

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*

A Study on The Simulation System for Automotive Fires on The Road under A Great Earthquake*

二神 透**, 木俣 昇***, 和田 修司****

By Tohru FUTAGAMI, Noboru KIMATA, Shuji WADA

1. まえがき

近来、日本の諸都市は、広幅員道路や橋梁などの基幹的土木施設の整備に始まり、住宅団地やニュータウンの開発が行われた。しかし、一般の市街地の整備は大きく遅れているのみならず、一般の急激な都市の成長に伴い、工場、住宅、店舗などが混在し、防災上最も危険な木造密集市街地は手つかずの状況である。これらの事実は、地震時の災害要因を複雑化させ、地震災害の予測をきわめて困難にしている。実際、1995年の阪神・淡路大震災では、地震による同時多発火災、高架高速道路の横転や鉄道の陥没等が発生し、都市直下型地震の被害の多様性を如実に示した事例である。

同時多発火災に着目すると、阪神・淡路大震災の出火発生率の40%は、発災後3時間以上経てからであり、それらの内、44件は復旧通電に起因する出火であったことが特定化されている¹⁾。また、路上やモータープールの車両火災や倒壊建物の下敷きとなった車両からの火災も報告されている²⁾。車両火災は、平常時においても増加傾向にあり、統計によれば、この十年間で40%増を示し、全出火に占める割合も11%となっている³⁾。また、新聞等でも車両衝突炎上事故が数多く報告されており、特に地震時には、車両を路上に放置せざるを得ない状況が発生するため、今後、路上車両を延焼加害要因として考慮することも必要であろう。

そこで本研究では、地震火災下での路上車両の発火危険性に着目し、炎上車両による沿道建物への延焼危険性を火災リスクとして定義する。そして、大震時の市街地火災を想定した路上車両の炎上特性に関する文献[4],[5]を整理し、それらの知見に基づき地震時の車両火災モデルの検討を試みる。つぎに、著者等が開発を行っている地震時火災シミュレーション・システムへ路上車両火災モデルの拡張化を行う。従来のシステムでは、道路を延焼阻害要因として取り扱い、延焼遮断・延焼遅延効果をもたらすとしてモデル化を行ってきた。しかし、本モデルでは、地震火災と車両配置の状況によっては、炎上車両が新たな延焼加害要因、すなわち、上述したリスクを伴うことについての検討を試みる。最後に、本システムの適用事例を通して、構成したシステムの実行可能性と問題点についての考察を行う。

2. 車両火災実験による諸知見

(1) 車両火災実験

松川は、大震時における自動車火災の特性を把握するために3回にわたる火災実験を実施している⁴⁾。はじめの二つの実験は、車両の配置パターンを変えた場合を想定した市街地火災による自動車群の延焼特性の把握を目的としている。三つ目の実験は、交差点でタンクローリーとトラックが衝突した場合の自動車群の延焼特性の把握である。いずれの実験においても、想定した道路は、幅員20m(歩道3m)であり、沿道には木造建物および材木を配置している。

一方、JAF(日本自動車連盟)は、二車両間における延焼特性の実験を行っている⁵⁾。

以下、それぞれの実験についての概要を述べる。

* Keywords: 防災計画、計画情報、車両火災

** 正会員 学博 愛媛大学 工学部 環境建設工学科
(〒790-8577 松山市文京町 3番)

Tel 089-927-9837 Fax 089-927-9837

*** 正会員 工博 金沢大学 工学部 土木建設工学科
(〒920-8667 金沢市小立野2-40-20)

Tel 0762-34-4914 Fax 0762-34-4915

**** 学生員、愛媛大学 大学院理工学研究科
土木海洋工学専攻

(a)火災実験1（6列配置車両群）

実験1では、図1に示すように、片側7mの3車線を想定して6列19台の車両を配置している。それらの構成は、トラック4台、ライトバン8台、乗用車7台である。気象条件は、北風、風速3m/sであった。この実験では、北側3箇所の集積木材に一齐に点火し、5つの木造建物が同時に炎上した。点火後50秒には第一列車両に着火し、その後約20秒間隔で次々に着火した。点火後30分には、ほとんどの車両が焼失した。

