

森林火災リスク軽減と森林保全 —統合的空間モデルによる分析—

木島 真志

特任研究員 大学共同利用機関法人 統計数理研究所 リスク解析戦略研究センター

(〒106-8569東京都港区南麻布4-6-7)

E-mail:konoshim@ism.ac.jp

森林火災被害は、生息地破壊・温暖化への影響など様々な環境問題を引き起こす。近年のアメリカ西部における大規模な森林火災被害は、その対応策として“間伐”や“火入れ”など事前の火種（小径木・下草など）管理が必要であるという認識を広めた。限られた予算のため火種管理は費用効率的に行われる必要がある。しかし、保護地域などの物理的制約は、管理の効率的な空間配置に制約を加える可能性がある。本研究では、火災の拡散メカニズムをとらえた物理モデルと空間的資源配分モデルを統合した数理最適化モデルを構築し、保護地域の導入が森林火災リスク軽減のための管理空間配置の効率性に与える影響を分析した。本研究の結果は、保護地域の導入が森林火災被害発生確率を高める可能性がある事を示唆した。

Key Words : forest fires, physical model, integrated mathematical programming model, risk, GIS

1. 背景・目的

近年、世界中（北米、東南アジア、オーストラリア、最近では、ギリシア）で森林火災による深刻な被害が報告されている。森林火災による被害は多岐に及ぶが、例を挙げると、住居地域への火災拡散による人的・経済的被害、森林火災後の土砂流出による人的・経済的被害、野生動物への直接的被害と生息地破壊、それに伴う生物多様性の喪失、そして火災による炭素排出に伴う温暖化への影響などである。

アメリカ西部における深刻な火災被害は、ヨーロッパ移民の移住以来行われてきた活発な火災沈静活動により、森林の植生が変化した事に加え、1980年代以降の生物多様性などを考慮した森林保護政策により、間伐などの管理が施行されなくなったことが原因であると考えられている¹⁾。従来、森林火災は、森林生態系において重要な役割を果たしてきた。自然発火は、小径木・下草などを焼き払い、これら火種の蓄積を防ぐことにより、“将来起こりうる”発火による森林火災の規模・程度を抑制してきた。しかし、活発な火災沈静活動は、このような効果が適切に起こることを妨げ、広範囲にわたり過度に火種蓄積量を増加させ、その結果、被害の規模・程度が大きくなったのである。更に、80年代以降進められた、森林保護政策は、火種蓄積量の増加を助長した。

このような植生状態の森林において一旦発火が起こる

と、火災は生態系に悪影響を及ぼすだけでなく、住居地域へまで拡散し、人命にも影響を及ぼすことになり、鎮火活動に掛かる費用も莫大なものとなる。これらの現状を踏まえ、従来の事後処理中心の対応策に限界があるとの認識が広まり、事前の火種管理（下草削除・間伐・火入れなど）を通して、被害の軽減及び、事後処理の費用を軽減する事の重要性が森林管理者、研究者、地域住民の間で確認された。

しかし、対象とする森林地帯すべてにおいて火種管理を施す事は、経済的にも物理的にも不可能である²⁾。アメリカ林野庁の森林火災に関わる予算は依然事後処理に対するものが大半を占めている。それゆえ、限られた予算のもと費用効率的に火種管理すべき箇所を優先化していく必要がある。費用効率的な火種管理の研究は、Konoshima *et al.* (2008)³⁾が火災拡散メカニズムを考慮し、戦略的に火種管理の空間配置を決定することで費用効率性が達成できる事を示した。

一方、物理的な制限の例としては、生息地保全などの理由で保護地域に指定されたことで火種管理を施すことができないことがある。せっかく生息地保全のために保護地域に制定しても火種管理が施せないため、火種が過度に蓄積され、“将来の起こりうる”火災により生息地が破壊されるという可能性が生じる。過度な火種蓄積量により火災被害が深刻化するなかで、どのように保護地域を扱うかは森林資源管理の重大な課題であり、

今後ますます議論される課題であるが、そのためには、まず保護地域の制が森林火災被害に与える影響を把握することが重要である。

本研究では、森林火災の空間的拡散メカニズムをとらえた物理モデルを空間的に明示的な資源配分（火種管理エフォートの時空間配分）モデルに組み込み、効率的な火種管理の配置が探究できる統合的数理最適化モデルを構築した。そして、それを用いて、保護政策による制約が森林火災被害発生に与える影響を定量的に評価し、保護地域という物理的制約が効率的な管理の空間配置実現に与える影響を分析した。

