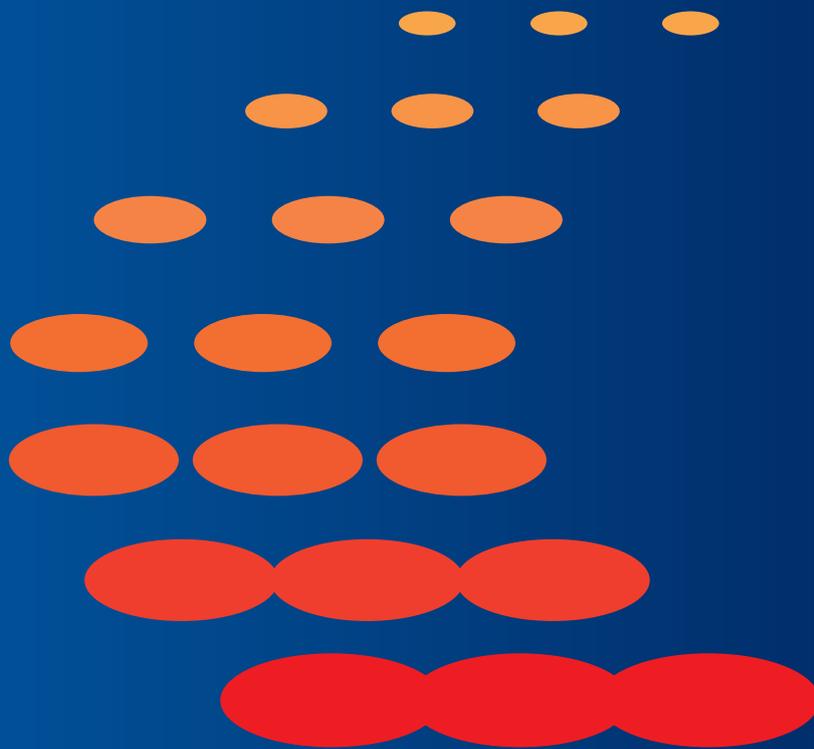
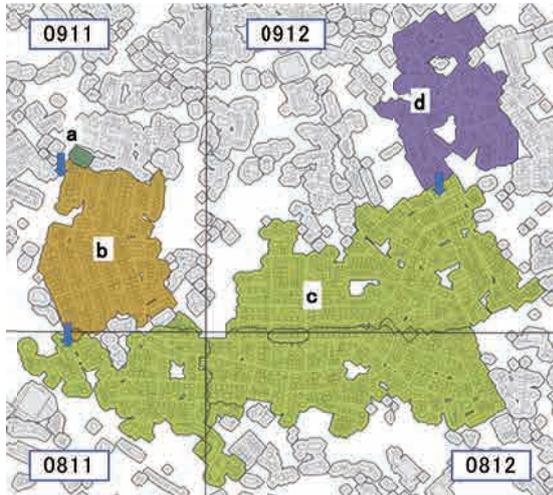

消防研究所報告

通 卷 130号

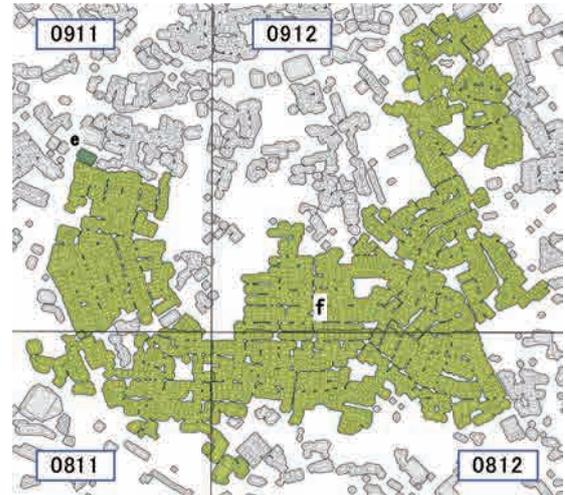
2021年12月



Report of National Research Institute
of Fire and Disaster



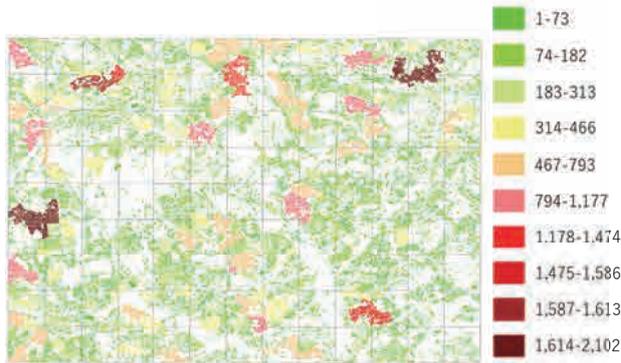
(1) 本報の計算手法により構築された延焼クラスタの例
An example of fire spreading clusters created by the method considering the one-way fire spreading.



(2) 既報の計算手法により構築された延焼クラスタの例
An example of fire spreading clusters created by the previously reported method.

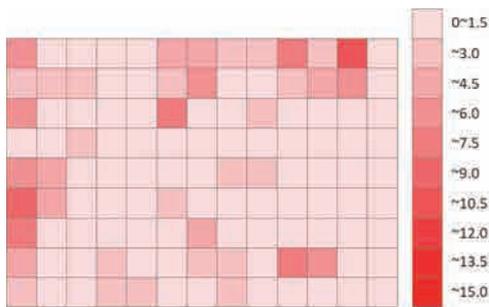
計算手法の違いにより分割されて作成される延焼クラスタの例 本文 29 ページ参照

An Example of differences in fire spreading clusters created due to differences in calculation methods. See also pages 29.

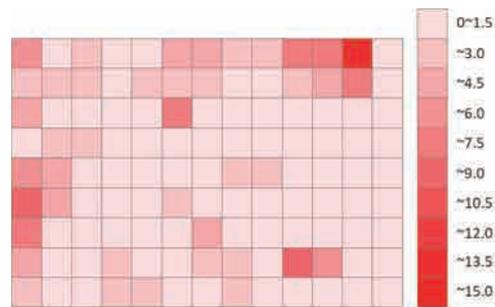


(1) 各棟延焼方式の市街地火災延焼シミュレーションを用いて対象地域の各防火木造建物に出火点を設定してシミュレーションを繰り返した結果から得られた各建物の焼失回数 (当該建物から出火した場合を含む)

The number of times each building was burned (including the case where a fire broke out from the building) obtained from the result of repeating the urban fire simulation by setting the fire point for each building in the target area.



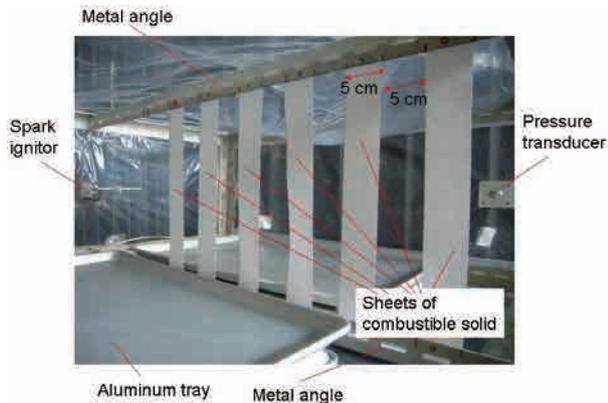
(2) 提案手法を用いて計算したメッシュごとの焼失棟数
The number of burnt buildings per mesh calculated by the method considering the one-way fire spreading.



(3) 既報の手法を用いて計算したメッシュごとの焼失棟数
The number of burnt buildings per mesh calculated by the previously reported method.

対象領域内で火災が 1 件発生するものとした場合の焼失棟数の推定結果の比較 本文 30 ページ参照

A comparison of estimation results of the burnt buildings number (assuming that one fire occurs in the target area). See also pages 30.



ガス爆発実験装置 (試料:ろ紙) 本文 51 ページ参照

Experimental setup of gas explosion test.

Sheets of filter paper are set inside. See also pages 51.



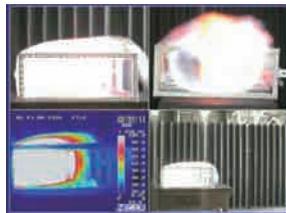
火炎伝ば後の様子 実験 c1 試料の種類 ポリ塩化ビニルシート

本文 59 ページ参照

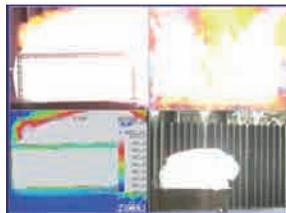
Polyvinyl chloride sheets after flame spread. See also pages 59.



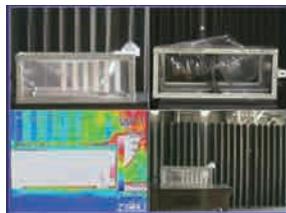
(1)
t=0
Flame spread starts.



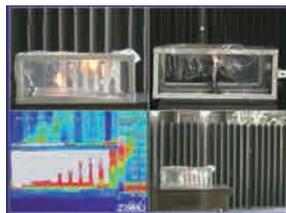
(2)
t=2/30 s
Opening is made.



(3)
t=3/30 s
Flames are ejected.



(4)
t=20/30 s
Flame is not seen.



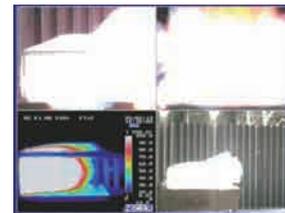
(5)
t=35/30 s
Filter papers are ignited.



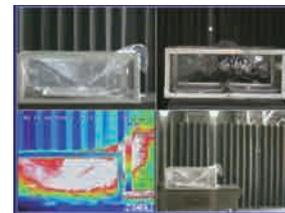
(1)
t=0
Flame spread starts.



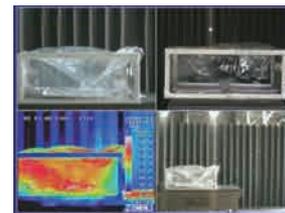
(2)
t=2/30 s
Opening is made.



(3)
t=3/30 s
Flames are ejected.



(4)
t=21/30 s
Flame of hexane is not seen. PVC sheets melted and dropped.



(5)
t=35/30 s
Smoke is generated from PVC.

火炎伝ばの様子 実験 a1 試料の種類 ろ紙 本文 52 ページ参照
Flame spread phenomena, Specimen: Filter paper sheets.
See also pages 52.

火炎伝ばの様子 実験 c1 試料の種類 ポリ塩化ビニルシート 本文 59 ページ参照
Flame spread phenomena, Specimen: Polyvinyl chloride sheets.
See also pages 59.

目 次

論文

消防隊員の屋内進入にかかる警防規程に関する調査

大津 暢人、新井場 公德、北後 明彦、阿部 伸之、田村 裕之、原島 裕貴 …………… (1)

技術報告

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

高梨 健一、細川 直史 …………… (11)

燃焼条件に応じた鉱物油の GC による検出と採取位置に関する研究

佐藤 康博、塚目 孝裕、長谷川 巧 …………… (33)

小型模型を使用したガス爆発実験について

鈴木 健 …………… (43)

— Contents —

[Paper]

- Survey on Firefighting Regulations about Indoor Entry by Firefighters at Building Fire Sites
Nobuhito Ohtsu, Kiminori Araiba, Akihiko Hokugo, Nobuyuki Abe,
Hiroyuki Tamura, and Yuuki Harashima (1)

[Technical Report]

- A Consideration of the Fire Spread Cluster Construction Method Using Directed Connected Graphs
and the Earthquake Fire Damage Estimation Method to Add a Function to the Wide-Area Earthquake Damage
Estimation System
Ken-ichi Takanashi and Masafumi Hosokawa (11)
- Study on the Detection Result for Kerosene by GC Analysis Depending on Combustion Conditions and Sample
Collection Point
Yasuhiro Sato, Takahiro Tsukame, and Takumi Hasegawa (33)
- Experiments on Gas Explosion Using Small Enclosures
Takeshi Suzuki (43)

論文

消防隊員の屋内進入にかかる警防規程に関する調査

大津 暢人、新井場 公德、北後 明彦*、阿部 伸之、田村 裕之、原島 裕貴

(令和3年10月8日 受理)

全国47の都道府県庁所在地管轄消防本部を対象に、警防規程の記載内容に関する調査を行ったところ、全47本部から回答があった。34本部72%において屋内進入に関する項目の規程類への記載があった。火災現場における面体装着は、「屋内進入前」を選択した本部が最も多く(11本部52%)、次いで「濃煙熱気内への進入前」、「小隊長が決断」であった。屋内進入に関する項目の規程類への記載の有無と、管轄市区町村数、職員数、管轄人口、火災件数等との関係についてクロス集計した結果、それらの数が多いほど屋内進入に関する項目の規程類に記載している本部の割合が増加していることが明らかになった。

1. はじめに

1.1. 背景

建物火災現場における警防活動は、有効注水や救助活動のため消防隊員^注による屋内進入を伴う場合がある。屋内進入には濃煙熱気や建材落下等、様々な危険性が伴う。火災現場に存在する危険性から消防隊員の安全を確保し任務を遂行するための一つの方法として、装着すべき装備、進入管理方法および、局面変化時の対応方法を事前に規定し、それに基づいた訓練や警防活動を行うことが挙げられる。消防隊員の安全確保については、警防規程や各種マニュアル等(以降、「規程類」という)に基づいて実施されることが多い。

しかし、自治体消防の原則や地域特性から、規程類に記載された項目は全国様々である。そこで本調査では、消防隊員の屋内進入時の安全確保について規程類に掲載された項目を明らかにすることを目的とする。全国の消防本部が本調査を活用し、より適切な項目を規程類に取り入れることや、また一方で、既存の方法の価値を再認識することおよび、それらに基づいた警防活動を行うことによって、今後の建物火災現場における消防隊員の安全確保の一助とすることが可能となる。

1.2. 先行研究

火災現場における消防隊員の安全確保については、これ

^注 消防隊員とは、狭義では現場出動する消防吏員で、かつ、放水隊に属する小隊長と機関員を除いた者の意で使用されるが、本調査では広義の現場出動する消防吏員と定義する。

* 神戸大学都市安全研究センター

までも多くの先行研究や事例報告がある。しかし、規程類に関する先行研究は現時点では見当たらない。安全確保に関する研究と実践が、進展することを期待し、戦略立案、放水と安全、局面変化と緊急脱出の順に、周辺分野も含めて整理する。

1.2.1. 進入管理と戦略立案に関する先行研究

環境に活動が制約を受ける現場における戦略立案の重要性に関する文献は、以下が挙げられる。

Jasonら¹⁾は、閉鎖区画への進入前に慎重なリスク評価と進入管理対策が必要であると述べている。

Heskethら²⁾は、林野火災現場における防御戦略を立案するためのトレーニング方法について調査を行った結果、現場における個人の意思決定は以前に遭遇した事案に大きく依存するとの見解を示している。

このことから、経験の少ない隊員の事故を予防するためには、個々の隊や隊員による事例研究と、その教訓を反映して手順を標準化し運用するための規程類が重要である。

1.2.2. 放水と屋内進入時の安全に関する先行研究

建物火災現場における屋内進入時の放水と消防隊員の安全に関する事例研究は多数存在するが、本調査に関連する分野の先行研究を以下に整理する。

竹内³⁾は、1977年東京都江東区で発生した火災について、工事関係者が倉庫上方のC型鋼の胴差しにアセチレン溶断機で穴を開けたところ、断熱材として吹き付けてあったポリウレタンフォームに着火したことが原因で、その後爆燃により消防隊員21名が受傷したと述べている。要救助者がいない場合は屋外から放水をすることおよび、屋内進入は複数の筒先を持っておこなうことを竹内は教訓としている。

複数の筒先を投入する屋内進入に関連して、安全性向上

のために援護放水についての実験もなされている。木田ら⁴⁾は、援護放水による隊員の安全性に関して、ガンタイプと21型改ノズルの2種類を用いて実験を行い、ノズル種別や放水流量に関わらず援護放水によって進入隊員への熱的影響が抑制された、としている。要救助者がいない場合は屋外からの放水を行うことに関連して、清水ら⁵⁾は、フラッシュオーバーが発生した室内への屋外からの効果的な放水方法について棒状および霧状の放水展開角度ごとに検証し、霧状30°が最も温度降下に効果的であると報告している。

1.2.3. 局面変化と緊急脱出に関する先事例研究

ホースやロープを使用した退出経路の明示と、退出時にそれらを伝えることの重要性を示した文献としては、以下の2点が挙げられる。

竹内⁶⁾は、1983年に発生した名古屋地下鉄栄駅変電室における2名の殉職火災について、屋内進入時に2名の隊員間のみならず屋外までつながる検索ロープを展張することの重要性を解説している。

竹内⁷⁾は、2002年に東京都の京浜島ゴミ処理センター火災で1名殉職4名受傷した事案について、燃焼中のゴムの固まりが落下したことにより下方のごみに着火し、濃煙熱気が急速に下降してきた環境要因と、空気呼吸器の残圧低下という個人装備的要因を挙げている。さらにボンベ交換のための退出時に、視覚による退出経路の確認が困難な状況下で触覚による経路確認の手段として用いるべき敷設ホースから離れてしまったという人的要因についても考察している。また同事案は、工場・倉庫等内部構造の空間把握と火災進展の予測が困難な対象物に進入する際の危険性についても認識する必要があるとの教訓を与えている。

1.3. 目的

前項で見てきたように、消防職員の屋内進入時の安全管理やその周辺分野に関連する先行研究および、そのための活動技術に関する研究、国内における個々の事例研究は多数存在する。

しかし、屋内進入に関して、その行動規範となる規程類についての先行研究は、見当たらない。

そこで本調査では、全国47都道府県の都道府県庁所在地管轄消防本部を対象として、書面による調査の実施および警防規程の提供を依頼し、回答があった全47本部(以降、「対象本部」という)について、規程類に記された屋内進入に関する項目を把握することを目的に、屋内進入にかかる事項の規程類への記載状況、火災現場における面体装着の決断方法、屋内進入関連事項の規程類への記載有無と、管轄人口、管轄市区町村数、職員数、火災件数等との関係に着眼して整理する。

2. 方法

本調査では、全国の都道府県庁所在地を管轄する47の

消防本部を対象に、2020年9月3日から11月30日までの間、書面による調査の実施および規程類の提供を依頼し、回答があった内容について、その結果を分析した。調査の概要をTable 1に示す。また、経時変化や市町村合併、広域化の影響もあるが、母数の目安として、令和3年度消防現勢⁸⁾による調査対象本部の管轄人口、構成市町村数及び職員定数並びに今回集計した1990年1月1日から2019年12月31日(統計がある直近30年間)の火災件数及び建物火災件数を末尾の付表に示す。

Table 1 Survey outline.

Survey title	Survey on firefighting regulations
Term	September 3 - November 30, 2020
Objectives	47 Fire Departments that have jurisdiction over the location of the prefectural office
Ratio of responses	100%
Number of questions	52
Outline of questions	Basic information : Number of firefighters, Number of jurisdiction administrations, etc. Firefighting regulations : Facemasks, Controllar for indoor entry, Report by radio systems, Alert equipment, Number of parties, Hose diameter, Play pipe, Drastic phase change, Tank alert, Residual air pressure in tank, Emergency escape, etc. Fires: Number of fires, Number of building fires, Number of injured during public affairs, Number of line of duty deaths, etc.

調査項目は、52問で構成し、特記がない限り2019年12月31日現在の実態について問う内容とし、回答欄は選択式および記述式とした。規程類に関しては、屋内進入に該当する部分の提供を依頼した。

3. 結果および考察

3.1. 屋内進入に関する項目の規程類への記載

屋内進入に関する項目の規程類への記載の有無をFig.1に示す。

屋内進入に関する項目については、47本部のうち72%が「記載あり」、28%が「記載なし」と回答した。ただし、進入管理に当たる人員の配置に関する記載は49%にとどまった。

面体装着場所および、空気呼吸器に装着したボンベ残圧低下の警報鳴動時の対処方法については、40%が「記載あり」と回答した。ボンベ残圧低下の警報鳴動時にボンベ交換のために退出する際の退人数などの対処方法について「記載あり」と回答した12本部の回答内容は、「小隊員全員退出」が8本部、「相互に連絡し、減圧隊員が退出」が1本部、「退人数に関して記載なし」が2本部、「進入隊員全員が退出」が1本部であった。

緊急脱出方法については、34%の本部が「記載あり」と回答した。急激な局面変化について記載がある本部は全て、緊急脱出についても記載があった。急激な局面変化時の指揮所から出動隊員への周知方法の記載について「あり」と回答した32%の本部の周知方法(複数回答可)は、無線10、笛2、肉声、ロープ信号、携帯警報器が各1であった。無線の場合の傍受周波数範囲は、回答した14本部すべてが「全出動隊」と回答した。一方、急激な局面変化を見聞いた隊員から指揮所への伝達方法については「記載あり」が28%にとどまった。局面変化は指揮所から見聞できる位置で発生するとは限らないため、指揮所からのみならず、隊員からの伝達方法も同時に検討が必要であると考えらる。

緊急脱出時にホースラインを伝うよう記載している本部は23%であった。

緊急脱出時は単独脱出か、屋内進入中の他の職員と共に脱出するかについて「記載あり」と回答した7本部のうち、5本部が「小隊ごと」、1本部が「全出動隊」、1本部が「検索班単位」として脱出すると回答した。

筒先に直結するホースの内径については、19%が「記載あり」と回答した。

屋内進入前の無線送信に関しては、小隊ごとの送信について15%が「記載あり」と回答し、消防隊員ごとの送信について2%が「記載あり」と回答した。

倉庫火災や工場火災の屋内進入時、一カ所の進入口から進入する放水隊数については、1本部のみが「記載あり(2隊)」と回答した。この本部は過去に倉庫火災による殉職を経験しており、援護注水による隊員への熱的影響の緩和のため、事故調査委員会の報告書にしたがって上記を追記したとのことである。

ボンベ残圧が0MPaになった際の対処方法は、対象とした全ての本部が「記載なし」と回答した。

次に、空気呼吸器に接続された面体を装着する決断について、Fig.2に示す。面体は空気呼吸器と共に現場に携行するが、面体を顔面に装着しボンベ内の空気を消費し始める決断について対象本部で差異が見られた。

記載があった21本部中、「屋内進入前」を選択した対象本部が最も多く11本部52%、次いで「濃煙熱気内への進入前」、「小隊長が決断(した場所/時)」であった。選択肢として設定してあった「隊員個人の判断」を回答した対象本部はなかった。48%の本部が屋内進入中も面体を顔面に装着していない可能性がある。

屋内進入直前、進入管理員に報告する規程類記載の事項についての回答をTable 2に示す。最も多い回答から、「進入人員」、「進入時刻と退出予定時刻」、「ボンベ残圧」、「進入隊数」、「進入目的」、「警報装置確認」となった。

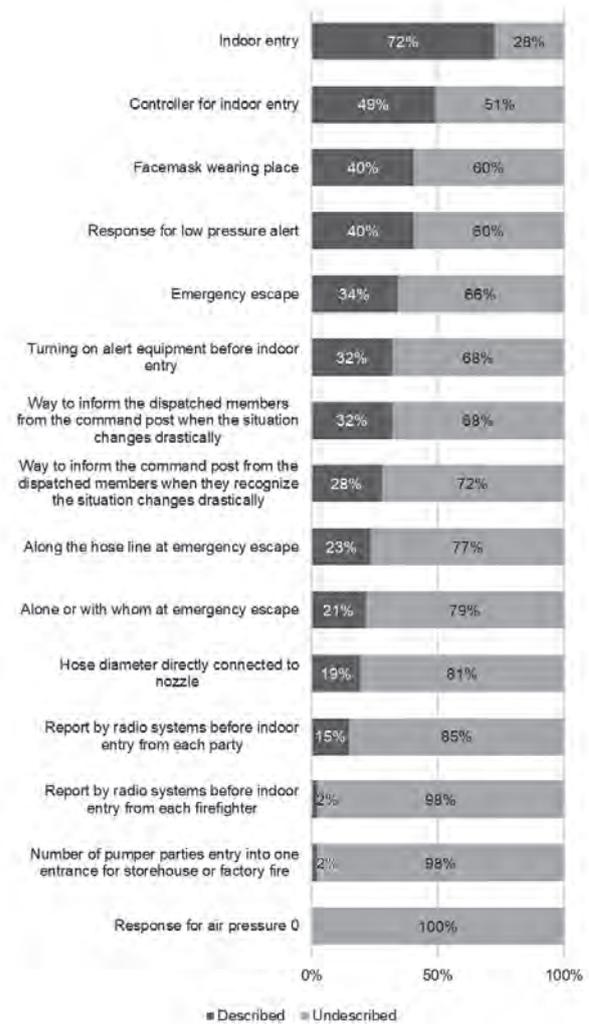


Fig.1 Described or undescribed each activity on firefighting regulations (N=47).



Fig.1 Described or undescribed each activity on firefighting regulations (N=47).

Table 2 Report items to indoor entry manager
(Multiple answers allowed).

Report items to indoor entry manager	
Number of firefighters	18
Entry and exit time	8
Residual air pressure	5
Number of parties	3
Purpose of entry	2
Alert equipment	2
Others	3

3.2. 記載有無と管轄市区町村数、職員数、火災件数等との関係

屋内進入に関する項目の規程類への記載有無と、他の主な調査項目との関係について、クロス集計した結果を本項で示す。なお、各項目のデータについて回答があった本部のみを対象にクロス集計を行ったため、それぞれの図において N 値は異なる。Fig.3 から Fig.10 については、おおよその傾向を見るために、限られたデータのサンプル数になるべく均等になるように、著者の判断で3つのクラスに分けた。

管轄自治体数と、規程類の屋内進入に関する記載の有無との関係を Fig.3 に示す。管轄市区町村数が 4 以上の消防本部は 80%にあたる 8 本部において屋内進入に関する記載がある。

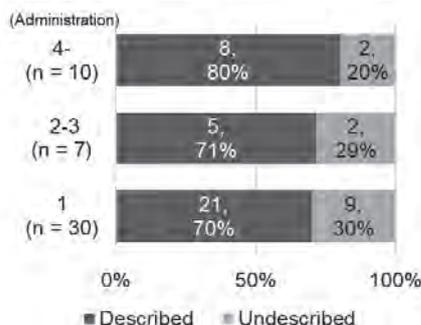


Fig.3 Number of jurisdiction administrations and description about indoor entry (N=47).

消防職員数と、規程類の屋内進入に関する記載の有無との関係を Fig.4 に示す。職員数 1,000 人以上の 12 本部は全て屋内進入に関する記載があった。

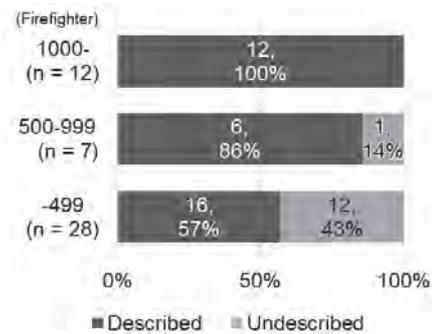


Fig.4 Number of firefighters (on December 31, 2019) and description about indoor entry (N=47).

管轄人口⁹⁾と、規程類の屋内進入に関する記載の有無との関係を Fig.5 に示す。管轄人口 100 万人以上の本部は全て屋内進入に関する記載があったが、50 万人未満の 28 本部に関しては 12 本部において記載がなかった。

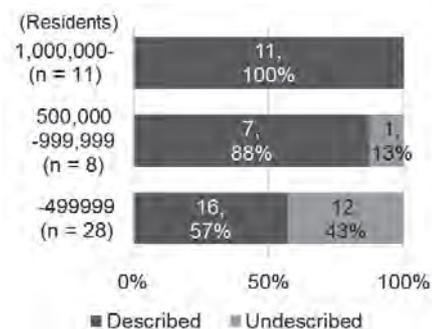


Fig.5 Number of jurisdiction population (on January 1, 2019) and description about indoor entry (N=47).

1990 年 1 月 1 日から 2019 年 12 月 31 日 (統計がある直近 30 年間) の火災件数と、規程類の屋内進入に関する記載の有無との関係を Fig.6 に示す。火災件数が多いほど記載がある本部が増加する傾向があった。

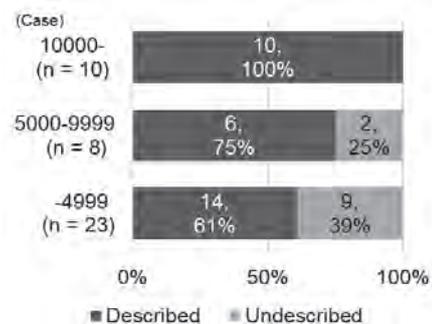


Fig.6 Number of fire cases in 30 years (from January 1, 1990 to December 31, 2019) and description about indoor entry (N=41).

1990年1月1日から2019年12月31日(統計がある直近30年間)の建物火災件数と、規程類の屋内進入に関する記載の有無との関係をFig.7に示す。建物火災が4,000件以上の12本部は全て屋内進入に関する記載があった。

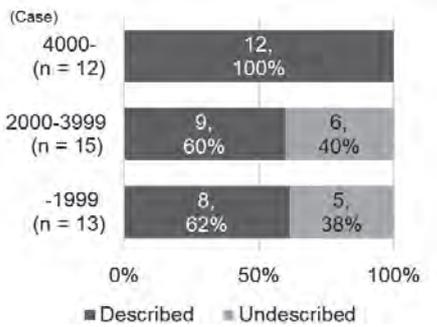


Fig.7 Number of building fire cases in 30 years (from January 1, 1990 to December 31, 2019) and description about indoor entry (N=40).

1990年1月1日から2019年12月31日(統計がある直近30年間)の火災出動における受傷件数と、規程類の屋内進入に関する記載の有無との関係をFig.8に示す。火災における受傷が40件以上の8本部は全て屋内進入に関する記載があった。

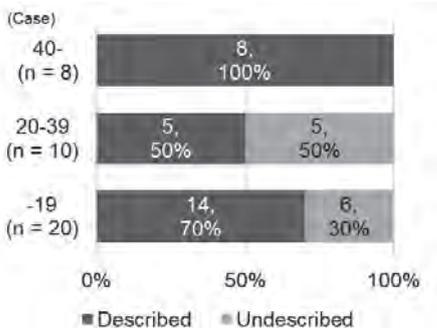


Fig.8 Number of firefighter injury cases in fire sight in 30 years (from January 1, 1990 to December 31, 2019) and description about indoor entry (N=38).

本調査において殉職事案ありと回答したのは21本部である。自治体消防設立(1948年)以来の殉職者数と、規程類の屋内進入に関する記載の有無との関係をFig.9に示す。殉職者数が5名以上の6本部は全て屋内進入に関する記載があった。

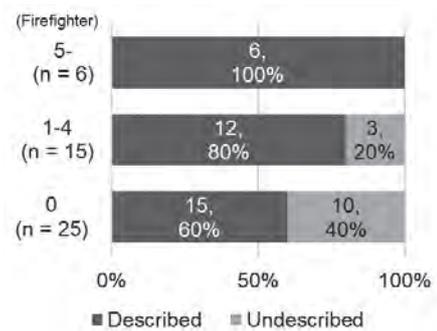


Fig.9 Number of line of duty deaths since administrative fire departments have established in 1948 and description about indoor entry (N=46).

火災出動における殉職事案ありと回答したのは17本部であった。自治体消防設立(1948年)以来の火災出動における殉職者数と、規程類の屋内進入に関する記載の有無との関係をFig.10に示す。殉職者数が5名以上の6本部は全て屋内進入に関する記載があった。

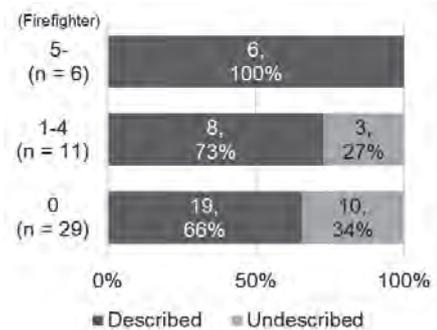


Fig.10 Number of line of duty deaths in fire sight since administrative fire departments have established in 1948 and description about indoor entry (N=46).