(b)火災実験2（4列配置車両群）

実験2では、図2に示すように、乗用車（L.P.G燃料）を含めて合計29台を配置している。ただし、自動車を左端配置し、道路中央部の空間を避難路として使用する場合の安全性の視点を加味している。この実験では、トラック5台、乗用車13台、L.P.G乗用車6台、ライトバン5台の29台である。気象条件は風向北から西へ約17°偏向、風速6.5m/sであった。この実験では、受熱量測定用センサーを用いて、自動車と建物の受熱量の実測を行っている。北側集積木材に着火してから、約2分30秒後に北側木造建物に着火し、4分30秒後に火炎が道路に吹き出した。目視観測によれば、5分30秒後に第1列車両に着火、6分後に第2列車両に着火している。道路中心空間を挟んだ第三列車両は8分後に着火し、9分後に第1、2列車両の火勢が盛んになっている。

(c)JAF（日本自動車連盟）による実験

JAFが行った実験は、図3に示すように二台の乗用車を90cmの間隔で配置し、車両の一台のボンネットに点火して、二車両の延焼性状を観察したものである。気象条件は、風速(2~3m/s)の微風であった。この実験では、点火後、一台目の車両は15分で火勢がピークを迎え、隣接する車両へ着火するまでに16分かかっている。観測結果より、二台目の車両は着火より6分後に火勢のピークを迎えている。この時間の差異は、一台目の車両炎上に伴う輻射熱の影響によると考えられる。