2. 研究の方法

費用効率的な火種管理の空間配置が探索できる統合的数理最適化モデルは、火災リスクを内因性のものとして扱うことにより、解の探索過程において便益、費用、リスク間のトレードオフが考慮できる必要がある。

森林火災被害は、発火地点、森林構造の空間的配置、傾斜、風向きなどに依存して空間上を広がる火災の空間的拡散メカニズムに依存する。森林管理者は火種管理を通して林分（森林における管理の単位：森林はいくつもの林分の集合と考えられる）の森林構造（地表上の火種蓄積など）を変化させることで、対象林分における火災の拡散速度を軽減できる。それゆえ、火種管理を適切に空間配置することで、効果的に火災拡散を軽減することが期待できる。

問題をより難しくさせるのは、発火地点に関して不確実性が存在することである。つまり、事前の火種管理による森林火災被害リスク軽減は、森林管理者が、火災の起こる以前に、潜在的発火地点からどのように火が拡散するかを予測した上で、火災が過度に拡散しない森林構造の空間的配置を決定する必要がある。発火地点により火災被害の空間的パターンが異なるので、潜在的発火地点が複数存在するなら、1つの管理空間的配置パターンに対して、複数の火災被害の空間的パターンが存在することになる。管理空間的配置パターンは、“組み合わせ”の要素を持ち、林分の数に対して指数的にパターンの数が増える。1つの管理パターンに対して複数の火災被害パターンが存在するので、すべての管理パターンに対するすべての火災被害パターンを評価し、最適な（費用効率的な）火種管理の空間配置が決定されなければならない。それゆえ膨大な空間的パターンの評価が必要になる。一般にこのような森林管理問題は、整数計画法による定式化が必要となる。整数計画法による定式化自体は難しくないが、問題が大き（変数が多くなる等）な

るにつれて、解を合理的な時間内に求めることが困難になる。本研究では、ヒューリスティック最適化モデルを適用し、厳密な最適解の探求ではなく、最適解の近似を求めることにした。

本研究では、保護政策の影響を評価するため最適化モデルにおいて、保護地域を空間的制約条件として扱った。保護地域の空間上の位置は、試験地のGISデータを用いて特定した。

(1) 火災モデル

本研究では、森林ランドスケープ上の確率的な火災被害空間パターンを評価する必要があるために、発火確率をそれぞれの林分に割り当てた。それぞれの林分において発火が起こる確率は0.02とした。この値は、オレゴン州のボンデロサパイン森林における平均的な火災発生率に基づいた（年率2%から6%とされている⁹⁾）。発火地点から火災の空間的拡散パターンは天候条件により決定論的に決まるとする⁹⁾。火が移動する距離は、火種蓄積量とその空間的配置により決まる。火災の拡散速度は、それぞれの林分の火種蓄積量に依存する。本研究では、各林分における拡散速度をBehavePlus[®]という森林火災シミュレーションモデルを用いて計算した。一旦発火すると火は森林ランドスケープ上を火災持続時間の間、拡散速度に従い広がり続ける。火災持続時間は、天候に依存すると考えられる。火災が1つの林分から隣接する林分に移動するに伴い、拡散速度はその林分の火種蓄積量に応じて調整される。

(2) 資源配分（火種管理エフォートの空間配分）モデル

森林管理者の火種管理最適化問題を、0-1整数計画法により現わした。最適化モデルを構築する上で、次の表記を定義した。 $i=1, \dots, I$; I が林分を、 $i=1, \dots, I$ が計画期間をそれぞれ表すとした。制御変数 x_i は、バイナリーで表され、次のようになる。

$$x_i = \begin{cases} 1 & \text{if stand } i \text{ is assigned fuels treatment} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

本研究では、森林管理者は、各期において林分が森林火災により破壊されなければ、その林分より一定の価値を得るとする。もし、林分が森林火災により破壊されれば、その価値を得ることはできない。ここで、林分の生存率（つまり、その価値を失うかどうか）は、その林分に火災が拡散した際の炎の長さによる。本研究では、前述のBehavePlus[®]という森林火災シミュレーションモデルを使って炎の長さを計算した。なお、炎の長さは地表上の火種蓄積量に依存する。

森林管理者は、各評価期において、管理可能な林分

の制約条件のもと、各評価期の最後にランドスケープから得る収益の期待値が最大になるように管理を施す林分の集合を選ぶ。ここで火種管理は、地表上の火種蓄積量を50%減らすこととする。

