



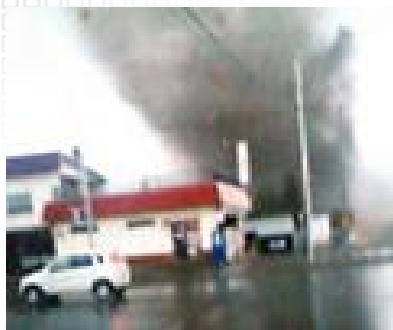
ネットワーク型レーダの 研究開発

牛尾知雄, 森本健志, 河崎善一郎
大阪大学大学院工学研究科
電気電子情報工学専攻



研究の背景

- ・ 近年, 日本では突風や局所的な豪雨等による被害が増加傾向にある。
- ・ Cバンド気象レーダのドップラー化
- ・ Xバンド偏波ドップラーレーダの配備



サロマでのF3竜巻
(2006年11月7日)



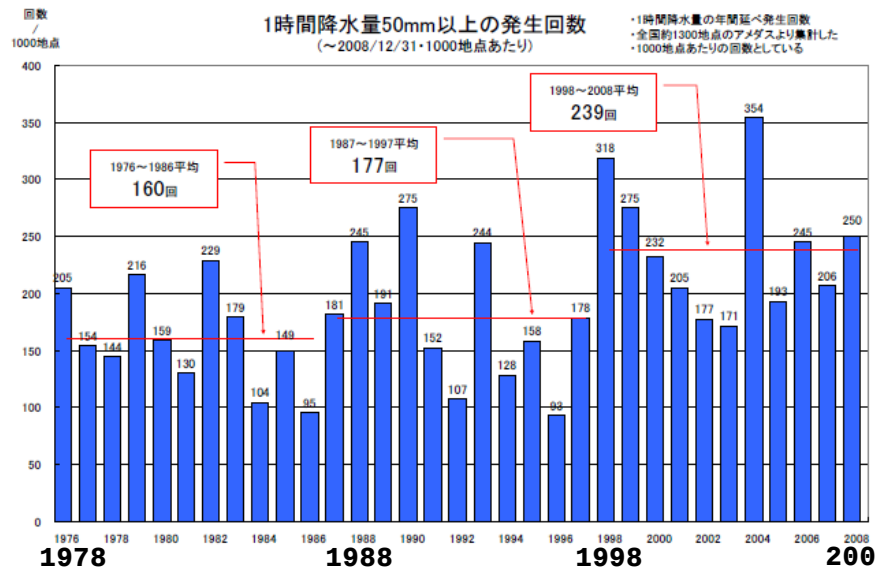
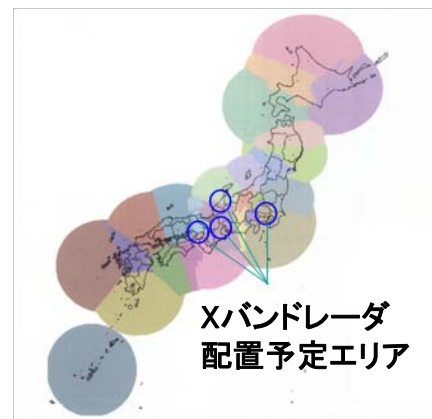
宮崎延岡での列車脱線事故
(2006年9月17日)



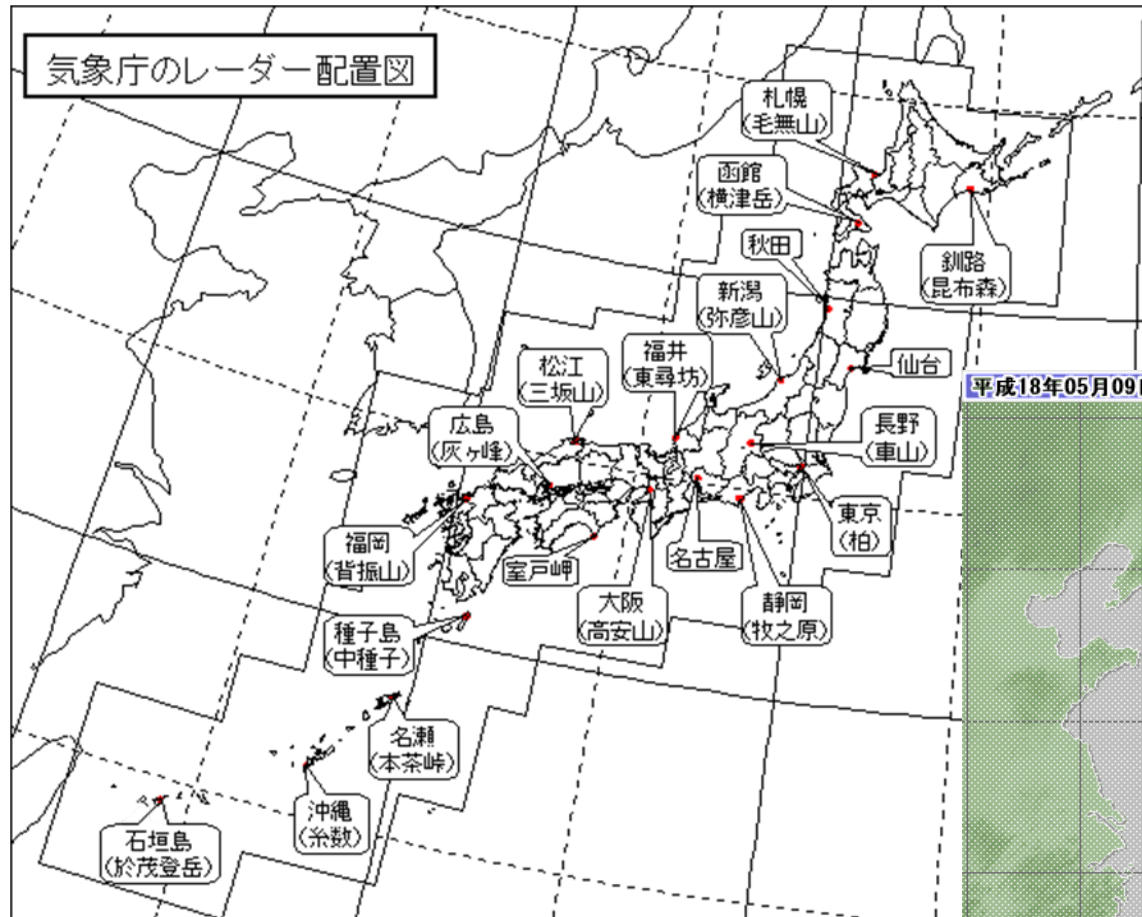
神戸都賀川事故(2008年7月28日)



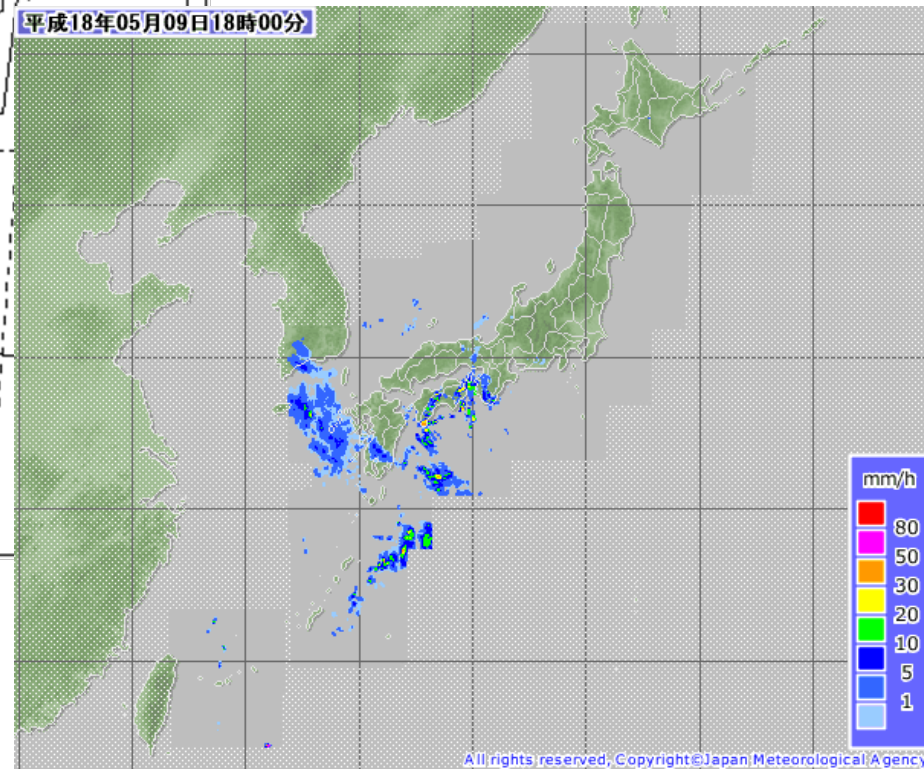
東京雑司ヶ谷での幹線工事事故
(2008年8月5日)



