

## 建物被害を考慮した地震直後の CA 火災予測システムの構築

謝 孟春<sup>†</sup> 関本 正光<sup>††</sup>

地震火災は地震の二次災害で最も大きい災害で、建物全壊率と直後出火率に高い相関がある。本研究では、地震直後の火災シミュレーションに建物の被害を取り込んで、建物被害が火災被害に与える影響を検討することを目的とする。建物被害を考慮した火災シミュレーションは、建物倒壊などによる被害をガレキの拡散で格子マップ上に表現する。御坊のある地区を対象として、シミュレーションを行った。

### Construction of System Based on Cellular Automaton for the Simulating Spread of Fire with Building Damage

Mengchun Xie<sup>†</sup> and Masahiro Sekimoto<sup>††</sup>

The spread of fire is the biggest disaster in the secondary disaster after an earthquake. There is high correlation at building collapse and the rate of fire breaking out. This research introduces a building damage into the fire simulation system for examining building damage effect. In this study, the building damages are expressed by spreading the rubble to a lattice map. Moreover, a method is proposed to arrange cells suitable for the urban districts of the Gobo-Hidaka area, in which a fire was simulated.

### 1. はじめに

地震火災は地震の二次災害で最も大きい災害で、建物全壊率と直後出火率に高い相関がある[1][2]。関東大震災による死者・行方不明者は10万人を越え、建物被害は焼失家屋が44.7万戸、全半壊が25.4万戸にのぼり、被害総額は当時のGDPの4割を越えた。また、地震発生直後から同時多発的に火災が発生し、その一部が延焼火災となって、旧東京市の43%が焼失した。

阪神・淡路大震災以降、日本の自治体では地震発生時の避難経路の策定や減災対策を整備している。しかし、被災時は建物の倒壊や大規模火災の影響で、平時と状況が異なることが予想される。よって、地震発生直後の被害状況をあらかじめシミュレートすることは、より安全な避難経路策定や減災対策への活用が期待できる。

火災予測シミュレーションを行う手法の一つにセル・オートマトン (Cellular Automaton: CA) 法がある。CA法は、有限個のセルと呼ばれる素子の状態から、時間発展する複雑系全体の振る舞いを表現する方法である[3]。CA火災シミュレーションにおいて、セルを相互に影響させることで、火災の広がりのような複雑な事象を具体的に表現できる[4][5][6]。

これまでのCAによる火災予測システムは、電子住宅地図を用いて対象とする地域をセルで表した格子マップを作り、火災シミュレーションを行った[7]。しかし、地震による建物の倒壊を考慮せず、道路を塞ぐように崩れた家屋を伝って燃え広がるといった地震発生直後に予想される火災は表現できなかった。

本研究では、地震発生直後の建物被害を火災シミュレーションに導入し、建物被害が火災被害に与える影響を検討することを目的とする。建物被害を考慮した火災シミュレーションは、「全半壊確率」と「耐震化率」で建物の被害を予測し、建物倒壊などによる被害をガレキの拡散で表現する。また、ガレキの拡散を反映した格子マップを用いて火災シミュレーションを行う。

本論文の構成は次のようである。2章ではCAによる火災予測シミュレーションについて述べる。3章では地震による建物被害の表現法を検討する。4章では建物被害を考慮した火災シミュレーションと従来法での比較実験を行い、その影響について考察する。5章はまとめである。

<sup>†</sup> 和歌山工業高等専門学校  
Wakayama National College of Technology

<sup>††</sup> 豊橋技術科学大学  
Toyohashi University of Technology

## 2. CAによる火災予測シミュレーション

### 2.1 CAによる火災シミュレーションの概略

CAによる火災予測シミュレーションは地図のセル化とセルの状態遷移から成り立っている[5]. CAによる火災予測システムの概略を以下に示す.

- ① 地図のセル化: シミュレーション対象となる地域のマップを作成する.
- ② 火災の発生: 出火点を任意に指定し, 火災が発生する.
- ③ 燃焼セルの変化: セルの燃焼時間により燃焼セルの延焼能力を変化させる. または, 燃焼セルが一定の時間が経過した後鎮火セルとなる.
- ④ セルの状態遷移: 延焼判定を行い, 可燃セルが燃焼セルに移り変わる確率を求める.
- ⑤ 終了条件: 定められた回数まで繰り返す.