(3) 最適化モデル

通常の確率動的計画法の0-1整数問題への適用は、管理する林分の数が少ない場合は困難でないが、対象とする森林における林分の数が多くなるほど、困難になる。そこで本研究では、動的な火種管理エフォートの配分に關しては、Costello and Polasky (2004)⁹が用いた1期先ヒューリスティック探索 (1 period look-ahead heuristic) を用いた。また、空間的配置問題に關しては、“焼きなまし法”と呼ばれるヒューリスティック・アルゴリズムを用いて最適解の近似を求めた。

各期の最適化モデルは、目的関数 (収益現在価値など) を最大化するために「どの林分に対して、火種管理を割り当てるか」を決定する“組み合わせ”問題になる。先述のように大規模な“組み合わせ”問題は、従来の分岐限定法 (ブランチ・アンド・バウンド法) による解の探索が困難なので、ヒューリスティック・アルゴリズムを用いた。本研究では、“焼きなまし法”により解の探索を行った。

“焼きなまし”とは、金属材料を熱した後、徐々に冷やすことにより、結晶を成長させて、欠陥を減らす作業の事であり、そのメカニズムを取り入れた最適化アルゴリズムを“焼きなまし法”と呼んだ⁹。

“焼きなまし法”による最適化は、さまざまな応用において、総じて“良い”実行結果をもたらすことが報告されており、森林管理における問題にも多く応用されている^{9, 10, 11}。

ここで、構築されたアルゴリズムによる探索のプロセスは以下の通りである：

- 1) 計算の初期において、火種管理をそれぞれの林分*i*にランダムに割り当てる。このとき、制約がある場合 (例えば、保護地において火種管理は行わない) はその制約を満たす“組み合わせ”が見つかるまで初期の“組み合わせ”の探索を行う。
- 2) ステップ1) による“組み合わせ”の目的関数値 (期待値) の計算を行う。それぞれの火種管理空間配置パターン (“組み合わせ”) による収益期待値の計算には、その空間火種管理配置に対するすべての可能な森林火災被害の空間的パターンとそのパターンが起こる確率を予測する必要がある。発火地点が異なると、異なる森林火災被害の空間的パターンが生じる。ある発火地

点からの火災拡散の空間的パターンは以下のようにより見られる。まず、森林火災持続時間がシミュレーション開始前に事前に与えられる。ある潜在的な発火地点からの火災は、その林分に隣接するすべての林分*j*に、それぞれの林分における拡散速度に応じて広がる。拡散のために費やされる時間は、その林分*i*の端から端までの最短距離をその林分上の拡散速度で割ることにより計算される。拡散のために費やされた時間が森林火災持続時間より小さければ、火災は発火地点の隣接地に拡散し、更にその林分*i*から次の隣接する林分*j*に拡散速度に応じて広がる。ここで、森林火災持続時間は、その林分*i*に到達するまでに費やした時間分だけ少なくなっている。あらたな林分*j*に拡散するために費やされた時間が計算され、それが、残りの森林火災持続時間より小さければ、火災は隣接地に拡散する。残存する森林火災持続時間が0になるとこの火災拡散プロセスは終了する。プログラムは、この発火地点*i*からの火災空間パターンにおける被害を評価し、メモリーに保存する。そして、次の可能な発火地点から同様のプロセスを行い、その発火地点からの火災の空間的パターンにおける被害が評価され、保存される。すべての可能な発火地点からの火災の空間的パターンにおける被害が評価され、保存されれば、プログラムは評価している火種管理の空間的配置パターンの期待値を可能な火災被害の加重平均をとって計算する。プログラムは、この期待値 (目的関数値) を“テンポラリーな”最大値として保存する。

