

## 土地被覆データを使用した 森林火災延焼拡大モデルの検討

上間弥† 赤嶺有平†† 遠藤聡志††  
本間利久††† 木村圭司†††

本稿では、土地被覆データを組み込んだ森林火災延焼拡大モデルについて述べる。土地被覆データとは、地表面の代表的な構成要素を観測したデータである。土地被覆データに基づき森林など土地の可燃性を推定し、火災延焼モデルの延焼速度予測を調整することで、モデルの精度向上が期待できる。シミュレーションにより精度の比較実験を行ったところ、土地被覆データを用いた森林火災延焼拡大モデルの予測結果は、土地被覆データを用いていないものと比較して、より観測結果に近いことが示された。

### Examine of forest-fire spread model using land-cover data

Wataru Uema† Yuhei Akamine†† Satoshi Endo††  
Toshihisa Honma††† and Keiji Kimura†††

This paper discusses a fire spread model including the effect of the physical material at the surface of the ground (land cover). Land covers offer to measure the flammability of the materials on the ground indirectly. The fire spread model uses flammability for adjustment of the fire spreading velocity. The result of the accuracy comparison experiment shows that the model including land cover can simulate higher accuracy than the one without land cover in our data set.

### 1. はじめに

近年、北方林における森林火災が頻繁に発生し、国際的な問題となっている。北方林の大規模な火災は、二酸化炭素や永久凍土の融解によるメタンガスを放出し、これら温室効果ガスの増加は地球温暖化を促進する主要な要因であるとされている。また、植生を破壊し、家屋の焼失や煙害など人々の日常生活にも直接影響をもたらす。そこで我々は、効果的な消火活動の手助けと、延焼予測地域へ情報を提供するために、森林火災の延焼予測を行うシステムの開発を行っている。

森林火災の延焼予測においては、風速・風向き等の気象要因だけでなく被燃焼物の特性を考慮するため、植生に応じた補正を掛ける必要があるとされている。同システムで用いられている予測モデルにおいては、対象とする地域全域が同一の植生で覆われていると仮定しているため、より詳細な植生データを用いる事で予測精度が向上する可能性がある。

そこで本研究では、衛星観測により得られた土地被覆データ（ランドカバー）<sup>4)</sup>に基づき、局所的な植生や土地被覆（道路や河川等）の変化を延焼速度に反映させることで、森林火災延焼予測の精度向上を目指す。

### 2. 土地被覆データについて

公開されている『The National Land Cover Database 2001 land cover layer』のデータ<sup>4)</sup>から、アラスカの土地被覆データを使用した。なお、本研究で使用しているデータは表1の座標間のデータを使用している、

上左端	148d 4'41.04"W, 68d 4'22.31"N
下左端	148d48'14.18"W, 64d34'24.54"N
上右端	144d52'39.90"W, 67d56' 2.98"N
下右端	145d59'21.05"W, 64d27' 9.64"N

表1. 使用した土地被覆データの座標

使用したデータには道路、鉄道、植生、河川といったデータが含まれている。植生以外のデータを含めた理由は、道路、鉄道、河川は延焼を遮る効果があると考えたためである。使用しているデータの一部を次の図1に示す。

† 琉球大学大学院理工学研究科情報工学専攻  
Graduate School of Science and Engineering Department of Information Engineering, University of the Ryukyus  
†† 琉球大学工学部情報工学科  
The Department of Information Engineering, University of the Ryukyus  
††† 北海道大学大学院情報科学研究科  
Graduate School of Information Science and Technology, Hokkaido University



図 1. 使用した土地被覆データの一部

なお、植生が延焼速度に与える影響度が明らかではなかったため、本研究では試行錯誤による実験的な値を用いた。

### 3. シミュレーションの実装方法

本研究では、火災のシミュレーションを実装するためにセルオートマトン (CA) を用いている。

格子状に区切られた各区画を『セル』と呼び (図 2)、各セルは様々な状態とパラメータを持っており (図 3, 図 4)、セル同士が相互に影響を与えることによって、状態遷移が起こり、その様子を火災の延焼に見立てている。

