

第5章 高解像度降水ナウキャストの改善*

5.1 はじめに*

高解像度降水ナウキャストは、2014年8月に運用を開始し、高解像度・高精度の降水解析と予測を提供している。気象庁では、運用開始後も精度改善に関する調査・開発を継続的に進めており、運用開始1周年にあたる平成2015年8月に、降水解析と予測の双方について処理の改良を実施した。降水の解析では、レーダー電波の混信などが原因となって発生するノイズを除去する機能を加え、降水解析の精度改善を実施した。また、降水の予測においては、組織化し発達する積乱雲を予測する処理に改良を加えている。ここでは、これらの改良について解説する。

5.2 降水解析の改良

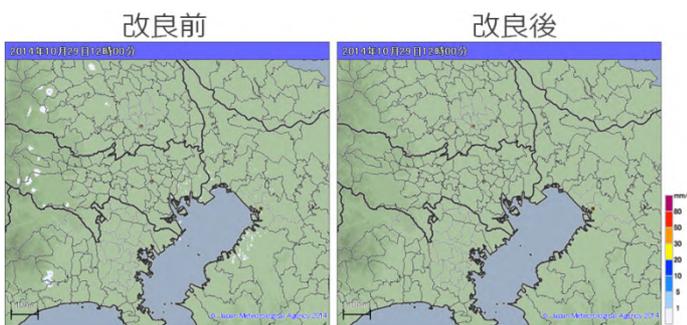
高解像度降水ナウキャストは、局地的大雨を始めとする降水の実況監視と予測機能を強化するため、気象庁気象ドップラーレーダーと国土交通省XバンドMPレーダの2つのレーダー観測網、高層観測網、並びに地上観測網から得られる観測データを総合的に利用し、陸上では250m解像度の降水解析及び1時間先までの予測を提供している（木川2015）。

降水解析においては、レーダー観測に実際の降水によるものではないエコーが含まれた場合に、地上に設置された雨量計との雨量値比較に基づいて、それらの影響を軽減する処理を運用開始当初から搭載していた。しかし、その処理に係数固定の計算式を使用していたため、電波観測環境を含むレーダーの特性変化に十分には対応できないことがあった。

そこで、5分毎、レーダー毎に異常値、非降水エコー、及び降水エコーの割合を降水強度データと品質管理情報から計算し、それらの割合に基づいて、異常値・非降水エコーの除去機能を動的に制御する方式を導入した。具体的には、異常値・非降水エコーの割合が予め設定された閾値（10%）を超えると、孤立点除去機能が動作を始める。この孤立点除去とは、レーダーの距離方向にエコーの「なし」、「あり」、「なし」のパターンが現れたときに、中央のエコー「あり」を異常値とみなして、無効化する処理である。レーダーの距離方向のサンプリング間隔は、気象庁の気象ドップラーレーダーが250m、国土交通省のXバンドMPレーダが150mである。これらのサンプリング間隔にビームの面積を掛け合わせた体積に比べて、体積が小さい降水エコーは無効値として扱われ、降水の解析値には現れないことになる。

第5.1図は孤立点除去機能の効果を示している。左は除去を行う前、右が後である。このときは、関東平野は晴天であったが、改良前の解析値（左）には東京湾沿岸部、埼玉県から神奈川県にかけての山沿いに弱い降水が解析されていたが、改良後（右）は弱い降水は現れていない。

孤立点除去は、文字通り点の除去であるため、レーダー電波の混信のように、広い面積



第5.1図 孤立点除去の効果

左が除去なし、右が除去あり。東京湾沿岸部（図の中央）と埼玉県から神奈川県にかけての山沿い（図の左側）に見られる非降水エコーは、孤立点除去によって取り除かれている。

* 運動学的予測グループ（木川誠一郎）

を持つノイズに対しては、別の除去機能が働く。一般的に混信によるノイズは、第5.2図の中央の楕円内に見られる南北の走向を持つノイズのように、レーダーを起点とした放射状の線として現れることが多い。そこで、方位角方向にエコーが「なし」、「あり」、「なし」のパターン抽出を行い、方位角に対する出現割合を作成する(第5.2図の左)。出現割合にはノイズに対応する明瞭なピークが見られ、降水エコーの面積割合に基づく閾値¹以上となった場合は「ノイズの可能性が高い」と判定する。そして、エコーに鉛直構造²が無い場合に限り、無効値化することによりノイズ除去を行う(第5.2図の右)。これは実際に存在する線状の降水域が偶然にレーダー起点から放射状に存在することもあり得るからである。

