

高分解能レーダーを用いた気象観測による 安全・安心な都市

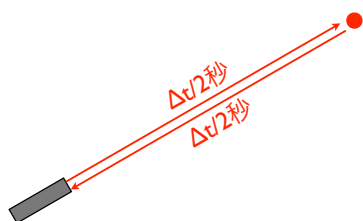
神戸大学 大石哲

1

Radio Detection And Ranging



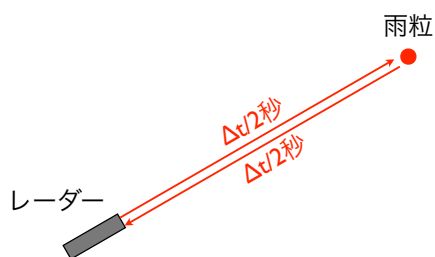
2



$$150 \times 10^3 = 3.0 \times 10^8 \times 0.001 \div 2$$

距離 = 光の速さ $C[m/s] \times \Delta t [s] \div 2$

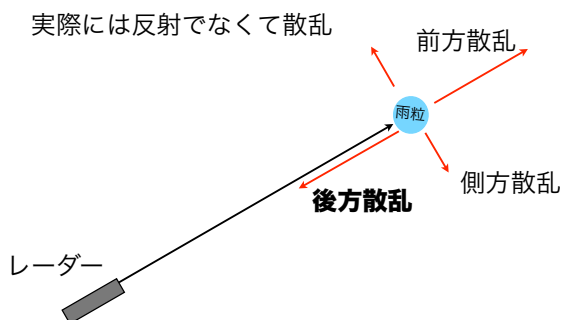
3



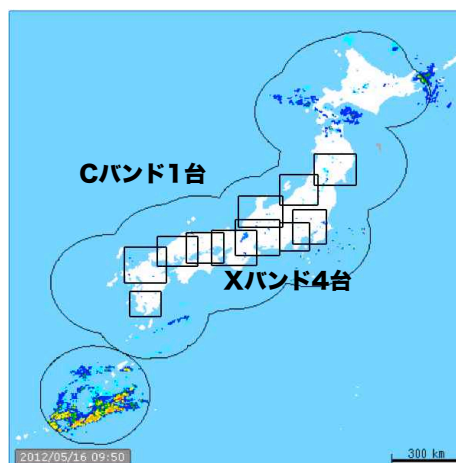
$$150 \times 10^3 = 3.0 \times 10^8 \times 0.001 \div 2$$

距離 = 光の速さ $C[m/s] \times \Delta t [s] \div 2$

4



5



6

くっきり
近くだけ



新型
Xバンド
10GHz帯

ぼんやり
遠くまで



従来型
Cバンド
5GHz帯

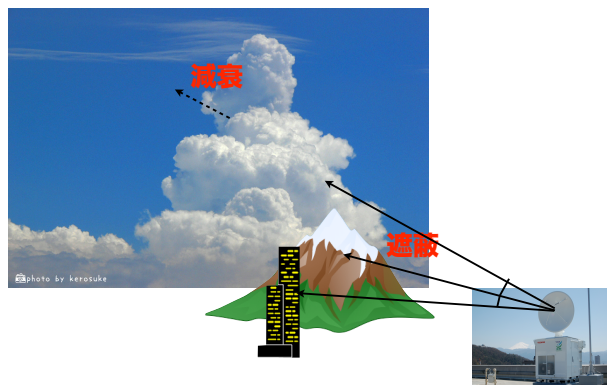
From HP of NIED <http://www.bosai.go.jp>