大型気象レーダー観測網

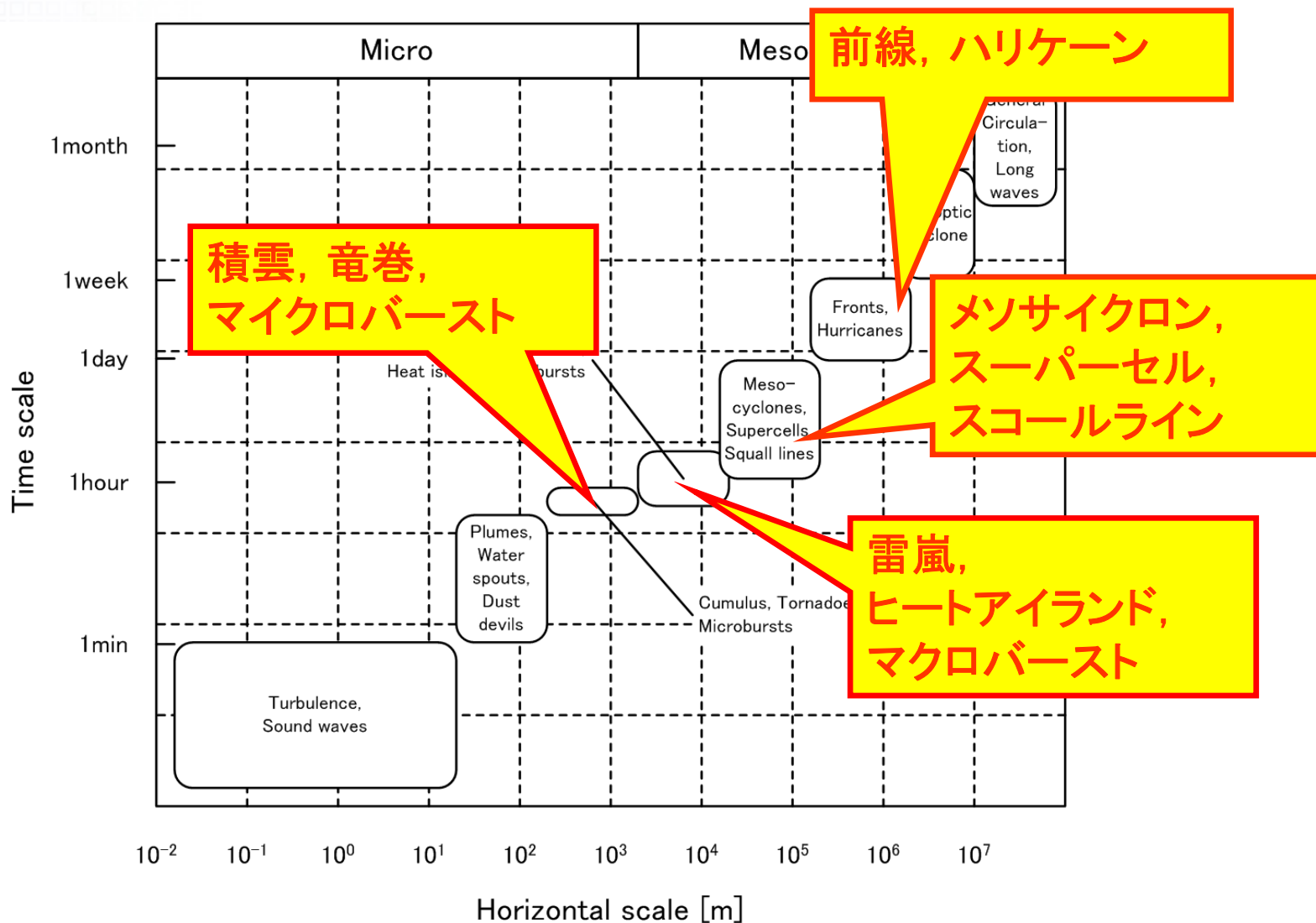


平成18年05月09日18時00分



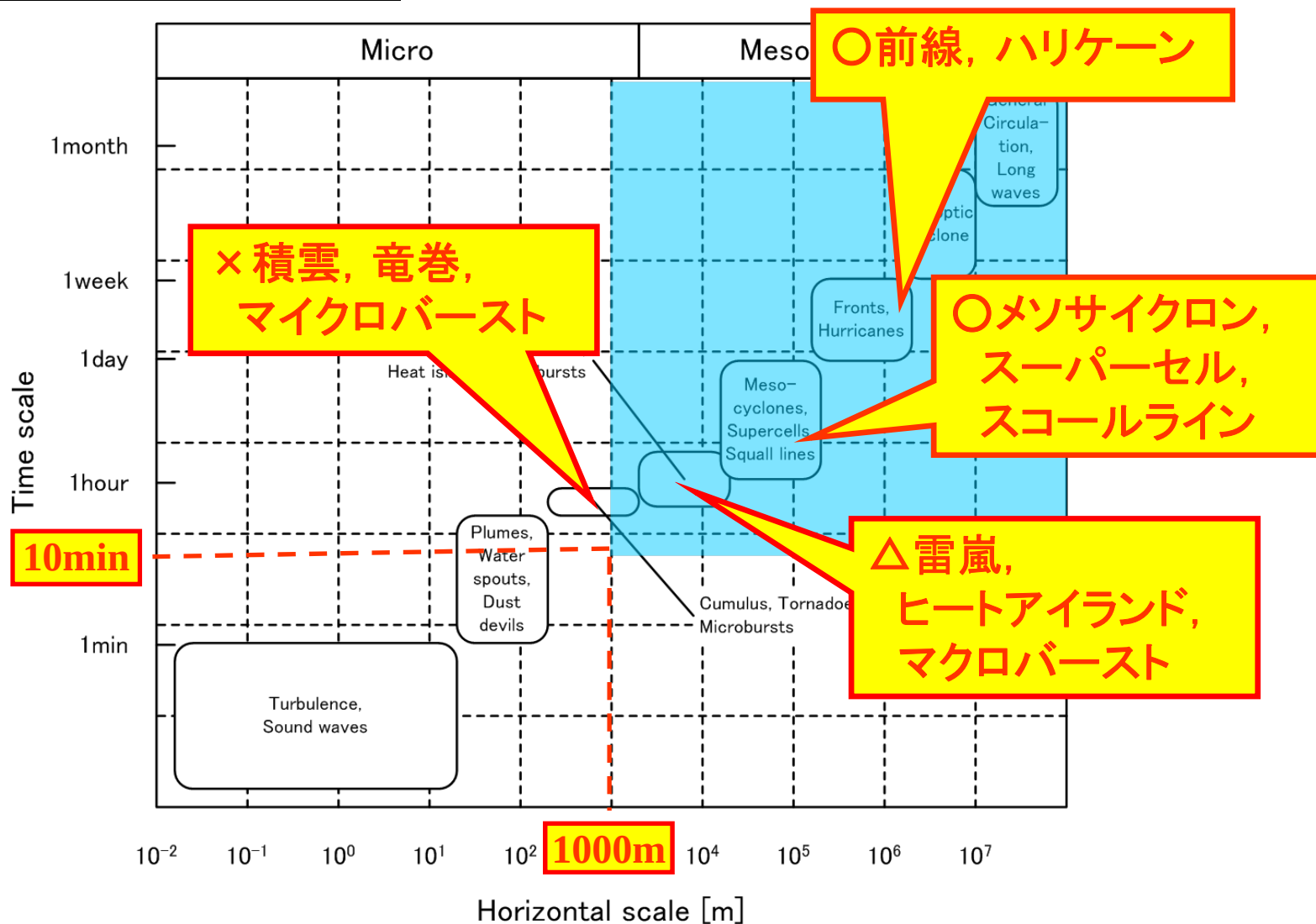


研究背景



研究背景

従来レーダの分解性能





Thunderstorm images in 10 minutes





Thunderstorm images in 5 minutes



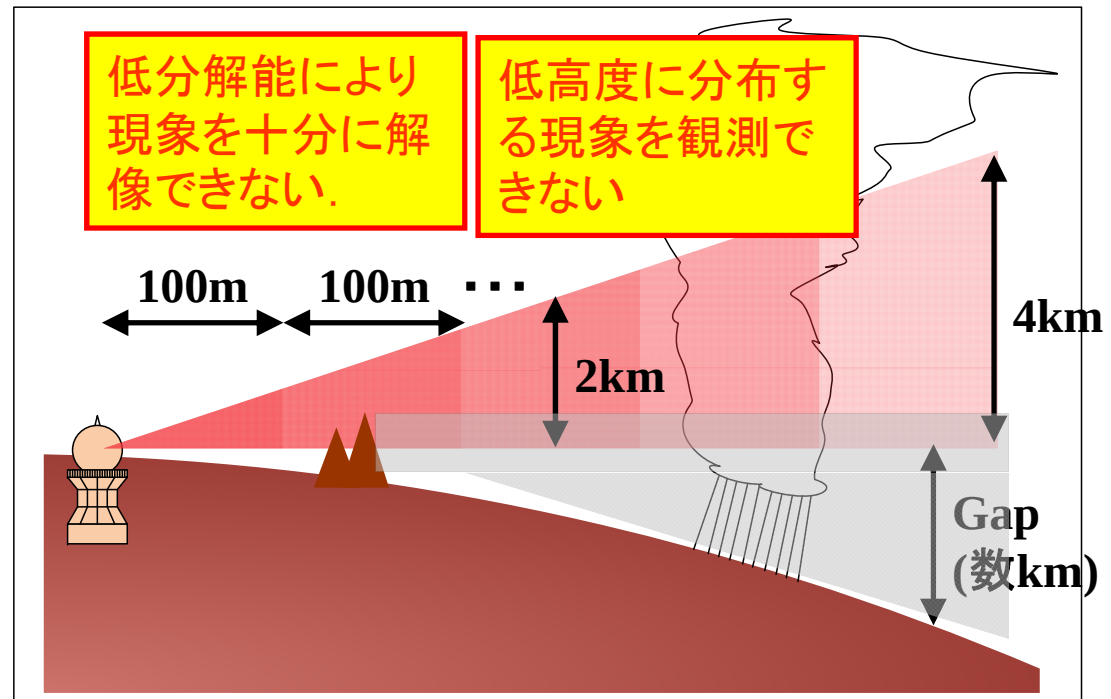
Thunderstorm images in every 1 minute





大型気象レーダ

- 大型アンテナ
- 高出力(数百kW)
- 低周波(S,C,X帯)
- 広い観測範囲(数百km)



○ 1台当たりの観測範囲が広い

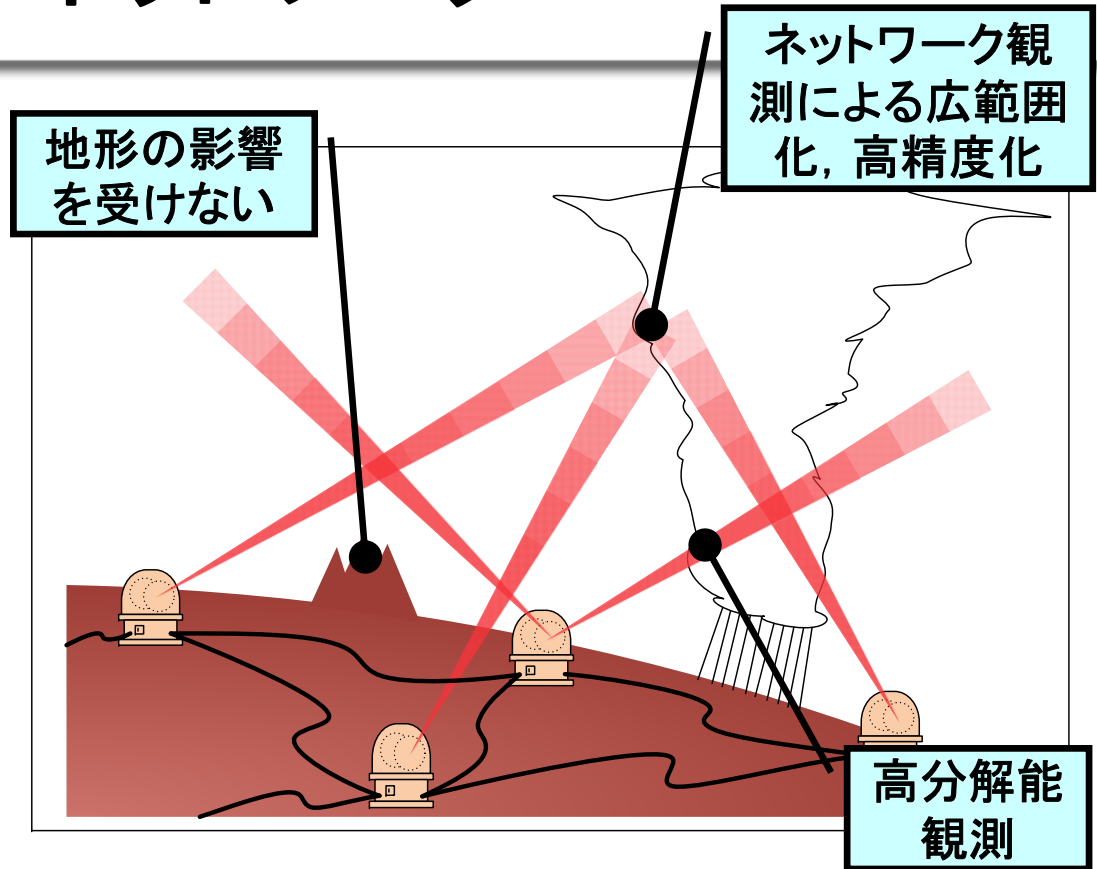
- × 距離分解能が低く(100m程度)集中豪雨や竜巻といった現象を捉えられない
- × 大型アンテナのため、スキャンスピードが遅い