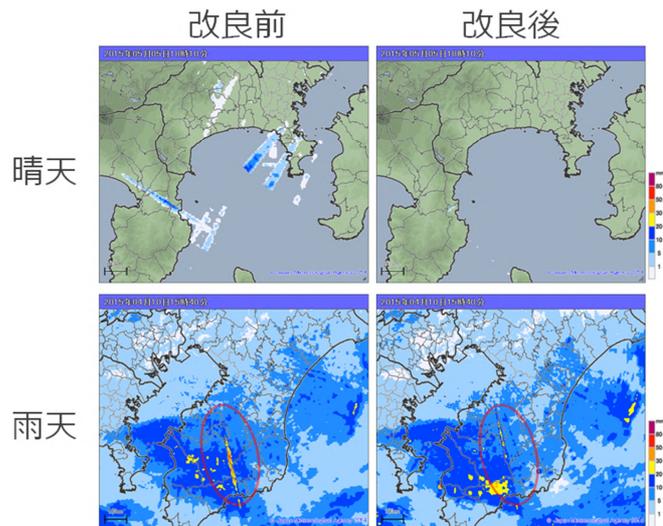
1 降水エコーの面積割合に基づく閾値は、(降水強度0.15mm/h以上の面積割合)×(出現割合)×50mm/hとして計算する。このように閾値を動的に制御することにより、雨天では実在するエコーを除去せず、晴天域では弱いノイズまで除去することができる(第5.3図)。

2 エコーの鉛直構造の有無は、複数の仰角にエコーが存在すれば鉛直構造あり、一つの仰角のみでは鉛直構造なし、と判断する。



第5.2図 線状ノイズ除去

左はレーダーの方位角に対するエコー「なし」、「あり」、「なし」のパターンの出現数を距離方向のサンプリング数で除した出現割合を示す。出現割合が1であれば距離方向にすべて、エコー「なし」、「あり」、「なし」のパターンが出現したことを意味する。このグラフには、中央の図に示す楕円内に南北の走向を持つノイズに対応するピークが見られる。右はノイズ除去を行った解析値であり、ノイズのみが除去されていることがわかる。



第5.3図 雨天と晴天時の線状ノイズ除去の比較

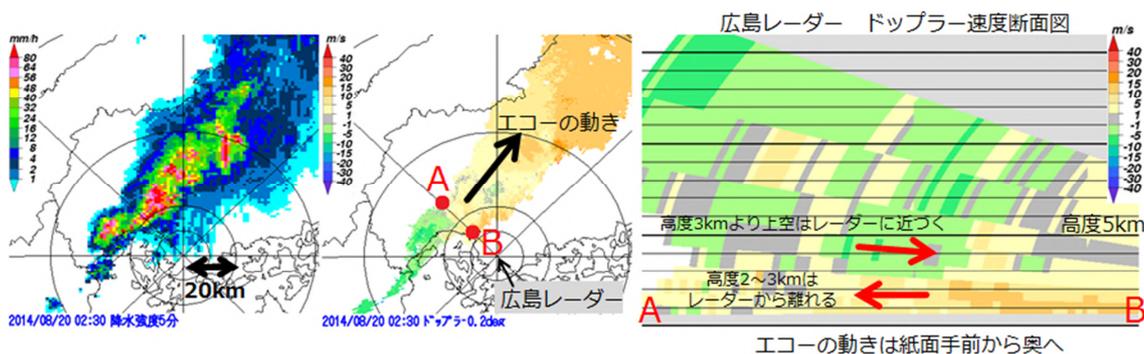
上段が晴天時、下段が雨天時の線状ノイズ除去の効果を示している。晴天時には、弱いノイズまで除去している。一方、雨天時は楕円の中のノイズを弱めているが、完全には除去していない。なお、線状のノイズ以外の領域にも降水強度の若干の変化が見られるが、これはブライトバンドの影響を軽減する機能(木川 2015の58頁)の調整を行った結果である。

5.3 降水予測の改良

高解像度降水ナウキャストの運用を開始した2014年8月は、広島県広島市の大雨に代表される「平成26年8月豪雨」と命名された記録的な大雨が続いた。これらの大雨事例について、観測データに基づいた詳細な解析を行った結果、降水予測の改良につながる糸口が見出された。

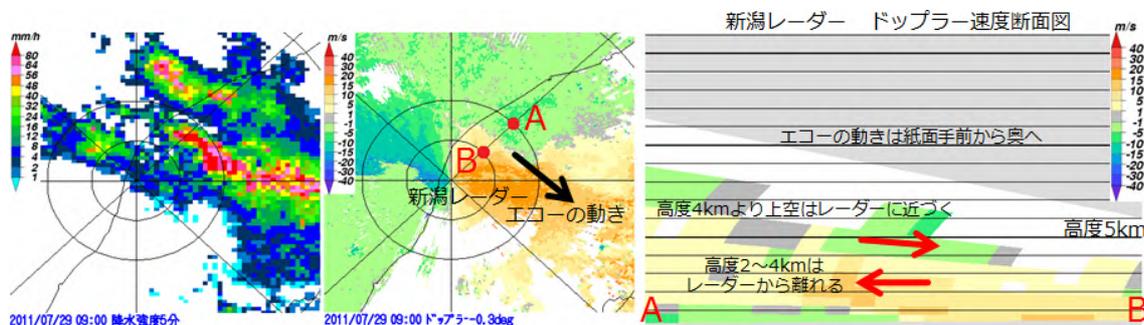
第5.4図の左は、広島市の大雨において、雨が最も強くなる直前の全国合成レーダー降水強度である。同図の中央は、気象庁の広島レーダーが観測したドップラー速度データを示し、エコーが南西から北東に移動していたことから、広島市の風上側ではマイナス（近づく）のドップラー速度が、風下側ではプラス（遠ざかる）が観測された。ここで、エコーの動きに垂直な線(A-B)においてドップラー速度の鉛直断面を見ると、高度2~3kmはレーダーから遠ざかる動き、一方、高度3km以上はレーダーに近づく動きが見られた（同図の右）。