7

弱点

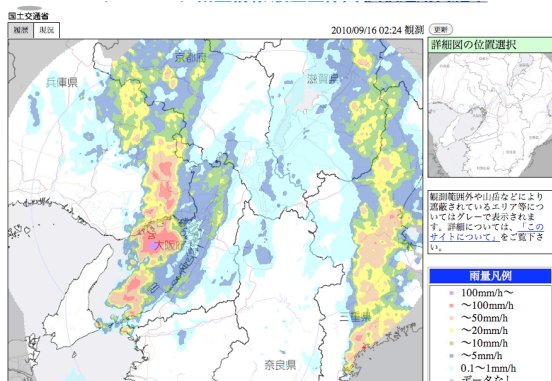
→2つの電波を使うこと
→位相を使うこと

で克服



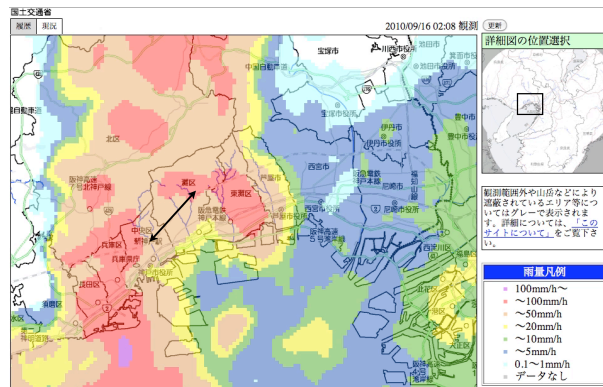
8

国交省はXバンドレーダーを
全国の都市に展開



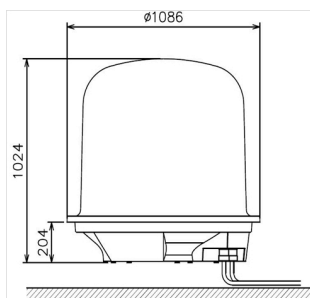
9

新神戸-六甲間（約5km）で雨が違う



10

小さいけれど高性能なレーダー



世界最小・最軽量級を実現!!
小型Xバンド