(2) 車両火災実験による諸知見

- i) 市街地火災から車両の延焼危険性が顕著に認められた。20,000Kcal/m²・hを越える輻射熱を受熱

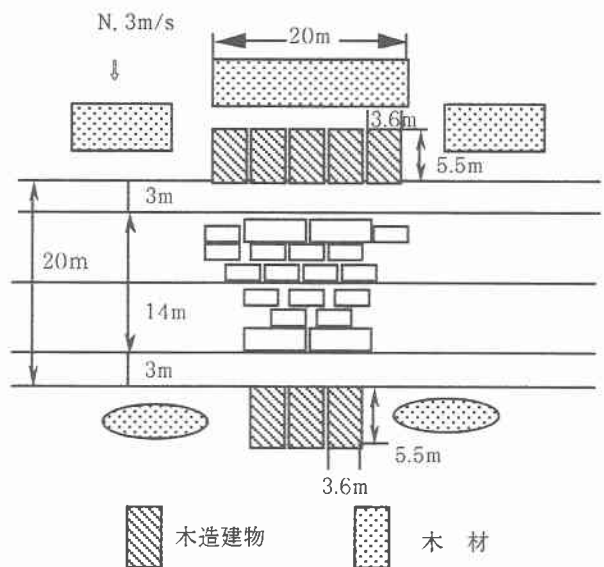


図1 車両火災実験1⁴⁾

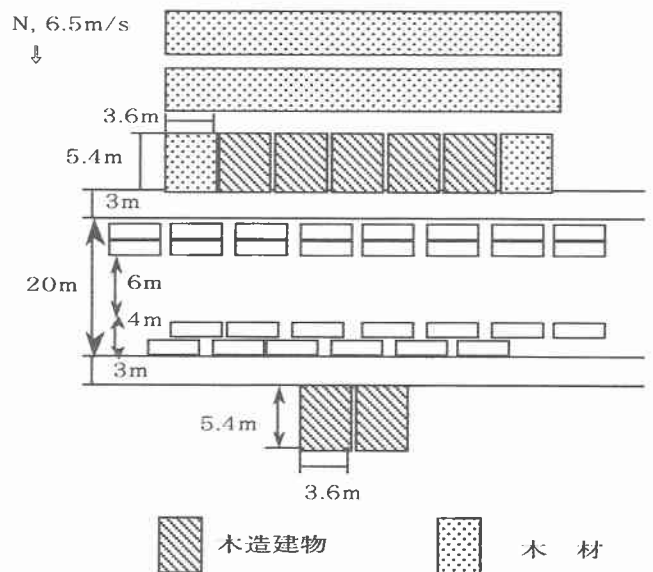


図2 車両火災実験2⁴⁾

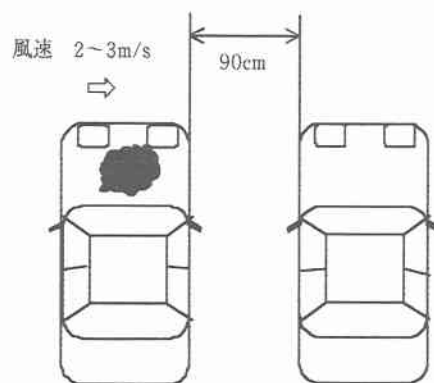


図3 車両火災実験3⁵⁾

すると車両の炎上最盛期までの所要時間は着火から3分30秒程度である。

- ii) 車両間の延焼は、市街地火災の輻射熱による影響が大である。
- iii) 車両から建物への延焼危険性は小さい（爆発的車両が無い場合）。
- iv) 静的には、L.P.G燃料車両は、安全弁が作動し爆発は見られなかった。
- v) 以上の車両炎上危険性は、風下側で卓越している。
- vi) 市街地火災の影響を受けない場合、車両単独の炎上ピークは15分程度であり、1分後には隣接車両へ着火する。

(3) 車両火災実験に基づく車両延焼モデル

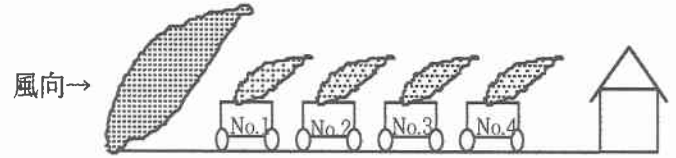
車両火災実験を整理すると、車両間の延焼は、木造建物と同様に着火から炎上、類焼、炎上というプロセスとなる。しかし、実験1に見られるように、車両が連続的に隣接し、かつ車両への環境温度が高い場合は、着火、延焼へ至る時間はきわめて短い。一方、実験2のように、車両を左端配置した場合は、道路の空間が車両間の延焼を阻止し、反対車線の車両は市街地火災からの輻射熱による着火・延焼となる。すなわち、地震時の渋滞道路の中央部空間を確保することは、緊急車両の走行を助けるのみならず、車両の延焼拡大に伴う沿道木造建物への延焼拡大阻害効果が期待できる。本節ではこれらの点に着目し、実験より得られた数少ないデータからではあるが、車両の着火・延焼速度と輻射熱の関係について考察を試みる。

(a) 車両からの輻射受熱量算定式に関する考察

実験2より、4列目の車両炎上に伴い、3.5m離れた風下側建物の受熱量が $2,800\text{Kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ 増加している。そこで、この受熱量の差を4列目車両からの輻射熱と想定し、式(1)の輻射熱計算式の定数項 $E\alpha$ を算定した結果、式(2)を得た。

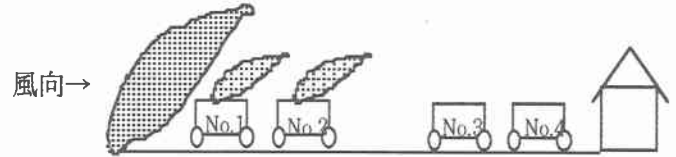
$$R(x) = E \cdot \alpha \cdot f(x) \quad (1)$$

$R(x)$: x (m) 距離における輻射受熱量 ($\text{Kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$)
 E : 輻射能 ($\text{Kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$)



ケース1) 渋滞時の車両配置

- a) 車両の延焼速度
- b) 風下建物への延焼の可否



ケース2) 渋滞時の左端車両配置

- c) 道路中央部の防災機能
- d) 3列車両への延焼の可否

図4 渋滞時左端駐車によるリスクの比較

α : 輝面率

$f(x)$: 形態係数

$$R(x) = 16025f(x) \quad (2)$$

(b) 車両の着火時間に関する考察

車両の着火時間に関するデータ(実験2)によれば、 $25,000 \sim 30,000\text{Kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ の熱量を受けた車両群は、約20秒で着火している。またJAFの実験では、火炎のピークから1分後に着火している。しかし、これ以上のデータは得られていないため、火炎の前面距離が車両に届く場合は、瞬時に着火し、それ以外の場合は、車両の火災ピーク時から1分後を車両の着火時間と仮定する。

(c) 車両の延焼速度に関する考察

車両の延焼速度(着火から延焼のピークまでの時間と定義する)は、実験2によると、一列目の車両は、 $25,000\text{Kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ の輻射熱量で3分30秒、二列目の車両は、 $12,000\text{Kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ で4分30秒の値が観測されている。また、式(2)を用いてJAFの実験における二台目車両の熱量を算定すると、 $7,300\text{Kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ となった。この実験では、二台目

