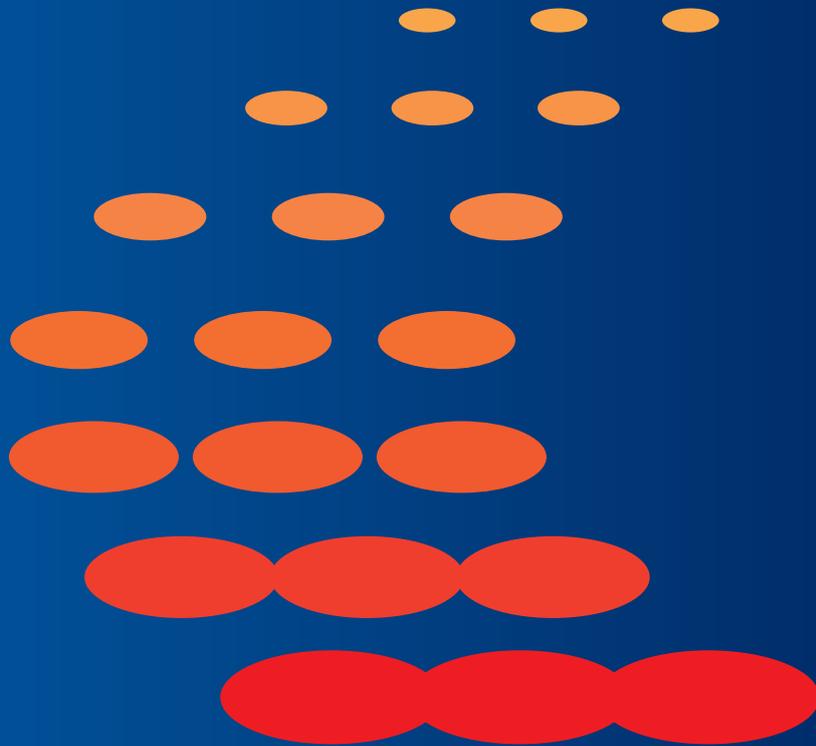
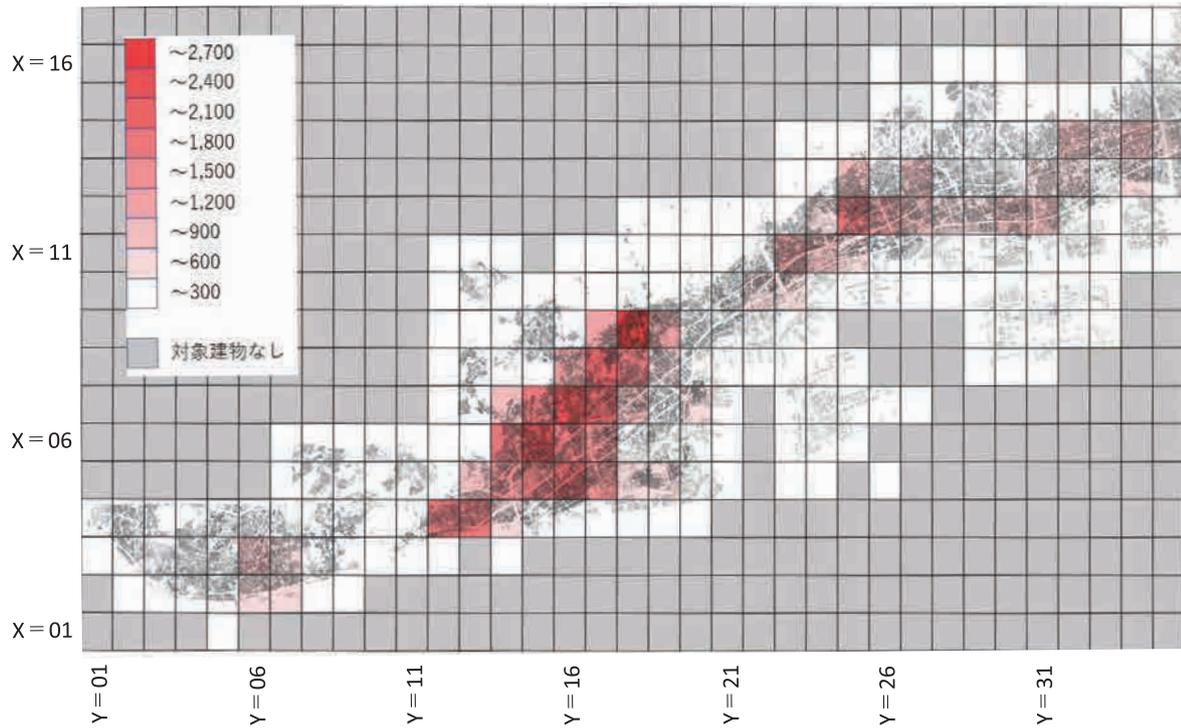

消防研究所報告

通 卷 132号

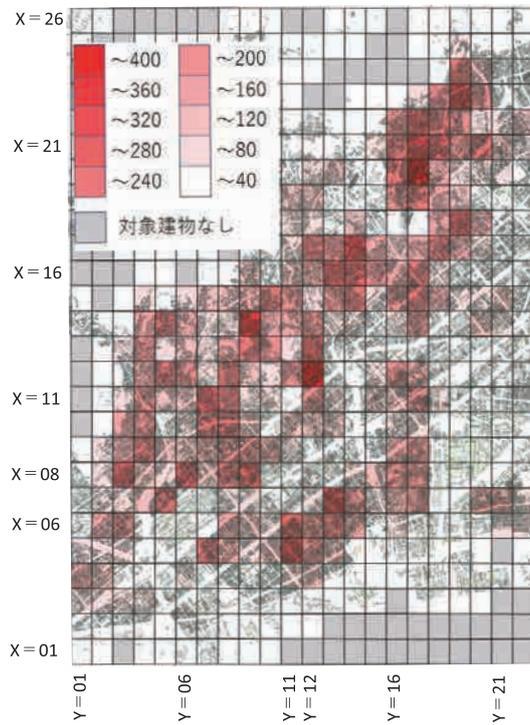
2023年9月



Report of National Research Institute
of Fire and Disaster

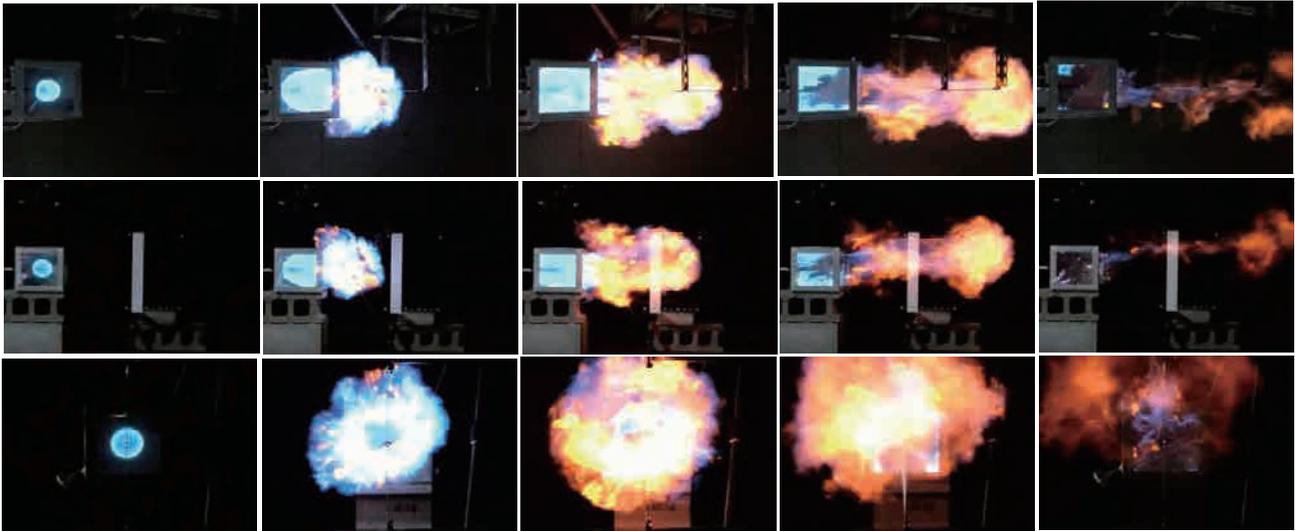


(1) 1km メッシュ
 (1) Mesh size is about 1km.



(2) 250m メッシュ
 (2) Mesh size is about 250m.

片方向延焼を考慮して構築した延焼クラスタを用いた高速な計算方法による焼損棟数の計算結果 本文 25 ページ参照
 The number of burnt buildings per mesh calculated by the method considering the one way fire spreading. See also page 25.



t=4/240 s

t=12/240 s

t=21/240 s

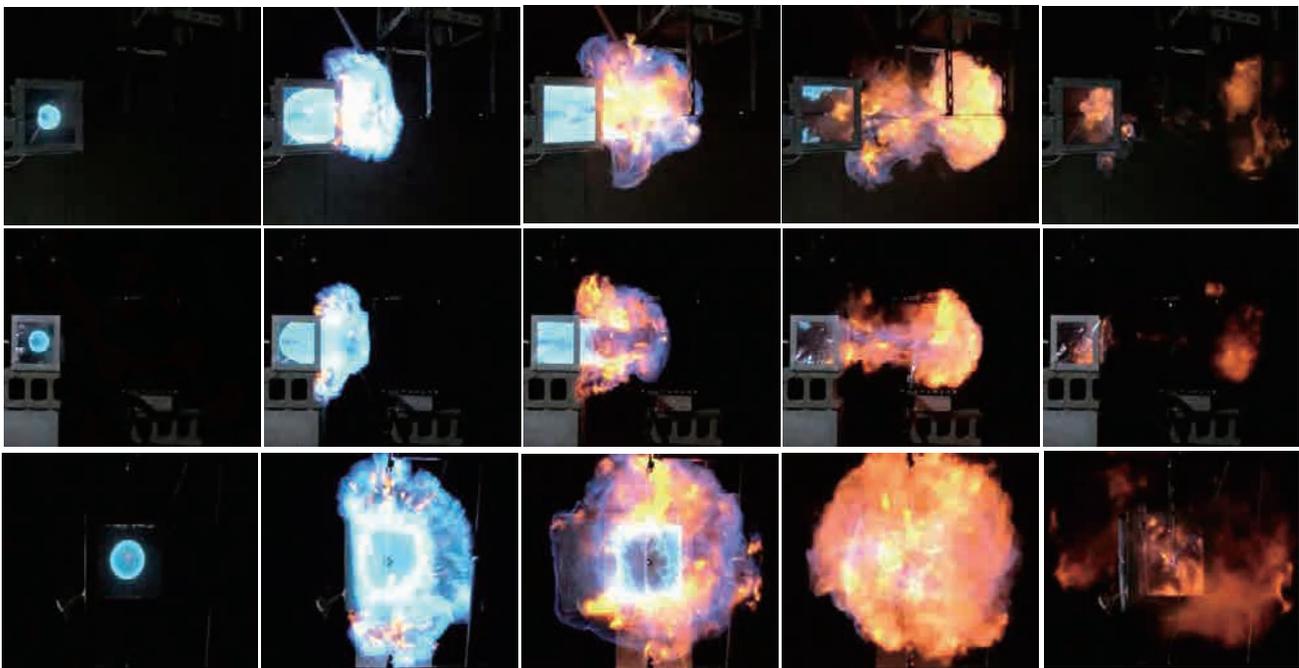
t=29/240 s

t=36/240 s

上段：C面を撮影、中段：A面を撮影、下段：B面を撮影
 Top: surface C, middle: surface A, bottom: surface B

ろ紙を使用した場合における火炎の様子 本文 35 ページ参照

Aspects of spreading flame. Sample: filter paper. t: time after ignition. :See also page 35.



t=4/240 s

t=13/240 s

t=22/240 s

t=35/240 s

t=47/240 s

上段：C面を撮影、中段：A面を撮影、下段：B面を撮影
 Top: surface C, middle: surface A, bottom: surface B

ポリエチレンシートを使用した場合における火炎の様子 本文 36 ページ参照

Aspects of spreading flame. Sample: polyethylene sheet. See also page 36.

目 次

技術報告

消火活動困難な火災に対応するための消火手法の研究開発について

～大規模倉庫火災に関する 実態調査～

高橋 優太、内藤 浩由、天野 久徳 …………… (1)

広域版地震被害想定システムへの機能追加を目的として構築した延焼被害推定手法による

焼損棟数の計算結果と実被害の比較

高梨 健一、細川 直史 …………… (13)

小型模型を使用したガス爆発実験について

- 開口より外部に噴出した火炎の影響 -

鈴木 健 …………… (33)

— Contents —

[Technical Report]

Research and Development of Firefighting Techniques against Difficult Fires

- Field Survey on Large-scale Warehouse Fires -

Yuta Takahashi, Hiroyoshi Naito and Hisanori Amano 1

A Comparison of the Estimation Number of Burnt Buildings Based on the Fast Method for the Earthquake Fire Damage Calculation Built for the Purpose of Adding Functions to the Wide-Area Earthquake Damage Estimation System and the Actual Damages

Ken-ichi Takanashi and Masafumi Hosokawa 13

Experiments on Gas Explosion Using a Small Enclosure

- Effect of Ejected Flames -

Takeshi Suzuki 33

技術報告

消火活動困難な火災に対応するための消火手法の研究開発について ～大規模倉庫火災に関する実態調査～

高橋 優太、内藤 浩由、天野 久徳

(令和 5 年 7 月 6 日 受理)

近年、物流業界の需要拡大に伴い、倉庫の件数増加及び大規模化の傾向が進んでいる中、殉職事案も含む大規模倉庫火災が急増している。

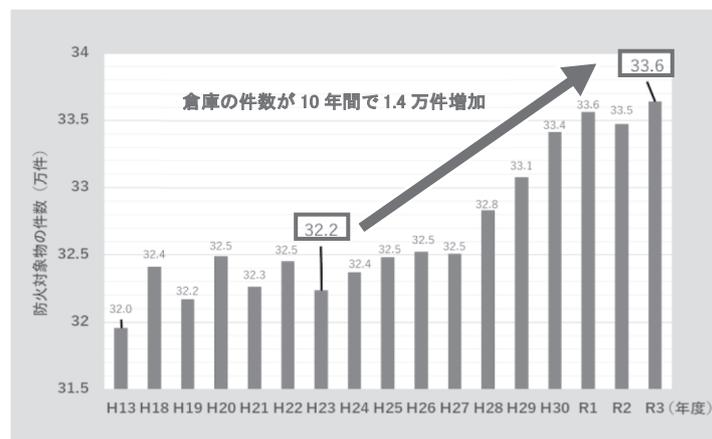
倉庫火災が発生すると濃煙熱気や急速な延焼拡大により、消防隊の屋内進入が困難となり、長時間の消火活動を余儀なくされる。結果として、周辺の生活や環境に影響を与えることに加え、物流ラインが停止することによる莫大な経済損失に繋がる。

本稿では、今後も発生しうる大規模倉庫火災に対応するため、実態調査により大規模倉庫等の火災対応時における問題点や課題を抽出した。

1. はじめに

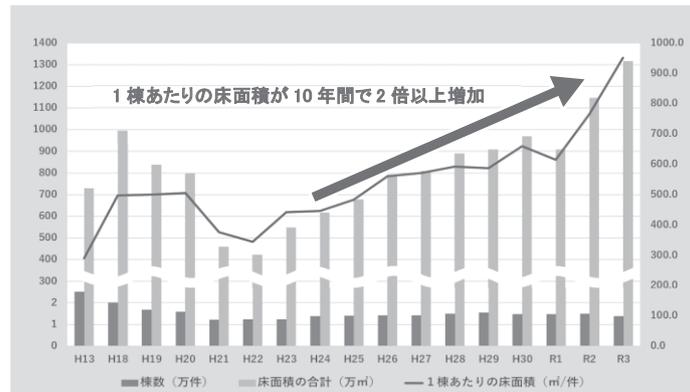
近年、ネット通販等の需要拡大に伴い、倉庫の件数は年々増加傾向にあり、総務省消防庁消防白書¹⁾のデータによると、平成 22 年から令和 2 年の 10 年間で 1.4 万件増加している(図 1.1)。また、国土交通省建築・住宅関係統計データ²⁾による

と、平成 23 年から令和 3 年の着工予定の倉庫の棟数は横ばいであるが、当該着工予定の倉庫の床面積は 10 年で約 770 万㎡増加、1 棟あたりの床面積は 2 倍以上となっている(図 1.2)。このことからわかる通り、倉庫の総数増加に加え、大規模化が進んでいる。



1. 総務省消防庁「消防白書¹⁾」より作成。(1989-2022)
2. 消防法施行令別表第 1 (14) 項に該当する防火対象物で延べ面積 150㎡以上のものを集計。

図 1.1 倉庫 (14 項) の件数の推移



1. 国土交通省「建築・住宅関係統計データ²⁾」より作成。(1989-2021)
2. 着工予定の建築物のうち、倉庫の用途、かつ床面積10㎡を超えるものを集計。

図1.2 倉庫の件数の推移

倉庫は、物品を保管する性質上、大量の可燃物の保管及び太陽光等による物品の劣化を避けていることが多い。そのため、物品搬出入や大型機器入替等の作業上必要な開口部以外は、法令上設置しなければならない開口部を除き、必要最低限となっており、トラック等の搬出入がない階の開口部は極端に減り、消火活動上有効な開口部を有しない階（無窓階）となっている傾向にある。

現行の消防用設備等による適切な消火、または延焼阻止できるように消防訓練等が行われているが、夜間等の従業員の少ない時間帯での火災や物品の可燃性の違い等が要因で初期消火に失敗した場合、大量の可燃物の集積や危険物等の貯蔵による、急速な延焼拡大や大量の濃煙熱気の発生、更には開口部が少ないため、屋外からの消火活動及び消防隊の屋内進入ができない等により、消火活動が極めて困難と

なり、長時間の消火活動となることが予想される。延焼時間が長期間となることは、周辺の生活や環境に影響を与えることに加え、物流ラインが停止することによる莫大な経済損失に繋がる懸念される。平成29年2月に埼玉県三芳町で発生した大規模倉庫火災（延べ面積：約72,000㎡）では、鎮火までに約12日間を要し、また令和2年4月に宮城県岩沼市で発生した大規模倉庫火災（延べ面積：約44,000㎡）でも、約7日間を要した。更に、令和2年7月に静岡県吉田町で発生した倉庫火災（延べ面積：約7,000㎡）では、鎮火までに約2日間を要し、消防隊員を含む殉職者が発生した。これらの火災に続き、令和3年11月にも、大阪府大阪市で大規模倉庫火災（延べ面積：約56,000㎡）が発生し、鎮火までに約5日間を要している（図1.3）。



図1.3 大規模倉庫火災の様子（左：埼玉県三芳町大規模倉庫火災、右：宮城県岩沼市大規模倉庫火災）



図 1.3 大規模倉庫火災の様子 (左: 静岡県吉田町倉庫火災³⁾、右: 大阪府大阪市大規模倉庫火災)

近年、この様な消火活動の困難性及び危険性が極めて高い大規模倉庫火災が急増しており、この様な類似の殉職事故や火災が再発しないよう、消防隊を含む人的被害をなくすための対策(無人での消火手法等)を取り入れ、安全で有

効な消火手法の開発や、新たな消防資機材の開発等による消防力の強化を図ることは、消防活動上において喫緊の課題である(表 1.1)。

表 1.1 近年発生した大規模倉庫火災の例

No.	発生日	場所	階層	延べ面積 (㎡)	焼損面積 (㎡)	鎮火時間 (h)	死傷者 (人)
I	2017.02	埼玉県	3 階	71,892	43,981	295	傷者 2
	管轄) 入間東部地区事務組合消防本部						
II	2020.04	宮城県	2 階	43,836	43,836	148	なし
	管轄) あぶくま消防本部						
III	2020.07	静岡県	2 階	6,857	6,845	29	死者 4、傷者 5
	管轄) 静岡市消防局						
IV	2020.12	栃木県	4 階	48,836	5,845	15	なし
	管轄) 宇都宮市消防局						
V	2021.11	大阪府	7 階	56,532	38,702	128	傷者 1
	管轄) 大阪市消防局						

本研究では、この様な消火活動困難性が極めて高い火災形態(建物構造、可燃物の種類、火災進展等)に対し、消防隊員の安全、かつ、迅速に消火のための消火手法及び消火戦術の検討を行うことを最終目標とし、本報では稼働中の大規模倉庫等への実態調査及び大規模倉庫火災に対応した消防本部(局)へのヒアリングの調査結果を示す。

2. 大規模倉庫等の実態調査

大規模倉庫火災等の消火活動困難な火災に対応するための消火手法の研究開発を行うため、大規模倉庫等への視察、倉庫関係者へのヒアリング及び大規模倉庫火災に対応した消防本部(局)に対するヒアリングを行った。

2.1 調査対象及び調査方法

本調査では、表 2.1 に示す 5 事業者の 5 カ所の倉庫及びそれを管轄する 4 消防本部(局)に対して、各倉庫の視察、関係者へのヒアリングを行い、表 2.2 に示す内容を調査した。

表 2.1 実態調査を行った大規模倉庫等

名称	視察日	主な物品	管轄消防本部（局）
倉庫 A	2021年 6月11日	家具・文具	入間東部地区事務組合消防本部
倉庫 B	2021年 10月26日	紙・機械	東京消防庁
倉庫 C	2021年 10月29日	食料品	東京消防庁
倉庫 D	2021年 11月 5日	工具・材料	埼玉東部消防組合消防局
倉庫 E	2021年 12月16日	家具・文具	吹田市消防本部

