

煙害警報システムのための森林火災モデルの開発*

Applicability of Spatial Duration Model for Wildfire Duration Toward Haze Alart System*

塚井 誠人[†]・M. N. B. JAAFAR[‡]・小林 潔司[§]

By Makoto TSUKAI[†] M.N.B.JAAFAR[‡] and Kiyoshi KOBAYASHI[§]

1. はじめに

インドネシアのカリマンタン島,スマトラ島では,南西モンスーン風が卓越する乾期に,自然発火と焼き畑農業のための野焼きを原因とする大規模な森林火災によって,大量の煤煙が大気中に放出される煙害が発生する¹⁾.その影響は周辺諸国にまで及び,呼吸器系の疾患や,視界不良による空港閉鎖や航空機事故などの深刻な影響をもたらしており,たとえば,1997年の森林火災による周辺諸国の損失は,9億アメリカドルに上ると試算される²⁾.

スマトラ島の対岸に位置するマレーシアは,人口,経済活動がマレー半島の西海岸地域に集中しており,スマトラ島の森林火災の影響を受けやすい.2005年の森林火災では,学校,会社,工場などの一時的な閉鎖に追い込まれた³⁾.この事態に対してマレーシア政府は,大気中の汚染物質をリアルタイムに観測し,ヘイズ警報を発令するシステムの開発を進めている.マレーシア国内の煙害状況は,マレーシア全土に50ヶ所の連続大気汚染モニタリング(Continuous Air quality monitoring: 以下,CA局と略す)ネットワークにより連続的に観測されている.この観測ネットワークは,Alam Sekitar Malaysia (ASMA)が建設,運営・維持を請け負っている⁴⁾.各CA局には大気分析装置と各種センサーが設置され,一酸化炭素,酸化窒素,粒子状物質,炭化水素,二酸化硫黄,光化学オキシダント等の大気中濃度が連続測定されている.測定したデータは,ASMAのデータ収集システムで一括管理され,これらのデータに基づいてマレーシア環境省は,独自に設定した総合大気汚染指数(Air Pollution Index: APIと略す)等を算出し,リアルタイムの煙害情報を提供している⁵⁾.

国境を越えて拡散する煙害の被害を最小限に食い止めるには,周辺諸国における煙害の正確な予測と,

警報システムの構築が必要である.マレーシア国土をカバーする広域の煙害警報システムとしては,衛星情報と地上観測データに基づいて,将来時刻における大気汚染物質の滞留量を迅速に予測できる統計的予測モデルが有用である.小林らは,レジーム変化(regime switching)と長期記憶性を考慮した統計的時空間モデルを定式化するとともに,ヘイズ災害に関する危機管理情報を作成する煙害警報システムを提案した.小林らの手法は,森林火災件数の時系列データを所与として,1)各地点で一定時間にわたって平均的に継続する大気汚染物質濃度の水準を複数の離散的なレジームと定義して,そのレジーム間の推移をマルコフ推移確率行列によって表現したレジームスイッチモデル(以下,RSモデル)と,2)1)から求まる各地点の大気汚染物質濃度レジームに基づいて,その局所的な滞留状況を,時間的・空間的な相関に基づいて求める長期記憶時空間統計モデルから構成されている.小林らは,この手法をマレーシア半島の各CA局で観測した大気汚染データに適用して有効性を明らかにしている⁶⁾.

本論文では,小林らの研究において所与とされていた森林火災件数を,火災発生地点の時間的・空間的な特性に基づいて内生的に求めることのできる統計モデルを開発することを目的に,時空間データに基づく生存関数モデルの適用について検討する.

2. 森林火災への Duration model の適用と課題

森林火災の発生と延焼過程の予測について,先行研究ではセルラーオートマタモデル(CAモデル)が提案されている⁷⁾.CAモデルでは,地表面のローカルな被覆特性を,対象領域をメッシュ分割した各セルの特性として与え,任意の出火点から火災が延焼する過程の支配パラメータを,既往火災データに基づいて同定する.CAモデルを用いれば,対象領域内の各地点・各時点の森林火災の有無を,シミュレーションによって求めることができる.しかし,そのためには地表面の被覆特性に関する情報が必要であり,データ収集負荷が大きくなる.

