

37. 北海道において2014年9月に発生した 線状降水帯の内部構造

長尾 賢汰¹・山田 朋人²

¹非会員 北海道大学工学部環境社会工学科 (〒060-8628札幌市北区北13条西8丁目)

E-mail: cloud7black@gmail.com

²正会員 北海道大学大学院工学研究院 准教授 (〒060-8628札幌市北区北13条西8丁目)

E-mail: tomohito@eng.hokudai.ac.jp

本研究は線状降水帯における連続的な積乱雲の形成とその定在性が大気中における内部波と関係があると予想し、その特徴を明らかにしようとするものである。本書は線状降水帯を内部波的に議論するに当たり使用する2つの解析手法を説明し、その途中経過を報告するものである。

Key Words : Line-shaped rain bands, Internal waves, Doppler Analysis, WRF

1章 はじめに

近年、日本では線状降水帯の発生数が増加している傾向にある。線状降水帯は線状に伸びる降水帯でありその定在性から局所的な豪雨をもたらす。バックビルディング現象等により、積乱雲が繰り返し発生することで線状降水帯は形成される。規模は、幅 20~50km、長さ 50~200km であり数時間に及び同じ地点に留まる傾向がある。代表的な発生例として 2014 年 9 月 11 日に発生した北海道石狩地方の大雨があり、土砂崩れなど多大なる被害をもたらした。その降雨概形を図 1 に示す。図 1 は 11 日午前 0 時から 6 時間の積算降雨である。線状降水帯の発生は地形に起因するものもあるが、そうでない例もある。したがって発生位置の予測は困難な状況である。

本研究の目的は線状降水帯の特徴を大気中の内部波と関連付け解明することである。周期的な積乱雲の発生が大気中の内部波と関係があると予想し、対象とする線状降水帯に対してレーダー解析および数値モデルによりその特徴を内部波的に議論していく。

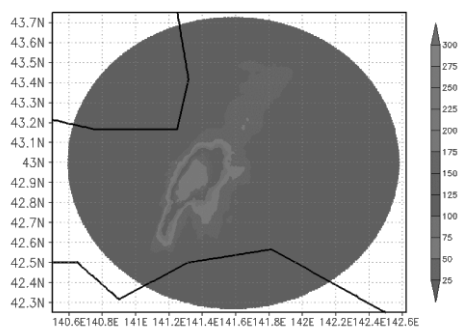


図1 X-band MP レーダーにより観測された
線状降水帯概形 (鈴木・山田 2015 より)

2章 解析手法

(1) ドップラー解析

本解析は気象庁レーダーやX-band MPレーダーにより観測された反射強度およびドップラー速度を用いて気象場の構造を明らかにするものである。本研究ではこの解析を用いて対象とする線状降水帯の3次元構造を明らかにし、その断面から内部波のパラメータが得られると考える。反射強度とは降水粒子に反射されて戻ってくる電波の強さをいう。雲の中に含まれる降水粒子の数が多いほど、また粒子が大きいほど、反射されて戻ってくる電波の強さは大きくなる¹⁾。ドップラー速度は動いている降水粒子から反射されて戻ってきた電波の周波数の送信時に対する変化量から求められる降水粒子のレーダービーム方向の速度である¹⁾。この周波数の変化量をドップラーシフトという²⁾。扱うレーダーはPPIモードで観測を行っている。PPIモードとはアンテナの仰角を一定にして、方位角方向に360°回転させ観測する方法である。したがって、観測されるデータ群は仰角と時間の組み合わせとなり極座標系で記録される。まず、本解析では解析を容易にするため記録されたレーダー毎に異なるデータフォーマットから統一したデータフォーマットにデコードする。次に1つのPPIごとのデータを複数収集し、3次元的な解析をするために1つのファイルに編集する。このファイルを3D-dataという。このとき編集したデータはほぼ同時刻だが若干のずれがある。次にその編集したデータ内からPPIデータをカーテシアン座標系(X-Y系)の格子点に内挿し、可視化やデータ処理が容易となる操作を行う。内挿処理は重み付き平均により行う。カーテ

