

# リアルタイム火災延焼動態システム構築に資するシミュレーション基盤に関する研究開発

○室崎益輝<sup>1)</sup>・神田学<sup>2)</sup>・青木尊之<sup>2)</sup>・座間信作<sup>3)</sup>・廣井悠<sup>4)</sup>・土屋徹<sup>5)</sup>・西岡保雄<sup>6)</sup>

Yoshiteru Murosaki, Manabu Kanda, Teruyuki Aoki, Shinsaku Zama, Yuh Hiroi, Toru Tuchiya and Yasuo Nishioka

**研究課題の要旨:** WRF-Fire を日本の山林火災事例に適用し、実際の火災状況と比較した結果、空間的・時間的な再現性が確認できた。このことから、WRF-Fire が微気象の影響を十分に反映でき、日本にも適用できることが検証された。さらに、WRF-Fire を市街地火災に適用するために、既存の火災延焼予測手法の解析を行い、WRF-Fire を改良した。さらに、LES の市街地火災への適用妥当性を検討した。また、国内外の石油タンク火災のデータを収集・整理し、WRF-Fire の適用可能性を検討した。

**キーワード:** 延焼シミュレーション、山林火災、市街地火災、石油タンク火災

## 1. 研究の背景・目的

大規模火災は実大実験を行うことが不可能なため、コンピュータ・シミュレーションモデルの提案が求められている。しかし、日本における予測手法やシミュレーションモデルでは、大規模火災の性状を大きく左右する「火災建物周辺のミクロな風環境による火災性状の変化」及び「飛び火による跳躍延焼」が十分考慮されていないのが、現状である。

特に、気象に起因する風と火災の熱との相互作用は、延焼火災の拡大や火災旋風が発生する要因のひとつと考えられるが、その検討範囲は、数 cm から約 2,000 km と広い。幸い、気象モデルの研究は活発であり、特に汎用気象モデル WRF (Weather Research and Forecasting) は、4次元データ同化法技術やネスティングによる局所・広域の相互接続技術が確立されている。

本研究では、領域気象モデル WRF と山林火災を対象とした火災モジュールのオンライン結合モデル WRF-Fire を用いて、実際に日本で発生した山林火災のシミュレーションを行い、実際の火災データとを比較して、火災が周囲の風環境に与える影響や燃料設定による火災動態への影響を検討することにより、日本での適用性を検討した。さらに、この検討結果を基に、WRF-Fire を市街地火災に拡張・適用するための基礎的な検討を行った。また、石油タンク火災への WRF-Fire の適用性、局所・広域の相互接続技術に関わる LES (Large Eddy Simulation) の適用妥当性の基礎的な検討を行った。

## 2. 日本の山林火災における WRF-Fire 適用検討

### 2.1 シミュレーションの準備および実施、結果の整理

#### 2.1.1 使用するモデルの説明

##### 【WRF】

領域気象モデル Weather Research and Forecasting model (WRF) は、National Center for Atmospheric Research (NCAR) と National Center for Environment Prediction (NCEP) らにより共同開発されたモデルで、気象予報、学術研究の双方で扱うことができる。特に NCAR が中心として開発した Advanced Research WRF (ARW) は学術研究に向けたモデルであり、本研究では ARW ver.3.3.1 を扱う。WRF は大気大循環モデルに見られる静力平衡近似や非弾性近似及び非圧縮性近似を用いず、3次元完全圧縮の非静力モデルである。雲物理量モデル、放射モデル、乱流モデル及び地表面モデルなど多数のモデルが扱われ、また、数メートルから数千キロメートルまで幅広い領域を計算することができる。その基礎方程式は運動方程式、連続式、状態方程式、熱量保存方程式、混合比保存式から成る。

##### 【WRF-Fire 火災モジュール】

WRF-Fire の火災モジュールは、領域気象モデル WRF に組み込まれた地表面火災延焼計算を可能とするモデルである。WRF により計算された地表面の風向、風力データは火災モジュールに入力され、地形の勾配及び燃料分布のデータとともに火災の瞬間的な拡散率及び進行方向を決定する。一方で、火災モジュールにより燃料消費が計算され、大気中へ放出する熱及び水蒸気量データを出力する。これにより発生したプルームと風の合流により、火災の周囲の風環境が変化する。これら大気データと火災データの相互作用により、各時系列でのオンラインシミュレーションを明示的に扱うことができる。気象モデル WRF では3次元の計算を行うのに対して、火災モジュールでは地表面のみ2次元計算を行う。また WRF-Fire では樹冠火は処理されず、地表面を進む火災が再現される。