- 3) 次に1つの林分を無作為に選び、初期に割り当てられた管理処方と異なる管理処方を割り当て (例えば、最初の“組み合わせ”において、火種管理が割り当てられていなければ、ここでは、火種管理を割り当てない)、制約条件を満たすか評価し、満たすなら、その目的関数値をステップ2) の過程に従って計算し、“テンポラリーな”最大値と比較する。ここで、改善された解 (目的関数の値が大きい) なら、その解を受け入れる。また、改善されない解であっても、以下の式 (1) を用いて、確率的にその解を受け入れることで、ローカルな極小状態に陥いるのを防ぐ。

$$e^{(\Delta OF Value) / Temp} > r \quad (1)$$

ここで、

$\Delta OF Value$: 目的関数値の変化

$Temp$: 温度パラメーター

$r: 0-1$ の一樣分布から無作為に抽出された乱数

ステップ2), 3)の評価プロセスを繰り返して, 解を探究する。プロセスの進行と共に $Temp$ の値を下げて行き, $Temp$ がある値 (事前に設定する) に達するとプロセスが終了し, その時点の解を報告し, 1期目の最適解を求めるアルゴリズムは終了する。次に2期目の最適解の探索に移る。2期目においてもステップ2), 3)に従い最適解を求める。これを計画期間に順次適用する。

(4) 試験地

試験地はオレゴン州立大学の所有する演習林 (マクドナルド・ダン・フォレストリー) の南西部にある約 2,900acreの森林地帯を選んだ。109個の林分からなる森林で樹齢100を超える林分がいくつも存在する (図-1)。このように樹齢の高い林分は一般的に複雑な林分構造を持ち多くの野生動物の生息地の役割を果たすため, 保護地域と指定されることが多く, 実際にマクドナルド・ダン・フォレストリーにおいてもこの地域は間伐など管理の対象にはなっていない。それゆえ, 保全林の設置が森林火災被害に与える影響を評価するのに適している。

保護地域制約に関して以下の3つのシナリオ: 1) 保護地域に対する制約なし (以後Base Caseと呼ぶ), 2) 樹齢120を超える林分は管理の対象にならない (以後OG120と呼ぶ), 3) 樹齢80を超える林分はすべて管理の対象にならない (以後OG80と呼ぶ) を検討した。

更に予算制約により, 各期において, 最多で40個の林分しか火種管理できないというシナリオ (以下B40) を考慮し, その制約とOG120, OG80と合わせたシナリオをそれぞれB40_OG120, B40_OG80とした。合計6つのシナリオ (Base Case, OG120, OG80, B40, B40_OG120, B40_OG80) にお

表-1 各シナリオの森林火災被害発生確率比較

	Base Case	OG120	OG80	B40	B40_OG120	B40_OG80
保護地域	0.1175	0.1455	0.1592	0.1523	0.1720	0.1724
森林全体	0.1139	0.1254	0.1435	0.1450	0.1577	0.1575

いて最適な空間的火種管理配置と森林火災被害の発生確率を評価した。なお, 本研究では, 計画期間は20年, 期間隔は1年とした。

3. 結果・考察

(1) 保護地域における森林火災被害

表-1の1行目は, 計画期0期の保護地域における各シナリオの森林火災被害発生確率をまとめたものである。シナリオOG120, OG80において, 森林火災被害が起こる確率は, Base Caseと比べてそれぞれ24%, 36%高くなった。予算制約により, 一度に管理できる林分の数が40個に制限された場合 (シナリオB40) は, 森林火災被害が起こる確率がBase Caseと比べて30%高くなった。保護地域の制約と予算制約を合わせたシナリオB40_OG120とB40_OG80において, 森林火災被害が起こる確率がBase Caseと比べてそれぞれ46%, 47%高くなった。また図-2は, 計画期0期における最適火種管理の空間パターンを示している。

6つの異なるシナリオ分析の比較から, それぞれの制約は, 保護地域における森林火災被害の発生確率を増加させることが分かった。制約条件が最も厳しいシナリオB40_OG80において森林火災被害が起こる確率ももっとも高い結果となった。