そこで、平成23年7月新潟・福島豪雨（第5.5図）、平成24年7月九州北部豪雨（第5.6図）、平成25年（2013年）8月9日の秋田県の局地的大雨（第5.7図）及び平成25年（2013年）7月28日の山口県における局地的大雨（第5.8図）について、同様の手法で解析したところ、広島市の大雨と同様に、風上から見て最も下層に左向き、その上空に右向きのドップラー速度の組合せが見られた。これらの事例に共通して、この組合せが見られることから、積乱雲が発達しながら組織化してもたらされる1時間に100mmを超えるような大雨の発生メカニズムと何らかの関係があることを示唆していた。



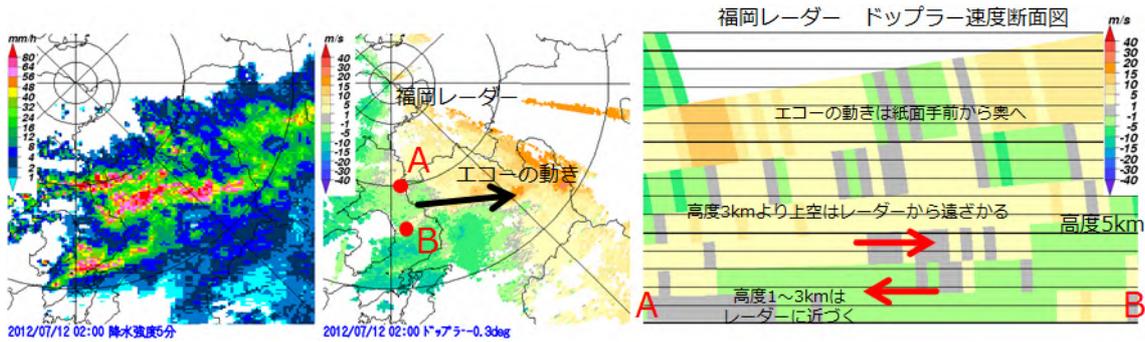
第5.4図 広島レーダーのドップラー速度断面図に見られる特徴

2014年8月20日未明に広島市に記録的な大雨をもたらした降水地域のレーダー観測データ。左は全国合成レーダー降水強度、中央は広島レーダーのドップラー速度の平面図、右は同レーダーの鉛直断面図。同心円の中心は広島レーダー。3時30分に広島市安佐北区で1時間に約120mmの降水量を観測（記録的短時間大雨情報）。図の構成は第5.8図まで同じ。

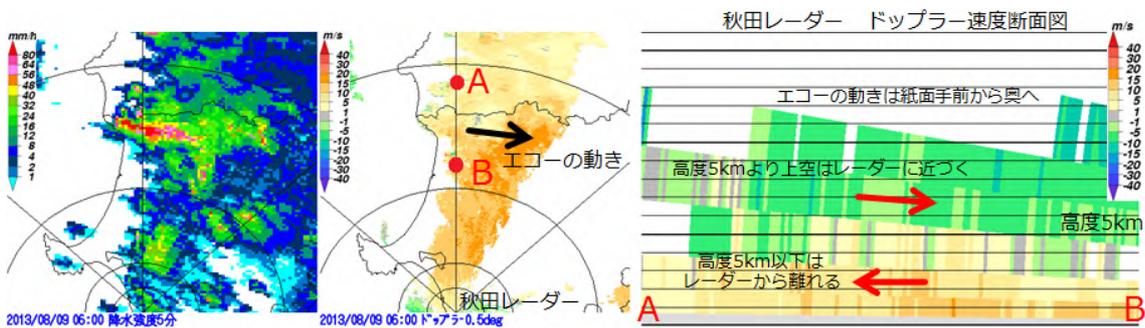


第5.5図 2011年7月29日09時00分（平成23年新潟・福島豪雨）

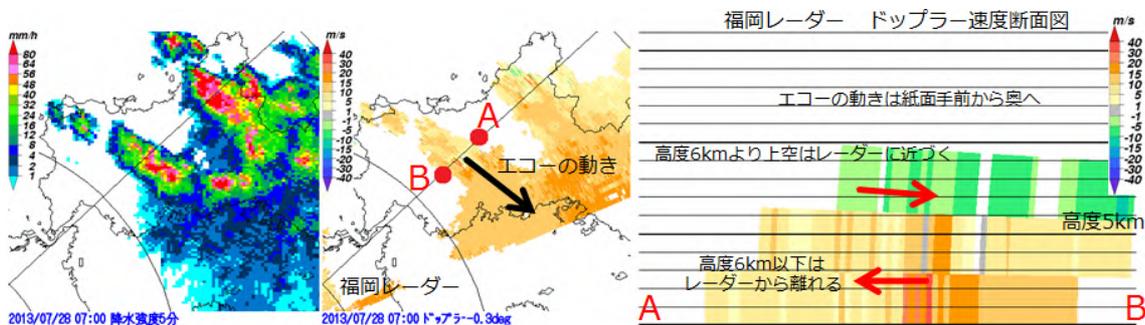
9時30分に新潟市南区、西蒲区で1時間に約80mmの降水量を観測（記録的短時間大雨情報）。