(所属機関)

- 1 公益財団法人 ひょうご震災記念21世紀研究機構
- 2 国立大学法人 東京工業大学
- 3 国立大学法人 横浜国立大学
- 4 国立大学法人 東京大学
- 5 株式会社 防災&情報研究所
- 6 神戸市消防局

### 【WRF-Fire 延焼速度式】

WRF-Fire の火災延焼速度は、半経験的に導かれた延焼モデルを使用する。このモデルにおいて、延焼速度式は局所風、地形勾配及び燃料特性により決定され、Rothermal (1972) に基づき定義される。延焼速度 $R$ は、

$$R = R_0(1 + \phi_w + \phi_s) \quad (1)$$

$R_0$ は無風時の延焼速度、 $\phi_w$ は風速による影響を表す風速補正值、 $\phi_s$ は地理的要因である傾斜による影響を表す傾斜補正值である。ここで、無風時の延焼速度 $R_0$ は

$$R_0 = \frac{I_R \xi}{\rho_b \varepsilon Q_{ig}} \quad (2)$$

$I_R$ は単位時間、単位面積当たりの熱放出速度を変化させる反応強度、 $\xi$ はフラックス比、 $\rho_b$ は乾燥時の1立方メートル当たり燃料密度、 $\varepsilon$ は初めに点火温度まで上昇させなければならない燃料の割合、そして $Q_{ig}$ は発火熱量である。つまり延焼速度は、燃料を燃焼温度に上昇させるのに要する熱量(分母)と火災領域の前方部が受ける熱量(分子)の比率により決定される。風速補正值 $\phi_w$ は

$$\phi_w = C(aU)^{0.02526\sigma^{0.54}} \frac{\beta}{\beta_{op}} \frac{0.715 \exp(-3.59 \times 10^{-4} \sigma)}{\beta_{op}} \quad (3)$$

ここで $(aU)$ は火線に垂直な風速成分の大きさで、係数 $C$ 及び最適重点率 $\beta_{op}$ は、燃料の表面積対体積比と重点率の関数として計算される。これは、燃料が占有する燃料床面積の割合として解釈される。可燃物の温度が上昇し着火するまでの間、風の影響がある場合には可燃物の温度より気温が高くなる。そのため着火温度までの上昇時間が短くなり、延焼速度が大きくなる。この温度上昇の影響のしやすさは燃料床面積の割合により変化する。また、より強い風により炎が地表面へ傾く影響からも延焼速度は増加する。傾斜補正值 $\phi_s$ は

$$\phi_s = 5.275\beta^{-0.3}(\tan \phi)^2 \quad (4)$$

$\phi_s$ は傾斜角度で、地表面の地形データから求められる。延焼速度 $R$ は風速の増加に伴い無限に増加しないため、6msを最大値とする。

延焼速度を変化させる燃料の主な要因は、可燃物の重量、形状、密度、熱的特性及び含水比である。上で示した式に含まれるパラメータはこれらの燃料特性を示す。

### 【WRF-Fire 燃料消費率・熱量】

燃料消費率は、燃料燃焼時間 $T_f$ により制御され、燃料質量の指数的な減少を示す。

$$F(t) = \exp\left(-\frac{t-t_i}{T_f}\right) \quad (5)$$

ここで $F$ は残り燃料の割合、 $t_i$ は着火時間、 $t$ は着火後の時間を示す。燃料残量の極度な減少や、燃料水分がその燃料カテゴリの吸湿量を超えると、火災は熱を放出しなくなる。

燃料消費の際には熱と水蒸気が放出される。火災によって放出される顕熱フラックス $H_s$ は

$$H_s = \frac{\Delta F}{\Delta t}(1 - B)w_1h \quad (6)$$

ここで $\Delta F$ は時間ステップ $\Delta t$ における燃料質量の変化、 $w_1$ は初期燃料重量、 $w_1h$ は乾燥セルロース燃料の燃焼熱である。 $B$ は総燃料質量と水の比であり、

$$B = \frac{M_f}{1 + M_f} \quad (7)$$

$M_f$ は燃料の含水比である。燃料消費により放出される潜熱フラックス $LE_s$ は

$$LE_s = \frac{\Delta F}{\Delta t}[B + 0.56(1 - B)]Lw_1 \quad (8)$$

ここで $Lw_1$ は水の蒸発潜熱である。第一項は木材のセル間の水分から生じ、第二項はセル自体の水分から生じる蒸発潜熱を示す。

火災挙動を左右する要因の一つである地表面の燃料設定は、Anderson (1982) による13種燃料モデルを用いる。これを表1に示す。これらに分類された各燃料特性は、主に燃料重量、表面積対体積比、燃料深度、含水比のパラメータによって特徴づけられる。