表 2.2 調査方法及び内容

調査方法	調査内容
①大規模倉庫等への視察	<ul style="list-style-type: none"> ・倉庫の外部及び内部の構造について ・消防用設備等の維持状況について ・倉庫の使用状況について ・可燃物（物品、パレット等）の管理状況について
②倉庫関係者へのヒアリング	<ul style="list-style-type: none"> ・職員について（勤務人員、勤務状況等） ・倉庫の使用状況について ・可燃物（物品、パレット等）の管理状況について ・物流の流れについて
③管轄消防本部（局）へのヒアリング	<ul style="list-style-type: none"> ・建物の基本情報について（構造、階層、面積等） ・消防用設備等の設置状況について ・平面図、警防計画の閲覧 ・訓練の実施状況について ・大規模倉庫等の火災に対する意見交換

2.2 調査結果

2.2.1 視察倉庫で多く見られた部分

大規模倉庫等の実態調査で多く見受けられた部分を以下に示す。

①物品の収納・保管方法及び天井との隙間

物品の形状により保管方法は異なるが、主に段ボールに

保管されており、またフォークリフトを使用する倉庫において、段ボールに保管された物品の収納方法は、主に複数の段ボールをパレット（主に T11 型（W1100mm × D1100mm × H144mm）が使用されている。）に載せ、床に平置きまたは、ネステナー及びパレットラックに収納している事例が多く確認された（表 2.3、図 2.1）。

表 2.3 物品の収納方法に関する特徴

名称	耐荷重	主な積み方	特徴
平置き	1 t / 個	<ul style="list-style-type: none"> ・下段の荷重が静荷重（耐荷重の 2 ～ 4 倍程度）以下の範囲 ・2 ～ 3 段積みが多い 	<ul style="list-style-type: none"> ・コスト・スペースが最小限 ・荷崩れ防止のため、積み方の知識が必要
ネステナー	1 t / 段	<ul style="list-style-type: none"> ・1段1個ずつ ・上段高さ 4 m まで 	<ul style="list-style-type: none"> ・レイアウトの自由度が高い ・形状が決まっている
パレットラック	1 ～ 3.5 t / 段	<ul style="list-style-type: none"> ・オーダーメイド ・1段2個が多い ・上段高さ 6 m まで 	<ul style="list-style-type: none"> ・形状の自由度が高い ・床にアンカー固定が必要



図 2.1 物品の主な積み方の例 (左:平置き、中:ネステナー、右:パレットラック)

実態調査をした倉庫では、床に平置きまたはラック（ネステナーやパレットラック）で収納されている例が多数確認された。季節や社会的な需要の変化による物品の配置換えや搬出入を効率的に行うためのレイアウト変更等の柔軟な対応が必要となるためと推察される。

ネステナーとは、倉庫や工場などで使用されるスチール製の保管ラックのことをいい、1個あたりの高さは、1.2 m、1.4 m、1.7 m程度のもので使用されていた。種類として、物品を載せる部分が下部にある正ネステナーと上部にある逆ネステナーがあり、逆ネステナーが多く使用されていた。

パレットラックとは、大型のスチール製の保管ラックのことをいい、重量の物品の保管に多く用いられていた。

段ボールのパレットへの積み方は、すべて同じ方向に積んでいくブロック積みと段ごとに方向を変えて積んでいく交互列積みが多く、積み終わった段ボールをストレッチフィルムで巻いていることが多かった。

また、一つあたりの高さは、物品の大きさ・重さによって異

なる場合があるが、1～1.5 m程度のもが多く散見され、ネステナーとの間は、10～20cm程度の間隔が空いていた。この間隔は、フォークリフトでネステナー内に置く際、パレット下面が取り降ろし位置より10cm程度高くなるように持ち上げなければならないためであると推察される。

床に平置き及びネステナーの最上段に置かれた物品は、可能な限り天井付近にまで積み上げられていることが多く、物品上面と天井との隙間は、ほとんどが1 m程度であった。

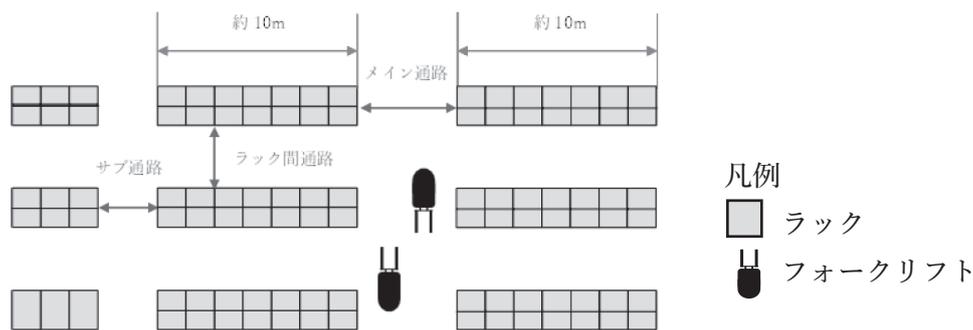
②天井の高さ

倉庫業者に対するヒアリング調査にて、床スラブから天井まで、おおむね5～7mの階高が多かった。（設計当初から物品の大きさを考えている階を除く。）

③通路幅員

実態調査を行った倉庫の通路幅員は、使用するフォークリフトや人の作業部によって、多少異なるものの、ほぼ同様の数値であった（表 2.4）。

表 2.4 通路幅員



通路区分	通路幅員
メイン通路	5 m以上
サブ通路	2.5 m～ 3 m
ラック間通路（フォークリフトが作業する部分）	2.5 m～ 3.5 m
ラック間通路（人が作業する部分）	0.8 m～ 1 m
連続するラック幅	10 m程度

メイン通路については、フォークリフト同士が行き交えるようになっており、サブ通路については、フォークリフトの旋回を含めた作業上必要なスペースを確保した幅となっていた。人が作業する通路幅については、主に小型の物品の出し入れがされており、作業上最低限の通路幅となっていた。

2.2.2 大規模倉庫等の実態調査から見えた課題

大規模倉庫等の実態調査を行った結果から大規模倉庫等の消防活動に関わる課題を警防活動と予防業務の観点で抽出した(表 2.5)。

表 2.5 大規模倉庫等の実態調査から見えた課題

警防活動	①開口部が少ない
	②屋外からの消火活動が困難
	③内部構造が複雑
	④常に大量の可燃物(物品、パレット等)を保管・集積
	⑤物品の把握が困難
予防業務	①使用形態の多様化
	②法令と革新技術との齟齬

2.2.2.1 警防活動

①開口部が少ない

倉庫は、物品の保管を目的として設けた建物であり、物流において品質管理の観点からトラックを横付けして物品の積み下ろしを行う階以外は、開口部が必要最低限となっており、消防法上の「無窓階」になることが多い。実際、視察を行った5件中、4件はすべての階が無窓階であり、残り1件も3階以上の階は無窓階となっていた。そのため、屋外からの注水等の消火活動及び屋内へのアクセスが困難な倉庫が多いと言える。

②屋外からの消火活動が困難

3階以上の階には、消火活動や救出活動の際に、屋外からの進入を容易にするための非常用進入口(建築基準法施行令第126条の6)または代替の開口部が設置されている。しかしながら、上記①に記述のとおり、今回視察した5件すべての3階以上の階が無窓階であったことに加え、大量のラック等により区画内部が迷路のように複雑となっていることから、火災が進行し、屋外からの消火活動となった場合、限られた開口部、かつ大量のラックやコンベアー等の物品を移動させるため設備機器(以下、「マテハン機器」)による散水障害により、出火区画中央部等への有効な注水ができないことが容易に想像できる。

③内部構造が複雑

大量のラックやマテハン機器の設置により、区画内部が迷路のように複雑化し、さらには区画免除による法令で定められている以上の大空間となることで、消火活動が困難となることが容易に想像できる。また、天井付近にまで物品が積み上げられていることや、大量の濃煙熱気の発生により、誘導

灯や誘導標識を容易に視認することが不可能であり、従業員の避難や消防隊の緊急退避に支障となるため、最悪の場合、死者が発生する恐れがある。

④常に大量の可燃物(物品、パレット等)を保管・集積

倉庫は、物品の保管を目的として設けた建物であるため、限られた収納スペースに大量の物品を保管するため、ラックやパレットに物品を天井付近まで積み重ねているのが現状である。また、物品を置いていない建物内外の空いたスペースに使用していない大量のパレットや折り畳みコンテナが集積し、高く積み上げられており、これらの可燃物による急激な延焼拡大や大量の濃煙熱気の発生が消火活動への困難性をさらに加速させていると言える。

⑤物品の把握が困難

倉庫における物品の保管の多くは、段ボールに梱包されているものがほとんどであり、さらにバーコードや登録番号等によるデータ管理が多いため、段ボール内に何の物品が入っているか即座に判別することは困難である。消防隊による消火活動は、燃焼物の種類によって有効な注水方法が異なり、また禁水性や自然発火性の危険物等の消火活動時に注意しなければならない物質があることから可燃物(物品、パレット等)の把握は重要である。このことから危険性を把握するうえでも可燃物の種類や数量、保管位置等の詳細な情報の把握ができないことが問題であると言える。

2.2.2.2 予防業務

①使用形態の多様化

近年、倉庫内では技術革新により、ロボット等による自動化が進んでおり、自動倉庫や高密度収納システム等の大型のマテハン機器及びプレハブの冷蔵冷凍倉庫などの設備・機器

が比較的容易に設置が可能であり、竣工時には想定していなかった設備・機器が次々使用されているのが現状である。管轄消防本部(局)へのヒアリングの際、竣工してから数か月後に訪れた際、竣工検査との状況の違いに困惑したと語っていた。

また、倉庫内をテナント貸ししている倉庫において、外観や名称は倉庫であるが、入居テナントの用途が倉庫以外の用途(ライブ会場、物品販売店舗等)で使用されている事案があったため、立入検査の際、聴取するだけでなく、インターネット等の情報も確認しているとのことであった。

②法令と革新技术との齟齬

技術革新により、大型マテハン機器等による倉庫内の自動化が進んでいくことで、生産性、安定性及び人手不足の改善が期待される。また、ネット通販等の需要拡大に伴い、効率的かつ、より多くの物品を保管できる高密度の大型自動倉庫を設置している倉庫が多く散見された。これら大型自動倉庫では、屋内消火栓設備の未警戒及び可動式のラックやローラーコンベア等による誘導灯の視認障害の発生が懸念される。

また、大型自動倉庫で火災があった場合、メンテナンスの

ための通路等が設けられているが、通常の通路に比べ、狭く複雑であるため、屋内消火栓設備のホースや消防隊のホースが機器の隙間に引っ掛かり、先に進めないことやノズルからの既定の圧力による放水ができないことも懸念される。

更には、機械による作業が主になると、階ごとの勤務人員が少なくなり、避難器具や放送設備等のハード面及び防火管理者や消防計画のようなソフト面で収容人員に依存する対策は、適用外となる場合が多くなる。倉庫内は、大空間、かつ段ボール等の吸音しやすいものが多いため、拡声器等での避難指示が聞こえづらいことから、放送設備は必要だと考える管轄消防本部(局)の担当者もいた。

3. 大規模倉庫火災に対応した消防本部(局)へのヒアリング調査

3.1 調査対象及び調査方法

本調査では、実際の大規模倉庫火災における問題点の抽出及び消火活動困難な火災に対応するための消火手法の研究開発を目的とし、消火活動に従事した消防本部(局)に対し、ヒアリングを行った(表 3.1、表 3.2)。

表 3.1 大規模倉庫火災に対応した消防本部(局)一覧

覚知日時	火災建物名称【所在】	管轄消防本部(局)
2017年 2月16日 9時14分	ASKULLogiPARK 首都圏 【埼玉県入間郡三芳町】	入間東部地区事務組合消防本部
2020年 4月30日 12時 8分	プロロジスパーク岩沼1 【宮城県岩沼市】	あぶくま消防本部
2020年 12月21日 7時48分	久和物流平出物流センター 【栃木県宇都宮市】	宇都宮市消防局
2021年 11月29日 8時55分	(株)日立物流関西メディカル物流センター 【大阪府大阪市】	大阪市消防局

表 3.2 調査方法及び内容

調査方法	調査内容
管轄消防本部(局)へのヒアリング	<ul style="list-style-type: none"> ・発災当時の建物の基本情報について(構造、階層、面積等) ・発災当時の消防用設備等の設置状況について ・発災当時の平面図、警防計画の閲覧 ・活動内容について ・対応した職員への当時状況の聴取について ・消防車両及び資器材についての意見交換

3.2 調査結果

3.2.1 活動時の状況

消防隊到着時点で、火勢が強く、防火シャッターが崩落するほど急激な延焼拡大していた事例が多かった。活動隊員からは、どんなに放水しても火勢が収まらないことや、濃煙熱気により視界は1m程度であったこと、活動時に恐怖を感じ

ていたことが共通して挙げられていた。

さらに、延焼拡大により高温の輻射熱や建物各部分の崩落・歪みが発生し、屋内での活動が非常に困難となり、一定距離離れた位置からのストレート注水となっていたが、黒煙等の噴出により、屋内の状況を視認しながらの注水は困難であった。

3.2.2 被害の少なかった事例

消防隊現着時、他の火災事例と同様、出火区画内は消防隊が進入できないほどに延焼拡大しており、隣区画の防火シャッター付近から火炎が噴出している状況であった。区画内部への注水が困難であったことから防火シャッターに対し、継続的な注水を実施したところ、防火シャッターは鎮火までの約 15 時間焼け落ちることはなかった。また、焼損面積は

区画とその付近のみと比較的少なく、鎮火までの期間もかなり短くなっていた。

3.2.3 大規模倉庫火災における問題点

大規模倉庫火災に対応した消防本部(局)へのヒアリング調査を行った結果、屋内と屋外での問題点を抽出した(表 3.3)。

表 3.3 大規模倉庫火災における問題点(屋内・屋外)

屋内	①大量のラックやコンベアー等のマテハン機器による活動障害
	②大量の可燃物(物品、パレット等)による燃焼の促進
	③防火シャッター等の作動不良による区画未形成
	④建物中心部の区画へのアクセスが困難
	⑤物品の把握が困難
	⑥黒煙による視界不良
	⑦屋根が高温により大きく湾曲し、屋内活動が危険
屋外	①長期にかけての活動になるため、大量の水源の確保が必要
	②開口部が少なく、限られた場所からの注水活動
	③注水方法がストレートのみ(熱気、飛距離等の都合上)
	④建物中央部にまで有効に注水できない

3.2.3.1 大規模倉庫火災における問題点(屋内)

①大量のラックやコンベアー等のマテハン機器による活動障害
大規模倉庫等の実態調査結果からもわかるとおり、大量の物品を保管・搬出するため、大量のラックやコンベアー等のマテハン機器が設置されている。屋内での消火活動において、このような大量のマテハン機器があることで、区画内が複雑化され、ホース延長や緊急待避等の障害となってしまうことが考えられる。

②大量の可燃物(物品、パレット等)による燃焼の促進
3 件の大規模倉庫火災とも消防隊が現着時には、すでに出火場所の区画内全体に火勢が広がっていた。対応した消防本部(局)へのヒアリングからも想像以上の早さの延焼拡大が起こっており、屋内進入が非常に困難な状況であった。このことからわかるとおり、出火場所付近の大量の可燃物(物品、パレット等)により、延焼が促進され、急激な延焼拡大につながったことが想像でき、消火活動の困難性が高いことが言える。

③防火シャッター等の作動不良による区画未形成
2017 年 2 月に発生した大規模倉庫火災後に行われた検討会の報告書にも記述されているが、延焼拡大した要因は、多くの防火シャッター等の作動不良によるとされており、他の 2 件についても同様に防火シャッターの作動不良が確認されて

いる。
また、隣接区画へ延焼拡大した部分で、防火シャッター自体が崩落している部分も確認されており、大量の可燃物による急速な火勢拡大で天井付近の温度がかなり高温になっていたことが推測できる。このような状況下における屋内での消火活動は、非常に危険であり、消火活動の困難性が高いと言える。

④建物中心部の区画へのアクセスが困難
上記①で記述したとおり、倉庫内部は大量のラックやマテハン機器が設置され、複雑化している。また、大規模倉庫火災に対応した消防本部(局)へのヒアリングから、火勢により物品が荷崩れし、それらを載せた樹脂製のパレットが溶け、大きな障害物となっていたことや、防火シャッターが崩壊している例が多く確認された。建物中心部で火災が発生した場合、迷路のように複雑化、かつ荷崩れした物品や防火シャッター等の大きな障害物により、消防隊のアクセスが非常に困難であると言える。

⑤物品の把握が困難
倉庫内の物品は、時間とともに大量に搬出入が行われており、またこれらの物品を決められた場所以外に一時的に置いている場合もあるため、すべての物品の正確な把握は不可能である。

物品は段ボールで保管されていることが多く、またバーコードや登録番号等、物品管理がデジタル化されているため、容易に把握することは困難である。

燃焼物ごとに最適な消火方法が異なるため、これらの早期の把握は消火活動において重要であると言える。

⑥黒煙による視界不良

大規模倉庫火災に対応した消防本部(局)へヒアリングを行った際、屋内は、大量の黒煙や濃煙熱気により、視界は1m程度であり、退路の確保をしなければ、要救助者になってしまう恐れが十分に考えられる状況であった。このことから、大量の黒煙の先でフラッシュオーバー等の急激な延焼拡大が起こった場合、緊急退避が遅れ、最悪の場合殉職者を出す可能性がある危険な環境であると言える。

⑦屋根が高温により大きく湾曲し、屋内活動が危険

3件の大規模倉庫火災とも、建物の屋根部分の崩落や柱・梁の歪みが発生していることが確認されている。また、3.2.3.1③で記述したとおり、防火シャッター自体が崩落するほど、建物内部はかなり高温になっていたことが推測でき、このような状況での消火活動は、極めて危険であり、困難性が高いと言える。

3.2.3.2 大規模倉庫火災における問題点(屋外)

①長期にかけての活動になるため、大量の水源地の確保が必要

3.2.3.1に記述したとおり、屋内進入しての消火活動は極めて困難であるため屋外からの消火活動を強いられている。また、限られた開口部からの注水となるため、大量のラックやコンベアー等のマテハン機器や大量の可燃物(物品、パレット等)に阻害され、直接火炎を狙うのが困難であることから長期にかけての活動となることが推測される。そのため、長期の消火活動を見越した大量の水源地の確保が必要となっている。

3件の大規模倉庫火災では、重機により新たな開口部を作ったことや放水塔車等の大流量放水が有効であったことが当該火災に対応した消防本部(局)のヒアリングから聴取でき、大型の開口部が早期に確保できれば、より早い消火につながる

可能性があると言える。

②開口部が少なく、限られた場所からの注水活動

3.2.3.2①で記述のとおり、倉庫は消火活動に有効な開口部が少なく、限られた場所からの注水となるため、筒先等の地上からの放水やはしご車等からの高所放水の場合、建物内部へ注水する場所・角度が限られてしまい、有効な注水は困難である。

③注水方法がストレートのみ(熱気、飛距離等の都合上)

3件の大規模倉庫火災に対応した消防本部(局)のヒアリングにより、外壁開口部等から噴出する大量の黒煙や火炎からの放射熱がひどく、建物外壁に近づいての消火活動が困難であったことが確認できている。本来、火災性状の変化に併せて、適した注水方法へ変えていかなければならないが、このような状況での注水は、飛距離及び風等の影響を考えると、ストレート注水のみとなってしまうことが懸念される。

④建物中央部にまで有効に注水できない

3.2.3.2①、②で記述したとおり、注水において、限られた開口部、かつ建物内部には大量のマテハン機器や大量の可燃物(物品、パレット等)等の障害となるものが多く存置されているため、屋外からの放水による建物中央部への注水は困難であると言える。また、火災が進行すると大量の可燃物や防火シャッター等の崩落により、さらに困難性は増すことが容易に想像できる。

3.2.4 消防隊員からの要望

倉庫火災に関し、消防隊員からいくつかの要望が出された(表3.4)。そのうち、警防活動に関しては、鎮火まで長時間を要した経緯とより安全な消火活動を前提に、燃烧区画内の状況を把握でき、かつ区画内を効率的に放水できる機構(装置、システム)の開発を求める要望が最も多かった。

4. まとめ

倉庫の形態・取扱物品は、地域及び企業によって様々であるが、主に物品の梱包用段ボール、木製または樹脂製のパレットが調査で行ったすべての倉庫で使用されており、倉

表 3.4 倉庫火災に対応する消防隊員からの要望(警防・予防)

警防活動	屋内放水時に内部状況が確認できる機構
	無人で火災室内を放水できる遠隔操作資機材(機構)
	梯子車の場合、上階開口部から筒先を入れて放水できる機構
	外壁や換気口等から突き刺して放水できる機構
	屋内進入した隊員の状況を指揮本部で確認できる機構
予防業務	建物の形状に応じたガイドライン
	スプリンクラー設備や連結散水設備の設置
	放送設備の設置(大空間、かつ段ボール吸音効果への対策)

庫内の代表的な可燃物として挙げられる。

大規模倉庫火災での問題点は、開口部が少ないことや大量の可燃物の存在など、稼働中の倉庫の問題点と共通する部分が多くあり、これらは倉庫火災全体の問題点であると言える。

倉庫火災の特徴として、隣接区画へ延焼すると、大量の可燃物(物品・パレット等)により火勢が増し、屋外からの活動を余儀なくされ、次第に消防力は劣勢となることが過去の火災事例からも明らかとなっている。被害の少ない事例を参照すると、隣接区画への延焼を阻止することにより、焼損面積が最小限、かつ鎮火までの期間を大幅に短縮できたことから、消防隊員が屋内進入して直接放水できる場合を除き、法令で定められる耐火時間内(1時間以内)での火災抑制するための手法、もしくは隣接区画への延焼防止対策が必要と考えられる。

また、消防隊員からの要望から屋外等から火災区画内の燃焼状況を把握でき、非常用進入口等から屋内進入せず、遠隔で燃焼物に対して直接放水できる機構(装置、システム)

開発や、また高発泡泡による冠泡消火の適用等、火災状況に合わせた複合的な消火戦術の確立が望まれる。

引き続き、大規模倉庫火災等に対応するための消火手法の研究開発を進め、消火戦術の提案を行う予定である。

参考文献

- 1) 総務省消防庁:消防白書、平成元年版-令和4年版、1989-2022、
<https://www.fdma.go.jp/publication/#whitepaper> (参照日2023年1月)
- 2) 国土交通省:建築・住宅関係統計データ、平成元年版-令和3年版、1989-2021、
https://www.mlit.go.jp/statistics/details/jutaku_list.html (参照日2023年1月)
- 3) あなたの静岡新聞:昨年7月5日未明に発生火元確認中に爆発音と爆風、2021
<https://www.at-s.com/news/shittoko/883194.html> (参照日2023年1月)

Research and Development of Firefighting Techniques against Difficult Fires

~Field Survey on Large-scale Warehouse Fires~

(Abstract)

Yuta Takahashi, Hiroyoshi Naito and Hisanori Amano

(Accepted July 6, 2023)

With the growing demand in the logistics industry, the number and the scale of the warehouses are increasing. The occurrence of fires in large-scale warehouses, including fatal cases, is also increasing.