第5.6図 2012年7月12日03時00分(平成24年九州北部豪雨)
02時30分までの1時間に熊本県阿蘇市で約120mm、菊池市で約110mmの降水量を観測(記録的短時間大雨情報)。



第5.7図 2013年8月9日06時00分 秋田県の局地的大雨
7時00分に秋田県大館市北部、北秋田市北部、藤里町、八峰町で1時間に約110mmの降水量を観測(記録的短時間大雨情報)。



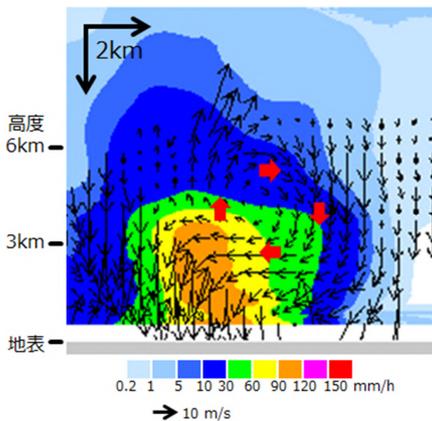
第5.8図 2013年7月28日07時00分 山口県の局地的大雨
8時00分に山口県美祢市美東で1時間に約100mmの降水量を観測(記録的短時間大雨情報)。

局地的大雨は、数 km から十数 km 規模の現象であることから、現象の理解には雨域内の降水粒子の動きなどを詳細に解析する必要がある。第5.4図に示した広島市の大雨事例では、気象庁の広島レーダーが約30kmの距離に、また、国土交通省 Xバンド MP レーダの牛尾山、野貝原レーダがそれぞれ約10km、20kmの距離に位置しており、3つのレーダーが大雨の領域を横、風上、及び風下から、それぞれ観測していた。このため、これら3つのレーダーの観測データを利用して、大雨をもたらした降水域の立体構造を詳しく解析することができた。

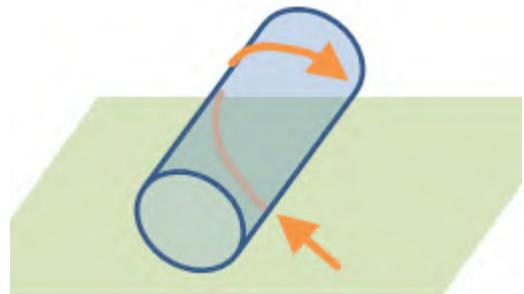
大雨をもたらした降水域を風上から風下に向かって見た鉛直断面(第5.9図)には、矢印が表す降水粒子の動きに渦のパターンが明瞭に見られた。注目される点は、高度3km付近において降水粒子が水平に(紙面では右から左に)移動していたことである。これは、降水粒子が強い上昇気流に支えられて落下していないことを表している。同時に、背景の降水強度を見ると、降水粒子の移動とともに降水強度が強まっていたこ

とがわかる。これは、上昇気流によって吹き上げられた小さな雨滴を併合しながら水平移動する降水粒子が成長し、上昇気流によっても支えきれない大きさまで成長して、落下する、と推測された。第5.9図に見られる渦パターンは、強い上昇気流によって高度5~6kmまで吹き上げられた降水粒子が、上空の風によって右側に流され、上昇気流の弱い領域で落下し、下層の風によって強い上昇気流領域に供給され、短時間で大きな雨粒に成長するとともに、上昇域と下降域が分離されて、強い雨が持続するメカニズムを表している、と解釈できるであろう。

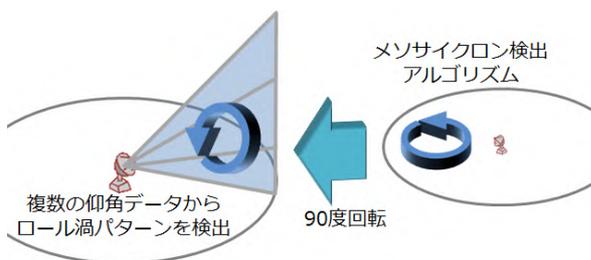
この降水粒子の動きを立体的に捉えると、高度1kmから6kmまでの水平風の平均風向を長軸とした円筒の表面を動き、つまり、らせん状の動きとなることが考えられる(第5.10図)。この降水粒子のらせん状の動きは、広島市の大雨事例に特有の現象であろうか、それとも大雨事例の多くに見られる現象であろうか?その答えを得るためには、詳細なレーダー解析を他の大雨事例においても実施する必要がある。しかし、広島市の大雨事例のように、大雨の領域を近くからレーダーが取り囲むように観測している事例は稀であり、大多数の事例はレーダーから遠い領域の観測となっている。