二重偏波ドップラ気象レーダー
型式 WR-2100
WR-2100の特長・仕様を見る

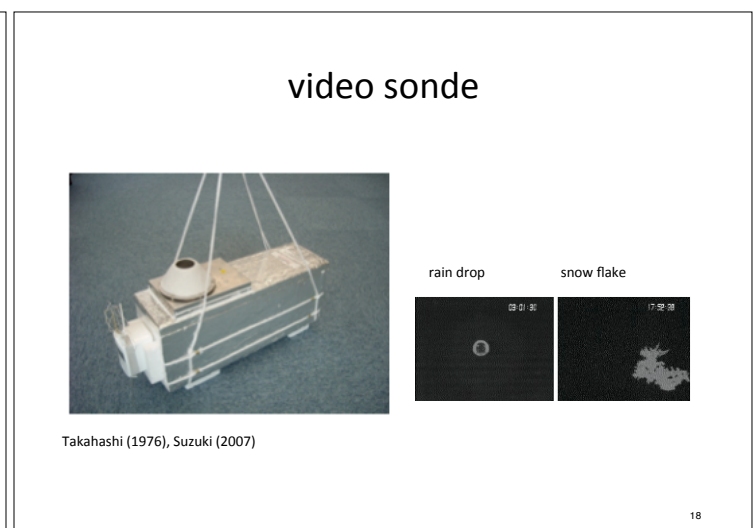
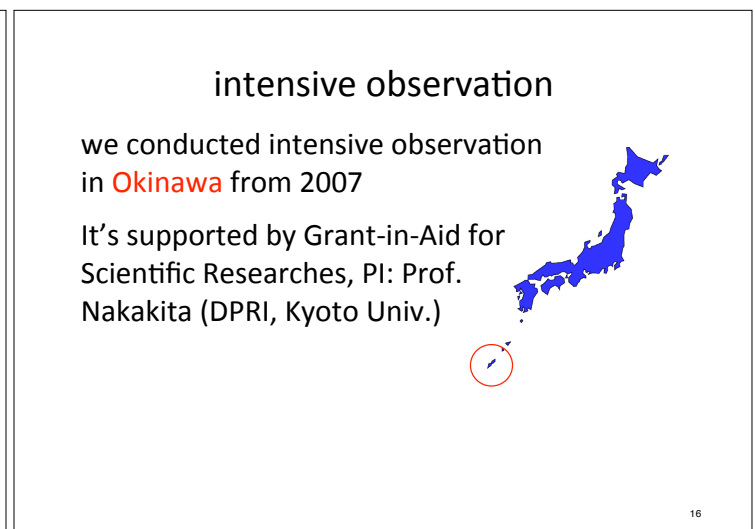
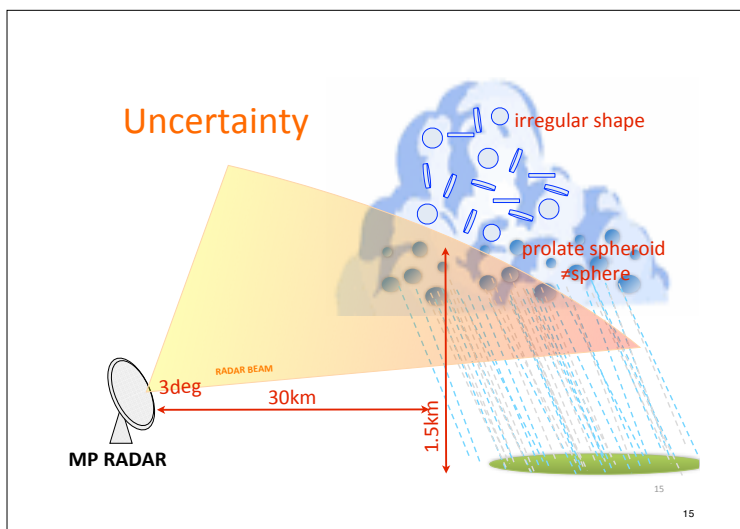
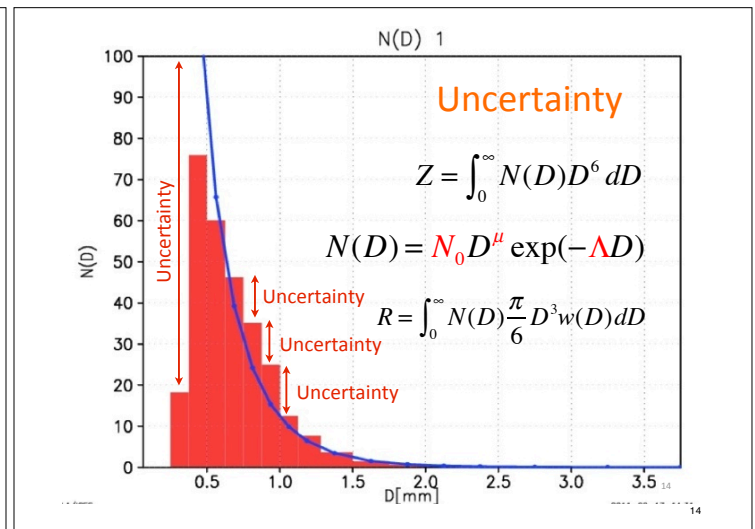
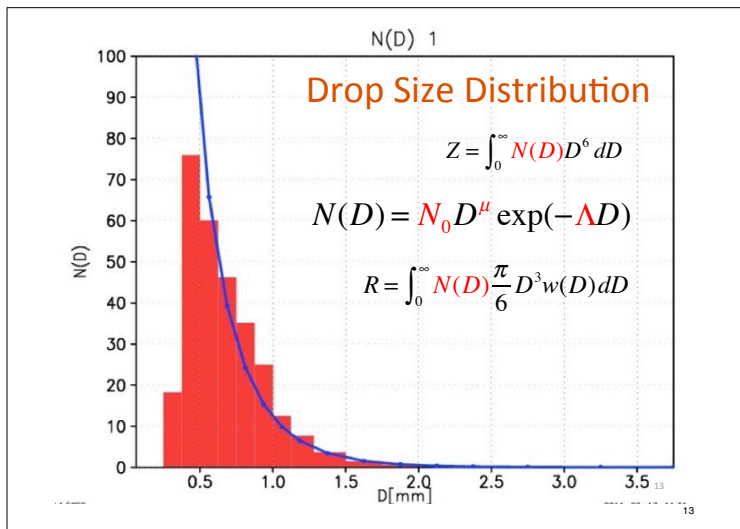
11

