【土木計画学研究・論文集 Vol.21 no.2 2004年9月】

倒壊建物と炎上車両を考慮した地震火災危険分析*

Analysis of fire risk considering collapsed structures and automobiles under a great earthquake*

二神 透**・木俣 昇***

By Tohru FUTAGAMI**・Noboru KIMATA***

1. はじめに

阪神淡路大震災から８年が経過した今，多くの自治体が防災計画の見直しを行ってきた．また，東南海・南海地震を想定した地域防災計画の策定を行っている自治体もある．阪神淡路大震災の教訓は，一口に言えば，行政・消防の初動体制の遅れであろう．それらの原因は，初動体制を立ち上げるための情報収集システムの不備，例えば，電話の不通による消防・救急・行政・病院・警察等の連絡体制が困難であったことがあげられよう．今後起こりうる都市直下地震でも，災害発生時に的確な情報収集がなされなければ，各組織が有機的に有効な体制を組むことができないため，被害を軽減することは困難となろう．

一方で，先般の災害は，地震の発生する季節・時間帯を考慮した防災計画の重要性を示している．阪神淡路大震災は，発生した時間帯が早朝であったため，犠牲者の９割が自宅等の建物・家具による圧死であった．残りの１割の犠牲者は，焼死である．このことより，住宅の耐震化を図っていくことが，市民の命を守るという観点から最優先されるべき対策であろう．しかし，財政的な問題より，住宅の耐震診断・耐震化の費用は住民個人に負担を強いることとなる．一方，阪神淡路大震災後の，都市計画的な防災に関する法律も整備されたが，根本的な耐震化・不燃化の解決には時間を要する．大震時の被害を事前に想定することは，事前対策・防災啓蒙という点で有効であるが，様々なリスクを想定し，発災時の被害予測に役立てることが，住民の生命・財産を守る上で肝要となろう．

大震時の車両火災リスクに着目した研究は，松川による実建物と車両を配置した火災実験に基づく知見[1)]が報告されている．一方，高井らの消防訓練のための延焼シミュレーション・システム[2)]は，大震時の倒壊建物を延焼過程に反映できる点が特徴である．これらの研究が示すように，車両火災や倒壊建物といった大震時の火災リスクに関する研究が個々に行われているが，火災の延焼と倒壊建物・車両延焼をダイナミックにシミュレーション可能なシステムの開発は行われていない．そこで，本稿では，倒壊建物を考慮した車両火災と延焼リスク分析の枠組みについて述べるとともに，構成したシステムの適用可能性について検討を行う．

2. 車両火災リスク算定システム

著者らは，車両延焼火災のモデルを従来の建物間のモデルに組み込み，市街地への適用研究を行っている[3)-5)]．しかし，大震時の建物倒壊による延焼への影響には言及していない．建物の倒壊は，道路閉塞の要因ともなるが，このことは火災の延焼危険性から見れば，延焼遮断空間が連続空間へと変化することを意味する．特に，倒壊した建物が車両に近接することにより，車両への類焼危険性は大きくなる．その一方，建物が倒壊することによる，火炎高さへの影響，逆に，輻射熱からの受熱地点の変化により，類焼危険性が変化する．そこで，本稿では，従来の研究の枠組みを整理し，倒壊建物と車両配置に伴う火災リスク算定モデルを構築する．

本研究では，図１に示すように幹線道路の延焼遮断効果に着目し，風上・風下側の建物倒壊を想定し

*キーワーズ：防災，地震火災，シミュレーション，

** 正員，学博，愛媛大学総合情報メディアセンター
(松山市文京町３，
TEL089-927-9837，FAX089-927-9837)
E-mail futagami@dpc.ehime-u.ac.jp
***正員，工博，金沢大学大学院自然科学研究科