3.3. 規程類の記載内容

これまでに述べた項目に関する記載がある規程類の該当箇所の提供を依頼したところ、29本部から送付があった。その中から特徴的な記載を以下に挙げる。

複数の本部は、何らかの危険な事象や急激な局面変化が発生した場合に、無線や肉声、笛などによって連絡を取ることを明記している。さらに、A消防本部は、連絡が途絶した隊についての認識を以下の通り明記している。「連絡途絶隊: 連絡が途絶えた隊は、重大な危機に直面している場合がある。報告がないこと自体、危機を知らせる無言の合図と判断し、連絡がとれない場合は直ちに伝令を派遣するか、自ら出向して現状を確認しなければならない。」これは、回答のあった中では最も詳細に記載されていると考えられる一例であ

る。報告がない場合は被害がないのではなく、被害程度が甚大であるがゆえに情報を送る手段が機能しない、または送るとまがない場合があるが、その状況と判断基準を明確に規程類に掲載した点は参考になる。

次に、記載方法については、複数の消防本部の規程類において、紙幅の左側に活動要領、右側にその事項に係る事故事例を記しており、記載内容から外れた行動をとった場合に起こりうる事故についての関連付けが容易になっている。またそのうち、写真付きで好ましい事例と好ましくない事例を掲出しているものがある。

1カ所の開口部からの屋内進入に関して、救助隊が放水隊を伴って活動するよう定めた本部や、複数の筒先による放水を定めた本部があり、竹内³⁾の教訓と合致する。さらに、B消防本部は、1カ所の開口部からの進入放水隊数を2隊以上と規定している。

3.4. 教訓の水平展開

竹内は1983年名古屋地下鉄栄駅変電室火災⁶⁾および、2002年東京都京浜島ゴミ処理センター火災⁷⁾の教訓として、ホースやロープによる脱出経路の明示を挙げている。しかし、ホースによる脱出経路の明示を規程類に記載している本部は本調査では23%にとどまっている。記載されていない本部においても脱出経路の明示を行っている可能性はあるが、他の本部で発生した事故の教訓を水平展開し新たな同種の事故を予防するためにも、教訓と対策を共有する仕組みの検討が必要であると考えられる。

3.5. 規程類の網羅性と形骸化の回避

想定される状況と対応行動を詳細に規程類に記載した場合、教育訓練において標準化が容易になるという利点がある一方、記載事項が膨大になれば現場手順の煩雑性が増加することによって臨機応変な行動を阻害することや規程類が形骸化する懸念がある。

また、過去の経験則をもとに規程類を執筆した場合は、将来発生しうる事象に対しても網羅性が担保できているとは言えず、現場活動における実効性を伴った規程類の策定は網羅性だけでは担保し得ない点にも注意が必要である。建築構造や素材の変化に対応し、また火災現象の解明と現象の不確実性を踏まえた規程類のあり方について、検討していく必要があると考える。

3.6. 複数自治体を管轄する本部における標準化

本調査で対象とした47本部のうち、28本部は複数自治体を管轄する消防本部であるが、それらの本部は単独常備本部に比べて、屋内進入に関する記載がある割合が高くなっている。この点については、複数の自治体出身者や、組織文化が異なる複数の本部出身者が一つの組織で勤務することから、文書による技術の標準化が不可欠であった可能性がある。

なお、消防本部の設置形態は、組合消防、単独常備、委

託常備、広域連合の4種が存在するが、本調査では設置形態は設問項目とせず、管轄市区町村数のみに着目した。

消防本部が今後さらに広域化して管轄市区町村数が増加する状況下において、組織文化が異なる複数の消防本部出身者が一つの隊に配属になる場合にあっても安全が確保できるよう、技術の標準化が必要になる可能性があり、経験や考え方の共有のためにも、客観的な検討を深めていく必要がある。

4. まとめ

本調査では、全国47都道府県の都道府県庁所在地管轄消防本部を対象として、書面による調査を行ったところ、全47本部から回答があった。その結果、

対象47本部のうち34本部72%が屋内進入に関する項目の規程類への記載があった。屋内進入に関する項目の規程類への記載の有無と、管轄人口、管轄市区町村数、職員数、火災件数等との関係については、それらの数が多いほど屋内進入に関する項目の規程類に記載している本部の割合が増加している。

また、火災現場における面体装着の決断方法については、記載があった21本部中、「屋内進入前」を選択した対象本部が最も多く11本部56%、次いで「濃煙熱気内への進入前」、「小隊長が決断」であった。

本調査の結果を、全国の消防本部が規程類を作成または改正する際に参照し、規程類の内容をより充実、または反対に、重要な項目のみに特化し簡素化することによって、現場における実効性の担保に繋げることを期待したい。その際の留意点としては、本調査では規程類に掲載された屋内進入に関する個々の項目に着目したが、規程類の総量や記載項目と現場活動における実効性の関係については明らかにしていない。そのため、実効性を検討することなく規程類の総量や記載項目を増加させることが現場の安全性の向上に寄与するとまでは言えない。

本調査では、規程類の内容が、消防戦術や受傷、殉職の発生に影響があったかについては検討していない。また反対に、受傷や殉職の発生、その他の事象が規程類の改正に与えた影響についても検討していない。記載内容の変遷や改正の契機となった事案との関係、またその影響については、今後の課題としたい。

本調査で扱った屋内進入は、多様な現場活動の一要素に過ぎない。今後、火災現場における受傷や殉職の実態を明らかにするために、現場活動に影響を与える因子に関連付けてさらなる研究を行う必要がある。

謝辞

本調査にご協力いただいた、全国の都道府県庁所在地管轄消防本部の皆様には感謝申し上げます。

参考文献

- 1) Jason Selman, Jeffrey Spickett, Janis Jansz, Benjamin Mullins: “Confined space rescue: A proposed procedure to reduce the risks”, Safety Science, Vol. 113, pp.78-90, 2019.
- 2) B. Hesketh, G. Dewsnap, A. Neal, W. Joung, S. Crawford, R. Griffiths, T. Kirkpatrick: “Decision Making and Safety: Problems in predicting fire behaviour”, The 3rd International Wildland Fire Conference, final agenda, <https://gfmc.online/wp-content/uploads/3-IWFC-025-Hesketh.pdf> (reference on 20 August 2020), 2003.
- 3) 竹内吉平：災害の対応と教訓⑧消火活動中「爆燃」により消防隊員21名が受傷した火災，近代消防，46(9)，pp.108-111，近代消防社，2008
- 4) 木田哲夫，徳永敦司，根本昌平，渡邊茂男：援護放水による隊員の安全性に関する検証，消防技術安全所報，第47号，pp.68-75，東京消防庁消防技術安全所，2010.
- 5) 清水幸平，木田哲夫，町井雄一郎：延焼する室内に対する効果的な放水方法の検証（フラッシュオーバーを抑制する放水方法），消防技術安全所報，第55号，pp.31-38，東京消防庁消防技術安全所，2018
- 6) 竹内吉平：災害の対応と教訓②名古屋地下鉄栄駅変電室消防隊員殉職火災の概要，近代消防，47(10)，pp.74-77，近代消防社，2009.
- 7) 竹内吉平：災害の対応と教訓③京浜島ごみ処理センター火災の殉職事故，近代消防，47(11)，pp.102-105，近代消防社，2009.
- 8) 全国消防長会：令和3年版消防現勢，全国消防長会，2021.
- 9) 消防庁：1 全国各消防本部（局）組織概要地図，全国消防便覧，pp.3-52，2020.

付表 調査対象本部の現況

職員数(令和元年 12月31日現在)	管轄市町村数	管轄人口(人)	構成市町村数	職員定数(人)	火災件数合計	うち、建物火 災件数
488	5	300,001	5	502	2,519	1,634
579	8	463,722	8	580	3,471	2,516
410	1	303,637	1	410	2,844	1,731
258	3	268,728	1	258	2,295	1,448
286	1	275,646	1	290	3,062	1,930
340	2	290,328	1	341	3,519	1,961
455	1	520,974	1	463	6,229	3,294
406	1	335,055	1	406	2,769	1,561
927	1	975,508	1	946	10,424	3,726
423	1	451,018	1	428	3,139	2,183
372	1	261,601	1	356	2,550	1,698
328	4	297,145	4	335	4,304	2,242
488	4	395,333	1	472	4,379	2,620
662	5	541,446	1	638	6,259	3,426
2,326	1	2,327,723	1	2,413	29,851	15,723
318	1	344,144	1	333	3,202	1,768
1,781	1	1,400,720	1	1,816	8,173	6,162
3,545	1	2,730,420	1	3,615	38,798	26,812
1,549	1	1,515,590	1	1,460	20,325	10,637
401	1	365,166	1	410	4,106	2,740
251	1	200,842	1	260	2,447	1,295
761	2	719,081	1	814	7,596	4,481
250	1	190,663	1	249	1,611	911
497	3	477,697	1	500	5,171	2,771
456	1	509,483	1	458	5,298	3,503
393	1	325,218	1	369	4,131	2,723
1,089	1	1,603,043	1	1,103	12,466	8,782
490	1	477,448	1	490	4,113	2,498
284	1	316,344	1	346		
1,112	1	1,065,932	1	1,096	11,612	7,058
912	1	784,774	1	920	3,843	2,976
476	1	414,102	1	474	2,272	1,749
1,034	5	872,709	1	1,040	6,668	3,727
353	1	276,072	1	345	4,526	2114 件
375	1	354,721	1	412	2,971	1,721

職員数(令和元年 12月31日現在)	管轄市町村数	管轄人口(人)	構成市町村数	職員定数(人)	火災件数合計	うち、建物火 災件数
246	1	252,093	1	260	2,596	1,868
425	5	342,756	5	425	2,932	1,565
830	3	772,745	1	810		
374	3	428,318	1	339	4,925	
506	1	601,546	1	523	6,292	4,060
455	3	482,421	1	512	5,588	3,191
1,788	1	1,961,575	1	1,733	16,878	11,263
3,739	1	3,760,048	1	3,625	29,050	16,951
1,334	6	1,268,494	1	1,350	14,389	8,213
308	5	224,343	5	310	3,115	1,786
1,341	1	1,324,589	1	1,357	3,368	1,844
18,620	52	13,726,337	1	18,661	175,727	122,587

Survey on Firefighting Regulations about Indoor Entry by Firefighters at Building Fire Sites

(Abstract)

Nobuhito Ohtsu, Kiminori Araiba, Akihiko Hokugo*, Nobuyuki Abe,
Hiroyuki Tamura, and Yuuki Harashima

(Accepted October 8, 2021)

In this study, a document survey was conducted on the 47 fire departments' firefighting regulations in relation to indoor entry by firefighters at fire sites within buildings. The key findings were: (1) 72% of the 47 departments have documented rules concerning procedure of entry into burning buildings. (2) 18 fire departments have documented rules regarding the time and location of attaching a facemask when at a fire site, and the majority— 10 departments — express that a facemask should be attached "before entry into burning buildings." (3) Departments with a greater number of jurisdiction administrations provided more detailed descriptions about entry into burning buildings. The results of this survey can be used as a reference for each fire department to prepare or revise their rules. Furthermore, by enhancing the contents of the regulations or simplifying them by focusing on important items, it is possible to boost the effectiveness of firefighting activities at the fire site.

* Research Center for Urban Safety and Security, Kobe University

技術報告

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

高梨 健一、細川 直史

(令和3年10月14日受理)

我々は、既報¹⁾において広域版地震被害想定システムに対して大規模地震災害発生直後に実行する被害推定機能の一つとして延焼棟数の期待値(以下、焼失棟数という)を表示する機能を追加するために、大規模地震災害の被害想定で焼失棟数を求める手法として良く用いられている延焼クラスタ方式の考え方を利用して高速に計算を行う手法の検討結果について報告を行った。

既報では、従来の延焼クラスタ作成法と同様に建物周辺に延焼限界距離の半分の範囲のバッファを設定し、バッファの重なる2つの建物は相互に延焼するものとして延焼クラスタを構成した。この方法は2棟のうち一方の建物からのみ延焼が発生するような状況を再現できないことから、筆者らは、このような状況に対応可能な手法として、ノードと方向を持つリンクで構成される有向グラフを用いる計算手法についても検討を行ってきた。

本報では、検討した手法の基本的な内容と、既報と同様に広域版地震被害想定システムのメッシュ計算に対応させる手法を検討した内容について述べるとともに、横浜市青葉区周辺地域を対象としたデータの試作結果およびツールを作成して焼失棟数を計算した結果についても報告する。

1. はじめに

消防庁では、大規模地震が発生した際、具体的な被害情報の乏しい初動時において緊急消防援助隊に関する業務等の意思決定を行うために、簡易型地震被害推定システム等の情報を活用している。

消防庁の活動に資することを目的として消防研究センターが開発した広域版地震被害想定システム²⁾では、気象庁から発表される震源情報や震度情報のほか、米国地質調査所(USGS: United States Geological Survey)から送信される全世界の震源情報をトリガーとして、各地の地盤情報や木造家屋数等に基づいて計算を行い、各種被害の推定結果を出力する機能を持っている。火災に関する項目としては出火件数のみを推定しているが、筆者らは複数の都道府県にまたがるような広い範囲の火災被害を高速に推定することができれば、大規模地震発生直後に推定結果から必要部隊数を見積もることにより緊急消防援助隊派遣のための意志決定に資することができるのではないかと考え、延焼被害の推定焼失棟数を提示する機能を追加することを目指して検討を進めてきた。

近年、南海トラフ巨大地震の被害想定³⁾や名古屋市の被害想定⁴⁾などの多くの被害想定では相互に延焼被害を及ぼす建物群を計算して確率的な延焼結果を求める延焼クラスタ

方式⁵⁾が用いられており、筆者らは、既報において、延焼クラスタ方式の考え方を応用し、広域版地震被害想定システムのメッシュごとに風向・風速を変化させた場合の延焼クラスタを事前に計算しておくとともに、隣接メッシュに属する延焼クラスタへ延焼するか否かについても把握しておくことで、実際の地震発生時に焼失棟数計算を実時間処理できるのではないかと考え検討した結果について報告を行ったところである。

従来の延焼クラスタ方式では隣接する2棟間の最短距離と双方の建物の延焼限界距離の平均値により相互に延焼するか否かを判断するため、一方の建物からのみ延焼が発生するような状況に対応できておらず、このことが焼失棟数を計算するうえで影響を及ぼす可能性が考えられたため、筆者らは、ノードと方向を持つリンクで構成される有向グラフを用いて片方向の延焼に対応できる延焼クラスタの構築方法及び焼失棟数の計算方法についても検討を行ってきた。

本報では、検討した手法の基本的な内容と、既報と同様に広域版地震被害想定システムのメッシュ計算に対応させる手法を検討した内容について述べるとともに、横浜市青葉区周辺地域を対象としたデータの試作結果およびツールを作成して焼失棟数を計算した結果についても報告する。

2. 既往研究

本節では、既報と重複するが本論文における展開に必要なため、広域版地震被害想定システム、延焼クラスタ方式について述べ、さらに既報で用いた高速化手法について概略を述べる。

2.1. 広域版地震被害想定システム

図1に概要を示す広域版地震被害想定システムは、USGSの発表する世界各地で発生する地震の震源情報やXML形式で提供されている気象庁防災情報(震源情報、震度情報、津波情報)を電子メールやFTPによりインターネット経由で自動的に取り込み、事前に準備した地盤増幅度や人口、家屋等の静的データを組み合わせることで計算を行って震度分布や家屋被害分布等の被害情報を推定するシステムである。また、当該システムは、計算結果をGIS上でグラフィカルに表示する機能のほか、画像データとして出力する機能や計算結果を集計してCSVファイルで出力する機能、電子メールによる解析結果の通知機能なども有している。

現在、広域版地震被害想定システムでは、震源情報または震度情報から求められる表層地盤の最大速度(PGV: Peak Ground Velocity)の値から童らの手法⁶⁾により(1),(2)式を用いてSI(Spectral Intensity)値と家屋被害率 r を算出し、続いて、この家屋被害率 r を全壊率と等しいものとして水野らの提案する方式⁷⁾により(3)式を用いて各メッシュにおける推定火災件数 y を計算している。本稿では、(3)式の右辺に現れる $\alpha\beta \times 0.003152r^{0.6041}$ を出火率として取り扱う。

$$SI = PGV \times 1.18 \tag{1}$$

$$\begin{cases} SI > 30 \text{ の場合} \\ r = 1.21 \times 10^{-4} \times (SI - 30)^{1.51} \\ SI \leq 30 \text{ の場合} \\ r = 0 \end{cases} \tag{2}$$

$$y = N\alpha\beta \times 0.003152r^{0.6041} \tag{3}$$

ここで

- 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

2.2. 延焼クラスタによる延焼リスク計算

加藤らが提案している延焼クラスタ方式の計算フローを図2に示す。この方式では、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。本節では、延焼クラスタの生成方法と焼失率及び焼失棟数の算定についてのみ言及する。

2.2.1. 延焼クラスタの作成方法

延焼クラスタを作成するためには、建物相互に延焼被害を及ぼすか否かを決定する必要がある。

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おり、延焼限界距離が異なる建

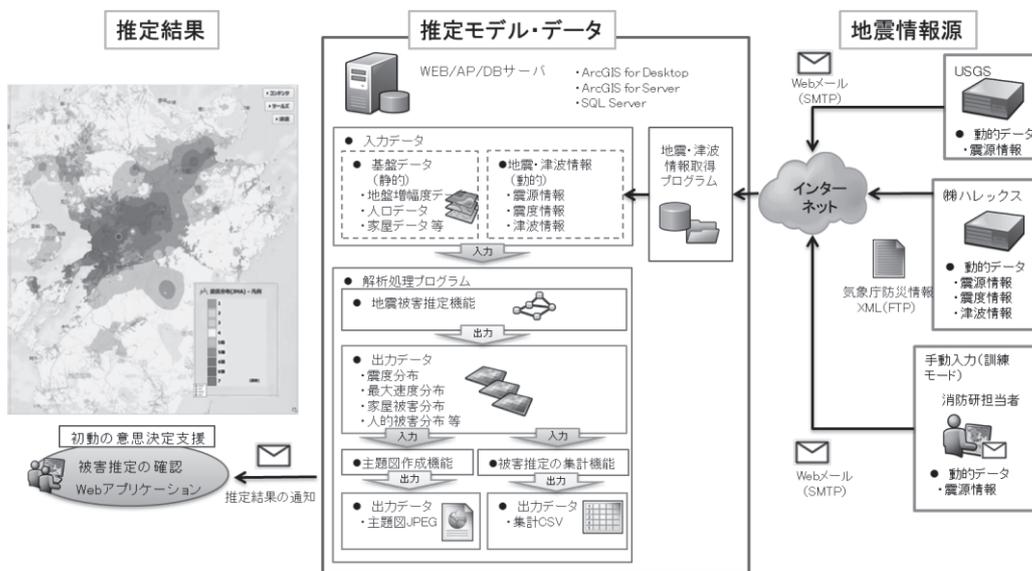


図1 広域版地震被害想定システムの概要

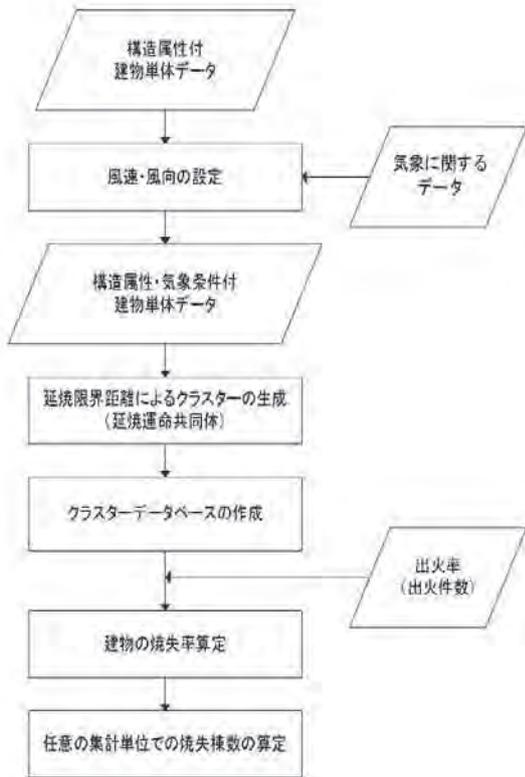


図2 延焼クラスタ方式の計算フロー^{3,5)}

物の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3に、この手法により構成された例⁸⁾を示す。

2.2.2 焼失率及び焼失棟数の算定

延焼クラスタ方式では、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。

$$P = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - p_i) \tag{4}$$

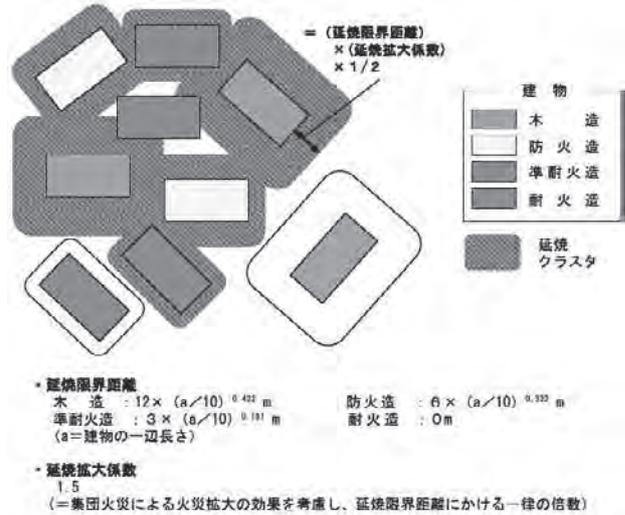


図3 延焼クラスタの作成例 (参考文献⁸⁾から引用)

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、

$$\chi = \sum P_k \tag{5}$$

と表される。

また、加藤らは、ある範囲内に含まれる建物の焼失率 P に関する次のような近似式を用いて、計算時間の短縮を図っている。

$$P = 1 - \exp(-n\bar{p}) \tag{6}$$

ここで、 \bar{p} は、範囲内建物の出火率の平均値である。

2.3 既報で用いた高速化した焼失棟数の計算手法

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。

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なことから、計算を事前計算と事後計算に分けるとともに、できる限り可能な計算を済ませておくことで高速化を図ったのが、既報の計算手法である。また、前述のとおり、広域版地震被害想定システムでは、最大表面加速度や火災件数をメッシュごとに計算しており、計算結果のメッシュ表示も可能であることから、延焼クラスタに基づく焼失率および焼失棟数の計算もメッシュ計算に対応させるものとなっている。

2.3.1 計算方法のメッシュ計算への対応についての基本的な考え方

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作成した延焼クラスタを組み合わせて実現することとした。

図4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4(2)の分割された延焼クラスタは、図4(1)の一つの延焼クラスタを4つのメッシュA,B,C,Dに属する4つの部分的な延焼クラスタa,b,c,dに分割したものである。このとき、ある部分的な延焼クラスタに含まれる建物から他の部分的な延焼クラスタに属する建物へ延焼するか否かを判断することができれば、図4(1)の延焼クラスタを再構成することが可能となる。そして、延焼クラスタの再構成が可能の場合、図4(1)の延焼クラスタの焼失率P及び焼失棟数χは式(7),(8)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可能となる。

$$\begin{aligned}
 P &= 1 - \prod_{i=1}^n (1 - p_i) \\
 &= 1 - \prod_{j=1}^{n_a} (1 - p_{a_j}) \times \prod_{k=1}^{n_b} (1 - p_{b_k}) \\
 &\quad \times \prod_{l=1}^{n_c} (1 - p_{c_l}) \times \prod_{m=1}^{n_d} (1 - p_{d_m}) \quad (7)
 \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned}
 \chi &= \sum P_k = \sum P = \sum_{i=1}^n P = nP \\
 &= (n_a + n_b + n_c + n_d)P = n_a P + n_b P + n_c P + n_d P \\
 &= \chi_a + \chi_b + \chi_c + \chi_d \quad (8)
 \end{aligned}$$

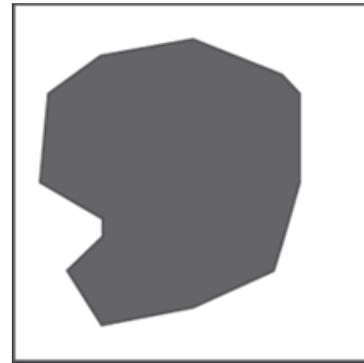
ここで、

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

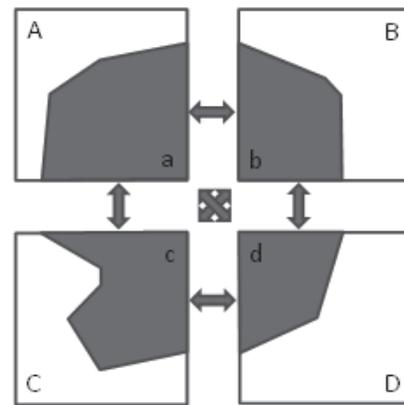
2.3.2 事前計算

焼失棟数に関する計算を地震発生直後に高速に実現するために、事前計算として、各メッシュに属する風向・風速に応じた延焼クラスタ、隣接する二つのメッシュに属する延焼クラスタ間での風向・風速に応じた延焼の有無を示すデータ、出火率および延焼がメッシュ内にとどまる延焼クラスタの焼失棟数を求めておくこととした。事前計算の詳細は(1)から(5)のとおりである。

(1) メッシュごとの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



(1) 本来作成される延焼クラスタ



(2) 4つのメッシュに分割した延焼クラスタ

図4 延焼クラスタの分割イメージ

風向・風速条件を事前に決定し、各メッシュに属する建物データから各風向・風速条件における延焼クラスタを計算して、延焼クラスタのデータベースを作成する。風向・風速の条件を増やすとメッシュ間での組み合わせが条件数の二乗になることから、計算量が飛躍的に増大するため、気を付けて設定する必要がある。

(2) 隣接する二つのメッシュに属する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

地震発生直後に風向、風速に応じて複数のメッシュに跨るような延焼クラスタに関する計算を行うため、隣接する2つのメッシュを選択し、双方のメッシュに属するクラスタ間における延焼の有無を、すべての風向・風速の組み合わせについて記録する。この時、事後計算時に検索する際のキーとするため、メッシュID、クラスタID、風向、風速を記録する。

(3) 出火率の事前計算

前述(1),(2),(3)式のとおり、広域版地震被害想定システムでは震源情報や震度情報から表層地盤の最大速度であるPGVや出火率を求めている。計算の結果として得られる出火率は、与えられる震源情報や震度情報によって計算さ

れる実数値であり、そのままでは全延焼クラスタの焼失棟数を毎回計算することとなり高速化を図ることが困難となる。そこで、事前にPGVの範囲をいくつか定め、その範囲に対応するPGVの代表的な値を用いて出火率を求めるとともに、求めた出火率を以後の焼失棟数の計算に用いることで高速化を図ることとする。

(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事前計算と延焼クラスタデータベースの修正

(3)のようにPGVの範囲に対応する出火率が定められると、出火した際に延焼がメッシュ内にとどまると考えられる延焼クラスタの焼失率及び焼失棟数を事前に計算しておくことが可能となる。出火した際に延焼がメッシュ内にとどまるということは、隣接メッシュに属する延焼クラスタへ延焼しないと言い換えることができ、(2)で作成したデータに現れない延焼クラスタすべてについて焼失棟数を計算し、メッシュごとに集計しておくこととする。

また、焼失棟数の事前計算の対象となった延焼クラスタは地震発生後に行う焼失棟数計算には用いないため、延焼クラスタデータベースから削除し、データベースの軽量化を図る。

2.3.3. 事後計算

2.3.2に示した事前計算を踏まえると、地震発生時に行う事後計算は、図5のフローのように整理される。

3 提案手法

2.2.1節でも触れたとおり、現在用いられている延焼クラスタ方式では、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されている。しかし、実際の市街地火災では、風向、風速に応じて延焼限界距離が変化するため一般的に風上方法へは延焼しづらくなること、また、裸木造、防火木造、耐火造等の建物種別によっても噴出火炎の大きさ等の火災性状が異なることから、2棟のうち的一方からのみ延焼する状況は当然起こり得るものと考えられる。

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6のように整理される。従来の延焼クラスタ作成法では $(d_a + d_b) / 2 \geq d$ 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、 $(d_a + d_b) / 2 < d$ かつ $d \leq d_a$ となる場合には建物 a から建物 b への延焼が発生するにも関わらずその延焼の影響は計算されないこととなり、また、 $(d_a + d_b) / 2 \geq d$ 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従来手法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、従来の延焼クラスタ方式を用いると、前者の場合は想定される焼失棟数が減少し、後者の場合は想定される焼失棟数が増大することを意味している。

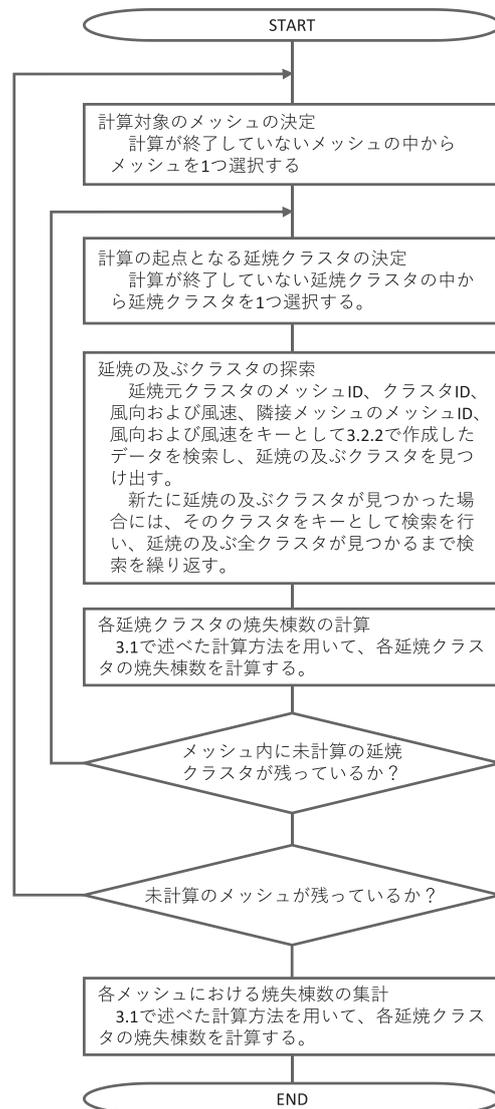


図5 事後計算のフロー図

このように、従来の方式は $d_b \leq d \leq d_a$ となる状況を再現できていないことから、本節では、このような問題を解消するために検討を行った、一方からの延焼も考慮した延焼クラスタの作成方法と焼失棟数の計算方法について示す。

3.1 延焼クラスタの生成方法

提案手法では延焼クラスタの生成にグラフ理論の手法を用いることとする。グラフ理論で用いられる線形グラフはノード（頂点とも呼ぶ）をリンク（辺、エッジ、弧とも呼ぶ）で結んだ図形であり、有向グラフはノードを結ぶリンクが方向を持つ線形グラフの一種である。