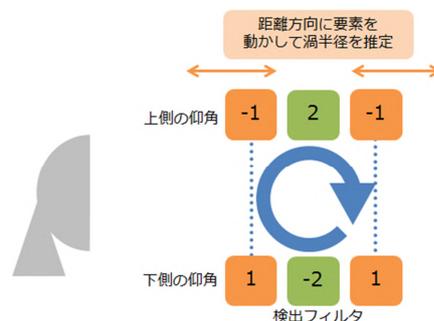
第5.9図 降水域を風上側から見た鉛直断面
降水強度に降水粒子の動きのベクトルを重ねている。降水域の先端から10kmまでについて、平成26年(2014年)8月20日02時40分~03時10分まで30分平均した値。気象庁の広島レーダー、国土交通省のXバンドMPレーダ(牛尾山、野貝原)の観測データを利用して解析した。矢印は降水粒子の動きを表し、風ベクトルではないことに留意。Xバンドのレーダー電波は強い雨によって減衰するため、確実に速度ベクトルを得られるように、30分平均としている。



第5.10図 降水粒子の動きの概念図
円筒の長軸が高度1kmから6km付近まで平均風向と仮定。降水粒子の動きは、立体的に見ると、らせん状の動きとなる。



第5.11図 ロール渦パターン検出の概念図
メソサイクロン検出(右)は、1つの仰角の観測データを利用して、水平面の渦パターンを検出する。一方、ロール渦パターン検出(左)は、複数の仰角の観測データを利用して、鉛直面の渦パターンを検出する。



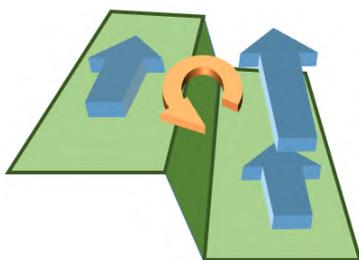
第5.12図 ロール渦パターン検出の概念図
2つの仰角に対して、上下の仰角で符号が逆のラプラスフィルタを適用する。左右の要素の位置を動かし、渦度が最大となったときの要素間の距離から渦の大きさを推定する。

そこで、1つのレーダーの観測データを使用して、渦パターンを検出する手法を開発した。ヒントとなった技術は、比較的強い竜巻の親雲に観測されることが多いメソサイクロンと呼ばれる渦を検出する技術である。第5.11図の右に示すように、鉛直方向に軸を持つ渦が存在すると、レーダーが観測するドップラー速度には、近づく速度と遠ざかる速度の組合せが現れる。その組合せを検出する技術がメソサイクロン検出である。このメソサイクロン検出において、検出面を90度回転させ、高度3kmの風向を軸としたロール回転成分を検出する手法が、今回開発したロール渦パターン検出である（第5.11図の左）。

ロール渦パターン検出では、複数の仰角のドップラー速度データを利用して、渦パターンを検出する。具体的には、第5.12図に示すように、2つの仰角のドップラー速度データに、上下で符号が逆転したラプラシアン（二次微分）フィルタを適用し、その出力が閾値よりも大きいときに、渦パターンありとする。二次微分を使っているため、渦パターンのみ検出し、鉛直シアは検出しない。渦パターンは、発達した対流性エコーのみ検出対象としている。ここでの対流性エコーとは、鉛直方向の最大反射因子 Z_{max} が 32dBZ 以上、かつエコー頂高度が融解層高度の1.8倍よりも高いエコーと定義している。

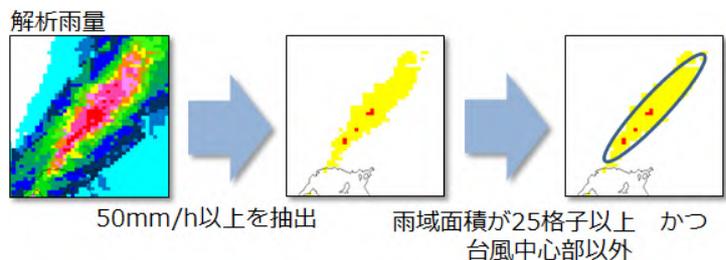
また、渦パターンは、ウィンドプロファイラの観測データから推定した高度3kmの風に対してプラスロール回転の成分のみ検出する。このため、高度3kmの風向とレーダーの視線がなす角が小さいとき、つまり、レーダーから見て風上と風下方向では、渦パターンは検出できない。さらに、レーダーから遠い領域では、レーダーの鉛直方向の分解能低下により、数km規模の渦パターンを検出できなくなる。

また、局地的大雨に関しては、地形の影響も考慮する必要がある。つまり、ロール渦パターンが発生しやすい地形と気象条件の組合せを予測に反映するために、第5.13図に示すように、地形を巨視的に見て、長く続く丘陵や山地のように高低差が大きい領域に沿って風が吹くときには、渦が発生しやすい、と考え、ロール渦パターン検出の条件として加えている。



第5.13図 地形の影響を見積もる概念図

高低差の大きい領域に沿って風が吹くとき、同じ標高では速度差が生じ、鉛直方向に軸を持つ渦が発生しやすく、上空ほど風速が大きいので渦の軸が傾き、らせん状の流れが生まれやすい、と想定する。

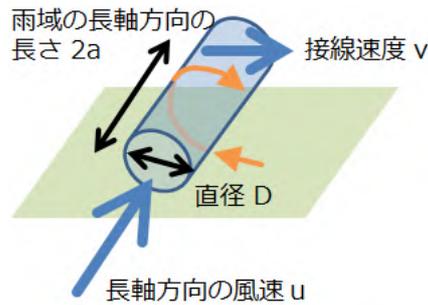


第5.14図 雨域抽出の手法

2011年から2015年までの5年間について、解析雨量（左）が50mm/h以上の格子を抽出し（中央）、雨域面積が25格子以上で、かつ台風中心部以外の雨域を選ぶ。選ばれた雨域を楕円に近似し、楕円内の最大雨量、長軸、短軸の長さ、長軸の長さと走向を得る（右）。