図-3は, Base Case, OG120, OG80の3つのシナリオについ

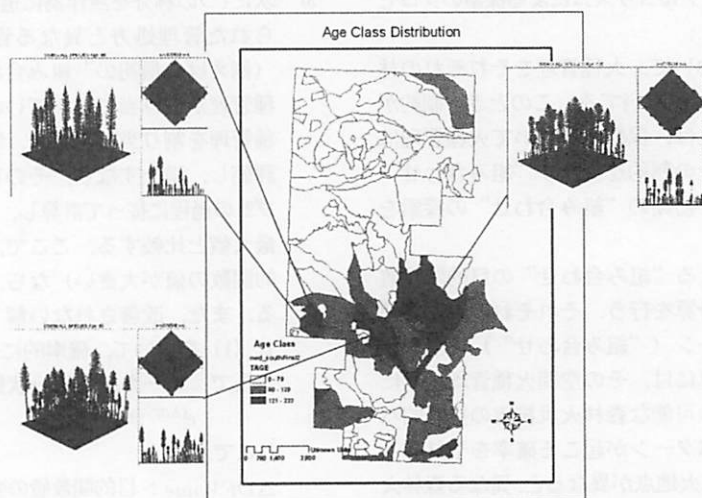


図-1 試験地と保護地域

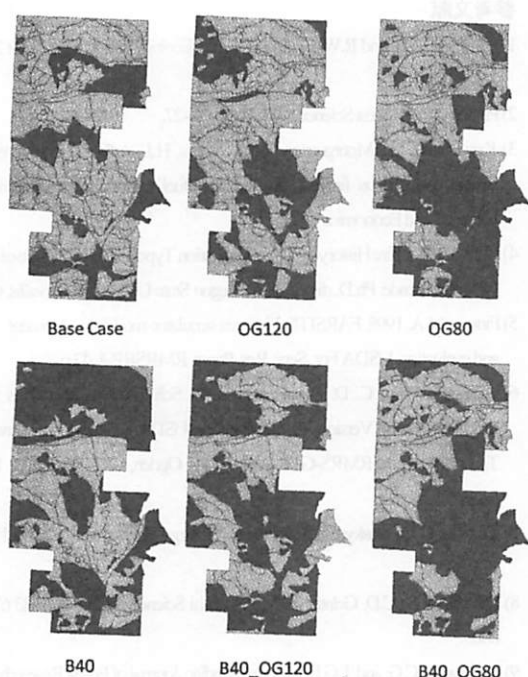


図-2 最適火種管理空間配置 (薄いグレー：火種管理)

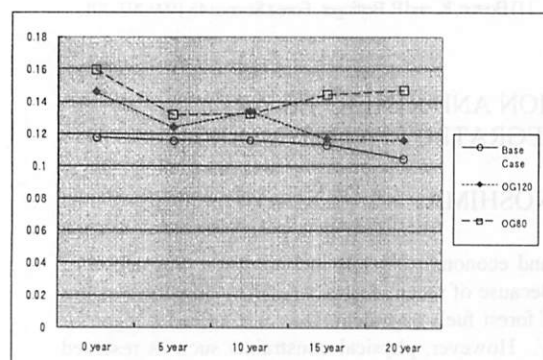


図-3 保護地域における火災被害発生確率の変化

て保護地域における森林火災被害発生確率の平均を5年ごと(20年間)評価したものである。保護地域における森林火災被害発生確率は、保護地域制約により最大でBase Caseと比べて、40%も高くなることわかる(OG80)。

(2) 対象森林全体における森林火災被害

表-1の2行目は、6つのシナリオ(Base Case, OG120, OG80, B40, B40_OG120, B40_OG80)において、計画期0期の対象とする森林全体における森林火災被害発生確率をまとめたものである。シナリオOG120, OG80共に森林火災被害が起る確率がBase Caseと比べて、それぞれ10%、

26%高くなった。予算制約がある場合(シナリオB40)は、森林火災被害が起る確率がBase Caseと比べて27%高くなった。

(3) まとめ

予算制約(B40)は、森林管理者が各期において40個(106個のうち)の林分しか火種管理を施業できないというきびしい制約であった。一方、シナリオOG180においては、B40のおよそ2倍もの林分が施業可能であった。しかし、対象とする森林全体での森林火災被害が起る確率は、B40のそれとほぼ等しくなり、保護地域における森林被害の発生確率に関しては、B40のそれよりも高くなった。このことから、保護地域は、それが限定された地域で広範囲に広がらなくても、森林火災被害が起る確率に多大な影響を与える可能性があることが示唆された。保護地域の導入は火種管理の空間的配置の選択に制約を加えるので、森林管理者はもっとも効率的に火種管理を配置する柔軟性を失い、火災被害軽減に対しては、非効率的な管理の空間的配置になる。

一方、本研究で考慮した予算制約は保護地域の導入に比べて、管理施業に関して数量・範囲的により厳しい制限を加えるが、森林管理者は効率的に火種管理を空間配置できるので、保護地域導入と同程度の火災被害リスク軽減目的を達成できる可能性がある。