### 【WRF-Fire】

以上で述べたWRFとWRF-Fire火災モジュールを結合させることで、気象場と火災延焼による相互作用を考慮した計算を行うことが可能となる。はじめにWRFで気象場を計算し、気象データを出力する。出力データのうち風速・風向データが火災モジュールへ入力される。ここで火災の有無を判断し、火災が発生していれば気象データ、燃料データ及び地理データから延焼速度を計算する。そして火災により発生する顕熱及び潜熱量を計算し、熱流量データをWRFへとフィードバックする。それをもとに、次のタイムステップで再びWRFが気象場を計算する。以上の仕組みでWRF-Fireはオンライン計算を可能としている。

表1: Anderson13種燃料モデル

1		Short grass (1ft)
2	Grass and grass dominated	Timber (grass&understory)
3		Tall grass (2.5ft)
4		Chaparral (6ft)
5	Chaparral and shrub fields	Brush (2ft)
6		Dormant brush, Hardwood slash
7		Southern rough
8	Timber litter	Closed timber litter
9		Hardwood litter
10		Timber (litter&understory)
11	Slash	Light logging slash
12		Medium logging slash
13		Heavy logging slash

## 2.1.2 WRF-Fire シミュレーション結果

### 【山林火災適用検討】

WRF-Fire の適用検討の前段階として、山火事への適用を検討した。国内で発生した山林火災例として、兵庫県高砂市に位置する高御位山における山林火災を対象とし現地調査を行った。これを図 1 に示す。2011 年 1 月 24 日早朝に発生した火災では、西風の影響を受けて主に東方向へおよそ 117ha が消失した。図 2 に実際の焼損範囲、図 3 に消防見取図を示す。本研究では焼損範囲をおよそ中心として WRF のネスティングをし、領域、日時、植生の設定を基に計算を行った。WRF で扱う気象条件の初期値・境界値には National Center for Environment Prediction(NCEP)で公開されている Final Analysis Data(FNL)を用いた。FNL は  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$  格子、鉛直 27 層、時間解像度 6 時間の全球データである。WRF では高い解像度の計算結果を低い解像度の計算結果へフィードバックさせることが可能で、多重ネスティング手法により広域から局所までの計算を行う。本研究では、調査対象である兵庫県高御位山（北緯  $34^{\circ}48'84''$  東経  $134^{\circ}46'44''$ ）をおよそ中心として第 1 ドメインから第 4 ドメインまでを設定し、4 重ネスティングとした。これを図 4 に示す。各ドメインの詳細は表 2 に示す。また、火災動態を計算するにはさらに高い解像度を必要とするため、第 4 ドメインには 10 倍解像度のサブグリッドを設けた。これにより 24m の解像度で計算を行う。WRF で計算を行う 4 つのドメインのうち WRF-Fire 火災モジュールは第 4 ドメインにのみ適用する。

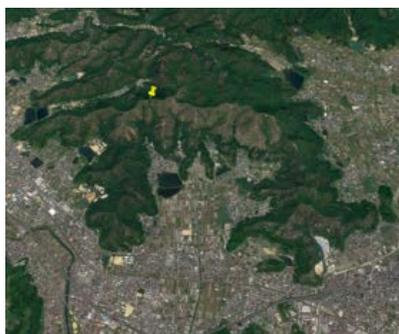


図 1：兵庫県高砂市高御位山

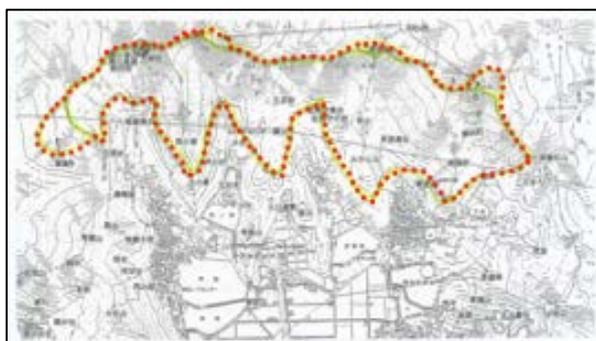


図 2：高御位山山林火災焼損範囲図



図 3：高御位山山林火災消防見取図

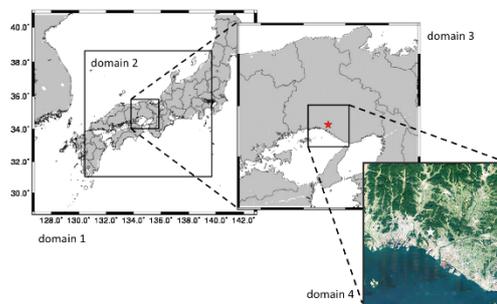


図 4：WRF ドメイン設定

表 2：各ドメイン解像度

Domain	Grid number	Grid size
Domain1	60×60×40	30,000m
Domain2	171×171×40	6,000m
Domain3	201×201×40	1,200m
Domain4	236×236×40	240m