Once a warehouse fire breaks out, a large amount of smoke and heat is generated, causing the fire to spread rapidly. This blocks the firefighters from entering inside, leading to prolonged firefighting activities.

Large-scale warehouse fires result in significant social and environmental impacts on the surrounding areas, as well as enormous economic losses due to disruption of supply chains.

This paper reports on a field survey of large-scale warehouse fires, and identifies relevant problems and challenges.

技術報告

広域版地震被害想定システムへの機能追加を目的として構築した延焼被害推定手法による焼損棟数の計算結果と実被害の比較

高梨 健一、細川 直史

(令和5年7月7日 受理)

我々は、消防庁が大規模地震災害発生直後に行う緊急消防援助隊に関する業務に資することを目的として、消防研究センターの開発した広域版地震被害想定システムに対して新たに火災被害の推定項目を盛り込むため、大規模地震の被害想定によく用いられている延焼クラスタ方式の考え方を応用して、地震発生直後に広域の被害を推定する手法について検討してきた。

本報では、これらの手法の有効性を検証するため、平成7年(1995年)兵庫県南部地震当時の神戸市の地図データから延焼クラスタを構築し、実被害との比較を行った内容について報告する。

1. はじめに

我々は、消防庁が大規模地震災害発生直後に行う緊急消防援助隊に関する業務に資することを目的として、消防研究センターの開発した広域版地震被害想定システム¹⁾に火災被害の推定項目を盛り込むため、大規模地震の被害想定によく用いられている加藤らの延焼クラスタによる地震火災リスクの評価手法²⁾(以下、従来手法という)の考え方を応用して、地震発生直後に広域の被害を推定する手法について検討してきた^{3,4)}。

既報³⁾では従来手法を広域版地震被害想定システムのメッシュ方式に適合させた高速な計算手法を提案しており、既報⁴⁾では有向連結グラフを利用して従来の延焼クラスタの計算では対応していなかった片方向の延焼に対応できるよう延焼クラスタの構築手法およびリスク計算手法を拡張するとともに既報³⁾同様に広域版地震被害推定システムに適合させた計算手法について提案したところである。

従来手法や我々の提案する手法により算出される焼損棟数は火災の様々な発生状況を確率的に計算した平均的な結果と捉えられるのに対し、実際に発生した被害はそれらの発生状況のうちの一つと考えられる。

そのため、焼損棟数の計算結果と実被害を単純に比較できるものではないが、これらの手法の有効性を検証する一つの材料とするため実被害との比較を試みることにした。

本報では、平成7年(1995年)兵庫県南部地震を対象として、これまで検討してきた計算手法により焼損棟数を求め、実被害との比較を行った内容について報告する。

2. 従来手法および既報における提案手法の概要

本節では、理解の一助とするため従来手法および既報における提案手法、更にそれらを広域版地震被害想定システムに適用させた計算方法の概要を簡単に示す。

2.1. 従来手法

従来手法の計算フローを図1に示す。従来手法では、火災が発生した場合に相互に延焼被害を及ぼす可能性のある建物群(これを「延焼クラスタ」と呼ぶ)を考え、延焼クラスタに含まれる少なくとも一つの建物から出火した場合には当該クラスタに含まれるすべての建物に延焼するものとして焼失棟数を計算する。

延焼クラスタを作成するためには、建物が相互に延焼被害を及ぼすか否かを決定する必要があり、加藤らは建物の隅角部や壁面の座標情報を用いて建物間の最短距離を求め、延焼限界距離と比較することで延焼被害を及ぼすか否かを決定している。このとき、延焼限界距離が異なる建物間では双方の延焼限界距離の平均値が建物間の最短距離よりも大きい場合に延焼被害を及ぼすものとしている。また、加藤らは形態係数の計算に基づいて複数の建物が同時に炎上した場合の影響を補正する係数を1.5と定め、各建物の延焼限界距離を1.5倍した値を複数棟同時炎上時の延焼限界距離として用いている。

なお、延焼クラスタの作成方法には、加藤らの方法の他に建物周辺に延焼限界距離の半分のバッファを発生させ、バッファが重なる建物間では相互に延焼被害を及ぼすものとみなして延焼クラスタを作成する手法があり、この手法も良く用いられている。図2に、この手法により構成された例⁵⁾を示す。

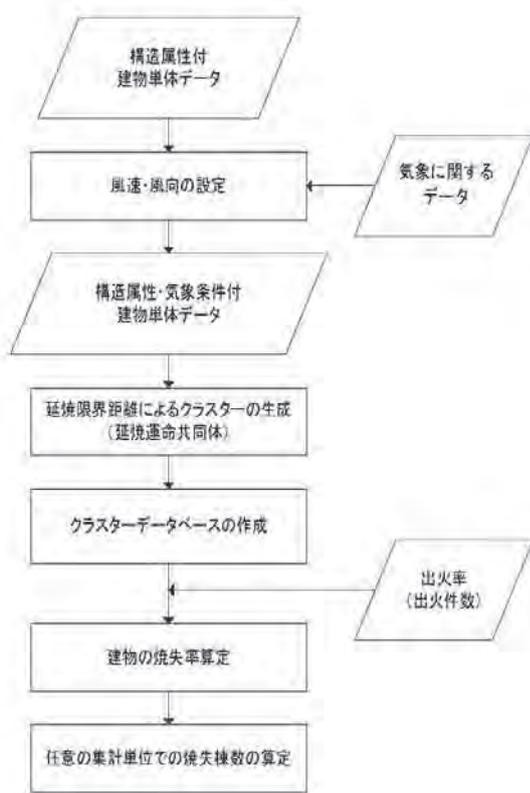


図 1 従来方式の計算フロー²⁾

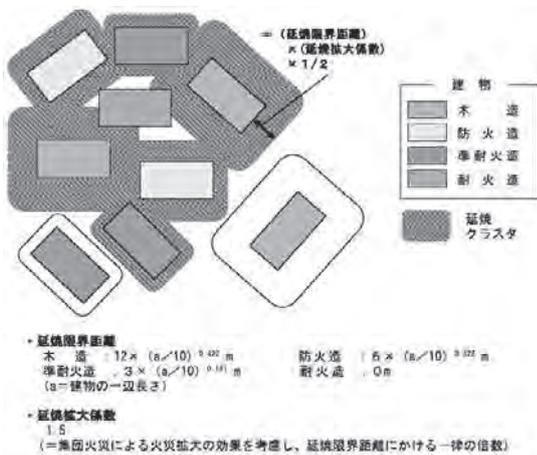


図 2 延焼クラスタの作成例 (参考文献⁵⁾ から引用)

従来手法では、このようにして構成された延焼クラスタに含まれる建物に対して個別の出火率が与えられた際に、延焼クラスタ内から少なくとも 1 棟が出火する確率を求め、その確率を延焼クラスタ全体の焼失率とする。例えば、ある延焼クラスタを構成する建物を n 棟、延焼クラスタに属する建物 i の出火率を p_i とすると、建物の焼失率 P は、次のようになる。

$$P = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - p_i) \quad (1)$$

なお、ある範囲に含まれる建物の焼失棟数の期待値 χ は、範囲内の建物 k の焼失率を用いて、

$$\chi = \sum P_k \quad (2)$$

と表される。

2.2. 従来手法を広域版地震被害想定システムに適合させ高速化した計算方法

この計算方法は、筆者らが既報³⁾において従来手法を広域版地震被害想定システムのメッシュ計算に適合させ高速化した計算方法である。

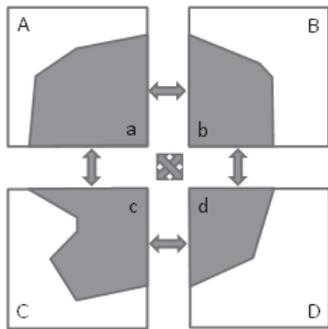
前節で述べたように加藤らの手法を用いて延焼クラスタ方式により焼失棟数の算定を行う場合には、風向・風速に基づいて延焼限界距離を算出して延焼クラスタを作成し、地震動等から算出される出火率に基づいて延焼クラスタの焼失率を求め、求められた焼失率を用いて焼失棟数を求めることとなる。しかしながら、大規模地震発生後に多数の建物から延焼クラスタを速やかに計算することは困難であるだけでなく、焼失率の計算も詳細に行くと時間を要することとなる。そのため我々は、延焼クラスタの作成など時間のかかる計算を事前に済ませておくほか、出火率については震度毎の代表値を事前に決定して用いることで、地震発生後に計算結果を出力するまでの時間の短縮を図った。

また、広域版地震被害想定システムでは、表層地盤の最大速度や火災件数をメッシュごとに計算するとともに、計算結果をメッシュ表示することができるため、焼失率および焼失棟数の計算をメッシュ計算に対応させた。

計算方法をメッシュ計算へ対応させる方法としては、メッシュごとに風向、風速に応じた部分的な延焼クラスタを作成しておくこと、また、複数のメッシュに跨る延焼クラスタに関する計算は地震発生直後に各メッシュに割り当てられた風向、風速条件に応じて事前に把握しておいた部分的な延焼クラスタ間での延焼の有無に関する情報を用いて行うこととした。

図 3 に延焼クラスタをメッシュに合わせて分割して作成する場合のイメージを示す。図 3 (1) のように 4 つのメッシュ A, B, C, D においてそれぞれ 4 つの部分的な延焼クラスタ a, b, c, d が作成されたとき、矢印で示した部分的な延焼クラスタの間の延焼の有無を示す情報から、図 3 (2) の一つの延焼クラスタを再現することを考える。

そして、このように部分的な延焼クラスタの統合が可能な場合、図 3 (2) の延焼クラスタの焼失率 P および焼失棟数 χ は式 (3), (4) に示すとおり、部分的な延焼クラスタの建物数や出火率で表すことができ、メッシュごとに焼失棟数を集計するために必要な部分的な延焼クラスタの焼失棟数も計算できる。



(1) 4つの隣接メッシュで作成される部分的な延焼クラスタ



(2) 本来作成されるべき延焼クラスタ

図 3 延焼クラスタの分割イメージ³⁾

$$\begin{aligned}
 P &= 1 - \prod_{i=1}^n (1 - p_i) \\
 &= 1 - \prod_{j=1}^{n_a} (1 - p_{a_j}) \times \prod_{k=1}^{n_b} (1 - p_{b_k}) \\
 &\quad \times \prod_{l=1}^{n_c} (1 - p_{c_l}) \times \prod_{m=1}^{n_d} (1 - p_{d_m}) \tag{3}
 \end{aligned}$$

ここで、

n_a, n_b, n_c, n_d : 部分的な延焼クラスタ
a,b,c,d に属する建物数

$p_{a_j}, p_{b_k}, p_{c_l}, p_{d_m}$: 部分的な延焼クラスタ
a,b,c,d に属する建物の出火率

$$\begin{aligned}
 \chi &= \sum P_k = \sum P = \sum_{i=1}^n P = nP \\
 &= (n_a + n_b + n_c + n_d)P \\
 &\quad = n_a P + n_b P + n_c P + n_d P \\
 &= \chi_a + \chi_b + \chi_c + \chi_d \tag{4}
 \end{aligned}$$

ここで、

$\chi_a, \chi_b, \chi_c, \chi_d$: 部分的な延焼クラスタ a,b,c,d における焼失棟数

これらの検討を踏まえ、事前計算では、次の事項を計算している。

- (1) メッシュごとの部分的な延焼クラスタの計算と延焼クラスタデータベースの作成
- (2) 隣接する二つのメッシュに属する部分的な延焼クラスタ間での風向・風速に応じた延焼の有無のデータ作成
- (3) 震度ごとの出火率の事前決定
- (4) 延焼がメッシュ内にとどまる延焼クラスタに対する焼失棟数の計算と延焼クラスタデータベースの修正

また、事後計算では、事前計算で作成した延焼有無のデータをメッシュ ID, クラスタ ID, 風向, 風速の 4 つ組をキーとして検索を繰り返し、延焼クラスタデータベースのデータを組み合わせて延焼クラスタを再構築した後、各クラスタの焼失棟数を計算し、それぞれのメッシュにおける焼失棟数を集計している。

2.3. 片方向延焼を考慮した延焼クラスタの構築手法およびリスク計算手法

2.1. 節でも触れたとおり、従来方式では、隣接する 2 棟の延焼限界距離を計算し、その平均値が 2 棟の隣棟間距離よりも大きな場合に相互に延焼すると判断している。しかし、実際の市街地火災では、気象条件次第で 2 棟のうちの一方からのみ延焼する状況が起こり得ると考えられたことから、延焼被害を及ぼす関係を有向グラフとして取り扱い、その強連結成分として延焼クラスタを構築することとしたのが、既報 4) で提案したこの手法の特徴である。

例えば、図 4 (1) のように建物が配置され、各建物の周辺に延焼限界距離の範囲が設定されたと仮定すると、延焼限界距離の範囲内にある隣接建物へ延焼するものと判断することにより図 4 (2) のように建物間に有向延焼リンクを設定することができ、建物をノードに置き換えることで図 4 (3) のような有向グラフを作成することができる。

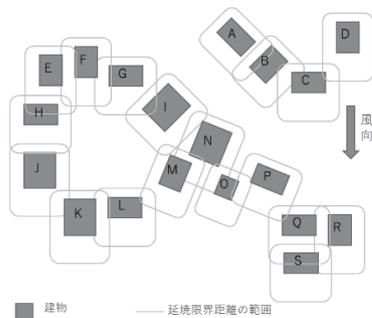
有向グラフにおいて相互に行き来することができるノードの集合を強連結成分と呼び、有向グラフから強連結成分を求める計算を強連結成分分解と呼ぶが、この手法では強連結成分分解を施して強連結成分としてまとめられた建物群を延焼クラスタとしている。なお、周辺の建物との間で延焼することも延焼させることもない単独の建物は、有向グラフを構成できず強連結成分分解の対象とはならないが、その建物のみで一つの延焼クラスタとして取り扱う。

例えば、図 4 (3) の有向グラフに強連結成分分解を施すと、図 5 (1) のように分解することができ、19 棟の建物が 11 個の延焼クラスタを構成することとなる。さらに、このようにして計算された延焼クラスタを一つのノードに置き換えることも

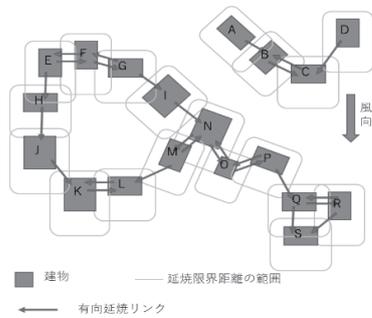
に、延焼クラスタ間のリンクを整理すると、図 5 (2) の延焼クラスタの有向非巡回グラフが得られる。

この手法ではあるクラスタとその上流にあたるクラスタの少なくとも 1 棟から火災が発生すると当該クラスタは全焼すると考えるが、延焼クラスタの焼失率および焼失棟数の計算にあたって他の延焼クラスタとの関係を考慮する必要があるため、非巡回有向グラフに対してトポロジカルソートを行って計算順序を決定している。

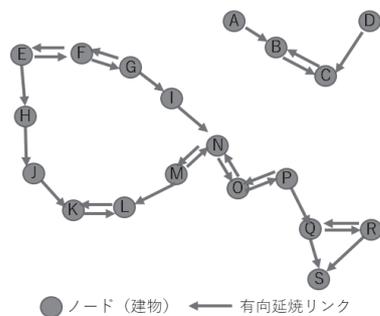
以後の詳細は省略するが、この手法では、決定された計算順序に従って各クラスタの上流に存在する延焼クラスタを把握する計算を行い、各延焼クラスタに属する建物の出火率から各延焼クラスタの焼失率および焼失棟数を計算することとしている。



(1) 建物と延焼限界距離の例



(2) 建物間の延焼被害を及ぼす関係



(3) 建物間の延焼被害に関する有向グラフ

図 4 建物間の延焼被害に関する有向グラフの作成方法⁴⁾

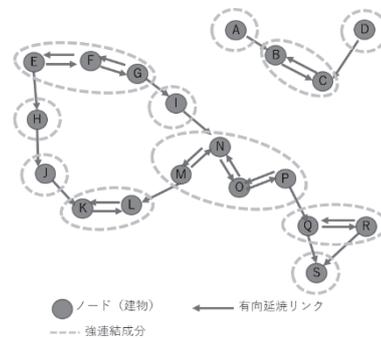
2.4. 片方向延焼を考慮した手法を広域版地震被害想定システムに適合させ高速化した計算方法

この計算方法は 2.3. で述べた手法を広域版地震被害想定システムに適合させた計算方法であり、2.2 の計算方法同様の方針で構築したものである。

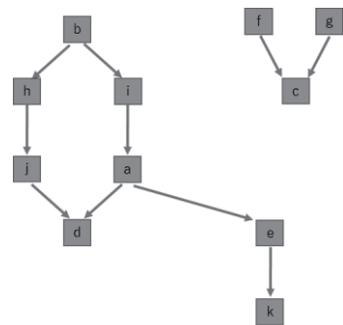
この計算方法では、事前計算として次の (1) から (4) の計算を行っているが、それぞれ 2.2. の方法の事前計算を片方向の延焼に対応できるように拡張したものである。

- (1) メッシュごとの部分的な延焼クラスタの計算と延焼クラスタデータベースおよびメッシュ内での部分的な延焼クラスタ間の延焼に関するデータの作成
- (2) 隣接する二つのメッシュに属する部分的な延焼クラスタ間での延焼の有無を示すデータの作成
- (3) 震度階級に対応する出火率等の事前決定
- (4) 延焼がメッシュ内にとどまる延焼クラスタの焼失棟数の計算と延焼クラスタデータベースの修正

また、事後計算では、次の (1) から (6) の計算を行っている。概ね 2.3. の手法に則っているが、この計算方法では風向風速条件ごとに各メッシュ単位で部分的な延焼クラスタを事前計算しているため、異なるメッシュに属する複数の延焼クラスタ間で延焼が発生する場合、それらの延焼クラスタ



(1) 強連結成分分解による延焼クラスタの作成



(2) 延焼クラスタの有向非巡回グラフ

図 5 延焼クラスタの有向非巡回グラフの作成⁴⁾

間での延焼被害を及ぼす関係を用いて有向グラフを構築すると新たにループが形成されてしまう可能性がある。このような状況を解消するため、(3) の計算として、入力された風向風速条件に従って構成した延焼クラスタの有向グラフに再び強連結成分分解を施して、強連結成分となるような延焼クラスタのグループ(暫定クラスタ)を把握してから計算を行っている。

- (1) 風向風速条件に基づく部分的な延焼クラスタおよび部分的な延焼クラスタ間の延焼に関するデータの読込
- (2) 延焼クラスタの有向グラフの構築
- (3) 強連結成分分解の実施と暫定クラスタへの置き換え
- (4) 焼失率および焼失棟数の計算
- (5) 暫定クラスタを構成する各延焼クラスタにおける焼失棟数の計算
- (6) メッシュごとの焼失棟数の集計

3. 平成 7 年 (1995 年) 兵庫県南部地震を対象とした検証

近年、大規模地震時に多数の大規模火災が発生した事例としては平成 7 年 (1995 年) 兵庫県南部地震と平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震が良く知られているが、平成 7 年 (1995 年) 兵庫県南部地震は都市直下型地震であり、数十 cm の津波の報告があったものの被害はなかった⁶⁾ことから、発生した地震火災も津波の影響を受けていないものと考えられる。それに対して、平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋地震では、発生した住宅火災や大規模な市街地延焼

につながるような火災は倒壊家屋のガレキから出火した火災や漂着ガレキ (車両を含む) から出火し建物に延焼した火災が大半を占めている⁷⁾とされている。検討してきた手法は津波による漂着ガレキの影響を考慮していないことから、検証の対象として平成 7 年 (1995 年) 兵庫県南部地震を選び、データ作成および計算結果との比較検証を行った。

3.1. データ作成

2.2. および 2.4. で述べた既報の 2 つの計算方法 (以下、2.2. の方法を「方法 1」、2.4. の方法を「方法 2」という) について検証するため、地震発生当時の建物データを用いて各種データを作成した。なお、実被害との比較には 1 つの気象条件のみのデータを作成すれば十分ではあるものの、我々の計算方法では計算に要する時間が作成するデータベースのサイズに依存することから、計算時間が実利用可能な範囲に収まるものか確認するため、実際に準備する可能性のあるデータと同等のデータを準備することとして、複数条件に対応できるデータを作成した。利用した建物データとメッシュの設定状況を図 6 に示す。

