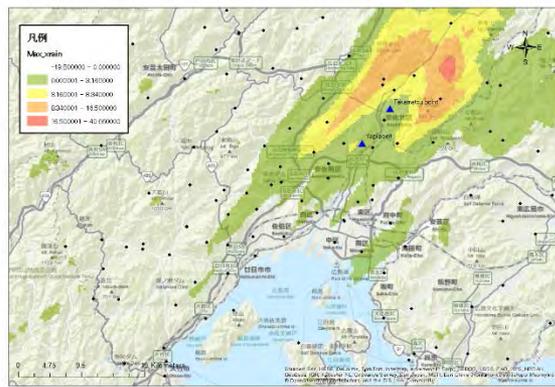
CバンドMPレーダー



(a) 2:00 am



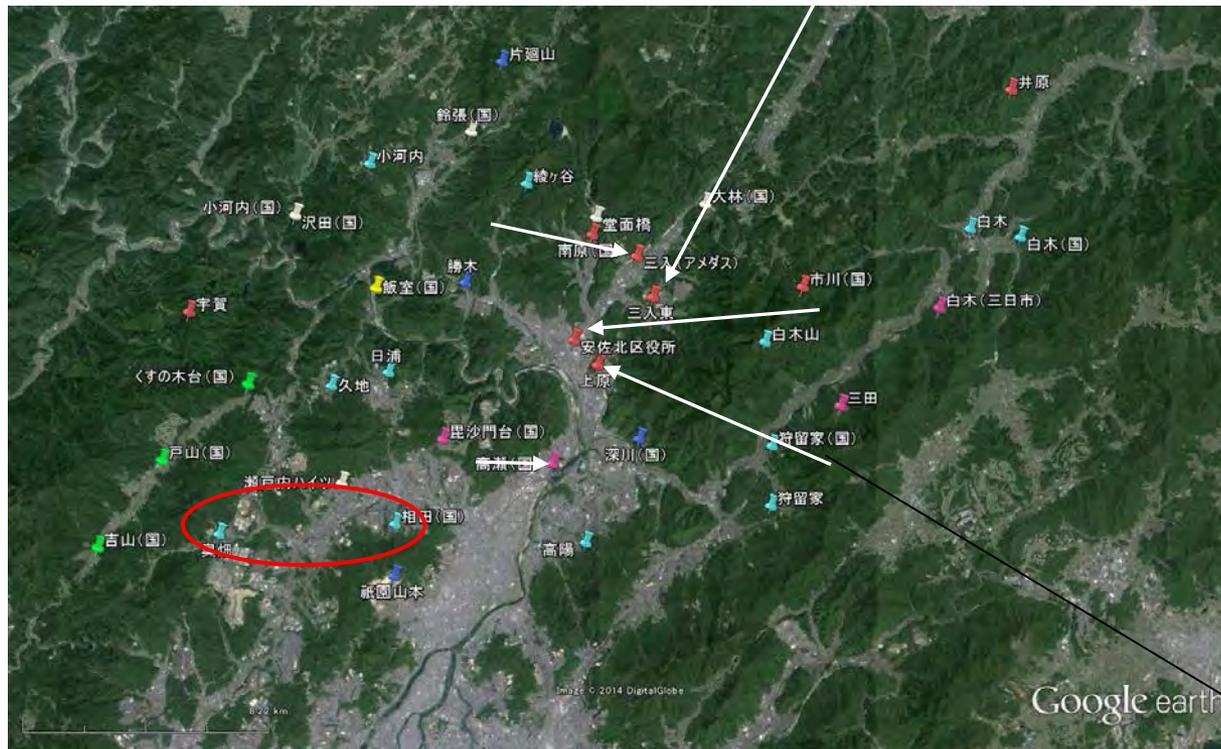
(b) 3:00 am



(c) 4:00 am

XRAIN

気象レーダーによる 10分間降水量の 比較

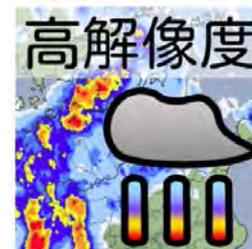
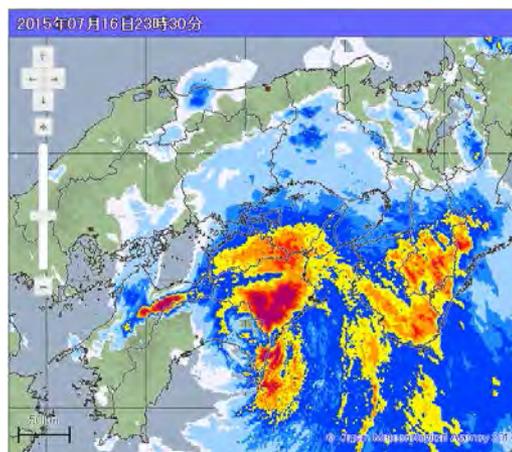