シアン座標の格子点を中心とする影響円を考え、そこに含まれる極座標データを格子点からの距離に応じた重みを付加して平均する。重みにはCressman型の関数を使用している。次にVAD解析を行う。比較的高い仰角のPPIデータを用いて、水平風（風速と風向）の高度分布を求める方法である。レーダーからの距離が一定の円周上のデータを用いて、この解析を行うことで風速場を得ることができる。現在はこの手法についてはここまでわかっており、今後この先の解析を進め、対象とする線状降水帯の3次元構造を得る予定である。

(2) WRF

WRFとは、米国のNCARおよびNCEPにより開発されたメソスケール気象モデルである。WRFは集中豪雨や雷雨など水平スケールが10～100kmの気象現象を扱う非静力学モデルであり、約1kmメッシュでの計算が可能である。主に初期値、境界値が現実にとどれだけ近いかによって予測精度が決まってくるが、近年同化技術を導入し、センサーによる観測データを活用した補正を行うことが可能になったことから、その精度向上はめざましいものがある。計算に使用する基礎方程式を図2に示す。(1)～(3)はxyn座標系の運動方程式、(4)は質量保存則、(5)は温度保存式、(6)は状態方程式、(7)はジオポテンシャル式、(8)は相対比湿保存式である³⁾。

3章 結果

レーダー解析については新千歳レーダーの2014年9月11日のデータを使用し施行中であり、PPIデータをカーテシアン座標系に内挿した2次元の反射強度分布の出力に成功している。得られた反射強度分布を図3に示す。分布図上部にデータの時刻と仰角が記されている。十字線交点がレーダー位置であり、横軸がレーダー位置を原点とした際の東西距離、縦軸が南北距離である。分布図右側に反射強度の分布ゲージを示しており、単位はdBZである。仰角が小さいものは低い位置の情報となり、仰角が大きくなるにつれて高い位置の情報となる。

WRFについては2014年9月10日午前9時から12日午後7時までの範囲で計算したうちの11日午前0時から6時間の積算降雨の結果を図4に示す。この計算の空間解像度は約3.3kmである。レーダーによる観測である図1と同時間同範囲のものであり比較するとほぼ同位置に線

状降水帯が表れている。降雨強度に関してはWRFが低いものとなっているが、地形データ等の精度を改善すればレーダー観測の値に近づくのではないかと考える。

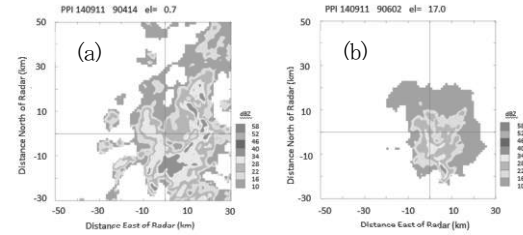


図3 反射強度分布

(a) 仰角 0.7° (b) 仰角 17.0°

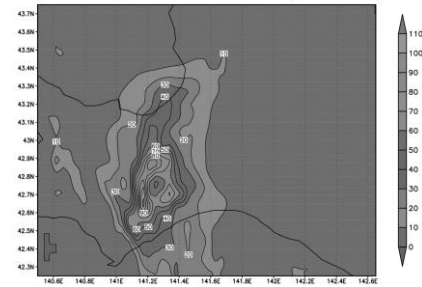


図4 WRFによる計算結果

4章 まとめと今後の予定

レーダー解析については反射強度の2次元分布まで求めることができています。今後は次のステップであるVAD解析による風速場の解析を進めるとともにその先のステップを学ぶとともにWRFの計算結果の改善を進める。そして、両者から最終的に線状降水帯の3次元構造を得る。そして、その断面から内部波としてのパラメータを得るとともにその構造を内部波的に議論していく予定である。

