不確実性を考慮する地上・レーダ雨量の合成
– 共変量クリギング型逐次ガウシアンシミュレーション法の提案 –

京都大学防災研究所 正会員 ○ 佐山 敬洋
京都大学防災研究所 正会員 立川 康人
京都大学防災研究所 フェロー会員 寶 馨

1 はじめに 流出予測の不確実性を評価するためには，降雨推定値の不確実性を定量的に求めることが必要不可欠である．特に分布型流出モデルを対象とする場合，これまでは入力する降雨場に適当な大きさのランダムノイズを加えるなどの方法が取られてきたが，降雨場に含まれる系統的な推定誤差の特性をどう表現するか，またその大きさをどのように設定するかといった問題があった．

本論で提案する共変量クリギング型逐次ガウシアンシミュレーション (Cokriging-type Sequential Gaussian Simulation : co-sGs)[1] は，共変量クリギングを実行する際に求まる誤差の推定分散値をもとにしてノイズを発生させ，不確実性を加味した合成降雨場を発生させる方法である．この手法を用いて，観測で得られた地上雨量・レーダ雨量に対して現実に起こり得たであろう複数の降雨場を生成し，それらを入力とした流出計算を実行すれば，その観測条件での降雨推定の不確実性がもたらす流出予測の不確実性を分析することができる．

2 co-sGs による地上・レーダ雨量の合成法 推定対象地点 $\boldsymbol{u}_0$ における地上・レーダ合成雨量の推定値 $V^*(\boldsymbol{u}_0)$ は近隣の数値点で観測された地上雨量 $G(\boldsymbol{u}_i)$ $(i=1,\dots,n)$，推定対象地点を含むレーダ雨量 $R(\boldsymbol{u}_j)$ $(j=0,\dots,m)$，ならびにこの推定アルゴリズムによって順次推定される近隣数値点の地上・レーダ合成雨量 $V(\boldsymbol{u}_j)$ $(j=1,\dots,m)$ の重みつき総和で求まるものと仮定する．

$$V^*(\boldsymbol{u}_0)=\sum_{i=1}^{n}\lambda_{G\boldsymbol{u}_i}G(\boldsymbol{u}_i)+\sum_{j=0}^{m}\lambda_{R\boldsymbol{u}_j}R(\boldsymbol{u}_j)+\sum_{j=1}^{m}\lambda_{V\boldsymbol{u}_j}V(\boldsymbol{u}_j) \qquad (1)$$

ここで，$\lambda_{G\boldsymbol{u}_i}$，$\lambda_{R\boldsymbol{u}_j}$，$\lambda_{V\boldsymbol{u}_j}$ はそれぞれ地上雨量，レーダ雨量，地上・レーダ合成雨量にかかる係数であり，共変量クリギングの問題はこれらの係数を求める問題である．

不偏推定量の仮定にもとづき，推定誤差 $\varepsilon_{V\boldsymbol{u}_0}$ $(=V^*(\boldsymbol{u}_0)-V(\boldsymbol{u}_0))$ の平均値が 0，分散が最小になるように係数 $\lambda_{G\boldsymbol{u}_i}$，$\lambda_{R\boldsymbol{u}_j}$，$\lambda_{V\boldsymbol{u}_j}$ を決定する．

$$E[\varepsilon_{V\boldsymbol{u}_0}] = 0 \qquad (2)$$

$$Var[\varepsilon_{V\boldsymbol{u}_0}] \rightarrow \min \qquad (3)$$

ここで，地点 $\boldsymbol{u}_i$ における降雨の対象期間内の時間的な期待値は対象領域内で一定であるという定常性の仮定をおき，また，地上雨量の時間的な期待値は地上・レーダ合成雨量の時間的な期待値と一致することを前提とする．さらに，地上雨量の観測誤差にはバイアスがかからないことを仮定すれば，地上雨量・レーダ雨量の共分散・相互共分散を変数に含むクリギング方程式を得る．ただし，あらゆる二地点間で共分散・相互共分散を求めることは通常難しいので，クリギング問題では二次定常性を仮定し，共分散・相互共分散を距離の関数に置き換える．これを，共分散関数と呼び，本論では指数型の共分散関数を仮定した．

$$C(h)=b\exp\left(-\frac{|h|}{a}\right) \qquad (4)$$

ここで，a，b はパラメータであり，観測値より各時間ステップで異なる値を求める．

上述のクリギング方程式を解くことにより，係数 $\lambda_{G\boldsymbol{u}_i}$，$\lambda_{R\boldsymbol{u}_j}$，$\lambda_{V\boldsymbol{u}_j}$，および，推定値の誤差分散を式 (5) のように求めることができる．

$$\begin{aligned}Var\left[\varepsilon_{V\boldsymbol{u}_0}\right] &= Cov\left[V(\boldsymbol{u}_0),V(\boldsymbol{u}_0)\right]\\ &-\sum_{i=1}^{n}\lambda_{G\boldsymbol{u}_i}Cov\left[G(\boldsymbol{u}_i),G(\boldsymbol{u}_0)\right]\\ &-\sum_{j=0}^{m}\lambda_{R\boldsymbol{u}_j}Cov\left[R(\boldsymbol{u}_j),R(\boldsymbol{u}_0)\right]\\ &-\sum_{j=1}^{m}\lambda_{V\boldsymbol{u}_j}Cov\left[V(\boldsymbol{u}_j),V(\boldsymbol{u}_0)\right]\\ &+\mu_1\end{aligned} \qquad (5)$$