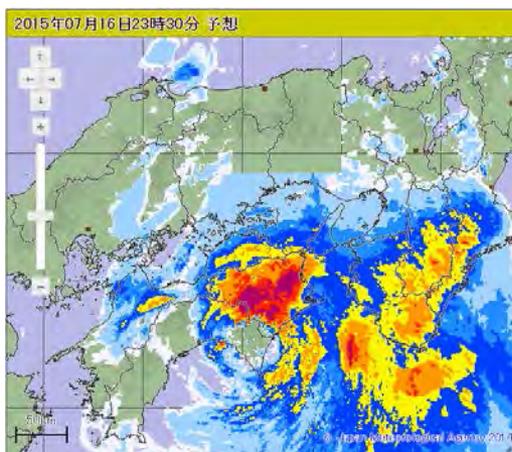


5. Xバンドレーダーの利活用



高解像度ナウキャスト

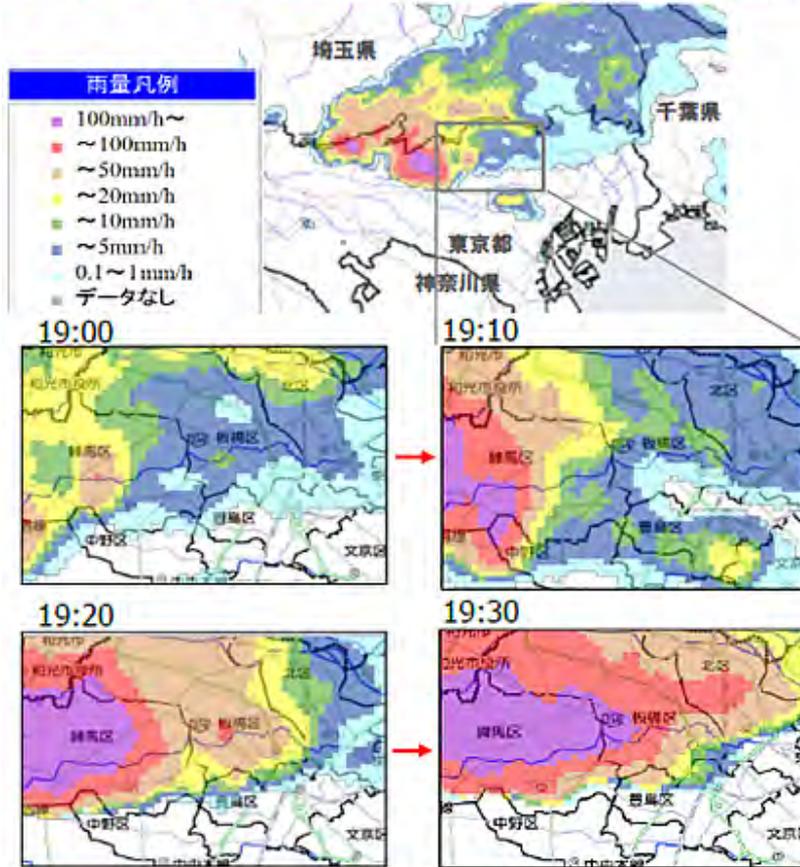
- 気象庁, 国土交通省の気象レーダーの観測データ
 - 気象庁, 国土交通省, 地方自治体の雨量計のデータ
 - ウィンドウプロファイラーやラジオゾンデの高層観測データ
- 250m解像度の降水分布を30分先まで予測する。