Drop Size Distribution

$$Z = \int_0^{\infty} N(D) D^6 dD$$

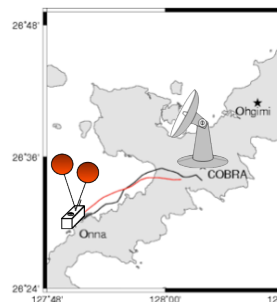


12

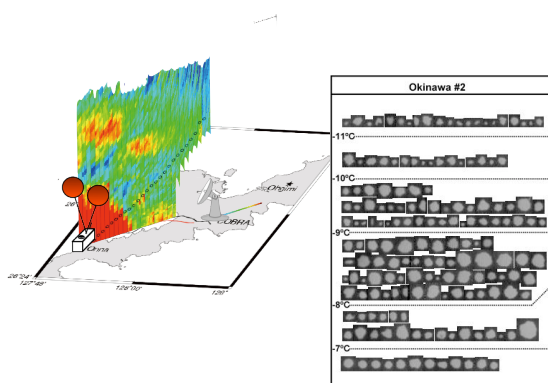




19

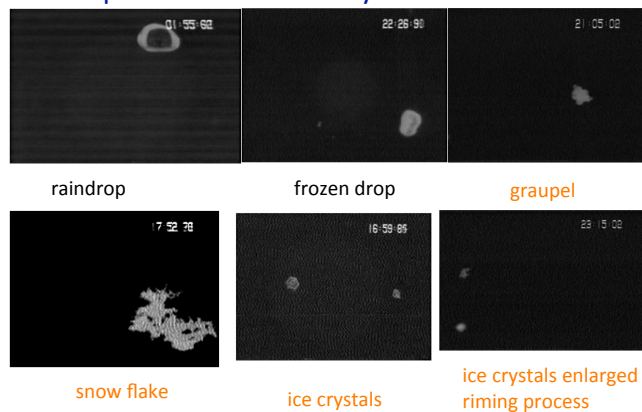


20

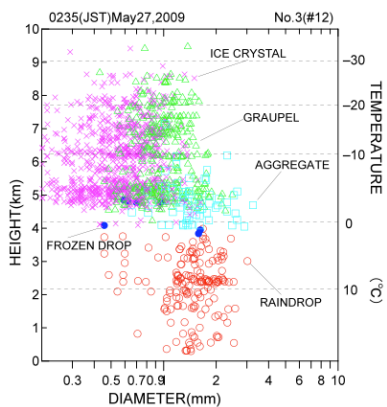


21

particles observed by video sonde



22



23

雷探知装置



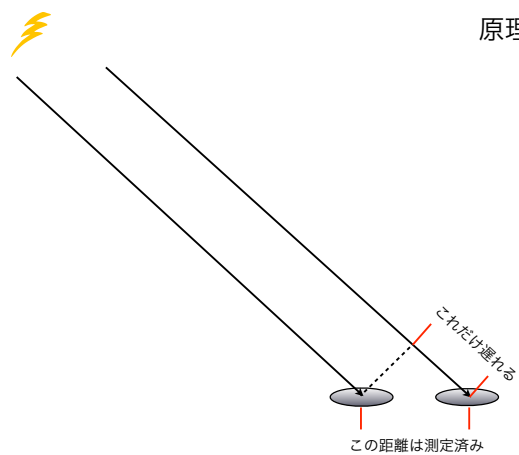
24

位置を測定する=電波干渉法



25

原理



26

高分解能レーダーを用いた気象観測による安全・安心な都市

大石 哲
神戸大学 都市安全研究センター

1 はじめに

「ゲリラ豪雨」という言葉は既に広く認識されたと言ってよい。突然現れて、大きな被害をもたらし、突然消え去る「ゲリラ」のような豪雨が毎年と列島のどこかを襲っている。一方で、来るぞ！来るぞ！と分かっているにもかかわらず、逃げられるほど小さいスケールではなく、村や地域を丸呑みしてしまうような豪雨もある。2013年には台風第18号で京都府を中心に大きな被害が出た。来襲することは十分に予測され、通過経路もよく予測されていたのだが、予想を超えるような量の雨が降った。

台風が近づくなどの大量の雨が懸念されているときに市民の立場からは、実際にどんな気象現象が、どこで、どの程度の強さや大きさを発生しているのかを知ることが災害から身を守るために必要であろう。

しかし、実際に激しい気象現象が起こっているまっただ中では、何が起きているのかがさっぱりわからない。

土砂降りの時には、雲が厚く日中でも相当暗くなるし、降りしきる雨が視界を遮る。ましてや夜になれば足下すら見えなくなる。夜間の避難中や堤防・田畑の巡視中に流されて亡くなる事例が後を絶たないのは、誤って滑り落ちるのではなく、一面水の足下が道なのか川なのかがわからずに、踏み出した足を流れにとられるからである。

一方で、我々はテクノロジーの発展によって、もう一つの目とそれを脳に伝える神経回路を持った、電波とインターネットである。ここでは、電波って何？ から始めて、電波で雨や雷をとらえる仕組みを説明する。また、インターネットを使ってその情報を取得する方法を解説する。