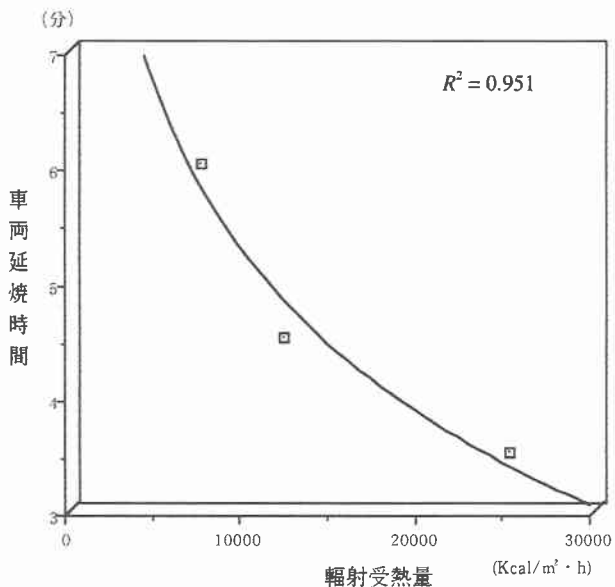


図5 延焼時間と輻射受熱量

の車両は約6分で火勢が最盛となっている。これらのデータを用いると、着火からピークまでの時間と輻射熱との関係は式(3)となる。

$$T_c = 23.445 - 4.564 \log(R(x)) \quad (3)$$

ただし $E \geq 7300$

T_c : 車両の延焼時間 (分)

式(3)を用いれば、市街地火災による輻射熱と車両火災からの輻射熱の算定が可能となる。具体的には、車両炎上に伴う風下側建物の延焼可否の判定や、避難路としての安全性評価指標の設定が可能となる。

表1 メッシュ属性の拡張

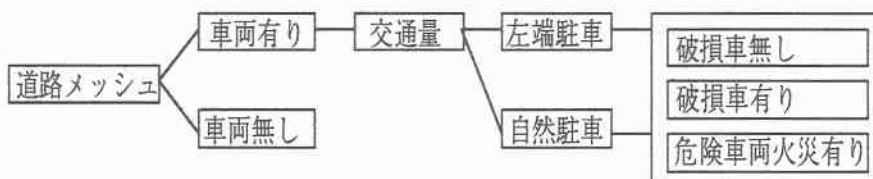
メッシュ属性	表記
可燃メッシュ	A
耐火造メッシュ	B
空地メッシュ	□
緑地メッシュ	G
道路メッシュ	R

3. 道路と車両属性の導入と関連アルゴリズム

従来の火災延焼シミュレーション・システムは、表1に示すように、都市構造を木造建物を主とする可燃メッシュ: "A"、耐火造建物を主とする耐火造メッシュ: "B"、道路・河川・オープンスペースを主とする空地メッシュ: "□"、緑地を主とする緑地メッシュ: "G" の4属性として取り扱ってきた。本節では、2.の車両火災実験から得られた知見を基に、道路メッシュ: "R" を導入し、河川・オープンスペースに代表される空地メッシュと属性を区分する。道路メッシュについては、図6に示すように、まず、車両の有無について考慮する。車両が存在しない道路メッシュについては、基本的には空地メッシュと同じ取り扱いをすればよい。車両の存在する道路メッシュについては、交通量から車両の配置状態を想定する。これらについては、渋滞時の左端配置と自然配置を想定する。そして、道路メッシュ: "R" には、個々の車両の位置座標が新たなデータとして追加されることになる。

最後に、これらの車両の延焼危険性は、破損車両の有無、危険車両火災の有無によって複合的な評価が必要となる。しかし、前述したように、著者らは、それらに関する十分な知見を得ていない。そこで、車両状態については衝突による破損車無し、タンクローリー等の危険車両無しと仮定し、市街地火災に伴う車両火災の危険性と、それに伴う風下側木造建物の延焼危険性および、車両間の延焼危険性についての検討を試みる。

表2は、道路メッシュを導入した炎上属性と、類焼属性の対応表である。表中、丸印は既存のアルゴリズムに組み込まれ済みであることを意味する。表中の網掛けの部分、すなわち炎上した木造建物・緑