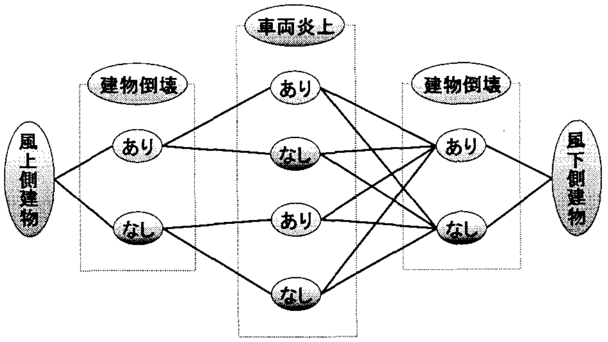

図１　倒壊建物・車両と火災リスク

た場合と，車両の有無によるケースを想定した火災リスクの評価を試みる．それらの評価数は，図１に示すように８通りの組み合わせとなるが，車両延焼の影響を考慮しなくても延焼突破する場合は，車両の有無は考慮しなくてよい．具体的に図２に，幹線道路との関係例を示す．図２は，火災の延焼を想定した上で，風下・風上側の建物の状態を，倒壊あり・なしの４ケースを想定している．

一方，車の配置パターンについては，渋滞時を想定している．それらの配置については，適用事例で述べる．車両の炎上可否は，輻射・対流熱算定モデルを用いて算定する．

シミュレーションの基礎データとなる建物情報については，H3 年度のデジタル地図・松山市測量成果(1/2500 DXF データ)を用いてポリゴン・道路データを収集した．

３．車両炎上モデル

著者らは，文献[2]において，車両火災実験から得られたパラメータを用いた車両炎上熱量算定式を提案している．その結果，車両火災輻射発散強度は，27,430Kcal/m²hとなった．車両からの受熱地点への熱量の関係は，図３に示すように，風速：Uの気象条件下，炎上奥行き：Dc，θ傾いた火炎面から受熱地点の輻射熱を算定するモデルである．図中，下のモデル図は，炎上しない車が遮蔽物として作用する場合のモデル図である．

以下，種々のパラメータを定式化すると，

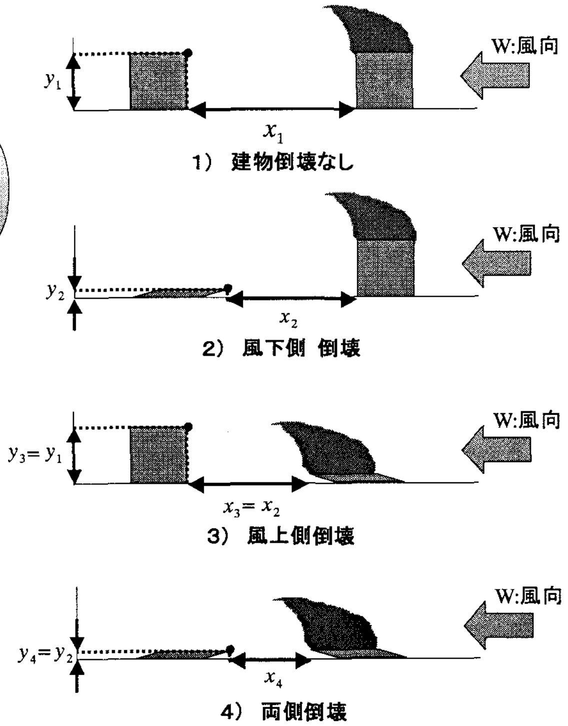

図２　幹線道路とリスクの関係図

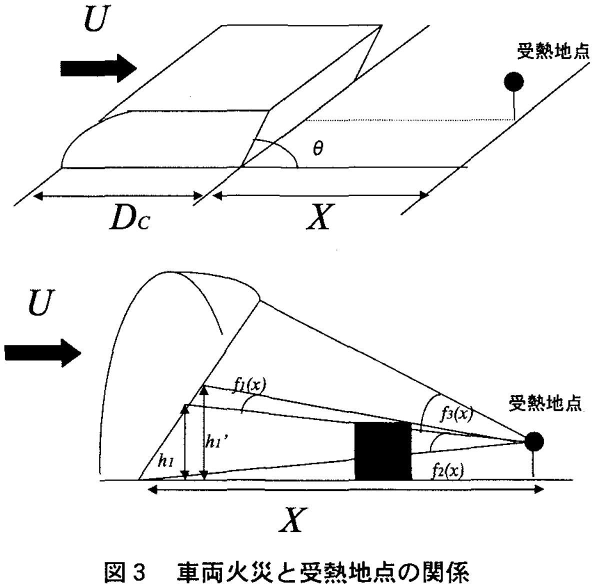

図３　車両火災と受熱地点の関係

a) 車両火災の傾きおよび高さ

$$\theta = \sin^{-1}(2/U)^{0.2} \quad (1)$$

θ : 火災傾き（°）

U : 風速（m/s）

$$H_c = 0.7(10^3/U)^{0.2} \quad (2)$$

$subto \quad U \geq 2$

H_c : 車両火災高さ(m)