(1) メッシュ

計算に用いるメッシュは、広域版地震被害想定システムで用いている 1km メッシュおよび 250m メッシュと同じメッシュを、1km メッシュについては神戸市全域を包含する矩形の範囲に、250m メッシュについては長田区を包含する矩形の範囲にそれぞれ設定した。1km メッシュの個数は南北方向 17

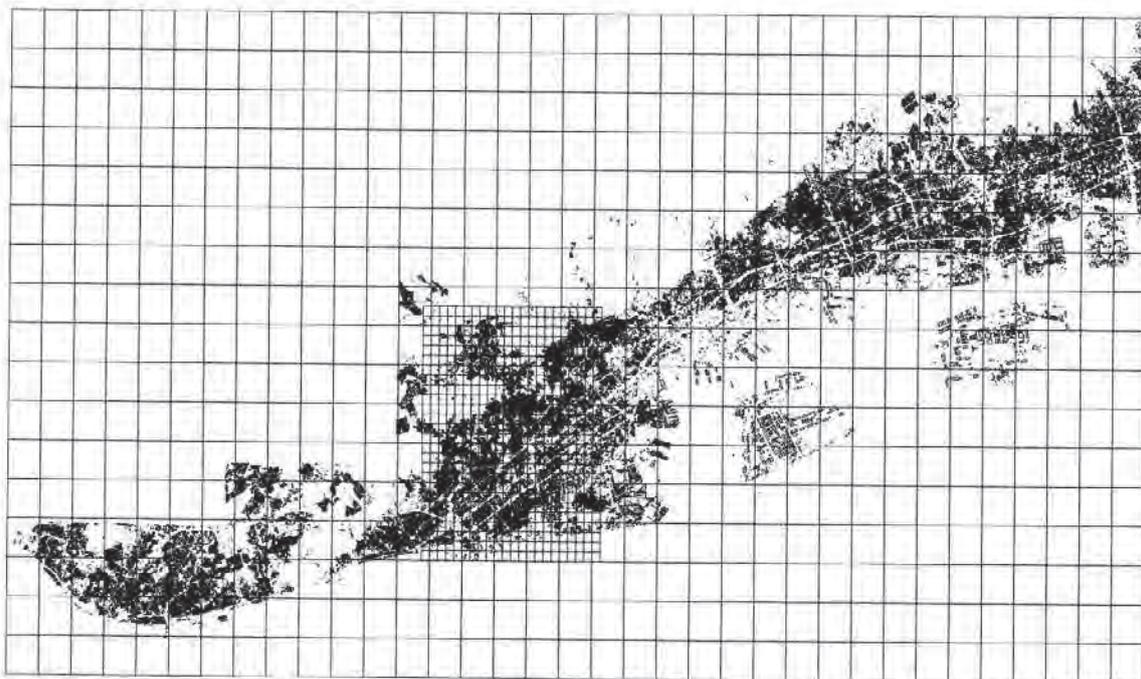


図 6 利用した建物データと設定したメッシュ

メッシュ (X=01～17)、東西方向 35 メッシュ (Y=01～35) の計 595 メッシュである。また、250m メッシュの個数は南北方向 26 メッシュ (X=01～26)、東西方向 22 メッシュ (Y=01～22) の計 572 メッシュである。以後、XY を並べた 4 桁の数字を用いて、それぞれのメッシュ ID を表すこととする。

(2) 延焼クラスタの作成対象とした建物

それぞれの方法の事前計算において延焼クラスタを作成する際、建物データのうち堅ろう建物を耐火造建物と仮定して作成対象から除外するとともに、普通建物を防火木造建物と仮定して延焼クラスタの作成対象とした。

(3) 風向風速条件と延焼限界距離

延焼クラスタを作成する風向風速条件は、風向 8 種類 (北、北東、東、南東、南、南西、西、北西)、風速 3 種類 (0.6, 1.2m/s) とした。延焼限界距離には既報 3,4) と同様に東京消防庁によって開発された延焼速度式⁸⁾により 1 時間で延焼する距離を風速に応じて風上、風横、風下の 3 方向について求めて用いることとし、加藤らの手法で用いられているような複数棟炎上を考慮した延焼限界距離の補正は行わないこととした。なお、今回利用した延焼速度式は、(5)、(6) 式で与えられており、風上、風横方向の延焼速度は、風下方向の延焼速度の定数倍で与えられることとなっている。風速 0m/s の場合、延焼の方向による延焼速度に違いがないことも考えられるが、今回はこの式をそのまま利用することとした。

延焼速度式

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{(風下方向)} \quad V_d = \frac{d}{106.7e^{0.363d}} \cdot r(v) \\ \text{(風横方向)} \quad V_s = 0.84V_d \\ \text{(風上方向)} \quad V_u = 0.73V_d \end{array} \right. \quad (5)$$

風速補正式

$$r(v) = 0.048v + 0.822 \quad (6)$$

(4) 震度分布データ

平成 7 年 (1995 年) 兵庫県南部地震は自治体震度計の整備が行われる以前の地震であり、広域版地震被害想定システムでの面的な震度分布の計算結果は無い。そのため、計算に用いる震度分布については、様々な分析や作図が行われている中から藤本らの作成した震度分布図⁹⁾を選び、広域版地震被害想定システムのメッシュをディスプレイ上で重ね合わせ、それぞれのメッシュにおいて各震度階級の占める面積を目視で読み取り、平均値を算出して作成した。作成した震度分布のデータを図 7 に示す。

(5) 出火率データ

震度階級に対応する防火木造建物の出火率については、既報 3,4) と同一の値を利用した (表 1 参照)。

3.2. 計算結果

3.1. で作成した各種データを用いて、2 種類の計算方法により焼損棟数を計算した。風向・風速については、地震発生直前の平成 7 年 1 月 17 日午前 5 時の神戸海洋気象台の観測記録¹⁰⁾ (東北東の風、2.1m/s) を参考に、延焼クラスタの作成条件 (24 条件) から最も近い条件と考えられる北東の風 0m/s をすべてのメッシュに適用して計算に用いた。

(1) 計算方法による計算結果の違い

ノート PC (Intel Core i7-5600U 2.6GHz, 8GB メモリ) 上で方法 1、方法 2 の 2 種類の方法について、それぞれ 1km メッシュと 250m メッシュの場合の計算を行った。計算に要した時間は、合計 4 種類の計算のいずれも 9 秒程度であった。このことから、少なくとも今回データを準備した範囲程度の計算であれば、震度情報の入手後、直ちに推定結果を示せることが判った。

また、1km メッシュの作成範囲全体での焼損棟数は、方法 1 では 58,029 棟、方法 2 では 56,198 棟となった。また、250m メッシュの作成範囲全体での焼損棟数は、方法 1 では 31,502 棟、方法 2 では 30,732 棟となった。どちらも方法 1 のほうが焼損棟数は多くなった。また、これら焼失棟数の値は実際の延焼被害 (7,574 棟) を大きく上回った。原因として、消防活動等の影響のほか、与えた出火率と各建物の建物数から計算される対象地域内の出火件数が約 232 件となり実際の神戸市内における地震発生当日の建物火災出火件数 (103 件¹¹⁾) の 2.3 倍となったことから、計算に用いた出火率の影響が考えられる。

また、1km メッシュで計算した結果について、表 2 にメッシュごとの焼損棟数の集計結果一覧を、図 8 に各メッシュの焼損棟数の集計結果、集計結果の差分値および増減率のグラフをそれぞれ示す。また、250m メッシュで計算した結果について、表 3 にメッシュごとの焼損棟数の集計結果一覧を、図 9 に各メッシュの焼損棟数の集計結果、集計結果の差分値および増減率のグラフをそれぞれ示す。なお、これらの表およびグラフでは、防火木造として取り扱う建物が存在しないメッシュは省略した。

図 8 および図 9 のグラフのうちメッシュごとの集計結果のグラフと集計結果の差分値のグラフを比較すると焼損棟数の差分の絶対値が大きくなるメッシュはもともと焼損棟数が多いメッシュであることが多い。また、図 8 および図 9 のグラフのうち集計結果の差分値のグラフと集計結果の増減率のグラフを比較すると、増減率が大きく変化したメッシュは、焼損棟数の差分の絶対値が大きくなるメッシュと若干ずれた位置に出現している。

各延焼クラスタの焼損棟数は、各延焼クラスタの建物数と焼失率の積で表されるが、焼失率は出火率と建物数の関数であり、建物数が多くなればなるほど焼損棟数の計算結果もより大きくなる。そのため、メッシュ内に多くの建物が属する

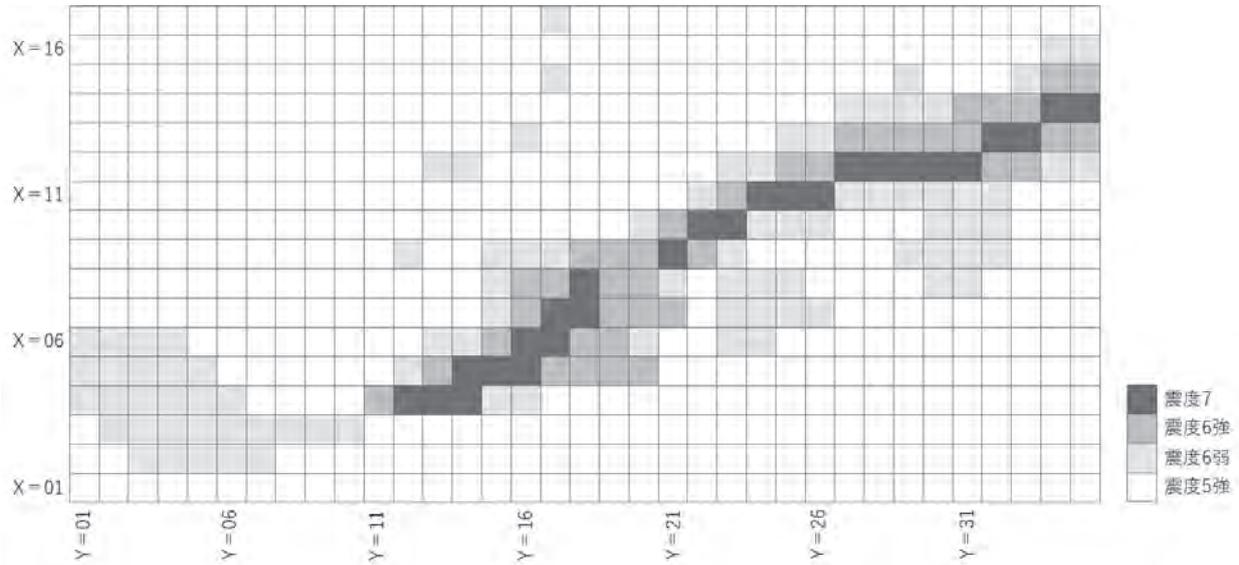


図7 入力として与えた震度分布データ
(上)1km メッシュ
(左)250m メッシュ

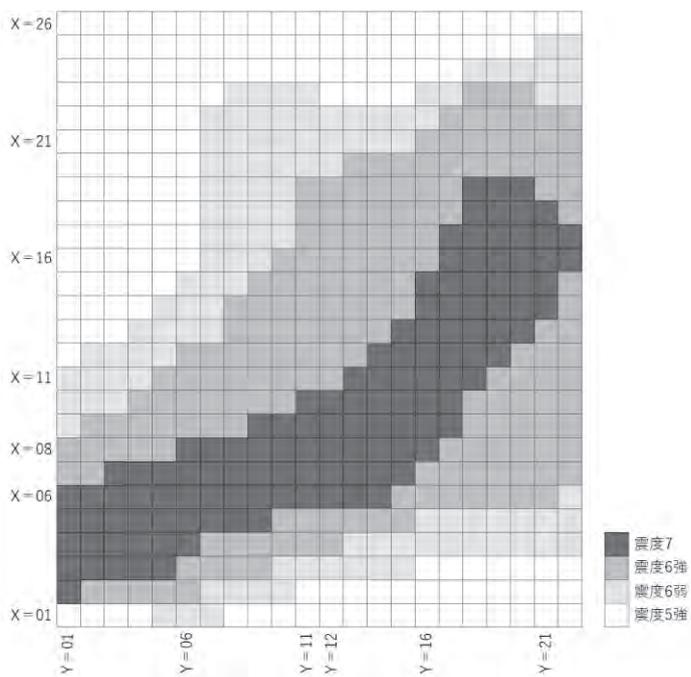


表1 震度階級に対応させる出火率

震度階級	震度階級ごとの出火率	震度階級	震度階級ごとの出火率
0	0.00000	5 弱	0.00000
1	0.00000	5 強	0.00011
2	0.00000	6 弱	0.00049
3	0.00000	6 強	0.00117
4	0.00000	7	0.00240

延焼クラスタが存在する場合に、クラスタ作成方法が異なることで延焼クラスタのサイズおよび構成が変わる影響がより顕著に表れているものと考えられる。

なお、これら焼損棟数の差分の絶対値が大きくなったメッシュの焼損棟数の増減率はさほど大きくなっておらず、これらのメッシュの計算結果が全体の集計値に与える影響は大きくないものと考えられる。

また、図8および図9のグラフのうち増減率のグラフだけに注目すると、多くのメッシュで100%を超える結果となっている。

方法1と方法2を比較すると、仮に隣接する建物 a, b が火災になった際の延焼限界距離を d_a, d_b とし、 $d_a > d_b$ と仮定した場合、2棟の隣棟間距離 d に応じた延焼クラスタの作成状況との関係は図10のように整理される。方法1では双方の建物の延焼限界距離の半分に設定した範囲が重なること、すなわち $d_a/2 + d_b/2 \geq d$ を条件として相互に延焼するか否かを判定しているため、 $d_a/2 + d_b/2 < d$ かつ $d \leq d_a$ となる場合には本来は建物 a から建物 b への延焼が発生するにも関わらず延焼の影響は計算されないこととなり、また、 $d_a/2 + d_b/2 \geq d$ かつ $d > d_b$ となる場合には建物 a からの延焼しか起きないにも関わ

らず方法 1 では相互に延焼することとして計算が行われてしまうこととなる。このことは、前者の場合は方法 1 に比べて方法 2 のほうが想定される焼失棟数が増加し、後者の場合は方法 1 に比べて方法 2 のほうが想定される焼失棟数が減少することを意味している。

このことから、今回の計算結果では、方法 1 で 1 個の延焼クラスタとなる建物群が方法 2 では片方向延焼する複数の延焼クラスタに分けられる場合の影響が、方法 1 で延焼しないと判断される延焼クラスタが方法 2 では片方向延焼すると判断される場合の影響よりも多くなり、その影響で相対的に

表 2 1km メッシュで計算した場合の各メッシュの焼損棟数集計結果一覧

MESH	方法1	方法2	MESH	方法1	方法2									
0105	0.0020	0.0020	0512	5.6879	5.6879	0813	13.0357	12.4647	1025	0.1089	0.1069	1233	37.8457	37.8182
0202	0.0001	0.0001	0513	657.5667	657.1937	0814	0.5255	0.5148	1026	0.0548	0.0548	1234	0.4447	0.4397
0203	15.4977	12.5169	0514	1472.6742	1493.0487	0815	109.1139	108.5680	1027	0.0030	0.0030	1235	0.4192	0.4192
0204	76.3210	62.2363	0515	1682.3860	1590.6183	0816	1141.3550	1084.8376	1028	0.0004	0.0004	1323	0.0034	0.0034
0205	112.1774	73.8748	0516	2123.5052	2037.9070	0817	1890.1140	1869.2041	1029	0.0155	0.0162	1324	65.4683	35.2397
0206	479.6435	475.1726	0517	1217.4369	1220.5958	0818	1738.0894	1739.5013	1030	0.0229	0.0229	1325	1070.0666	855.4119
0207	405.0523	403.0878	0518	480.1593	443.1794	0819	323.5157	305.0765	1031	0.1511	0.1511	1326	125.7313	104.9704
0208	5.3788	5.3769	0519	378.6574	333.7831	0820	46.1243	46.0085	1032	0.1426	0.1407	1327	593.8706	642.2560
0209	0.0001	0.0001	0520	6.1279	5.8651	0821	0.2866	0.2866	1033	0.2277	0.2277	1328	263.3742	247.9187
0301	0.6717	0.6717	0521	0.0341	0.0340	0822	0.0082	0.0081	1112	0.0238	0.0238	1329	71.8922	70.4807
0302	68.9040	69.1016	0523	0.0003	0.0003	0823	0.0311	0.0311	1113	0.3764	0.3764	1330	64.6506	57.9121
0303	36.5279	29.6160	0524	0.0001	0.0001	0824	0.0781	0.0786	1114	0.0844	0.0847	1331	543.9520	579.9977
0304	124.5959	117.2151	0526	0.0010	0.0010	0825	0.0326	0.0326	1116	0.0002	0.0002	1332	320.6909	319.8220
0305	179.4900	157.8933	0607	0.1974	0.1889	0829	0.0020	0.0020	1117	0.0003	0.0003	1333	78.0014	78.6292
0306	757.5581	740.3398	0608	1.0812	1.0062	0830	0.0085	0.0084	1118	0.2601	0.2531	1334	386.7459	386.6995
0307	615.2299	504.1960	0609	0.8334	0.7898	0831	0.0894	0.0879	1119	0.0007	0.0007	1335	88.1041	85.2850
0308	196.8967	190.0247	0610	8.4852	8.4190	0912	0.0035	0.0035	1120	0.0077	0.0078	1423	0.0001	0.0001
0309	50.1887	48.6187	0611	0.3122	0.3272	0913	0.0122	0.0122	1121	9.9138	5.9551	1424	0.0051	0.0052
0310	0.6108	0.5773	0612	0.0001	0.0001	0914	2.3679	2.5609	1122	132.9909	132.7434	1425	0.8356	0.8356
0311	14.0879	14.0547	0613	8.2688	8.0206	0915	156.2820	144.3371	1123	1194.7985	1014.7220	1426	0.7989	0.7820
0312	4.7177	4.7177	0614	1583.2611	1579.7837	0916	9.3704	8.7563	1124	750.9877	740.2394	1427	19.4022	19.3958
0314	0.0001	0.0001	0615	2504.6103	2297.9975	0917	1119.4520	1112.2089	1125	304.2018	304.9790	1428	11.5313	11.3117
0401	3.0367	2.7668	0616	1702.2007	1606.0182	0918	2488.6069	2486.2617	1126	229.4319	219.4063	1429	11.0213	10.2174
0402	203.3519	210.3099	0617	1214.0078	1203.5582	0919	1092.2402	1054.0225	1127	84.6884	84.6879	1430	23.2715	23.7276
0403	51.3938	45.4353	0618	73.3201	71.1828	0920	106.7020	102.4658	1128	0.6223	0.6085	1431	137.4913	131.1589
0404	23.7438	22.4805	0619	41.2277	39.6087	0921	7.7347	7.8342	1129	0.2859	0.2804	1432	705.2253	630.0282
0405	127.9212	128.2312	0620	12.2745	10.6250	0922	0.3349	0.3302	1130	13.1777	13.1353	1433	312.2140	305.1676
0406	41.9688	40.5451	0621	0.0105	0.0104	0923	0.2345	0.2404	1131	4.4425	4.4522	1434	673.5113	673.8589
0407	5.6684	5.2956	0623	0.1431	0.1431	0924	0.0051	0.0051	1132	0.6569	0.6471	1435	398.7473	392.3833
0408	27.8478	27.1766	0624	0.1841	0.1669	0929	0.0438	0.0458	1133	0.1683	0.1683	1526	0.1898	0.1835
0409	32.7991	24.3138	0625	0.0278	0.0274	0930	0.3573	0.3533	1134	0.1049	0.1034	1527	0.6323	0.6319
0410	0.0999	0.1063	0712	0.3462	0.3186	0931	0.4967	0.4932	1135	0.0539	0.0522	1528	8.3004	6.5983
0411	234.1678	233.5573	0713	17.3771	17.0898	0932	0.0371	0.0361	1218	0.0804	0.0804	1529	10.2454	10.1758
0412	1600.7075	1598.7036	0714	658.3577	633.1983	0933	0.0003	0.0003	1219	0.0063	0.0061	1530	0.4354	0.4354
0413	1795.0237	1795.7271	0715	1610.2748	1607.1912	1012	0.0127	0.0127	1220	0.0039	0.0039	1531	0.2411	0.2411
0414	409.2690	468.5461	0716	2195.9857	2206.9732	1013	0.9269	0.9093	1221	0.0050	0.0050	1532	0.0385	0.0385
0415	89.0432	87.0512	0717	2061.4973	2053.2422	1014	0.2444	0.2445	1222	0.8651	0.8273	1533	4.5241	4.3611
0416	263.7421	252.2492	0718	741.8310	710.2401	1015	2.5339	2.5453	1223	71.9608	72.6832	1534	130.1977	131.4765
0417	1.3966	1.1970	0719	110.1598	98.0730	1016	3.6053	3.6050	1224	387.8810	379.0380	1535	82.6187	75.8793
0418	0.1253	0.1253	0720	343.3882	335.5327	1017	0.0107	0.0107	1225	1557.6066	1562.0951	1626	0.0001	0.0001
0419	0.0881	0.0788	0721	1.1963	1.2056	1018	126.8204	126.8040	1226	948.5018	916.7890	1628	0.5927	0.0589
0420	0.0171	0.0164	0723	0.1496	0.1383	1019	153.2146	127.0305	1227	882.0375	775.1132	1629	0.0572	0.0384
0507	0.3546	0.3546	0724	0.3108	0.3015	1020	36.2951	36.0811	1228	399.1581	357.8810	1630	0.0003	0.0003
0508	1.7629	1.7071	0725	0.1284	0.1067	1021	160.5515	156.9672	1229	536.4122	498.5700	1634	2.7031	2.4386
0509	4.8577	4.8599	0726	0.0420	0.0425	1022	374.2105	373.0336	1230	833.0294	809.2805	1635	8.9610	8.9990
0510	0.6406	0.5626	0727	0.0004	0.0004	1023	519.2645	480.2438	1231	625.7939	624.5342	1734	0.0001	0.0001
0511	1.4106	1.4246	0812	0.0408	0.0404	1024	2.6913	2.6921	1232	195.9096	195.3932	1735	0.0316	0.0322