### 【WRF 出力気象データ検証】

本研究で用いる領域気象モデル WRF により出力される気象データを検討するため、その出力データと実際の観測値との比較を行う。まず観測値データとして、気象庁が公開している兵庫県明石の気象データを扱う。この観測地点で得られる気温及び風速データと、比較する WRF 出力データを図 5、6 に示す。二つの出力データは計算時間の違いによる。気温及び風速比較結果から、実際の観測データと WRF 出力データは同様の挙動を示しており、気温及び風速の時間変化がやや再現されていることがわかる。両データには検証時間を通して値の乖離が見られるが、これは観測高さの差によるものと考えられ、挙動の再現性は高いためこの WRF 出力結果を用いることとする。

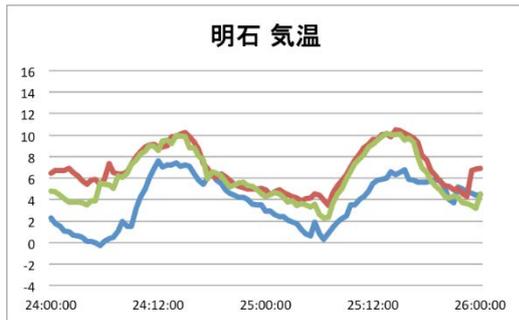


図5：気温の観測データ（地上1.5m, 青）及び出力データ（地上2m, 赤・緑）比較



図6：風速の観測データ（地上28.6m, 青）及び出力データ（地上10m, 赤・緑）比較

## 2.2 山林火災シミュレーション結果

図7にシミュレーションによる延焼範囲を示した。図の矢印は風の強さ、向きを表す。シミュレーションにより、出火地点から風向に影響され東方向へ延焼する様子が再現された。延焼範囲はおよそ実際の範囲と一致し、出火時間から東端到達時間まで再現された。図8は炎から発生した熱による温度差を示している。火災の発生により生じた熱と、それに影響を受け変化する風の様子がわかる。火災が発生した際に炎に向かって吹き込む風の挙動が確認できたことから、火災旋風への適用可能性も期待できるだろう。また、実際の消火活動（図3参照）を基に燃料分布を設定し火災延焼を制限することにより、延焼動態が改善された。設定した燃料分布を図9に示す。これにより、火災と気象の相互作用を再現したリアルタイム延焼シミュレーションを可能としたことが確認できた。