- 1) 車両の有無 2) 交通量 3) 配置状態 4) 車両状態

図6 道路メッシュの状態定義

表2 炎上・類焼の対応表

類焼 炎上	A	G	R
A	○	○	A→R
G	○	○	G→R
R	R→A	R→G	R→R

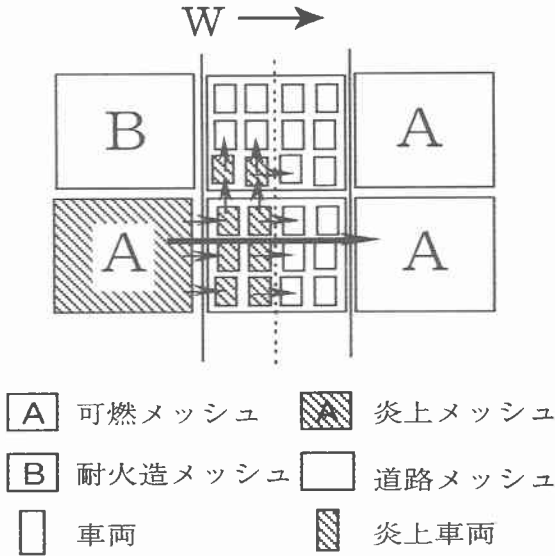


図7 車両の延焼パターン例

地から車両への延焼 (A→R)、(G→R)、および、車両火災から木造建物・緑地・車両への延焼 (R→A)、(R→G)、(R→R) のアルゴリズムを検討する。それらのイメージを、図7に示す。この図は、風上側の可燃メッシュが延焼し、それらの輻射熱によって車両が順次延焼するイメージを表している。図8に、具体的なアルゴリズムを示す。

炎上した木造建物・緑地から車両への延焼 (A→R)、(G→R)、については、火炎面から x_m m離れた車両 AZ_n への輻射熱量を算定する。このとき、火炎の前面距離 $L \cos \alpha$ (m) が車両に被れば、即時に着火すると仮定して着火時間 $T_f = 0$ を与える。それ以外は、輻射熱量と車両の耐火限界値 $E1$ と比較して、着火と判断されれば、 $T_f = 1$ (min) を与える。着火から延焼のピークまでの時間は、2. の式 (3) で与える。つぎに、車両火災から木造建物・緑地・車両への延焼 (R→A)、(R→G)、(R→R) については、火炎面からの熱量と、2. の式 (2)