- × 遠距離ではビームが広がりすぎる(数km)
- × 遠距離では地球の曲率による未観測域が発生
- × 山岳等により未観測域が発生



小型レーダネットワーク

- 大型レーダによる未観測域を補完
- 地上から上空15kmまでを高分解能で観測
- レーダのネットワーキング



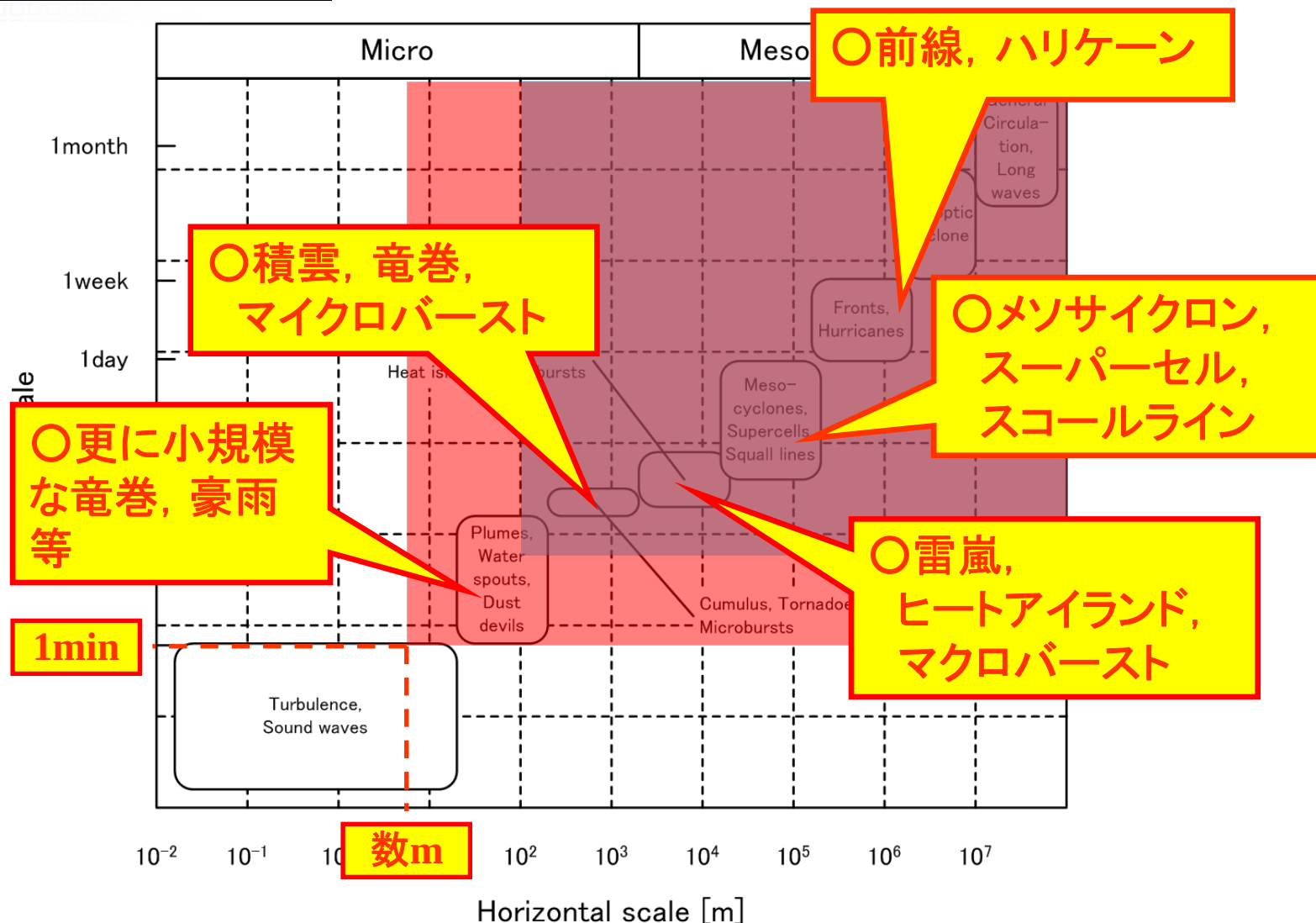
- 高速高分解能観測により**集中豪雨**や**竜巻**といった現象が検出可
- 近距離レーダを多数配置することで**地形の影響を受けない**

- **ネットワーク観測**により**広範囲**を観測可
- ネットワーク観測による**観測精度の向上**



研究背景

求められる分解性能





SCOPEの研究目標

本研究では、高精度、高分解能の小型レーダを複数個配置して、時空間的に大型レーダネットワークの間隙となっている地表面付近からの降雨の三次元構造を数メートルオーダーで詳細に、且つ、時間的にも密に観測し、それらのレーダを複数台配置して、全国配備を目指した基礎的技術検討を行うのが目標である。

- 2重偏波機能を有する高精度高分解能高速スキャンニングレーダの開発

開発に成功した(住友電工と共同開発)。

- 同レーダを用いた有効性の検証

実際に竜巻を観測しその有効性を示せた。

- 2台のレーダを配置したネットワーク化の基礎検討について検討を行う。

確率論的降雨減衰補正アルゴリズムの開発に成功した。



小型高性能レーダ開発

本研究では小型高分解能レーダネットワークに適した、定常運用可能かつ高分解能な、ボリウムスキャニングレーダを開発することを目的とする

設計要求

- 高距離分解能
 - 本研究グループで開発したプロトタイプレーダで実績あり。実質の距離分解能**5m**程度。
- 高時間分解能
 - **1分間**で**1ボリウムスキャン**(全天スキャン)
- 距離15kmにて20dBZ($\div 1\text{mm/h}$)の降雨を検知
 - 送信出力, 信号処理
- 高速かつ柔軟な信号処理システム
 - ハード, ソフト
- **2重偏波(垂直偏波、水平偏波)観測機能**