このようにして検出されたロール渦パターンの情報は、空間連続性（1km格子で数えたときに10格子以上の面積を持つこと）及び時間連続性（30分間の平均値で有意な値を持つこと）を持つときに、降水の予測に利用される。

次に、大雨事例において、降水粒子がどの程度らせん回転しているのか調べた。ここでは、大雨事例として、第5.14図の左から中央に示すように、解析雨量が50mm/h以上の格子から構成される雨域を抽出し、雨域の面積が解析雨量の1km格子において25格子以上であり、台風の暴風域内を除いた事例を選んだ。各事例の雨域を楕円に近似し、楕円内の最大雨量、形状（軸の長さ、走向）を算出する（同図の右）。



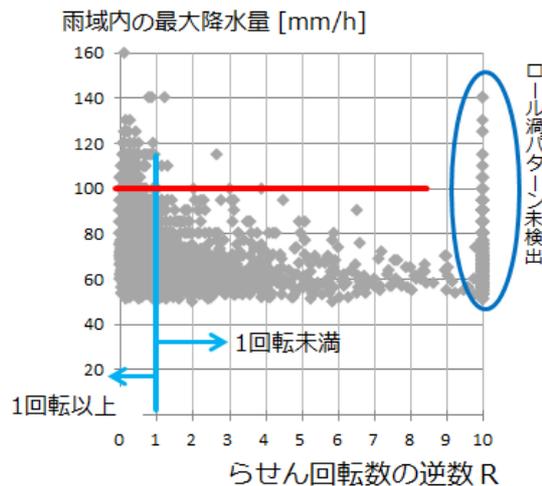
第 5.15 図 らせん回転数の計算

中下層の平均風ベクトルが円筒の長軸に平行と仮定し、降水粒子は長軸方向の風速 u と円筒表面の接線速度 v の合成によって、円筒の表面を移動する。接線速度 v が大きいほど、円筒の直径 D が小さいほど、長軸 a が長いほど、そして、一般流 u が小さいほど、らせん回転数が多くなる。

降水粒子がどの程度、らせん回転しているかを調べるため、第 5.15 図に示すパラメータを使用し、ここでは、中下層を平均した風が雨域を通過する間に、雨域内においてらせん回転する回数の逆数 R を、第 5.1 式から計算する。

$$R = \frac{\pi D \cdot u}{\frac{v+10}{2} \cdot 2a} \quad \text{第 5.1 式}$$

この R を、大雨領域として抽出した雨域について計算した結果が、第 5.16 図である。1 時間に 100mm を超える雨の多くで R が小さく、らせん回転数は 2 回転以上であった。一方、1 時間降水量が 60mm 程度では、 R は 5 を超える大きな値まで分布している。これらのことから、降水粒子のらせん状の動きは、広島市の大雨に特有の現象ではなく、大雨事例に広く見られる現象であると言えるであろう。なお、降水粒子の鉛直速度は、レーダーから離れるにつれて精度が低下する。多くの事例を解析するために、ここでは鉛直速度を一律 10m/s と仮定し、レーダーから遠い雨域も解析対象とした。



第 5.16 図 らせん回転数の計算

縦軸は雨域内の 1 時間降水量の最大値、横軸はらせん回転数の逆数 R である。 R が 0 に近づくほど、らせん回転数が多い。 $R=10$ はロール渦パターン未検出を表す。1 時間に 100mm を超える雨を含む雨域の多くで、 R は 1 よりも小さく、1 回転以上のらせん回転が観測された。

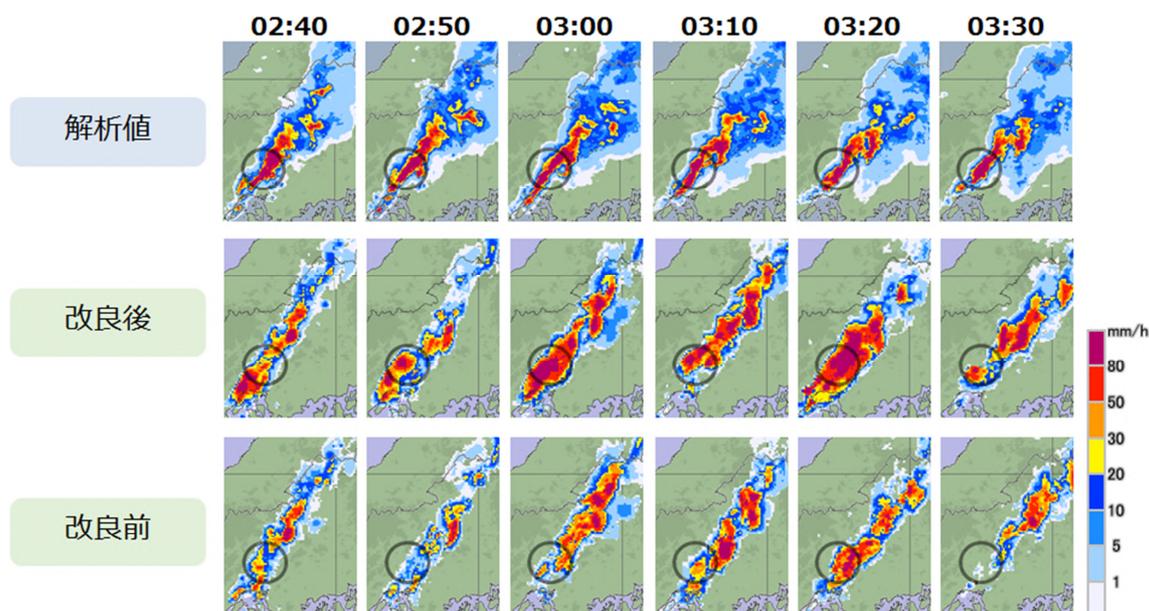
降水粒子のらせん状の動きが大雨に関連づけられるとしたら、そのメカニズムを降水予測に組み入れることにより、降水予測の改善に寄与すると期待される。そこで、大気の鉛直プロファイル、渦の大きさ、接線