3.1.1. 隣接建物間での延焼状況の把握と有向グラフの作成

延焼速度式等を利用して、隣接建物間での延焼の有無を把握する。把握した結果を用いて、建物をノードとし、延焼元建物を始点、延焼先建物を終点とする有向リンクで

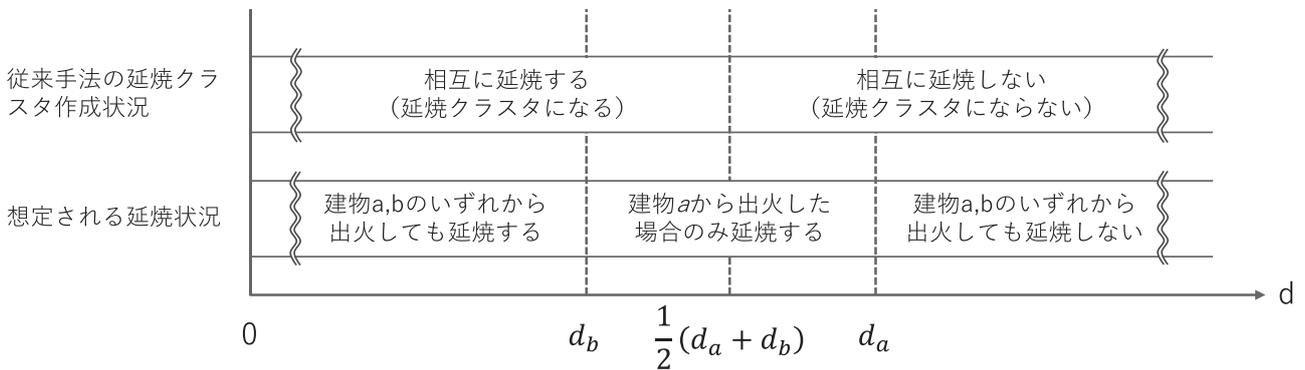


図 6 従来手法の延焼クラスタ作成状況と隣棟間距離および延焼限界距離の関係

ノード間を接続し、建物間における延焼を及ぼす関係を表現する有向グラフを作成する。

例えば、図 7(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可能性があることにより図 7(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 7(3)のような有向グラフを得ることができる。

3.1.2. 有向グラフの強連結成分分解による延焼クラスタの作成と延焼クラスタ間での延焼被害に関する有向グラフの作成

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。

3.1.1 で得られた有向グラフに対して強連結成分分解を施し、強連結成分としてまとめられた建物群を、提案手法における延焼クラスタとする。なお、周辺の建物との間で延焼することも延焼させられ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ものとする。例えば、図 7(3)の有向グラフに強連結成分

分解を施すと、図 8(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。

また、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とともに、延焼クラスタ間のリンクを整理すると、ループを持たない延焼クラスタの有向グラフを得ることができる。このようなループを持たない有向グラフを、有向非巡回グラフという。

例えば、図 8(1)では、建物 S に対して建物 Q,R から有向延焼リンクが伸びているが、建物 Q,R は同じ延焼クラスタに含まれることとなるため、2 本の有向延焼リンク (Q → S, R → S) を 1 つにまとめる。このような操作を行うことで図 8(2)の延焼クラスタの有向非巡回グラフが得られる。

3.2. 焼失率及び焼失棟数の計算手順

提案手法における延焼クラスタは他の延焼クラスタにも延焼を及ぼす場合があることから、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。

トポロジカルソートは、有向非巡回グラフの辺の向きで示される順序関係を満たすようにノードを列挙する手法であり、例えばプロジェクト管理の分野で手順を踏んで進め

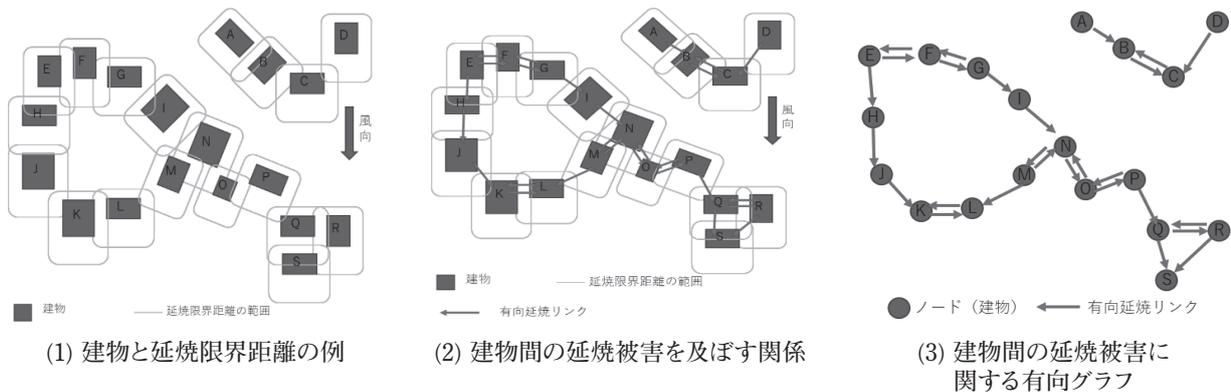


図 7 建物間の延焼被害に関する有向グラフの作成方法

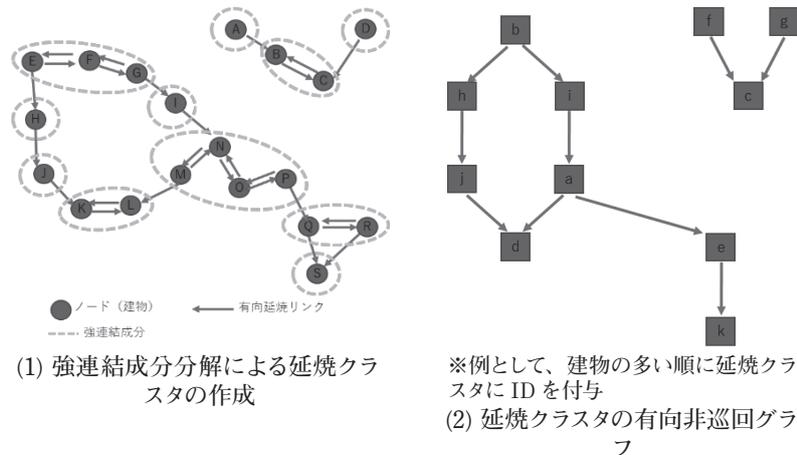


図 8 延焼クラスターの有向非巡回グラフの作成

る必要のある各種作業の計画立案等に用いられている。
 提案手法では、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把握し、その順序に従って計算に用いるべき延焼クラスターを把握しつつ焼失率及び焼失確率を求めることとする。

3.2.1. トポロジカルソートによる計算順序の把握

3.1.2 で得られた延焼クラスターの有向非巡回グラフにトポロジカルソートを適用して、延焼クラスター間の延焼元と延焼先の関係から、焼失率及び焼失棟数を計算する延焼クラスターの順序を決定する。

一般に、トポロジカルソートの結果はソートを開始するノードやアルゴリズムによって異なり、結果は一意とはならない。例えば、図 8(2) 左側の有向非巡回グラフにトポロジカルソートを施した場合には、b, h, i, a, j, d, e, k のような結果や、b, i, a, e, k, h, j, d など数種類の結果を得ることがある。以後の例では、図 8(2) 左側の有向非巡回グラフにトポロジカルソートを施した結果、b, h, i, a, j, d, e, k という結果が得られたものとして説明を行う。

3.2.2. 各延焼クラスターで焼失棟数等の計算に用いる上位の延焼クラスターの把握

有向非巡回グラフは内部にループを持たないものの、あるノードから他のノードに至る複数の経路が存在する場合がある。そこで、3.2.1 において構成した延焼クラスターの有向非巡回グラフに複数の経路が存在しても焼失率や焼失棟数を計算する際に重複して用いてしまうことがないよう、3.2.1 のトポロジカルソートの結果を用いて、各延焼クラスターで焼失率や焼失棟数の計算に用いるべき延焼クラスターを把握する。

なお、把握する方法は複数考えられるが、筆者らは接続行列を用いてトポロジカルソートを実施する際に平行して確率計算用行列を準備できることから、次のような方法に

- より、計算に用いるべき延焼クラスターを把握した。
- (1) 接続行列の列をトポロジカルソートにより決定された延焼クラスターの順番に列を入れ替えた確率計算用行列を作成する。
 - (2) 確率計算用行列の左側の列から順に、下記の操作を繰り返す。
 - (ア) 1 になっている要素を探し、1 になっている要素の延焼元の延焼クラスターに対応する列の論理和を計算対象の列に代入する。この操作は、延焼クラスターの焼失率や焼失棟数の計算に用いられる延焼クラスターを洗い出す作業に相当する。
 - (イ) 計算対象の列に対応する延焼クラスターに相当する行の要素を 1 とする。この操作により、計算対象の列に対応する延焼クラスター自身を焼失率や焼失棟数の計算の対象に加えることとなる。

図 8(2) 左側の有向非巡回グラフについて、上記の延焼クラスターを把握する過程を図 9 に示す。この計算により、例えば、延焼クラスター d の焼失確率および焼失棟数を求めるために、延焼クラスター a, b, d, h, i, j の情報を利用しなければならないことが判る。

3.2.3. 焼失率および焼失棟数の計算

3.1.2 で延焼クラスターデータベースに記録した各延焼クラスターの構成建物に関する情報と 3.2.2 で把握した上位の延焼クラスターの情報に基づいて、延焼クラスターの焼失率及び焼失棟数を計算する。

例えば、図 8(2) の有向非巡回グラフを構成する延焼クラスターについては、図 10 のように各延焼クラスターの焼失率および焼失棟数が計算されることとなる。

		延焼先クラスターID										
		a	b	d	e	h	i	j	k			
延焼元クラスターID	a				1	1						
	b						1	1				
	d											
	e											1
	h									1		
	i		1									
	j				1							
	k											

(1) 図8(2)左側の有向非巡回グラフの接続行列

		延焼先クラスターID										
		b	h	i	a	j	d	e	k			
延焼元クラスターID	a						1	1				
	b			1	1							
	d											
	e											1
	h						1					
	i				1							
	j								1			
	k											

(2) トポロジカルソートにより決定された延焼クラスターの順番に入れ替えた確率計算用行列

		延焼先クラスターID										
		b	h	i	a	j	d	e	k			
延焼元クラスターID	a						1	1				
	b			1	1							
	d											
	e											1
	h						1					
	i				1							
	j								1			
	k											

(3) 1列目(延焼クラスターb)の処理
すべての要素が0なので操作しない。

		延焼先クラスターID										
		b	h	i	a	j	d	e	k			
延焼元クラスターID	a						1	1				
	b			1	1							
	d											
	e											1
	h						1					
	i				1							
	j								1			
	k											

(4) 1列目の延焼クラスターbに対応する行の要素を1とする。

		延焼先クラスターID										
		b	h	i	a	j	d	e	k			
延焼元クラスターID	a						1	1				
	b			1	1							
	d											
	e											1
	h						1					
	i				1							
	j								1			
	k											

(5) 2列目(延焼クラスターh)の処理
延焼クラスターbに対応する行のみに1があることから、延焼クラスターbに対応する列の内容に置き換える。

		延焼先クラスターID										
		b	h	i	a	j	d	e	k			
延焼元クラスターID	a						1	1				
	b			1	1							
	d											
	e											1
	h						1					
	i				1							
	j								1			
	k											

(6) 2列目の延焼クラスターhに対応する行の要素を1とする。

		延焼先クラスターID										
		b	h	i	a	j	d	e	k			
延焼元クラスターID	a						1	1				
	b			1	1							
	d											
	e											1
	h						1		1			
	i				1							
	j								1			
	k											

(7) 3列目(延焼クラスターi)の処理
延焼クラスターbに対応する行のみに1があることから、延焼クラスターbに対応する列の内容に置き換える。

		延焼先クラスターID										
		b	h	i	a	j	d	e	k			
延焼元クラスターID	a						1	1				
	b			1	1							
	d											
	e											1
	h						1		1			
	i				1							
	j								1			
	k											

(8) 3列目の延焼クラスターiに対応する行の要素を1とする。

		延焼先クラスターID										
		b	h	i	a	j	d	e	k			
延焼元クラスターID	a						1	1				
	b			1	1							
	d											
	e											1
	h						1		1			
	i				1							
	j								1			
	k											

(9) 4列目(延焼クラスターa)の処理
延焼クラスターiに対応する行のみに1があることから、延焼クラスターiに対応する列の内容に置き換える。

		延焼先クラスターID										
		b	h	i	a	j	d	e	k			
延焼元クラスターID	a						1	1				
	b			1	1							
	d											
	e											1
	h						1		1			
	i				1							
	j								1			
	k											

(10) 4列目の延焼クラスターaに対応する行の要素を1とする。

		延焼先クラスターID										
		b	h	i	a	j	d	e	k			
延焼元クラスターID	a						1	1				
	b			1	1							
	d											
	e											1
	h						1		1			
	i				1							
	j								1			
	k											

(11) 5列目(延焼クラスターj)の処理
延焼クラスターhに対応する行のみに1があることから、延焼クラスターhに対応する列の内容に置き換える。

		延焼先クラスターID										
		b	h	i	a	j	d	e	k			
延焼元クラスターID	a						1	1				
	b			1	1							
	d											
	e											1
	h						1		1			
	i				1							
	j								1			
	k											

(12) 5列目の延焼クラスターjに対応する行の要素を1とする。

		延焼先クラスターID										
		b	h	i	a	j	d	e	k			
延焼元クラスターID	a						1	1				
	b			1	1							
	d											
	e											1
	h						1		1			
	i				1							
	j								1			
	k											

(13) 6列目(延焼クラスターd)の処理
延焼クラスターa,jに対応する行に1があることから、延焼クラスターa,jに対応する列の論理和に置き換える。

		延焼先クラスターID										
		b	h	i	a	j	d	e	k			
延焼元クラスターID	a						1	1				
	b			1	1							
	d											1
	e											1
	h						1		1			
	i				1							
	j								1			
	k											

(14) 6列目の延焼クラスターdに対応する行の要素を1とする。

		延焼先クラスターID										
		b	h	i	a	j	d	e	k			
延焼元クラスターID	a						1	1				
	b			1	1							
	d											1
	e											1
	h						1		1			
	i				1							
	j								1			
	k											

(15) 7列目(延焼クラスターe)の処理
延焼クラスターaに対応する行のみに1があることから、延焼クラスターaに対応する列の内容に置き換える。

		延焼先クラスターID										
		b	h	i	a	j	d	e	k			
延焼元クラスターID	a						1	1				
	b			1	1							
	d											1
	e											1
	h						1		1			
	i				1							
	j								1			
	k											

(16) 7列目の延焼クラスターeに対応する行の要素を1とする。

		延焼先クラスターID										
		b	h	i	a	j	d	e	k			
延焼元クラスターID	a						1	1	1	1		
	b			1	1							
	d											1
	e											1
	h						1		1			
	i				1							
	j								1			
	k											

(17) 8列目(延焼クラスターk)の処理
延焼クラスターeに対応する行のみに1があることから、延焼クラスターeに対応する列の内容に置き換える。

		延焼先クラスターID									
		b	h	i	a	j	d	e	k		
延焼元クラスターID	a										

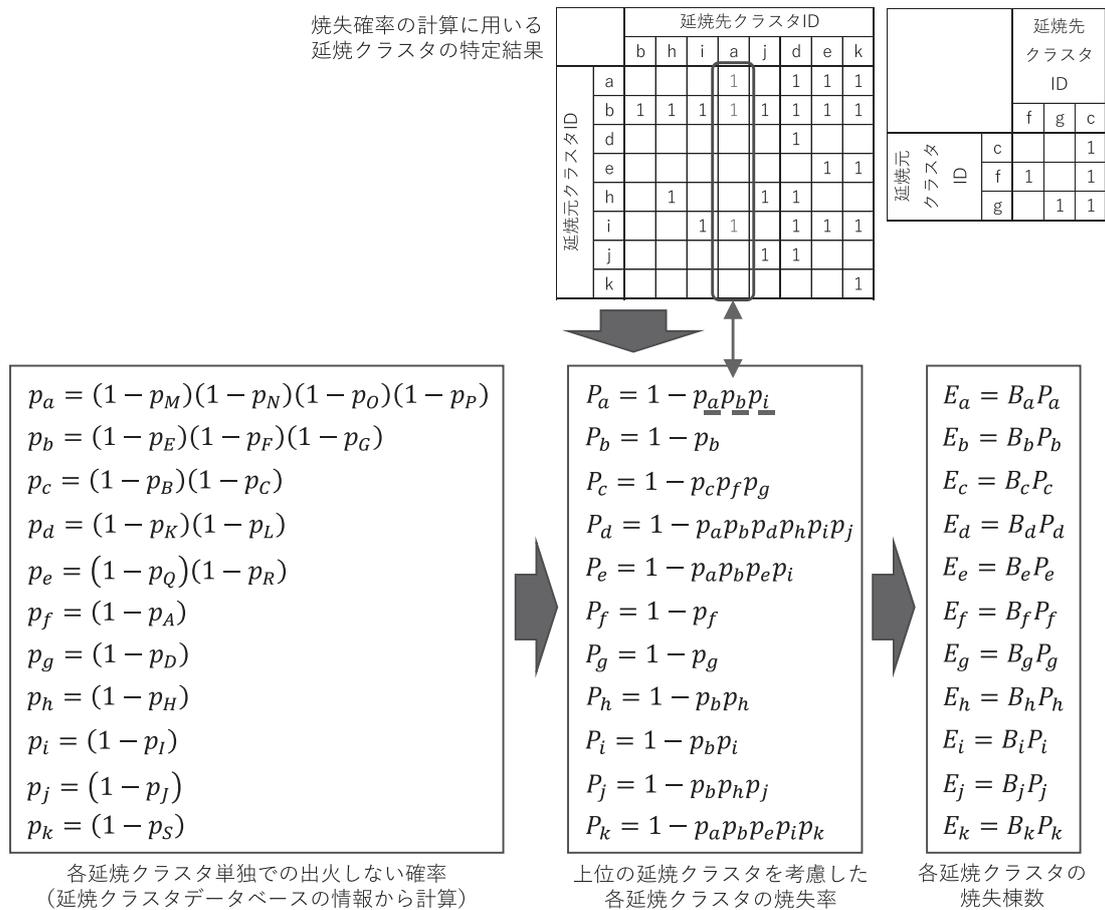


図10 図8(2)の各延焼クラスタの焼失率及び焼失棟数の計算例

4. 提案手法の広域版地震被害想定システムへの実装手法に関する検討

我々は、提案手法についても広域版地震被害想定システムへの実装することを目的として高速に焼失棟数を計算する手法（以下、「本報の計算手法」という）の検討を行った。本節では、その概要について述べる。

4.1. 本報の計算手法におけるメッシュ計算への対応についての考え方

本報の計算手法においても、メッシュ計算へ対応させる方法として、既報の計算手法と同様に、メッシュごとの風向、風速に応じた延焼クラスタを作成しておくこと、また、延焼が複数のメッシュにまたがる可能性のあ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作成した延焼クラスタを組み合わせることで実現することとした。

また、既報の計算手法と同様に、計算を事前計算と事後計算に分けるとともにできる限り事前に可能な計算を行うておくこととした。

4.2. 事前計算

焼失棟数に関する計算を地震発生直後に高速に実現するために、本報の計算手法でも、各メッシュに属する風向・風速に応じた延焼クラスタ、隣接する二つのメッシュに属する延焼クラスタ間での風向・風速に応じた延焼の有無を示すデータ、出火率および延焼がメッシュ内にとどまる延焼クラスタの焼失棟数を事前に求めておく。事前計算の詳細は4.2.1から4.2.4のとおりである。

4.2.1. メッシュごとの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延焼クラスタ間の延焼に関するデータの作成

既報の計算手法と同様に風向・風速条件を事前に決定し、各メッシュに属する建物データから各風向・風速条件における延焼クラスタを計算して、延焼クラスタのデータベースを作成する。風向・風速の条件を増やすとメッシュ間での組合せが条件数の二乗になることから、事前および事後に行う計算量が飛躍的に増大するため、本報の計算手法でも気を付けて設定する必要がある。

また、各風向・風速条件における同一メッシュに属する延焼クラスタ間で延焼被害を及ぼす関係に関するデータを作成する。

4.2.2. 隣接する二つのメッシュに属する延焼クラスタ間での延焼の有無を示すデータの作成

既報の計算手法と同様に地震発生後に風速、風向に応じて複数のメッシュに跨るような延焼クラスタに関する計算を行うため、隣接する2つのメッシュを選択し、双方のメッシュに属する延焼クラスタ間における延焼の有無を、すべての風向・風速の組み合わせについて調査して、記録する。この時、メッシュID、延焼クラスタID、風向、風速を記録する。

なお、延焼するか否かの判断は、延焼元となる延焼クラスタに属する建物の延焼限界距離内に近隣の延焼クラスタに含まれる建物が存在するか否かで判断する。

4.2.3. 震度階級に対応する出火率等の事前計算

既報でも述べたとおり、広域版地震被害想定システムでは震源情報や震度情報から表層地盤の最大速度であるPGVや出火率を求めている。計算の結果として得られる出火率は、与えられる震源情報や震度情報によって計算される実数値であり、そのままでは全延焼クラスタの焼失棟数を毎回計算することとなり高速化を図ることが困難となる。そこで、本報の計算手法でも既報の計算手法と同様に、事前にPGVの範囲をいくつか定め、その範囲に対応するPGVの代表的な値を用いて出火率を求めるとともに、求めた出火率を以後の焼失棟数の計算に用いることで高速化を図ることとする。

4.2.4. メッシュ間の延焼に関与しない延焼クラスタの焼失棟数の事前計算と延焼クラスタデータベースの修正

4.2.3でPGVの範囲に対応する出火率が定められると、出火した際にメッシュ間の延焼に関係しない延焼クラスタの焼失率及び焼失棟数を事前に計算しておくことが可能となることから、本報の計算手法においても、焼失棟数を計算しメッシュごとに集計しておくこととした。なお、メッシュ間の延焼に関係しない延焼クラスタは、単独で存在して4.2.1や4.2.2で作成した延焼クラスタ間の延焼に関するデータに現れない延焼クラスタ、あるいは、4.2.1で作

成したメッシュ内の延焼クラスタ間の延焼被害を及ぼす関係を辿っても4.2.2で計算される隣接する二つのメッシュに属する延焼クラスタ間の延焼に関するデータに現れる延焼クラスタにたどり着けない延焼クラスタということができる。また、本報の計算手法でも既報の計算手法と同様に、事前に焼失率及び焼失棟数を計算した延焼クラスタは以後の計算に用いないことから、延焼クラスタデータベースから削除するものとする。

4.2.5. 延焼の有無を示すデータの統合と修正

メッシュ内の延焼クラスタ間における延焼の有無を示すデータと、隣接するメッシュに属する延焼クラスタ間における延焼の有無を示すデータを統合する。さらに、統合したデータから4.2.4において、メッシュ間の延焼に関与しない延焼クラスタにおける焼失棟数の事前計算に用いたデータを削除する。

4.3. 事後計算

事後計算では、4.3.1から4.3.6の計算を行う。

4.3.1. 風向風速条件に基づく延焼クラスタ及び延焼クラスタ間の延焼に関するデータの読み込

入力された風向、風速を条件として、延焼クラスタデータベース及び延焼クラスタ間の延焼に関するデータを検索し、読み込む。

4.3.2. 延焼クラスタの有向グラフの構築

読み込まれた延焼クラスタ間の延焼に関するデータを用いて、延焼クラスタの有向グラフを構築する。

4.3.3. 強連結成分分解の実施と暫定クラスタへの置き換え

提案手法では強連結成分分解を用いて延焼クラスタを作成しているため、作成される延焼クラスタの有向グラフは有向非巡回グラフとなる。しかしながら本報の計算手法では風向風速条件ごとに各メッシュ単位で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には、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を把握しなければならない。

そこで、4.3.2で得られた延焼クラスタの有向グラフに対して強連結成分分解を行う。複数の延焼クラスタからなる強連結成分が得られた場合には、強連結成分を暫定的な延焼クラスタ（以下、「暫定クラスタ」という）に置き換えることにより、延焼クラスタの有向非巡回グラフとする。

4.3.4. 焼失率及び焼失棟数の計算

4.3.3で得られた延焼クラスタの有向非巡回グラフに基づいて、3.2で述べた計算を行い、焼失率と焼失棟数を求める。なお、暫定クラスタが存在する場合、暫定クラスタ

から出火しない確率は、暫定クラスタを構成することとなった各延焼クラスタから出火しない確率の積として計算するものとする。

4.3.5. 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

暫定クラスタが存在する場合、暫定クラスタを構成する各延焼クラスタの焼失棟数は、暫定クラスタの焼失確率と各延焼クラスタに含まれる建物数の積により計算するものとする。

4.3.6. メッシュごとの焼失棟数の集計

事後計算により計算された延焼クラスタごとの焼失棟数を集計するとともに、事前に計算しておいたメッシュ間の延焼に参与しない延焼クラスタの焼失棟数を加え、メッシュごとの焼失棟数を集計する。

5 検証

本節では、計算用データを試作し、既報の計算手法と本報の計算手法による計算を行って検証を行った結果について示す。

5.1. 対象地域と利用データ

既報と同様に横浜市青葉区を包含する矩形の地域を対象地域とし、国土地理院が公開している基盤地図情報を用いて各種データを作成した。図11に対象地域の建物データと設定したメッシュを示す。メッシュは広域版地震被害想定システムと同位置、同サイズとして設定した。なお、メッシュIDは下から上へ $x=01 \sim 09$ 、左から右へ $y=01 \sim 13$ として与えたため、最も左下のメッシュのIDが0101、最も右上のメッシュのIDが0913となる。

また、既報と条件をそろえるため、消防研究センターにおいて別途開発を継続している建物単位の市街地火災延焼シミュレーションソフトウェア（以下、単に「シミュレーションソフト」という）を参考に、次の前提条件を既報と同様に設定した。

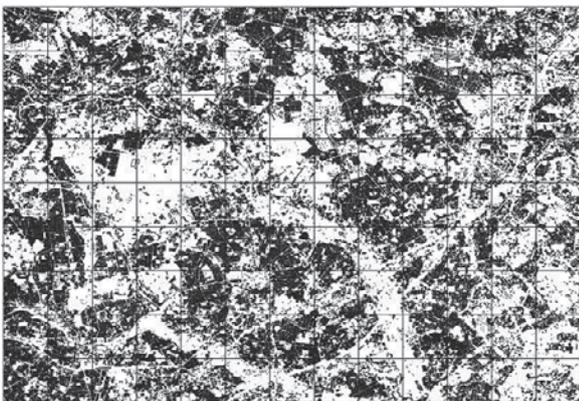


図11 対象地域の建物データ(基盤地図情報(普通建物、普通無壁舎))とメッシュ

- ・建物種別は、シミュレーションソフトと同様、防火木造建物と耐火造建物の2種類に単純化する。基盤地図情報の建物データには、建物種別として次の4種類の属性が割り当てられている。データ作成にあたり普通建物および普通無壁舎を防火木造建物とみなす。

- 普通建物：3階未満の建物及び3階以上の木造等で建築された建物
- 普通無壁舎：側壁のない建物、温室及び工場内の建物類似の建築物で、3階未満のもの
- 堅ろう建物：鉄筋コンクリート等で建築された建物で、地上3階以上または3階相当以上の高さのもの
- 堅ろう無壁舎：鉄筋コンクリートなどで建築された側壁のない建物および建物類似の建築物で、地上3階以上または3階相当以上の高さのもの

- ・堅ろう建物、堅ろう無壁舎については、延焼クラスタの計算には用いない。また、耐火建物には輻射を遮るなど市街地火災を抑制する可能性があるが、今回は考慮しない。

- ・シミュレーションソフトと同様、建物階数は全て2階建てとする。

- ・実際の延焼では建物の建てられている地形の影響を受けることとなるが、今回は地形の影響は考慮しない。

- ・建物が含まれるメッシュは建物重心の位置により決定し、一つの建物が複数のメッシュに含まれることはないものとする。

- ・シミュレーションソフトにおいて燃落時間を1時間と設定していることから、東京消防庁によって開発された延焼速度式⁹⁾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延焼限界距離として用いることとし、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。

5.2. 事前計算結果とその検証

5.2.1. メッシュごとの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延焼クラスタ間の延焼に関するデータの作成

既報と同様、風向については8方向、風速については0, 6, 12m/sの3通りとして、設定した風向・風速条件ごとに、各メッシュの延焼クラスタを作成した。今回の計算では、建物周辺に延焼限界距離の範囲で設定したバッファが近隣建物の建物ポリゴンと重なる場合に延焼限界距離内に存在すると判断することとし、図12に示す手法により異方向を持つ延焼限界距離のバッファを近似的に実現して建物間での延焼被害を及ぼす関係の把握に用いた。

また、強連結成分分解によって得られた延焼クラスタに含まれる建物の延焼範囲ポリゴンを重ね合わせ、延焼クラスタポリゴンを作成した。

なお、計算の結果、延焼範囲ポリゴンが近隣建物の建物ポリゴンと重ならなかった場合には、建物1棟のみの延焼クラスタとするとともに、延焼範囲ポリゴンを延焼クラスタポリゴンとして取り扱うこととした。

図13に対象地域のメッシュ番号0305における本報の計算手法と既報の計算手法による延焼クラスタポリゴンの作成結果の例を示す。なお、図中の延焼クラスタポリゴンの作成に用いたバッファが、提案手法では延焼限界距離であるのに対して、既報の計算手法では延焼限界距離の半分となっているため、ポリゴンの外周やポリゴン内の塗り残し部分の大きさなど、延焼クラスタポリゴンの見え方が異なるが、延焼クラスタポリゴンに含まれている建物を比較すると、提案手法を用いた場合にも風向・風速を変更すると作成される延焼クラスタが変化していること、また、既報の方法と今回の手法により作成される延焼クラスタはよく似ているものの若干の違いが出ていることが確認できる。

計算の結果、今回の手法により対象地域全体において風向・風速の全条件で作成した延焼クラスタの総数は421,837となった。この結果、風向・風速1条件あたりの平均的な延焼クラスタ数は対象領域全体で約17,576.5、風向・風速1条件あたりのメッシュ平均の延焼クラスタ数は約150.2となった。複数のメッシュにまたがるような延焼クラスタが分割された場合もあるため単純に評価することは難しいが、風向・風速1条件あたりのメッシュ平均の延焼クラスタ数が約144.2だった既報の計算手法に比べ、約4% ($150.2/144.2 \div 1.042$) 程度増加する結果となった。これは、図6において示した $(d_a + d_b)/2 \geq d$ かつ $d \geq d_b$ という条件に該当したため、既存の手法や既報の計算手法で一つの延焼クラスタとして取り扱っていた建物群が複数の延焼クラスタに分割されることにより、延焼クラスタ数が増えたものと考えられる。

風速ごとに延焼クラスタ数を集計すると、表1のとおりとなった。本報の計算手法を用いた場合にも、風速の増加に応じて延焼限界距離が大きくなることから延焼クラスタのサイズが大きくなり、その一方で延焼クラスタ数が減ることが予想され、この予想に矛盾しない結果が得られている。また、風速ごとに本報の計算手法を用いて作成される延焼クラスタ数と既報の計算手法を用いた場合の延焼クラスタ数を比較したところ、変化率に極端な差は見られなかった。

また、メッシュ内での延焼クラスタ間の延焼に関するデータの数は、全部で29,160となった。117メッシュについて風向風速24条件で作成しているため、メッシュ内の平均10.4か所まで片方向に延焼すると計算されていることとなる。例として北風12m/sの場合のメッシュ0305における延焼クラスタ間の延焼に関するデータ及び延焼クラスタの位置関係を図14及び表2に示す。図中の数字は延

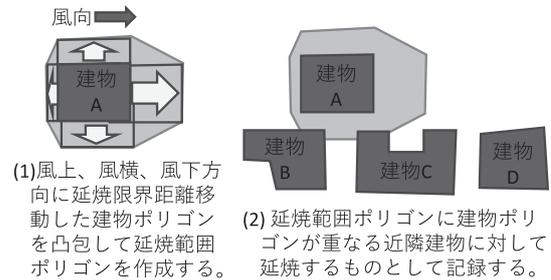


図12 延焼被害を及ぼす関係を判断する方法

焼クラスタIDを示しており、矢印は始点を延焼元クラスタ、終点を延焼先クラスタとして延焼クラスタ間で延焼することを示している。

5.2.2 隣接する2つのメッシュに属する延焼クラスタ間での延焼の有無を示すデータの作成

5.2.1で作成したメッシュごとの延焼クラスタデータを用いて、あるメッシュに属する延焼クラスタの延焼クラスタポリゴンが隣接メッシュの延焼クラスタに属する建物の建物ポリゴンに重なるか否かをメッシュの風向・風速を順次変更して計算し、重なる場合に延焼することとして記録した。1メッシュあたり風向、風速の条件が24種類となるため、1対の隣接メッシュについて風向・風速条件の組み合わせは既報と同様に576種類となり、本報告の手法で作成したデータ数は対象地域全体で1,724,839となった。既報の計算手法では、隣接するメッシュに属する延焼クラスタの延焼クラスタポリゴンの重なりを用いて延焼クラスタ間の延焼の有無を判断して記録しているが、その数は1,693,024であり、今回の手法では約1.9%増加した。