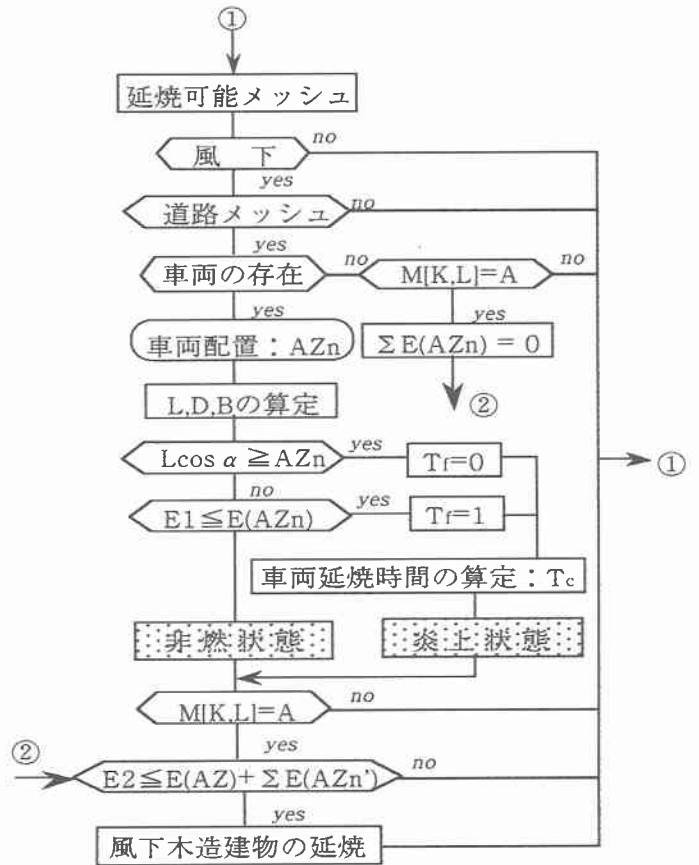


図8 車両火災モデルの拡張アルゴリズム

表3 パラメーター一覧

パラメータ	内 容
$M[K,L]=A$	風下二次近傍可燃メッシュ
AZ_n	n番車両配置 (x,y座標)
L	火炎長さ(m)
D	同時炎上奥行き(m)
B	火炎幅(m)
$L \cos \alpha$	火炎前面距離(m)
T_f	車両着火時間(min)
T_c	車両延焼時間(min)
E1	車両耐火限界値(Kcal/m ² ・h)
$E(AZ_n)$	車両受熱量(Kcal/m ² ・h)
$E(AZ_n')$	車両輻射熱量(Kcal/m ² ・h)
$E(AZ)$	市街地火災からの輻射熱量(Kcal/m ² ・h)
E2	木造建物の耐火受熱量(Kcal/m ² ・h)

の車両の熱量を算定し、木造、緑地、車両の耐火限界熱量と比較して延焼の可否を判定する。風横車両間の延焼については、2. の知見ii) ”車両間の延焼は、市街地火災の輻射熱による影響が大でありより延焼しないと仮定する。

以上を整理すると、道路メッシュと空地メッシュとの延焼阻害効果の違いは、車両炎上に伴う輻射熱のリスクとなって現れる。すなわち、十分な距離を

持つ空地メッシュは、風下二次近傍建物への延焼を遮断する延焼阻止効果を持つが、道路を挟む場合、車両間の炎上に伴う輻射熱の増加により、風下二次近傍可燃メッシュへの、新たな延焼拡大のリスクを伴うことになる。

最後に、計算結果のアウトプットについては、ポリゴンデータを用いて、建物・車両を配置し、単位時間毎にシミュレーション結果を表示することにした⁶⁾。

4. シミュレーション実行による考察

松山市の現地調査を行い、幹線道路と木造建物が隣接する地域を選定した。図9がその対象となる、100m四方の地区のマップである。道路幅員は、約20mで、歩道部分を3mとっている。この図より、道路西側は、耐火建物、木造建物が混在しているが、東側では、木造家屋が密集していることが分かる。そこで、東側の建物から火災が発生し、車両を渋滞時、左端配置の2つのケースを想定した。そして、火災による影響を受けると考えられる位置に車両を配置した。気象条件については、風向を東風、風速を2m/sに設定した。出火点については、風下側沿道から3軒奥の木造建物を与え、単位時間を1分とするシミュレーション実験を行った。出火から25分後、道路東側へ火災が延焼し、このとき火炎の前面距離は自動車前面距離よりも小さく、輻射受熱量が、14,655Kcal/m²・hとなり、発火に1分、延焼に4分となり、5分後に二台の車両が炎上した。以下、ケース1) 渋滞時の車両配置と道路左端の車両配置におけるシミュレーション結果について考察を行う。

図9のケース1)では、渋滞時の自然車両配置を想定しているため、車両が時間の経過とともに着火炎上している。そして、火災発生から44分後(道路に火炎が迫ってから19分後)には、風上側4列車両が炎上し、その輻射熱量と市街地からの輻射熱量の総和が、木造建物の耐火受熱量を超えたため、風下側の木造建物が炎上している。

一方、ケース2)の左端配置では、道路中央部に空間ができるため、二列めの車両から3列目の車両

への延焼が阻止され、その結果、風下側の木造建物の延焼危険性は見られない。

5. おわりに

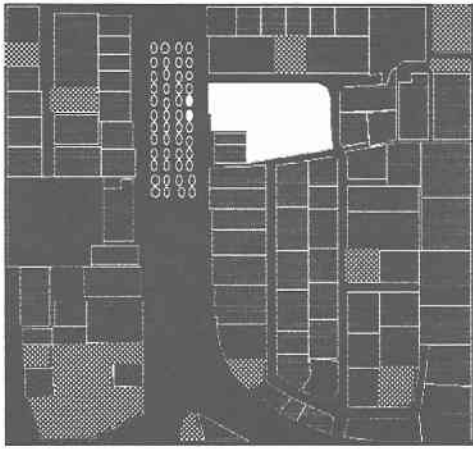
本研究では、都市直下型地震における車両火災の危険性を指摘し、火災実験より得られた知見を基に車両火災のモデル化とシミュレーション・システムへの拡張化の検討を行った。はじめに、車両の延焼危険性は、市街地火災からの輻射熱による影響が大きいという知見に基づき、車両の延焼プロセスを、着火、延焼のピーク、類焼可能と定義し、それぞれの時間を、実験データに基づき想定した。また、車両からの輻射受熱式を想定し、車両炎上に伴う風下建物への延焼危険判定のアルゴリズム化についても検討を行った。