b) 輻射熱について

$$R_c = E_c \cdot \sum_{r=1}^{n} \tau_i e_i f_i(x) \quad (3)$$

R_c : 車両輻射熱（$kcal/m^2 \cdot h$）

E_c : 車両火災輻射発散強度（$27430 kcal/m^2 \cdot h$）

$f_i(x)$: 距離x範囲の形態係数

$\overline{\tau_i}$: 遮断壁iの平均透過率

e_i : $f_i(x)$ に対応する炎面の平均輝面率

$$e_i = \frac{h_i' + h_{i+1}'}{2H_0} \quad (4)$$

h_i', h_{i+1}' : 対象となる炎面の上限・下限高さ（m）

c) 気流熱について

$$T_{ac} = 17.75 \cdot \frac{D_c U}{X} \left(\frac{1}{X + D_c/2} \right)^{0.8} \quad (5)$$

T_{ac} : 車両火災気流温度（℃）

D_c : 車両同時延焼奥行（$1.695m$）

U : 風速（m/s）

X : 火災域からの距離（m）

d) 風下への放射熱量

$$E = 40T_{ac} + R_c \quad (6)$$

E : 放射熱量（$kcal/m^2 \cdot h$）

e) 着火から炎上ピークまでの時間

$$Tc = 23.445 - 4.56\log(R(x)) \quad (7)$$

ただし $R(x) \geq 7300 kcal/m^2 h$

Tc : 車両の延焼時間（分）

$R(x)$ 車両の受熱量(Kcal/㎡h)

で与えられる．

4．シミュレーションへのシステム化

前節で述べたように，風下側の倒壊建物の延焼リスクを算定するためには，建物の状態を想定する必要がある．そこで，シミュレーションでは，図1で示したケースについて建物の状態を想定することにした．以下，シミュレーション・アルゴリズムおよびパラメータを示す．