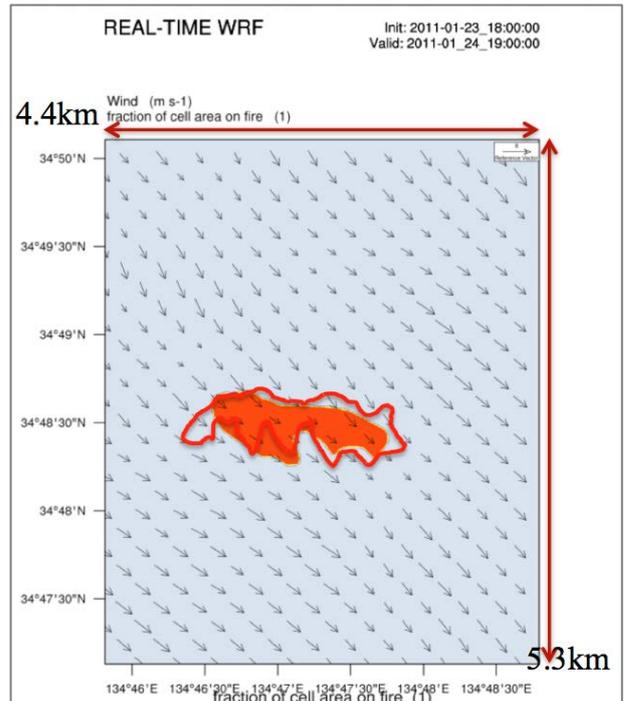


図7：WRF-Fire シミュレーション結果

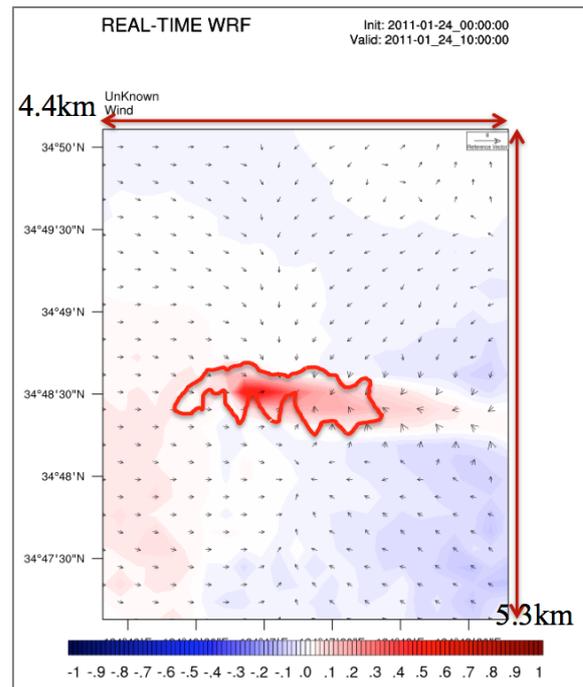


図8：WRF-Fire シミュレーション結果  
(火災による熱の発生)

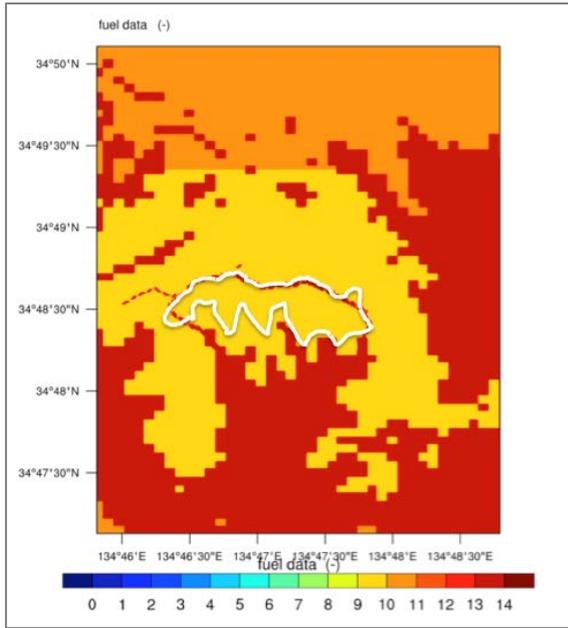


図9：燃料設定 (黄：木くず，赤：非植生)

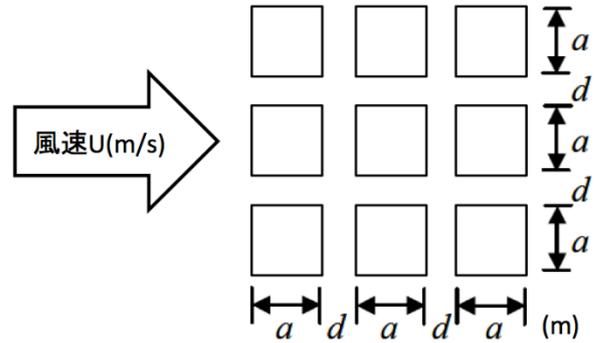


図10：濱田式 建物設定

### 3. WRF-Fire を市街地へ適用するための延焼式検討

#### 3.1 WRF-Fire 計算式の設定

山林火災を対象に計算を行ったが、本来山林火災を対象としている WRF-Fire を都市火災へ応用する為には、新たな延焼速度及び放熱量の式、そして燃料特性を設定する必要がある。

#### 3.2 延焼速度式

都市における火災延焼を初めて定量的に評価可能なモデル化を行ったのは濱田による濱田式 (1951) である。この延焼式は均一な大きさの建物が格子状に並んだ市街地を想定し、一樣な風環境のもとで延焼時間及び延焼限界距離を求める。建物の並びは図 10 に設定する。濱田式は過去の都市火災事例や実大火災実験の結果から統計的に求められた式であり、この簡易的なモデルは、地域防災計画を策定する際の被害想定において現在でも広く利用されている。濱田式を WRF-Fire 延焼速度式へ導入するにあたり、式(2)~(4)を以下のように設定する。