速度を入力し、降水粒子の移動速度としてランキン渦の速度分布を仮定して、予測降水量を計算する手法を開発した。雨滴生成はSimpson 他（1965, 1969）の auto-conversion によって計算する。もし、回転速度が速すぎると雨滴が十分に成長せず、遅すぎると水平方向の移動距離が長くなり、降水量を少なく計算する。また、降水量の水平分布は、降水域の先端は雲の発達過程で降水量は少なく、風下側は水蒸気量が減り、降水量が少ないと見積もる。

さらに、組織化した積乱雲の活動が終息に向かうことを見極める材料として、上空を通過する擾乱の推定技術を導入している。これは、12時間前までウィンドプロファイラの高度3kmの風を使用し、風に沿って解析雨量を平均した値が閾値（1mm/h）よりも大きくなった場合、現在は何もエコーが無いとしても、過去12時間以内には降水エコーが存在しており、対流活動を活発化させる要因が隠れているとして、積乱雲の盛衰予測に利用する。

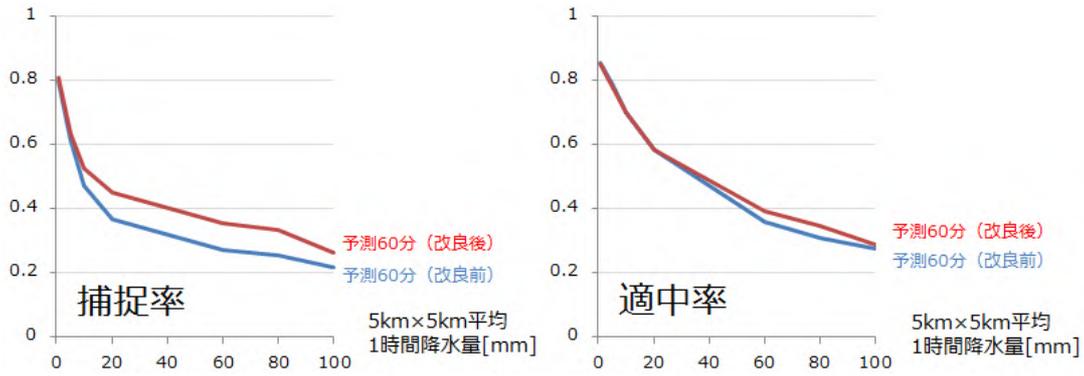
このように改良を加えた降水予測処理の精度評価については、まずその改良に方向性を与えた2014年8月の広島市の大雨事例を第5.17図に示している。この事例では組織化した積乱雲から構成される雨域が停滞し、猛烈な雨が持続した（上段）。中段と下段は上段の解析値の時刻を1時間前に予測したものであり、例えば、03:00は02:00の解析値を初期値として予測している。下段の改良前の予測では、猛烈な雨の持続を予測していない時刻があった。一方、中段の改良後では、雨域の形状には差があるものの、猛烈な雨の持続を予測しており、改良の効果が現れている。

次に、より多くの事例において精度評価を実施した結果を第5.18図に示す。評価期間を第5.19図のカレンダーに示しており、記録的短時間大雨情報の発表や大雨が観測された日を中心に、黄色の期間において精度評価を行った。ロール渦パターンは数km規模の現象であるので、予測においては数kmの位置誤差を許容するとの考えから、5km格子（5km×5kmの平均値）により、1時間降水量を解析値と比較して、捕捉率と適中率を計算している。60分先までの予測値を積算した1時間降水量については、改良前（青線）に対して改良後（赤）が有意に上昇しており、改良の効果が示されている。



第5.17図 降水予測の改良例

降水予測改良の糸口となった2014年8月20日未明の広島市の大雨について、上段は解析値、中段は1時間前の解析値を初期値として改良した手法による1時間後の予測、下段は改良前の予測である。図中の円は、大規模な土砂災害が発生した広島県安佐南区付近を示す。改良前は、円内に降水域の隙間が多く、猛烈な雨の持続を十分に予測できていないが、改良後は持続を予測している。