焼失率が低下して、結果として焼損棟数が少なくなったものと考えられる。

なお、前述のとおり、図8および図9のグラフのうち集計結果の差分値のグラフと集計結果の増減率のグラフを比較すると、増減率が大きく変化したメッシュは焼損棟数の差分の

絶対値の大きなメッシュと若干ずれた位置に出現しており、焼損棟数の増減率が大きく変化しているメッシュの計算結果が全体の集計値に与える影響もさほど大きくないものと考えられる。

以上の検討の結果、今回の計算結果では、計算方法の違い

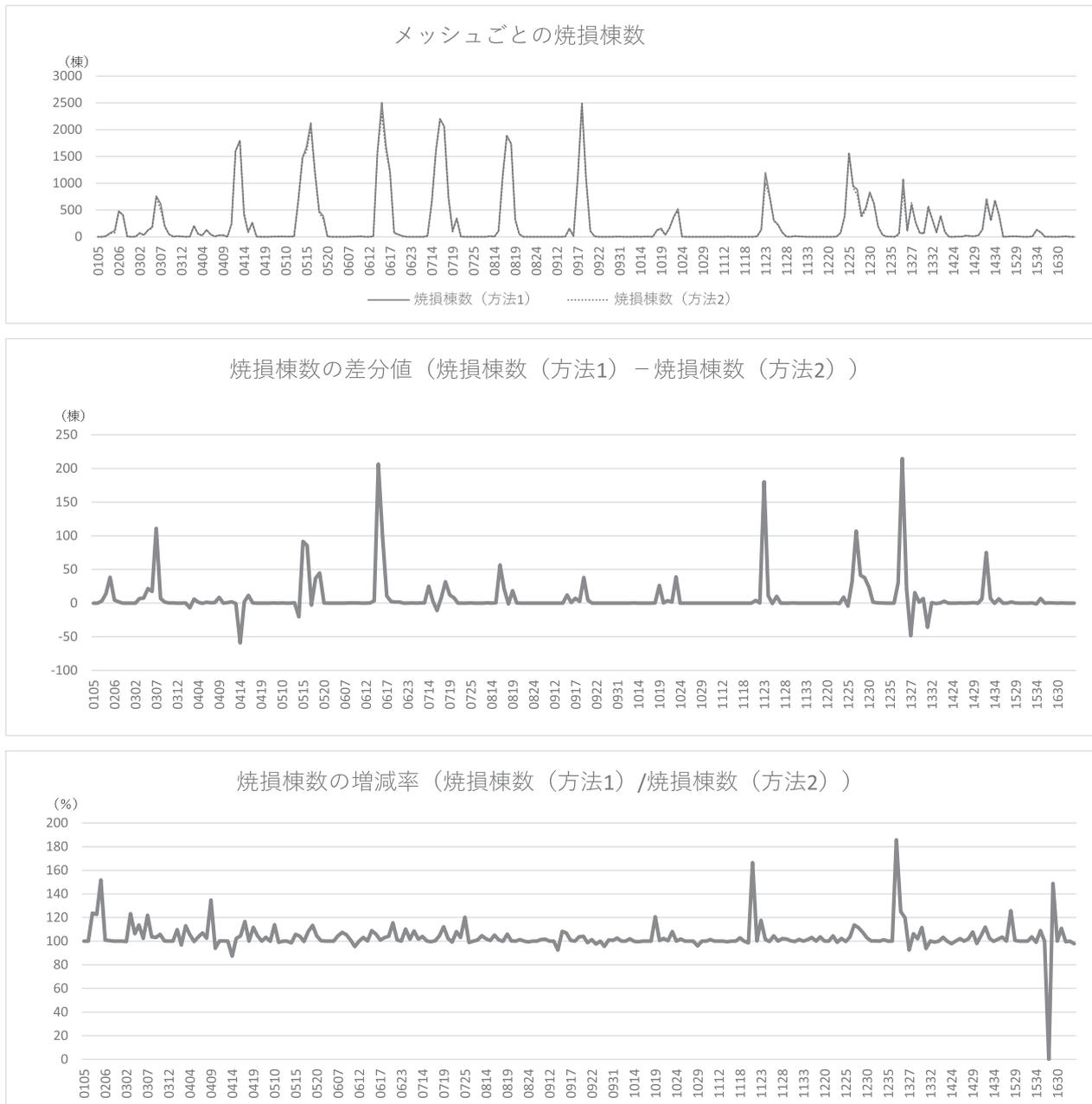


図8 1kmメッシュで計算した各メッシュにおける焼損棟数
 (上) 集計結果 (中) 集計結果の差分値 (下) 集計結果の増減率

いにより顕著な差が現れた部分があるとは考えられなかったため、以後では、方法2の結果に基づいて検討を行うこととした。

(2) 大規模火災発生地点との比較

方法2を用いて焼損棟数を計算した結果を地図上にメッシュ表示した図を図11に、実際の大規模火災(5,000m²以

表3 250mメッシュで計算した場合の各メッシュの焼損棟数集計結果一覧

MESH	方法1	方法2															
0101	0.0001	0.0001	0512	187.9517	166.3982	0820	0.1772	0.1772	1208	235.9568	235.4928	1517	224.7228	222.0034	1913	3.8422	3.8394
0102	0.0003	0.0003	0513	142.0658	102.064	0821	39.9858	32.6675	1209	114.507	113.8874	1518	152.7956	150.6234	1914	4.3458	4.3458
0104	0.0013	0.0013	0514	21.5662	20.0873	0822	22.5354	3.7788	1210	61.1897	61.1	1519	69.59	67.4451	1915	0.5285	0.5285
0105	0.001	0.001	0515	0.069	0.0585	0901	0.5339	0.5339	1211	143.9549	190.0059	1520	75.829	69.8085	1916	181.7085	181.7085
0106	0.0084	0.0084	0516	0.3885	0.3529	0902	56.6722	56.5886	1212	329.3667	369.4584	1521	91.7555	91.5441	1917	237.0157	237.0157
0107	0.051	0.051	0517	0.2528	0.2333	0903	158.1629	156.3837	1213	43.0942	31.3168	1522	36.2816	26.1766	1918	147.6903	147.949
0108	0.0013	0.0015	0518	0.0104	0.0104	0904	210.3162	207.8508	1214	2.1731	2.1517	1604	0.0003	0.0003	1919	98.8576	98.13
0109	0.0001	0.0001	0519	0.1425	0.1302	0905	111.2376	110.8198	1215	44.2889	43.6757	1605	0.0007	0.0007	1920	15.9875	15.9975
0110	0.0001	0.0001	0520	0.0133	0.0133	0906	89.4229	88.9746	1216	178.4068	178.4044	1607	0.0069	0.0069	1921	4.8409	4.8409
0201	11.1431	11.1431	0522	0.002	0.002	0907	170.4552	142.9765	1217	145.3252	145.3252	1608	11.6096	11.6096	1922	2.6091	2.4306
0202	14.1873	30.6824	0601	14.4885	14.4861	0908	201.4629	170.3428	1218	11.4763	9.7011	1609	110.8122	110.4517	2001	0.0003	0.0003
0203	21.2229	29.8141	0602	152.8619	152.8619	0909	223.8625	165.0495	1219	1.6738	1.6714	1610	30.8294	30.8294	2002	0.0134	0.0134
0204	16.7116	16.7116	0603	189.3668	189.3668	0910	142.2418	130.3547	1220	3.6483	3.6148	1611	89.8686	89.8628	2003	0.0034	0.0034
0205	3.7108	3.7108	0604	27.396	27.413	0911	71.8827	46.5329	1221	2.2844	1.2783	1612	156.0457	155.9437	2004	0.0993	0.0993
0206	10.5648	10.5648	0605	7.9382	8.9098	0912	6.1579	6.0507	1222	9.617	7.7419	1613	267.8536	267.6211	2005	0.2047	0.197
0207	0.3119	0.3119	0606	7.6592	7.8813	0913	22.4576	23.1404	1302	0.9839	0.8593	1614	244.1916	243.9796	2006	6.1471	6.1608
0208	0.0217	0.0217	0607	30.289	30.5902	0914	1.4768	1.4195	1303	47.4894	47.4242	1615	171.3139	171.1652	2007	8.4094	8.3765
0209	0.0153	0.0153	0608	172.5519	135.113	0915	10.339	15.5708	1304	162.0935	162.1408	1616	151.7218	151.6681	2008	12.7412	12.7407
0210	0.0153	0.0153	0609	138.8172	95.3902	0916	125.5619	125.0363	1305	46.7014	46.6972	1617	218.5228	218.9059	2009	16.2499	16.63
0211	0.0003	0.0003	0610	76.5675	71.4037	0917	173.1108	173.1108	1306	116.0415	116.182	1618	54.4994	54.4411	2010	13.106	13.6847
0212	0.0004	0.0004	0611	254.2081	253.549	0918	4.0202	3.9918	1307	49.3407	49.2733	1619	24.0894	19.353	2011	1.993	2.0779
0301	74.5746	74.6523	0612	183.9695	171.9931	0919	0.5645	0.462	1308	130.9343	130.6905	1620	27.744	21.7061	2012	64.5453	64.5371
0302	30.036	57.1963	0613	221.1606	226.6082	0920	0.1868	0.1632	1309	205.2486	204.845	1621	26.7715	25.6827	2013	92.4806	92.5666
0303	63.4182	73.384	0614	120.9796	131.0791	0921	0.0304	0.0304	1310	167.5644	167.2349	1622	9.6711	9.6711	2014	18.14	18.1388
0304	77.512	77.9937	0615	11.2679	11.2679	0922	0.1203	0.1388	1311	59.4934	60.3658	1703	0.0008	0.0008	2015	28.668	28.668
0305	15.0613	14.6437	0616	43.2419	42.4008	1002	6.8429	6.7628	1312	254.1883	253.6615	1704	0.0017	0.0014	2016	238.9096	238.9096
0306	11.0996	9.6975	0617	7.8707	7.8497	1003	161.5826	159.6884	1313	30.1496	29.3499	1705	0.0013	0.0013	2017	360.9881	360.9881
0307	2.2166	2.2084	0618	1.0484	1.0105	1004	188.9405	186.7256	1314	11.3387	11.3387	1706	0.003	0.0025	2018	146.7405	146.7405
0308	0.0596	0.0175	0619	0.0817	0.0817	1005	35.246	34.8451	1315	14.7146	14.6763	1707	0.0148	0.0143	2019	66.022	66.022
0309	2.0827	2.2122	0620	8.3759	8.3511	1006	51.1857	51.1792	1316	12.8484	12.8414	1709	18.5619	16.8009	2020	62.3521	62.3521
0310	2.7305	2.891	0621	79.9125	79.647	1007	211.83	205.5839	1317	29.6747	29.5639	1710	19.7865	11.6744	2021	59.8721	59.8721
0311	6.0802	6.0802	0622	67.8261	67.6047	1008	249.0907	202.966	1318	2.9676	2.8474	1711	52.1521	52.1532	2022	24.6621	24.3829
0312	0.0819	0.0819	0701	10.3996	10.3996	1009	111.2761	83.1242	1319	3.7941	3.7941	1712	204.3058	204.1368	2101	0.0001	0.0001
0313	0.0217	0.0217	0702	59.3609	58.8398	1010	29.6749	24.3131	1320	0.2743	0.2743	1713	225.2691	177.3197	2102	0.0004	0.0004
0314	0.0301	0.0301	0703	62.4371	62.7675	1011	138.5197	99.7707	1321	0.4383	0.4383	1714	295.3015	295.0451	2103	0.0052	0.0052
0315	0.0212	0.0212	0704	87.0197	93.0083	1012	93.5871	92.1563	1322	0.5838	0.5838	1715	154.2808	154.1469	2104	0.0186	0.0181
0317	0.0033	0.0043	0705	232.8548	233.0511	1013	112.6794	97.9931	1401	1.0235	1.0101	1716	102.369	102.7659	2105	0.3882	0.3341
0318	0.0012	0.0012	0706	27.8338	27.8585	1014	0.3496	0.3496	1402	1.0706	0.8829	1717	130.1598	130.5427	2106	5.958	5.9677
0319	0.0051	0.0051	0707	18.4995	23.1165	1015	11.3251	11.608	1403	1.5509	1.5514	1718	234.8749	235.4717	2107	11.2948	11.2873
0320	0.0136	0.0126	0708	46.2759	46.2759	1016	63.8452	57.4334	1404	121.9562	121.9918	1719	157.8678	159.242	2108	15.4278	17.0575
0401	152.6466	152.5911	0709	45.2797	45.0388	1017	83.3474	76.7363	1405	234.7218	234.7903	1720	63.7462	62.9633	2109	21.1179	18.8733
0402	117.273	117.273	0710	43.1414	36.1234	1018	3.6425	3.6425	1406	138.9512	138.9918	1721	38.3386	36.454	2110	0.5612	0.5213
0403	9.7244	9.7244	0711	59.6311	25.7158	1019	0.1289	0.1163	1407	73.2657	73.285	1722	30.8768	31.0523	2111	0.5951	0.622
0404	16.4636	16.4636	0712	47.1241	46.4279	1020	0.3884	0.3977	1408	76.3098	75.8622	1801	0.2523	0.2774	2112	11.0605	0.3382
0405	0.4801	0.4801	0713	280.0245	280.5136	1021	0.4004	0.4004	1409	321.2074	321.5651	1803	0.0069	0.0069	2113	1.1979	1.1934
0406	55.7183	54.037	0714	187.5953	184.4307	1022	0.1945	0.1945	1410	145.7424	145.5111	1804	0.0009	0.0007	2114	0.5254	0.5254
0407	20.5162	20.7634	0715	76.2815	76.2815	1102	0.0133	0.0133	1411	144.7638	144.4792	1805	0.0017	0.0014	2115	64.3045	64.3045
0408	36.8936	24.679	0716	128.5056	128.5056	1103	47.1406	46.6495	1412	160.5231	160.1673	1806	0.002	0.002	2116	204.0692	204.068
0409	11.3754	11.3754	0717	192.2414	192.2414	1104	172.6468	172.0707	1413	56.8864	59.702	1810	0.6524	0.6524	2117	308.2078	308.2078
0410	40.2221	35.0103	0718	3.6677	3.6677	1105	90.9823	91.008	1414	78.6823	78.6494	1811	70.2597	70.8947	2118	266.8889	266.8889
0411	67.2318	66.5671	0719	11.6436	11.3535	1106	118.0557	118.0657	1415	23.3382	22.3511	1812	57.7312	57.7632	2119	183.4405	183.4405
0412	93.1376	90.9377	0720	141.2767	130.2801	1107	241.8981	241.4407	1416	57.0153	56.3527	1813	34.0647	32.6289	2120	217.1451	217.1451
0413	45.1579	29.1007	0721	150.609	129.4493	1108	216.1234	215.6983	1417	195.9356	193.1297	1814	91.8482	91.7685	2121	118.8253	117.9916
0414	1.3745	0.8814	0722	89.539	78.4667	1109	60.6811	60.6616	1418	31.7426	27.0566	1815	6.7572	5.8516	2122	84.3109	79.0018
0415	0.0143	0.0143	0801	15.1529	15.1529	1110	63.8955	63.8877	1419	8.1698	8.2471	1816	9.7725	9.7725	2123	0.0035	0.0035
0416	0.0276	0.0276	0802	49.6773	49.9108	1111	7.4348	6.2849	1420	89.1954	87.4576	1817	5.9454	5.3361	2202	0.0007	0.0007
0417	0.2166	0.2166	0803	259.9013	256.8545	1112	193.1234	169.3362	1421	81.2311	79.4235	1818	154.6283	155.0213	2205	0.1692	0.1692
0418	0.1098	0.1098	0804	111.872	116.891	1113	151.29	68.4231	1422	5.9794	5.8609	1819	274.0207	274.717	2206	1.0942	1.0914
0419	0.0454	0.0479	0805	62.7234	62.7714	1114	7.3637	6.5476	1501	0.0025	0.0025	1820	156.6659	157.024	2207	10.1666	8.8471
0420	0.0814	0.0															

上)の発生状況を図12にそれぞれ示す。なお、大規模火災の発生状況は、文献11)から凡その範囲を転記して作成した。また、図12中の矢印は印刷時のかすれやぼやけに備

えて追記したもので、矢印の先端付近に大規模火災発生地点が存在することを示している。

表4に、全メッシュの焼損棟数から作製した度数分布表を

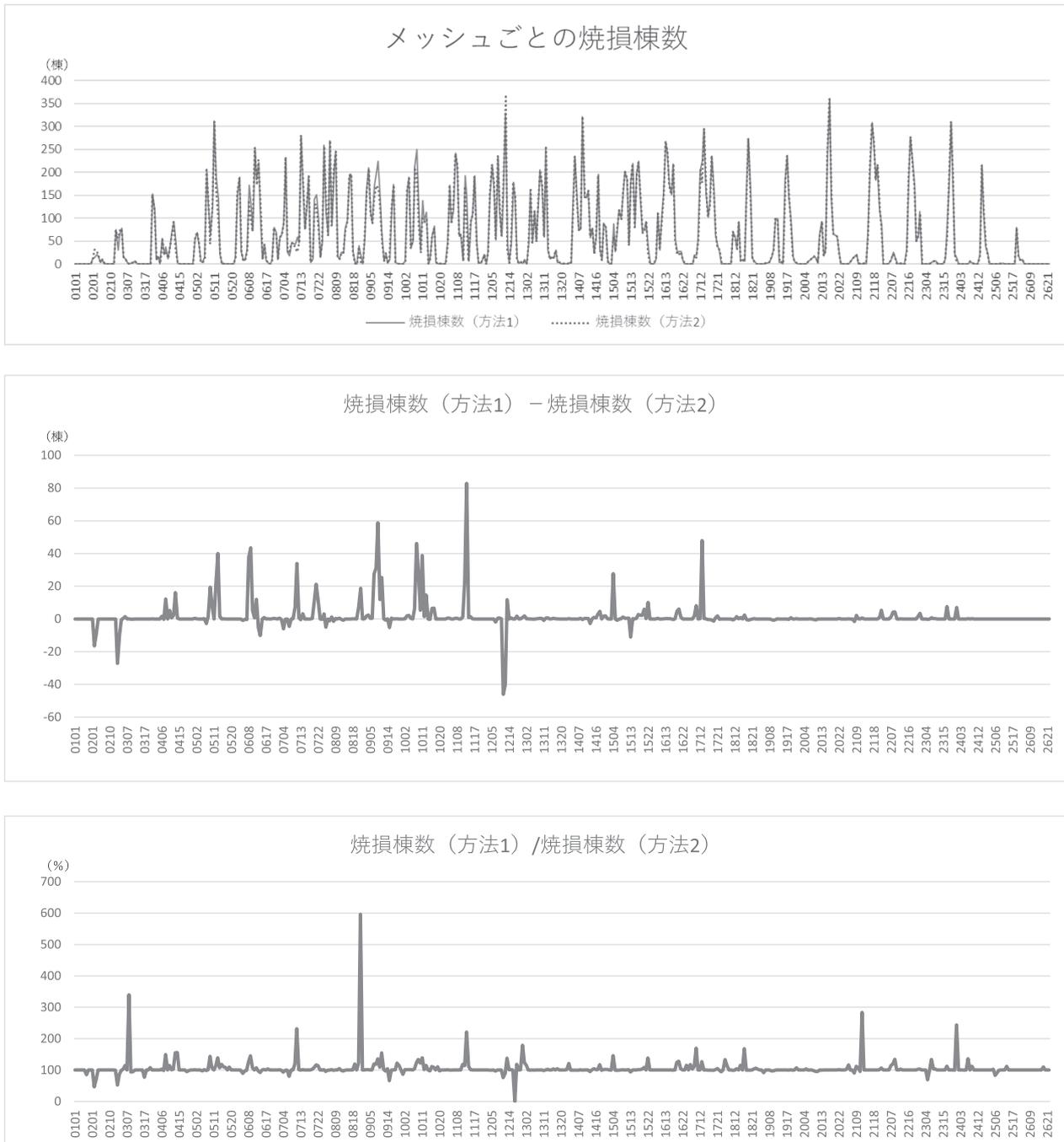


図9 250mメッシュで計算した各メッシュの焼損棟数
 (上) 集計結果 (中) 集計結果の差分値 (下) 集計結果の増減率

示す。なお、累積度数および累積相対度数については、焼損棟数が 0 となるメッシュ、すなわち対象建物の存在しない海等のメッシュを除いて計算した。

表 4 (上) からは、1km メッシュの場合には、対象建物の存在する全メッシュのうち、焼損棟数の多いほうから上位 9.36% のメッシュに大規模火災が発生したメッシュのうち半数を超えるメッシュが集中していることとなる。このことから、焼損棟数の多いメッシュならば大規模な火災が発生するとは言えないものの、大規模な火災が発生したメッシュは焼損棟数が比較的多く、大規模地震災害発生直後に延焼被害が大きくなる地域を提示できる可能性があると考えられる。

なお、表 4 (下) の 250m メッシュの場合、上位 20.95% の延焼棟数の多いメッシュに含まれる大規模火災が発生したメッシュでも 46.94% に留まっている。こちらも、焼損棟数の多いメッシュならば大規模な火災が発生するとは言えないものの、大規模な火災が発生したメッシュは焼損棟数が比較的多いという傾向が現れていると思われるが、1km メッシュの場合に比べて大規模火災の発生したメッシュが延焼棟数の多いメッシュに集中していない。この原因としては、メッシュサイズが大規模火災の延焼範囲よりも小さく、複数のメッシュに大規模火災が及んだことで、比較的延焼棟数の少ないメッシュも大規模火災の発生したメッシュとして計上している事が 1km メッシュの場合よりも多くなっている可能性が考えられる。