なお本研究では、1つのセルのサイズは縦横 50m である。

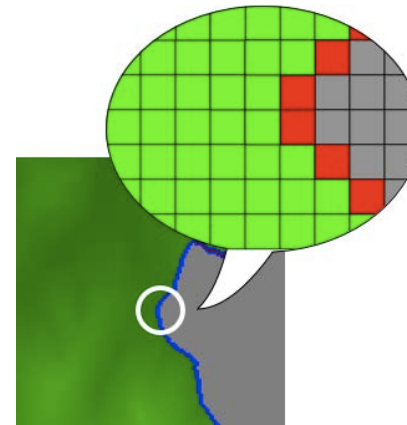


図 2. セル分割イメージ

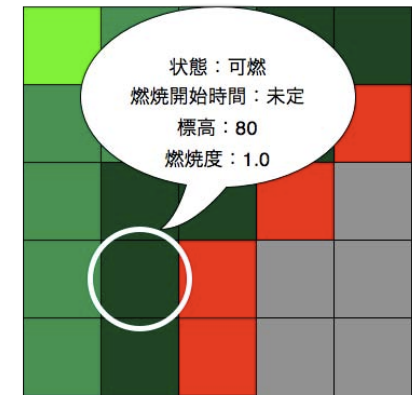


図 3. 可燃セルの設定例

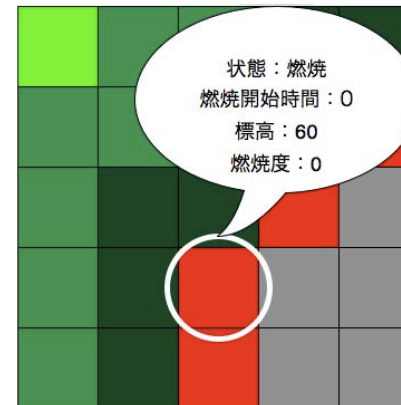


図 4. 燃焼セルの設定例

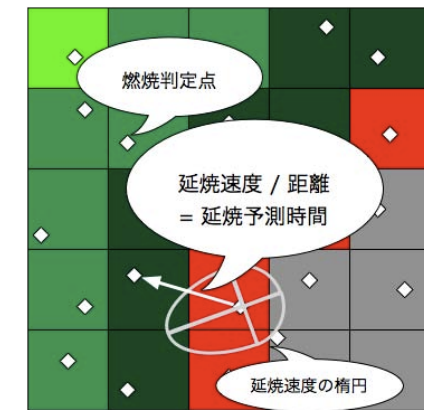


図 5. 延焼予測時間の計算

本研究でのシミュレーションは以下の手順で進められる。

1. シミュレーションエリアを格子状（セル）に分割する。（図 2）
2. 各セルにシミュレーションにより推定する情報の初期値と、シミュレーションを通して変動しない値を設定する。（図 3, 4）  
出力される情報と入力する情報は以下の物がある。

出力	入力
セルの状態（未燃・灰・燃焼）	標高
燃焼開始地間	植生・土地被覆データ（燃焼度）
	セルの状態（未燃・灰・燃焼）
	燃焼判定点

なお、燃焼判定点はそのセルの中心点ではなく、二次元 CA において円形に状態を遷移させる際に用いられる手法であるマーカス法を用いている。

3. 燃焼セルから各近傍の未燃セルへの延焼予測時間を算出する。  
ここで、延焼速度は延焼速度式を用いて算出し、セル間の距離は燃焼判定点を用いて求め、延焼予測時間を算出する。（図 5）
4. 複数の燃焼セルに隣接した未燃セルは、延焼予測時間の最も短い値をそのセルの燃焼開始時間とする。
5. 設定した回数、もしくは状態が遷移しなくなるまで 3. 4. を繰り返す。

#### 4. 延焼速度式

延焼予測に使用する延焼速度式は、既存の延焼速度式<sup>2)</sup>と、参考文献<sup>3)</sup>の実験から算出した値を参考にしている。

延焼速度は主に風とその他の影響（地形・燃焼度等）によって決定される。燃焼度とは、その場所の燃えやすさのことである。土地被覆データに基づき設定され、植生による可燃性の違いも含まれる。