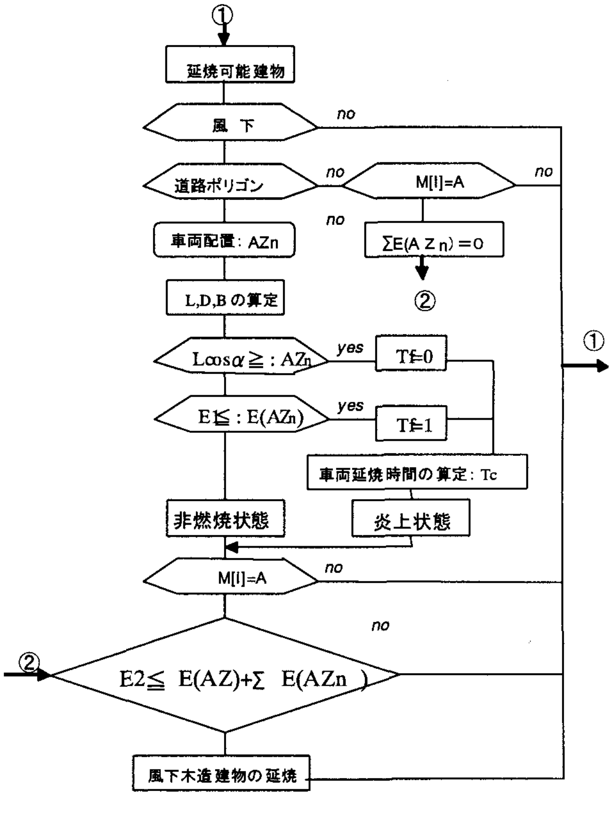

図4　シミュレーション・アルゴリズム

表2　パラメーター覧

パラメータ	内　容
M[I]=A	風下木造建物
Az n	n 番車両配置(x,y)座標
L	火炎長さ(m)
D	火炎奥行き(m)
B	火炎幅(m)
Lcos θ	火炎前面距離(m)
Tf	車両着火時間(min)
Tc	車両延焼時間(min)
E1	車両耐火限界値(Kcal/m² h)
E(AZn)	車両受熱量(Kcal/m² h)
E(AZn')	車両輻射熱量(Kcal/m² h)
E(AZ)	市街地火災輻射受熱量(Kcal/m² h)

図４より，延焼可能建物の風下１次近傍に，道路ポリゴンが存在する場合，インプットされている車両配置データ：AZnが車両延焼計算の対象となる．延焼可能建物の火炎前面距離が車両に達するならば，車両は瞬時(Tf=0)に発火する．車両へ火炎が達せず，可燃建物からの輻射受熱量：E(AZn)が車両耐火限界値よりも大きければ，発火時間１分(Tf=1)を与える．発火した車両は，車両延焼時間：Tcを算定し，式（６）の風下への放射熱量を算定し，風下１次近傍への車両の延焼の可否ならびに，風下木造建物の受熱量E2の延焼危険性を算定することになる．

５．システムの適用

まずシステムを適応する地域は，松山市中心部から北部に伸びる国道沿い１辺約 150 mの地域である．図５に示すように，道路沿道の一部は耐火建物が存在するが，道路を挟んで紙面右側のほとんどが木造建物の密集する地域である．たとえば，この右側の地域で地震火災が発生すると，倒壊や車両の状態によっては，道路を挟んで左側の木造建物に延焼する危険性がある．本節では，それらの火災リスクについて構築したシミュレーション・システムを用いて道路の防災機能を検証する．

火災延焼シミュレーションのパラメータの設定は，以下のように定める．

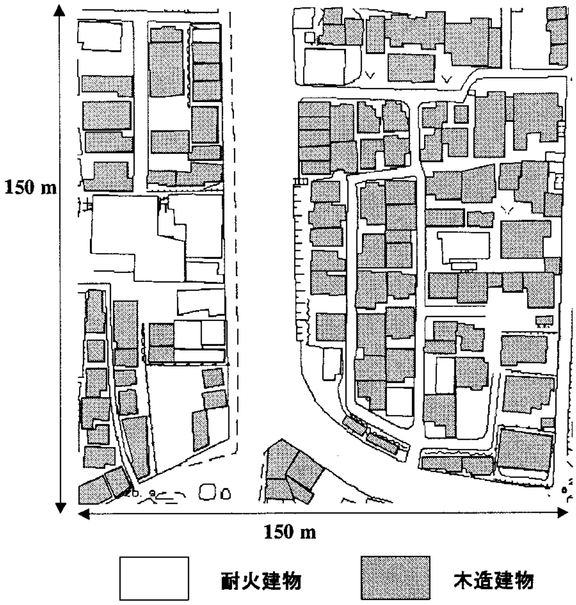

図５　松山市の対象地域（倒壊なし）

1) 気象条件は，風速は松山の年平均風速約 2m/s よりやや強い 3 m/s. 風向は西向きで一定とする．
2) 地震による建物火災の出火点は，今回は風上側で熱量計算の対象となる建物の火炎面判定領域内において同時延焼火炎面が最大になるような一箇所のみを任意に指定する．

シミュレーションに用いる都市構造データについては前述したように，松山市から入手した松山市測量成果図(1/2500，DFX データ)に含まれる建物の位置座標，面積，家屋周長といったデータより，ポリゴンモデルに必要な位置座標，面積のデータを利用して火災延焼シミュレーションのための基本データを整備した．

また，本研究では図１で示した建物の倒壊の有無や車両火災の考慮といった要因によって様々に分けられるパターンのうちで，倒壊なし，風上側倒壊，風下側倒壊，両側倒壊の４パターンについて延焼シミュレーションを適応させる．ちなみに，風上建物倒壊図を図６に，風下建物倒壊図を図７に，両側建物倒壊図を図８に示す．図９は，建物倒壊がない事例で，出火後 55 分のシミュレーション結果を示している．