最後に、適用事例を通して、渋滞時の道路中央部空間を確保した車両配置の場合、風上側の車両は延焼するが、風下側木造建物への延焼地拡を阻止することが認められた。しかし、用いたデータの妥当性の検討や、衝突による破損車両からの出火や、危険物車両火災を伴うリスク等、問題点も数多い。今後、これらについてのデータ収集を行い分析を進める必要がある。また、実市街地規模への適用を試みるとともに、樹木や歩道等の沿道整備による車両火災対策と延焼拡大への影響についても合わせて検討を行っていきたいと考えている。

<参考文献>

- 1)石井一郎編：防災工学、森北出版、1996.
- 2)平成7年兵庫県南部地震被害調査報告(速報)、建設省建築研究所、1995.
- 3)日本火災学会編：火災便覧、共立出版、1997.
- 4)松川 渉：大震災時における路上自動車群の延焼に関する研究(2)、火災、31,pp.11-18,1981.
- 5)JAFユーザーテスト84、JAF MATE社、1984.
- 6)二神 透、林 昌宏：GISを用いた火災延焼シミュレーション・システムの開発と適用に関する研究、土木学会四国支部第4回技術研究発表会、pp.318-319、1998.
- 7)二神 透、木俣 昇：防災緑地網整備計画のため

N
4
↑



T=30min (Δt=5min)

車両1列目の輻射受熱量
(14,655Kcal/m²・h)



T=44min (Δt=19min)

風下建物の輻射受熱量
(4,616Kcal/m²・h)

風速(2m/s)



ケース1) 渋滞時の車両配置

凡例

● 木造建物	● 耐火建物
● 空地	○ 延焼
○ 車両	○ 炎上車両

N
4
↑



T=30min (Δt=5min)

車両1列目の輻射受熱量
(14,655Kcal/m²・h)



T=44min (Δt=19min)

車両3列目の輻射受熱量
(7,359Kcal/m²・h)

風速(2m/s)



ケース2) 道路左端の車両配置

図9 松山市の幹線道路における適用事例

の火災延焼シミュレーション・システムの拡張化に関する基礎的研究、土木計画学研究・論文集、No.12, pp.151-158, 1995.

- 8) 二神 透, 和田修司, 木俣 昇: 車両火災を考慮した火災延焼シミュレーション・システムの開発、第4回都市直下型地震災害総合シンポジウム論文集、pp.537-540, 1998.
- 9) 木俣 昇, 千田 諭, 浦本 武: 地震時車両火災事故リスクのペトリネットシミュレーション、第4回都市直下型地震災害総合シンポジウム論文集、pp.533-536, 1998.
-

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

二神 透, 木俣 昇, 和田 修司

本研究では、はじめに都市直下型地震における車両火災の危険性を指摘し、火災実験より得られた知見を整理した。その結果、車両の延焼危険性は、市街地火災からの輻射熱による影響が大きい点に着目し、実験データから炎上車両輻射熱算定、着火算定、延焼時間算定式を提案し、車両炎上火災を考慮したシミュレーション・システムを構成した。最後に、適用事例を通して、車両の配置状態によって、道路の防災機能の役割が大きく異なることを指摘することができた。

A Study on The Simulation System for Automotive Fires on The Road under A Great Earthquake

By Tohru FUTAGAMI, Noboru KIMATA and Shuji WADA

Under a great earthquake, it is important to consider automotive fires as a factor of risks against fire-spreading in urban areas, because even usually automotive fires ratio has been increased about 40% in this decade. In this study, we try to extend fire-spreading simulation system for automotive fires.

Firstly, we analyze the literatures about experiments of automotive fires. Secondly, we extend our simulation system