計算結果の一例を図15および表3に示す。図中の四角で囲まれた数字はメッシュ番号、その他の数字は延焼クラスタIDを示している。メッシュ0511,0611,0612には東風12m/sを条件として与えており、メッシュ0512についてのみ図15(1)では東風6m/s、図15(2)では東風12m/sをそれぞれ条件として与えている。

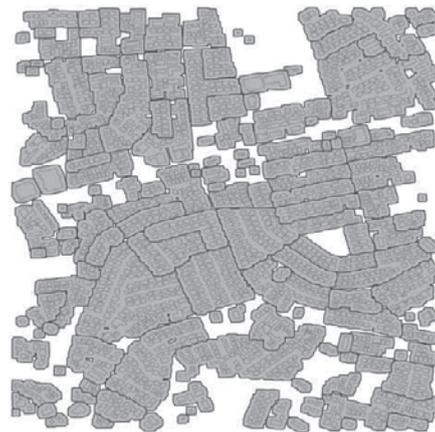
例えば、図15(1)において、メッシュ0512の北西端に位置する建物5棟で構成される延焼クラスタ131に注目すると、メッシュ0512の延焼クラスタ131の延焼クラスタポリゴンがメッシュ0511の延焼クラスタ14の東端の建物の建物ポリゴンと重なることから、メッシュ0512の延焼クラスタ131で発生した火災はメッシュ0511の延焼クラスタ14に延焼するものと判断される。逆に、メッシュ0511の延焼クラスタ14の延焼クラスタポリゴンがメッシュ0512の延焼クラスタ131の南端の建物に重なることから、メッシュ0511の延焼クラスタ14で発生した火災はメッシュ0512の延焼クラスタ131に延焼するものと判断され、結果的にこの二つの延焼クラスタは相互に延焼すると判断されることとなる。また、メッシュ0512の延焼

クラスタ131の延焼クラスタポリゴンがメッシュ0612の延焼クラスタ8の南西端の建物の建物ポリゴンに近接しているものの重ならないためメッシュ0512の延焼クラスタ131からメッシュ0612の延焼クラスタ8へは延焼しないものとして判断されるが、メッシュ0612の延焼クラスタ

8の延焼クラスタポリゴンがメッシュ0512の延焼クラスタ131の北西端の建物の建物ポリゴンに重なるためメッシュ0612の延焼クラスタ8からメッシュ0512の延焼クラスタ131へは延焼すると判断され、ここで延焼クラスタ間の片方向の延焼が発生する状況となることが判る。



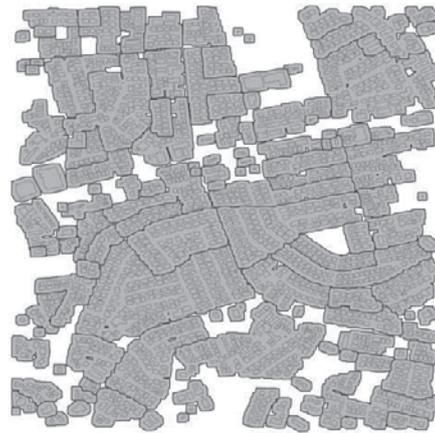
(1) 本報の計算手法 (風向:北 風速6m/s)



(2) 本報の計算手法 (風向:北東 風速6m/s)



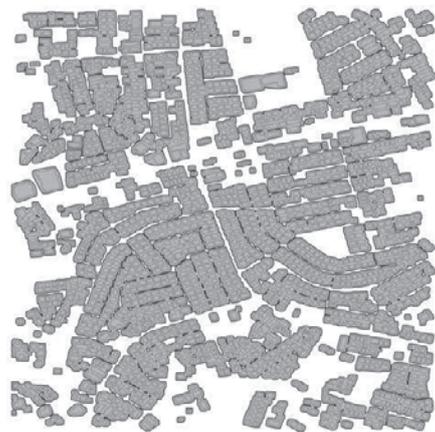
(3) 本報の計算手法 (風向:北 風速12m/s)



(4) 本報の計算手法 (風向:北東 風速12m/s)



(5) 既報の計算手法 (風向:北 風速12m/s)



(6) 既報の計算手法 (風向:北東 風速12m/s)

図13 風向・風速を変化させた場合の延焼クラスタポリゴンの計算結果の例 (メッシュ0305)

一方、図 15(2)の場合は、図 15(1)の場合と同様にメッシュ 0512 の延焼クラスタ 125 とメッシュ 0511 の延焼クラスタ 14 が相互に延焼すると判断され、メッシュ 0612 の延焼クラスタ 8 からメッシュ 0512 の延焼クラスタ 125 へも



図 14 メッシュ内で計算した延焼クラスタ間延焼の例 (メッシュ 0305 風向:北 風速:12m/s)

延焼すると判断される。そして、図 15(2) は図 15(1) に比べてメッシュ 0512 の風速が増加していることから設定される延焼限界距離が大きくなり、それに伴って作成される延焼クラスタポリゴンの範囲も大きくなるため、メッシュ 0512 の延焼クラスタ 125 の延焼クラスタポリゴンがメッシュ 0612 の延焼クラスタ 8 に含まれる建物の建物ポリゴンと重なることから、図 15(2) の場合はメッシュ 0512 の延焼クラスタ 125 とメッシュ 0612 の延焼クラスタ 8 の関係が、片方向の延焼ではなく相互に延焼すると判断されることとなる。

また、同様の計算により、メッシュ 0612 の延焼クラスタ 8 とメッシュ 0611 の延焼クラスタ 22、メッシュ 0611 の延焼クラスタ 22 とメッシュ 0612 の延焼クラスタ 107 が、それぞれ相互に延焼するものとして計算される。

表 3 は、このような延焼クラスタ間の延焼についてデータ化した結果を一部抜粋のうえ並べ替えたものである。最初の 3 行が図 15(1)におけるメッシュ 0512 の延焼クラスタ 131 の延焼に関するデータであり、その次の 4 行は図

表 1 風速ごとの延焼クラスタの作成状況

風速	本報の計算手法			既報の計算手法			本報の計算手法と既報の手法で作成される延焼クラスタ数の変化率 ((A)/(B))
	対象領域全域において計算された延焼クラスタ数	対象領域全域における風向 1 条件あたりの平均延焼クラスタ数	風向 1 条件あたりのメッシュあたりの平均延焼クラスタ数 (A)	対象領域全域において計算された延焼クラスタ数	対象領域全域における風向 1 条件あたりの平均延焼クラスタ数	風向 1 条件あたりのメッシュあたりの平均延焼クラスタ数 (B)	
0m/s	157,866	約 19,733.3	約 168.7	151,654	約 18,956.8	約 162.0	1.041358
6m/s	138,643	約 17,330.4	約 148.1	133,059	約 16,632.4	約 142.2	1.041491
12m/s	125,328	15,666	約 133.9	120,203	約 15,025.4	約 128.4	1.042835

表 2 メッシュ内での延焼クラスタ間の延焼に関するデータの例 (メッシュ 0305 風向:北 風速:12m/s)

延焼元クラスタ				延焼先クラスタ			
メッシュ ID	クラスタ ID	風向	風速	メッシュ ID	クラスタ ID	風向	風速
0305	2	北	12	0305	1	北	12
0305	5	北	12	0305	4	北	12
0305	14	北	12	0305	13	北	12
0305	19	北	12	0305	18	北	12
0305	23	北	12	0305	8	北	12
0305	26	北	12	0305	25	北	12
0305	29	北	12	0305	28	北	12
0305	33	北	12	0305	32	北	12
0305	36	北	12	0305	9	北	12
0305	39	北	12	0305	12	北	12
0305	43	北	12	0305	12	北	12
0305	55	北	12	0305	24	北	12
0305	76	北	12	0305	11	北	12
0305	86	北	12	0305	84	北	12

15(2)におけるメッシュ 0512 の延焼クラスタ 125 の延焼に関するデータ、残りの4行は図15(1)(2)共通のメッシュ 0611 の延焼クラスタ 27 とメッシュ 0612 の延焼クラスタ 23、124 の延焼に関するデータである。なお、既報の計算手法では延焼クラスタ間の延焼を双方向で記録していたため1対の延焼クラスタの組み合わせについて2つのデータができていたが、本報の計算手法では一方からのみ延焼するような場合を取り扱うため、一部のデータは対になっていない。

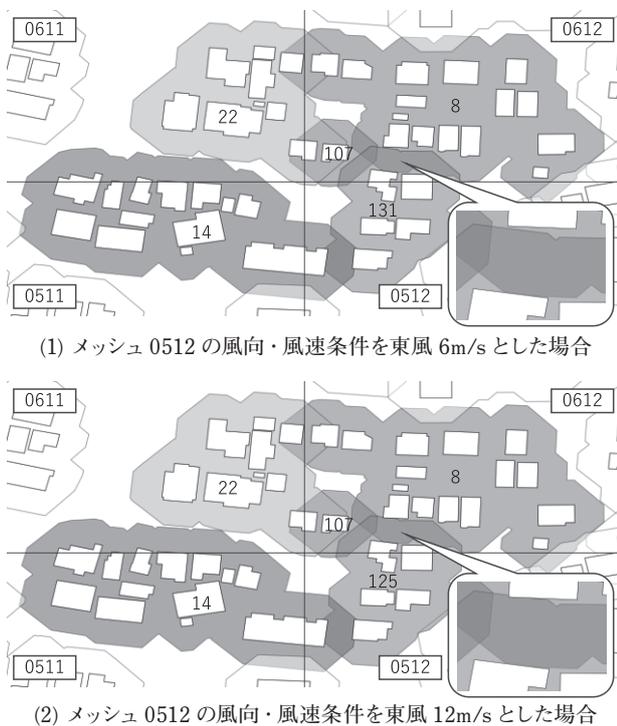


図15 隣接メッシュに属する延焼クラスタ間の延焼状況の計算例

表3 隣接メッシュ間での延焼クラスタ間の延焼に関するデータの例(図15関連を抜粋)

延焼元クラスタ				延焼先クラスタ			
メッシュ ID	クラスタ ID	風向	風速	メッシュ ID	クラスタ ID	風向	風速
0512	131	東	6	0511	14	東	12
0511	14	東	12	0512	131	東	6
0612	8	東	12	0512	131	東	6
0512	125	東	12	0511	14	東	12
0511	14	東	12	0512	125	東	12
0512	125	東	12	0612	8	東	12
0612	8	東	12	0512	125	東	12
0612	8	東	12	0611	22	東	12
0611	22	東	12	0612	8	東	12
0611	22	東	12	0612	107	東	12
0612	107	東	12	0611	22	東	12

5.2.3. 震度階級に対応する出火率等の事前計算

4.2.3 で述べたとおり、本検討では PGV の範囲を定め、その代表値を用いて計算を行うことで計算の簡略化と高速化を図ることとしている。

そこで、本報告でも既報と同様に、広域版地震被害想定システムにおいてメッシュごとに震度階級を計算し表示する機能があること、震度階級が社会一般で利用されていることから、PGV の範囲を震度階級に対応づけ、震度階級に対応する PGV の平均値を代表値として用いて出火率を算出することにより、出火率を震度階級に対応する値として準備することとした。なお、震度7の範囲は計測震度6.5から7とした。また、発生時刻の影響を補正する係数 α と季節の影響を補正する係数 β は、それぞれ広域版地震被害想定システムで用いている値の平均値とした。

震度階級と震度階級に対応する PGV の範囲及び出火率を表4に示す。

5.2.4. メッシュ内で延焼がとどまる延焼クラスタの焼失棟数の事前計算と延焼クラスタデータベースの修正

各メッシュにおいて、メッシュ内で延焼がとどまる延焼クラスタにおける焼失棟数を表4に示した出火率から震度階級ごとに計算し、メッシュ単位で集計した。

また、延焼クラスタデータベースから、焼失棟数計算を事前に計算した延焼クラスタを削除し、隣接メッシュに属する延焼クラスタへ延焼する可能性の或る延焼クラスタのみのデータとした。この結果、延焼クラスタデータベースのエントリー数は68,500となり、エントリー数を1/6程度に削減することができた。

5.2.5. 延焼クラスタ間の延焼の有無を示すデータの統合と修正

メッシュ内の延焼クラスタ間における延焼の有無を示すデータと、隣接するメッシュに属する延焼クラスタ間における延焼の有無を示すデータを統合した後、5.2.4の計算対象となったデータを削除した。19,383個のメッシュ内

表 4 震度階級 (JMA) に対応させる出火率の計算結果

震度階級	震度階級に応じた計測震度の範囲		計測震度の範囲に対応する PGV の範囲		震度階級ごとの PGV の平均値	震度階級ごとの SI 値	震度階級ごとの家屋被害率 r	震度階級ごとの出火率
	下限	上限	下限	上限				
0	(0 以上)	0.5 未満	0.02766	0.05402	0.04084	0.04819	0.00000	0.00000
1	0.5 以上	1.5 未満	0.05402	0.20604	0.13003	0.15344	0.00000	0.00000
2	1.5 以上	2.5 未満	0.20604	0.78587	0.49595	0.58523	0.00000	0.00000
3	2.5 以上	3.5 未満	0.78587	2.99740	1.89163	2.23213	0.00000	0.00000
4	3.5 以上	4.5 未満	2.99740	11.43246	7.21493	8.51361	0.00000	0.00000
5 弱	4.5 以上	5.0 未満	11.43246	22.32735	16.87990	19.91829	0.00000	0.00000
5 強	5.0 以上	5.5 未満	22.32735	43.60486	32.96611	38.90000	0.00328	0.00011
6 弱	5.5 以上	6.0 未満	43.60486	85.15939	64.38213	75.97091	0.03919	0.00049
6 強	6.0 以上	6.5 未満	85.15939	166.31455	125.73697	148.36962	0.16345	0.00117
7	6.5 以上	(7.0 未満)	166.31455	324.80889	245.56172	289.76283	0.53555	0.00240

での延焼クラスタ間の延焼に関するデータが 5.2.4 の計算に用いられたため、事後計算に用いる延焼クラスタ間の延焼の有無を示すデータの総数は 1,734,670 となった。

5.3. 事後計算結果の検証

本節では、本報の計算手法を用いた場合の計算結果に関する検証と、既報の計算手法との比較結果、さらに別途開発している市街地火災延焼シミュレーションによる計算結果との比較について述べる。

5.3.1 本報の計算手法を用いた場合の計算結果に関する検証

数種類の入力データを用いて計算を行った結果について検証した。図 16 に、入力としてすべてのメッシュに同じ条件を与えた場合の計算結果の一例を示す。風向は北風とし、風速、震度階級を変化させているが、風速が増加する場合や震度階級が大きくなる場合に、焼失棟数が増加していることが判る。風速が増加する場合には風速から計算さ

れる延焼限界距離が大きくなり、それに伴って一つの延焼クラスタに含まれる建物数が多くなることから、計算される焼失確率が増加して、最終的に計算される焼失棟数も増加することとなる。一方、震度階級が大きくなる場合は、震度階級に対応して与えられる出火率が大きくなるため、焼失確率が増加し、最終的に計算される焼失棟数も増加することとなる。

また、図 17 に既報で用いたものと同じ入力データを使用した場合の計算結果を示す。図 17(1) は、対象地域に一樣の風向・風速の風が吹くとともに震度分布として震度 5 強の揺れが一樣に与えられた場合の結果である。焼失棟数は、対象地域全体で約 2,092.2 棟となった。

次に、図 17(2) は図 17(1) に対して一部メッシュの風速を変化させた場合の焼失棟数の変化を比率で示したものである。風速を小さくしたメッシュおよびその隣接メッシュにおける焼失棟数が減少する一方、風速を大きくした

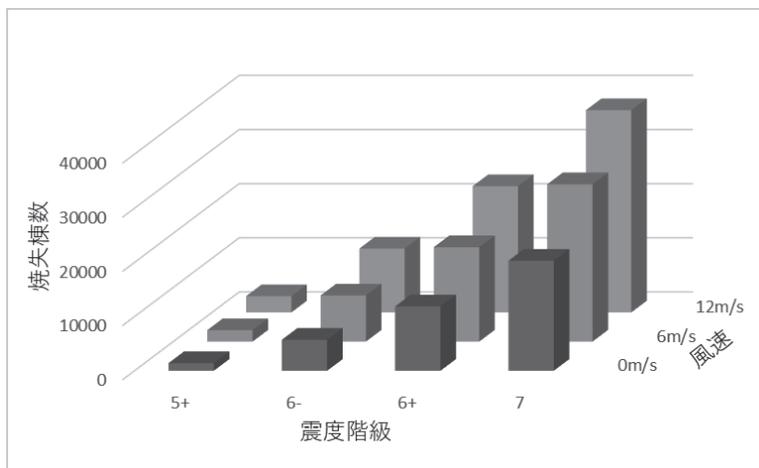


図 16 すべてのメッシュに同一の条件を入力した場合の焼失棟数の変化の例 (北風の場合)

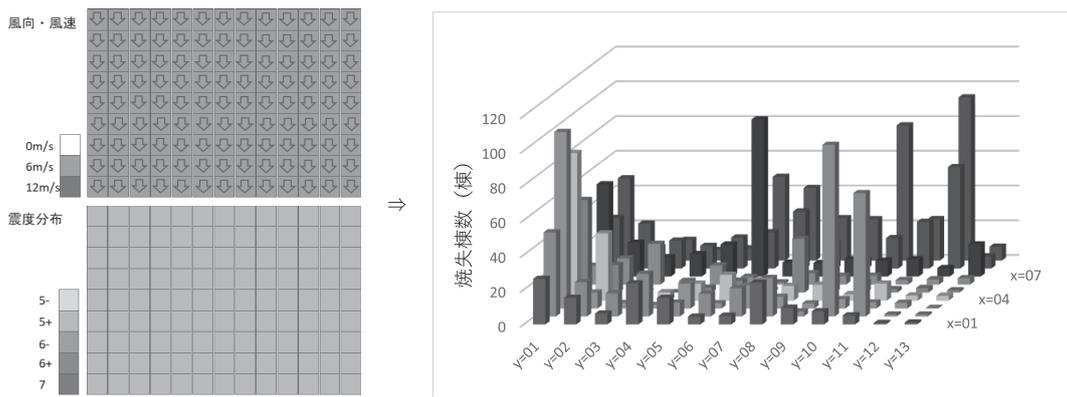
メッシュおよびその隣接メッシュでは焼失棟数が増加していることが確認でき、対象地域全体の焼失棟数は約2,072.4棟となった。

さらに、図17(3)は、図17(1)に対して中心の1行分の震度を5強から6弱に大きくした場合の焼失棟数の変化を比率で示したものである。震度を大きくしたメッシュおよびその隣接メッシュにおいて焼失棟数の増加が認めら

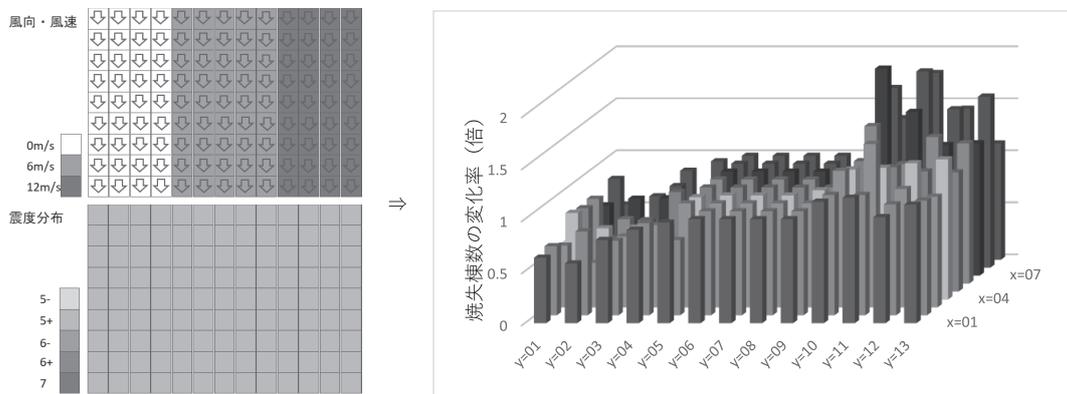
れ、焼失棟数は約2,617.4棟となった。

これらの結果から、条件を変更したメッシュの影響が隣接するメッシュに及んでいることが確認できる。

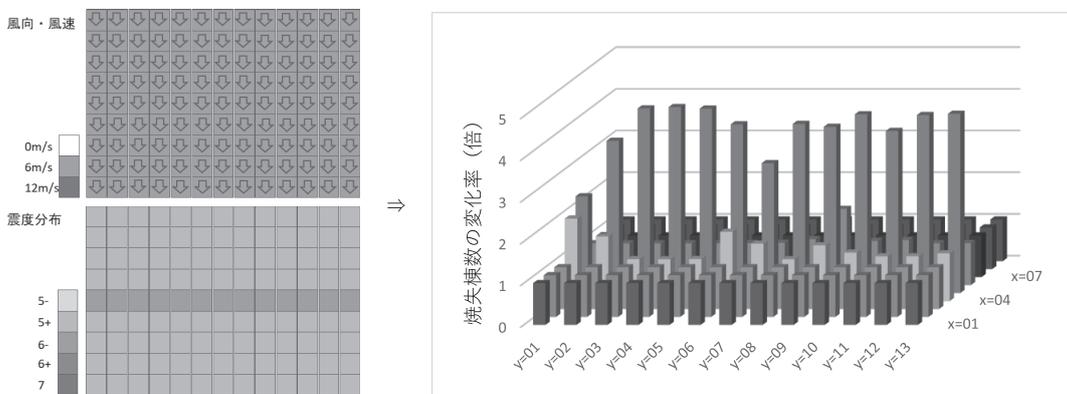
最後に、図18に関東地震を参考に小田原市付近にマグニチュード7.9、震源深さ10kmを設定した場合に広域版地震被害想定システムで得られる震度分布を入力として与えた場合の結果を示す。図17(1)の結果と比較すると、入



(1) 一様の風(北風、6m/s)、一様の揺れ(震度5強)を入力として与えた場合



(2) (1)に対して一部の風速を変更した場合の焼失棟数の変化率



(3) (1)に対して一部の震度を変更した場合の焼失棟数の変化率

図17 焼失棟数の計算結果例

力として与えた震度が全体的に大きくなっていることから焼失棟数も増加しており、全体で2,850.7棟となった。また、本報の計算手法においても、複雑な震度分布にも対応できていることが確認できた。

計算時間については、デスクトップPC (Intel Core i7 4.2GHz, 64GBメモリ) 上でツールを実行したところ、図17、図18のいずれの場合においても、1回の計算に4秒程度の時間を要した。プログラムの構成が異なっているため、単純に比較できるものではないが、既報の計算手法と遜色ない計算時間となった。

5.3.2. 本報の計算手法と既報の計算手法との比較結果

本報の計算手法と既報の計算手法による焼失棟数の計算結果の比較例として、北風12m/sと震度5強を一様に入力として与えた結果を図19に示す。図19(1)は本報の計算手法による焼失棟数の計算結果、図19(2)は既報の計算手法による計算結果であり、図19(3),(4)は双方の計算結果の違いについて差分値と増減比率を求めたグラフである。図19(3)および(4)からメッシュ0807で差分値、増減比率ともに大きく上昇しているほか、0911や0912において差分値、増減比率ともに大きく減少しており、局所的に計算結果が大きく変化する場合があることが判る。

図20に、メッシュ0811,0812,0911,0912の境界付近で作成された比較的大きな延焼クラスタおよび暫定クラスタ(延焼クラスタのグループ)の例を示す。図中の四角で囲まれた数字はメッシュ番号であり、aからfの色分けされた箇所は焼失率及び焼失棟数の計算時に一つの延焼クラスタとして扱われる建物群(単独の延焼クラスタあるいは暫定クラスタ)を示している。また、図20(1)中の矢印は、延焼クラスタ間で延焼が発生する方向を示している。

図20(1),(2)を比較すると、既報の計算手法を用いた場合にe,fの2つの延焼クラスタとして扱われる建物群が、

本報の計算手法ではa,b,c,dの4つの延焼クラスタとして計算されることとなることが判る。

この状況の焼失率及び焼失棟数への影響について見ていくと、図20(1)ではaの建物はb,c,dの建物群から延焼せず、図20(2)でのeの建物も単独で存在するため、同じ出火率を与えた場合、a,eの焼失率および焼失棟数は等しくなる。続いて、図20(1)のb,c,dの建物群と図20(2)のfの建物群についてみると、cの建物群は、a,b,dの建物群から延焼が発生するため、aの建物の影響を受けて僅かに焼失率が上昇するものの、fの建物群とほぼ同様の焼失率となる。また、図20(1)のbの建物群についてはaの建物からの延焼が発生するもののc,dの建物群からは延焼しないため焼失率が低下し、図20(1)のdの建物群についてはa,b,cの建物群からの延焼が発生しないことから焼失率が低下する。このような、b,dの建物群の焼失率の低下に伴い、焼失率と建物数の積として計算されるb,dの焼失棟数が減少したことが、メッシュ0911,0912における焼失棟数の集計結果が減少した主な原因となっている。

5.3.3. 各棟延焼方式の市街地火災延焼シミュレーションを用いた被害推定結果との比較

消防研究センターでは、従来から各棟延焼方式の市街地火災延焼シミュレーションソフトウェアの開発を行ってきたが、応用機能の一つとして、入力として与えた地域に存在するすべての防火木造建物から順次火災を発生させて計算を繰り返す機能を持っている。

そこで、この機能を用いて対象領域のすべての建物から火災を発生させ、その結果を本報の計算手法及び既報の計算手法と比較した。なお、比較のため、対象領域内で火災が1件発生するものとして、本報の計算手法及び既報の計算手法による計算を行うにあたり、出火率を0.00000678(≒1÷147,385)として与えた。また、風向、

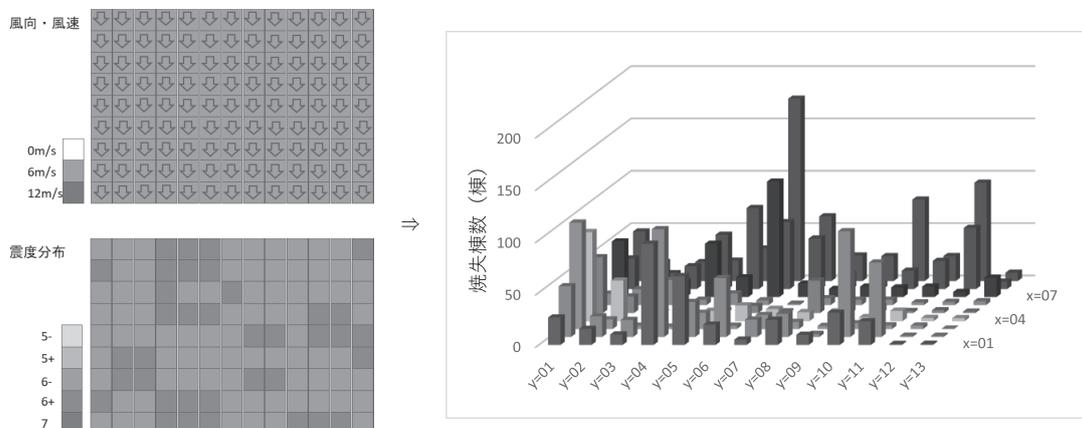
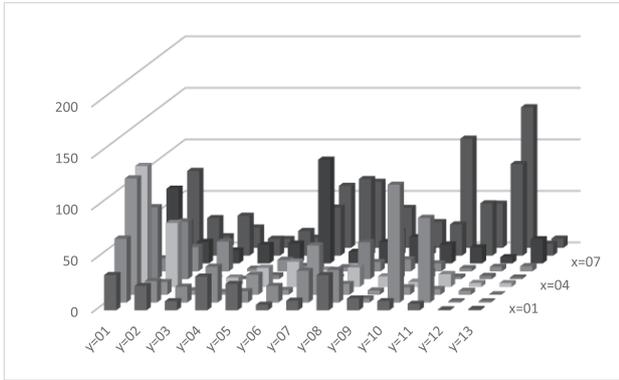
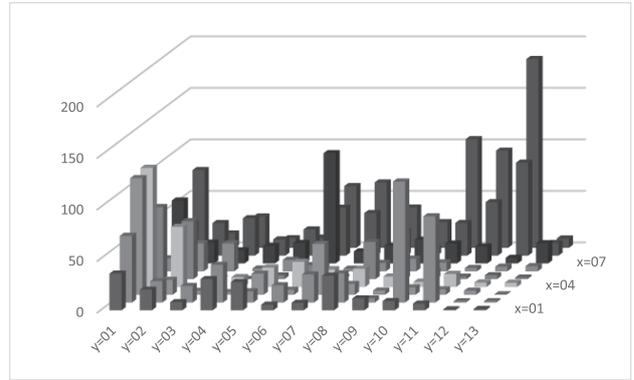


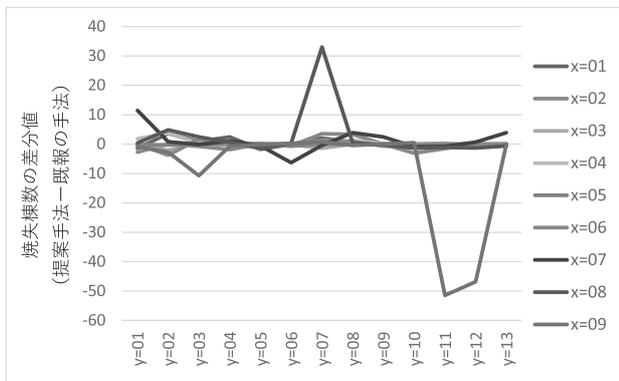
図18 関東地震を参考にした震源情報を広域版地震被害想定システムに入力して得られる震度分布を用いた場合



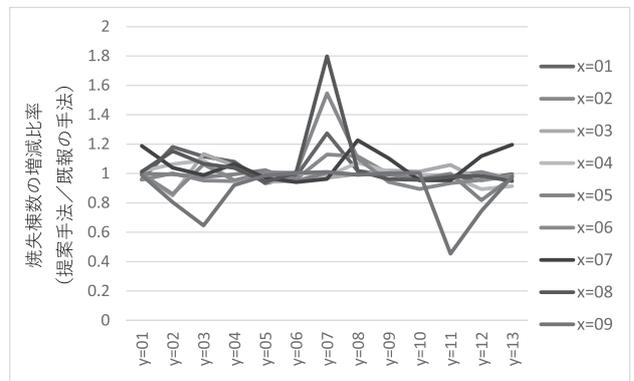
(1) 本報の計算手法による焼失棟数の計算結果



(2) 既報の計算手法による計算結果



(3) 本報の計算手法と既報の計算手法による計算結果の差分値



(4) 本報の計算手法と既報の計算手法による計算結果の増減比率

図19 本報の計算手法と既報の計算手法による焼失棟数の計算結果の比較例



(1) 本報の計算手法により構築された延焼クラスタの例



(2) 既報の計算手法により構築された延焼クラスタの例

図20 計算手法の違いにより分割されて作成される延焼クラスタの例

風速は、それぞれ北風、12m/sとした。

それぞれの方式で計算した結果を図21に示す。なお、図21(1)は、シミュレーション結果から当該建物が出火建物となった場合も含めて焼失回数を集計し、当該建物の焼失回数に応じて各建物に着色したものである。

図21(1)は火災が必ず1件発生する場合の計算結果であるのに対して、図21(2),(3)は複数の建物から同時に出火する場合や1件も出火しない場合を確率的に含む計算の結果であり、単純に比較できるものではないが、大きな延焼被害が発生する可能性のある濃い色の地域は比較的類似していることが判る。