*Key words: duration model, 空間ハザード関数

[†]正会員, 博(工), 広島大学大学院 工学研究科

(〒739-8527 東広島市鏡山 1-4-1, TEL&FAX 082-424-7827)

[‡]非会員, Master(Eng.) Spatialworks Sdn Bhd, Malaysia

(〒606-8501 46000 Petaling Jaya, TEL&FAX 075-383-3222)

[§]正会員, 博(工), 京都大学経営管理大学院 経営管理学講座

(〒606-8501 京都市左京区吉田本町, TEL&FAX 075-383-3222)

小林らのRSモデルでは、入力情報として火災地点数の時系列データを用いている。ある時点の火災発生地点数は、その時点で観測したスマトラ島の衛星画像に基づいて、地表面の温度が一定以上の閾値を超える地点（以下、hot spot）をスマトラ島全体で集計することによって求められる。本研究では、よりデータ収集負荷の少ない煙害予測・警報システムを構築するため、火災地点数を、CAモデルのような詳細な地点データを必要とする地点別シミュレーション結果の空間集計によって求めるのではなく、より少ない情報量で、hot spot 数が求められるモデルを構築する。

そこで本研究では、森林火災が発生するまでの期間、および火災が発生してから森林火災継続期間のそれぞれを確率変数とみなして、ある時点までに得られる情報に基づいて将来の hot spot 発生数を予測するモデルとして、Duration model の適用を検討する。

3. Duration model に基づく森林火災モデル

(1) Geo additive ハザード関数

対象領域全体で森林火災が発生していない時刻を観察開始時刻 T とする。また、ある地点 i について、 T から火災が発生するまでの経過時間を t_i とする。時刻 $T + t > T$ において火災が発生していない確率 S は、火災発生時刻が $T + t_i > T + t$ となる確率、すなわち経過時間が $t_i > t$ となる確率 $S(t_i > t) = S(t)$ で表される。ここで $t_i = t$ の瞬間に火災が発生するリスクを非負のハザード関数 $h(t) \geq 0$ で表し、経過時間軸 $t \geq 0$ 上で定義される火災発生確率密度関数を $f(t)$ とすると、以下の duration model が得られる。

$$f(t) = h(t) \cdot S \left(- \int_0^t h(t) \right) \quad (1)$$

さらに、 $h_i(t)$ は地点 i の特性の影響を表す共変量関数 η_i によって変化すると仮定すると、比例ハザードモデル、

$$\begin{aligned} h_i(t) &= h_0(t) \exp(\eta_i) \\ &= \exp(\log h_0(t) + \eta_i) \end{aligned} \quad (2)$$

が得られる。ここで $h_0(t)$ は地点とは無関係の基準ハザードである。

式(1)より、観測期間内に地点 i において火災が発生しない right censoring の有無を記号 δ_i で表わすと、対数尤度関数 L は、

$$L = \sum_i \left(\delta_i \log h_i(t) - \int_0^t h_i(t) \right) \quad (3)$$

となる。ただし $\delta_i = 1/0$ のとき right censoring が起こっていない/起こっていることを表す。

Kneib and Fahrmeir は、空間データを対象とした duration model として、式(2)の $h_i(t)$ に空間特性をはじめとする柔軟な関数形を設定した geo additive 関数を提案した⁸⁾。

$$\begin{aligned} h_i(t) = \exp \left(g_0(t) + \sum_j \gamma_j u_{ij} + \sum_k g_k(t) u_{ik} \right. \\ \left. + \sum_l f_l(u_{il}) + f_s(s_i) \right) \end{aligned} \quad (4)$$

ここで $g_0(t) = \log h_0(t)$ は基準ハザードに対応する線形関数 ($h_0(t) = \exp(g_0(t))$)、 u_{ij} 、 u_{ik} 、 u_{il} は観察開始時刻の地点 i の特性を表わす定数型共変量である。一方、 γ_j 、 $g_k(t)$ は、それぞれ、 t に依存しない定数パラメータ、 t に依存するパラメータ関数である。また、 $f_l(u_{il})$ は、共変量 u_{il} に関する非線形関数であり、たとえば3次スプライン関数などが提案されている。 $f_s(s_i)$ は、地点 i 近傍の固有効果を表す項であり、たとえば場の条件として、マルコフ場や、正規場などのランダム効果が仮定される。