### 2.2 地図のセル化

CAにおける地図のセル化とは, 電子住宅地図を1m四方の二次元格子というセルで区切ることである. 地図のセル化より作成された地図を格子マップと呼ぶ.

それぞれのセルは以下に示す6つの状態のいずれかを対応させる. 木造セルと防火セルは, 延焼が起こる可能性があるため, 可燃セルと呼ぶ. また, 本研究において木造, 防火, 耐火の建築様式を建物属性として表現し, これら3つのいずれかの属性を持つセルを建物セルとする. 燃焼セル及び鎮火セルは, 火災における状態なので, シミュレーション内のみで考慮する.

- (1) 木造セル: 木造建築を表し, 燃えることがある.
- (2) 防火セル: 防火建築を表し, 木造セルに比べ燃焼に移り変わりにくい.
- (3) 耐火セル: 耐火建築を表し, 燃えない.
- (4) 空き地セル: 道路, 空き地などの建物でない場所を表す.
- (5) 燃焼セル: 燃えている建物を表す.
- (6) 鎮火セル: 燃え尽きた建物を表す.

### 2.3 セルの状態遷

可燃セルが燃焼セルに変化する条件は以下の2つとする.

- (1) ムーア近傍に燃焼セルがある場合.
- (2) 8m以内の道路・空地セルを挟んで燃焼セルがある場合.

延焼可能な可燃セルが燃焼セルに変化する確率  $p$  を式(1)のように定義する.

$$p = \frac{W_e \cdot C_b \cdot C_f}{C_d} \quad (1)$$

式中の各パラメータは以下のように設定する.

$W_e$ : 風の影響を表すパラメータで, その計算式は式(2)で表される.

$$W_e = \begin{cases} \frac{W^2}{8} + 1 & (W \geq 0) \\ 1 & (W < 0) \end{cases} \quad (2)$$

$C_f$ : 燃焼セルの火の勢いを表すパラメータであり, 消防の経験則より式(3)と設定する.

$$C_f = \begin{cases} 1 - \left( \frac{t-7.0}{13.0} \right)^2 & (\text{木造}) \\ 0.7 \left\{ 1 - \left( \frac{t-12.0}{18.0} \right)^2 \right\} & (0 \leq C_f \leq 1) \\ & (\text{防火}) \end{cases} \quad (3)$$

$C_d (C_d \geq 1)$ : 建物間距離を表すパラメータであり, 建物間距離が大きくなるとその値も大きくなる.

$C_b (0 \leq C_b \leq 1)$ : 無風状態でのセルの燃えやすさを表すパラメータで, セルの種類によって変化する.  $C_b$ として, 東京消防庁の東京消防式 2001 を適用している. 東京消防式 2001 は建物内と建物間での延焼速度が異なり, これに基づいて, 以下の計算になる.

#### 建物内の場合

木造セルの  $C_b$  は式(4)のようである.

$$C_b = \frac{52}{120 \times 0.77} = 0.56 \quad (4)$$

防火セルは木造セルより燃えにくいという性質より, 木造セル  $C_b$  の半分の 0.28 とする.

#### 建物間の場合

木造セル, 防火セルのそれぞれの  $C_b$  について, 式(5)より求める.

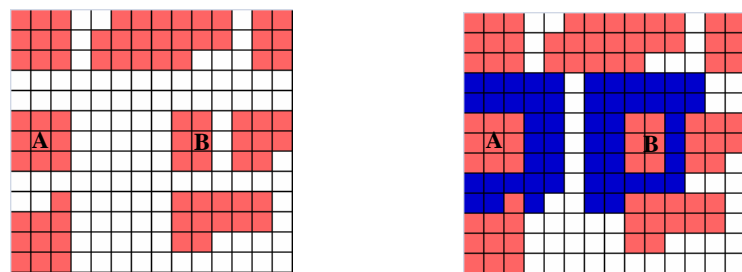
$$C_b = \begin{cases} \frac{V}{92.4} & (\text{木造}) \\ \frac{V}{184.8} & (\text{防火}) \end{cases} \quad (5)$$

以上で求めた確率  $p$  と一様乱数  $r_f (0 \leq r_f \leq 1)$  を比較し,  $p \geq r_f$  の時に可燃セルは燃焼セルに変化する.