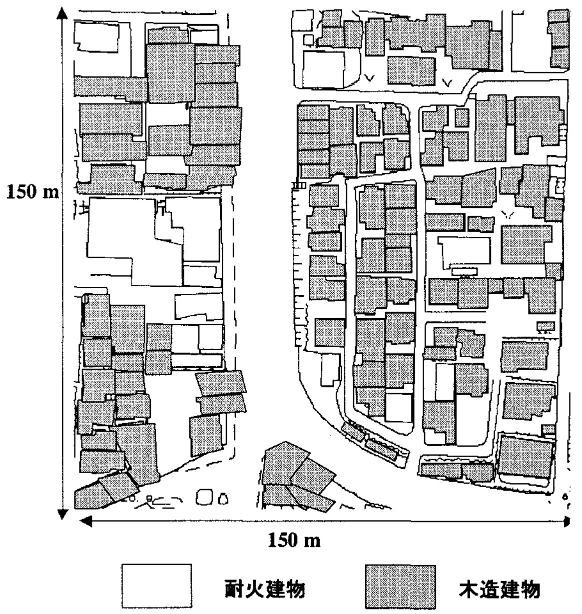

図６　松山市の対象地域（風下倒壊）

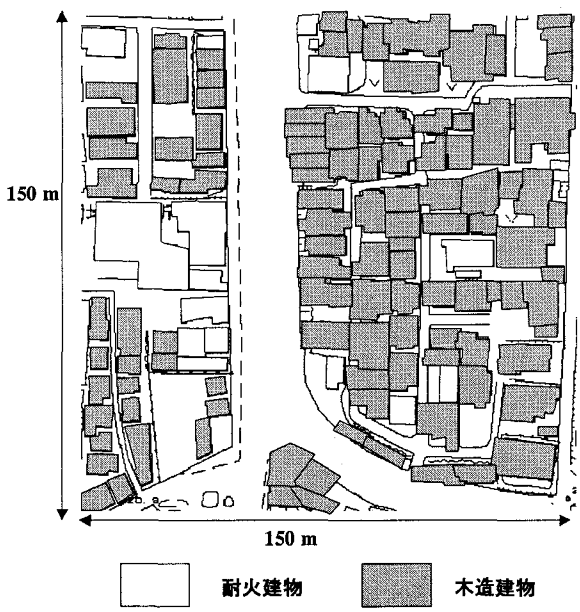

図７　松山市の対象地域（風上倒壊）

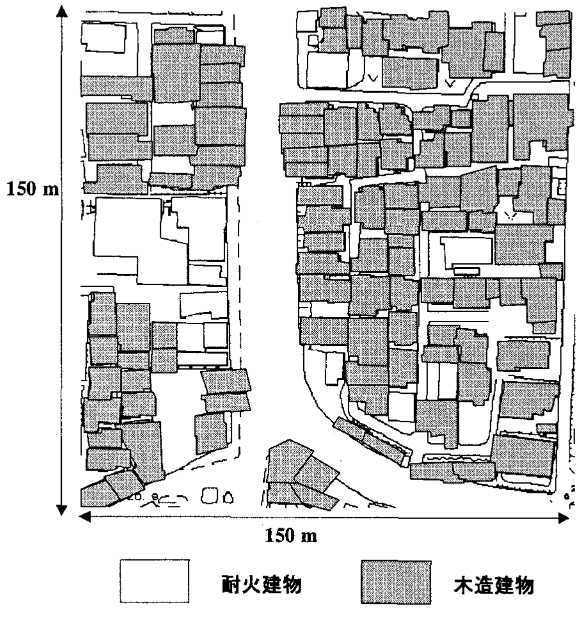

図８　松山市の対象地域（両側倒壊）

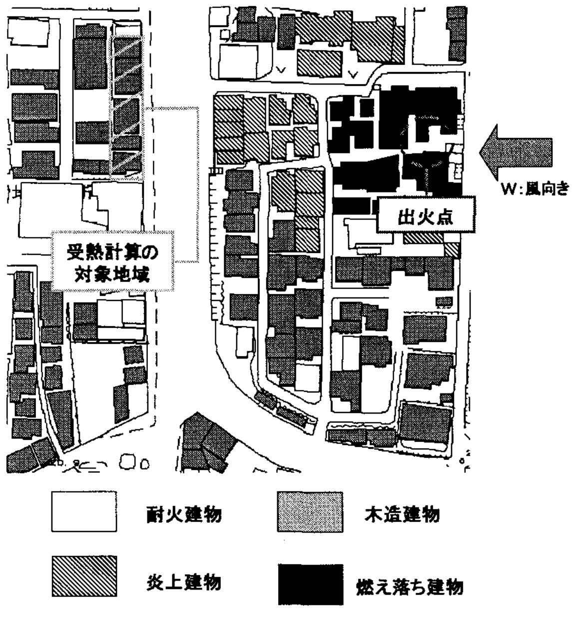

図９　シミュレーション結果（倒壊なし）55 分後

これらのシミュレーション結果より，車両が存在しない状態で延焼突破が起こるのは，沿道建物両側が倒壊したときである．つぎに，延焼しない3ケースについては車両火災を想定した熱量計算を実施し火災リスクの算定を行う．

a）車両を考慮しないシミュレーション結果

建物パターンと，風下木造建物の受熱量の算定結果と引火熱量との比較を示す．

- **倒壊なし**：輻射熱量 4278.0$(kcal/m^2 \cdot h)$，気流熱 32.7(℃)なので 受熱量 5331.4$(kcal/m^2 \cdot h)$ ＜ 8000$(kcal/m^2 \cdot h)$
- **風下側倒壊**：輻射熱量 5063.2$(kcal/m^2 \cdot h)$，気流熱 47.0(℃)なので 受熱量 6403.9$(kcal/m^2 \cdot h)$ ＜ 8000$(kcal/m^2 \cdot h)$
- **風上側倒壊**：輻射熱量 6589.1$(kcal/m^2 \cdot h)$，気流熱 51.6(℃)なので 受熱量 8020.2$(kcal/m^2 \cdot h)$ ＞ 8000$(kcal/m^2 \cdot h)$
- **両側倒壊**：輻射熱量 6929.1$(kcal/m^2 \cdot h)$，気流熱 81.5(℃)なので 受熱量 8959.5$(kcal/m^2 \cdot h)$ ＞ 8000$(kcal/m^2 \cdot h)$