$$R_0 = \frac{build(a+d)}{3 + \frac{3a}{8} + \frac{8d}{D}} \quad (9)$$

$build$  : 建物種類によるパラメータ

$D$  : 延焼限界距離

$$\phi_w = 1 + 0.1U + 0.007U^2 \quad (10)$$

$$\phi_s = 0 \quad (11)$$

### 3.3 熱放出

都市火災において発生する熱量を設定するために、国交省らによる防災まちづくり総プロの火災モデルを検討する。これは個別建築物の火災性状と建物間の延焼を予測したモデルで、精密な都市火災シミュレーションを可能とする。WRF-Fire の燃料消費率は式(5)によって表され、 $T_f$ の値により燃料残量の減衰度が決定する。燃焼によって発生するエネルギー量を、WRF-Fire による計算結果と国土交通省総合技術開発プロジェクト「まちづくりにおける防災評価・対策技術の開発」のモデル (以下総プロモデル) による計算結果と比較し  $T_f$ の値を設定することで、都市火災における燃料消費の再現を検討する。

図 11 は総プロモデルによる建物構造別の発生顕熱量比較である。これを基に初期燃料重量 $w_1$ 及び減衰度 $T_f$ を仮定し、WRF-Fire による計算を行う。図 12 は総プロモデルと仮定したパラメータを用いた WRF-Fire 計算による比較である。この比較から燃料重量、減衰度、及び各構造を特徴づけるパラメータを決定し、WRF-Fire 熱放出量式の都市モデルへの拡張を検討する。

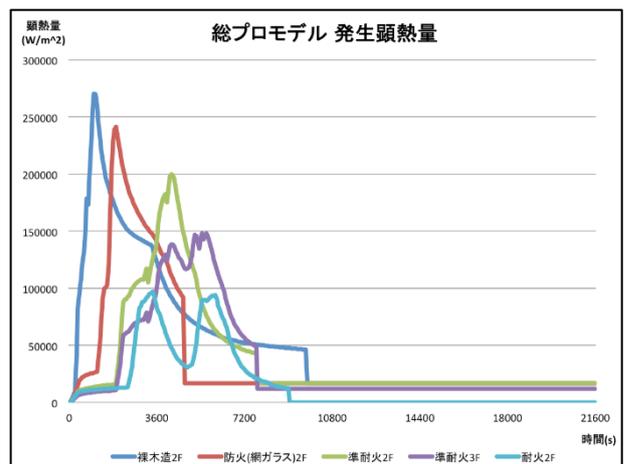


図11：総プロモデルにおける構造別顕熱量比較

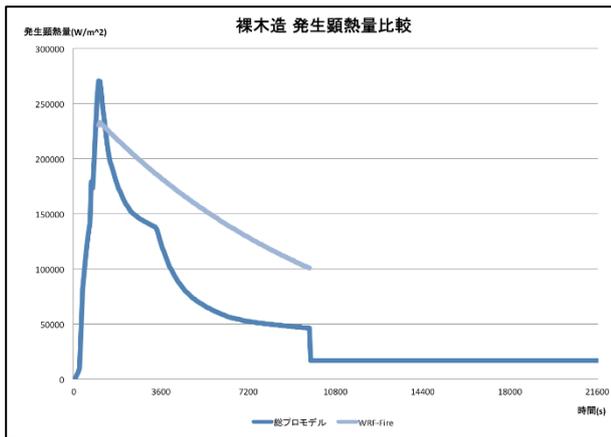


図 12：総プロモデル及び WRF-Fire 計算式による発生頭熱量比較(裸木造)

## 4. 石油タンク火災のデータ整理および WRF-Fire 適用検討

### 4.1 石油タンク火災の事例

石油タンク火災の事例のうち、地震を起因とした事例としては、1923 年関東震災、1964 年新潟地震、2003 年十勝沖地震、2011 年東日本大震災があげられる。このうち、1964 年新潟地震では、まず、昭和石油新潟製油所でスロッシングにより原油が溢流して着火し、隣接するタンク群も巻き込んで火災となる。さらに、防油堤の破損箇所から火災が拡大した。タンク 5 基、一般民家 18 棟を全焼した。その後、別の危険物タンクから流失した油が液状化による噴水や津波のため拡散し、地震発生後の 5 時間に爆発音とともに火災となる。これによりタンク 138 基焼損、一般民家 440 棟を全焼した。