##### 4.1 風の影響

任意方向への単位時間あたりの延焼速度ベクトルをプロットすると、図 6 のように楕円が形作られる。

主延焼方向は風向きと同じ方向であり、最も延焼速度が速くなる方向である。

裏延焼方向は主延焼方向から反対方向で、最も延焼速度が遅くなる。

横延焼方向は主延焼方向から垂直方向である。

また、各方向の延焼速度をそれぞれ、主延焼速度・裏延焼速度・横延焼速度と呼ぶ。

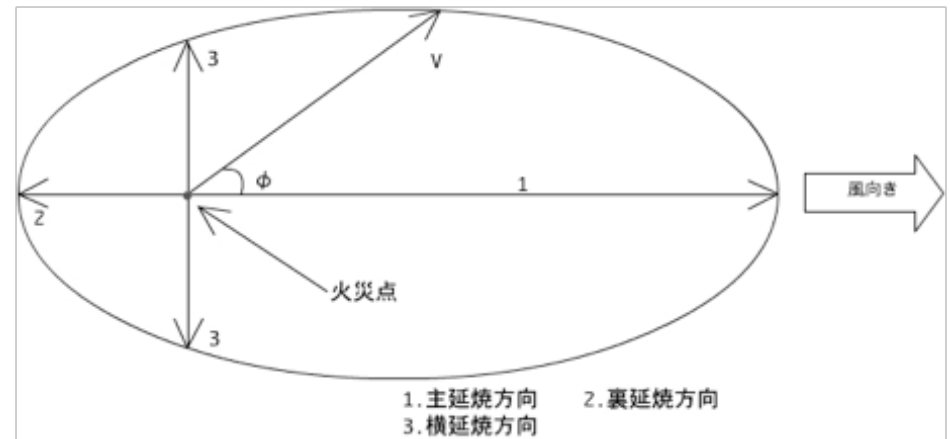


図 6. 延焼速度によって形作られる楕円風の影響による延焼速度は次の式(1)によって求められる。

$$v_W = 1 + W_C \cdot U \dots (1)$$

$v_W$ : 風の影響のみの延焼速度     $W_C$ : 風の影響力  
 $U$ : 風速

なお、本稿の数式で使われている『・(ドット)』は積を表している。

##### 4.2 その他の影響

主延焼速度( $v_E$ )は風の影響による延焼速度に湿度・燃焼度を考慮した次の式(2)にて求められる。主延焼係数 ( $M_C$ ) については後に述べる。

$$v_E = \{(7.5/R) \cdot F \cdot v_W\} \cdot M_C \dots (2)$$

$R$ : 湿度 (%)     $F$ : 燃焼度

$M_C$ : 主延焼係数

また、横延焼速度( $v_S$ )と裏延焼速度( $v_B$ )は次の式(3), (4)で求められる。

$$v_S = v_E \cdot 10^{-0.12 \cdot U} \dots (3)$$

$$v_B = v_E \cdot 10^{-0.214 \cdot U} \dots (4)$$

任意方向( $\theta$ )の延焼速度( $v_A$ )は次の式(5), (6)で表される。

$$v_A = \frac{1}{\sqrt{\cos^2 \theta / v_E^2 + \sin^2 \theta / v_S^2}} \quad (-\pi/2 \leq \theta \leq \pi/2) \dots\dots (5)$$

$$v_A = \frac{1}{\sqrt{\cos^2 \theta / v_E^2 + \sin^2 \theta / v_B^2}} \left\{ \begin{array}{l} (-\pi \leq \theta < -\pi/2) \\ (\pi/2 < \theta \leq \pi) \end{array} \right\} \dots\dots(6)$$

最終的な延焼速度(v)は、任意方向の延焼速度に傾斜角と傾斜の影響を考慮した、次の式(7)で求められる。

$$v = v_A \cdot 2^{T/S_C} \dots\dots(7)$$

T : 傾斜角                      S<sub>C</sub> : 傾斜の影響度

本研究では、以上の延焼速度式のうち、湿度・燃焼度・傾斜角と言った環境要因以外の変数、つまり各影響度はシミュレーション対象地域によって変化すると考え、また、それらを求める数式が確立していないことから、遺伝的アルゴリズムを用いて各影響度を求める。