もちろん、電波もインターネットも本当の災害時には停電になって機能しなくなる。したがって、災害が懸念されるときにはここで紹介する方法で情報を取得して、早めの準備、早めの避難をすることがいのちを守ることになると改めて強調しておきたい。

2 電波の特性

電波は強さと周波数という2つの性質で特徴付けられる。我々に最もなじみのある光も電波である。光でいうと、強さは明るさに相当し、周波数は色に相当する。強さとはエネルギーのことでW（ワット）という単位で表す。周波数は電波の「波」が1秒間に振動する回数であり、Hz（ヘルツ）という単位で表す。光の速さ（ $c = 3.0 \times 10^8 \text{ m/s}$ ）といっているものは、実際には全ての電波の速さであり、電子レンジから出ている電波も携帯電話の電波も全て速さは c である。

難しい電波の定義を説明するより、日常生活の中の何が電波なのかを説明する方が分かりやすいと思う。実際にはいろんな電波が我々の目の前や頭の上やらを飛び交っているのだが、その中で「情報を伝える」という役割を持っているものをあげていきたい。

最もなじみのある電波は光である。光を感じるセンサーである目は強さ（エネルギー、W）を虹彩（絞り）で調節しながら水晶体（レンズ）で焦点を調整¹して光を受信し、周波数（振動、Hz）を脳に送って脳はそれを色として認識する。光の中で比較的周波数が高いものは紫や青に見え、周波数が低いものは赤や橙色に見える。

携帯電話は電話機と中継アンテナの間を800MHzから2GHz²までの決められた周波数の電波で結んでいる。最近では携帯電話が増えてこの周波数が足りなくなっていることは頻りに新聞に取り上げら

¹関係ないが筆者は極度の乱視と近視である

²Mはメガで10の6乗、Gはギガで10の9乗のこと

れている。テレビは最近地デジ化して UHF という 470～710MHz の周波数の電波を使い始めた。アナログの頃は VHF という 90～222MHz の周波数であった。要するに NHK もフジテレビも地方局の U チャンネルの電波を使い出したといえる。ラジオはテレビより低い周波数の電波を使っている。すなわち電波の周波数が高い方から光、携帯電話、地デジ、アナログテレビ、ラジオの順である。この順に、1 秒間にたくさん振動している。情報は振動で運ばれるので、情報を早くたくさん伝えるためには 1 秒間の振動が多いすなわち、周波数が高い方が有利である。地デジになったら俳優さんのしわが目立つようになったのはアナログよりたくさん情報を送ることができるようになったからである。ブルーレイ（青色）DVD がそれまでの DVD（赤色）よりくっきり見えるのも周波数の高い青い光を使うことができるからである。

周波数が高い電波はたくさんの情報を運ぶことができるのだが、長い距離を進む間に波の形が消えてしまう特性がある。減衰という。この減衰によってアナログ時代のサンテレビは兵庫県内でしか見られなかったが、NHK は京阪神で見られたのだ。太陽はすごい強さの光の波を送っているのだが、大気の間を通る間に減衰する。大気を長く通る朝や夕方には周波数が高い青い光が減衰して橙色や赤だけが残る朝焼けや夕焼けになる。

ここまでのまとめ

1. 電波の特徴は強さ（エネルギー）と周波数（1 秒間の振動回数）。
2. 周波数が高いものほどたくさんの情報を運ぶことができる。
3. 周波数が高いものほど減衰しやすいので到達距離は短い。

3 豪雨災害を見るための電波

(1) 概要

災害を引き起こすような気象状況を知るためには、雨・風・水蒸気・雷を知ることができるとよい。そこで、どうやってその情報を取得するのかということを説明する。実際には、海面の温度とか、空気中のエアロゾルだとかそういったマニアック³な情報も取得可能であるが、紙面の関係でそれはまたの機会にする。

気象状況を知るには電波の中でもマイクロ波というものを使うことが多い。マイクロ波は周波数が 100MHz から 100GHz くらいの電波である。電気を使ってマイクロ波を送信してそれを受信するか、自然が発生するマイクロ波を受信するのかの 2 つの方法がある。前者をアクティブ（能動的）、後者をパッシブ（受動的）と言ったりする。普段見ている景色は太陽という自然の電波（光）発生装置から発せられた電波が「もの」にあたって一部の周波数の電波が吸収され、吸収されなかった周波数（すなわち色）の電波が目が受信しているという意味でパッシブである。黒く見えるのはほとんど全ての周波数の電波が吸収されてしまっているからであり、白く見えるのはほとんど全ての周波数の電波が反射しているためである。

