時空間統計モデルを用いた線状降水帯のシミュレーション
Simulation of Senjo-Kosuitai Using Spatio-Temporal Statistical Model

○丸尾啓太*・近森秀高**・工藤亮治**
MARUO Keita, CHIKAMORI Hidetaka, KUDO Ryoji

１．背景・目的　降水は，その時空間パターンによって河川の洪水や農地の湛水被害のリスクを変動させるため，洪水防御計画や排水計画の策定には様々なパターンを考慮する必要がある．線状降水帯では，降水は同じ場所に集中し，災害発生リスクが高い豪雨の時空間パターンを形成する．そこで本研究では，統計モデルを用いた降雨の時空間パターンの模擬生成に着目し，降雨場の相関構造の異方性や移流といった複雑な要素をもつ統計モデル（Papalexiou et al., 2021）を用いて降雨場のシミュレーションを行い，線状降水帯の再現性を評価した．

２．解析対象資料　対象地域として広島県西部を選定し，解析対象資料には，レーダー・アメダス解析雨量の 2014 年 8 月 19 日 12 時～20 日 12 時における 1 時間雨量を選定した．当時のレーダー・アメダス解析雨量は 1km メッシュで公開されているが，本研究では，計算時間を短縮するために，5km メッシュにアップスケーリングしたデータを用いた．

３．方法　**3.1 モデルパラメータの推定**　まず，観測値に周辺分布関数と時空間共分散関数を適合させ，パラメータを推定した．次に，推定した時空間共分散関数を正規確率場における時空間共分散関数に変換した．最後に，正規確率場における時空間共分散関数を用いて多変量自己回帰（Multivariate Autoregressive, MAR）モデルのパラメータを推定した．適用したモデルと推定方法を以下に示す．　**a)周辺分布**　一般化ガンマ分布を用い，パラメータは観測値との二乗誤差を最小化するように推定した．　**b)時空間共分散関数**　Gneiting(2002)の式(14)を用いた．共分散関数のモデル式を以下に示す．

$$\rho(\mathbf{h},u)=\frac{1}{(a|u|^{2\alpha}+1)^{\tau}}\exp\left(-\frac{c|\mathbf{h}|^{2\gamma}}{(a|u|^{2\alpha}+1)^{\beta\gamma}}\right)$$

ここで，$\mathbf{h}$は 2 地点間のユークリッド距離，uは時間差，a,cは非負の尺度パラメータ，α,γ,τは平滑パラメータ，βは時空間相互作用パラメータ．各パラメータは非線形重み付き最小二乗法で推定した．　**c)異方性変換**　線状降水帯は方向によって共分散が異なるため，幾何学的異方性を用いて座標変換を行った．パラメータは方向別の共分散バリオグラムのプロットから目視で推定した．　**d)移流ベクトル**　雨域の移流ベクトルを$\mathbf{V}=(v_x,v_y)$とすると，ラグランジュ型の時空間共分散関数$\rho_{\mathcal{L}}$は，$\rho_{\mathcal{L}}(\delta,\tau)=\rho(\delta-\mathbf{V}\tau,\tau)$の関係式から得られる．移流ベクトルは先行研究を参考に，$\|\mathbf{V}\|=15[\mathrm{m/s}]$となるように決定した（$\|\cdot\|$はベクトルのノルム）．　**e)MAR モデル**　MAR モデルのパラメータはユール - ウォーカー方程式に時空間共分散関数を代入し求めた．

3.2 降雨場のシミュレーション　推定した MAR モデルを用いて正規分布に従う乱数を生成し，正規変換とは逆の変換を行うことで，降雨場を模擬生成した．

４．結果・考察　**4.1 パラメータの推定値**　標本共分散と共分散関数モデルの関係を，時間差別に図 1 に示す．図中の点は標本値，実線は共分散関数モデルの値を示す．空間共分散が

---

* 農業・食品産業技術総合研究機構　National Agriculture and Food Research Organization
** 岡山大学学術研究院環境生命科学学域　Academic Field of Environmental and Life Science, Okayama University
キーワード：水文統計，降雨特性

14㎟以上では，モデル値は標本値によく適合していた．一方，時間差が 0 または 2，かつ距離が 10km 以上の範囲では適合が悪く，時間差が 5 のときは全体的に適合が悪かった．本研究では降雨場の再現を目的としているためモデルを標本値に完全に当てはめる必要はないが，より正確な推定のためには推定方法やモデルの変更を検討する必要がある．