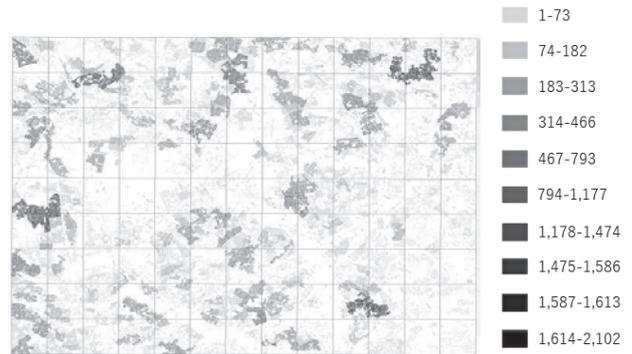
6. おわりに

本報では、従来の延焼クラスタ方式では対応できていないと思われる、隣接する2棟間の一方からのみ延焼するような状況に対応して計算する手法について検討するとともに、既報と同様に広域版地震被害想定システムのメッシュ計算に対応させる手法を検討した内容について述べ、更に横浜市青葉区周辺地域を対象としたデータの試作結果およびツールを作成して焼失棟数を計算した結果についても報告した。

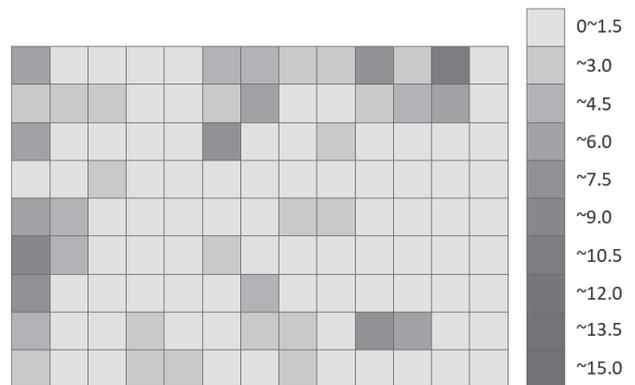
今後の課題としては、本報の計算手法について既報で行ったような計算量に関する検討を行う必要があるほか、本報告の計算手法と既報の計算手法のいずれが実際の状況により近い結果を示せるのか検証していく必要がある。また、用いる延焼速度式や建物データを変更した場合の影響についても検証する必要があると考えられる。

参考文献

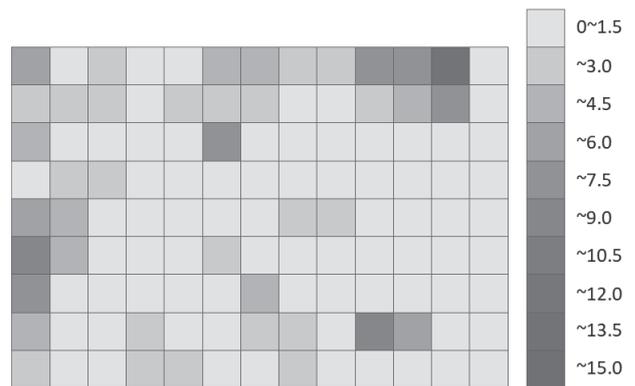
- 1) 高梨ほか, 広域版地震被害想定システムへの機能追加のための高速な延焼被害推定手法に関する検討, 消防研究所報告, pp.21-33, Vol.128, 2020
- 2) Masafumi Hosokawa et al., Development of the Wide-Area Earthquake Damage Estimation System and Mashup of Disaster Prevention Information, Journal of Disaster Research, pp.118-130, Vol.12, No.1, 2017
- 3) 中央防災会議, 南海トラフの巨大地震 建物被害・人的被害の被害想定項目及び手法の概要, http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/taisaku_wg/pdf/20120829_gaiyou.pdf (2012)
- 4) 名古屋市, 震災に強いまちづくり方針(本編), <http://www.city.nagoya.jp/jutakutoshi/cmsfiles/contents/0000002/2717/honpen.pdf> (2015)
- 5) 加藤ら, 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
- 6) 童ら, 被害事例に基づく地震動強さと家屋被害率の関係,



(1) 各棟延焼方式の市街地火災延焼シミュレーションを用いて対象地域の各防火木造建物に出火点を設定してシミュレーションを繰り返した結果から得られた各建物の焼失回数(当該建物から出火した場合を含む)



(2) 提案手法を用いて計算したメッシュごとの焼失棟数



(3) 既報の手法を用いて計算したメッシュごとの焼失棟数

図21 対象領域内で火災が1件発生するものとした場合の焼失棟数の推定結果の比較

- pp.2299-2304, 第9回地震工学シンポジウム,1995
- 7) 水野ら, 地震時の出火件数の予測に関する研究, pp.81-90, 日本建築学会論文報告集 No.250,1996
 - 8) 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(東京消防庁)
 - 9) 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

A Consideration of the Fire Spread Cluster Construction Method Using Directed Connected Graphs and the Earthquake Fire Damage Estimation Method to Add a Function to the Wide-Area Earthquake Damage Estimation System

(Abstract)

Ken-ichi Takanashi and Masafumi Hosokawa

(Accepted October 14, 2021)

In the previous paper, in order to add an earthquake fire damage estimating function to the Wide-Area Earthquake Damage Estimation System, we discussed that the fast estimation method using ideas of fire spreading cluster.

Since the previously reported method does not handle the situation where fire spreads only from one of the two adjacent buildings properly, the authors have also studied a calculation method that can handle such a situation.

In this paper, we report on the contents of the examined method, the contents of the fast method corresponding to mesh calculation, the result of data creation, and the result of verification.

技術報告

燃焼条件と試料採取位置に応じた灯油のGCによる検出に関する研究

佐藤 康博、塚目 孝裕、長谷川 巧

(令和3年10月22日受理)

火災原因調査において鉍物油の検出が、原因究明のための重要な要素となる可能性がある。鉍物油の検査法やデータの評価について、燃焼時の変化に関する報告は知られているが、試料の採取箇所についての検討は行われていない。そこで、本報告では、GC分析について、灯油の濃度によるクロマトグラムへの影響について確認した後に、燃焼した灯油の変化および採取位置の違いに焦点をあてて検討した。砂の上においた綿製品に灯油をかけて燃焼させた実験では、直接灯油をかけた綿製品より、その下の砂の方が高いピーク強度であり燃焼の影響を受けていない灯油を検出できた。綿製品に散布された灯油は、燃焼時に綿からの染み出しが生じ、液体状態で他へ移行していく可能性があることがわかった。

1. はじめに

灯油、ガソリンなどの鉍物油は、火災現場において助燃材として機能し、出火や延焼拡大の一因となる。そのため、鉍物油は放火等の故意に火災を広げようとする場合に使用される可能性がある。平成27年中における全国の火災原因の第1位は放火であり、年間4033件、全火災の10.3%となる。火災原因の第4位である、放火の疑いも考慮に入れると、年間6502件、全火災の16.6%にも及ぶ火災が、放火により起きていることになる¹⁾。このため、火災事案の現場において、鉍物油の有無を判断することは火災原因の特定を行う上で重要な項目となる。鉍物油の有無の判断はガスクロマトグラフ(以後、GCと表記する)分析によって一般には行われ、鉍物油の検査法や燃焼によって変化したデータの評価については、これまで数多くの報告が出ている。

例えば、福島らは、燃焼・蒸発による鉍物油の変化、プラスチック類の分析結果に与える影響について、焼損物のペンタンによる全量抽出によって鉍物油類の分析を行うことで、燃焼された鉍物油の分析データを把握する検討を行っている²⁾。また、橋上は、シャーレ上での灯油の燃焼による検討を行っており、燃焼面積の違いによる比較検討を中心に報告している^{3),4),5)}。これらの報告では、低沸点成分が高沸点成分に比べて先行して消失し、ピークパターンが高沸点側にシフトすることが共通している。

以上のように、燃焼時の変化に関する報告は知られているが、試料の採取位置の違いがピークの強度およびピークパターンの変化に及ぼす影響についての検討は行われていない。このような背景を踏まえ、本報告では、火災原因調査の究明能力向上を目的とし、GC分析において、灯油の濃度

によるクロマトグラムへの影響について確認した後に、燃焼した灯油の変化および採取位置の違いに焦点をあてて検討し、採取位置に与える影響の理由として灯油の染み出し現象について紹介する。

2. 実験方法

2.1 灯油の濃度によるクロマトグラムへの影響

メスピペット、メスフラスコを用いて0.001g/L、0.01g/L、0.1g/L、1g/L、5g/L、50g/L、100g/Lの灯油濃度のn-ペンタン溶液を調整し、GCによる分析を行った。この実験は、灯油の有無を明確に決定できる濃度を明確にするために行った。n-ペンタンはGCによる分析で灯油のピークと保持時間が大きく異なり、灯油の分析結果に影響を与えないため、n-ペンタン溶液を調整した。

2.2 灯油を散布した綿製品の燃焼

ステンレス製バット(560mm×415mm×22mm)に砂(あかぎ園芸株式会社製の川砂:群馬県渡良瀬川の砂を、水洗いしてアク抜きをして3mm以下にふるい分けしたもの)を15mm程度の厚さになるように敷き、その中央に綿製品(300mm×200mm、タオル状の布)をおいた。使用する灯油をメスシリンダーにて計量し、綿製品に散布した後、ライターで速やかに着火し、火が自然に消える時間を測定した。その後、水道水を用いて、完全に消火した。1時間半ほど放置したのち、焼損した綿製品とその下の砂をポリ袋にそれぞれ採取した。採取物を入れたポリ袋にジエチルエーテル60mLを加え、ろ過後、分液ロートでジエチルエーテル層のみ回収した。回収した溶液を60℃に設定したウォーターバスで温め、5mL程度まで濃縮し、硫酸ナトリウムで脱水を行ったのち、GC

に導入した。この実験は、燃焼前後の灯油のピークパターンの変化および抽出した場所の違いがピークパターンに及ぼす影響について調べるために行った。この実験は、表2に示すような条件で、散布範囲、灯油量を変えて行った。

2.3 灯油の染み出しの観察

僅かに傾斜させたステンレス製バットの上に乾燥した綿製品(300mm×200mm、150mm×200mm)を置き、20mLの灯油を全体に散布して、綿製品に染み込んだ部分の端に着火した。この灯油量は綿製品が十分に灯油を保持できる。また、同様の実験をステンレス製バットの代わりに網を用いて行った。これらの実験条件を表1にまとめた。この実験は、後述の「3.2 灯油を散布した綿製品の燃焼」において、綿製品よりも砂から抽出したGC分析結果の方が高いピーク強度となり、燃焼によるピークパターンの変化が小さい理由について検証するために綿製品から灯油が染み出す現象について確認する目的で行った。網については綿製品から染み出す灯油が滴下することを確認することを期待し、実験を行った。

表1 実験条件

No.	雑巾	容器	灯油
1	30 cm×20 cm	バット	20 mL
2	15 cm×20 cm	バット	20 mL
3	30 cm×20 cm	網	20 mL

自然鎮火後、燃焼した綿製品の周囲の染みだした部分の全てをアセトンを含ませたキムワイプでふき取った。拭き取ったキムワイプを約5mLのジエチルエーテルで抽出することで、ガスクロマトグラフ(GC)の試料とした。

2.4 GCの構成と分析条件

GC分析に使用した機器及び条件は、以下に示すとおりである。

機器：島津製作所製 GC-2025

検出器：FID 280℃

カラム：アジレント・テクノロジー製 DB-1

(30m×φ0.25mm 膜厚0.25μmφ)

カラム条件：40℃(10min)→(20℃/min)→280℃

気化室温度：250℃、注入量：1μL

キャリアガス：ヘリウム(カラム流量2.49mL/min)

3. 結果と考察

3.1 灯油の濃度によるクロマトグラムへの影響

0.001g/L、0.01g/L、0.1g/L、1g/L、5g/L、50g/L、100g/Lの灯油濃度のn-ペンタン溶液のGC分析結果を図1に示す。灯油検出の目安として、①直鎖飽和炭化水素が複数あること、②直鎖飽和炭化水素のピーク間にいくつかの弱

い強度の複雑なピーク(複数の分岐炭化水素)が認められることの2点を基準とした。図1に示すように、5g/Lの灯油濃度のペンタン溶液のGCの測定結果では、直鎖飽和炭化水素であるオクタン(3.8min)、ノナン(5.0min)、デカン(6.1min)、ウンデカン(7.1min)、ドデカン(7.9min)、トリデカン(8.7min)、テトラデカン(9.4min)、ペンタデカン(10.1min)に対応する一連の直鎖飽和炭化水素(以下、それぞれC8-C15として表記する)と、それらのピーク間に複数のピークが観測され、上記の2点を満たすことから灯油の検出を確認できた。一方、

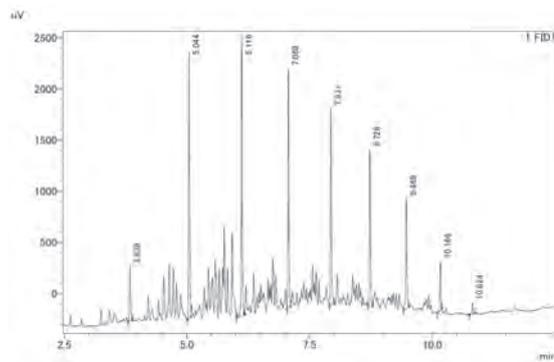
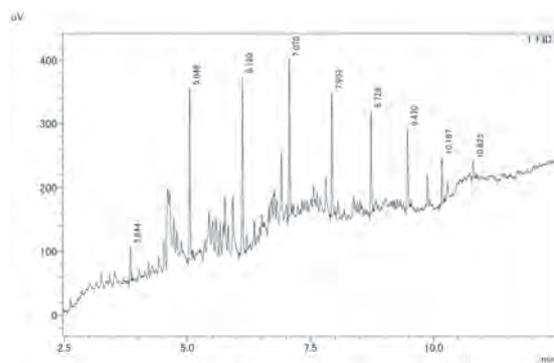
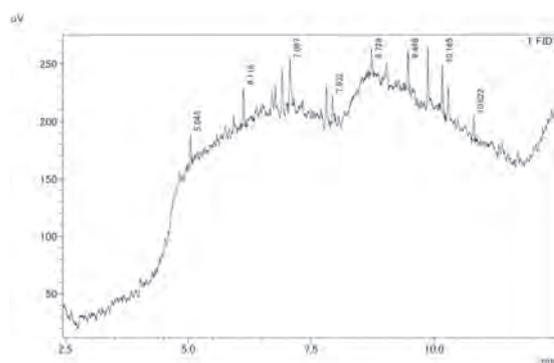


図1 灯油のn-ペンタン溶液のGC分析結果

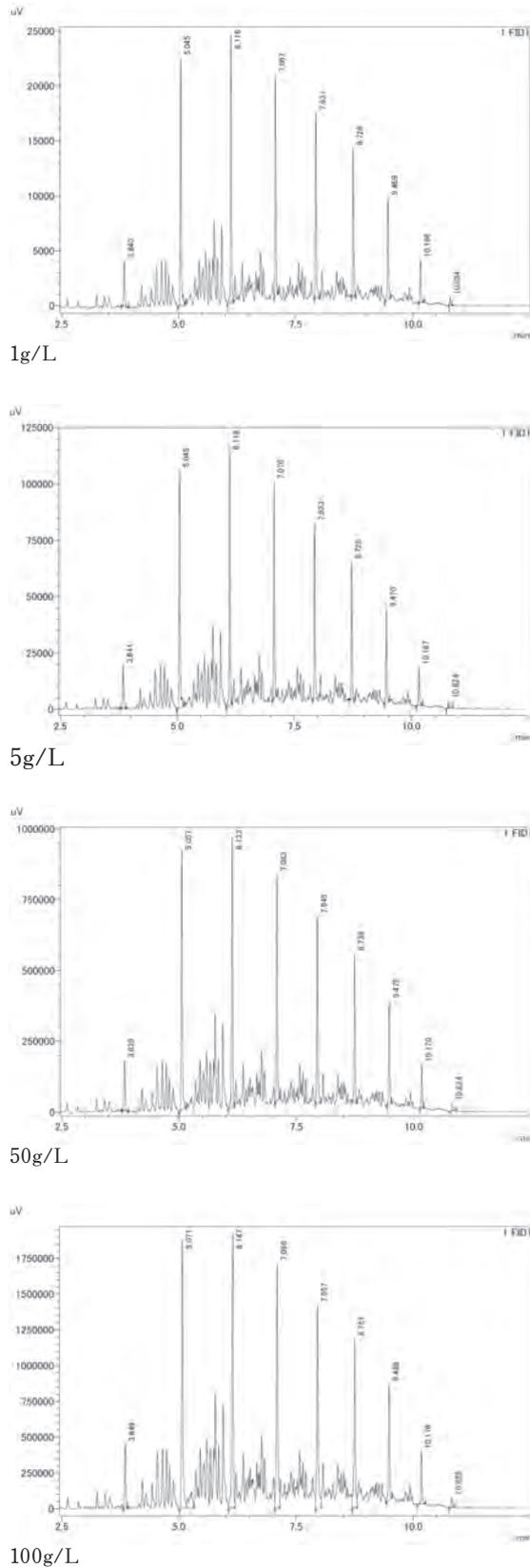


図 1 灯油の n-ペンタン溶液の GC 分析結果 (前ページからの続き)

灯油濃度 0.001g/L の GC の結果では、直鎖飽和炭化水素のピークは観測できるものの、ベースラインの乱れとノイズの影響により分岐炭化水素の弱いピークの有無の判別が困難なため、灯油の検出ができなかったと判断した。0.01 g/L 以上の濃度では、比較的低濃度のサンプルの時には、ピーク強度が低く、ベースラインの乱れの影響を受けるが、灯油の検出を確認できた。

次に、ピーク面積比が一定となる濃度範囲を調べる目的で、複数の灯油濃度でそれぞれ C13 を基準として C9 ~ C15 のピーク面積比 (Cn/C13: n = 9 ~ 15) を算出し、比較を行った (図 2)。C13 のピークは、高沸点成分の中で比較的ピークの強度が大きく、ノイズの影響を受けにくいいため基準として選定した。灯油の検出が困難であった 0.001 g/L 以外は濃度によらずほぼ一定のピーク比であることがわかった。このことから 0.01 ~ 100 g/L の範囲では安定したピーク面積比が得られると考えられる。また、灯油の有無の判別が困難な場合でも、濃縮することで判別が可能になる可能性を示している。

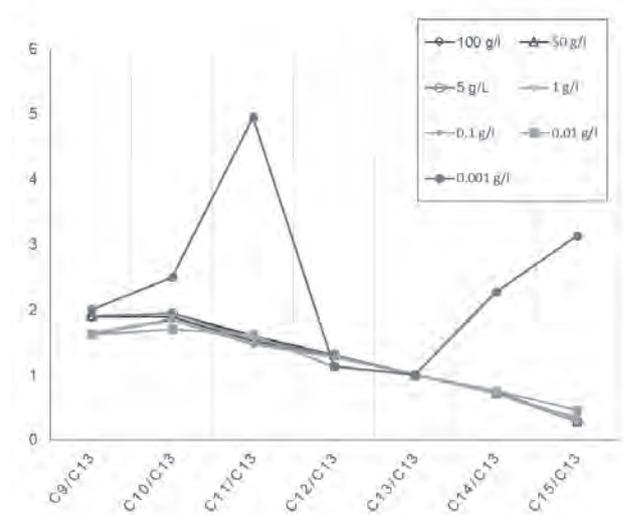


図 2 灯油濃度と GC ピーク比

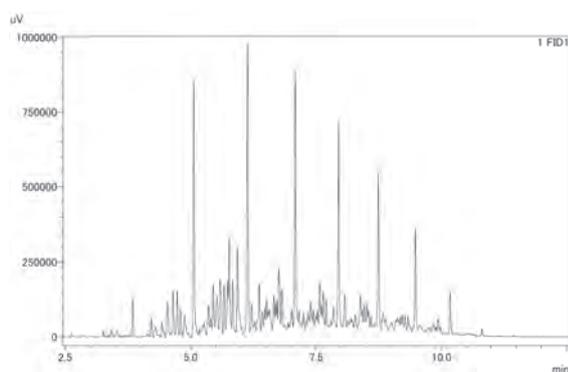
3.2 灯油を散布した綿製品の燃焼

散布した灯油量と散布箇所、燃焼時間について検討した結果を表 2 にまとめた。採取した綿製品、砂を「2.2 灯油を散布した綿製品の燃焼」で示した方法でサンプル調製し、GC を用いて分析したところ、図 3 に示す GC 分析結果が得られた。これらの GC 分析結果を比較すると、綿製品よりも砂を処理した結果の方が、再現性良く高いピーク強度が得られた。特に、実験 E (灯油 2 mL を綿製品中央に散布した条件) の綿製品から抽出した試料の GC 分析結果では灯油の有無の判断が困難であったが、砂から抽出した場合には灯油のピークを明確に確認できた。実験 A-F について C13 に対する C9 ~ C15 のピーク面積比 (Cn/C13: n = 9 ~ 15)

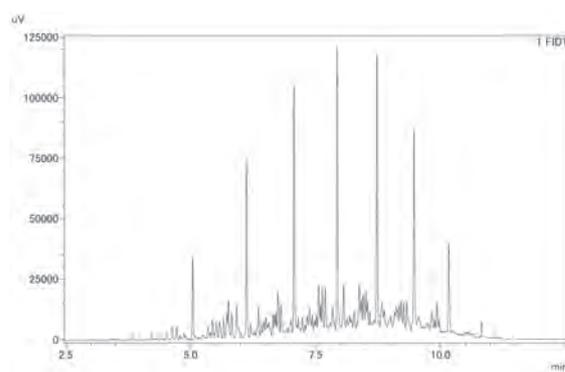
を算出し、5 g/L の灯油濃度のペンタン溶液の GC 分析結果（以後、 α と表記する）と比較した結果を綿製品から抽出したものと砂から抽出したものに分けて、図4に示した。綿製品から抽出した結果と砂から抽出した結果の比較では、低沸点成分について砂から抽出した結果の方が高いピーク面積比となることがわかった。また、砂から抽出した GC 分析結果については実験 A～F までの各分析の C9～C15 のピーク面積は、安定したピーク比を得られる濃度である 0.01～100g/L の範囲内に収まっている。これらの結果から、以下の考察では、砂から抽出した GC 分析結果（図4 燃烧した灯油の GC ピーク比 (2) 砂から抽出した結果）について考察を行う。

実験	灯油量	散布箇所	燃烧時間
A	20 mL	全体	4分30秒
B	10 mL	全体	4分50秒
C	5 mL	全体	4分50秒
D	5 mL	中央	5分8秒
E	2 mL	全体	9分4秒
F	2 mL	中央	4分52秒

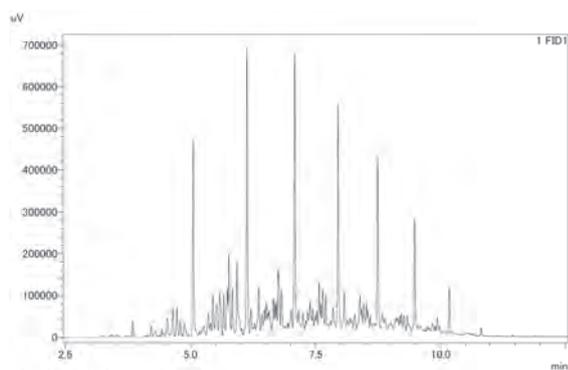
表2 灯油の量、散布箇所と綿製品の燃烧時間



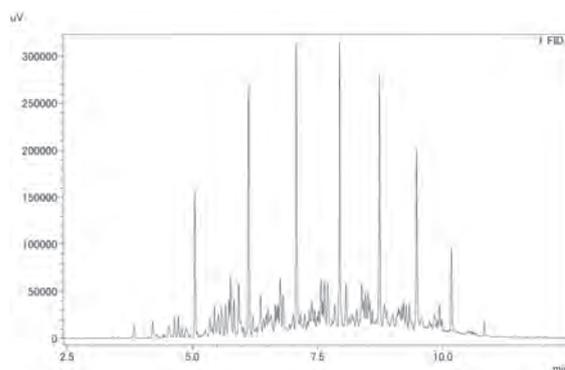
実験 A (砂)



実験 A (綿製品)

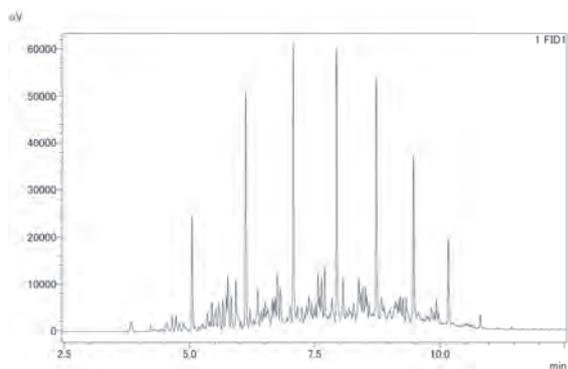


実験 B (砂)

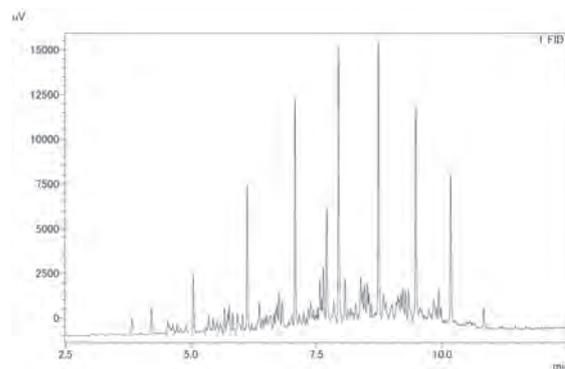


実験 B (綿製品)

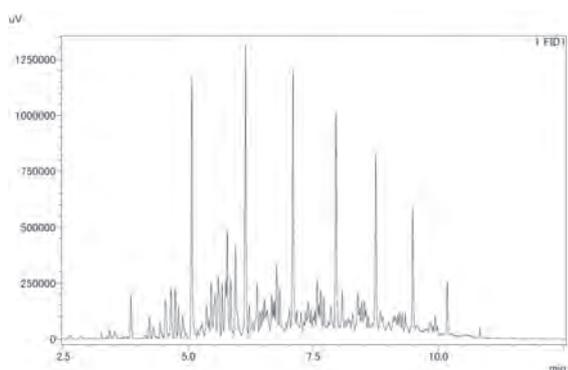
図3 燃烧残渣物から抽出した試料の GC 分析結果



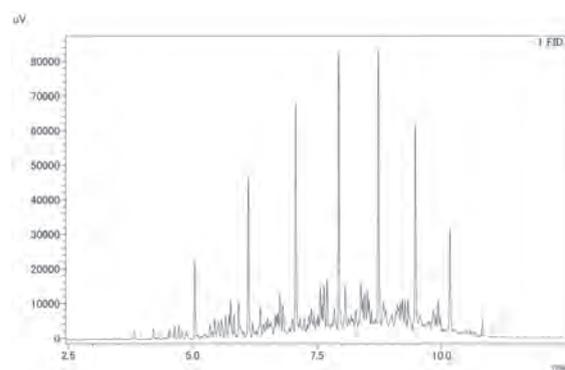
実験 C (砂)



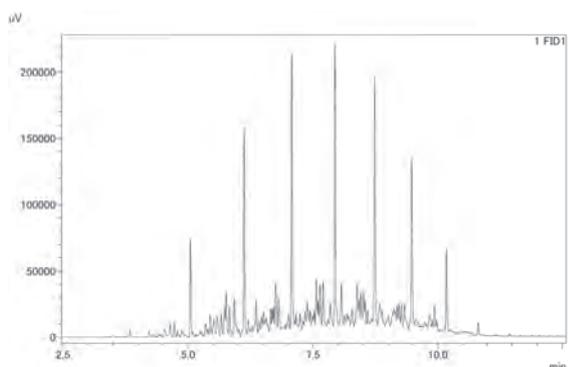
実験 C (綿製品)



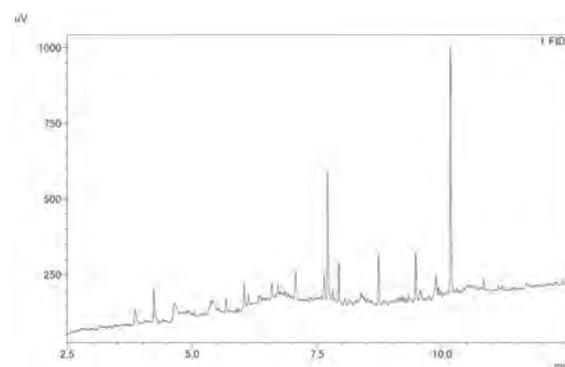
実験 D (砂)



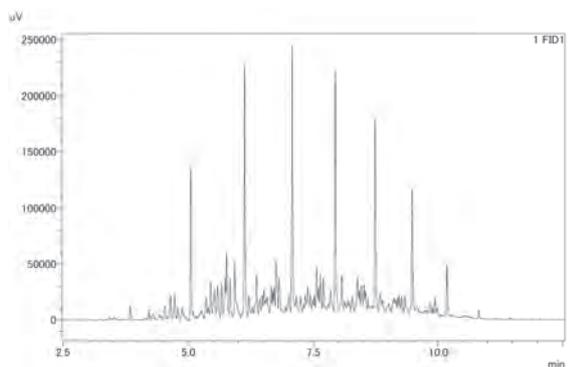
実験 D (綿製品)



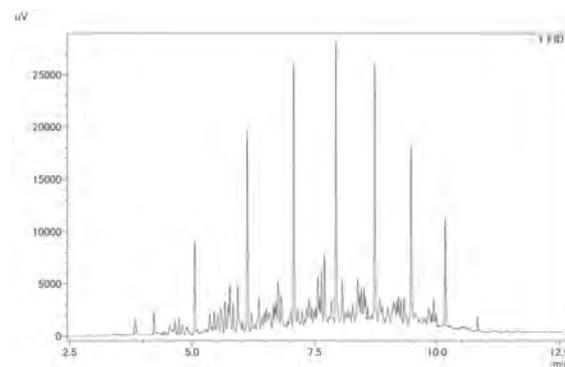
実験 E (砂)



実験 E (綿製品)

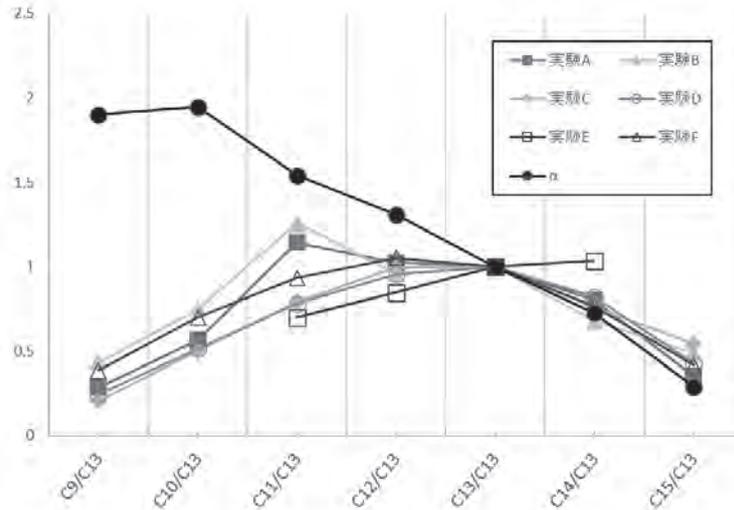


実験 F (砂)