### 3. 火災予測システムにおける建物被害の取扱い

#### 3.1 ガレキの拡散による建物被害の表現

地震が発生した場合、建物が倒壊しガレキが道や空き地に散乱する。ガレキは建物の材質と同じく可燃性を持つもので、これが道や空き地などの延焼を防ぐ空間を埋めることにより、延焼の可能性が高くなる。図1にガレキがある場合とない場合の一例を示す。桃色のセルが建物を示し、延焼の可能性はある。白色のセルが空き地セルで、延焼の可能性はない。青色のセルはガレキを示し、可燃性である。図1(a)のガレキがない場合は、建物間でのスペースが多くて、A点で出火したとしても、空き地セルの存在で道を挟んだB点への延焼確率は低い。図1(b)のガレキがある場合は、建物間のスペースがガレキで埋められ、A点からガレキを伝って延焼するので、B点へも延焼する確率が高くなる。



(a) ガレキあり (b) ガレキなし

■ 建物セル □ 空き地セル ■ 瓦礫

図1 ガレキの拡散

日本の戸建て住宅はほとんど2階建てで、一階あたりに高さが3mほどである[8]。建物倒壊などによるガレキの表現方法は、地上2階の一戸建て住宅の高さを6mとし、それが倒壊した際に、建物の材質を周囲に拡散するものとする(図2)。

全壊の場合、対象とした建物セルから半径6mのセルに対して、式(6)で計算し、図3のようにガレキの拡散とする。ただし、 $i, j$  : 元の座標,  $i_0, j_0$  : 対象セルの座標である。

$$(i - i_0)^2 + (j - j_0)^2 \leq 6^2 \quad (6)$$

半壊の場合は、対象とするセルが周囲の25%のセルにガレキを拡散させることとする。

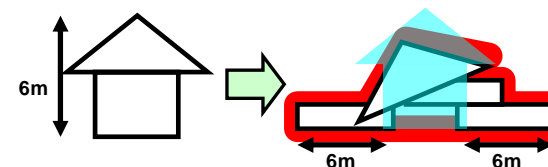
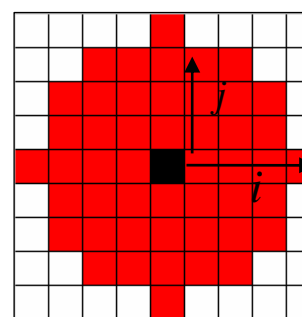


図2 ガレキの表現



■ 対象セル ■ ガレキの拡散範囲

図3 全壊時のガレキの拡散範囲

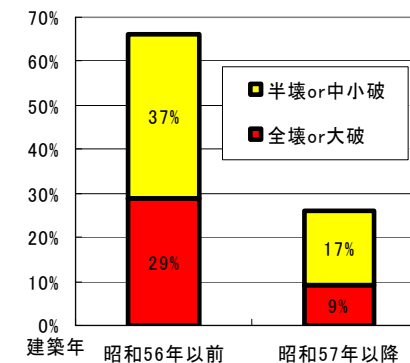


図4 阪神・淡路大震災の建物被害

#### 3.2 建物被害を表現するパラメータの設定

建物被害を表現するパラメータに「全半壊確率」と「耐震化率」を用いる。

全半壊確率とは、その建物の耐震性能によって決まる値で、「平成7年阪神・淡路大震災建築震災調査委員会の中間報告」から図4に示すようなデータがある[9]。この報告では、建築基準法施行例が大幅改正された昭和56年を境に建物倒壊に顕著な差が現れることが示された。同報告によると、昭和56年の建築基準法施行例改正以前に建築された建物の全壊率は29%に達したことにに対し、施行例改正後に建築された建物の全壊率は9%であった。また、施行例改正以前に建築された建物の半壊率は37%であったことにに対し、施行例改正後の建物の半壊率は17%であった。

耐震化率とは、その地域における耐震化された建物の比率を表したものである。建築基準法施行令が改正された昭和56年を境に、それ以降新増築した建物を「耐震性あり」とし、そうでない建物を「耐震性なし」とした。耐震化率の値は、和歌山県の平均として和歌山県総合防災課にて開示されているデータで、対象地域として御坊市名田町上野地区を実地踏査して調べたデータを用いる(表1) [9][10].