これらの結果から，風上側の建物が倒壊すると風下側の建物の状態に関わらず延焼する危険性があることがわかった．すなわち，風下側が倒壊すると受熱高度が下がり火炎面からの輻射熱量が大きく減少することが影響していると考えられる．倒壊なしと風下側倒壊の場合に関しては，受熱量が引火熱量に達しなかったため，現状での建物火災のみによる受熱量だけでは延焼する危険性はないことがわかった．風上側倒壊の場合には，受熱量が引火熱量よりもやや大きくなったために延焼のリスクがあると考えられる．ただし，外気温などの変動のあるパラメータの値によっては引火熱量に達しないことも考えられる．

以上の３つの状態については車両を配置し火災発生の有無と，車両火災が発生にともなう放射熱量を考慮に入れたシミュレーション実験を行う．

最後に両側倒壊に関しては，完全に引火熱量よりも受熱量が大きくなり延焼計算の際に判断する風下側に空地がある時の延焼限界距離よりも道路幅が短くなるために，浜田の延焼速度式による計算で問題なく延焼するということが証明された結果となった．この状態については車両火災を考慮する必要はない．

b）車両火災による受熱量計算結果

倒壊なし，風下側倒壊，風上側倒壊，3 つの建物の状態において，それぞれの火災による放射熱量によって道路に配置した車両に引火するかどうかの判定を行う．その後，引火する車両がある場合についてそれぞれの放射熱量を計算して風下側の受熱建物の受ける総受熱量を求めることで建物の引火熱量との比較により火災リスク判定を行う．

1）車両の引火判定

上記で述べたように，まず配置した車両に延焼するかどうかの判定を行う．その判定方法は，建物の各状態での放射熱量が車両の限界引火熱量に達するまでの時間を求めて建物火災の火炎面が持続する時間と比較して短ければ車両の延焼が起こる．