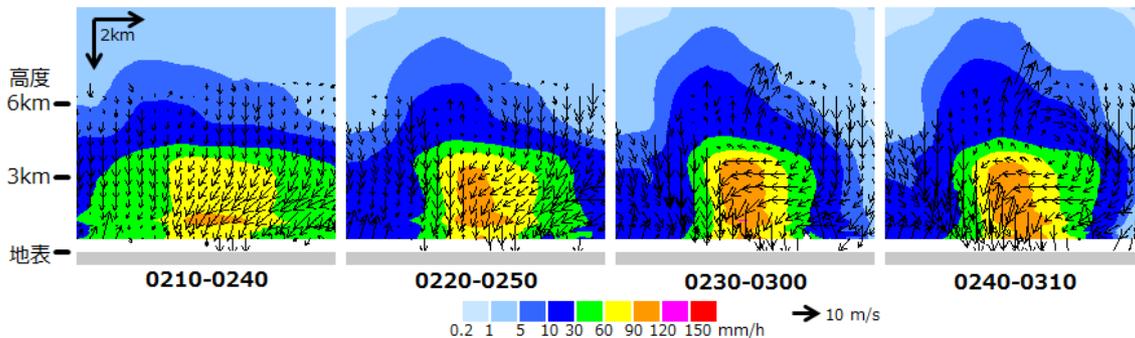
第 5.18 図 1 時間降水量 (5km 格子) の精度評価結果

1 時間降水量の 5km 四方の平均値を解析値と比較した結果をグラフに示している。横軸は捕捉率又は適中率を計算する際の閾値である。横軸が 100mm のとき、100mm 以上の 1 時間降水量について捕捉率、適中率を示している。捕捉率、適中率は、降水域の分布により値が大きく変化するので、ここではそれらの絶対値ではなく、改良前を基準として相対的に改良の効果を見る必要がある。



第 5.19 図 降水予測の精度評価期間

精度評価はカレンダーに黄色で示した期間を対象に実施した。赤い丸は記録的短時間大雨情報が発表された日を示す。



第 5.20 図 降水粒子のらせん状の動きの形成

図の条件は、時刻を除いて第 5.9 図に同じ。

最後に、降水粒子のらせん状の動きが形成されるメカニズムについて、考察したい。第 5.20 図には、第 5.9 図と同じ条件で、時刻のみ変えて、時系列に降水強度と降水粒子の移動ベクトルを示している。02 時 40 分までの 30 分平均 (同図の最も左) では、鉛直シアは見られるが降水粒子の循環は見られない。その右隣の 02 時 50 分では、降水強度が 90mm/h 以上のオレンジ色の領域が高度 3km 付近まで達しているが、そのオレンジ色の領域内でも矢印は下向き成分があり、降水粒子が落下していたことを表している。さらに 10 分進んで、03 時 00 分になると、オレンジ色の領域の面積がさらに広がり、矢印が水平方向を指向し、降水粒子が水平に移動していたことを示している。同時に、高度 6km 付近に下層とは逆方向 (同図では右向き) の動きが見られるようになる。そして、この状況が 03 時 10 分においても継続していた。

これらのことから、この広島の大雨事例では、細長い雨域内を、高度 2~3km では強い上昇気流に支えら

れて降水粒子が水平に移動し、一方、高度5~6kmでは上昇速度が減速して水平発散となり、降水粒子が下層とは逆方向に移動していた、と考えられる。ここから、降水粒子のらせん状の動きをもたらすメカニズムの要素として、細長い雨域を形成する鉛直シア、降水粒子の重さを支える下層の強い上昇気流、降水粒子が中層で方向転換するための上昇速度の減速、を考えることができるであろう。今後、より多くの事例の解析を通じて、メカニズムの解明が進むことを期待したい。

5.4 今後の改善に向けて

ここでは、2015年8月に実施した、高解像度降水ナウキャストの改良について、降水解析と降水予測の両面について解説した。降水解析では、レーダー電波の混信などによって生じるノイズを除去する技術を導入した。降水予測では、レーダーのドップラー速度観測データを用いて、ロール渦パターンを検出し、組織化する積乱雲の盛衰予測を改良した。

ロール渦パターンの検出は、大雨事例の多くに見られる、という経験則に基づいている。経験則は現在のナウキャスト技術に多用されているが、それは、経験則や統計的手法が短時間で計算できるため、速報性が求められるナウキャストには適した手法であることが大きな要因である。しかし、学習データの無い、未経験の状況において、正しく予測できる保証がないことから、物理学・気象学に基づいた力学的予測の導入・高度化が今後の課題である。高解像度降水ナウキャストでは、豪雨・大雨発生メカニズムの理解を通じて、運動学的・統計的手法と力学的手法の最適な融合を目指していきたい。

参考文献

- 木川誠一郎，2015：高解像度降水ナウキャストにおける降水の解析・予測技術について．測候時報，81，55-76．
- Simpson, J., R.H.Simpson, D.A.Andrews and M.A.Eaton, 1965: Experimental cumulus dynamics. Reviews of Geophysics, 3, 387-431.
- Simpson, J., and V. Wiggert, 1969: Models of precipitating cumulus towers. Monthly Weather Review, 97, 471-489.