表1 和歌山県と対象地域の耐震化率

	耐震性あり	耐震性なし
和歌山県平均	70%	30%
対象地域	60%	40%

### 3.3 建物被害を考慮した格子マップの作成方法

建物被害を火災シミュレーションで取扱うための格子マップの作成は、以下のような手順で行う。

#### 手順①格子マップの作成

電子住宅地図から格子マップを作成する。各セルには2.2節で示された建物の性質を示す属性が与えられる。

#### 手順②建物セルの走査

格子マップのすべてのセルを走査し、倒壊判定を対象となる建物セルを取り出す。

#### 手順③全半壊判定

建物の倒壊判定を行う。倒壊判定では、前節に設定したパラメータ(耐震化率・全半壊確率)を使用する。まず耐震化率から当該建物が耐震化されているかを判定し、決定した耐震性能から全半壊率により判定を行う。

#### 手順④同一建物の判定

手順②を格子マップの建物セル全てに対して行う際に、すでに判定が行われた建物に異なる判定が行われないように、同一建物には1つの判定のみとする。図5に示すように格子マップ上では、異なる建物セルは連結がない、すなわち、同一建物のセルは別の建物セル間には空き地セルがある。従って、ノイマン近傍で隣接する建物セルを同一建物とする。

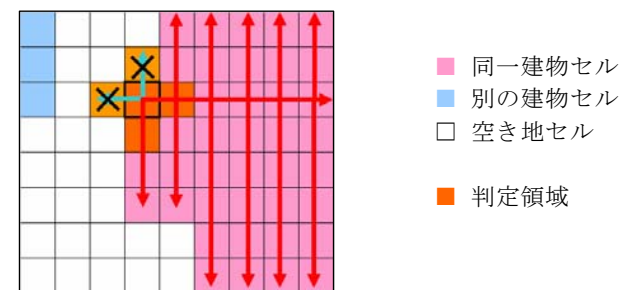


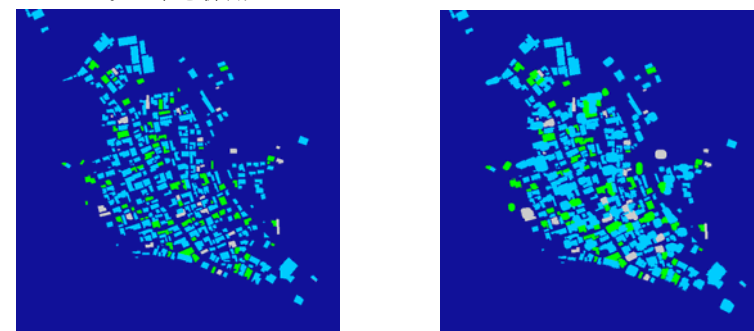
図5 同一建物の判定

全半壊によるガレキの拡散において、1つのセルに複数回ガレキの判定がされる場合、より燃えやすいガレキを伝えて延焼することが考えられるので、ガレキの属性は木造、防火、耐火の順に優先で決定する。拡散させるセルにすでに建物があった場合は、建物属性を優先して使用する。

## 4. 実験と考察

### 4.1 ガレキの拡散による建物被害の表現

御坊市名田町上野地区を対象として、従来の手法と本研究で提案したガレキの拡散手法を用いて格子マップを作成した(図6)。木造住宅多数地域、耐震化率6:4という比率を採用した。



(a) 従来法

(b) 本手法

■ 木造セル ■ 防火セル ■ 耐火セル ■ 空き地セル

図6 ガレキの拡散の有無の格子マップ

従来法で作成した格子マップ（図 6(a)）は、電子住宅地図にある建物の形をそのまま再現している。本手法で作成した格子マップ（図 6(b)）は、ガレキの拡散を考慮したため、本来の道路・空き地セルの一部を建物セルに変わって、従来法のマップに比べ、空き地セルの面積が小さくなった。このような地域では、火災が発生する場合、ガレキの拡散で延焼しやすくなることが示唆される。

#### 4.2 建物被害を考慮した火災予測シミュレーション

図 6 に示した二つの格子マップを用いて、火災予測シミュレーションを行った。シミュレーション時間を 10 時間、無風、リピート 200 回とする。出火点はそれぞれの図に示している。

従来の手法での火災燃焼確率を表す危険度マップを図 7, 本手法の結果を図 8 に示す。危険度マップとは、200 回のシミュレーションにおける、各時間の焼失した確率をセルごとに表したものである。