また、地震に起因しないが、海外における大きな事例としては、1975 年 Pennsylvania 州 Philadelphia (米国)、1983 年 New Jersey 州 Newark (米国)、1985 年ナポリ (イタリア)、2005 年 Hemel Hempstead (英国)、2009 年 Bayamon (プエルトリコ) 等がある。特に、1985 年ナポリの事例では、24 基の石油タンクが爆発し、火災が 6 日間続いている。これにより、5 名が死亡、170 人が負傷、2,000 人以上の住民が避難している。また、古い事例ではあるが、1926 年に米国カリフォルニア州の SAN LUIS OBISPO では、石油タンク火災に伴う火災旋風の発生が記録されている。この火災は、最初に落雷による石油貯蔵施設の爆破事故から始まっており、爆発の後に大規模な火災が発生し、拡大している。翌日になって火災旋風の発生が確認され、規模の小さいものを含めて断続的に続いている。このうち、最大規模の旋風は、高さ 300 フィート (約 90m) であり、建物を破壊してその残骸を 3 マイル (約 5 km) 先まで運んでいる。この火災発

生時には、雷が発生したように、大気はかなり不安定な状況であると共に、この施設は谷間であったため、常時、強い風が吹いている地域であった。研究者による推測では、火災当時、15 マイル/時 (約 7 m/s) のやや強い風が吹いていた。

## 4.2 石油タンク火災の予測手法

石油タンク火災に関連する影響度の予測については、総務省消防庁の「石油コンビナートの防災アセスメント指針」に示されている。

### 4.2.1 解析モデルの選定

可燃性物質や毒性物質を取り扱う施設で漏洩などの事故が発生した場合、液面火災、ガス爆発 (蒸気雲爆発)、フラッシュ火災 (可燃性蒸気雲の燃焼で火炎伝播速度が比較的遅い火災) などの災害現象により周囲に影響を与える可能性がある。このような災害現象を解析するためのモデルが国内外で数多く提案されているが、現象の単純化の程度によって簡易なモデルから詳細なモデルまで様々なものがある。解析にあたっては、できれば詳細なモデルを適用することが望ましいが、そのためには専用のソフトウェアを購入したり、多くのプロセスデータや物性データを準備する必要がある。一方、石油コンビナート全域を対象としたマクロ的な評価では、災害現象に適合するものであれば簡易モデルでも問題はないとされている。

### 4.2.2 基準値の設定

物理的作用の解析モデルは、一般に発災地点からの距離と放射熱などの作用強度との関係を表わしたもので、作用強度に対してある基準値を設定し、強度がこの値を超える距離を求めて影響範囲とすることになる。このように基準値は、作用強度とそれを受ける対象物の被害程度をもとに設定する。例えば、液面火災のように長時間継続する可能性がある火災に対しては、人体が単位時間に受ける放射熱の基準値としては、 $2.3\text{kW/m}^2$  ( $2,000\text{kcal/m}^2\text{h}$ ) 程度の値が用いられる。また、地震時の市街地大火に対する避難計画では  $2.4\text{kW/m}^2$  ( $2,050\text{kcal/m}^2\text{h}$ ) という値が用いられた例がある。この値は、概ね数 10 秒間受けることにより痛みを感じる程度の熱量である。

### 4.2.3 影響度の推定

「入力データの収集」→「気象条件の設定」→「漏洩口 (開口部) の設定」→「影響範囲の算定」の手順により影響範囲の算定を行い、周囲に与える影響の大きさを推定する。「入力データの収集」として、対象施設を保有する事業所などから算定

に必要なデータを収集する。「気象条件の設定」として、風速と大気安定度を特定する必要がある。なお、気象データは、できるだけ石油コンビナートの内部あるいは直近で観測されたものを使用する。「漏洩口（開口部）の設定」は、危険物質の流出率を算定するために想定する必要がある。漏洩口の想定は、モデルの選定以上に算定結果に影響を与える。「影響範囲の算定」として、算定結果から影響度を推定する場合には、範囲の大きさだけでなく、そのなかに含まれる人口や一般施設、あるいは算定で考慮していない施設のまわりの構造物や自然地形による影響防止効果などでもできるだけ考慮することが望ましい。

#### 4.3 石油タンク火災のWRF-Fireへの適用性について

石油タンク火災の予測では、基本的に人体への影響を予測の基準としているため、主に放射熱量の予測が中心となる。また、詳細な施設のモデル化が必要であり、火災の燃料となる物質の流出状況から、詳細な火面の設定が必要である。さらに、取り扱う燃料により、燃焼の条件が大きく異なることから、燃料の各種パラメータ設定が重要であるが、設定自体は複雑である。また、施設の耐久性の評価も必要である。その他、煙による放射熱の影響評価やボイルオーバー（水蒸気爆発による燃料の噴出）やファイヤーボール（爆発による巨大な火球）等の石油タンク火災特有の現象についての設定が必要となる。