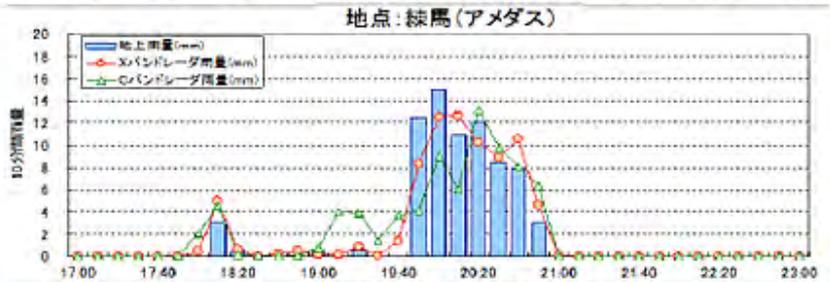
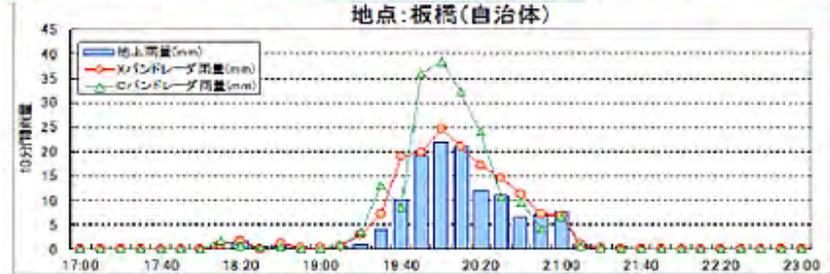
現状では最も信頼できる予測結果を与える。
ただし、30分先まで。

水災害の監視・予測の高度化(1)

XバンドMPLレーダによる観測結果(関東地方:平成22年7月5日降雨)