キーワード：共変量クリギング，逐次ガウシアンシミュレーション，レーダ雨量
連絡先 ：〒611-0011 宇治市五ヶ庄 TEL 0774(38)4128 FAX 0774(38)4130

この推定誤差分散の値を用いて平均値0の正規乱数を発生させる．その値を$V^*(\boldsymbol{u}_0)$に加えた値が最終的な地上・レーダ合成雨量となる．

推定に採用する地上雨量のグリッドセルの位置については，まず推定する地点$\boldsymbol{u}_0$を推定の終了していないグリッドセルからランダムに選択し，その近隣からn地点の地上雨量観測点をとる．また，推定に採用するレーダ雨量，地上・レーダ合成雨量のグリッドセルについては，推定点$\boldsymbol{u}_0$の近隣から既に推定の終了しているグリッドセルをm地点とる．なお，レーダ雨量に関しては，推定地点のレーダ雨量も変数のひとつとして加える．本論の適用例ではnの最大値を4，mの最大値を5とし，いずれも推定対象点から20 km以内の点のみを採用することにした．

3 co-sGsの特徴 co-sGsが，上記の方法で地上雨量，レーダ雨量，地上・レーダ合成雨量を推定に用いることの利点を以下にまとめる．

1. ノイズを加えて得た既推定の地上・レーダ合成雨量の値を共変量クリギングの主変数として用いることにより，観測によって得られた降雨場の空間相関特性を保持するように地上・レーダ雨量を合成することができる．

2. 既に推定の終了しているグリッドセルの中から近隣のグリッドセルを選び出し，その地点におけるレーダ雨量を変数として採用することにより，特定のグリッドセルにおけるレーダ雨量を常に推定に用いることを避ける．これにより特定のグリッドセルに含まれるレーダ雨量の誤差が近隣に伝播することを防ぐ．

4 降雨場推定の結果と考察 1990年9月19日0時から21日0時までの48時間に観測された台風22号の降雨を対象にco-sGsにより地上・レーダ雨量を合成する．比較のため，現業で国土交通省レーダの地上・レーダ雨量合成に用いられているダイナミックウィンドウ法により合成した結果を合わせて示す．対象とする領域は近畿地方の淀川流域(枚方上流)であり，対象領域の面積は7,281 km^{2}である．合成に用いた降雨データは対象流域内58地点で観測された地上雨量と国土交通省深山レーダによって観測されたレーダ雨量である．

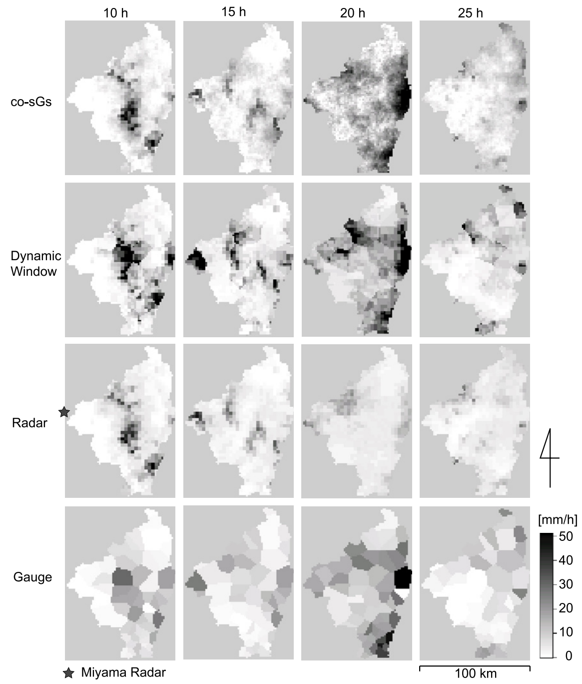

図1 co-sGsとダイナミックウィンドウ法による地上・レーダ雨量の合成結果

図1は計算開始時刻から10時間後，15時間後，20時間後，25時間後の5分平均の降雨強度分布を表しており，上段からco-sGsによる合成結果，ダイナミックウィンドウ法による合成結果，入力情報であるレーダ雨量の降雨分布，同じく入力情報である地上雨量の最近隣分布を表している．地上雨量とレーダ雨量とを比較すると，降雨強度の大きな20時間後にレーダ雨量は過小評価していることがわかる．

地上・レーダ雨量の合成は，こうしたレーダ雨量の定量的な誤差を補正することを可能とする．ダイナミックウィンドウ法の結果は地上雨量の最近隣区分が現れているのに対し，co-sGsの結果はレーダ雨量の空間分布を保持しつつ，地上雨量と定量的に整合性を保つような降雨場となっていることがわかる．このことは交差検証によっても確認されている [1]．ただし，20時間後の流域中央部のように，レーダ雨量の分布と合成雨量の分布は必ずしも適合しない．これは推定時に加える誤差成分によるものであり，co-sGsの結果は条件付きでランダムに降雨場を発生させた場合のひとつの実現値であることに注意する．

参考文献

[1] 佐山敬洋，立川康人，寶 馨：不確実性を考慮する地上・レーダ雨量の合成法，土木学会論文集，2005，投稿中．