以上から、石油タンク火災については、燃料の保管状況から燃料供給源に限られ、施設が市街地からある程度離れているため延焼拡大の危険も小さいことから、詳細な延焼予測の必要性は低いと考えられる。石油タンク火災にWRF-Fireを適用するためには、石油タンク火災特有のパラメータを検討、設定する必要がある

表3 石油タンク火災における  
燃焼に関するパラメータの例

油種	原油	ナフサ	出典等
燃焼速度(m/s)	$5.2 \times 10^{-5}$	$8.0 \times 10^{-5}$	消防庁指針
標準発熱量(MJ/l)	38.28	33.31	総合エネルギー統計2013度改訂*
発熱速度(kW/m <sup>2</sup> )	$2.0 \times 10^3$	$2.7 \times 10^3$	標準発熱量より換算
火災面積(m <sup>2</sup> )	41,140	1,432	過去事例より設定
	1964年新潟地震(第一火災での凡その面積)	2003年十勝沖地震でのナフサタンク	
発熱量(kW)	$8.2 \times 10^7$	$3.8 \times 10^6$	発熱量と火災面積から換算

## 5. 局所・広域の相互接続技術に関わる

### LES(Large Eddy Simulation)の妥当性検討

#### 5.1 シミュレーション結果による火災旋風再現の可能性

山林火災のシミュレーション結果では、延焼エリアで温度上昇が集中している部分があり、この周りに若干温度下降しているゾーンが見られる。これは、火災の発生により生じた熱によって上昇気流が発生し、炎に向かって吹き込む風の挙動を示しているものと考えられる。また、延焼エリアのそれぞれのメッシュでは風向や風速に差が見られ、気流の回転もうかがえることから、火災旋風の再現が見込まれる。

#### 5.2 LES適用の可能性と適用にあたっての課題

今回の山林火災シミュレーションで使用したWRF-Fireには、LESの計算機能がオプションで備わっているため、これを利用してシミュレーションを行うことが考えられる。ただし、計算にあたっては、メッシュの解像度を上げるとともに、垂直方向の気流の流れを詳細に検討する必要がある。また、旋風の発生の条件には、顕熱（輻射熱）の量と熱源の広さが影響するため、市街地火災を対象とした場合には、個々の建物から発生する熱量の設定が非常に重要になるものと考えられる。WRF-FireのLESの計算機能を用いたシミュレーションを行い、火災旋風の出現可能性や出現にあたっての建物や気象の条件を整理、確認した後に、本格的なLESの実施が望まれる。

## 6. まとめ及び今後の展開

延焼火災の予測に関しては、様々な予測式、シミュレーション手法が提案されているが、気象に起因する風と火災の熱との相互作用については、ごく簡易なモデルしか考慮されておらず、3次元的な影響については反映されていないのが現状である。

本研究の成果では、4次元データ同化法技術やネスティングによる局所及び広域の相互接続技術が確立されている汎用気象モデルWRF(Weather Research and Forecasting)を利用した山林火災の予測を行うWRF-Fireを、市街地火災に適用する試みを行った。

今後は、実際に存在する市街地を対象に、WRF-Fireを用いて火災延焼シミュレーションを行い、実際の火災との比較・検証から、精度向上のための技術上の課題を解決することにより、気象条件や建物形状や市街地の特性（道路や空き地の配置等）に違いによる延焼状況の変化を詳細に把握し、防災上の課題を検討することが可能とな

る。さらに、火災の規模と気象条件により、「火災旋風」の予測にあたっての基本的な技術の蓄積ができることが期待される。

また、発生が予測されている首都直下地震や南海トラフ巨大地震における延焼火災の状況を詳細に予測することができ、都市部における大規模火災の発生及びそれに伴う多数の死傷者の発生に対する効果的な防災対策の提案が行えるものと考えられる。

#### 【参考文献】

- 1) Anderson, 1972: Aids to Determining Fuel Models For Estimating Fire Behavior
- 2) Coen et al, 2012: WRF-Fire: Coupled Weather-Wildland Fire Modeling with the Weather Research and Forecasting Model
- 3) Rothermel, 1972: A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels
- 4) 国土交通省総合技術開発プロジェクト, 2003: まちづくりにおける防災評価・対策技術の開発
- 5) 濱田稔, 1951: 火災の延焼速度について 火災の研究 I
- 6) 消防庁特殊災害室, 平成25年3月: 石油コンビナートの防災アセスメント指針