謝辞：X-MP レーダーデータを出力可能なデータ形式に変更する際に、気象庁よりご提供いただいたdraftを使用した。
本研究はMEXT/SOSEI (theme C-i-c), JSPS 科研費(26242036, 15K18118)の成果の一部である。

参考文献

- 1) 気象庁：ドップラーレーダーによる解析について、
http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/tomado/dr_notes.pdf, 2015/06/19.
- 2) 深尾昌一郎・浜津享助：気象と大気のレーダーリモートセンシング，改訂第2版，
京都大学学術出版会，2004.
- 3) 三石真也・角哲也・尾関敏久：WRFによる降雨予測を活用したダム操作に関する検討，ダム工学，20.2，pp. 94-104，2010.

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial U}{\partial t} + m \left[\frac{\partial}{\partial x} (Uu) + \frac{\partial}{\partial y} (Uv) \right] + \frac{\partial}{\partial \eta} (\Omega u) &= \left(\mu_d \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \mu_d \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right) + \left(\frac{\alpha}{\alpha_d} \right) \left(\mu_d \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \mu_d \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right) = F_x - (1) \quad \frac{\partial U}{\partial t} + m \left[\frac{\partial}{\partial x} (Uu) + \frac{\partial}{\partial y} (Uv) \right] + \frac{\partial}{\partial \eta} (\Omega u) = F_x - (1) \\
 \frac{\partial V}{\partial t} + m \left[\frac{\partial}{\partial x} (Uv) + \frac{\partial}{\partial y} (Vv) \right] + \frac{\partial}{\partial \eta} (\Omega v) &= \left(\mu_d \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \mu_d \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right) + \left(\frac{\alpha}{\alpha_d} \right) \left(\mu_d \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \mu_d \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right) = F_y - (2) \quad \frac{\partial V}{\partial t} + m \left[\frac{\partial}{\partial x} (Uv) + \frac{\partial}{\partial y} (Vv) \right] + \frac{\partial}{\partial \eta} (\Omega v) = F_y - (2) \\
 \frac{\partial \Omega}{\partial t} + m \left[\frac{\partial}{\partial x} (U\Omega) + \frac{\partial}{\partial y} (V\Omega) \right] + \frac{\partial}{\partial \eta} (\Omega^2) &= \left(\mu_d \frac{\partial^2 \Omega}{\partial x^2} + \mu_d \frac{\partial^2 \Omega}{\partial y^2} \right) + \left(\frac{\alpha}{\alpha_d} \right) \left(\mu_d \frac{\partial^2 \Omega}{\partial x^2} + \mu_d \frac{\partial^2 \Omega}{\partial y^2} \right) = F_\Omega - (3) \quad \frac{\partial \Omega}{\partial t} + m \left[\frac{\partial}{\partial x} (U\Omega) + \frac{\partial}{\partial y} (V\Omega) \right] + \frac{\partial}{\partial \eta} (\Omega^2) = F_\Omega - (3) \\
 \frac{\partial \rho}{\partial t} + m \left[\frac{\partial}{\partial x} (\rho u) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho v) \right] + \frac{\partial}{\partial \eta} (\rho \Omega) &= -\rho \left(\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} \right) - \rho \left(\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} \right) = F_\rho - (4) \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} + m \left[\frac{\partial}{\partial x} (\rho u) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho v) \right] + \frac{\partial}{\partial \eta} (\rho \Omega) = -\rho \left(\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} \right) - \rho \left(\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} \right) = F_\rho - (4) \\