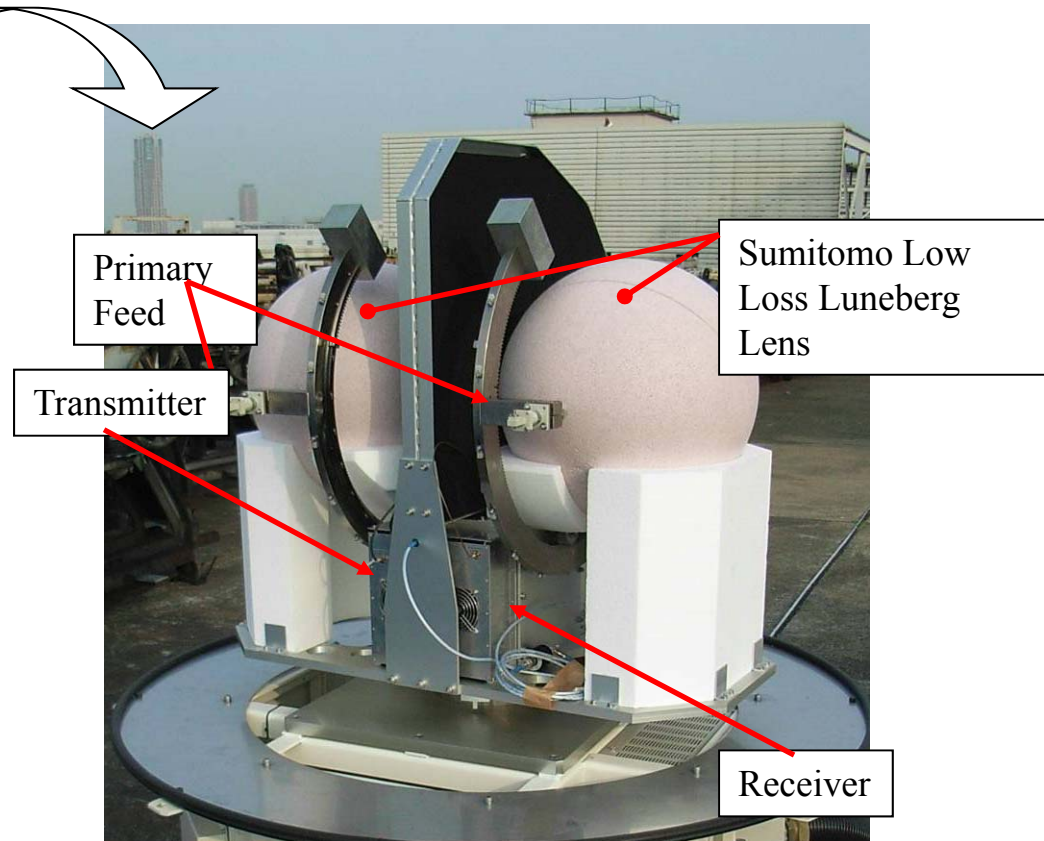


Description of the BBR

Overview



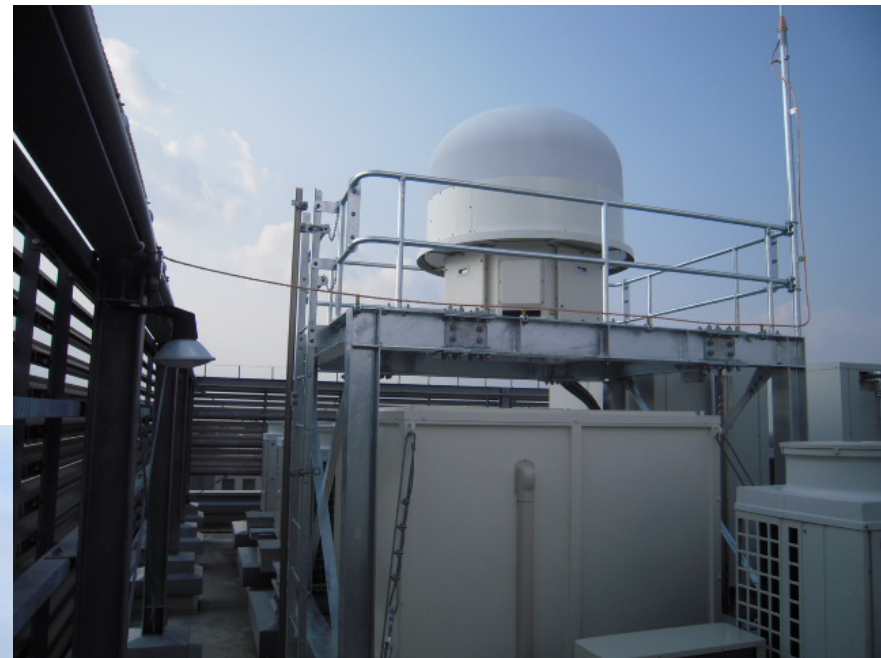
Outside View



Inside View



レーダ観測の様子



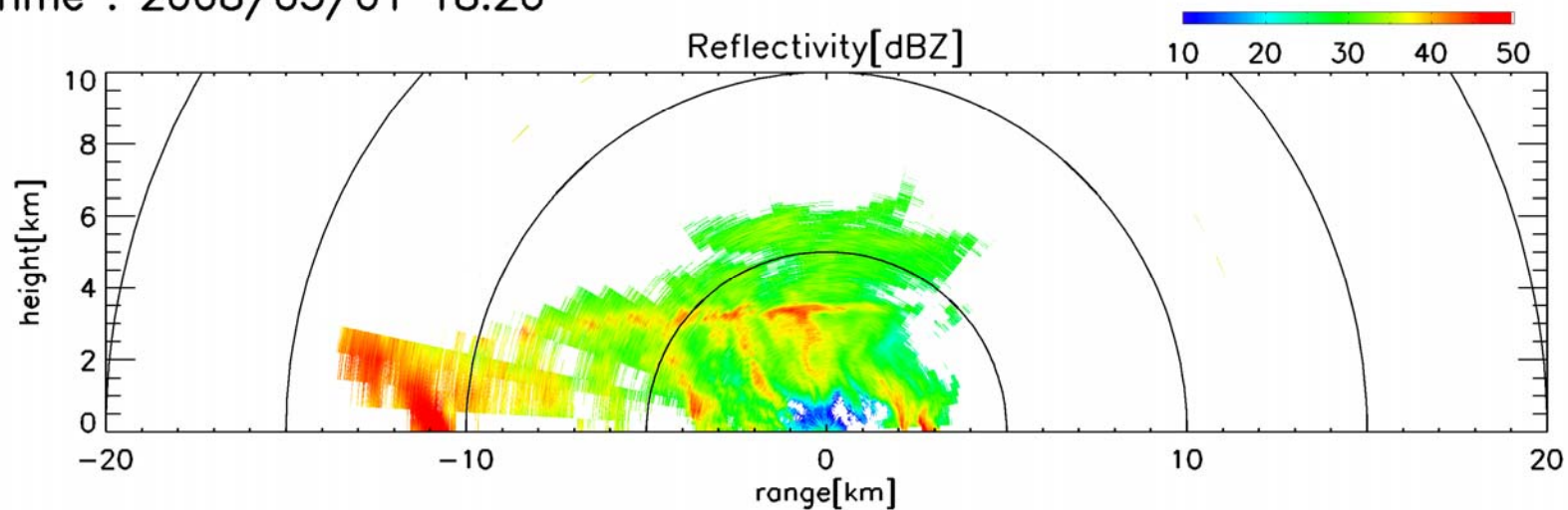
レーダサイトからの遠景





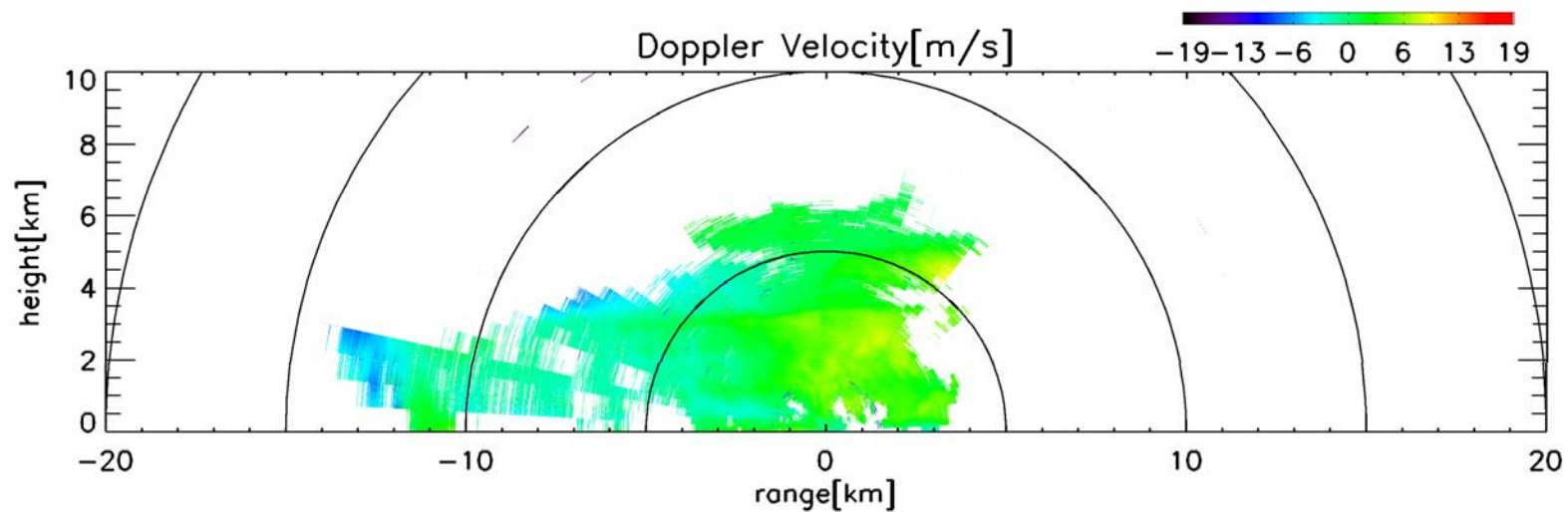
観測例

Time : 2008/05/01 18:20

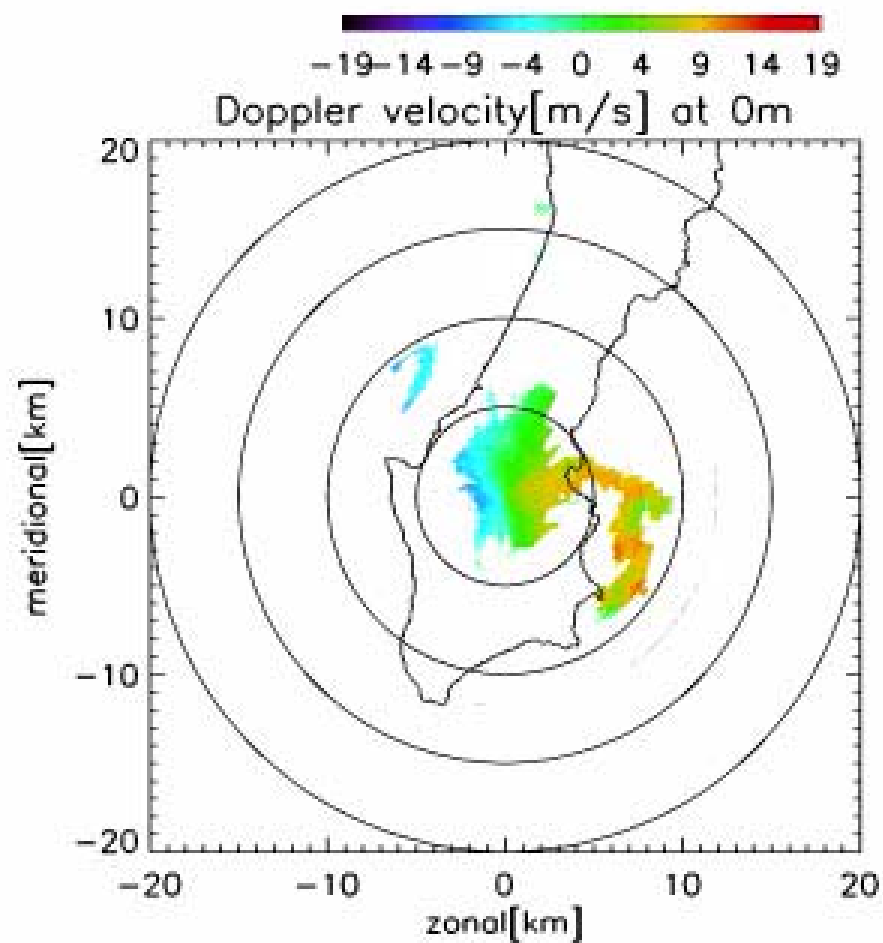
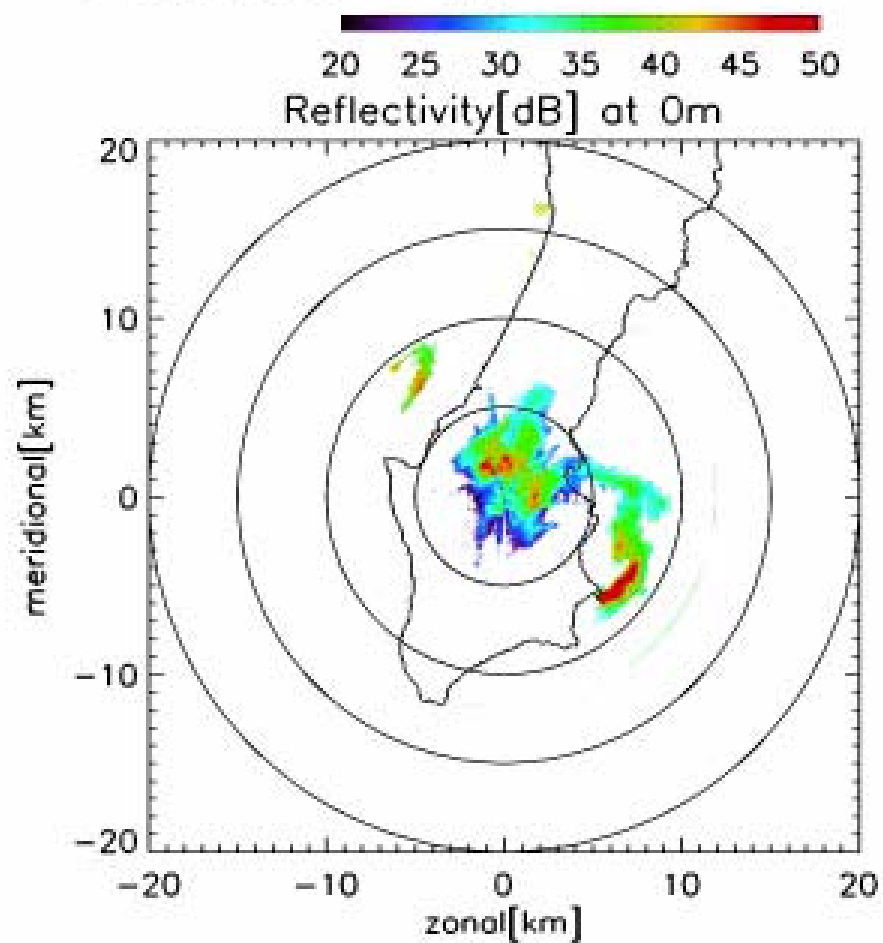