本研究では図 10，11 に示すように，車両の大きさは縦 4.7 m，幅 1.7 mを想定し，間隔が縦 5.5m，横 4 mで４列停車している状態とする．

2）車両火災を考慮にいれた火災リスク判定

次に，それぞれの建物状態において車両火災の放射熱量を考慮に入れた受熱建物の総受熱量をシミュレーションにより算定する．それらの結果の一部を，図 12 に示す．図 12 より，倒壊なしの場合については 4 列目までの車両が全て炎上した場合でも，受熱量が 8000$kcal/m^2 \cdot h$ を超えることがなかったため，風下側建物に延焼する危険性はないことがわかる．

一方，紙面の制約上，図は割愛するが，風上倒壊の場合は建物火災のみの状態でも延焼の危険性があったが，車両火災が発生する条件下では受熱量が 8020.2$kcal/m^2 \cdot h$ から 9838.5$kcal/m^2 \cdot h$ へと増加するため，延焼する危険性が増していることがわかる．

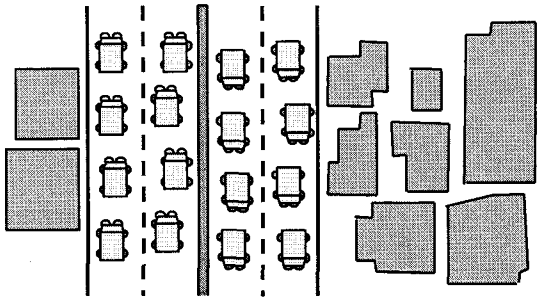

図 10　車両の配置（倒壊なし）

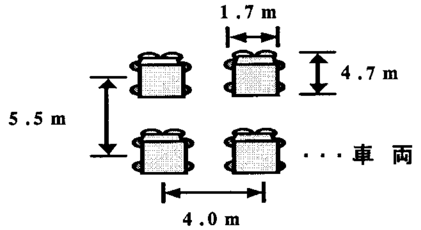

図 11　車両位置の設定

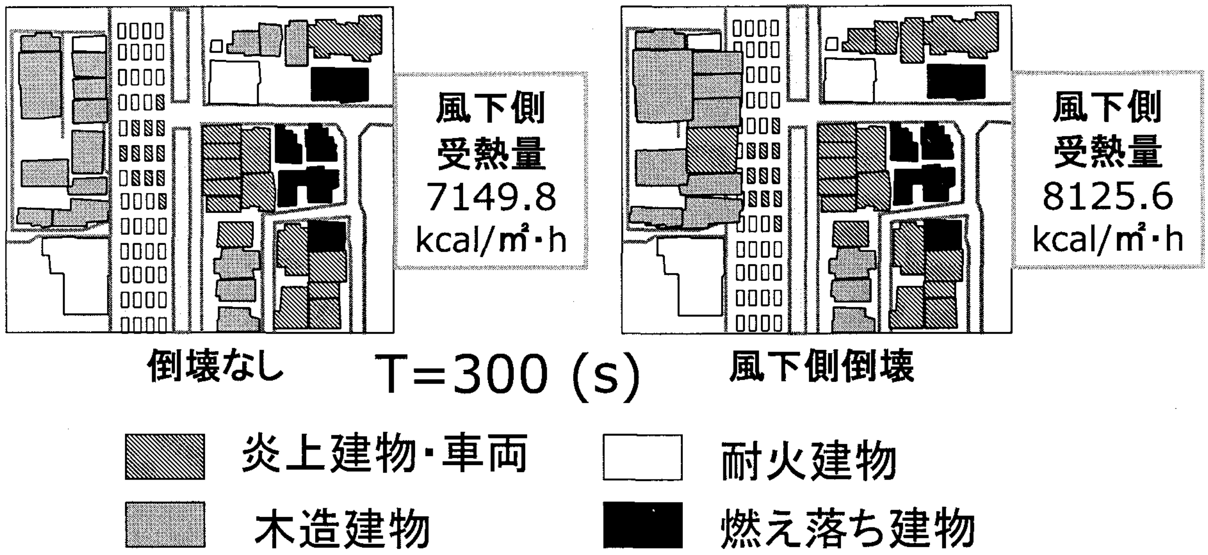

図 12　倒壊建物と車両火災を考慮したシミュレーション結果

最後に，図 12 の風下倒壊の状態に関しては，車両火災が発生していないときの受熱量が 6403.9 $kcal/m^2 \cdot h$ となり延焼の危険性はなかったのだが，新たに車両火災を考慮すると受熱量が 8125.6 $kcal/m^2 \cdot h$ に増加して延焼する危険性が出てくることがわかる．

5．おわりに

本稿では，幹線道路に車両が存在する場合の火災リスクについて，建物倒壊との関連よりリスク分析の枠組みを示した．従来のシミュレーション・システムとの改良点として，車両延焼モデルを精緻化したこと，シミュレーションの入力系である都市構造データをデジタル測量地図より採取可能としたことがあげられる．本システムを実市街地に適用した結果，風上建物が倒壊した場合，それだけで風下建物への延焼危険度が大きく増すこと，両側倒壊の場合には，延焼突破することを定量的に示すことができた．一方，倒壊なし，風下倒壊の場合には，当該道路は延焼遮断の防災空間としての機能を果たすが，後者の場合，車両の延焼に伴う火災リスクが発生することをダイナミックかつ視覚的に示すことができた．

以上より，構築したシステムは，車両モデル・入力情報の精緻化により，個々の建物の状態や，車両の位置によるリスクをより詳細に反映することができる．さらに，これらのアウトプットも，幹線道路の耐火・不燃化を進める上で，より具体的に火災リスクを提示できかつ，評価できるという点で，行政・住民にとって有益な情報となろう．さらに，渋滞時の車両混雑の状態は，人の避難空間を低下させるだけでなく，延焼拡大の助長要因となることを示