ここでは、アクティブな電波送受信装置として雨を探知するレーダー、パッシブな装置として雷が発する電波をアンテナが受け取る雷探知装置を説明する。

(2) レーダー

新型の X バンドレーダー（X-band Multi Parameter Radar, 以下 X バンド MP レーダーと称する）の説明をする。

レーダーというのは RAdio Detection And Ranging の略で、電波 (Radio) を使って何か（標的）を探知 (Detection) し、その位置を測る (Ranging) するための装置である。探知するためにレーダーは電波を出しているのがアクティブである。発した電波が標的にあたってはね返ってくるエコー（直訳すると「こだま」）を受信する。電波は光の速さ ($c = 3.0 \times 10^8 \text{ m/s}$) で進むので、発信してあたってはね返って受信するまでの時間を Δt とすると、 $c \times \Delta t / 2$ が、レーダーと標的の間の距離である。光はかなり速いので Δt は小さい。例えば標的が 150km 離れたところにあると Δt は千分の 1 秒である。実際に

³水蒸気も相当マニアックだろうし、雨を電波で見るともマニアかもしれないだろうが。

はレーダーのアンテナは3秒から20秒程度かけて回りながら360°監視しているのだが、千分の1秒は3秒に対して十分に短いので、アンテナが止まっていると考えてよい。

雨が標的であると考え、実際にはレーダーの電波は雨にあたって反射するのではなく、散乱する、反射とは電波が来た方向すなわちアンテナの方向だけにはね返るのだが、散乱とはアンテナの方向にも、電波の進行方向にも、電波の進行と直角方向にも電波がまき散らされる。ただし、アンテナの方向と電波の進行方向がもっとも強い。したがって、アンテナと標的の雨の間に別の雨があっても標的の雨に電波が達することができる。

さて、第2節で電波は強さと周波数で特徴付けられるといったが、新型のXバンドMPレーダーの周波数は約10GHz⁴である。Xバンドの「バンド」は帯とも訳されて、10GHzの近くのある程度の幅（帯）の周波数はレーダーに使ってよいと決められている。個々のレーダーの周波数はその帯の中から総務省が割り当てて、免許を与える。

気象レーダーに使われているバンドは、Xバンド以外にCバンド（約5GHz）がある。第2節で述べたように周波数が高くなるとたくさんの情報を運ぶことができるので、Xバンドの方がくっきり、はっきり見える。ただし、周波数が高いものほど減衰しやすく到達距離は短いので、Cバンドの方が遠くまで見える。また、昔の富士山レーダーはSバンド（約3GHz）を使っていた。高い山から日本全体を見渡して台風を探知しようとする作戦のために作られた。Sバンドになると細かい雨域はさらにぼやける。

国土交通省と気象庁ではXバンドMPレーダーを関東、北陸（富山・石川）、中部、近畿、栗駒山周辺、新潟、静岡、岡山、広島、九州北部、桜島周辺などの全国35カ所（平成25年度実績）に配備して特に都市周辺の豪雨を観測している。また、東京、大阪、神戸などの大きな自治体では独自のXバンドレーダーをもって雨水処理に活用しているし、民間気象会社や大学でもXバンドレーダーを有しているところがある。XバンドMPレーダーではアンテナを中心に半径約60kmくらいの円状の豪雨を観測できる。半径約30kmくらいまでは雨量も精度よく算定でき、それより遠くでは雨の強弱がわかる。このように空間的のどこにどの程度雨が降っているのかという情報を空間分布という。

一方で、国土交通省と気象庁では26基のCバンドレーダーを使って日本全国をくまなく観測している。Cバンドではアンテナを中心に半径120kmまでの雨量を算定しているが、解像度が粗いので1km四方の平均的な雨がわかるだけでくっきりとは見えない。富士山レーダーのSバンドは半径800kmまで⁵の雨を監視していた。

一方、ビルや山のような標的は大きすぎるので電波を反射してしまう。したがって、アンテナと雨の間にビルが入ると雨は探知できない。このことを遮蔽という。遮蔽を避けるためにはアンテナの仰角を上げてビルや山を避ければよい。しかし、仰角をあげると高い高度の雨雲を見ることになる。地上で降る雨とは性質の異なるものを見ることになる。地上5kmになれば夏でも0℃になり、雨粒は凍ってしまう。凍ると電波の散乱特性が変化するので、上空の雨粒や氷粒から地表の雨量を推定する方法が必要である。