4. おわりに

北米において、近年の森林火災被害の深刻化は、従来の事後処理中心の対応策に疑問を投げかけた。現在、管理者・住民・研究者の間の共通の認識は、事前の火種管理を通して、火災被害リスクを軽減する必要があるということである。事前管理は、予算制約のため費用効率的に行われることが重要である。先行研究は、費用効率性を追求するためには、森林火災拡散メカニズムを考慮した上で、火種管理の空間配置が行われる必要があることを示した。しかし、保護地域などの物理的制限は、火種管理の空間配置の決定に制約を加えるものであり、森林火災被害リスク軽減という目的に対しては、効率的な管理が施せない可能性がある。

本研究では、保護地域が森林火災被害発生確率にどのような影響を与えるか定量的に評価した。分析には、火災の拡散メカニズムをとらえた物理的モデルと空間的に明示的な資源配分(火種管理エフォートの時空間配分)モデルを統合した数理最適化モデルを構築し、それを用いた。本研究における分析結果によると、保護地域は森林火災被害の発生確率を高め、効率的な空間配置による

リスク軽減に悪影響を及ぼす可能性があることを示唆した。

日本における森林火災の被害は、欧米、オーストラリア、東南アジア諸国に比べて少なく、それゆえ、火災被害軽減のための管理・政策が注目されることはあまりない。しかし、多くの自然災害は、森林火災のように空間的プロセスである。そのような災害のリスクに対して、事前の管理でリスク軽減を目指す場合、「どこにどのような管理を施業するか」を決定する必要がある。このような政策作成又は、実施に関わる意思決定の段階における情報提供には、ここで構築したモデルのように、災害の空間的拡散メカニズムをとらえた物理モデルと資源配分モデルを統合したモデルによる分析が必要である。近年、日本でも台風など自然災害のリスク管理の重要性が認識され始められており、このような統合的モデルが構築されれば効率的な管理戦略の実施に役立てられる情報提供が可能であろう。

謝辞：本研究を遂行するにあたって、多くの人々にご協力をいただきました。オレゴン州立大学森林学部森林資源学科のベイリー教授、アルバース教授のご指導ならびに森林資源学科・森林科学学科・森林利用学科の先輩方や仲間である院生（特に、ダン氏）の暖かいご協力に感謝の意を表したいと思います。

参考文献

- 1) Sampson, R.N. and R.W. Sampson. *Forest Ecology and Management* 211 2005. 109-116.
- 2) Finney, M.A. *Forest Science* 47(2) 2001. 219-27.
- 3) Konoshima, M., Montgomery, C.A., Albers, H.J., Arthur, J.L. [in press]. Spatial endogenous fire risk and efficient fuel management and timber harvest. *Land Economics*
- 4) Bork, J. 1985. Fire History in Three Vegetation Types on the East Side of the Oregon Cascade. Ph.D. dissertation. Oregon State University, Corvallis, OR.
- 5) Finney, M.A. 1998. FARSITE: Fire area simulator-model development and evaluation. USDA For. Serv. Res. Paper. RMRSRP-4. 47 p.
- 6) Andrews, P. L., C. D. Bevins, and R. C. Seli. (2005) BehavePlus fire modeling system, Version 3.0: User's Guide. USDA Forest Service General Technical Report RMRS-GTR-106WWW. Ogden, UT. (6,726 KB; 134 pages)
- 7) Costello, C.J., Polasky, S. : *Resource and Energy Economics* 26 2006 157-174
- 8) Kirkpatrick S., C.D. Gelatt and, M.P. Vecchi *Science* 220(4598) 1983 671-680.
- 9) Lockwood, C.G. and T.G.E. Moore *Canadian Journal of Forest Research* 23 1993 468-478.
- 10) Murray, A.T. and R.L. Church. *OR Spectrum* 17 1995 193-203.
- 11) Boston, K. and P. Bettinger. *Forest Science* 45 1999 292-301.

FOREST FIRE RISK MITIGATION AND RESERVED AREA -ANALYSIS THROUGH AN INTEGRATED SPATIAL MODEL-

Masashi KONOSHIMA,

Forest fires lead to several negative environment and economic impacts including the destruction of wildlife habitats, soil erosion, and global warming. Because of recent destructive forest fires in Western US there is a general agreement on the importance of forest fuels treatment. Due to a limited budget for fuels treatment, fuels must be treated cost-effectively. However, physical constraints such as reserved areas may prevent land managers from allocating treatment in a cost effective way in order to mitigate fire risk. In this study we combine a physical model capturing a fire spread mechanism into a spatially explicit resource allocation model and develop an integrated mathematical programming model for analyzing the impact of establishing reserved areas on cost-effective fuels management. Our results show that establishing reserved areas may increase the probability of fire damage.