また、250m メッシュの場合の 0812 のメッシュでは、実際には大きな火災が発生しているにもかかわらず、焼損棟数の計算結果としては 26 棟程度にとどまっている。この原因としては、メッシュ内の対象建物が 9 つに分かれてクラスタを構成しているため焼失率が大きくならなかったことのほか、文献 11) の 90 ページには「この地域は、中小のケミカルシューズの工場及びこれに関連する零細企業が多く建っている所で、44 棟もの建物がある。その内でも、特に出火場所となった若松町 3 丁目一帯には、27 棟と集中している。また、ケミカ

ルシューズ工場には溶剤、ゴム製品、ゴム糊等の危険物が大量に存在するため、速燃的に延焼拡大した火災である。

さらに、建物外壁のモルタルの剥離、屋根瓦の落下、倒壊のほか、街区内の生活道路の幅員が狭いことなどが重なり大規模な火災となったものである。」との記載があることから実際の火災の性状が我々の計算方法で想定している防火木造建物の火災性状とは異なっていた可能性も考えられる。

(3) 出火点分布との比較

実際の出火点分布と図 11 (上) をかさねあわせた結果を図 13 に示す。

1995 年 (平成 7 年) 兵庫県南部地震の火災は家屋被害とほぼ比例して震度 6 以上の地域に多く発生していると言われている¹²⁾が、図 13 においても出火点と焼損棟数の多いメッシュが比較的好く重なっており、焼損棟数の計算結果にも同様の傾向が再現されていることが判る。また、図 11 の各メッシュのうち、海等の対象建物の存在しないメッシュを除いた各メッシュの焼損棟数の震度別度数分布表を表 5 に示す。焼損棟数の大きなメッシュは震度 6 弱以上のメッシュに存在し、特に震度 6 強以上のメッシュに集中していることが判る。このことは、震度が大きくなるにつれて大きな出火率を与えている影響が、焼損棟数の計算結果に適切に反映されていることを示していると考えられる。

(4) 出火率の影響に関する検証

3.2 (1) で述べたとおり、焼損棟数の計算結果は実際の被害に比べ、かなり大きなものとなった。この原因として、計算に用いた出火率が過大であった可能性が考えられたことから、出火率の影響について検証を行った。

1) 出火率計算における時刻補正および季節補正の影響に関する検証

広域版地震被害想定システム¹⁾では、地震の発生した時刻および季節に応じて図 14 に示すように補正係数を用いて

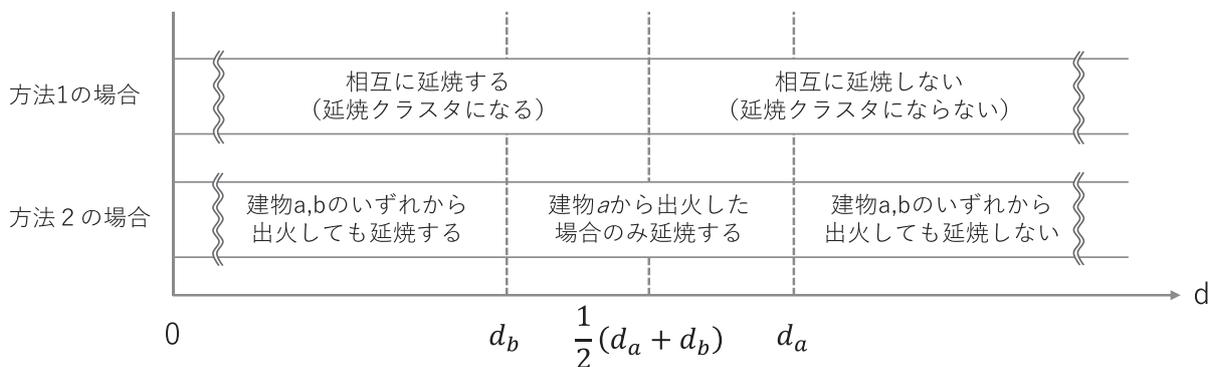


図 10 方法 1 と方法 2 により作成される延焼クラスタと延焼限界距離の関係

火災件数を算出しており、(9) 式の右辺に現れる $\alpha\beta \times 0.003152r^{0.6041}$ が出火率に相当する。3.2 (1) の計算を行う際、3.1 (5) で触れたように震度階級に対応する防火木造建

物の出火率として既報3,4) と同一の値を用いたが、既報3,4) ではこの出火率を算出する際、 α, β についてはそれぞれの加重平均を用いていた。表6,7に α, β のそれぞれについて、

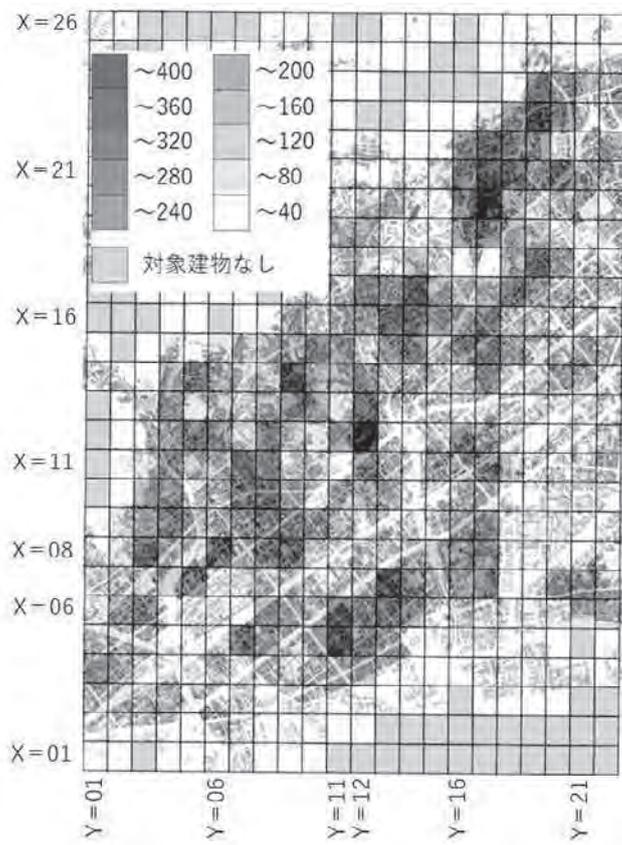
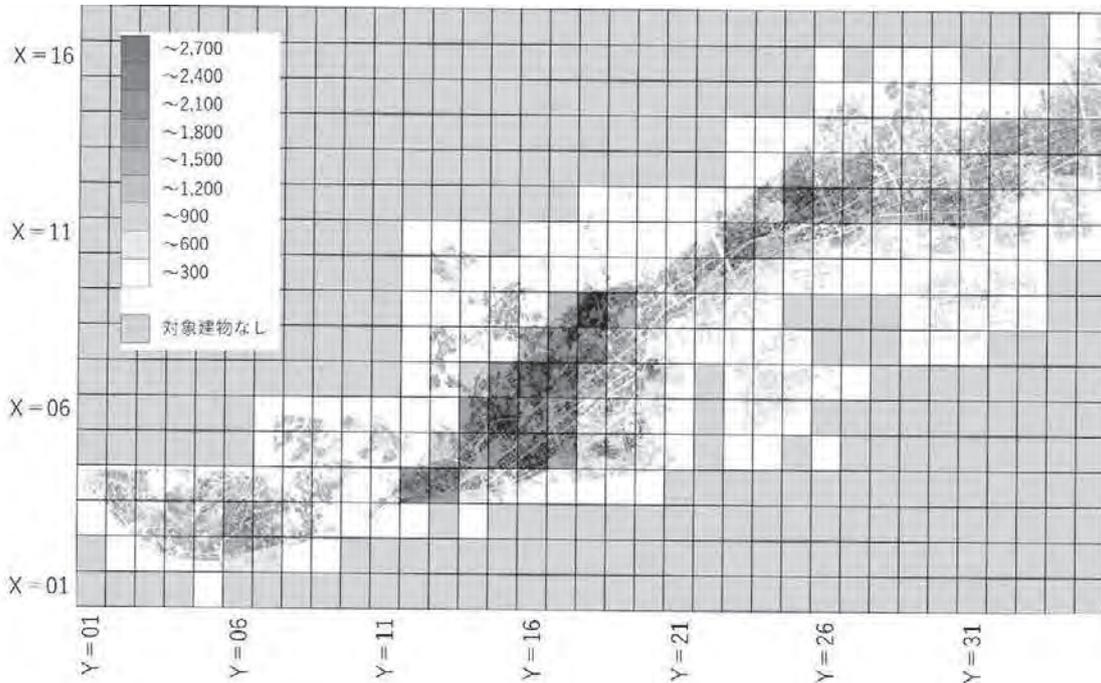


図11 方法2を用いて計算した焼損棟数の計算結果
(上) 1km メッシュ
(左) 250m メッシュ

本来の補正係数の値と、3.2 (1) の計算に用いた補正係数の加重平均を示す。

表から、平成7年(1995年)兵庫県南部地震の発生時刻

である1月17日午前5時46分に適用される補正値は本来 α が0.098、 β が2.4087であるが、3.2 (1) の計算を行う際に用いた補正値は α が0.950917、 β が1.167204であり、 α 、

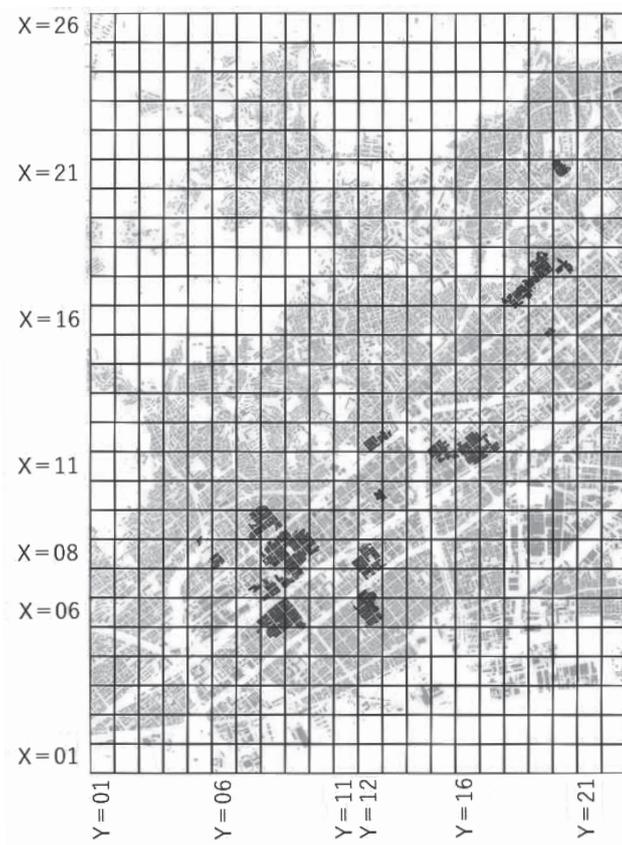
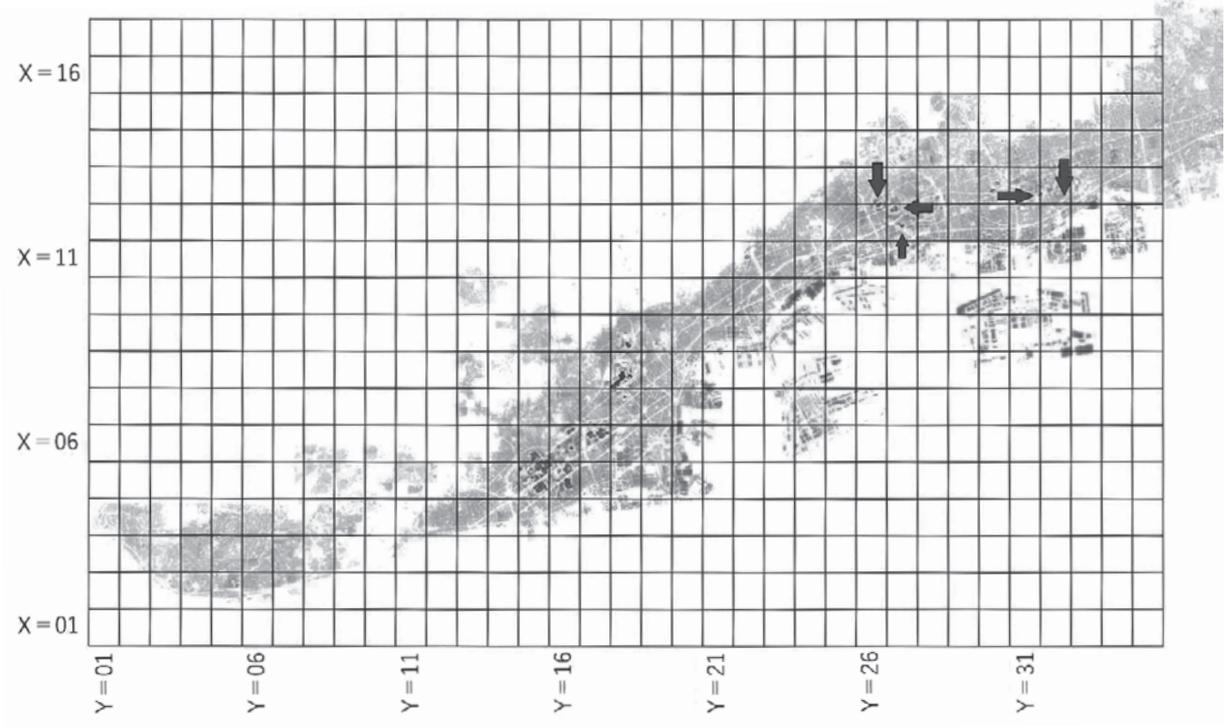


図12 実際の大規模火災の発生状況 (5,000m²以上)
 (上) 1km メッシュ
 (左) 250m メッシュ

表 4 方法 2 を用いて計算した全メッシュの焼損棟数の度数分布
(上) 1km メッシュ (下) 250m メッシュ

	度数		累積度数		相対累積度数 (%) ※対象建物のないメッシュは除く	
	全メッシュ	大規模火災が 発生している メッシュ	全メッシュ	大規模火災が 発生している メッシュ	全メッシュ	大規模火災が 発生している メッシュ
2400< 焼損棟数 ≤ 2700	1	1	1	1	0.43	6.67
2100< 焼損棟数 ≤ 2400	2	1	3	2	1.28	13.33
1800< 焼損棟数 ≤ 2100	3	1	6	3	2.55	20.00
1500< 焼損棟数 ≤ 1800	8	3	14	6	5.96	40.00
1200< 焼損棟数 ≤ 1500	3	1	17	7	7.23	46.67
900< 焼損棟数 ≤ 1200	5	1	22	8	9.36	53.33
600< 焼損棟数 ≤ 900	12	1	34	9	14.47	60.00
300< 焼損棟数 ≤ 600	19	3	53	12	22.55	80.00
0< 焼損棟数 ≤ 300	182	3	235	15	100.00	100.00
対象建物なし(焼損棟数=0)	360	-	595	-	-	-

	度数		累積度数		相対累積度数 (%) ※対象建物のないメッシュは除く	
	全メッシュ	大規模火災が 発生している メッシュ	全メッシュ	大規模火災が 発生している メッシュ	全メッシュ	大規模火災が 発生している メッシュ
360< 焼損棟数 ≤ 400	2	1	2	1	0.40	2.04
320< 焼損棟数 ≤ 360	1	0	3	1	0.59	2.04
280< 焼損棟数 ≤ 320	5	0	8	1	1.58	2.04
240< 焼損棟数 ≤ 280	11	5	19	6	3.75	12.23
200< 焼損棟数 ≤ 240	24	3	43	9	8.50	18.36
160< 焼損棟数 ≤ 200	32	6	75	15	14.82	30.61
120< 焼損棟数 ≤ 160	31	8	106	23	20.95	46.94
80< 焼損棟数 ≤ 120	36	6	142	29	28.06	59.18
40< 焼損棟数 ≤ 80	68	8	210	37	41.50	75.51
0< 焼損棟数 ≤ 40	296	12	506	49	100.00	100.00
対象建物なし(焼損棟数=0)	66	-	572	-	-	-

β の積をそれぞれ求めると約 0.236 と約 1.110 となり、3.2(1)の計算に用いた出火率が広域版地震被害想定システムで本来利用されている出火率よりも約 4.7 倍に大きくなっている。

そこで、広域版地震被害想定システムで本来利用されている出火率を用いて、3.2 (1) と同一の気象条件・震度分布データにより計算を行った結果、1km メッシュの場合の焼損棟数は、方法 1 では約 21,304 棟、方法 2 では約 20,604 棟となった。また、250m メッシュの場合の焼損棟数は、方法 1 では約 12,957 棟、方法 2 では約 12,595 棟となった。これら焼失棟数の値は、まだ実際の延焼被害 (7,574 棟) を上回っているが、平均値を用いた場合に比べて実際の値に近づいた結果となった。

図 15、16、表 8 に、本来広域版地震被害想定システムで用いている補正係数を利用して焼損棟数を計算した結果の

一部を示す。

図 15、16 からは、計算の結果、各メッシュの焼損棟数の計算結果がそれぞれ減少していることが確認できるのに加え、各メッシュの焼損棟数の大小がよく似ていることが判る。

また、表 8 の度数分布表では、上位 15.31% に 73.33% が集中しており、この場合でも大規模地震災害発生直後に、延焼被害が大きくなる地域を提示できる可能性があると考えられる。

方法 1 と方法 2 の双方とも、大規模地震発生直後に推定結果を算出できるよう、事前に震度階級ごとの出火率を求め、事前処理の中で一部の延焼クラスターの焼失棟数まで計算することとしたが、その際に平均値を利用したことが計算結果に影響したものであり、簡略化の悪影響とすることができる。

なお、時刻に関する補正係数 α の最小値および最大値は

0.046と2.5であり、季節に関する補正係数 β の最小値および最大値は0.4152と2.4087である。このため、 α 、 β の積の最小値および最大値は約0.019と約6.022となり、この値を用いて計算される出火率には最大で300倍以上の差が生じる場合があることが判る。また、出火率以外の条件を3.2(1)の計算と等しくして焼損棟数を計算すると、最小の出火率を利用した場合の焼損棟数は約2,044棟、最大の出火率を用いた場合の焼損棟数は約101,888棟となり、焼損棟数の計算結果にも約50倍の差が生じることとなる。このことを踏まえると、実装に向けて、時刻や季節に合わせて適切な出

火率を設定しても高速で実行できる実装方法について検討しておく必要があると考えられる。

2) 実際の出火件数に基づいて出火率を調整した場合との比較
 前述のとおり、平成7年(1995年)兵庫県南部地震発当日の神戸市内における建物火災出火件数は103件となっているのに対して、平均的な α 、 β を用いて出火率から求めた出火件数は232件である。

作成したデータの範囲が神戸市と完全に一致していないため、これらの数字をそのまま用いると誤差を含むことになる点や、地震発生当日の出火件数ではなく地震発生後数日間

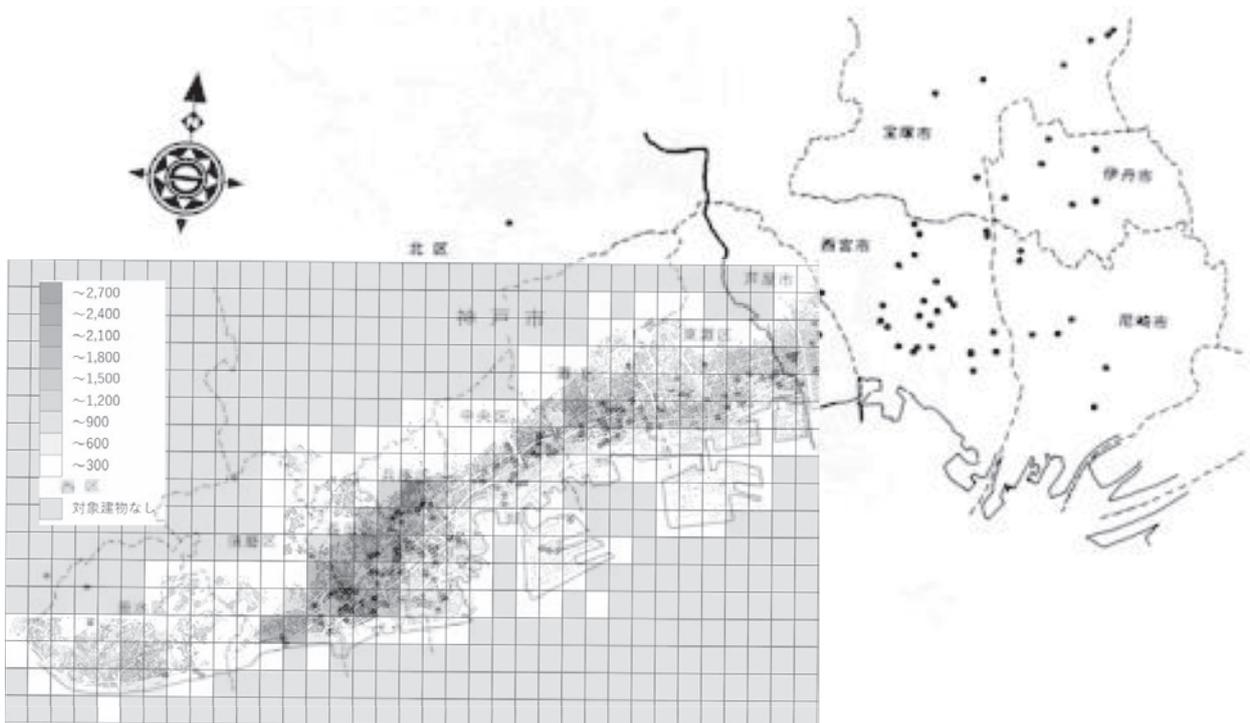


図13 焼損棟数の計算結果と出火点分布¹²⁾の重ね合わせ

表5 各メッシュの焼損棟数の震度別度数分布表
 (1kmメッシュの場合、焼損棟数が0のメッシュを除く)