< Az180deg

Az000deg >

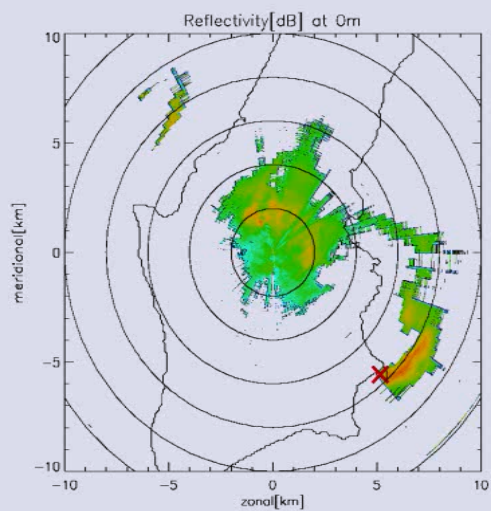
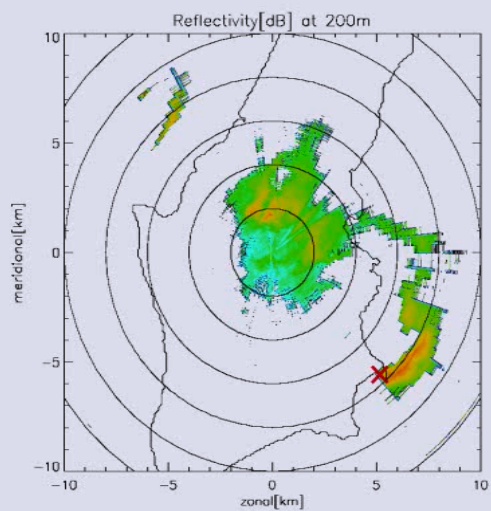
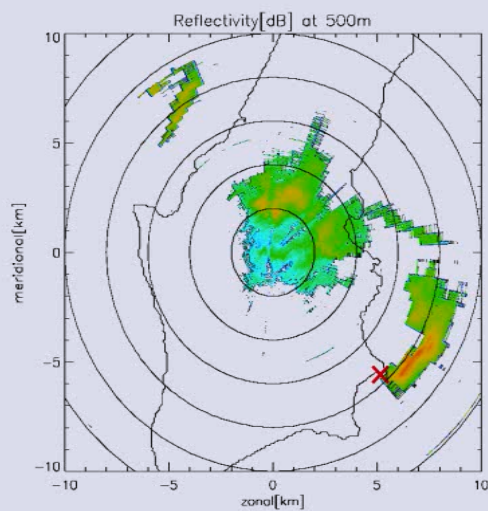
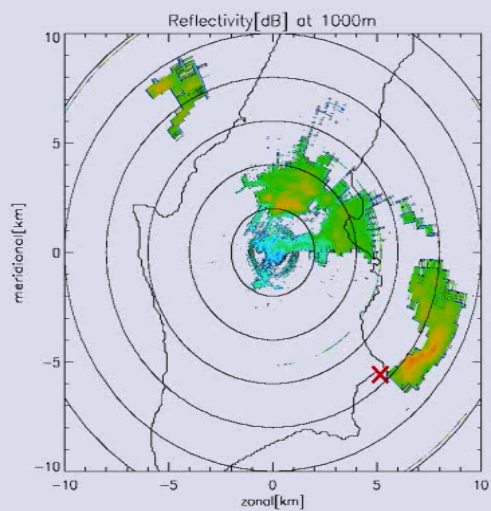
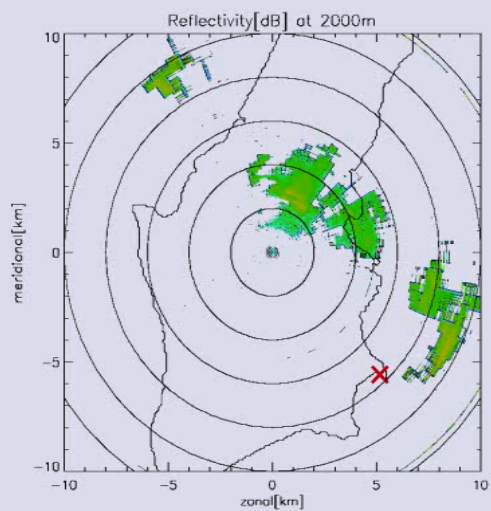
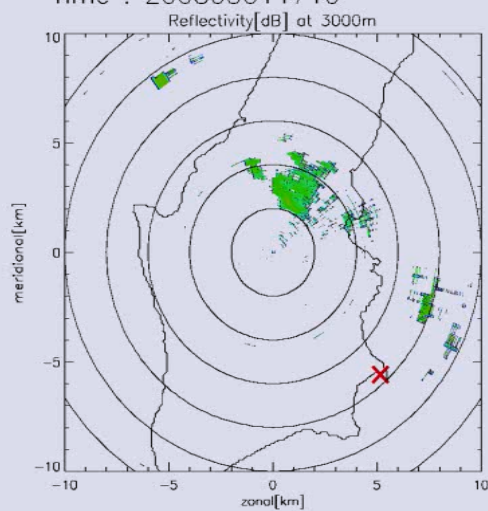


Time : 20080501171020





Time : 200805011710

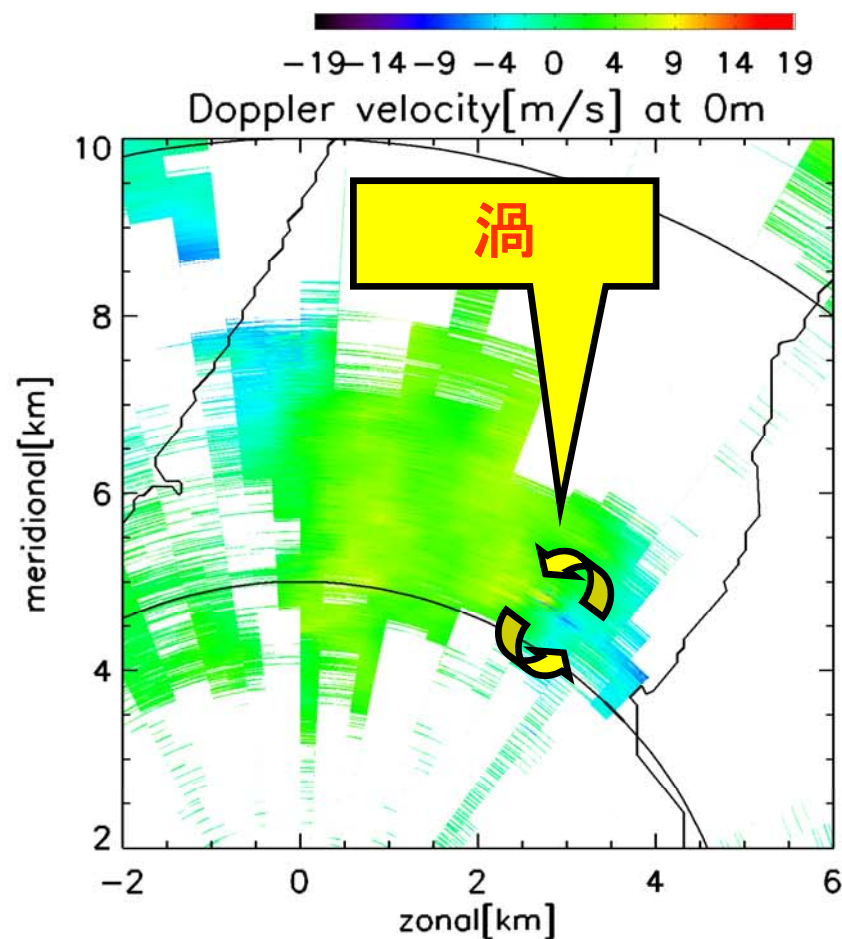
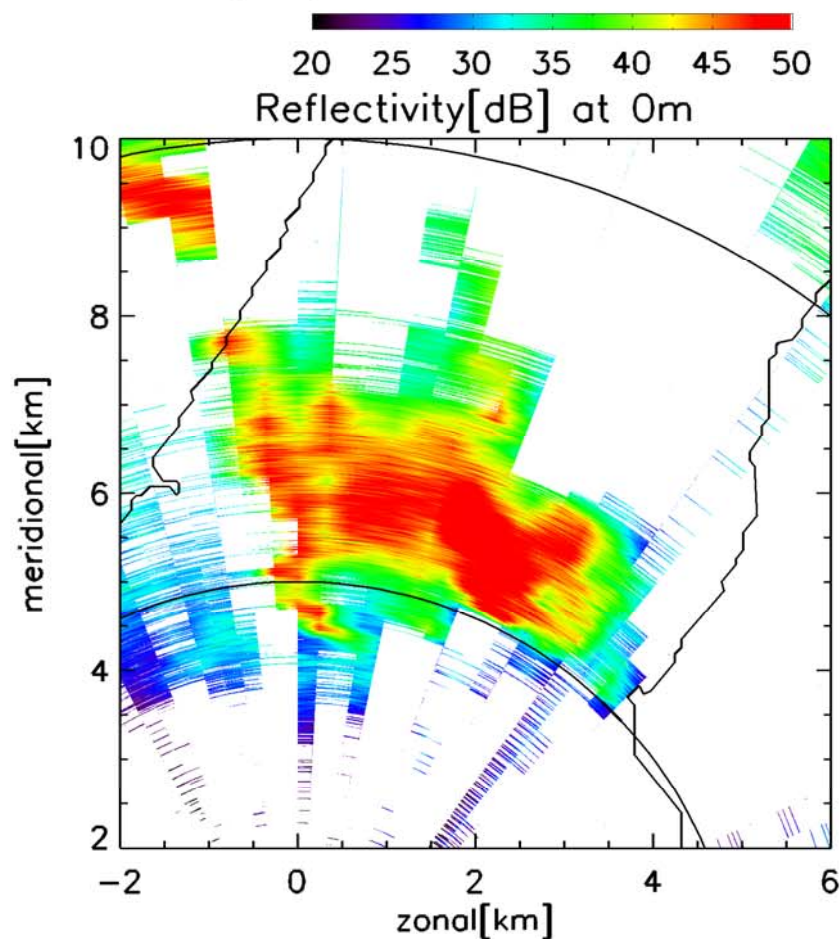