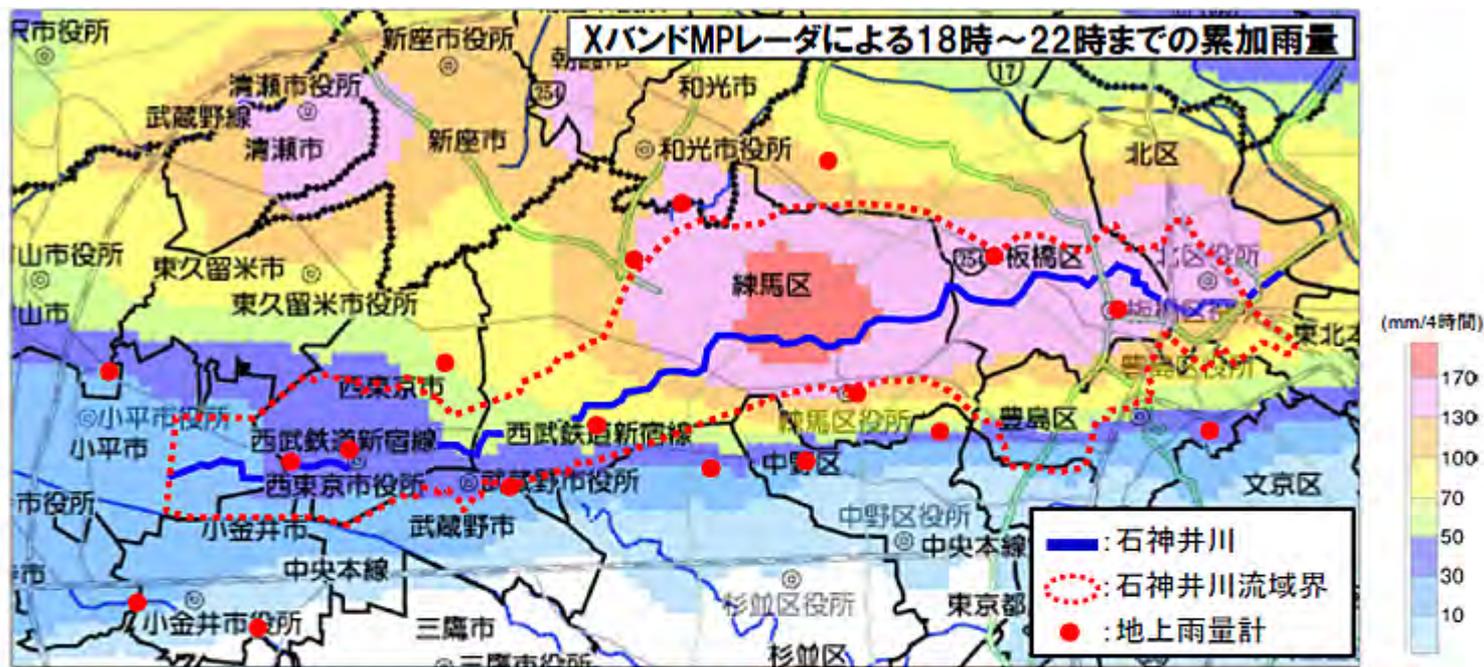
詳細な雨量分布や動きをほぼリアルタイムに把握することが可能



既存のレーダに比べ、Xバンドレーダは地上雨量と近いデータとなっており、格段に精度が上がっている。



水災害の監視・予測の高度化(2)



地上雨量計から算出した
石神井川の流域平均雨量は69mm

XバンドMPLレーダから算出した
石神井川の流域平均雨量は98mm

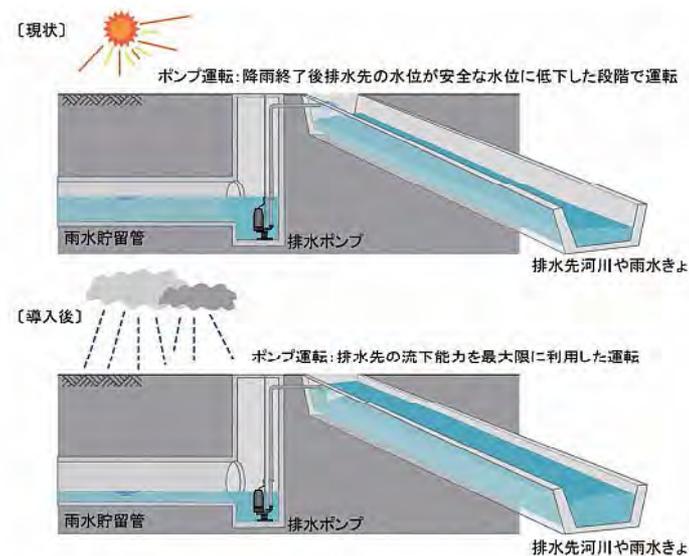
XバンドMPLレーダは面的かつ詳細な観測が可能のため、地上雨量計では捕えきれない局地的な大雨を逃さず観測することが可能。

地上雨量計では捕えられていない降雨も、XバンドMPLレーダでは観測可能なため、平成22年7月5日の石神井川流域の流域平均雨量は、地上雨量計よりも約4割多い雨を観測。

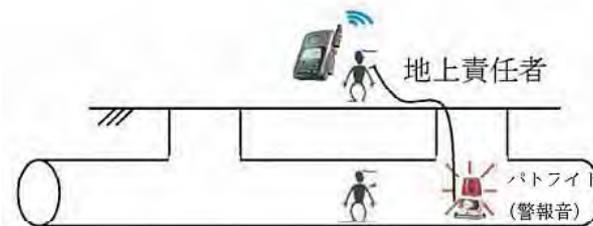


下水道分野での利活用(1)