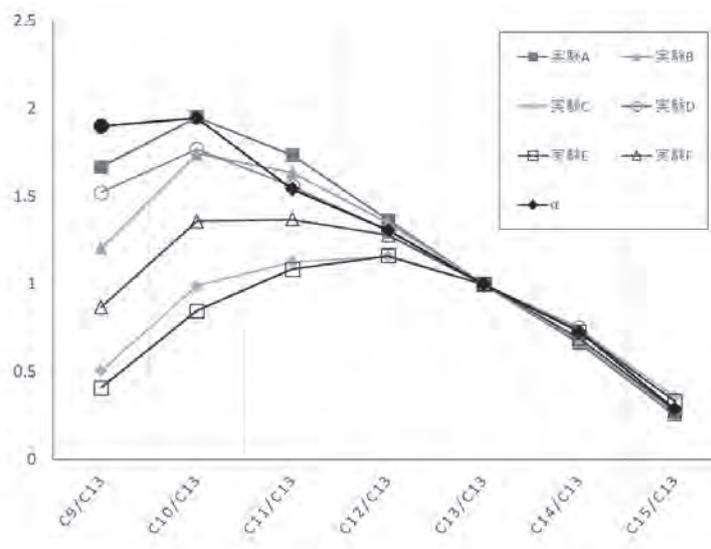


実験 F (綿製品)

図 3 燃焼残渣物から抽出した試料の GC 分析結果 (前ページからの続き)



(1) 綿製品から抽出した結果



(2) 砂から抽出した結果

図4 燃焼した灯油のGCピーク比

実験 A～Fと α の比較では、グラフの形状が異なり、燃焼によってピーク面積比に変化が見られた。C12～C15に対応するピーク面積比は、灯油量、散布箇所、燃焼時間にかかわらず、グラフが重なりほぼ一致している。一方、C9～C11のピーク面積比は大きく下方にシフトしている。これらの結果は、燃焼により高沸点成分側であるC12～C15に比べて低沸点成分側のC9～C11がより多く消失していることを示している。例えば、実験Bでは、C9/C13およびC10/C13の値が α より低いことから、燃焼により低沸点成分(C9,C10)がC11～C15の直鎖飽和炭化水素より多い割合で消失していると考えられる。鉱物油の低沸点成分の燃焼・

揮発によりGCピークパターンが全体的に高沸点側にシフトすることは以前から報告されているが^{2,3,4,5}、今回の結果もこれらと一致するものとなった。

灯油量が多い実験A、Bおよび少量の灯油を中央に散布した実験Dの3つを比較すると、着火後はいずれも灯油が散布された部分が急激に燃え、大きな炎が発生するが、1～2分程で炎が小さくなり、穏やかな燃焼となる。一方、少量の灯油を綿製品全体に散布した実験C、Eには、着火後から穏やかに燃焼が進み、炎が大きくなったとしても、灯油がより多く散布されている箇所ですら大きな炎をあげる程度である。灯油量が少ないほど燃焼時間が長くなり、グラフの最大

値も高沸点側へシフトしていくことがわかる(灯油量が多い実験 A、B および D では C10 が最大であるのに対して、灯油量の少ない実験 C および E では C12 が最大となっている)。以上のことより、急激に燃焼する実験 A、B、D よりも、長時間穏やかに燃焼する実験 C、E が下方にシフトすることを考えると、燃焼時間の違いが灯油の面積比のシフトに差を生じさせていることがわかる。短時間の急激な燃焼よりも、長時間の穏やかな燃焼の方がより多くの灯油が焼失してしまうといえる。しかし、実験 F のように、灯油を中央に散布した場合でも、2mL と灯油量が少ないと急激に燃焼する時間が短いにもかかわらず、灯油は綿製品の長時間の燃焼の影響を強く受け、低沸点成分がより多く消失した(灯油を中央に散布した実験 D と F の比較から低沸点成分である C9、C10 で大きな違いが見られる)。

3.3 灯油の染み出しの観察

ステンレス製パットの上に綿製品を置き、灯油を散布して着火した場合には、いずれの条件でも、着火時に炎が広がり、炎周辺部分の綿が円形状に焦げはじめ、この焦げが同心円状に広がった(写真1)。しばらくすると綿製品端部から液体が染み出した(写真2)。

実験 No.1 の 300mm × 200mm の綿製品では、綿製品端部から染み出した液体が火炎の熱によって次第に揮発し、ステンレス製パットの上でしみとなって残った。自然鎮火後にこのしみの部分を拭き取ったものを試料とする。

実験 No.2 の 150mm × 200mm の綿製品では、染み出した液体が液滴となって傾斜したパット下部に流れた。この液滴を拭き取ったものを試料とする。

網の上に綿製品を置き、灯油を散布した実験 No.3 では、燃焼後しばらくしてから綿製品底面に瞬時に着火する現象が

認められ、綿製品底面への揮発灯油の浸透が起こっていることが認められた。

3.4 染み出した灯油の GC の分析結果

実験に使用した灯油と同一のもののクロマトグラムを図5に示す。炭素数8(C8)程度から直鎖飽和炭化水素の大きなピークが検出し、この間に分枝炭化水素が検出している。炭素数10(C10)を炭素分布のピークとする典型的な灯油のクロマトグラムである。

実験 No.1 のクロマトグラムを図6に示す。未燃焼の灯油と比較して C8、C9 が消失し、ピークの分布の中央が C13 の高沸点側に移行している。この現象は、既報2)等で報告されている燃焼後や加熱された灯油のクロマトグラムとよく一致している。綿製品から染み出したものは散布した灯油由来の液体であり、綿製品端部で留まり、熱によって軽質成分が揮発した結果、燃焼後の灯油と同様に変化したものと認められた。

実験 No.2 のクロマトグラムを図7に示す。未燃焼の灯油と比較して、C8 は消失しているが、C9 は残存しており、ピーク分布の中央が C11 に移行している。実験 No.1 ほど軽質成分の揮発は見られず、未燃焼灯油により近いクロマトグラムが得られている。

実験 No.2 が実験 No.1 ほど軽質成分の揮発が見られなかった理由は綿製品の大きさが半分であるため、液体保持力が低く、液滴となってパット下部に流れ、熱の影響を受けにくかったためと考えている。

今回の実験では、ステンレス製パットの上で燃焼させているため、綿製品から染み出した灯油はパットの上に流出する。布団、座布団、畳などの上に灯油が散布された灯油でも、燃焼時に同様の染み出しが生じ、着火物下部や炎の周辺に



写真1 綿製品の燃焼している状態



写真2 液体の染み出した状態

移行していることが考えられる。下部へ移行した灯油は、加熱箇所より遠くなるために、軽質成分の揮発を受けにくく、燃焼していない灯油に近いクロマトグラムが得られることが期待できる。これらの結果は、「3.2 灯油を散布した綿製品の燃焼」で報告した砂の上に綿製品を置き灯油を散布して燃焼させた場合に、綿製品よりも下部の砂のほうが再現性良く強度の強いクロマトグラムが得られたことをよく支持している。

4. まとめ

本報告では、GC分析において、灯油の濃度によるクロマトグラムへの影響について確認した上で、灯油を燃焼させた試料について採取位置の違いがピークの強度およびピークパターンの変化に及ぼす影響に焦点をあてた実験を行った。その結果、灯油の検出できる最低限度の濃度は0.01g/L程度であり、0.01～100g/Lの濃度範囲で安定したピーク面積比を与えることがわかった。このことは、灯油の有無の判別が困難な場合でも、濃縮することで判別が可能になる可能性を

示している。また、砂の上においた綿製品に灯油をかけて燃焼させた実験では、直接灯油をかけた綿製品より、その下の砂の方が高い強度で灯油を検出できた。さらに、同一灯油量の条件では、燃焼による灯油の変化は燃焼時間に依存し、燃焼時間が長いほど、GCのピークの最大値は大きく高沸点成分側にシフトし、既報の結果と一致した。

ステンレス製バットの上に綿製品を置き、灯油を散布して着火した実験では、綿製品に散布された灯油は、燃焼時に綿からの染み出しが生じ、状態によっては液体状態で他の燃焼媒体へ移行していく可能性があることがわかった。また、液体状態で染み出した灯油は、熱変性をあまり受けない状態で検出できる可能性がある。本報告では、直接灯油をかけた位置とは異なる場所から燃焼による影響をあまり受けていないピーク強度の高いGC分析結果が得られることを実験的に示すことができたが、このことは火災現場での試料の採取について出火の原因と考えられる場所だけでなくその近傍（特に下部）でも鉱物油が検出できる可能性を示唆している。

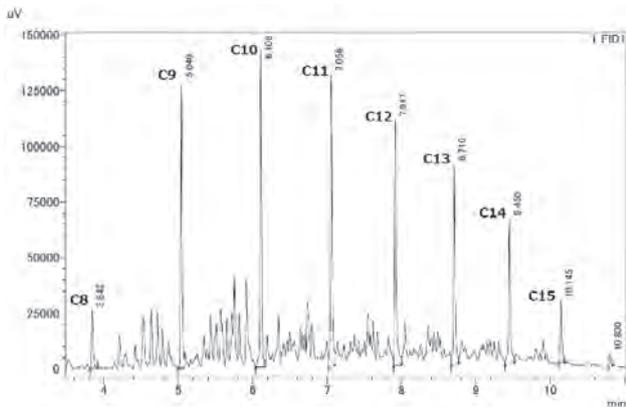


図5 未燃焼の灯油のクロマトグラム

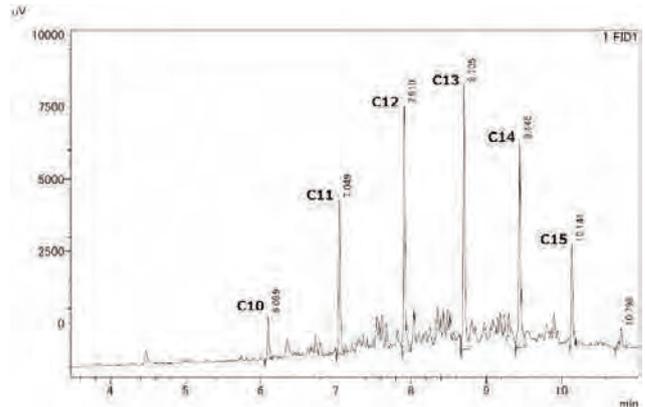


図6 実験 No.1のクロマトグラム

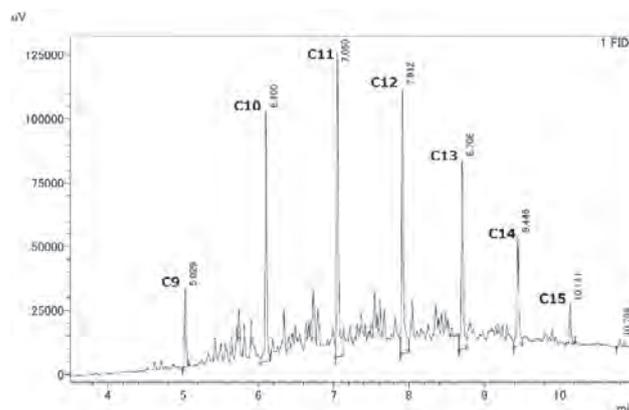


図7 実験 No.2のクロマトグラム

参考文献

- 1) 総務省消防庁：平成28年度版消防白書，2016
- 2) 福岡かおる，中牟田啓子，廣中博見，松原英隆：焼損物に含まれる鉱物油のGC/MS分析に係る検討，福岡市保健環境研究所報，27号，pp.49-55，2002
- 3) 橋上勉：燃烧による灯油成分の変化について，消防科学研究所報（札幌消防科学研究所），No.1，pp. 41-47，1994
- 4) 橋上勉：燃烧面積の違いによる灯油成分の変化について，消防科学研究所報（札幌消防科学研究所），No.2，pp. 35-44，1995
- 5) 橋上勉：燃烧面積の違いによる灯油成分の変化について（その2），消防科学研究所報（札幌消防科学研究所），No.3，pp. 36-43，1996

Study on the Detection Result for Kerosene by GC analysis Depending on Combustion Conditions and Sample Collection Point

(Abstract)

Yasuhiro Sato, Takahiro Tsukame, and Takumi Hasegawa

(Accepted October 22, 2021)

The detection of mineral oil in combustion residues may be an important factor in fire investigating. Although there have been reports on the changes in mineral oil due to combustion in terms of testing methods and evaluation of GC data, there have been no studies on the differences in GC analysis depending on the sample collection point. In this report, we examined the differences in GC analysis results for different concentrations of kerosene and the effects of combustion and sample collection points on the GC analysis results. As a result, kerosene could be detected by GC analysis at higher intensity in the sand underneath the cotton product than in the cotton product sprayed with kerosene. It was found that the kerosene sprayed on the cotton products may seep out from the cotton products during combustion and migrate to other areas in a liquid state.

技術報告

小型模型を使用したガス爆発実験について

鈴木 健

(令和3年10月28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。区画内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。区画内にろ紙を設置した場合、ろ紙が着火した。伝ば火炎によって、直接ろ紙が着火したのではなく、区画内の温度が高い状態で維持され、ろ紙が熱発火したと考えられる。テフロンシートを設置した場合、そのまま残った。ただし、加熱により一時伸びていた。ポリ塩化ビニルシート、ポリエチレンシートを設置した場合、加熱により溶融した。

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勤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表1に示すようなことが考えられる。①から⑧が原因だと推定された爆発の事例を表2に示す。

ここでは、表1に示した②のように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、火炎が外部に噴出する。いわゆる、ガス爆発の現象が起こる。区画内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。

本実験は横浜市消防局と共同で行った。

関連した過去の研究としては、以下のようなものがある。メタンと空気の予混合気のガス爆発の際に生じる火炎により、周囲に置かれた薄い可燃性固体が加熱された場合、どのような条件で着火するかについて、平野らが実験を行った^{5,6)}。平野らは、内寸法、幅8.5cm、長さ12cm、高さ9cmの燃焼容器を使用し、メタンと空気の予混合気に着火する実験を行った。燃焼容器内の圧力が上昇すると、脆弱部が破壊され、開口ができるようになっていた。燃焼容器内に設置したパラフィン紙の着火について調べた。パラフィン紙への着火は、火炎がパラフィン紙を通過し、高温の燃焼ガスがパラフィン紙を通過する時期には起こらず、その後の燃焼容器外側の空気が内部に流入する時期に起こった。また、エタノール蒸気と空気の予混合気のガス爆発の際に生じる火炎により、周囲に置かれた薄い樹脂製シートが加熱された場合、どのように変形するかについて、鶴田が実験を行った⁷⁾。鶴田は、爆発実験装置の幅45mm、奥行き25mm、高さ30mmの流路中に樹脂製シート(厚さ0.1または0.15mm)を設置し、火炎を伝ばさせた。火炎が通過する際に、樹脂シートは加熱され変形した。樹脂シートは、流れ場の上流側において、強く加熱された。上流側では、下流側に比べ、変形が大きかった。

表1 爆発の原因

可燃物の状態	原因
気体	①配管、容器等から可燃性気体が外部に出て、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。
液体	②引火点の低い可燃性液体の入っている配管、容器等がある。液体が、配管、容器等から外部に出て、気化する。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。 ③引火点の低い可燃性液体の入っている容器がある。容器は完全に密閉されている状態ではない。蒸気が、容器から外部に出る。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。 ④引火点が比較的高い可燃性液体の流れる配管等に亀裂ができ、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。 ⑤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。 ⑥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。 ⑦引火点が比較的低い可燃性液体を含む液体が、固体と混合している。乾燥設備、遠心分離装置等を使用して、固体と液体を分離する作業を行う。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。
固体	⑧可燃性固体の粉末が空気中に舞い上がり、何らかの着火源により着火する。

表2 爆発があったと推定された事件事例

推定原因	年	月	都道府県	概要	出典
①	1996	4	東京	共同住宅*の地下1階にあるカラオケボックスに5人**がいた。カラオケボックスで爆発が発生した。5人が熱傷を負った***。天井、内壁が破損し、エアコン等が焼損した。 以下のように推定された。カラオケルーム内にいた2人が、ビニール袋にライター充填用ガスボンベから注入し、吸引する通称「ガスパン遊び」をしていた。他の1名が、たばこを吸おうと、ライターに着火したため、室内に充満していた可燃性ガスに着火し、爆発が発生した。 *耐火造(地上3階、地下1階建)、延面積273㎡ **全員15才、高校生、女3人、男2人 ***男2人と女2人が中等症、女1人が軽症	1
①	1999	4	東京	共同住宅*の1階居室において、居住者の息子が使用済みの簡易型ガスコンロ用ガスボンベを廃棄するために、ガスボンベ約10本の底部に缶切りで穴を開けた。その直後にたばこを吸おうとしたところ、室内で爆発が発生した。1名が負傷した。1棟がぼやになった。マットレス、こたつ、毛布等が焼損した。 たばこを吸うためにライターに着火したことにより、ガスボンベから放出され室内に滞留していた可燃性気体に着火したと推定された。 *耐火造(地上5階建)、延面積2744㎡	1
①	2001	12	埼玉	歯車製造業の事業所では、焼入れ炉*において、半製品を加熱炉**で加熱した後に焼入れ油で熱処理していた。焼入れ炉を休止し、点検していた。作業員が、焼入れ炉内の焼入れ油槽部分に入り作業した後、焼入れ炉の外に出た。焼入れ炉内の加熱炉を点検するために扉を開けたところ、爆発が発生した。 作業員2名が軽症を負った。 加熱炉内を点検するために照明が必要になり、ライターに着火したところ、加熱炉内に漏れていたボタンに着火したと推定された。 *一般取扱所 **ボタンを燃料として使用	2

推定原因	年	月	都道府県	概要	出典
①	2017	3	新潟	屋外給油取扱所の営業準備中であった。販売室で爆発が発生した。従業員が消火器で初期消火活動を行った。販売室の網入りガラス3枚、天井の一部が破損した。従業員1名が顔面にI度熱傷を負った。公設消防機関の覚知は爆発の発生の約3時間後であった。公設消防機関は付近の住民からの通報により覚知した。スプレー缶を石油ファンヒーターの前で温めたために破裂し、爆発となったと推定された。	2
①	2018	12	栃木	共同住宅兼飲食店において、消防より火災になっている旨の連絡を受けたLPガス販売事業者が現場へ出動した。現場では火災により設置してあったLPガス容器のバルブが破損し閉止できなくなっているため、消防の許可のもと、安全な場所でガスの放出を実施した。5名が軽症となった。何らかの原因により可燃性気体が漏えいし、調理場のガステーブルを点火棒ライターで点火しようとしたところ、漏えいした可燃性気体に引火し爆発し火災となったと推定された。	3
①	2019	5	静岡	一般住宅のプレハブ小屋において、煮炊き用に設置した鋳物コンロ及びLPガス容器*付近で、爆発し、火災となった。消費者1名及び当該物件付近でバーベキューをしていた7名、計8名が負傷した**。 消費者が鋳物コンロを点火する際、単段式調整器に接続されている2口ボールバルブの内、燃焼器と接続されていない側のバルブを開放したまま鋳物コンロとの接続側のバルブを開き点火したことにより漏洩し、引火し、爆発したと推定された。 * 10 kg ** 重傷1名、軽傷7名	3
②	2004	11	大阪	塗料の製造、調色を行う事業所において、従業員が攪拌機*に付着した塗料を洗浄するために、攪拌機の上部に鉄製ホッパーを取り付け、洗浄用のキシレン**を攪拌機内に流し込んでいた。1回目の洗浄後、2回目の洗浄のためキシレンを流し込んだところ、爆発が発生した。 キシレン20リットル、攪拌機、モーターが焼損した。 攪拌機内にあったキシレンの蒸気に着火したと推定された。 * 容量2000リットル ** 第2石油類	2
②	2010	10	福岡	自動車整備業を営む事業所において、移動タンク貯蔵所のタンク*内部のメンテナンス作業を行っていた。パーツクリーナー**によりタンク内部に付着した油分を除去した。2から3時間が経過した後、タンク内部を確認するために照明としてライターを使用したところ、爆発が発生した。 火災現場にいた作業員1名が中等症になった。 タンク内に可燃性蒸気が存在していたため、裸火により着火したと推定された。 * 容量3600リットル ** 第1石油類	2
②	2018	11	兵庫	レーヨン、アセテートを製造する事業所において、反応釜を自動洗浄していたところ、爆発が発生した。 スレートの屋根300㎡、スレートの壁40㎡、扉2カ所、窓ガラス8カ所、照明1カ所、反応釜のマンホール蓋、ダクト、配管を固定するための吊り金具が破損した。飛散物が半径20mの範囲に飛散した。 事後聞知であった。公設消防機関の覚知は、発生から約7時間後であった。 自動洗浄を行っていたところ、二硫化炭素注入ラインのバルブから二硫化炭素*が漏洩し、着火し、爆発が発生したと推定された。 * 特殊引火物	2

推定原因	年	月	都道府県	概要	出典
③	2002	9	東京	<p>中学校において、出勤してきた教師が、建物*1階にある理科準備室の鍵を開け、中に入ったところ、冷蔵庫が壊れているのを発見した。カエルの解剖のために使用したジエチルエーテル**を含んだ綿とカエルをビニール袋に入れて、理科準備室内の冷蔵庫に保管していた。ビニール袋は2重にしていた。</p> <p>発見の前日に、ジエチルエーテルが気化し、冷蔵庫内に滞留し、着火し、冷蔵庫内で爆発したと推定された。</p> <p>*耐火造(地上3階建)、延面積670㎡</p> <p>**特殊引火物</p>	1
③	2004	2	群馬	<p>給油取扱所の整備室内において、従業員2名が故障車両の燃料タンクからガソリンを抜き取っていたところ、爆発が発生した。従業員1名が火傷を負い、中等症になった。全自動洗濯機1台が焼損した。</p> <p>整備室内にガソリンの蒸気が滞留しており、全自動洗濯機を使用したことにより着火したと推定された。</p>	2
③	2004	6	兵庫	<p>液晶関連材料を製造する事業所のプラント室において、反応槽*を使い、水銀灯による光反応工程を行っていたところ、爆発が発生した。</p> <p>壁体3㎡が焼損した。設備機器(エバポレーター)1基、光反应用水銀灯1基が破損した。作業員1名が中等症(上肢熱傷II度)、1名が軽症(聴力障害)となった。</p> <p>以下のように推定された。反応槽の上部の蓋は密閉設計ではなかったため、反応槽内からトルエン**の蒸気が周囲に流出した。反応槽周囲の局所排気効果は十分ではなかった。可燃性予混合気が発生され、電気スイッチにより着火し、爆発が発生した。</p> <p>*直径39cm、高さ39cm、容量45リットル</p> <p>**第1石油類</p>	2
③	2006	12	石川	<p>給油取扱所の車輛整備室のピット*内で、従業員が普通乗用車の燃料タンクからペール缶にハイオクガソリン**を抜き取ったところ、火災になった。作業を行っていた従業員1名が両手背部に火傷を負い、重症となった。</p> <p>ハイオクガソリンの蒸気がピット内に滞留しており、使用していた投光器***により着火したと推定された。</p> <p>*縦470cm×横150cm×深さ135cm、コンクリート製</p> <p>**第1石油類</p> <p>***非防爆</p>	2
④	1992	12	山口	<p>各種のポンプの製造、販売を行う事業所において、油圧モーターの作動試験中に、耐油ゴムホースが破損し作動油*が噴霧状に噴出した。火災となった。</p> <p>建物**内の油圧発生装置一式、油圧モーターが全焼した。重症者3名、軽症者1名が発生した。重油***1200リットル、作動油2500リットルの一部が延焼および流出した。</p> <p>油圧モーター内部で部品の破壊による故障が生じ、設計圧力2kgf/cm²のドレンラインに約100kgf/cm²の作動油が流入し、常圧10kgf/cm²(最小破壊圧力40kgf/cm²)の耐油ゴムホースが破損したと推定された。</p> <p>*第4石油類</p> <p>**鉄骨ブロック造平屋建、床面積140㎡</p> <p>***第3石油類</p>	2

推定原因	年	月	都道府県	概要	出典
④	2000	2	北海道	<p>移動タンク所蔵所の運転者が複合用途ビル*の1階店舗に灯油**の注油に向き、ホースリールを店舗内に延長してポリ容器に詰め替えていた。注油ノズルを閉止した際、ホースリールのノズル側から約3mの位置で亀裂が生じ、噴霧状に噴出した。火災となった。複合用とビルの1階75㎡が焼損した。従業員1名が焼死し、2名が重症、8名が軽症となった。</p> <p>燃焼中の移動式灯油ストーブにより着火したと推定された。</p> <p>* 防火造地上2階建て、延べ299㎡</p> <p>** 第2石油類</p>	2
⑤	2001	7	福島	<p>給油取扱所において、販売室の液面計が故障していたため、従業員が、地下タンク*のマンホール内の液面計により油量を確認しようとした。鋼板の蓋を開け、明かりを採るために、手持ちのライターに着火したところ、爆発が発生した。</p> <p>従業員1名が、顔面と右上腕部に火傷を負い、軽症となった。マンホール内に滞留していたガソリン蒸気が、ライターにより着火したと推定された。</p> <p>* 容量10キロリットル、ガソリンを貯蔵</p>	2
⑤	2007	3	茨城	<p>塗料を製造する事業所において、製造した塗料*を充填ポンプから18リットル缶に充填していたところ、爆発が発生し、火災となった。デジタル台はかり1台と18リットル缶1個が焼損した。従業員1名が重症となった。</p> <p>粉末消火器による初期消火活動により、火災は拡大しなかったが、周囲には第1石油類等の危険物が多量にあった。</p> <p>18リットル缶内にあった塗料の蒸気が着火したと推定された。</p> <p>* 第1石油類</p>	2
⑤	2012	1	北海道	<p>給油取扱所において、業務委託を受けている会社の社員が在庫点検を実施するために、地下貯蔵タンクのマンホールを開放したところ、爆発が発生した。</p> <p>社員1名が顔面部に熱傷(軽症)を負った。</p> <p>事後聞知であった。公設消防機関の覚知は発生から約16時間後であった。</p> <p>計量口南京錠が凍結して鍵が入らなかったために、解冻するためにガスハンドトーチを使用したことにより、タンク内にあったレギュラーガソリン*の蒸気が着火したと推定された。</p> <p>* 第1石油類</p>	2
⑥	1992	2	神奈川	<p>給油取扱所において、移動タンク貯蔵所*から地下専用タンクへの荷下ろしが完了した。保安監督者の指示により、22時頃にアルバイト従業員が移動タンク貯蔵所の上部に登り、マンホールの蓋を開けてタンクが空であることを確認しようとした。ライターに着火したところ、火災になった。</p> <p>アルバイト従業員1名が、軽症となった。</p> <p>当日は雪の影響で、移動タンク貯蔵所の到着が遅れ、到着は夜であったため、荷下ろしの確認のために、通常は必要としない照明が必要になったため、ライターを使用した。</p> <p>ライターの裸火により、移動タンク貯蔵所のタンク内のガソリンの蒸気が着火したと推定された。</p> <p>* 容量20キロリットル</p>	2

推定原因	年	月	都道府県	概要	出典
⑥	2006	6	愛知	<p>自動車部品を製造する事業所において、自家用給油取扱所の地下タンク*を取り替えるための工事を行っていた。タンク内のガソリンを抜き取り、ガス濃度測定**を行い、内部清掃を行った。その2日後の午前中に、コンクリートカッターでタンク上部のコンクリートを切断し、午後に、マンホール横を切断していたところ爆発が発生した。爆発により、コンクリートカッター、トラックが破損した。マンホールの蓋が40 m 飛んだ。コンクリートカッターを操作していた者と補助者の2名が軽症となり、事業所の救急車で病院に搬送された。事後聞知であった。</p> <p>タンク内にガソリンの蒸気があり、着火したと推定された。</p> <p>* 容量 9600 リットル</p> <p>** 酸素濃度 21%、可燃性ガス 0.1% 以下であった</p>	2
⑥	2008	7	和歌山	<p>化学品を製造する事業所において、変更工事のため製造所の運転を停止していた。屋内にあるトルエンタンク*のベント配管を改造するため、トルエンタンクを空にし、トルエンタンク内と配管を洗浄した。ベント配管にフランジを取り付けるための溶接工事**を開始した直後に、トルエンタンクが爆発した。</p> <p>トルエンタンクの天板と底板の部分が破裂した。付属配管、計装機器、2階床面が損傷した。事業所を管轄する消防署への一般加入電話での通報により、公設消防機関は覚知した。</p> <p>以下のように推定された。溶接工事を行う前日までに、トルエンタンクを空にし、トルエンタンクと配管の洗浄を行った。洗浄が十分でなく、少量のトルエンが残留したため、トルエン***の蒸気がベント配管内に滞留した。また、溶接工事前にフランジ接続部を仕切り板で閉鎖しなかった。溶接工事を開始したところ、着火した。</p> <p>* 直径 3 m、高さ 3.5 m、容量 23 キロリットル</p> <p>** アルゴン溶接</p> <p>*** 第1 石油類</p>	2
⑦	1989	8	愛知	<p>剥離紙を製造する事業所において、塗工紙製造機を通常運転していた。塗工液*を塗布された塗工紙を乾燥するための熱風乾燥炉**内で爆発が発生した。</p> <p>工場の建物の屋根が崩落し、乾燥装置も破壊された。</p> <p>公設消防機関の覚知は、爆発発生約2時間後であった。</p> <p>装置の不調により、通常より多くの塗工液が紙に付着し、乾燥炉内に多くの塗工液が送られ、乾燥炉内で可燃範囲に入り、爆発が発生したと推定された。</p> <p>* トルエン(第1 石油類)を含む液体</p> <p>** 長さ 50 m × 幅 3 m × 高さ 6.5 m</p>	2
⑦	1995	2	東京	<p>クリーニング作業場*では、石油系ドライ溶剤**を使用し、洗濯して脱液したセーター類を回収乾燥機で乾燥していた。</p> <p>従業員が、作業中に、回収乾燥機から「ドカン」という音が聞こえたので、振り返ってみると、乾燥機内に火炎が見えた。</p> <p>1棟がぼやになった。</p> <p>回収乾燥機内で、石油系ドライ溶剤の蒸気が着火し、爆発が発生したと推定された。</p> <p>* 準耐火造(地上2階建)</p> <p>** エクゾール D40、第2 石油類</p>	1

推定原因	年	月	都道府県	概要	出典
⑦	1997	9	東京	<p>医薬品製造工場*では以下のようにして顆粒状のビタミン剤を製造していた。</p> <p>数種類の粉末薬品を混合する →粒径を大きくするためにアルコールを添加し、顆粒状に造粒する →電気乾燥機**でアルコールを蒸発乾燥させる</p> <p>乾燥中に、電気乾燥機が爆発した。 布製カバー等が焼損した。作業員5名が負傷した。</p> <p>以下のように推定された。電気ヒーターの設定が通常と異なり、電気乾燥機内の温度が通常より高かった。また、電気乾燥機にはアルコールを排出するための排気ダクトがあったが、排気が十分でなかった。そのため、アルコール蒸気の濃度が通常より上昇し、可燃範囲に入り、電気ヒーターにより着火した。</p> <p>*耐火造(地上4階建)、延面積702㎡ **建物の1階に設置</p>	1
⑦	2016	3	山口	<p>化学工業製品を製造する事業所において、遠心分離機*を使用して、スラリー液**から結晶を分離する作業を行っていた。遠心分離機にスラリー液を給液したところ、遠心分離機内で爆発が発生した。</p> <p>遠心分離機の給液ノズルが破損した。遠心分離機内を確認するための照明用の窓のガラスが破損し、給液の状態を確認していた作業員1名が熱傷により重症になった。</p> <p>破損した給液ノズルからスラリー液約100kgが流出した。 救急要請により出動した救急隊による自己覚知であった。</p> <p>窒素による遠心分離機内の置換が不十分であったため、遠心分離機内で可燃範囲に入り、着火したと推定された。</p> <p>*容量505リットル **ヘプタン(第1石油類)と1,6-デカンジカルボン酸の混合物</p>	2
⑦	2017	6	岩手	<p>医薬品を製造する事業所において、2階の部屋にあるマンホールから、布製のシュートを介して1階の乾燥機内に、薬品と溶剤*の混合物を投入していた。約90kgを投入することになっていた。10分間かけて、約50kgを投入したところ、爆発が発生した。</p> <p>乾燥機は停止中であった。 窓ガラス、扉、床が破損した。布製のシュートが焼損した。</p> <p>乾燥機内またはシュート内で、酢酸エチルの蒸気が着火したと推定された。</p> <p>*酢酸エチル、第1石油類</p>	2
⑦	2017	8	山形	<p>研究機関の実験室*において、試料繊維への油剤塗布工程を行っていた。メタノールを含浸させた試料繊維を2槽式洗濯機**を使用して脱水していたところ、爆発が発生した。周囲の従業員が粉末消火器により初期消火活動を行った。</p> <p>洗濯機が破損した。脱水槽内にあった試料繊維と洗濯ネットが、焼損した。</p> <p>事後聞知であった。公設消防機関の覚知は、爆発発生翌日であった。</p> <p>洗濯機内で、メタノールの蒸気が着火したと推定された。</p> <p>*一般取扱所 **非防爆</p>	2