4.2 降雨継続時間と降雨強度の関係　構築したモデルを用いて 10,000 時間分の降雨場を模擬生成させた．その中から辻本ら(2017)の基準を参考に，時点ごとに線状降水帯を抽出し，6 時間以内の模擬降雨場で発生した降雨事例を同一の場における発生事例として扱った結果，移流を考慮した場合は 234 事例，考慮しなかった場合は 183 事例が抽出された．各事例において前 12 時間積算降水量が最大となったメッシュにおける降雨継続時間と降雨強度の関係（DD 関係）の中央値と観測値の DD 関係を図 2 に例示する．移流を考慮しなかった模擬降雨場 (Sim) は強雨域が停滞していた一方，移流を考慮した場合（Sim.Adv）は停滞しなかった．線状降水帯では，積乱雲が同じ場所に集中して発生するため，短時間に豪雨が集中するという特徴がある．この短時間の集中豪雨を再現するためには，共分散関数のパラメータを時間変化させる必要があると考えられる．

4.3 降雨強度と降雨面積の関係　線状降水帯の事例を対象に，降雨強度と降雨面積の関係を調べた．図 3 は，10,000 時間の模擬降雨場から各時点で抽出された線状降水帯について，ある閾値を超えた雨域の面積の中央値を示している．移流の有無にかかわらず，模擬降雨場の中央値は，線状降水帯における強雨域の面積をよく再現できたといえる．

５．結論　　本研究では，線状降水帯の降雨場に対して時空間統計モデルを構築し，そのモデルを用いて降雨場の模擬生成を行った．構築したモデルは観測値の相関構造をよく表現しており，模擬発生させた降雨場からは線状降水帯が抽出された．模擬降雨場の線状降水帯における強雨域の面積は観測値をよく再現できていたが，短時間に集中する豪雨の再現性はやや不十分であり，非定常の共分散関数を用いる必要が示唆された．今後は，モデルの推定方法の改良，解析事例を増やすことにより，構築した時空間統計モデルのパラメータを吟味することが必要である．

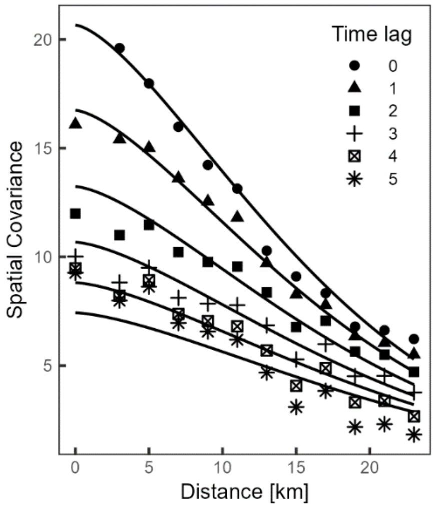

図 1 時間差別の空間共分散
Spatial Covariance for Several Time lags

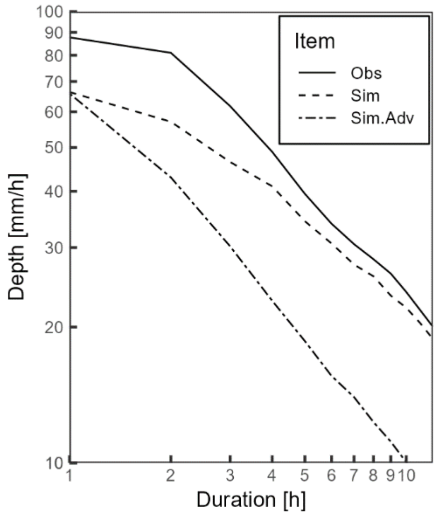

図 2 DD 関係の比較（両対数軸）
Comparison of DD curves (logarithmic axis)

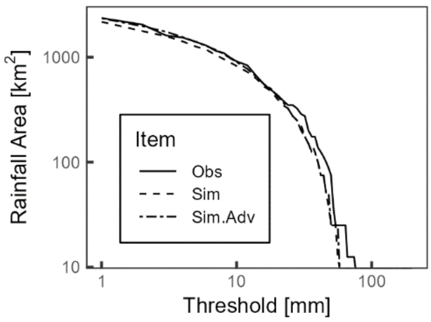

図 3 閾値以上の雨域の面積（両対数軸）
Rainfall area above threshold (logarithmic axis)

参考文献　辻本ら，砂防学会誌,69(6),49-55,2017. Gneiting, J. Am. Statist .Ass, 97(458), 59-600, 2002. Papalexiou et al., Water Resour. Res, 56, e2019WR026331, 2021.