唆することができた．今後，都市域全体で，道路・車両の火災リスクを算定し，地域防災計画，地区計画等に反映していきたいと考えている．

そのためには，電子地図からの都市構造データの自動化，倒壊建物の延焼速度の設定，避難計画との連動，インターラクティブなシステム設計等のステムへの拡張化を考えている．

<参考文献>

1) 松川　渉：大震時における路上自動車群の延焼について(2)，火災，Vol.31,No.5.pp.11-18，1981.

2)伊藤秀昭，服部佳昭，高井広行，上村雄二：神戸市における消防計画支援システムの開発－延焼シミュレーションシステム・部隊訓練システムー，土木計画学研究・講演集，No.21(1)，pp.355-358，1998.

3)二神透，木俣昇，和田修司：路上車両火災を考慮した地震時火災シミュレーションに関する基礎的研究，土木計画学研究・論文集，No.16，pp.349-356，1999.

4) 二神透，財間圭史：大震時火災下における車両火災リスク分析に関する基礎的研究，土木計画学研究・講演集，No.23(1)，pp.287-290，2000.

5)二神透，財間圭史：地震火災下における路上車両群延焼動態分析，土木学会四国支部第6回技術研究発表会講演概要集，pp.358-359，2000.

6)日本火災学会編：火災便覧，共立出版，1997.

倒壊建物と炎上車両を考慮した地震火災危険分析

二神　透・木俣　昇

本研究は，デジタル測量データによる建物情報を用いた火災延焼シミュレーション・システムを開発し，倒壊建物を考慮した車両火災と延焼リスク分析の枠組みを整理した．火災リスク分析システムを適用した結果，倒壊建物のパターンと車両の炎上に伴うリスクを定量的かつ視覚的に提示することができた．

Analysis of fire risk considering collapsed structures and automobiles under a great earthquake

By Tohru FUTAGAMI・Noboru KIMATA

In this paper, we developed the fire spread-of-a-fire simulation system using the building information by digital survey data, and arranged the framework of the vehicles fire in consideration of the collapse building, and spread-of-a-fire risk analysis.

As a result of applying a fire risk analysis system, the risk accompanying the pattern of a collapse building and destruction by fire of vehicles was able to be shown quantitatively and visually.