Kneib and Fahrmeir は、式(3)の尤度関数に、パラメータ間の制約を表すペナルティ項を付加した最尤法によって、パラメータを推計する方法を提案した⁹⁾。たとえば $f_s(s_i)$ としてマルコフ場を仮定すれば、

$$f_s(s_i) = \frac{1}{N_s} \sum_{s \in D_{s_i}} \beta_s + u_s, \quad u_s \sim N \left(0, \frac{\sigma_s^2}{N_s} \right) \quad (5)$$

である。ここで β_s は領域 s の固有効果パラメータ、 D_{s_i} は、地点 i を含む領域 s の近傍であり、 N_s は近傍 D_{s_i} に含まれる領域数である。また、 u_s はランダム項であり、 σ_s^2 はランダム項の分散を表す。ここで領域数を S 、 $S \times 1$ のパラメータベクトルを β 、領域 s 間の近接行列となる $S \times S$ のペナルティ行列を K_s とすれば、式(5)のマルコフ場に対応するペナルティ項 P_s は、

$$P_s = - \frac{\beta' K_s \beta}{2\sigma_s^2} \quad (6)$$

で与えられる。さらに式(4)の各項を m として、非ランダムパラメータである γ を除くランダムパラメータが正規分布に従うとすれば、それらのペナルティ項は式(6)と類似した P_m で与えられる。このとき、ペナルティ付き対数尤度関数は、

$$L_p = \sum_i \left(\delta_i \log h_i(t) - \int_0^t h_i(t) \right) - \sum_m P_m \quad (7)$$

となる。なお式(7)の尤度最大化は、ベイズ推計の立場からは事後尤度の最大化に相当する。

式(7)を未知パラメータについて直接最大化すると、ペナルティ行列が正則ではない場合は、分散 σ_m^2 の推定値を求めるための周辺分布が得られない。そこで、 σ_m^2 に適当な初期値を与えてハザード関数のパラメータを推計し、それらを所与とする近似周辺尤度関数を解いて σ_m^2 を更新する手順を、パラメータが収束するまで繰り返す計算アルゴリズムが提案されている。詳細は、Fahrmeir and Kneibを参照されたい¹⁰⁾。

(2) 森林火災モデルの定式化

3.(1)の geo additive ハザード関数は、地点特性を考慮しながらハザードの形状を柔軟に表現できるため、森林火災の発生モデルのハザード関数として望ましい性質を持っている。しかし、式(4)の共変量は、全て開始時刻 T の観測情報によって定義される定数型共変量である。一方、時間と共に延焼領域が拡大する森林火災の発生ハザードを表現する上では、現時点 t の情報を共変量に反映させることにより、モデルの予測能力向上が期待される。

そこで森林火災モデルでは、現在時刻 τ に応じて共変量を改訂する。なお、このような共変量は、時間依存共変量と呼ばれる。森林火災発生モデルのハザード関数を、

$$h_i^o(t) = \gamma_0 + \sum^l f_l(t) + \sum^k \rho_k u_{i,t-k} + f_s(s_i) \quad (8)$$

と定式化する。右辺第1項および第2項は、それぞれ定数、およびスプライン関数で表されるベースラインハザード、第3項は現在および直近の過去数時点の共変量観測値 $u_{i,t-k}$ で定義される時間依存型共変量(気温や湿度など)、さらに第4項は、地点の固有効果を、式(5)のマルコフランダム場におけるランダムパラメータとして定義した、空間ハザード項である。

同様に森林火災継続期間も、生存時間関数によって表現する。なお、森林火災継続期間モデルでは、地点 i の観察開始時刻 T_i は森林火災発生時刻 $T + t_i$ に等しいため、サンプル間で共通ではない点に注意しなくてはならない。森林火災発生までの時間と、森林火災継続時間が相互に独立と仮定すると、これらの生存関数は独立に推定できる。

ところで、本研究で用いる森林火災データは、衛星写真に基づいて地表面温度を推計したデータであり、その温度は観測ピクセル周辺の空間平均である。したがって、厳密には火災の発生地点を表しているわけではない。すなわち、hot spot データを用いる限り、一度 hot spot と定義される温度以下となった地点が、再び hot spot と定義される温度以上となる、