## 5. 遺伝的アルゴリズム

遺伝的アルゴリズムとは、解候補(個体)を多数生成し、個体を評価して、その個体群に遺伝的操作(選択・交叉・突然変異)を行い、世代を重ねることで近似解を求める手法である。

本研究では解を構成する要素(遺伝子=各影響度)が実数なので、遺伝的操作を以下のように行っている。

### 5.1 選択

本研究ではエリート選択を使用している。エリート選択とは、1世代の個体群の一定数を前世代の上位個体とする選択方法である。これにより、個体群全体で評価が悪化することはなくなるが、多様性が失われる可能性がある。そのため、エリート選択に割く個体数を抑え、突然変異率を高めに設定している。

### 5.2 交叉

交叉は遺伝子を入れ替えるのではなく、ルーレット選択を行って取り出した個体2つの全ての遺伝子において、同じ位置にある遺伝子の平均値を取るという実装をしている。また、ただ中間点を取るのではなく、より評価値の高い個体に近づけるという処理を行っている。

### 5.3 突然変異

突然変異は、遺伝子1つをランダム変化させるのではなく、個体を作り直すこと、

つまり遺伝子すべてを生成し直すことで実現している。

### 5.4 遺伝的アルゴリズムで探索する変数(遺伝子群)

遺伝的アルゴリズムで探索する変数は、延焼速度式の項で述べたように、各影響度を遺伝子として組み込んだ。さらに、湿度、風速、風向きは詳細なデータが得られなかったため、これも探索するパラメータに含めた。また、延焼速度を調整する「主延焼係数(M<sub>C</sub>)」を探索するパラメータに含めた。この主延焼係数が延焼速度を定数倍することにより、時間スケールの調整を行うことができる。

以下に、本研究で探索するパラメータを示す。

W <sub>C</sub> : 風の影響度	S <sub>C</sub> : 傾斜の影響度
M <sub>C</sub> : 主延焼係数	
U : 風速 (m/s)	風向き (度)
R : 湿度 (%)	

### 5.5 評価関数

パラメータの適応度を計算する評価関数を以下のように設定した。

パラメータを与えて、シミュレーションエリア全体の燃焼開始時間を計算し、シミュレーション結果の評価値を以下の式(7)を用いて計算する。

なお、式(8)において、Cはシミュレーション結果が教師状態と一致した時の加点を大きくすることにより、燃焼範囲が教師状態の範囲を超えた時の減点を抑える係数である。パラメータ探索時にこの係数を設定しなければ、シミュレーション結果は教師状態の燃焼範囲内で推移し、実際の火災よりも過小な結果になってしまう。それを防ぐため、この係数を設定している。なお、本研究ではこの値を6としている。

つまり、この評価関数は初期状態からの変化を教師状態と比較し、評価値を算出している。また、この式によって算出する評価値は、実行結果の全てのセルが教師状態と完全に一致した時、最大値1.0となる。

$$Fitness = \frac{(RM \cdot C - OB) - IM}{TB - IB} \dots\dots(8)$$

RM : 実行結果と教師状態が一致したセル数  
OB : 実行結果のうち、教師状態からはみ出たセル数  
IM : 実行結果と初期状態が一致したセル数  
TB : 教師状態の燃焼セルの数  
IB : 教師状態の燃焼セルと初期状態の燃焼セルが一致した数  
C : 過燃焼許容係数

## 6. 実験

火災発生後 72 時間 (3 日後) が経過した状態 (図 7) を初期状態とし, 教師状態はその 24 時間後の状態 (図 8) を使用した。

また, 風速, 風向きと湿度を探索するパラメータに含めた。その理由は, シミュレーション対象地域から数 100km 離れた観測地のデータしか得られなかったためである。シミュレーション対象地域と同じデータとは考えにくいいため, パラメータとして探索を行った。