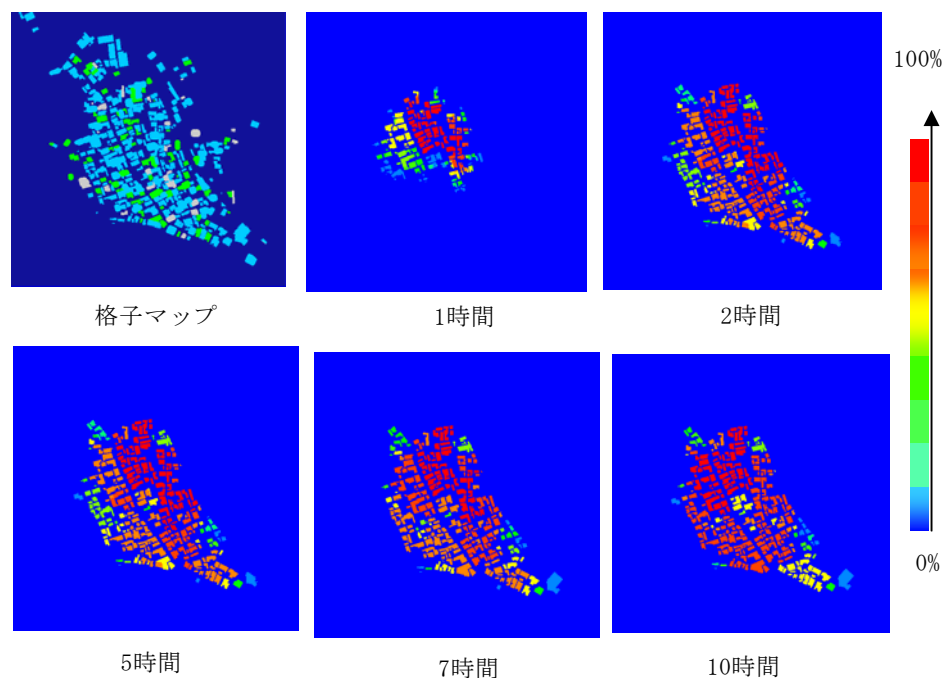


図 6 従来手法での危険度マップの時間変化

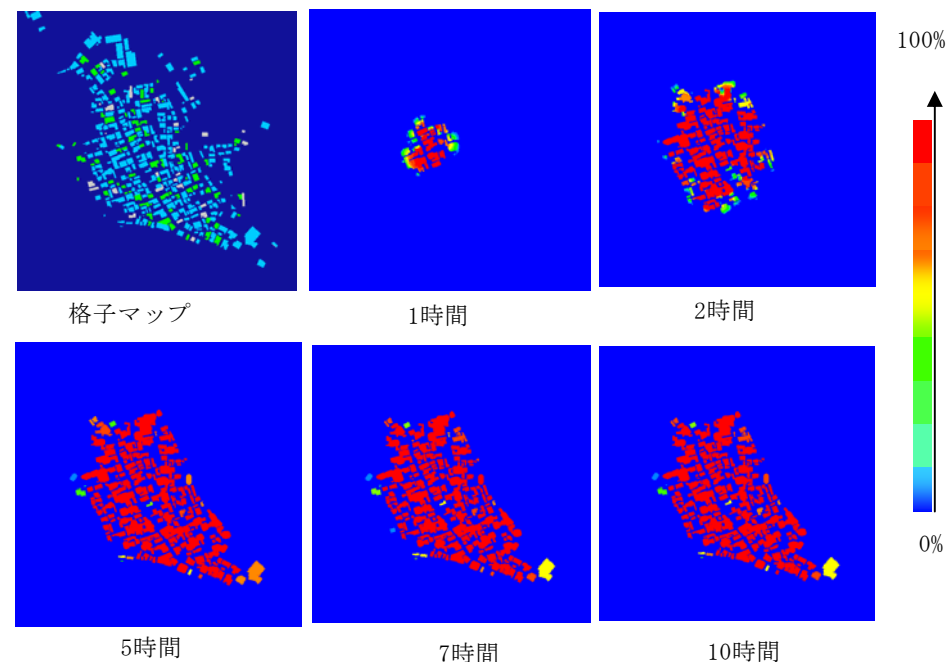


図 7 本手法での危険度マップの時間変化

出火後 1 時間から 5 時間にかけて、従来法で作成した危険度マップより本手法で作成した危険度マップの方が、延焼確率が高いセルが多いことが分かった。延焼が止まる 7 時間から 10 時間の危険度マップを比較しても、本手法で作成した危険度マップの方が延焼した回数が多かった。