活用クラス	施設運転管理	
過去・現況データの活用	活用方法	降雨画像情報による人的判断
	効果	施設運転判断の的確化
過去データの高度な分析活用	活用方法	ナレッジデータ解析を用いた運転判断
	効果	降雨パターンごとの施設運転方法の体系化
リアルタイム予測の活用	活用方法	リアルタイム予測による人的判断
	効果	施設運転の判断の早期化(施設能力の最大利用)
リアルタイム予測の高度な活用	活用方法	リアルタイムシナリオ解析による人的判断
	効果	施設運転における人的判断ミスの減少
リアルタイムコントロール	活用方法	リアルタイムコントロール
	効果	設備運転の最適化



排水ポンプの運転の変化



的確なアラート配信



下水道分野での利活用(2)

活用クラス

防災・減災活動

過去・現況
データの活用

活用方法 降雨画像情報・付帯情報の配信
効果 防災活動の的確化

過去データ
の分析活用

活用方法 内水ハザードマップの詳細情報化
効果 集中豪雨の発生確率の高い地域を事前に確認

過去データ
の高度な
分析活用

活用方法 ナレッジデータ解析を用いた被害予測
効果 防災活動の早期化(減災効果の向上)

リアルタイム
予測の活用

活用方法 リアルタイム予測による人的判断
効果 防災活動の早期化(減災効果の向上)



リアルタイムハザードマップの配信



今後の豪雨情報の利活用に向けて (まとめ)

気象レーダーを含む豪雨観測技術はさらに進歩する。豪雨情報を有効に活用するためには、以下のことが求められる。

防災担当者の豪雨情報に対する理解度の向上

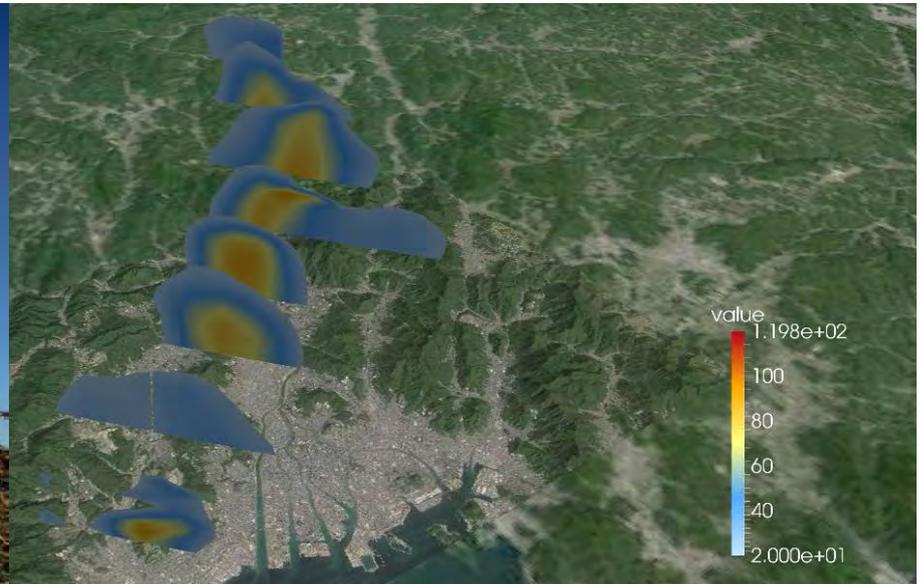
防災施設の的確な運転(施設能力の最大利用)

住民の豪雨災害に対する知識の普及, 災害に対するイメージ(災害を正しく恐れる)力の向上

大雨予測技術, 流出解析技術, 氾濫解析技術の信頼性の向上



ご静聴ありがとうございました



羅漢山山頂のCバンドMPLレーダー

XRAIN

<http://www.panoramio.com/photo/62094573>