その他の実験条件も, 土地被覆データ適用以前と適用後で同じデータを使用している。なお, 画像内の青い線で囲まれた部分は教師状態の範囲を表している。

### 6.1 実験条件

- 燃焼度はセル毎に土地被覆データに基づいて設定 (土地被覆データ適用以前はフィールド全体で固定値を使用)
- 湿度・風速・風向きはパラメータとして探索
- 遺伝的アルゴリズムの設定: 世代数 100 世代, 個体数 100 個体
- 遺伝的操作の割合
  - エリート保存・・・0.1 (10%)
  - 交叉確率・・・0.6 (60%)
  - 突然変異率・・・0.3 (30%)

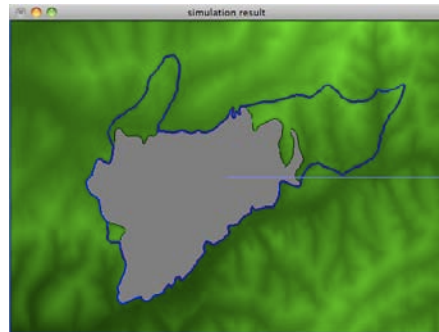


図 7. 初期状態

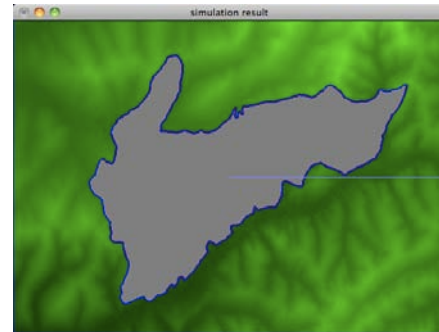


図 8. 教師状態

なお, この図では標高を緑色の輝度で表現しており, 輝度が低いほど標高が低く, 輝度が高いほど標高が高くなっている。また, 初期状態に燃焼度を表示した画像を次に示す。(図 9)