これにより、本手法によるシミュレーションでは、従来法に比べて延焼速度、延焼確率のどちらも増大することがわかる。これは、ガレキによって空き地セル面積が小さくなったことによるものと考えられる。

また、シミュレーションにおける焼失面積の変化を図 8 に示す。焼失面積とは、その時間に対応する燃焼セルと鎮火セルの和である。セルは 1m 四方なので、セルの個数が面積となる。図 8 より、本手法では最終的な焼失面積でおよそ 2 倍の差が出る事がわかる。このことから、道などの空き地に大きな防火効果があることがわかる。

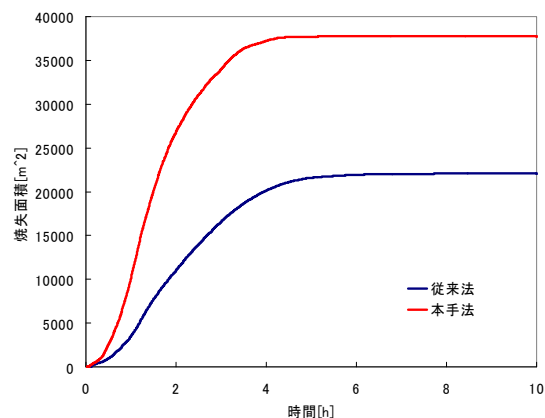


図8 焼失面積の時間変化

## 5. おわりに

本研究では、地震による建物被害をガレキの拡散で表現し、火災予測シミュレーションに導入した。ガレキの拡散によって建物被害を考慮することによって、地震直後の状態をある程度反映したシステムを構築することができた。建物倒壊したガレキによって空き地の面積が縮小した結果、焼失面積が増大し、延焼拡大傾向があることがわかった。また、全半壊判定の偏りはシミュレーション開始直後に影響するもので、十分時間が経過したとき影響は小さいことがわかった。

今後の課題として、高さも考慮した3次元のシステムを検討する。高層建築物の建物被害は、平屋や2階建ての建物とは違い周囲に大きな影響を及ぼす。よって、高層建築物がある地域でシミュレーションを行う場合、ガレキの拡散範囲やその方法を変更する必要がある。また、防火林の影響など現実にある要素を考慮してシステムを改善する必要がある。

## 参考文献

- 1) 消防庁震災対策指導室, 地震時における出火防止対策のあり方に関する調査検討報告書について (1998)
- 2) 目黒, 柳田, 高橋, 関東大震災の延焼火災に与えた建物被害影響について, 生産研究 55, 577, pp.119-122 (2003)
- 3) 加藤, 光成, 築山, セルオートマトン法—複雑系の自己組織化と超並列処理—, 森北出版, p17(1998)
- 4) 野口, 謝, 御坊・日高地方における震災直後の火災予測システムにおける格子マップ作成の効率化, 平成19年度電気関係学会関西支部連合大会論文集, G11-7(CD-ROM)(2007)
- 5) M.C. Xie, N. Sakamoto and H. Ogura, Application of Cellular Automata to Simulation of the Spread of a Fair on a City Site, Proceedings of the IASTED International Conference on Artificial Intelligence and Applications (AIA2003) pp.343-347(2003)
- 6) M. Xie and T. Kiritoshi, Improvement of the Model Based on Cellular Automata for Simulating the Spread of Fire, Proceedings of the Sixth IASTED International Conference on Modelling, Simulation and Optimization, pp106-110 (2006)
- 7) 謝, 野口, セルオートマトン法を用いた震災直後の市町村火災延焼危険マップの作成, 情報処理学会研究報告, MPS-73, pp.121-124 (2009)
- 8) <http://kodate.home4u.jp/column/buy/20080610.html>
- 9) 和歌山県庁総務部危機管理局総合防災課, 東南海・南海地震に備えよう, p5(2008)
- 10) 関本, 謝, 複合要因を考慮した地震直後の火災予測システムの構築, 平成20年度電気関係学会関西支部連合大会論文集, G11-15 (CD-ROM)(2008)
- 11) 和歌山県総務部危機管理局総合防災課, 和歌山県地震被害想定調査概要について (2006)