竜巻観測結果

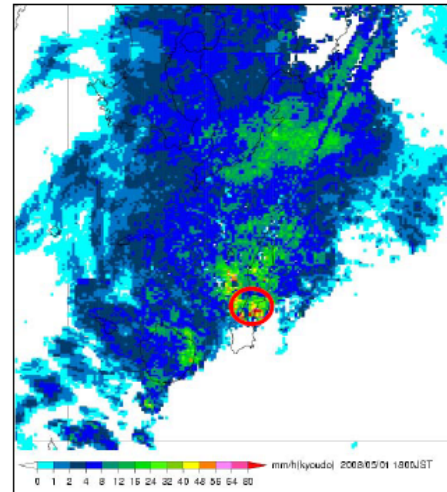
高度0mにおける反射強度及びドップラー速度

Time : 2008/05/01 18:06

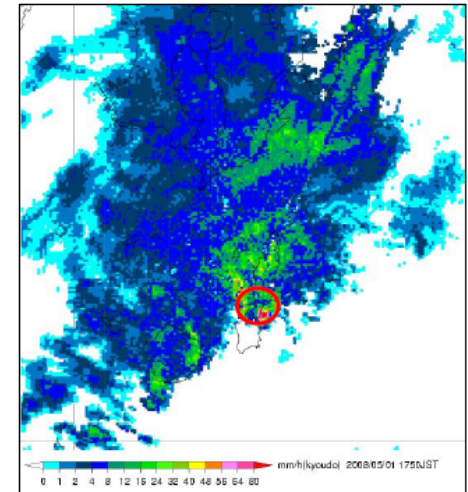


竜巻の大型レーダ画像

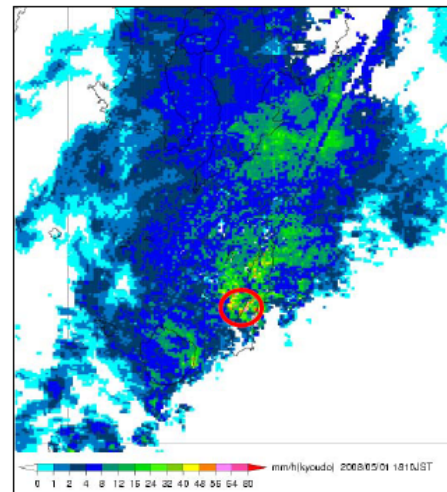
- 広域にわたる雨域は良く捉えられている反面、竜巻、マイソサイクロン、竜巻の親雲の信号を見出すことは難しい。
- 大型レーダでは、検出は不可能。
- 小型レーダの有効性の観測的な実証が出来た。



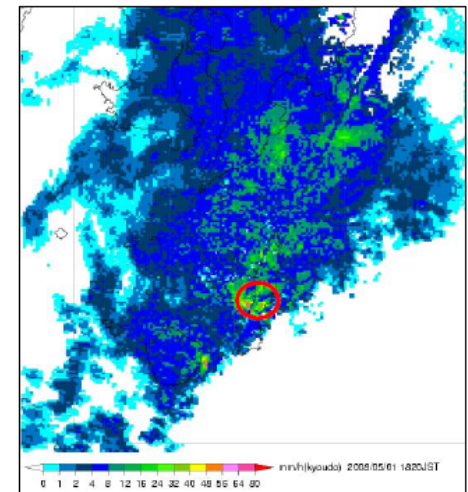
5月1日17時50分のレーダー画像



5月1日18時00分のレーダー画像



5月1日18時10分のレーダー画像



5月1日18時20分のレーダー画像

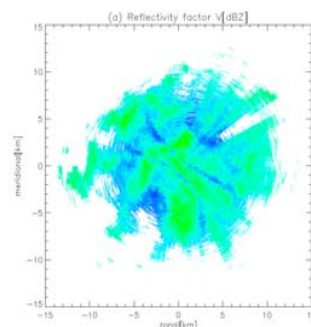


偏波観測結果

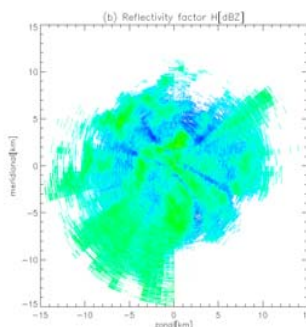
- レーダ反射因子
- ドップラー速度
- 速度幅
- 差分レーダ反射因子
- 偏波間位相差
- 偏波間相関係数

の諸量が導出可能となった。これらのQA (Quality Control)は今後の課題

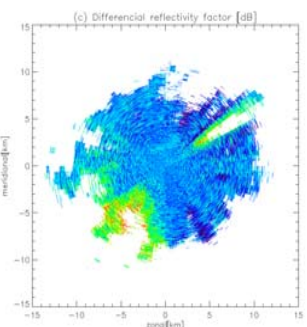
Reflectivity Factor V: Z_v



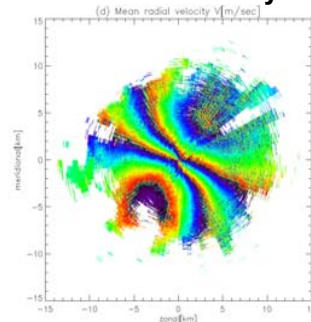
Reflectivity Factor H: Z_h



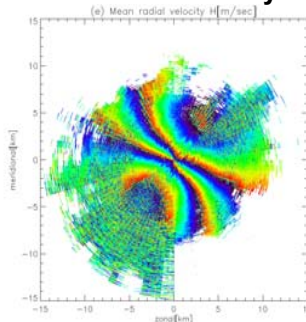
Differential Reflectivity Factor: Z_{dr}



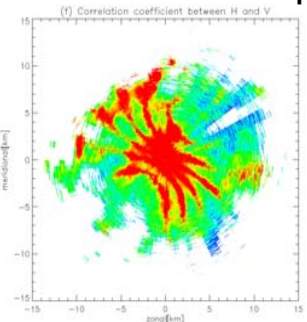
Mean Radial Velocity V: V_v



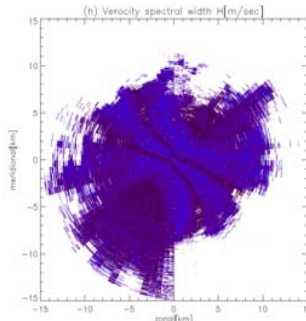
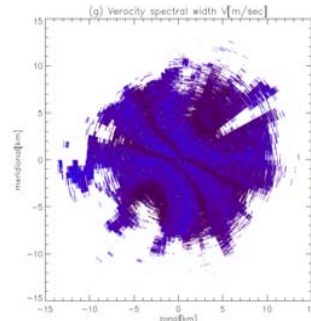
Mean Radial Velocity: V_h



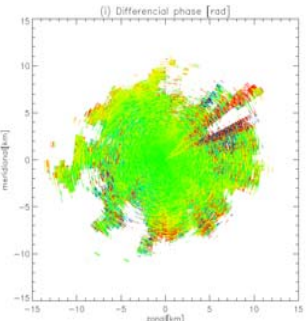
CC between H and V : ρ_{hv}



Velocity Spectral Width V: σ_{vv} Velocity Spectral Width V: σ_{hv}



Differential Phase: ϕ_{dp}

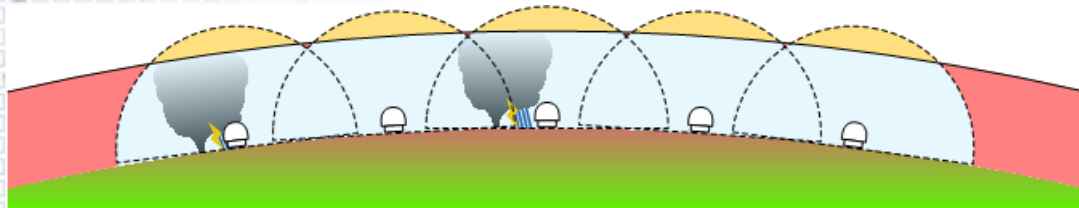


小型レーダネットワーク観測配置想定図

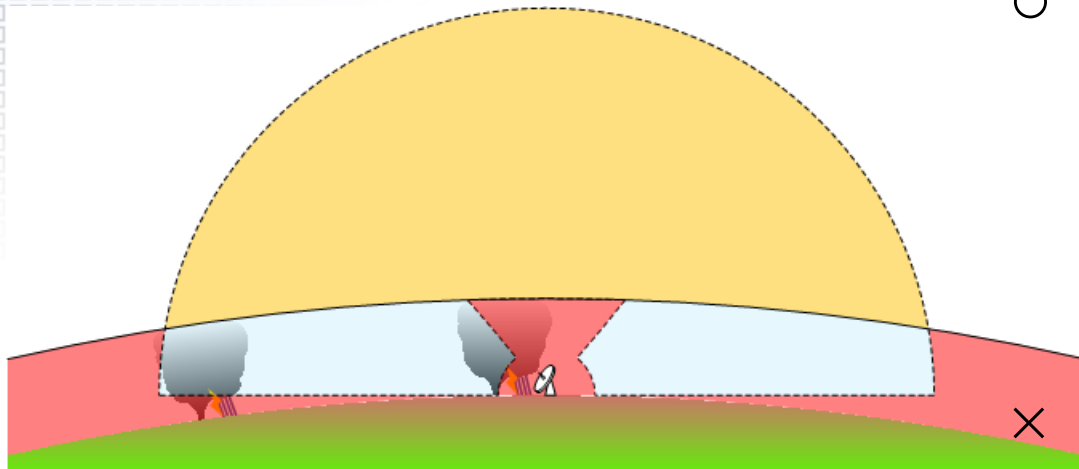




Ku帯広帯域レーダネットワーク



- 低高度の未観測域が少ない
⇒ in 0 deg elevation
300 km range : 5 km altitude
100 km range : 0.5 km altitude
15 km range : 14 m altitude



- 観測領域に無駄が少ない
⇒ 対流圏は**高度10~20 km**
- 高分解能観測
⇒ **range resolution : 数m**
3-dB beam width : 3 deg
time resolution : 1 min/VoS
- × 1台当りの観測領域が狭い
- × **降雨減衰の影響**が大きい