この図では燃焼度が高い箇所, つまり, より燃えやすい箇所を緑色の輝度で表している。輝度が高いほど燃焼度が高く, 輝度が低いほど燃焼度が低くなっている。

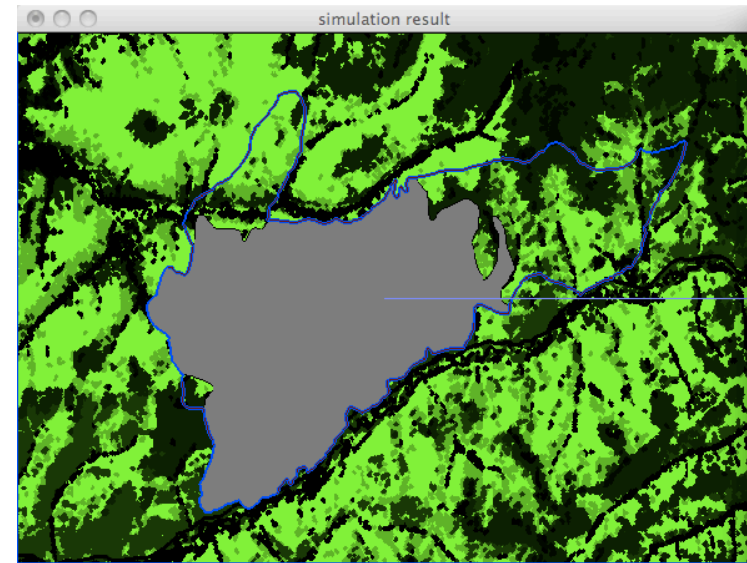


図 9. 燃焼度を表示した初期状態画像

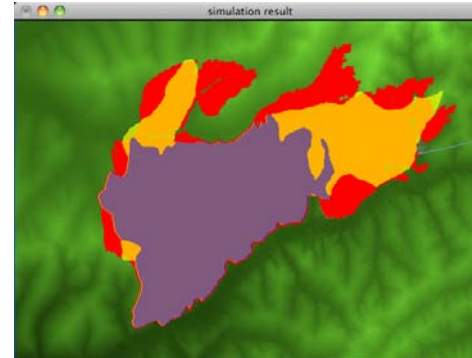


図 10. 土地被覆データ適用時の実行結果

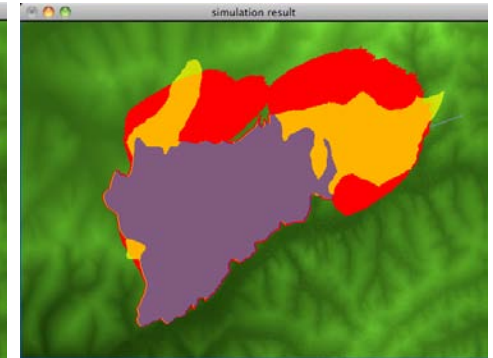


図 11. 土地被覆データ無しの実行結果

### 6.2 実験結果

前述の実験条件で行った結果と, 土地被覆データを適用時の実験結果を図 10, 土地被覆データ無し時の結果を図 11 に示す。なお, この画像では青紫の箇所が初期状態, 黄色い箇所が教師状態, 赤い箇所が実行結果を表している。

## 7. 考察

表 2 は、探索により得られたパラメータを詳細な植生データの有無別に示したものである。

また、風の影響度は参考文献 1) で使用されている値を、傾斜の影響度は参考文献 3) で実験結果から導いた設定値を、実行結果の参考値として並べた。

	土地被覆データ無し	土地被覆データ有り	参考値
風の影響度	3.295464	3.014833	3.0
傾斜の影響度	62.812702	30.630278	10
主延焼係数	4.647954	3.731784	1.0
風速(m/s)	8.313869	7.368732	
風向き(度)	333 (東北東)	343 (東北東)	
湿度(%)	81	79	
評価値	0.773264	0.813708	

表 2. 実行結果の比較表

実行結果の画像を見比べると、図 1 1 の土地被覆データ無しの実験結果では延焼範囲が地形とは無関係に広がっている。これは傾斜の影響度が 62.812702 となっていることが原因だと考えられる。「傾斜の影響度」は、値が大きいほど傾斜角度が延焼速度に与える影響が小さい(式 7)。例えば、傾斜角が 10 度で傾斜の影響度が 60 の時、延焼速度はおよそ 1.1 倍され、傾斜角が-10 度ではおよそ 0.9 倍となる。つまり、傾斜角の影響が小さくなっているため、地形の影響も小さくなっていると考えられる。

それに対して、土地被覆データ有りの実行結果では、傾斜の影響度が 30.630278 と、参考値と比べて影響が小さくなっているにも関わらず地形に沿った延焼が見られる。これは、土地被覆データによって得られた植生分布が地形に沿っているため、地形に沿って延焼したように見えたと考えられる。

評価値を比較すると、土地被覆データ無しの実験結果では評価値が『0.773264』であるに対し、土地被覆データ有りの実行結果では評価値が『0.813708』と、向上した。

延焼範囲の形状と評価値の向上から、土地被覆データは森林火災延焼拡大モデルにおいてシミュレーションの精度を向上させるのに有効だと考えられる。

## 8. おわりに

本研究では、土地被覆データに基づき局所的な植生や土地被覆の変化を延焼速度に反映させた森林火災延焼拡大モデルを提案・実装し、衛星による観測データとの比較実験を行った。その結果、シミュレーション精度の向上が見られた。

今後は、他の初期状態・教師状態を用いた実験を行い、森林火災延焼拡大モデルの正確さを検証したい。

**謝辞** 本研究は科研費(20241042)の助成を受けたものである。

## 参考文献

- 1) 木村圭司, 小鍛冶貴介, 本間利久, 中右浩二, 串田圭司, 福田正己, 早坂洋史: 北方森林火災の延焼拡大シミュレーション, 地理情報システム学会講演論文集, vol.14, pp185-188 (2005)
- 2) パソコンを用いた林野火災の拡大予測に関する研究 (1990), 消防庁 消防研究所 研究資料 第 22 号  
[http://www.fri.go.jp/pdf/shiryo/shiryo\\_no22.pdf](http://www.fri.go.jp/pdf/shiryo/shiryo_no22.pdf)
- 3) 林野火災の延焼速度に関する実験的研究 (1992), 森林総合研究所関西支所研究情報 No.24  
<http://www.fsm.affrc.go.jp/Joho/24/p2.html>
- 4) U.S. Geological Survey  
<http://www.usgs.gov/>
- 5) Multi-Resolution Land Characteristics Consortium (MRLC)  
<http://www.mrlc.gov/>