推定原因	年	月	都道府県	概要	出典
⑧	1958	n	長野	菓子工場において、乾菓子を製造するため、コーンスターチとデンプンを練り、型に流し込んで乾燥室*に入れて乾燥させていた。入口の引き戸を閉めてから数秒後に乾燥室内で爆発が起きて工場全体が火災になった。 3名が火傷を負った。 乾燥室内にコーンスターチ粉が堆積しており、振動で粉じん雲が形成され、乾燥用の熱源である電熱器**により着火し、爆発したと推定された。 * 約10 m ³ ** 6台あった	4
⑧	1970	n	千葉	横吹アトマイジング工場において、アルミニウム粉捕集用のバグフィルターのアルミ粉の払い落とし中に爆発が発生した。 工場2棟が損壊した。作業員3名が死亡、3名が負傷した。 ブロワーを運転したままの作業だったので、バグフィルター付近のアルミニウム粉が舞い上がり、着火し、粉じん爆発が発生したと推定された。	4
⑧	1991	2	愛知	水飴、液糖コーンスターチを製造する事業所に、トウモロコシを皮と実に分けて、実は乾燥させ、皮は飼料にするために粉碎機にかけ粉末にする工程があった。トウモロコシの実を乾燥させる設備内で、トウモロコシの実が焼けたため、焼けたトウモロコシの実を取り除く作業を行っていた際に、粉碎機内で爆発が発生した。 火災となり、乾燥設備200 m ³ が焼損した。作業中であったアルバイト1名が重症となった。 粉碎機内にあったトウモロコシの微粉に着火し、粉じん爆発が発生したと推定された。	2

n: 記載なし
①から⑧は、表1を参照。

2. 実験装置及び方法

実験装置の概要を図1に示す。図1(a)に示すように、スチール製アングル(幅: 40 mm)を使用して奥行き1 m、幅1 m、高さ40 cmの直方体の枠をつくり、直方体の6面に透明なプラスチックシート(材質: ポリエチレン、厚さ: 0.1 mm)を貼り付けることにより密閉された区画をつくった。貼り付けるために市販の両面テープまたは梱包用養生テープを使用した、図2に示すように、側面の4面をA面、B面、C面、D面とし、天井の面をE面とする。区画の床面上に置いたアルミニウム製のトレイ上にヘキサン(鹿1級)を散布し、ヘキサンが全て気化するのを待った。気化に要する時間を短くするために、アルミニウム製のトレイをリボンヒーターで加熱した。区画内の攪拌は行わなかった。1回の実験においてヘキサンを散布した量は、37 gと38 gの間であった。ヘキサンが全て気化し、区画内において空気と一様に混合した場合のヘキサンの濃度は、2.4%になる。これは爆発下限濃度の約2倍に相当する。ヘキサンの性質を表3に示す。使用したヘキサンには弱い独特な臭いがある。そのため、区画の密封が完全でなく、ヘキサンが区画から漏れ出した場合、区画の周囲でヘキサンの臭いを感じる。ヘキサンを散布してから全て気化するまでの間に、時々区画に近づいたが、

臭いは感じなかった。

図1(a)、図1(b)、図2に示すように、A面のほぼ中央から電気火花着火装置の2本の電極を内部に差し込み、A面から7 cm内側の位置で火花が発生するようにした。電気火花着火装置に使用されている変圧器の諸元を以下に示す。

型式 長野愛知電機製 IG-A1 型

周波数 50・60 Hz

1次電圧 100 V

容量 280・210 VA

2次電圧 10 kV

2次電流 23・18 mA

2次中性点接地

時間定格 連続

電気火花着火装置の電極を設置した高さにおける濃度が、爆発下限濃度以上かどうか判断するために、区画内のガス濃度を簡易的に測定した。A面のスチール製アングル近傍で、電気火花着火装置の電極とほぼ同じ高さの位置にガス採取用チューブを差し込み、採取口を約1 cm内側に設置し、区画内の気体をポンプで吸引してガス検知器(機種: 新コスモス電機製 XA-4400)に送り、ガス濃度を

簡易的に測定した。電気火花着火装置を設置した高さにおいて、爆発下限濃度付近になっていることをガス検知器の表示から判断した後に、電気火花着火装置に通電し、電気火花を発生させることにより着火した。通常のビデオカメラ、デジタルカメラ、熱画像カメラを使用して火炎伝ばの様子を撮影した。

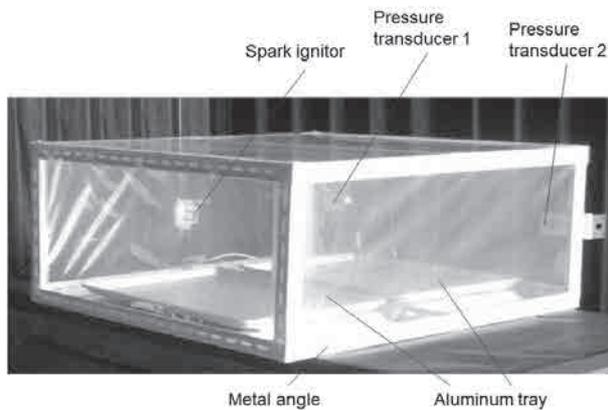
D面の2箇所に、圧力センサー(計測技研 圧力伝送器 POW-21J型 圧力範囲0~50 kPa)を設置し、区画

内の圧力変化を測定した。圧力センサーを設置する高さは、電気火花着火装置の電極とほぼ同じ高さとした。圧力センサーの信号は、データロガー(TEAC VR-24)に記録した。使用したデータロガーには、カメラの映像をとりこみ、他のデータと同期させて表示する機能がある。圧力センサーの信号と、火炎伝ばの様子を比較した。

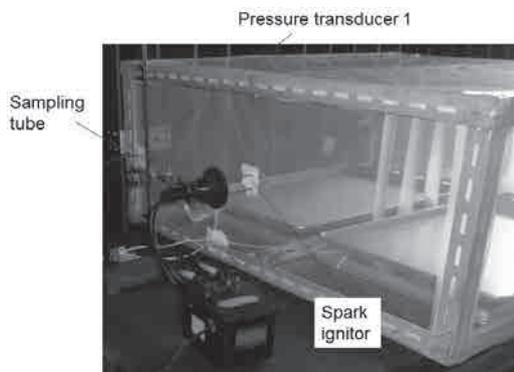
区画内にシート状の可燃性固体を設置した。図1(c)に示すように、区画の天井面と床面にL型スチール製アングルを設置した。図2における破線にあたる位置である。短冊状(長さ40 cm、幅5 cm)の可燃性固体6枚を、スチール製アングルに両面テープで貼り付けた。短冊状の可燃性固体の間隔は5 cmとした。可燃性固体として、ろ紙(厚さ:0.20 mm)、テフロンシート(厚さ:0.05 mm)、ポリ塩化ビニルシート(厚さ:0.05 mm)、ポリエチレンシート(厚さ:0.05 mm)を使用した。

実験番号を表4に示す。同じ条件の実験を各2回行った。例えば、実験a1と実験a2は、同じ条件で行った実験である。

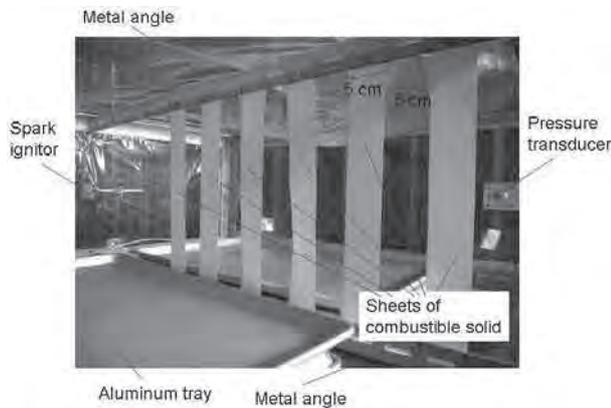
実験は屋内で行った。実験を行った場所の雰囲気温度は10から13℃であった。



(a) 外観



(b) 外観



(c) 内部

図1 実験装置

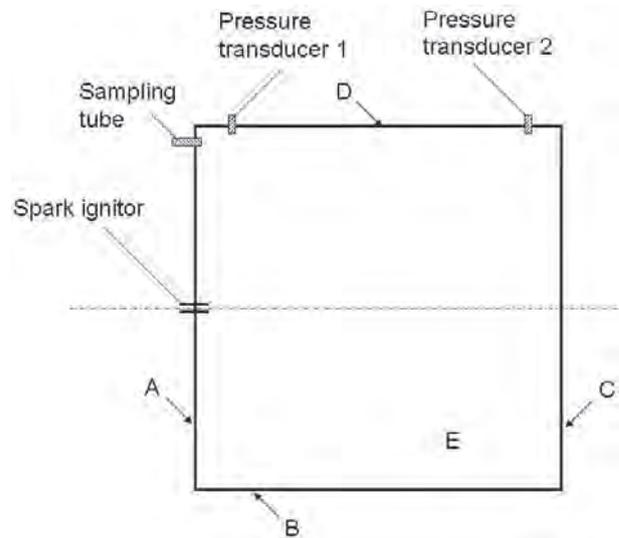


図2 上方から見た実験装置の概要

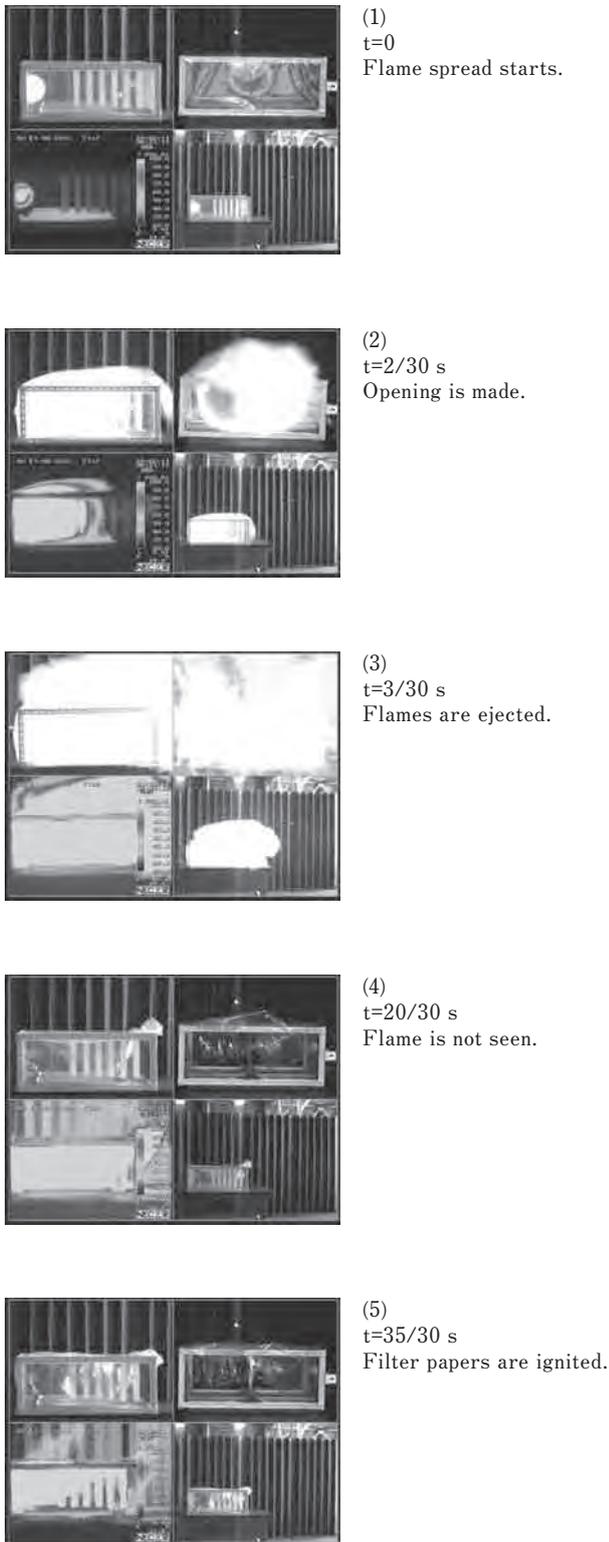


図 3 火炎伝ばの様子
実験 a1
試料の種類 ろ紙

3. 結果及び考察

実験結果の概要を示す。

実験 a1

火炎伝ばの様子を図 3 に示す。下段左の画像は熱画像カメラで撮影した。他は通常のビデオカメラで撮影した。上段右の画像は C 面を撮影した。他は B 面を撮影した。t は経過時間である。火炎の伝ばが開始されると (図 3(1))、区画内の圧力が上昇し、C 面のプラスチックシートが持ち上がり、開口ができた。さらに持ち上がり、E 面に開口ができた (図 3(2))。C 面、E 面の開口から火炎が噴出した (図 3(3))。ビデオカメラでは火炎が見えなくなった後も、熱画像カメラの映像では区画内の温度が高かった (図 3(4))。ろ紙に着火し (図 3(5))、6 枚全てが燃え尽きた。ろ紙の火炎により、E 面のプラスチックシートが有炎燃焼した。プラスチックシートの一部が燃えながら、熔融し、落下した。伝ば火炎によって、直接ろ紙が着火したのではなかった。開口ができ外部から空気が流入したが、区画内の温度が高い状態で維持された結果、ろ紙が熱発火したと考えられる。可燃性固体の着火が伝ば火炎の通過後であったのは、平野ら^{5,6)}の実験結果と同様である。

圧力の時間変化を図 4 に示す。圧力センサーを 2 箇所に設置したが、圧力の時間変化を示す曲線の形状に大きな違いはなかった。着火し (図 4 ①)、火炎伝ばが開始されると、区画内の圧力が上昇した。C 面のプラスチックシートが持ち上がり、開口ができると圧力が低下した (図 4 ②、③、④)。その後、再び圧力が上昇し、E 面に開口ができ (図 4 ⑤)、火炎が激しく外部に噴出する状態になると、圧力が低下した (図 4 ⑥)。その後、圧力が上昇するが、ヘキサンが消費され火炎が小さくなると、圧力が着火前の状態に戻った。その後、火炎が見えなくなった (図 4 ⑦)。

① t=0
Ignition



④ t=0.11 s
First minimum



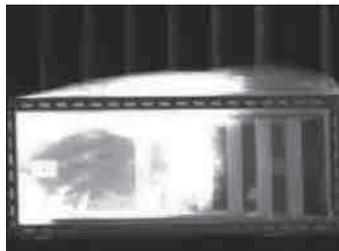
② t=0.075 s
Opening is made at surface C.



⑤ t=0.13 s
Second peak
Opening is made at surface E.



③ t=0.092 s
First peak



⑥ t=0.18 s
Second minimum

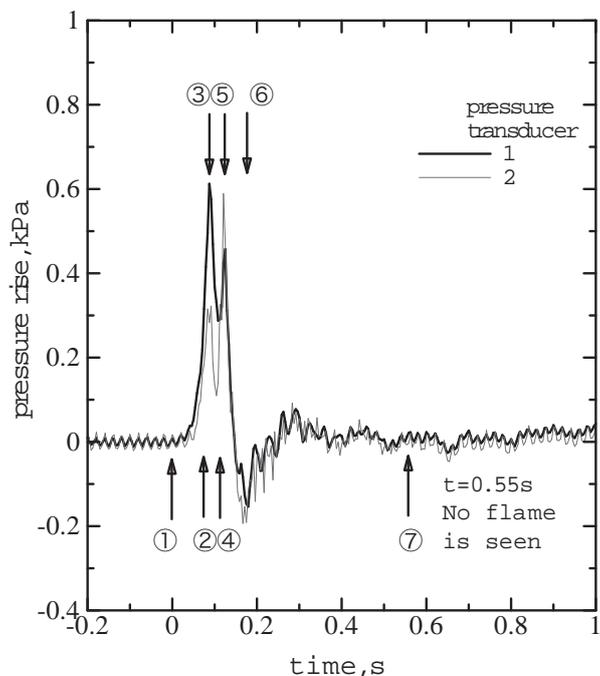


図4 圧力の時間変化
実験 a1
試料の種類 ろ紙

表 3 ヘキサンの性質

		出典
分子式	C ₆ H ₁₄	
構造式	CH ₃ (CH ₂) ₄ CH ₃	
分子量	86.17	
沸点, °C	69	8
融点, °C	-95	8
下部引火点, °C	-27	8
上部引火点, °C	4	8
爆発下限界, %	1.1	8
爆発上限界, %	7.5	8
化学量論温度, °C	-17	8
化学量論組成, %	2.16	8
蒸気圧, mmHg ()内の数値は温度単位は°C	1 (-53.9) 5 (-34.5) 10 (-25.0) 30 (-14.1) 60 (5.4) 100 (15.8) 200 (31.6) 760 (68.7)	8
最低発火温度, °C (大気圧、空気中)	240	9
瞬間発火温度, °C (大気圧、空気中)	365	9
燃焼速度, cm/s (空気中における最も大きな値)	38.5 (C=2.5)	10
爆発圧力 (65 °Cで容積 10 リットルの密閉容器 中で燃焼させた場合の値)	P=5.1, t ₁ =0.12, V ₁ =59.8, V ₂ =42.2 (C=1.2) P=6.2, t ₁ =0.08, V ₁ =119.5, V ₂ =77.3 (C=2) P=6.5, t ₁ =0.06, V ₁ =175.8, V ₂ =105.5 (C=2.5) P=6.4, t ₁ =0.10, V ₁ =108.3, V ₂ =63.3 (C=3) P=3.8, t ₁ =0.72, V ₁ =7.8, V ₂ =5.3 (C=4)	10
比重	0.6603 (20 °C /4 °C)	11
蒸気密度	2.97	11
溶解性	水に不溶	11
毒性	呼吸器系に刺激性で、高濃度で麻酔性と思われる。 10 分間 5000 ppm 吸入すると、著しいめまいを起こす。2500 ~ 1000 ppm の濃度を 1 日に 12 時間吸入すると、眠気、疲労、食欲不振、四肢末梢の知覚異常を起こす。	11
臭気	わずかに臭気を有する。	11

C: ヘキサン蒸気の濃度 (単位 %)

P: 最高圧力、爆発圧力の最高値 (絶対圧)(単位 kg/cm²)

t₁: 最高圧力到達時間、圧力が上昇を始めてから最高圧力に到達するまでの時間 (単位 s)

V₁: 圧力上昇最大速度、圧力時間曲線の最も傾斜が急な部分での圧力上昇速度 (単位 kg/(cm²・s))

V₂: 圧力上昇平均速度、最高圧力を最高圧力到達時間で除したもの (単位 kg/(cm²・s))

表 4 実験番号

実験番号	区画内に設置した可燃性固体の種類	試料の厚さ, mm
a1	ろ紙	0.20
a2		
b1	テフロンシート	0.05
b2		
c1	ポリ塩化ビニールシート	0.05
c2		
d1	ポリエチレンシート	0.05
d2		
e1	なし	
e2		

実験 a2

火炎伝ばの様子を図 5 に示す。火炎の伝ばが開始されると(図 5 (1))、区画内の圧力が上昇し、C 面のプラスチックシートが持ち上がり、開口ができた。D 面において、A 面に近いところに隙間ができ(図 5 (2))、火炎が噴出した。C 面のプラスチックシートがさらに持ち上がり、E 面に開口が

できた。C 面、E 面の開口から火炎が噴出した(図 5 (3))。ビデオカメラでは火炎が見えなくなった後も、熱画像カメラの映像では区画内の温度が高かった(図 5 (4))。しかし、ろ紙に着火しなかった(図 5 (5))。図 6 に火炎伝ば後のろ紙の様子を示す。ろ紙の端部が焦げたのみで、着火しなかった。ただし、火花点火装置に近い上流側が、下流側に比べ

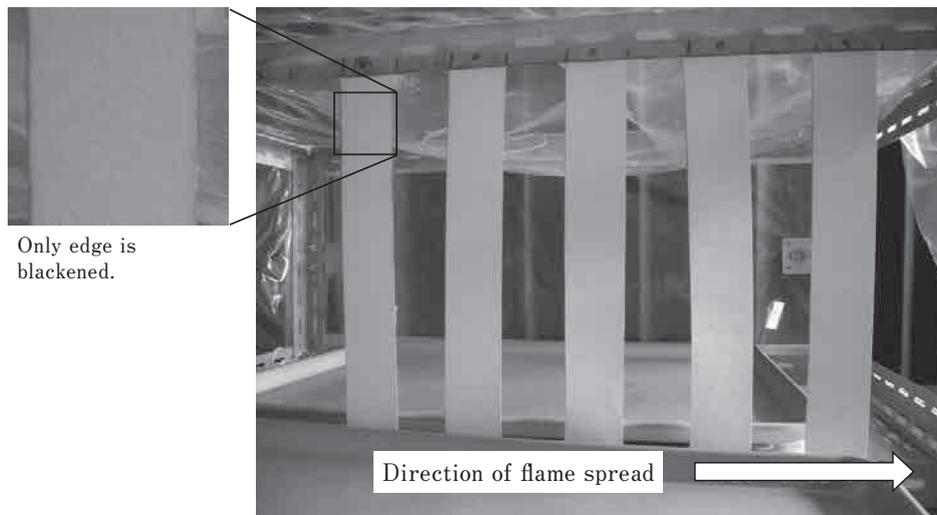
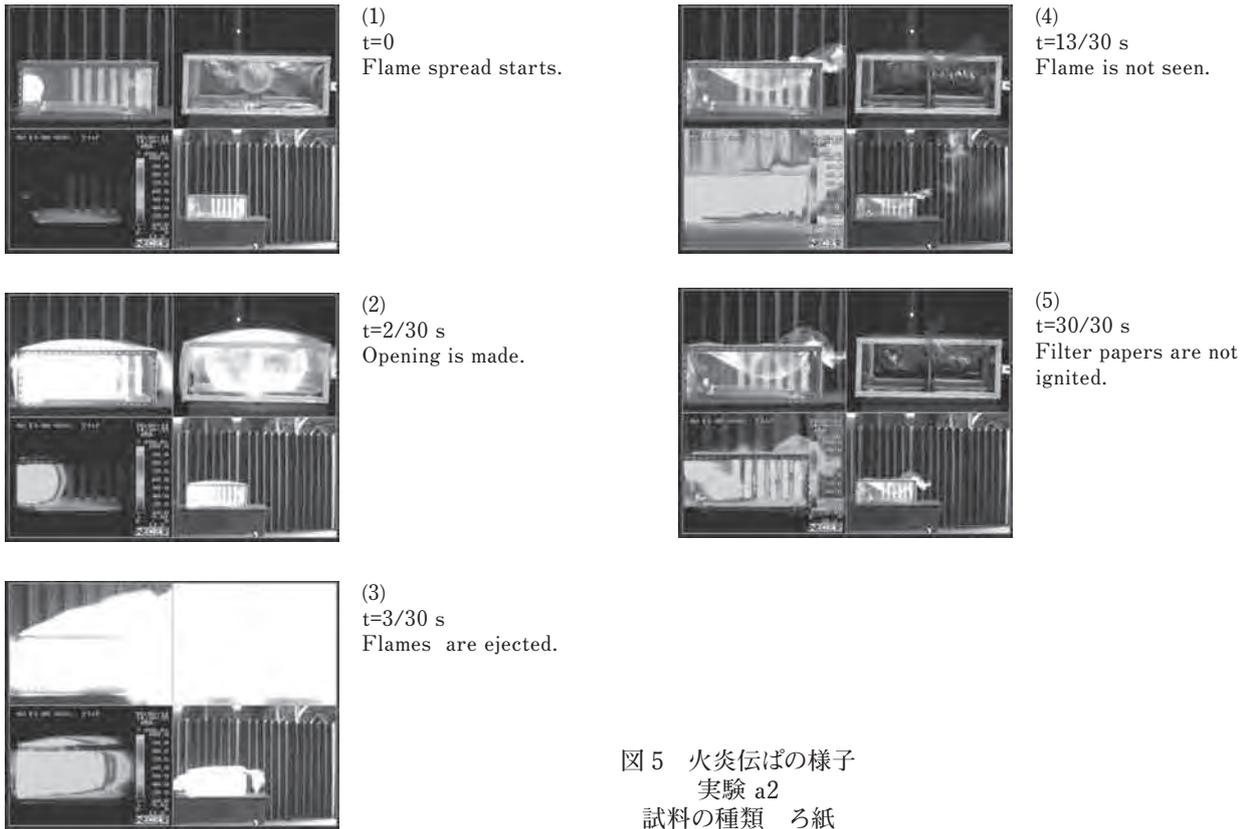


図 6 火炎伝ば後のろ紙の様子
実験 a2

焦げが強かった。固体に残った熱による影響が、上流側により強く残っているのは、鶴田⁷⁾の実験結果と同様である。E面にできた開口が大きく、そこから高温の気体が流出し、実験a1に比べると、区画内の温度が高い状態で維持されなかったため、着火しなかったと思われる。

圧力の時間変化を図7に示す。圧力センサーを2箇所に設置したが、圧力の時間変化を示す曲線の形状に大きな違いはなかった。着火(図7①)し、火炎伝播が開始されると、区画内の圧力が上昇した。C面とD面のプラスチックシートが持ち上がり、開口ができた後、圧力が低下した(図7②、③、④)。その後、再び圧力が上昇し、E面に開口ができた(図7⑤)、火炎が激しく外部に噴出する状態になると、圧力が低下した(図7⑥)。その後、圧力が上昇するが、ヘキサミンが消費され火炎が小さくなると、圧力が着火前の状態に戻った。その後、火炎が見えなくなった(図7⑦)。

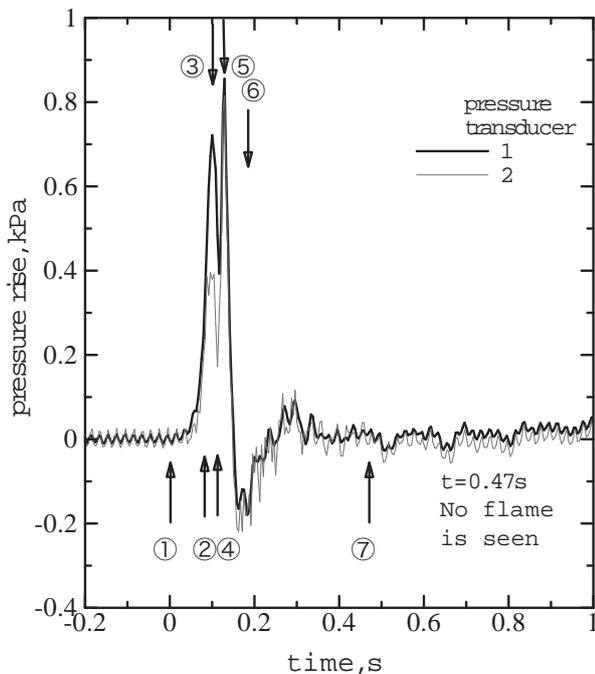
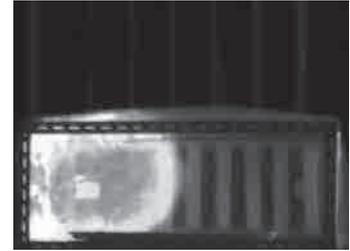


図7 圧力の時間変化
実験 a2
試料の種類 ろ紙

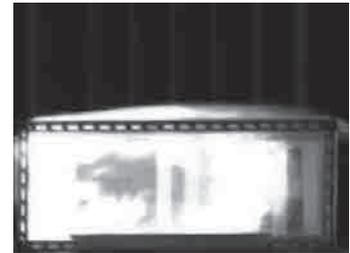
① t=0
Ignition



② t=0.084 s
Opening is made at surfaces C and D.



③ t=0.1 s
First peak



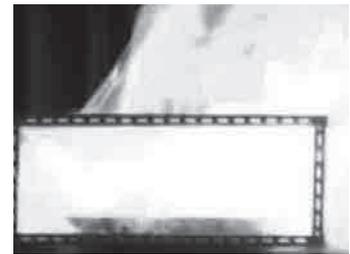
④ t=0.12 s
First minimum



⑤ t=0.13 s
Second peak
Opening is made at surface E.



⑥ t=0.18 s
Second minimum

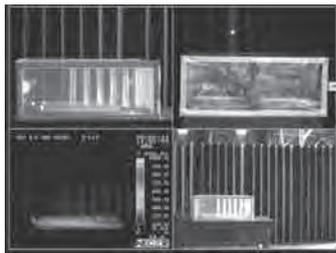


実験 b1

火炎伝ばの様子を図 8 に示す。火炎の伝ばが開始されると(図 8 (1))、区画内の圧力が上昇し、C 面のプラスチックシートが持ち上がり、開口ができた(図 8 (2))。C 面のプラスチックシートがさらに持ち上がり、E 面に開口ができた、C 面、E 面の開口から火炎が噴出した(図 8(3))。テフロ

ンシートは、温められて伸び(図 8 (4))、その後冷えて収縮した(図 8 (5))。図 9 に火炎伝ば後のテフロンシートの様子を示す。テフロンシートに焦げたような痕跡はなく、そのまま残った。ただし、しわができていた。

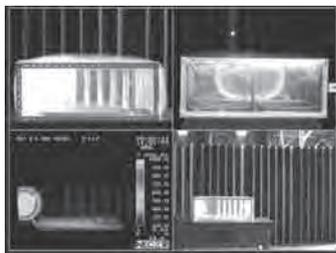
圧力の時間変化を図 10 に示す。圧力センサーを 2 箇所を設置したが、圧力の時間変化を示す曲線の形状に大きな違



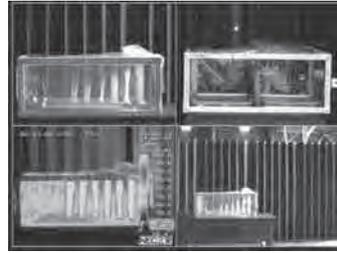
(1)
t=0
Flame spread starts.



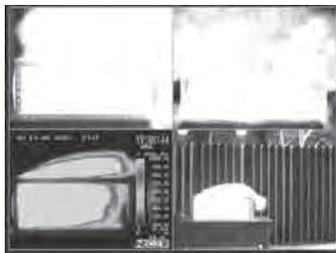
(4)
t=22/30 s
Flame is not seen. Teflon sheets expanded.



(2)
t=2/30 s
Opening is made.



(5)
t=90/30 s
Teflon sheets shrank. Teflon remained with almost no effect.



(3)
t=4/30 s
Flames are ejected.