確率論的降雨減衰補正手法

- 決定論的アプローチの問題点
 - Hitchfeld-Bordan solutionに代表される
 - k-Z関係が一意的である
 - 推定誤差の蓄積による**解不安定化**
⇒ **確率論的アプローチ**が有利
- レーダネットワークへの応用
 - **Uncertainty**情報によって、重複観測エリアを推定
 - 降雨の状態は**距離・時間的に相関**がある
⇒ **カルマンフィルタ**を採用
- 雨滴粒径分布推定(DSD)
 - k-Z関係の一意性を解消するためにDSD情報を用いる
⇒ BBRにて**鉛直最近接レンジ(50 m)のDSD**を推定
⇒ **鉛直DSD@50m**は、**全方位の初期値**として仮定

ref) Iguchi and Meneghini
(1994),
Haddad et al. (1996)



降雨減衰補正

<観測量と減衰量の関係>

$$Z_m(r) = Z_e(r) - 2 \int_0^r k(s) ds$$

$$\Rightarrow Z_m(r) = Z_e(r) - 2 \int_0^r k(\mu(s)) ds$$

Z_e : reflectivity factor (dBZ)

Z_m : measured reflectivity factor (dB)

k : specific attenuation (dB/km)

<ガンマ分布を仮定>

ガンマ分布を仮定すると**k-Z関係の係数が μ の関数**で表わせる.

$$k(\mu) = \alpha(\mu) Z_e^{\beta(\mu)}$$

ref) Ulbrich (1983)

<拡張カルマンフィルタに適用>

状態方程式: $Z_e(r + \Delta) = Z_e(r) + w_{Z_e}$

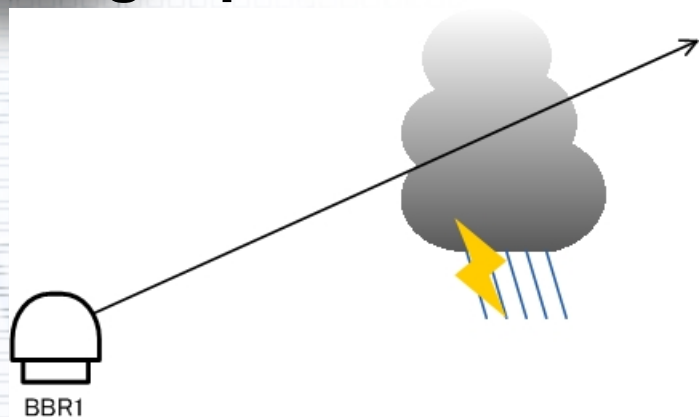
$$\mu(r + \Delta) = \mu(r) + w_{\mu}$$

観測方程式: $Z_m(r) = Z_e(r) - PIA(r) \mp 2\Delta \alpha(\mu(r)) Z_e^{\beta(\mu(r))} + v(r)$

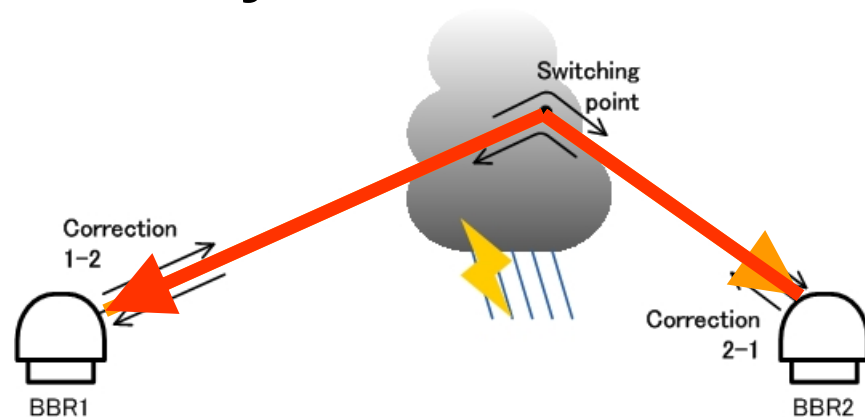
$$(\because PIA(r) = Z_e(r - \Delta) - Z_m(r - \Delta))$$

補正手順

<Single-path correction>

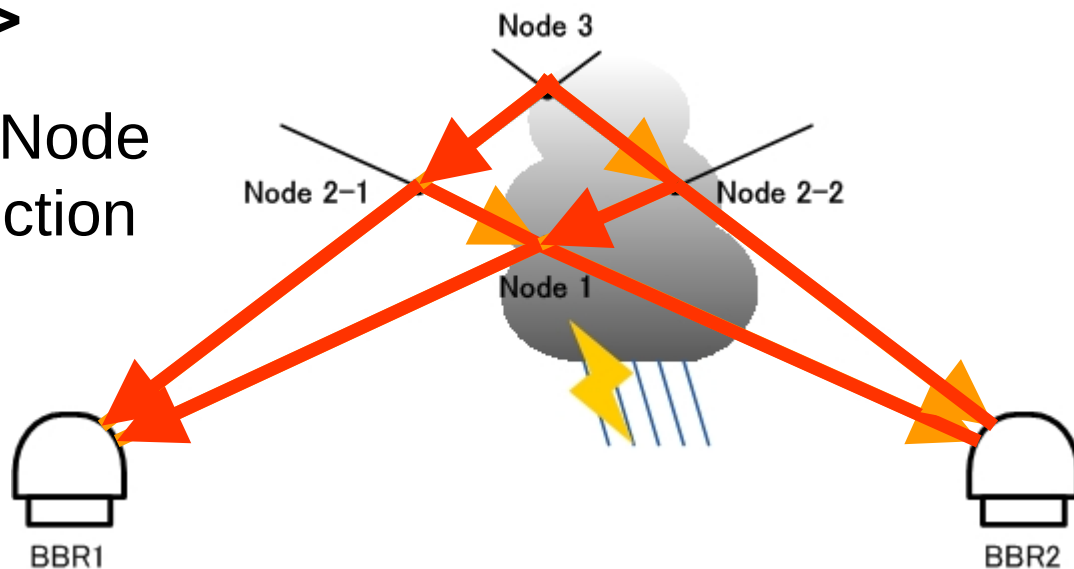


<Two-way correction>



<Network correction>

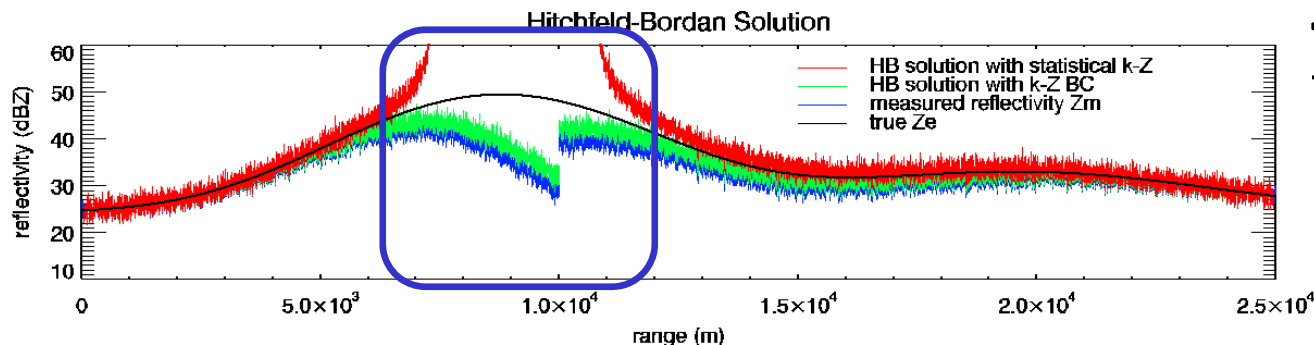
Node 1 $\Rightarrow$ Node 2- $\Rightarrow$ Node 3
3の順でTwo-way correction
を繰り返すことで実現.





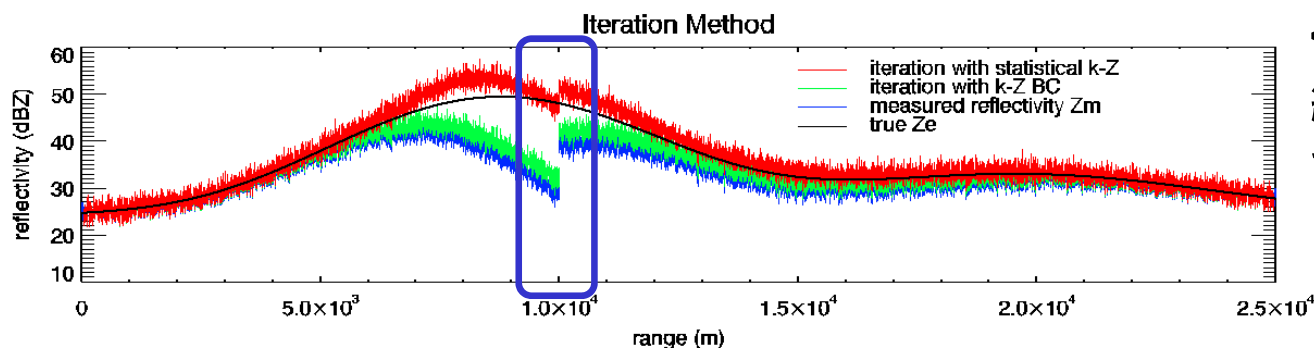
Simulation results

Comparison to conventional methods



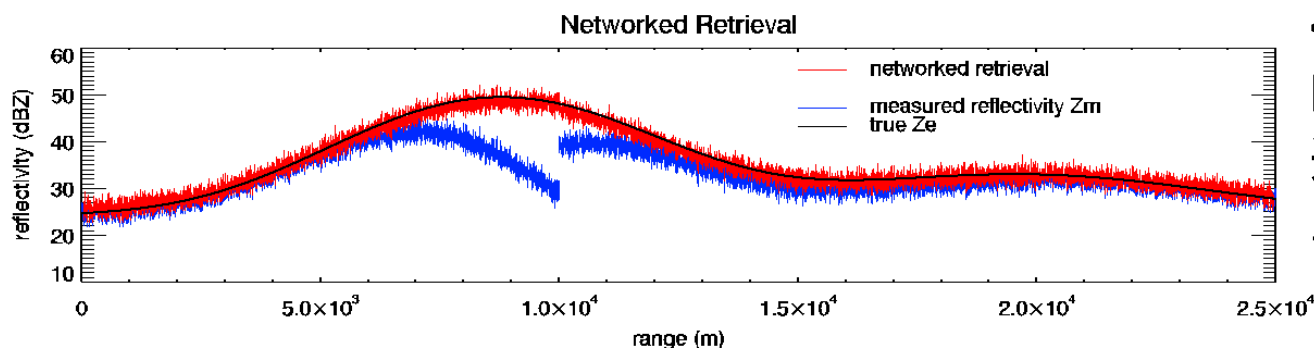
<HB solution>

設定するk-Z関係に依存し、**解は不安定**となる。



<Iteration method>

繰返回数を制限することで安定化. しかし**重複点の推定が問題**.