 \frac{\partial \theta}{\partial t} + m \left[\frac{\partial}{\partial x} (\theta u) + \frac{\partial}{\partial y} (\theta v) \right] + \frac{\partial}{\partial \eta} (\theta \Omega) &= \left(\mu_d \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \mu_d \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} \right) + \left(\frac{\alpha}{\alpha_d} \right) \left(\mu_d \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \mu_d \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} \right) = F_\theta - (5) \quad \frac{\partial \theta}{\partial t} + m \left[\frac{\partial}{\partial x} (\theta u) + \frac{\partial}{\partial y} (\theta v) \right] + \frac{\partial}{\partial \eta} (\theta \Omega) = \left(\mu_d \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \mu_d \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} \right) + \left(\frac{\alpha}{\alpha_d} \right) \left(\mu_d \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \mu_d \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} \right) = F_\theta - (5) \\
 \frac{\partial q}{\partial t} + m \left[\frac{\partial}{\partial x} (q u) + \frac{\partial}{\partial y} (q v) \right] + \frac{\partial}{\partial \eta} (q \Omega) &= \left(\mu_d \frac{\partial^2 q}{\partial x^2} + \mu_d \frac{\partial^2 q}{\partial y^2} \right) + \left(\frac{\alpha}{\alpha_d} \right) \left(\mu_d \frac{\partial^2 q}{\partial x^2} + \mu_d \frac{\partial^2 q}{\partial y^2} \right) = F_q - (6) \quad \frac{\partial q}{\partial t} + m \left[\frac{\partial}{\partial x} (q u) + \frac{\partial}{\partial y} (q v) \right] + \frac{\partial}{\partial \eta} (q \Omega) = \left(\mu_d \frac{\partial^2 q}{\partial x^2} + \mu_d \frac{\partial^2 q}{\partial y^2} \right) + \left(\frac{\alpha}{\alpha_d} \right) \left(\mu_d \frac{\partial^2 q}{\partial x^2} + \mu_d \frac{\partial^2 q}{\partial y^2} \right) = F_q - (6) \\
 \frac{\partial \phi}{\partial t} + m \left[\frac{\partial}{\partial x} (\phi u) + \frac{\partial}{\partial y} (\phi v) \right] + \frac{\partial}{\partial \eta} (\phi \Omega) &= \left(\mu_d \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \mu_d \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} \right) + \left(\frac{\alpha}{\alpha_d} \right) \left(\mu_d \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \mu_d \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} \right) = F_\phi - (7) \quad \frac{\partial \phi}{\partial t} + m \left[\frac{\partial}{\partial x} (\phi u) + \frac{\partial}{\partial y} (\phi v) \right] + \frac{\partial}{\partial \eta} (\phi \Omega) = \left(\mu_d \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \mu_d \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} \right) + \left(\frac{\alpha}{\alpha_d} \right) \left(\mu_d \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \mu_d \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} \right) = F_\phi - (7) \\
 \frac{\partial q_s}{\partial t} + m \left[\frac{\partial}{\partial x} (q_s u) + \frac{\partial}{\partial y} (q_s v) \right] + \frac{\partial}{\partial \eta} (q_s \Omega) &= \left(\mu_d \frac{\partial^2 q_s}{\partial x^2} + \mu_d \frac{\partial^2 q_s}{\partial y^2} \right) + \left(\frac{\alpha}{\alpha_d} \right) \left(\mu_d \frac{\partial^2 q_s}{\partial x^2} + \mu_d \frac{\partial^2 q_s}{\partial y^2} \right) = F_{q_s} - (8) \quad \frac{\partial q_s}{\partial t} + m \left[\frac{\partial}{\partial x} (q_s u) + \frac{\partial}{\partial y} (q_s v) \right] + \frac{\partial}{\partial \eta} (q_s \Omega) = \left(\mu_d \frac{\partial^2 q_s}{\partial x^2} + \mu_d \frac{\partial^2 q_s}{\partial y^2} \right) + \left(\frac{\alpha}{\alpha_d} \right) \left(\mu_d \frac{\partial^2 q_s}{\partial x^2} + \mu_d \frac{\partial^2 q_s}{\partial y^2} \right) = F_{q_s} - (8)
 \end{aligned}$$

図2 WRFのxyn座標系における基礎方程式