「再出火」現象が見られる可能性がある。このように、同一サンプルについて複数回イベントが発生する場合の生存関数は、多期間(multiple spell)モデルと呼ばれる。この場合の尤度関数を、森林火災発生モデルについて示しておこう。地点 i について q 回目の火災発生の有無をわずダミー変数を δ_i^q とする。この場合、 $q-1$ 回目の鎮火時点を観察開始時刻 T_i^q として経過時間をカウントする。 q 回目の火災発生がその他の地点の火災発生と独立であれば、対数尤度関数は、

$$L_p = \sum^i \sum^q \left(\delta_i^q \log h_i^q(t) - \int_0^t h_i^q(t) \right) - \sum^m P_m \quad (9)$$

のように、火災発生回数 q に関する和を加えた形として得られる¹¹⁾。なお、一度出火した地点が再出火するハザードは、最初の出火ハザードとは異なっている可能性がある¹²⁾。そこで、既往出火の有無を表すダミー変数を、定数型共変量としてハザード関数に加えておく¹¹⁾。

(3) 森林火災モデルによる hot spot 数の予測

森林火災発生モデル、および、森林火災継続モデルの推計から得られる生存関数に基づいて、以下の手順で任意の将来時刻 τ の hot spot 数を求める。

- a) 未出火地点については、現時点で入手できる情報に基づいてハザード関数を更新して森林火災未発生地点の生存関数 $S_i^o(\tau)$ を求める。
- b) 得られた $S_i^o(\tau)$ を時間軸上で重ね合わせて、各時刻の出火地点数の期待値を求める。
- c) 時刻別の出火地点ごとに、現時点で入手できる情報に基づいてハザード関数を更新して、森林火災継続期間の生存関数 $S_i^d(\tau)$ を求める。
- d) 得られた $S_i^d(\tau)$ を、観察開始時刻(出火時刻)を考慮して時間軸上で重ね合わせて、各時刻の hot spot 数の期待値を求める。

4. おわりに

本論文では、Duration modelに基づく森林火災モデルを、森林火災発生モデル、および森林火災継続期間モデルとして定式化した。今後は、定式化したモデルの有効性を、森林火災データに基づくモデル推計によって検証する必要がある。

参考文献

- 1) Langmann, B.: A model study of smoke-haze influence on clouds and warm precipitation formation in Indonesia

- 1997/1998, *Atmospheric Environment*, (article in press), 2007.
- 2) The global fire monitoring centre : Forest fire situation in Malaysia, *International forest fire news country notes*, vol.26, pp.66-74, 2001.
 - 3) Nichol, J. : Smoke haze in SE Asia: A predictable recurrence. *Atmospheric Environment*, vol.32, pp.2715-2716, 1998.
 - 4) Abdul, R.K.: Observations of PM10 Readings in Relation to Forest Fire Events from ASMA 's Continuous Air Quality Monitoring Stations, ASMA, 2000.
 - 5) Department of Environment Malaysia: *A Guide to Air Pollutant Index (API) in Malaysia*, 2000.
 - 6) 小林潔司, M.N.B.JAAFAR, 尾形誠一郎, 塚井誠人: 越境へイズ災害のための危険予告情報: レジーム変化と長期記憶性, 土木学会論文集 (投稿中), 2006.
 - 7) Hargrove, R., Gardner, R., Tuener, M., Romme, W. and Despain, D.: Simulating fire patterns in heterogeneous landscapes, *Ecological Modelling*, vol.135, pp.243-263, 2000.
 - 8) Kneib, T. and Fahrmeir, L.: Structured additive regression for categorical space-time data: A mixed model approach, *Biometrics*, vol.69, pp.109-118, 2006.
 - 9) Kneib, T. and Fahrmeir, L.: A mixed model approach for geospatial hazard regression *Scandinavian Journal of Statistics*, vol.34, pp.207-228, 2007.
 - 10) Fahrmeir, L. and Kneib, T. : Penalized structured additive regression for space-time data: A bayesian perspective, *Statistica Scinica*, vol.14, pp.731-761, 2004.
 - 11) 藤原章正, 杉恵頼寧, 張峻屹, 重松史生: Duration model によるパーク・アンド・ライド社会実験への参加行動の分析, 土木計画学研究・論文集, No.14, pp.671-678, 1997.
 - 12) Sarvador, R., Lloret, F., Pons, X and Pinol, J.: Does fire occurrence modify the probability of being burned again? A null hypothesis test from Mediterranean ecosystem in NE Spain, *Ecological Modelling*, vol.188, pp.461-469, 2005.