図 8 火炎伝ばの様子
実験 b1
試料の種類 テフロンシート

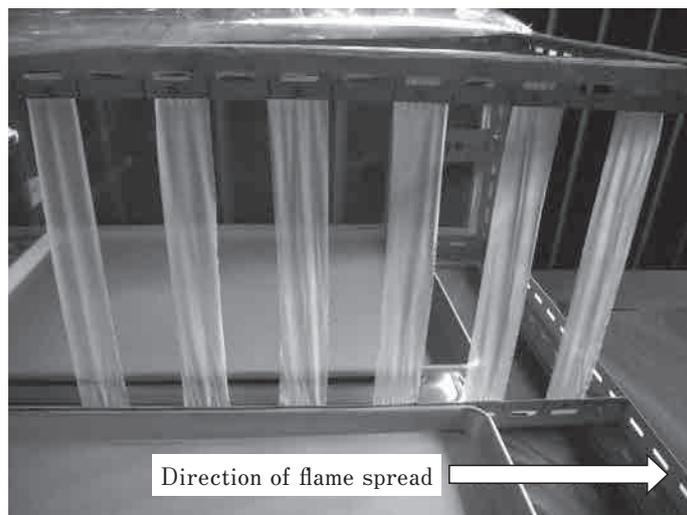


図 9 火炎伝ば後の様子
実験 b1
試料の種類 テフロンシート

いはなかった。着火(図10 ①)し、火炎伝播が開始されると、区画内の圧力が上昇した。C面のプラスチックシートが持ち上がり開口ができた後、圧力が低下し、E面に開口ができ、火炎が噴出した(図10 ②、③、④)。その後、再び圧力が上昇し(図10 ⑤)、火炎が激しく外部に噴出する状態になると、圧力が低下した(図10 ⑥)。その後、圧力が上昇するが、ヘキサンが消費され火炎が小さくなると、圧力が着火前の状態に戻った。その後、火炎が見えなくなった(図10 ⑦)。

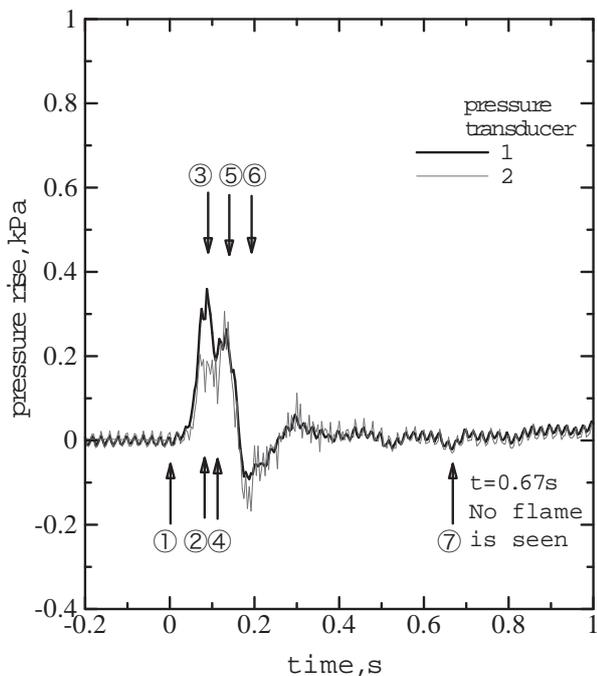
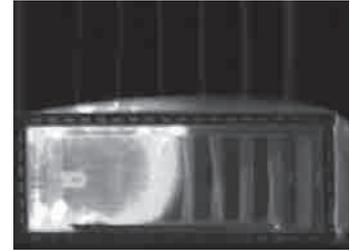


図10 圧力の時間変化
 実験 b1
 試料の種類 テフロンシート

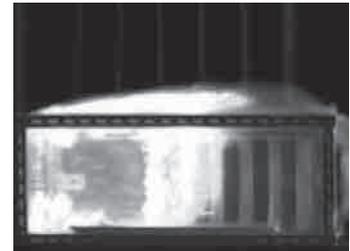
① t=0
 Ignition



② t=0.083 s
 Opening is made at surface C.



③ t=0.091 s
 First peak



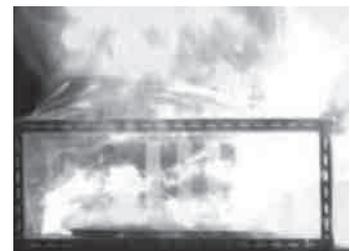
④ t=0.12 s
 First minimum
 Opening is made at surface E.



⑤ t=0.14 s
 Second peak



⑥ t=0.20 s
 Second minimum



実験 b2

C 面のプラスチックシートが持ち上がり、開口ができた。C 面のプラスチックシートがさらに持ち上がり、E 面に開口ができた。C 面、E 面の開口から火炎が噴出した。火花点火装置から最も遠いテフロンシートが有炎燃焼したが、燃え尽きることなく、その後、消炎した。

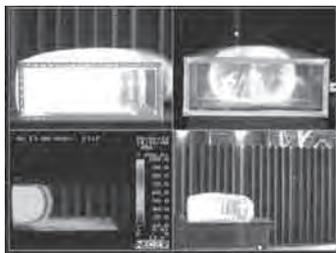
テフロンシートが有炎燃焼したのは、伝ば火炎により直接的に着火したのではなかった。C 面のプラスチックシートが持ち上がって、スチール製アングルから離れると、プラスチックシートを金属アングルに接着するために使用した両面テープの一部が自由な状態になった。その両面テープに着火し、テフロンシートに付着し、テフロンシートが有炎燃焼した。



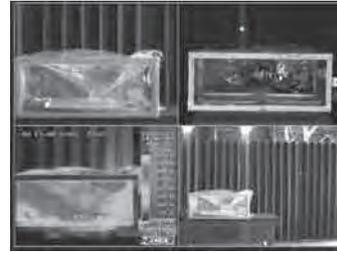
(1)
t=0
Flame spread starts.



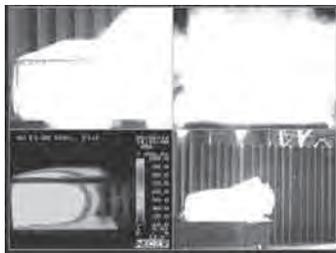
(4)
t=21/30 s
Flame of hexane is not seen. PVC sheets melted and dropped.



(2)
t=2/30 s
Opening is made.

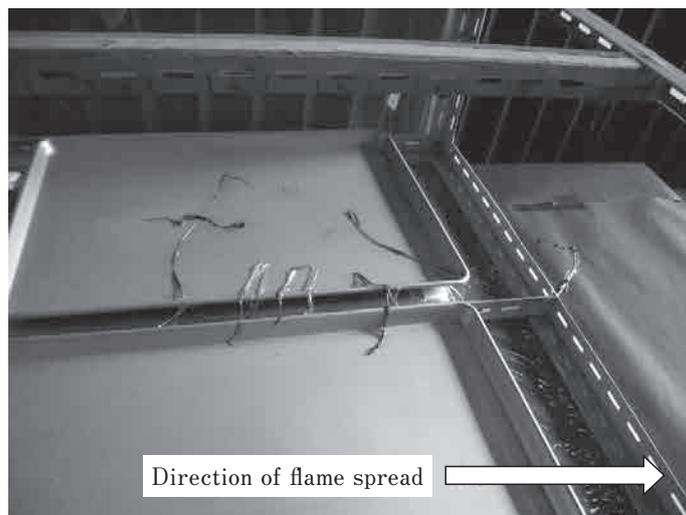


(5)
t=35/30 s
Smoke is generated from PVC.



(3)
t=3/30 s
Flames are ejected.

図 11 火炎伝ばの様子
実験 c1
試料の種類 ポリ塩化ビニルシート



Direction of flame spread →

図 12 火炎伝ば後の様子
実験 c1
試料の種類 ポリ塩化ビニルシート

実験 c1

火炎伝ばの様子を図 11 に示す。火炎の伝ばが開始されると(図 11 (1))、区画内の圧力が上昇し、C 面のプラスチックシートが持ち上がり、開口ができた(図 11 (2))。C 面のプラスチックシートがさらに持ち上がり、E 面に開口ができた。C 面、E 面の開口から火炎が噴出した(図 11 (3))。ヘプタンの火炎が見えなくなったときには、ポリ塩化ビニルのシートは 6 枚全てが溶融し、落下していた(図 11 (4))。落下する際には、ポリ塩化ビニルシートは有炎燃焼していた。その後、落下したポリ塩化ビニルシートは、白煙を発生させながら、無炎燃焼していた(図 11 (5))。図 12 に火炎伝ば後のポリ塩化ビニルシートの様子を示す。溶融した後、固化し、変色していた。区画の外に落下したものもあった。

圧力の時間変化を図 13 に示す。圧力センサーを 2 箇所に設置したが、圧力の時間変化を示す曲線の形状に大きな違いはなかった。着火(図 13 ①)し、火炎伝ばが開始されると、区画内の圧力が上昇した。C 面のプラスチックシートが持ち上がり、開口ができた後、圧力が低下した(図 13 ②、③、④)。その後、再び圧力が上昇し、E 面に開口ができた(図 13 ⑤)、火炎が激しく外部に噴出する状態になると、圧力が低下した(図 13 ⑥)。その後、圧力が上昇するが、ヘキサンが消費され火炎が小さくなると、圧力が着火前の状態に戻った。その後、火炎が見えなくなった(図 13 ⑦)。

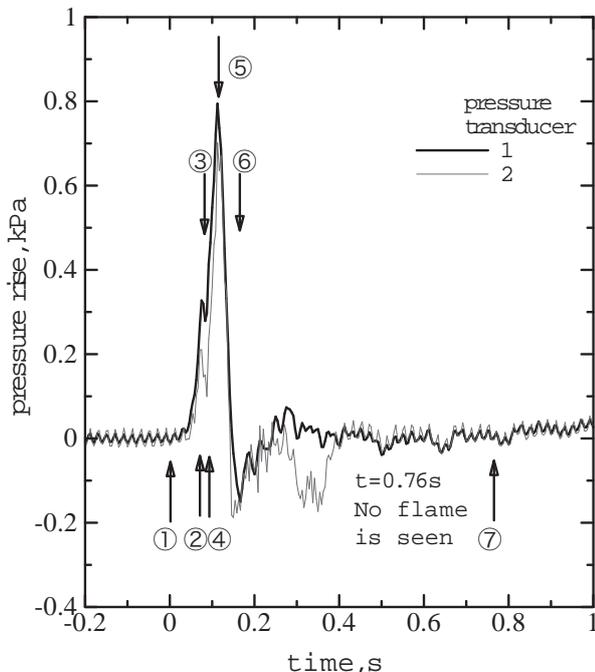
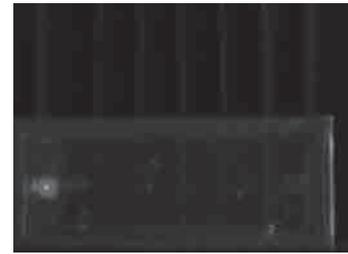
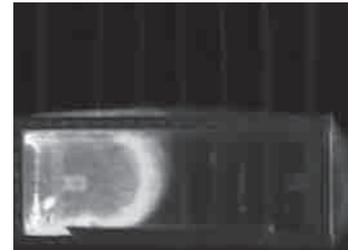


図 13 圧力の時間変化
実験 c1
試料の種類 ポリ塩化ビニルシート

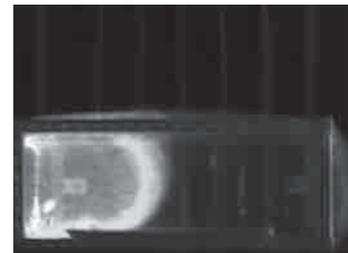
① t=0
Ignition



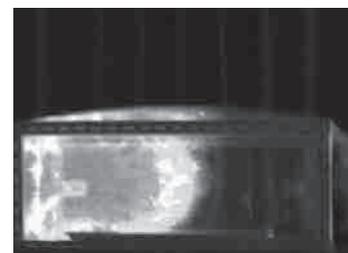
② t=0.071 s
Opening is made at surface C.



③ t=0.079 s
First peak



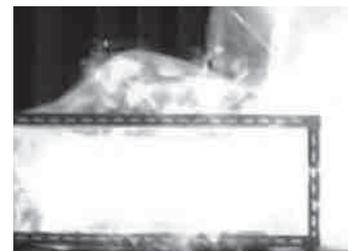
④ t=0.088 s
First minimum



⑤ t=0.11 s
Second peak
Opening is made at surface E.



⑥ t=0.16 s
Second minimum



実験 c2

C 面が持ち上がり、開口ができた。E 面において、B 面に近い側が持ち上がり、開口ができた。E 面の開口、C 面の開口から火炎が噴出した。ヘキサンの火炎に加熱され、ポリ塩化ビニルシートは 6 枚全てが溶融し、落下した。ヘキサンの火炎が見えなくなった後に、落下したポリ塩化ビニルシ

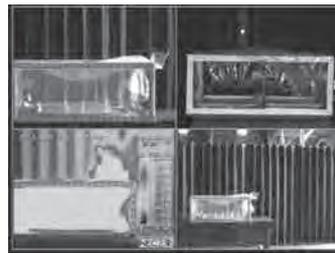
トは、有炎燃焼していた。その後、白煙を発生させながら、無炎燃焼した。

実験 d1

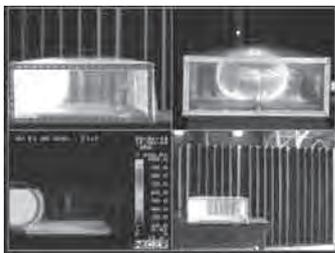
火炎伝ばの様子を図 14 に示す。火炎の伝ばが開始されると(図 14 (1))、区画内の圧力が上昇し、C 面が持ち上がり、開口ができた(図 14 (2))。E 面において、D 面に近い側



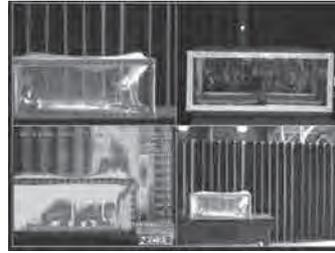
(1)
t=0
Flame spread starts.



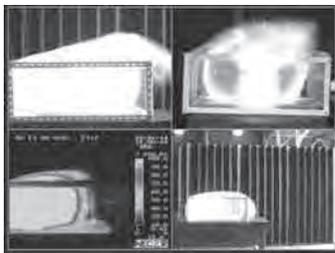
(4)
t=26/30 s
Flame of hexane is not seen. PE sheets melted and dropped.



(2)
t=2/30 s
Opening is made at surface C.



(5)
t=40/30 s
Smoke is generated from PE.



(3)
t=3/30 s
Flames are ejected.

図 14 火炎伝ばの様子
実験 d1
試料の種類 ポリエチレンシート

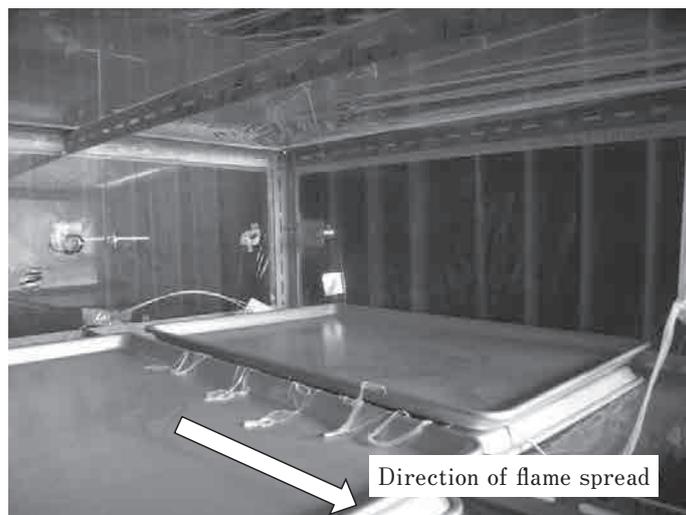


図 15 火炎伝ば後の様子
実験 d1
試料の種類 ポリエチレンシート

が持ち上がり、開口ができ、火炎が噴出した(図14(3))。C面から火炎が噴出した。ヘキサンの火炎が見えなくなった後に、ポリエチレンシートは6枚全てが溶融して落下した(図14(4))。落下した直後には、白煙を発生させていた。(図14(5))。火炎伝ば後のポリエチレンシートの様子を図15に示す。溶融した後、固化していた。

圧力の時間変化を図16に示す。圧力センサーを2箇所に設置したが、圧力の時間変化を示す曲線の形状に大きな違いはなかった。着火(図16①)し、火炎伝ばが開始されると、区画内の圧力が上昇した。C面のプラスチックシートが持ち上がり、開口ができ、圧力が低下し、E面に開口ができ、火炎が噴出した(図16②、③、④)。その後、再び圧力が上昇し(図16⑤)、火炎が激しく外部に噴出する状態になると、圧力が低下した(図16⑥)。その後、圧力が上昇するが、ヘキサンが消費され火炎が小さくなると、圧力が着火前の状態に戻った。その後、火炎が見えなくなった(図16⑦)。

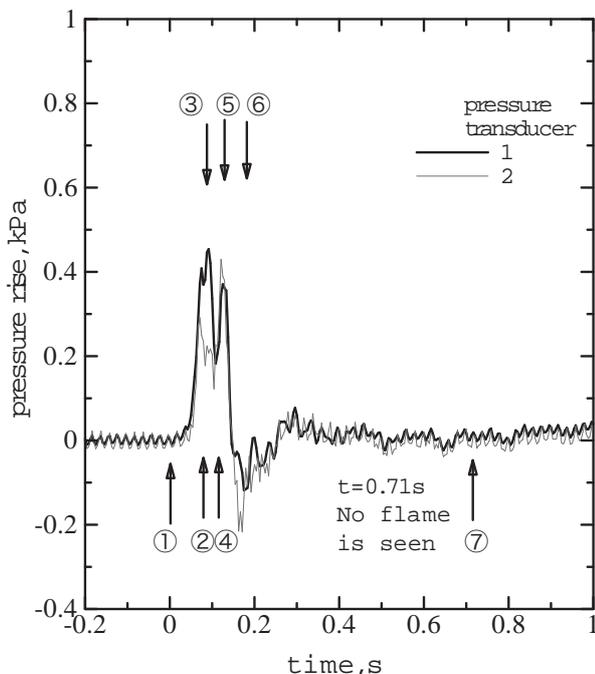
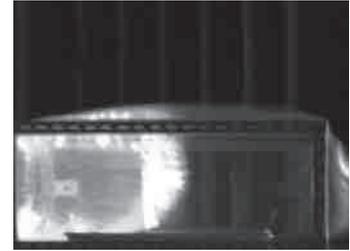


図16 圧力の時間変化
実験 d1
試料の種類 ポリエチレンシート

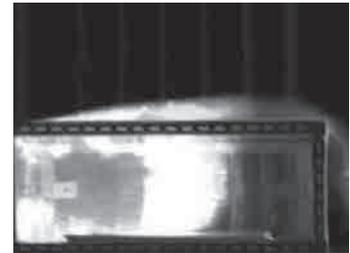
① t=0
Ignition



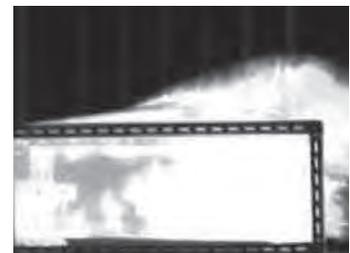
② t=0.079 s
Opening is made at surface C.



③ t=0.092 s
First peak



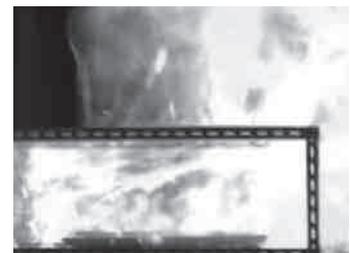
④ t=0.12 s
First minimum
Opening is made at surface E.



⑤ t=0.13 s
Second peak



⑥ t=0.18 s
Second minimum



実験 d2

C 面が持ち上がり、開口ができた。E 面において、B 面に近い側が持ち上がり、開口ができ、火炎が噴出した。C 面から火炎が噴出した。ヘキサンの火炎が見えなくなった後に、ポリエチレンシートは 6 枚全てが溶融して落下した。落下後は白煙を発生させていた。

白煙が見えなくなってから実験装置を見ると、A 面、B 面、E 面のプラスチックシートにしわが残っていた(図 17)。火炎から熱を受けたことによると思われる。D 面には、明確なしわが見えなかったが、強いストロボ光をあてると、模様のようなものが見えた(図 18)。火炎から熱を受けたことによると思われる。

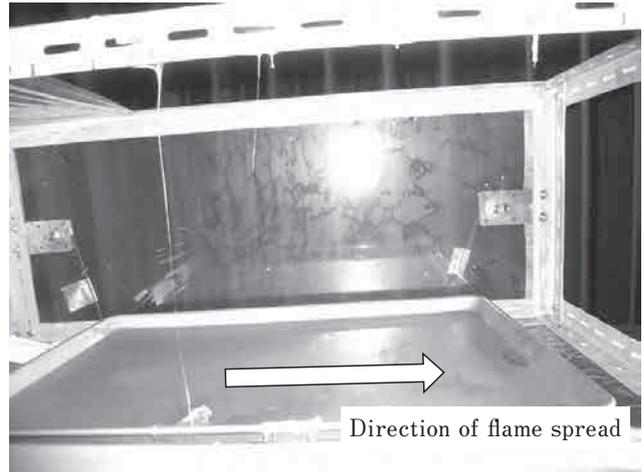
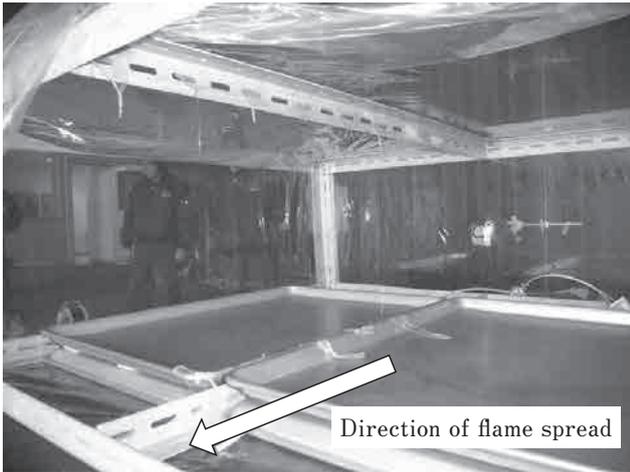
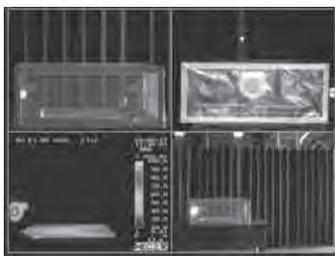
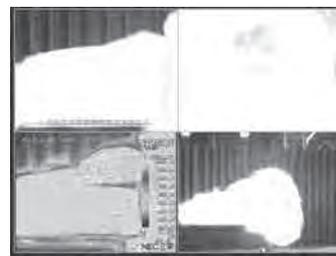


図 17 火炎伝ば後の様子
実験 d2
試料の種類 ポリエチレンシート

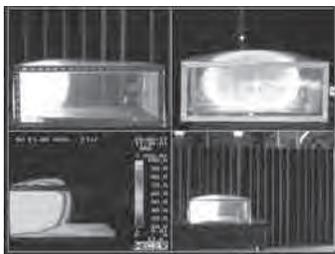
図 18 火炎伝ば後の様子
実験 d2
試料の種類 ポリエチレンシート



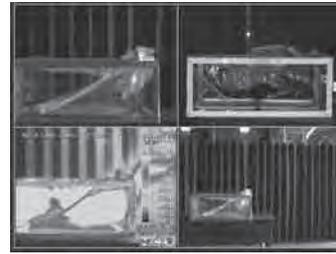
(1)
t=0
Flame spread starts.



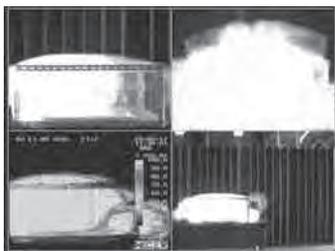
(4)
t=4/30 s
Opening is made at surface E. Flames are ejected.



(2)
t=2/30 s
Flame spreads.



(5)
t=20/30 s
Flame of hexane is not seen.



(3)
t=3/30 s
Opening is made at surface A and C. Flames are ejected.

図 19 火炎伝ばの様子
実験 e1
試料 なし

実験 e1

火炎伝ばの様子を図 19 に示す。着火する(図 19 (1))と、火炎伝ばが開始された(図 19 (2))。区画内の圧力が上昇し、C 面が持ち上がり、開口ができた。A 面に隙間ができ、火炎が噴出した(図 19 (3))。E 面が持ち上がり、開口ができ、火炎が噴出した(図 19 (4))。ビデオカメラでは火炎が見えなくなった後も、熱画像カメラの映像では区画内の温度が高かった(図 19 (5))。

圧力の時間変化を図 20 に示す。圧力センサーを 2 箇所に設置したが、圧力の時間変化を示す曲線の形状に大きな違いはなかった。着火(図 20 ①)し、火炎伝ばが開始されると、区画内の圧力が上昇した。C 面のプラスチックシートが持ち上がり、開口ができ、圧力が低下し、A 面に隙間ができ、火炎が噴出した(図 20 ②、③)。その後、再び圧力が上昇した(図 20 ④)。火炎が激しく外部に噴出する状態になると、圧力が低下した(図 20 ⑤)。その後、圧力が上昇するが、ヘキサンが消費され火炎が小さくなると、圧力が着火前の状態に戻った。その後、火炎が見えなくなった(図 20 ⑥)。

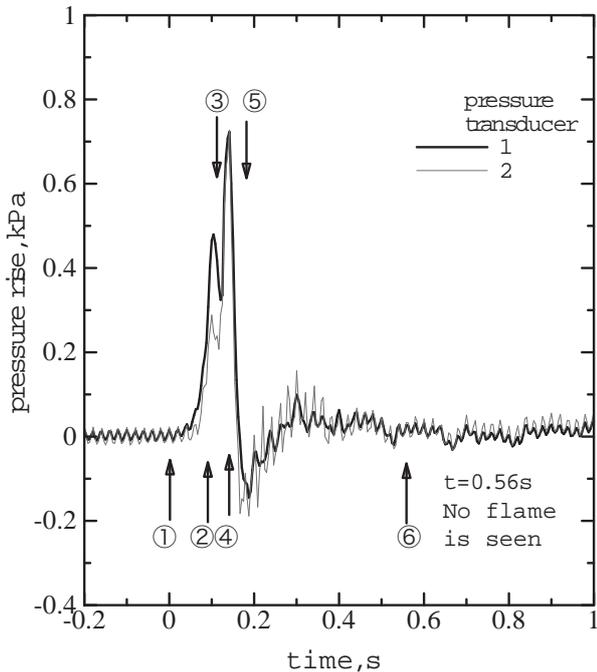
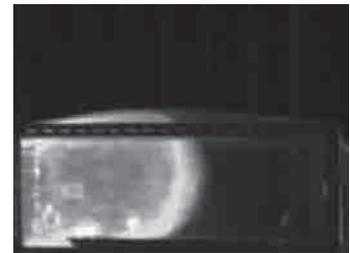


図 20 圧力の時間変化
実験 e1
試料 なし

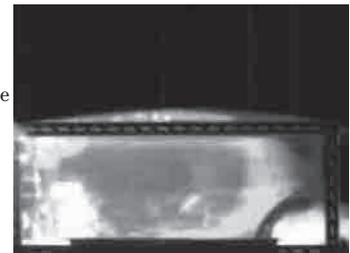
① t=0
Ignition



② t=0.09 s
Opening is made at surface C.
First peak



③ t=0.11 s
First minimum
Opening is made at surface A and flames are ejected.



④ t=0.14 s
Second peak



⑤ t=0.18 s
Second minimum



実験 e2

C面に開口ができた。E面のD面に近い側に開口ができた。E面の開口から、火炎が噴出した。C面から火炎が噴出した。

火炎が見えなくなつてから、実験装置を見ると、C面、E面のプラスチックシートにしわが残っていた。火炎から熱を受けたことによると思われる。なお、過去に行った実験では、明確なしわがなくても、光にすかしてみると、模様のようなものが見えたことがあった。

スチール製アングルを使用して直方体の枠をつくり、直方体の6面に透明なプラスチックシートを、市販の両面テープまたは梱包用養生テープを使用して、貼り付けることにより密閉された区画をつくった。区画内の可燃性予混合気に着火し、火炎が伝ばし、区画内の圧力が上昇すると、プラスチックシートがスチール製アングルからはがれて持ち上がり、開口ができた。開口から火炎が噴出した。開口のできる位置、順序、大きさが実験により異なることがあった。これが、区画内の温度変化に影響し、さらに、区画内に設置した可燃性固体のシートの受熱に影響した。その結果、ろ紙を設置した場合、着火した場合と、着火しない場合の両方の結果があった。

テフロンシートを設置した場合、そのまま残った。ただし、加熱により一時伸びていた。ポリ塩化ビニルシート、ポリエチレンシートを設置した場合、加熱により溶融した。このように、種類によって結果が異なった。

4. 爆発があったことを判断するための材料として何を見たらよいか

爆発が発生した場合にその場にどのような痕跡が残り、爆発があったことを判断するための材料として何を見たらよいかについて、著者の考えを以下に示す。

- ・薄い紙のような可燃性固体があった場合、伝ば火炎が近くを通過しただけでは薄い紙は着火しない。伝ば火炎が通過した後に、その場が温度の高い状態で維持されたときに、薄い紙は焦げたり、熱発火する。調査の際には、現場に残っていた薄い紙に、焦げが残っていないかどうか見ればよいと思われる。
- ・ポリエチレンまたはポリ塩化ビニルのような薄いプラスチックシートがあった場合、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、プラスチックシートは溶融する。また、溶融したポリ塩化ビニルは変色する場合もある。調査の際には、現場に残っていた薄いプラスチックシートに、溶融、変色した痕跡が残っていないかどうか見ればよいと思われる。
- ・ポリエチレンのような薄いプラスチックシートは、弱い加熱を受けると伸び、加熱が停止されると収縮する。その結果、しわができることがある。また、明確なしわがなくても、強

い光を当てたり、光にすかしてみると、模様のようなものが見えることがある。調査の際には、現場に残っていた薄いプラスチックシートにしわが残っていないか、強い光を当てたり、光にすかすと模様のようなものが見えないかどうか調べればよいと思われる。

5. まとめ

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す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が形成され、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。区画内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。

区画内にろ紙を設置した場合、ろ紙が着火した。伝ば火炎によって、直接ろ紙が着火したのではなく、区画内の温度が高い状態で維持され、ろ紙が熱発火したと考えられる。テフロンシートを設置した場合、そのまま残った。ただし、加熱により一時伸びていた、ポリ塩化ビニルシート、ポリエチレンシートを設置した場合、加熱により溶融した。

6. 参考文献

1. 東京消防庁：火災の実態
2. 消防庁：危険物に係る事故事例
3. 経済産業省：液化石油ガス法に係る事故情報
(<http://www.meti.go.jp>) (Last accessed on 26 August 2020)
4. 労働安全衛生総合研究所：爆発火災データベース
(<https://www.jniosh.johas.go.jp>) (Last accessed on 12 May 2021)
5. 平野敏右、鶴田俊、久野哲彦、土橋律、佐藤研二：ガス爆発から火災への遷移現象に関する小模型実験、日本火災学会論文集、36(1-2), pp. 1-8, 1987
6. 鶴田俊：ガス爆発から火災への遷移現象、火災、43(2), No.203, pp. 20-26, 1993
7. 鶴田俊：ガス爆発による樹脂類の熱変形、第51回燃焼シンポジウム講演論文集、pp. 54-55, 2013
8. 柳生昭三：引火温度 - 爆発限界の関係線図(2)、安全工学、24(4), pp. 210-215, 1985
9. 柳生昭三：発火温度の測定データ(17)、安全工学、14(2), pp. 80-82, 1975
10. 安全工学協会編：改訂安全工学便覧、コロナ社、1980
11. 藤原鎮男(監訳)：ザックス有害物質データブック、pp.549-550, 丸善、1990

Experiments on Gas Explosion Using Small Enclosures

(Abstract)

Takeshi Suzuki

(Accepted October 28, 2021)

To explore effects of gas explosion to solid combustible materials which are located near the ignition source, the process of heating solid combustible materials during a gas explosion was studied using an enclosure (1 m × 1 m × 0.4 m). The test piece of a solid combustible used in the experiments was a sheet (5 cm × 40 cm) of filter paper, Teflon, PVC (Polyvinyl chloride), and PE (Polyethylene) which was placed in the enclosure filled with a hexane-air mixture. The mixture was ignited by an electric spark near a side wall and subsequently a premixed flame propagated across the test piece. Filter paper sheets were thermally ignited after a flame had passed. Teflon remained with almost no effects. PVC and PE melted by heating.

消防研究所報告

通 卷 130 号

令和3年12月28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)

<http://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

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

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