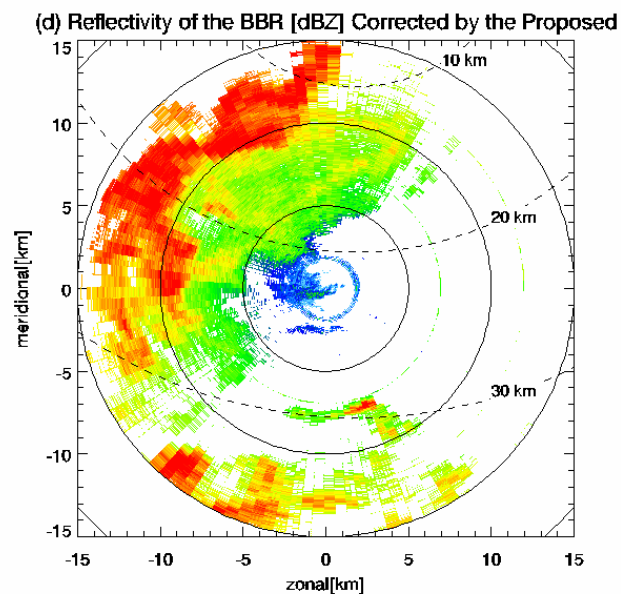
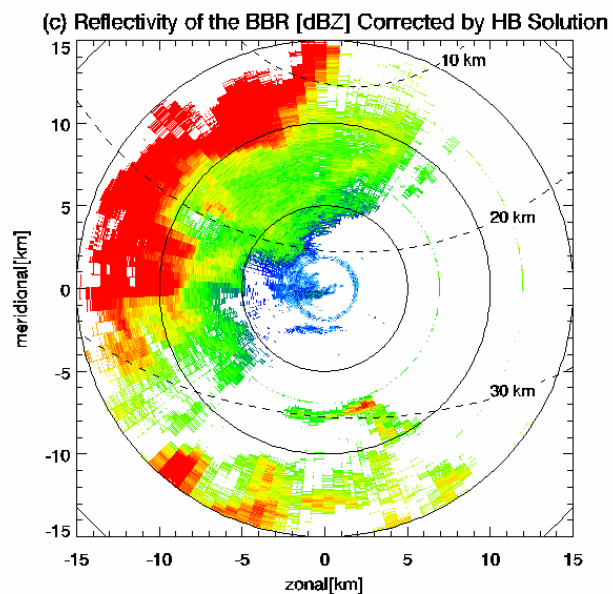
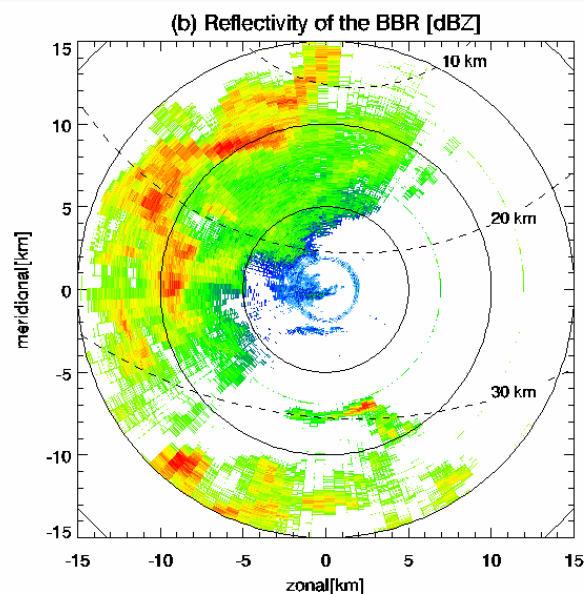
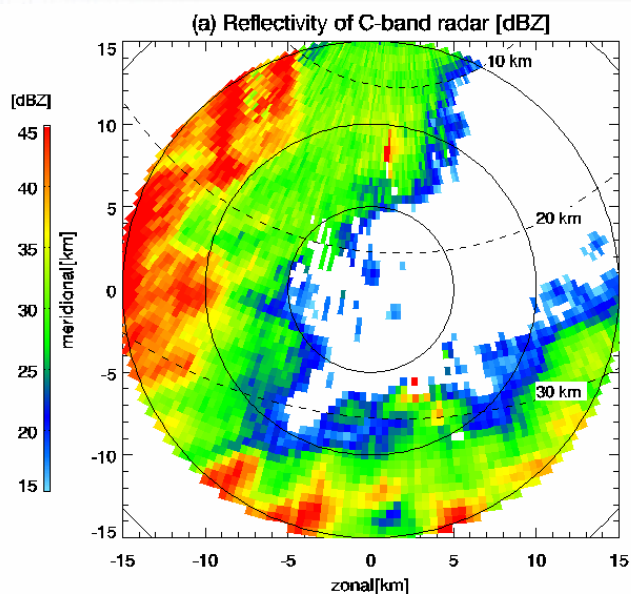


<Networked retrieval>

Forward, Backwardの最適推定により安定した補正が可能.



Cバンドレーダーとの比較



成果等

直接関連する論文発表

- Yoshikawa, E., T. Mega, T. Morimoto, T. Ushio, and Z-I. Kawasaki, Real-Time spectral moments estimation and ground clutter suppression for precipitation radar with high resolution, *IEICE Trans. Commun.*, Vol. E92-B, No.2, pp.578-584, 2009.2
- Nakamura, Y., E. Yoshikawa, M. Akita, T. Morimoto, T. Ushio, Z. Kawasaki, T. Saito, T. Nishida, and N. Sakazume, High-resolution Lightning and Precipitation Monitoring by the Ku-band Broadband Radar and the VHF Broadband Digital Interferometer, *IEEJ Trans*, Vol. 129-A, No. 12, pp. 845-852, 2009
- Yoshikawa, E., Tomoaki Mega, Takeshi Morimoto, Tomoo Ushio, Zen Kawasaki, Katsuyuki Imai, and Shin'ichiro Nagayama, Development and Initial Observation of High Resolution Volume Scanning Radar for Meteorological Application, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, in press
- 他, 関連する論文発表10件程度

直接関連する国際会議発表

- Tomoo Ushio, Eiichi Yoshikawa, Tomoaki Mega, Takeshi Morimoto, and Zen-Ichiro Kawasaki, Broad band radar for high resolution observation of precipitation, IEEE Radar Conference, Rome Italy, TH-S3.4, May 27-29 2008
- 他10件程度, 解説記事2件

シンポジウム招待講演など

- International Symposium on X-band Weather Radar Network — Challenge the Severe Storms —, National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention (NIED)/ Nagoya University/ Engineering Research Center for Collaborative Adaptive Sensing of the Atmosphere USA, Broad band radar for high resolution observation of precipitation, Nov. 5th 2007, NIED Tsukuba Japan
- 他, 10件以上

その他

- 2009年7月 コロラド州立大, 大阪大学大学院工学研究科間学術交流協定を締結(気象レーダ技術に関する研究交流)

広く細かく 庄内空港周辺



庄内空港に進入する航空機。12月から空港周辺の
風観測が行われる ＝酒田市内

宇宙航空研究開発機構（宇宙機構）と大阪大学は、庄内空港周辺の冬期間における風のメカニズムや風が飛行機の通航に与える影響を探る観測を12月にスタートさせる。最新の電波を使った気象レーダーとレーザー光レーダーの2基の観測装置を用いて、風の動きや風力などのデータを広範囲に詳しく収集。乱気流、突風の発生を予測する技術開発を目指す。

冬の風つかめ

庄内空港は1991年10月に開港した。特に冬は強風や

す。着陸ができないと羽田空
港へ引き返したり、ほかの空
港へ行き先を変更する場合が
ある。過去3年間の東京便の
就航率をみると、4・12月は
100%に近いが、1月は97
・6%、2月は95・3%に低
下する。

同便を通航する全日空は以前から就航率を向上させるために、パイロットからの着陸進入時の風向きと機体の揺れ具合の報告を分析するなど、独自に風観測に取り組んでいる。

同社から相談を受けた宇宙機構は海岸沿いに面する他留港のモデルケースになり、将来の技術開発につながる判断。最新の観測装置を開発した大阪大と共同で調査を行うことにした。

装置は2種類。一つは大阪
大が開発した広域帯の電波を
使った気象レーダーで、雪や
降雨時に観測する。観測範囲

従来のものと比べて広範囲に細かく風の変動をチェックできるのが特徴だ。もう一基は民間会社の装置で、晴天時に使用。半径約2式、約75日間隔で、レーザー光を空気中のちりや微粒子に投射して風向、風速を測る。

ームは「2種類の装置を併用する」とどの様な気象条件でも観測が可能になる。こうした調査は全国空港では初めて。広範囲の細かい風の変動を観測すれば、庄内空港周辺の風の特徴が解明できる」と話す。金日空側は「乱気流の発生原因やメカニズムが分かれれば対策を講じることができると語っている」。

観測は12月1日から来年1月31日までの2カ月間、装置は空港周辺に設置し、東京便が運航している時間帯に監視する。収集したデータは東京大、全日空、気象庁気象研究所などとともに分析し、乱気流や強風の発生要因、運航への影響を解析する。

今冬以降の観測も検討中
で、宇宙機構は航空機を使つた風計測も実施する意向だ。将来は風の予測情報を航空機運航に生かす技術開発を目指す。

三、四、五、六、七、八、九、十、十一、十二、十三、十四、十五、十六、十七、十八、十九、二十、二十一、二十二、二十三、二十四、二十五、二十六、二十七、二十八、二十九、三十、三十一、三十二、三十三、三十四、三十五、三十六、三十七、三十八、三十九、四十、四十一、四十二、四十三、四十四、四十五、四十六、四十七、四十八、四十九、五十、五十一、五十二、五十三、五十四、五十五、五十六、五十七、五十八、五十九、六十、六十一、六十二、六十三、六十四、六十五、六十六、六十七、六十八、六十九、七十、七十一、七十二、七十三、七十四、七十五、七十六、七十七、七十八、七十九、八十、八十一、八十二、八十三、八十四、八十五、八十六、八十七、八十八、八十九、九十、九十一、九十二、九十三、九十四、九十五、九十六、九十七、九十八、九十九、一百。



まとめ

- ネットワーク型レーダの概念について紹介した。
- 2重偏波機能を有する高速高分解能レーダの開発結果について報告した。
- 観測結果について紹介を行い、小型レーダ観測の有効性が、竜巻の観測を通じて示された。
- 確率論的手法に基づいた降雨減衰補正手法を開発した結果、従来手法に比して精度の良い補正を行うことが出来た。
- 同方法を用いてネットワーク型降雨減衰補正手法を提案し、開発した。