ここまでレーダーの概要を伝えてきたので、国土交通省や気象庁が持つレーダーデータにアクセスする方法を述べたいと思う。

気象庁は膨大な観測情報をホームページでほぼ即時公開している。そのうちレーダーに関するものは

- 気象庁の解析雨量：<http://www.jma.go.jp/jp/radnowc/>

である。

国土交通省は「川の防災情報」としてレーダーのデータをホームページでほぼ即時公開している。それと同時に、地上で測った雨量や河川の水位などの水理量も公開している。

- Cバンド：<http://www.river.go.jp/nrpc0201gDisp.do?areaCode=80>
- Xバンド：<http://www.river.go.jp/xbandrader/>
- 水理量：<http://www.river.go.jp/03/nrpc0301g.html>

レーダーは夜だろうが、雨だろうが遠くにある雨をとらえる目である。我々はそれをインターネットという神経を通じて自分に取り込むことができる。しかし、注意したい点がある。レーダーがとらえているのは雨滴などによって散乱された「電波」であって、雨滴そのものではない。したがって、条件によっては地上で測定する雨量計と同じ雨量を算出できないことがある。なぜなら、地上雨量を測定する

⁴1秒間に約100億回振動している

⁵富士山を中心に本州全体

のは地上に設置された直径が30cmに円筒状の転倒マス式雨量計であるが、レーダーは上空にある200ha以上の面積における平均的な雨量を算出しているのである。また、レーダーの機種や個体毎の差によって、微妙に雨量推定精度が異なり、積み重なると大きな差になって表れる。だからといってレーダーは使えない！とか、正しくない！といって退けるのではなく、それぞれの特性に応じた利用をして欲しい。

特にXバンドレーダーは細かな雨域をよくとらえ、しばらく見ていると、いつぐらいから雨が降り出すのかも分かるようになる。夏の夕立の10分程度の隙間を見つけてそれにあわせて濡れずに帰宅するために、レーダーを見て目を肥やしておきたい。

(3) 雷探知

私たちは経験的に雷が豪雨の前兆と知っている。科学的には、雷は上空の氷粒でできた雲が持つ電気が地面や別の雲に運ばれる際に発生し、「上空の氷粒でできた雲」は落下して融けて豪雨になるというメカニズムで雷は豪雨の前兆である。しかし、雷も大きな雷鳴があるものばかりではないし、山の向こう側の雷は気付きにくいものである。電波で雷を探知することができれば、豪雨予測につながるのではないかと考えられる。私たちは、大阪大学の河崎善一郎教授らのグループが開発した雷探知装置を利用して豪雨予測につながらないかという研究をしている。

雷は枝分かれするときに電波を発する。雷探知装置ではこの電波を受信して雷が起こったことを知る。位置は電波干渉法という方法で求める。電波干渉法とは1つの発生源からの電波を2つの受信機で受信したときの時間遅れから、発生源の角度を求める方法である。3つの受信機を東西と南北に並べると、雷発生位置である電波の発生源の東西方向の角度と南北方向の角度が分かる。さらにそれが2セットあると交点が雷発生位置として特定できる。すごく簡単に言えば、2つのアンテナで雷による電波をとらえて、その時間差で場所がわかるというものである。

大阪大学の河崎善一郎教授らのグループでは、平城京遷都1300年祭の際に雷探知装置を使い、気象会社が落雷・ひょう・豪雨・突風・竜巻予測をして参加者を落雷から守った。気象会社にいる熟練の気象予報士が種々のデータを使って予測をしたのだが、我々大学の人間はそれを式にしたり、マニュアルにしたり、コンピュータのプログラムにしたりするのが仕事である。予報士の力量によらず、同程度の予報をすることができるようになれば、力量のある予報士はさらにレベルの高い予報を目指す。そのようなことをしながら豪雨予測のレベルを上げたいと考えているが、まだまだ道は遠い。

4 おわりに

本稿では、レーダー、雷探知装置などの電波を使った豪雨関連の現象を観測するシステムについての説明をしたつもりである。やや高度な内容であったのと、筆者の力量不足で分かりにくかったと思う。わかりにくいところは、どしどし質問していただけると幸いである。