	入力した震度情報			
	5強	6弱	6強	7
2400< 焼損棟数 ≤ 2700	0	0	1	0
2100< 焼損棟数 ≤ 2400	0	0	2	0
1800< 焼損棟数 ≤ 2100	0	0	1	2
1500< 焼損棟数 ≤ 1800	0	2	1	5
1200< 焼損棟数 ≤ 1500	0	0	1	2
900< 焼損棟数 ≤ 1200	0	1	4	0
600< 焼損棟数 ≤ 900	1	2	3	6
300< 焼損棟数 ≤ 600	0	4	7	8
0< 焼損棟数 ≤ 300	91	68	19	4

の出火件数を用いるべきか否かなど、妥当性についての懸念はあるものの、実際の出火件数に基づいて出火率を調整して検証を行った。

出火件数の比に基づいて震度階級ごとの出火率を算出すると表 9 の出火率を得ることができるが、この出火率を用いて、3.2 (1) と同一の気象条件・震度分布データにより計算を行った結果、1km メッシュの場合の焼損棟数は、方法 1 では約 36,515 棟、方法 2 では約 35,324 棟となった。

また、250m メッシュの場合の焼損棟数は、方法 1 では約 21,379 棟、方法 2 では約 20,807 棟となった。

焼損棟数は各クラスタに含まれる建物数と出火率から計算されているが、出火率を調整したにも関わらず焼損棟数が多くなったことから、作成された延焼クラスタに含まれる建物数が多くなっている可能性が考えられる。延焼クラスタに含まれる建物数が大きくなった原因としては、クラスタ作成に用いた延焼限界距離が過大になっている可能性が考えられ、適切な延焼限界距離の設定方法についても検討する必要があると考えられる。

4. おわりに

本報告では、平成 7 年 (1995 年) 兵庫県南部地震を対象にデータを作成して、筆者らの検討してきた計算方法による焼損棟数の計算を行い、実際の被害と比較した結果について報告した。

その結果、現在の計算方法では、焼損棟数の計算結果が実際の火災被害を大きく上回った。

また、焼損棟数の多いメッシュならば大規模な火災が発生するとは言えないものの、大規模な火災が発生したメッシュは焼損棟数が比較的多い傾向があることが確認できた。

さらに、1995 年 (平成 7 年) 兵庫県南部地震の火災は家屋被害とほぼ比例して震度 6 以上の地域に多く発生していると言われているが、焼 25 損棟数の計算結果では震度 6 弱以上、特に震度 6 強以上に焼損棟数の多いメッシュが集中しており、震度の影響を反映して同様の傾向が再現されていることが判った。

また、出火率が焼損棟数の計算結果に与える影響について検証し、広域版地震被害推定システムで本来用いている時間や季節に関する補正係数を用いたほうが実際の火災被害に近い計算結果を得られることや、クラスタ作成に用いている延焼限界距離が過大になっている可能性があることが判った。

今後の課題としては、実際の延焼被害を焼損棟数の計算結果が大きく上回った原因についてのさらなる検討や、延焼限界距離の適切な設定方法、作成した延焼クラスタと各火災の延焼範囲の比較、他の地震を対象とした検証等を行う必要があると考えられる。

(1) SI 値の計算
 $SI = PGV \times 1.18$ (7)

(2) 家屋被害率 r の計算

{

$SI > 30$ の場合

$r = 1.21 \times 10^{-4} \times (SI - 30)^{1.51}$ (8)

$SI \leq 30$ の場合

$r = 0$

(3) 火災件数 y の計算
 $y = N\alpha\beta \times 0.003152r^{0.6041}$ (9)

N : メッシュ内の木造家屋数
 α : 発生時刻の影響を補正する係数
 β : 季節の影響を補正する係数

図 14 広域版地震被害推定システムにおける火災件数の計算方法

表 6 発生時刻の影響を補正する係数 α

発生時刻	係数	対象時間	係数と対象時間の積
0:00 ~ 3:59	0.046	4	0.184
4:00 ~ 4:59	0.150	1	0.150
5:00 ~ 5:59	0.098	1	0.098
6:00 ~ 7:59	1.640	2	3.280
8:00 ~ 10:59	1.100	3	3.300
11:00 ~ 12:59	1.520	2	3.040
13:00 ~ 15:59	0.850	3	2.550
16:00 ~ 16:59	1.300	1	1.300
17:00 ~ 18:59	2.500	2	5.000
19:00 ~ 19:59	1.800	1	1.800
20:00 ~ 20:59	1.100	1	1.100
21:00 ~ 22:59	0.450	2	0.900
23:00 ~ 23:59	0.120	1	0.120
合計		24	22.822

加重平均 0.950917

表 7 季節の影響を補正する係数 β

発生日	係数	対象期間 (半月単位)	係数と対象期間の積
1/1 ~ 3/31	2.4087	6	14.4522
4/1 ~ 5/31	1.0000	4	4.0000
6/1 ~ 10/31	0.4152	10	4.1520
11/1 ~ 12/15	1.0000	3	3.0000
12/16 ~ 12/31	2.4087	1	2.4087
		24	28.0129

加重平均 1.167204

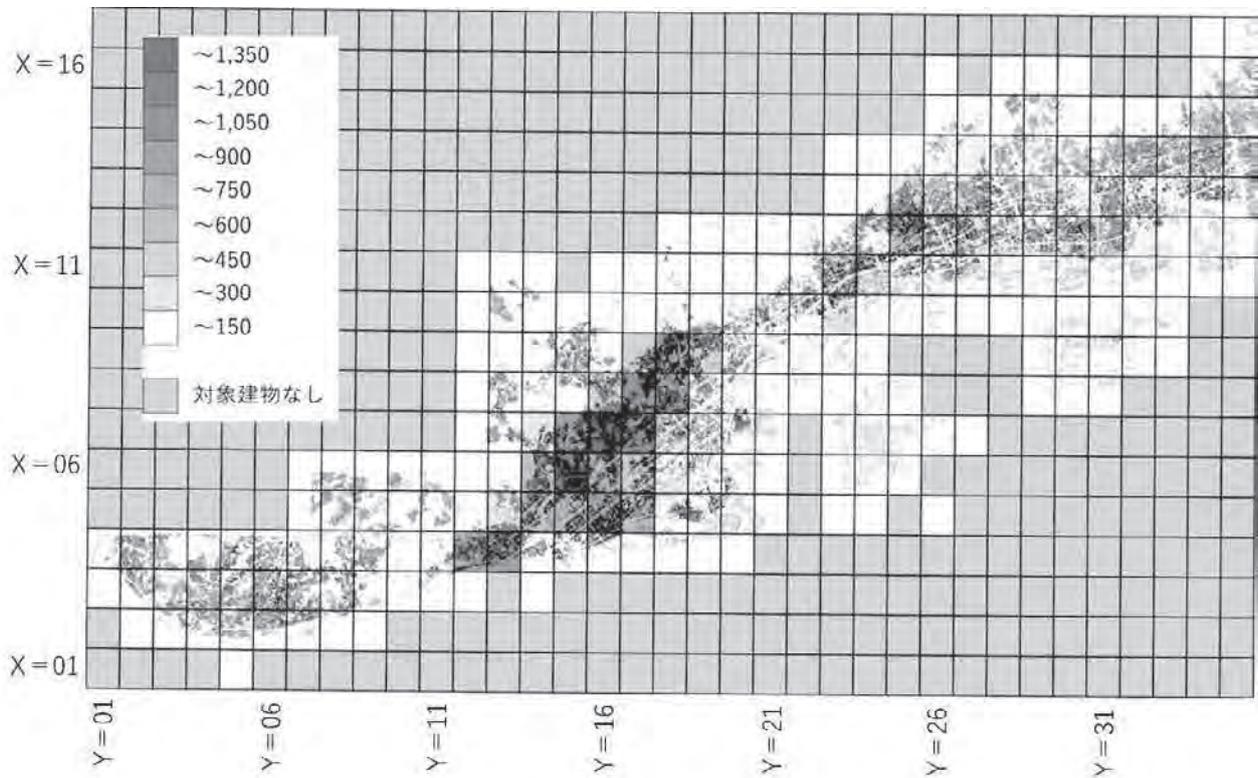


図15 広域版地震被害推定手法で本来用いられている時刻・季節に関する補正係数を利用して計算した焼損棟数の計算結果(1kmメッシュ、方法2の場合)

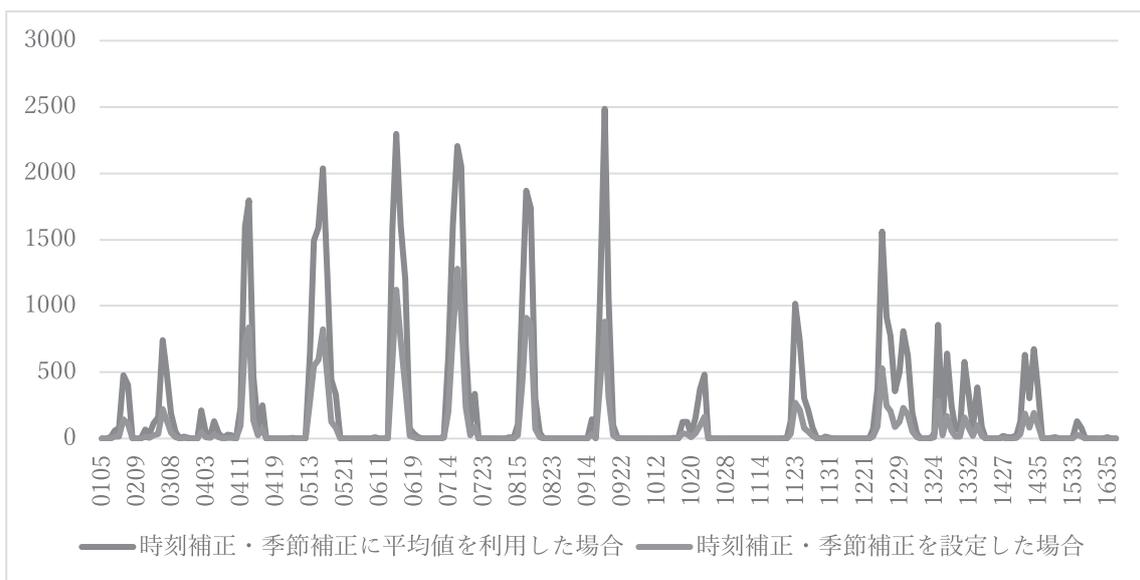


図16 時刻・季節に関する補正係数に平均値を利用した場合と広域版地震被害推定手法で本来用いられている係数を用いた場合の焼損棟数の計算結果の違い(1kmメッシュ、方法2の場合)

表8 広域版地震被害推定手法で本来用いられている時刻・季節に関する補正係数を利用して計算した全メッシュの焼損棟数の度数分布 (1kmメッシュ、方法2の場合)

	度数		累積度数		相対累積度数 (%) ※対象建物のないメッシュは除く	
	全メッシュ	大規模火災が発生しているメッシュ	全メッシュ	大規模火災が発生しているメッシュ	全メッシュ	大規模火災が発生しているメッシュ
1200<x≤1350	1	0	1	0	0.43	0.00
1050<x≤1200	1	1	2	1	0.85	6.67
900<x≤1050	2	0	4	1	1.70	6.67
750<x≤900	5	3	9	4	3.83	26.67
600<x≤750	2	1	11	5	4.68	33.33
450<x≤600	5	1	16	6	6.81	40.00
300<x≤450	4	1	20	7	8.51	46.67
150<x≤300	16	4	36	11	15.31	73.33
0<x≤150	199	4	235	15	100.00	100.00
対象建物なし	360	-	-595	-	-	-

表9 平成7年(1995年)兵庫県南部地震発当日の神戸市内における建物火災出火件数に基づいて調整した出火率

震度階級	震度階級ごとの出火率	震度階級	震度階級ごとの出火率
0	0.000000	5弱	0.000000
1	0.000000	5強	0.000049
2	0.000000	6弱	0.000219
3	0.000000	6強	0.000520
4	0.000000	7	0.001065

参考文献

- Masafumi Hosokawa et al., Development of the Wide-Area Earthquake Damage Estimation System and Mashup of Disaster Prevention Information, Journal of Disaster Research, pp.118-130, Vol.12, No.1, 2017
- 加藤ほか, 建物単体データを用いた全スケール対応・出火確率統合型の地震火災リスクの評価手法の構築, pp.1-10, 地域安全学会論文集 No.8, 2006
- 高梨ほか, 広域版地震被害想定システムへの機能追加のための高速な延焼被害推定手法に関する検討, 消防研究所報告, pp.21-33, Vol.129, 2020
- 高梨ほか, 広域版地震被害想定システムへの機能追加のための有向連結グラフを用いた延焼クラスタ構築手法と被害推定手法に関する検討, 消防研究所報告, pp.11-32, Vol.130, 2021
- 東京消防庁, 火災予防審議会地震対策部会答申書(第19期)減災目標を達成するため木造住宅密集地域において緊急に実施すべき震災対策, 2011
- 内閣府, 平成23年版防災白書, 2011
- 今津ほか, 東日本大震災で発生した津波火災における地形的影響の考察と津波火災危険度評価指標の提案, pp.127-143, No.2, Vol.33, 自然災害科学, 2014
- 東京消防庁, 地震時の延焼シミュレーションシステムに関する調査研究, 1989
- 藤本一雄, 1995年兵庫県南部地震の震度分布とその要因の分析, 東京工業大学博士論文甲第4097号, 1999
- 気象庁, http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/hourly_sl1.php?prec_no=63&prec_ch=%95%BA%8C%9%8C%A7&block_no=47770&block_ch=%90_%8C%CB&year=1995&month=01&day=17&view=p1
- 阪神・淡路大震災における火災状況【神戸市域】, 神戸市消防局, 1996
- 関沢, 阪神・淡路大震災における火災の発生状況と焼け止まり状況について, pp.45-54, 消防科学と情報, 1995

**A Comparison of the Estimation Number of Burnt Buildings
Based on the Fast Method for the Earthquake Fire Damage Calculation
Built for the Purpose of Adding Functions to the Wide-Area Earthquake Damage
Estimation System and the Actual Damages**

(Abstract)

Ken-ichi Takanashi and Masafumi Hosokawa

(Accepted July 7, 2023)

When a large earthquake occurs, it is thought that many earthquake fires will occur as seen in past large earthquakes.

In our previous report, in order to add an earthquake fire damage estimating function to the Wide-Area Earthquake Damage Estimation System, we discussed those two fast estimation methods using ideas of fire spreading cluster.

The numbers of burnt buildings obtained by these calculation methods are considered to be the probabilistic average of various fire occurrence situations, while the actual damage is considered to be one of those occurrence situations.

Therefore, although it is difficult to simply compare the calculation results and the actual damage, in order to verify the effectiveness of these methods, we try to compare.

In this paper, we report on the result of comparison the number of burnt buildings obtained by the calculation method studied so far, with the actual damage for the 1995 Hyogoken-Nanbu Earthquake.

技術報告

小型模型を使用したガス爆発実験について
- 開口より外部に噴出した火炎の影響 -

鈴木 健

(令和5年7月31日 受理)

爆発が発生した場合にどのような痕跡が残るかについて知るために小規模な爆発実験を行った。低引火点の可燃性液体がほぼ密閉された区画内の床面上に漏洩し、気化し、区画内に可燃性予混合気形成され、着火した場合を想定した。着火すると火炎が区画内を伝ばする。区画内の圧力が上昇すると、区画の一部が壊れ、火炎が外部に噴出する。区画外にシート状の可燃性固体を設置し、可燃性固体にどのような痕跡が残るかを実験的に調べた。

1. まえがき

公設消防機関が化学工場で爆発があったらしいという通報を受けて出動し現場に到着した際に、施設が激しく壊れており大きな音がしたという証言があれば、爆発があったと判断できる。しかし、現場に到着したときには火災が見えず、施設の一部に破壊の跡が発見されたのみであった場合、破壊の原因は爆発かどうかの判断が容易にできないことがある。爆発が発生した場合、どのような痕跡が残るかについて知るために、小規模な爆発実験を行った。

爆発の原因として例えば以下のようなことが考えられる。

- ①配管、貯蔵容器から気体燃料が漏洩し、空気中で可燃性予混合気を形成し、何らかの着火源により着火する。
- ②配管、容器から引火点の低い可燃性液体が漏洩し、気化し、空気中で可燃性予混合気を形成し、何らかの着火源により着火する。
- ③容器内に、引火点の低い可燃性液体が貯蔵されており、液面上に可燃性予混合気が形成されている。何らかの着火源により着火する。
- ④容器内に、引火点の低い可燃性液体が貯蔵されており、液面上に可燃性予混合気が形成されている。可燃性液体を容器から抜き取った後であっても、容器内に可燃性予混合気が存在し、何らかの着火源により着火する。
- ⑤細かい粉が空気中に舞い上がり、何らかの着火源により着火する。
- ⑥引火点の高い可燃性液体の流れる配管に亀裂ができ、亀裂から可燃性液体がミスト状に噴出する。何らかの着火源により着火する。
- ⑦可燃性液体の入っている容器から外部に蒸気が流出する。蒸気が滞留し、可燃性予混合気が形成され、何らかの着火

源により着火する。

①から⑦が原因と推定された災害の事例を文献1に示した。ここでは、低引火点の可燃性液体がほぼ密閉された区画内の床面上に漏洩し、気化し、区画内に可燃性予混合気が形成され、着火した場合を想定する。着火すると、火炎が区画内を伝ばする。区画内の圧力が上昇すると、区画の一部が壊れ、区画内の気体が外部に噴出する。このとき火炎が噴出することもある。このように、いわゆる、ガス爆発の現象が起こる^{2,3)}。区画内にシート状の可燃性固体を設置し、区画内を伝ばする火炎により、区画内の可燃性固体にどのような痕跡が残るかを実験的に調べ、その結果を文献1で報告した。ガス爆発では、外部に火炎が噴出することがある。区画外にシート状の可燃性固体を設置し、外部に噴出した火炎により、可燃性固体にどのような痕跡が残るかを実験的に調べることにした。そのために、実験用の区画を作り、区画内に可燃性予混合気を形成させ、着火した。着火すると、火炎が区画内を伝ばし、区画の一部が壊れ、火炎が外部に噴出するようにした。区画の外に短冊状の可燃性固体を設置し、噴出する火炎によりどのような痕跡が残るかを実験的に調べた。

2. 実験装置及び方法

実験装置として、ステンレス製容器を使用した。内寸は20cm×20cm×20cm、外寸は21.4cm×21.4cm×21.4cmである。図1に示すように、ステンレス製容器の上面には窓(16cm×16cm)があり、側面の2面にも窓(16cm×16cm)がある。側面をA面、B面とし、上面をC面とする。ステンレス容器の外側から、両面テープと養生テープを使い、窓にポリエチレンシート(厚さ0.1mm)を貼り付けることによ

り窓をふさぎ、ステンレス容器を密閉した。ステンレス製容器の内部の床面にステンレスシャーレを設置し、ステンレスシャーレ内にヘキサン(和光純薬鹿1級)を注ぎ、ヘキサンが気化するのを待った。気化を早めるために、ステンレスシャーレの下にカートリッジヒーターを1本設置し、加熱した。カートリッジヒーターの最大の出力は、電圧100Vで120Wであるが、変圧器を介することにより電圧25Vで使用した。ワットチェッカー付き電源タップを使い簡易に電力消費を測定したところ、電圧25Vでは、7Wであった。ステンレスシャーレ内のヘキサンがすべて気化した後に、ステンレス製容器の内部のほぼ中央で電気火花を発生させることにより着火した。電気火花を発生させるために使用した変圧器の仕様を以下に示す。

名称	燃焼器具用変圧器
製造	長野愛知電機
形式	IG-CD162B
形番	ATN110A-1
時間定格	連続
1次電圧	100・200V
2次電圧	6kV
周波数	50・60Hz
容量	155・120VA
2次短絡電流	21・16mA

ステンレス製容器にポリエチレンシートを貼り付ける際に、B面の貼り付けを他の面よりも弱くした。このようにして内部

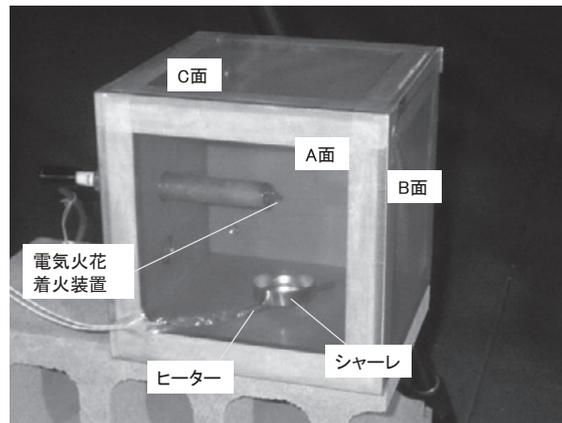


図1 実験に使用したステンレス製容器

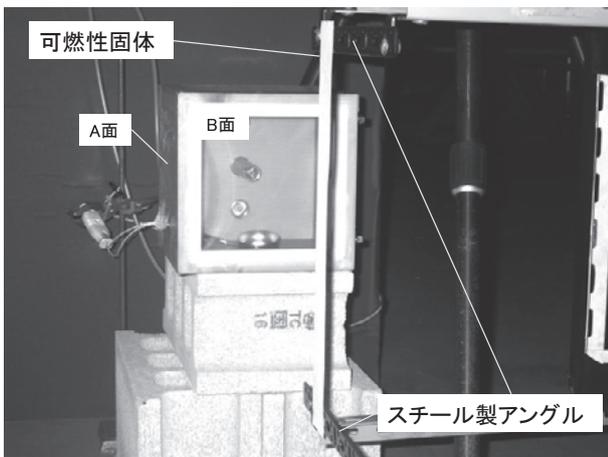


図2 B面の方向から見たステンレス製容器とその外部に設置した可燃性固体

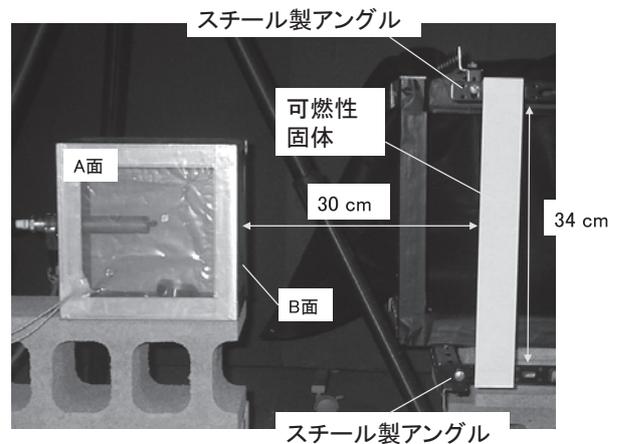
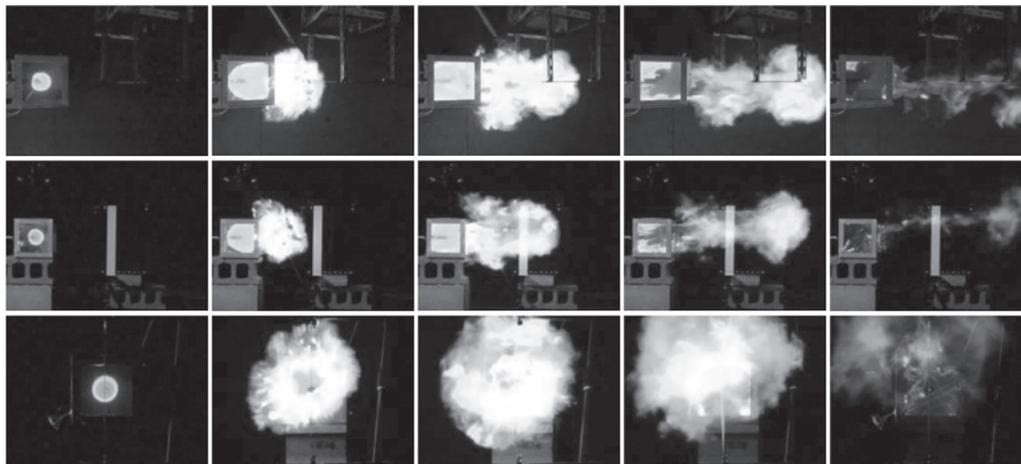


図3 A面の方向から見たステンレス製容器とその外部に設置した可燃性固体



t=4/240 s 内部で火炎が伝ばする
 t=12/240 s 火炎が外部に噴出する
 t=21/240 s 噴出した火炎が可燃性固体を覆う
 t=29/240 s 噴出した火炎が可燃性固体をほぼ通過する
 t=36/240 s 噴出した火炎がほぼ見えなくなる

上段:C面を撮影, 中段:A面を撮影, 下段:B面を撮影

図4 ろ紙を使用した場合における火炎の様子

での圧力が上昇しポリエチレンシートが剥がれる際にB面が剥がれるようにした。また、内部の攪拌は行わなかった。

図2と図3に示すように、実験装置の外に可燃性固体を設置するための金属製の枠を置いた。枠はスチール製アングルを使い作成した。短冊状の可燃性固体1枚を枠に両面テープで貼り付けた。可燃性固体として、ろ紙(厚さ:0.20mm)、ポリエチレンシート(厚さ:0.05mm)、ポリ塩化ビニルシート(厚さ:0.05mm)、テフロンシート(厚さ:0.05mm)、キムタオル(厚さ:0.075mm、日本製紙クレシアが製造販売している紙製のウエス)を使用した。短冊状の可燃性固体の幅は5cmとした。キムタオルの長さは38cmとし、それ以外の長さは40cmとした。キムタオルは出荷時には4枚重ねとなっているのを引き剥がし1枚にした。引き剥がした結果、表面には毛羽のようなものができたが、そのままにした。B面から可燃性固体の端までの距離を30cmとした。

高速度ビデオ撮影の機能があるデジタルカメラを使用し、A面、B面、C面を同時に撮影した。撮影速度は毎秒240コマとした。得られた画像を解析した。

3. 結果及び考察

ステンレス製容器の内部に形成された可燃性予混合気に着火すると、火炎が内部を伝ばした。内部の圧力が上昇すると、B面に貼り付けたポリエチレンシートの一部が剥がれ、火炎が外部に噴出した。噴出する様子は、内部で気化したヘキサン量、すなわち、内部でのヘキサンの濃度により変化した。ヘキサンの量を変化させながら、火炎が噴出する様子を観察したところ、ヘキサンを1g気化させた際に、外部に

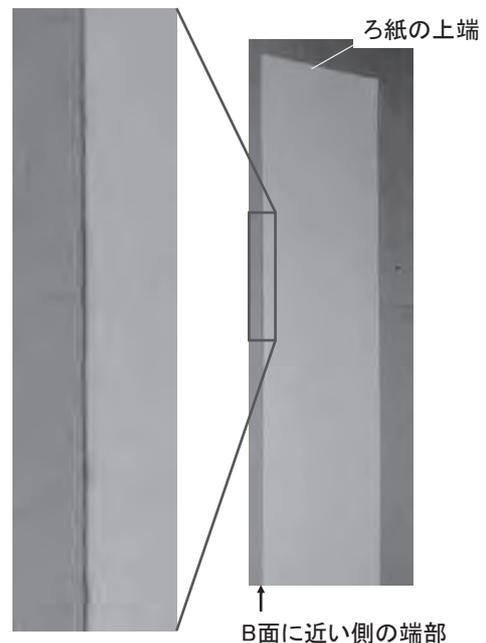
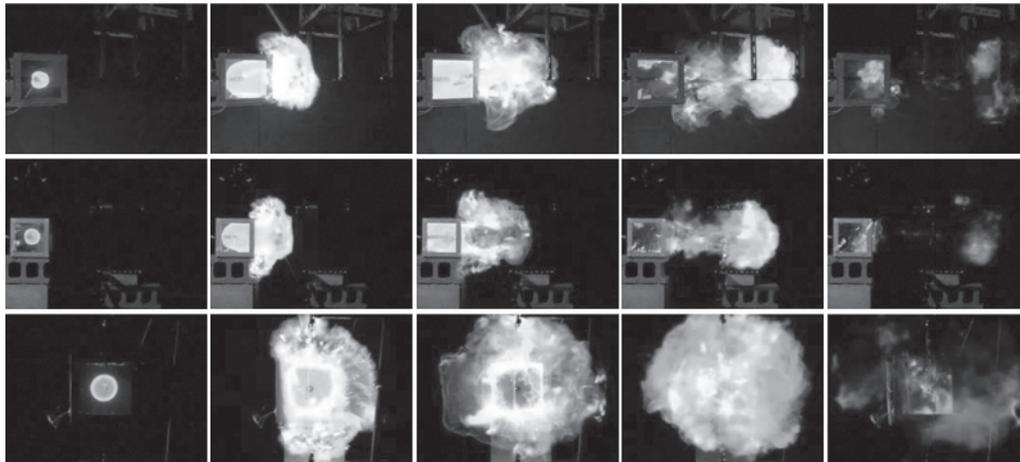


図5 実験終了後のろ紙の様子

噴出した火炎が最も大きかった。本実験は、ヘキサンを1g気化させて行うこととした。このときのヘキサンの濃度は3.5%であった。

外部に設置する可燃性固体として、ろ紙を使用した場合における火炎の様子を図4に示す。tは着火からの経過時間である。火炎は外部に噴出した後、ろ紙を覆い、ろ紙を通過し、見えなくなった。実験終了後のろ紙は実験前と比べ、ほとんど



t=4/240 s 内部で火炎が伝ばする
 t=13/240 s 火炎が外部に噴出する
 t=22/240 s 噴出した火炎が可燃性固体を覆う
 t=35/240 s 噴出した火炎が可燃性固体をほぼ通過する
 t=47/240 s 噴出した火炎がほぼ見えなくなる

上段:C面を撮影, 中段:A面を撮影, 下段:B面を撮影

図 6 ポリエチレンシートを使用した場合における火炎の様子

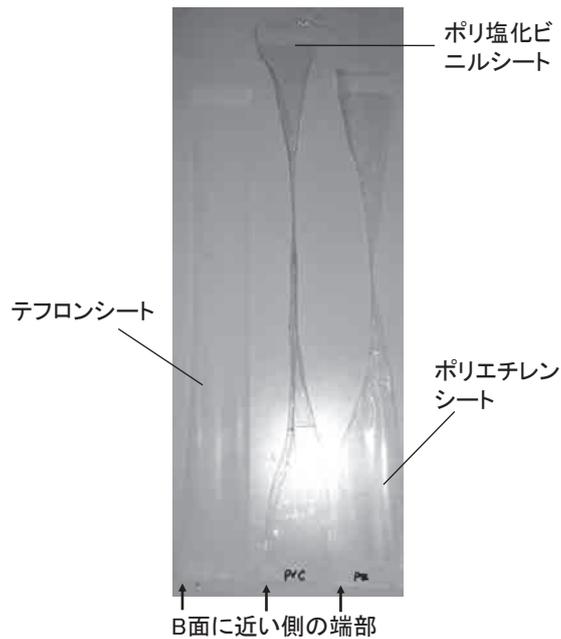


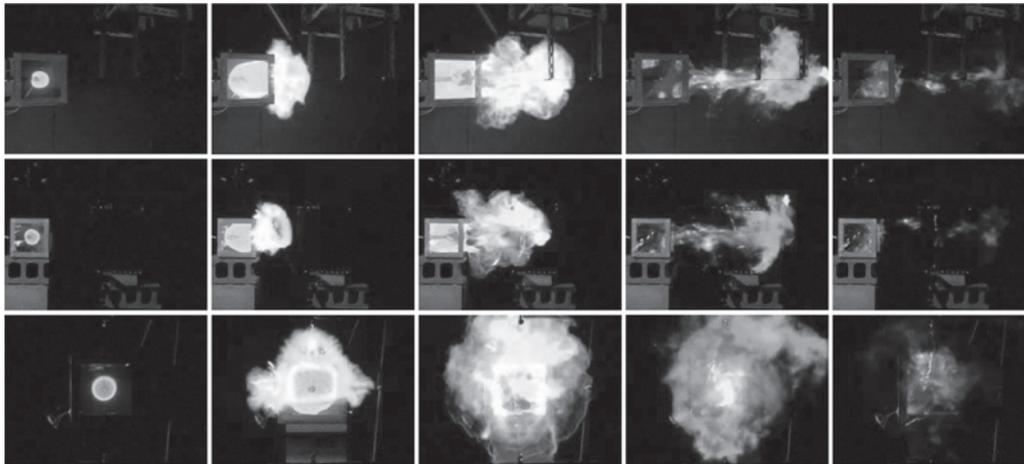
図 7 実験終了後のポリエチレンシート、ポリ塩化ビニルシート、テフロンシートの様子

ど変化がなかった。拡大して観察すると、図 5 に示すように、B 面に近い側の端部の一部が黒く変色することがあった。過去の実験¹⁾では、火炎が伝ばした後に区画内の温度が高い状態で維持されたために、区画内に設置したる紙が燃焼を開始した。本実験では、火炎が通過すれば温度が下がるので、区画外に設置したる紙は燃焼しなかった。

外部に設置する可燃性固体として、ポリエチレンシートを

使用した場合における火炎の様子を図 6 に示す。火炎は外部に噴出した後、ポリエチレンシートを覆い、ポリエチレンシートを通過し、見えなくなった。図 7 に示すように、ポリエチレンシートは火炎に覆われていた部分のあたりが溶融し収縮していた。

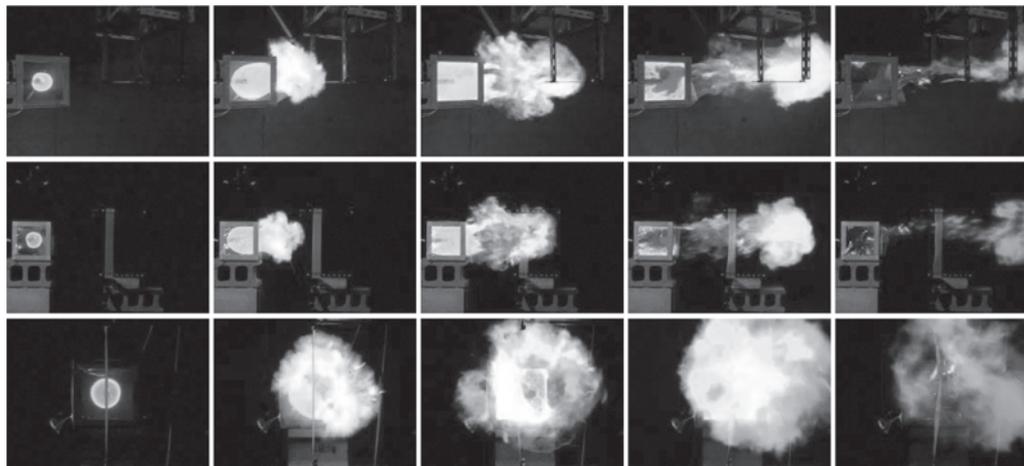
外部に設置する可燃性固体として、ポリ塩化ビニルシートを使用した場合における火炎の様子を図 8 に示す。火炎は



t=4/240 s 内部で火炎が伝ばする
 t=12/240 s 火炎が外部に噴出する
 t=25/240 s 噴出した火炎が可燃性固体を覆う
 t=40/240 s 噴出した火炎が可燃性固体をほぼ通過する
 t=48/240 s 噴出した火炎がほぼ見えなくなる

上段:C面を撮影, 中段:A面を撮影, 下段:B面を撮影

図 8 ポリ塩化ビニルシートを使用した場合における火炎の様子



t=5/240 s 内部で火炎が伝ばする
 t=12/240 s 火炎が外部に噴出する
 t=23/240 s 噴出した火炎が可燃性固体を覆う
 t=34/240 s 噴出した火炎が可燃性固体をほぼ通過する
 t=42/240 s 噴出した火炎がほぼ見えなくなる

上段:C面を撮影, 中段:A面を撮影, 下段:B面を撮影

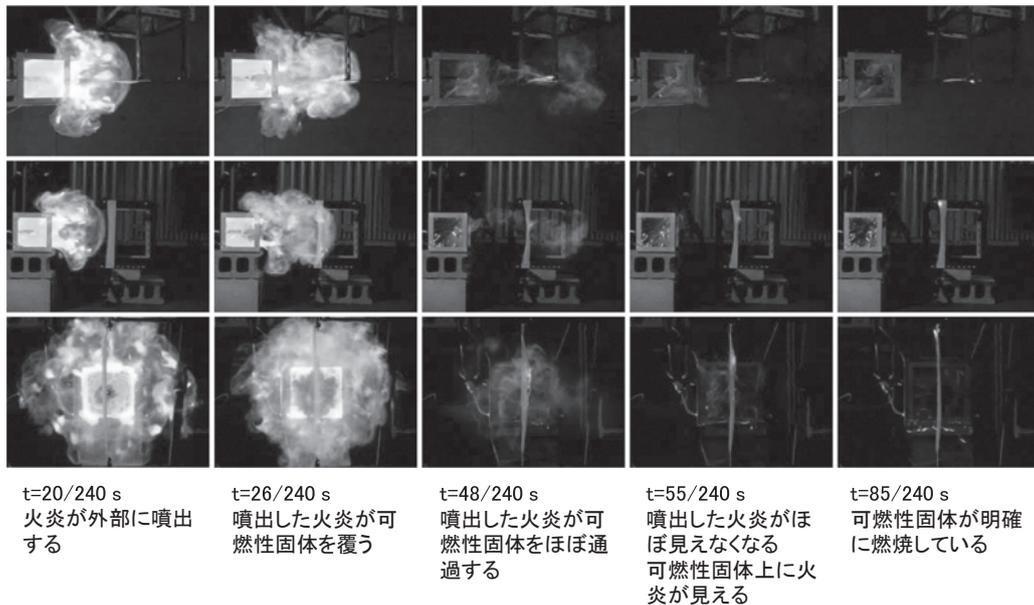
図 9 テフロンシートを使用した場合における火炎の様子

外部に噴出した後、ポリ塩化ビニルシートを覆い、ポリ塩化ビニルシートを通過し、見えなくなった。図 7 に示すように、ポリ塩化ビニルシートは火炎に覆われていた部分のあたりが溶融し収縮していた。

過去の実験¹⁾では、ポリエチレンシートとポリ塩化ビニルシートが区画内に設置された場合、伝ば火炎からの熱と、火炎後方の燃焼生成気体からの熱により、溶融した。本実験

では、同様に、火炎が通過する際に受ける熱により、溶融した。

外部に設置する可燃性固体として、テフロンシートを使用した場合における火炎の様子を図 9 に示す。火炎は外部に噴出した後、テフロンシートを覆い、テフロンシートを通過し、見えなくなった。撮影した画像をみると、火炎が通過した直後では、テフロンシートは伸びていた。図 7 に示すように、実験終了後のテフロンシートは、実験前と比べほとんど変化



上段:C面を撮影, 中段:A面を撮影, 下段:B面を撮影

図10 キムタオルを使用した場合における火炎の様子

がなかった。本実験でのテフロンシートに関する結果は、過去の実験¹⁾と同様である。

外部に設置する可燃性固体として、キムタオルを使用した場合における火炎の様子を図10に示す。火炎は外部に噴出した後、キムタオルを覆い、キムタオルを通過し、見えなくなった。噴出した火炎が通過した後、キムタオルの表面の一部に火炎があった。表面にあった火炎が拡がり、キムタオル全体が燃えた。着火前には、キムタオルの表面には毛羽のようなものがあった。噴出した火炎がキムタオルを覆っている間に、毛羽のような燃えやすいものが着火され、噴出した火炎が通過した後も、毛羽の燃焼が継続したと思われる。過去の実験¹⁾では、表面に毛羽のようなものあるキムタオルは使用しなかった。区画内に設置していれば、着火した可能性はある。

4. まとめ

爆発が発生した場合、どのような痕跡が残るかについて知るために、小規模な爆発実験を行った。低引火点の可燃性液体が、ほぼ密閉された区画内の床面上に漏洩し、気化し、区画内に可燃性予混合気形成され、着火した場合を想定した。着火すると、火炎が区画内を伝ばする。区画内の圧

力が上昇すると、区画の一部が壊れ、火炎が外部に噴出する。区画の外に短冊状の可燃性固体を設置し、噴出する火炎によりどのような痕跡が残るかを実験的に調べた。火炎は外部に噴出した後、可燃性固体を覆い、通過し、見えなくなった。可燃性固体としてろ紙を使用した場合、ろ紙の端部の一部が黒く変色することがあった。ポリエチレンシートとポリ塩化ビニルシートを使用した場合、実験終了後、溶融し収縮した。テフロンシートを使用した場合、実験終了後は、実験前と比べほとんど変化がなかった。キムタオルを使用した場合、キムタオル全体が燃えた。表面にあった毛羽のような燃えやすいものが、噴出した火炎により着火され、火炎が通過した後も毛羽の燃焼が継続し、拡がったと思われる。

5. 参考文献

- 1) 鈴木健: 小型模型を使用したガス爆発実験について, 消防研究所報告, No.130, pp.43-66, 2021
- 2) 平野敏右: ガス爆発予防技術, 海文堂, 1983
- 3) 佐藤研二: 爆発防止実用便覧, サイエンスフォーラム, 1983, pp.24-35

Experiments on Gas Explosion Using a Small Enclosure -Effect of Ejected Flames-

(Abstract)

Takeshi Suzuki

(Accepted July 31, 2023)

Small-scale explosion experiments were conducted to find out what traces would be left after an explosion occurred. A flammable mixture of hexane and air was formed in an enclosure (inner dimensions: 20 cm × 20 cm × 20 cm) and was ignited by an electric spark. A flame spread in the enclosure. When the pressure in the enclosure increased, part of the enclosure broke and a flame was ejected outside. A sheet of flammable solid was placed outside the enclosure and experimentally examined what traces were left by the ejected flame. When the flame was ejected outside, it covered the flammable solid, passed through it, and disappeared. When a sheet of filter paper was used as a flammable solid, a part of the edge of the filter paper sheet turned into black. When a polyethylene sheet and a polyvinyl chloride sheet were used, they melted and shrank after the ejected flame disappeared. When a Teflon sheet was used, there was almost no change after the ejected flame disappeared. When a sheet of paper towel was used, the entire sheet burned. It is thought that flammable objects on the fuzzy surface were ignited by the ejected flame, and the combustion continued after the flame passed.

消防研究所報告

通 卷 132 号

令和 5 年 9 月 29 日発行

禁無断転載

編 集
発 行

消防庁 消防研究センター

〒182-8508 東京都調布市深大寺東町4-35-3

電話 (0422) 44-8331 (代表)

<https://nrifd.fdma.go.jp>

印 刷

(株)三州社

〒105-0012 東京都港区芝大門1丁目1番21号



消防庁 消防研究センター
〒182-8508 東京都調布市深大寺東町4-35-3

<https://nrifd.fdma.go.jp>

National Research Institute of Fire and Disaster
35-3, Jindaiji Higashimachi 4-chome,
Chofu Tokyo 182-8508 Japan