

第 16 回 消防防災研究講演会資料

平成 25 年 2 月 1 日

主催 消防庁 消防研究センター

第16回 消防防災研究講演会

東日本大震災を受けての消防防災研究

日時 平成25年2月1日(金) 10:00～16:50
会場 消防研究センター 本館3階 大会議室

－ プログラム －

【開会】

10:00～10:05 挨拶 消防研究センター所長 松原美之
10:05～10:15 趣旨説明 消防研究センター 座間信作 …… 3

【消防活動】

10:15～10:45 (1) 大規模災害時の消防職員の活動のあり方
消防庁消防・救急課 井上元次 …… 5
10:45～11:15 (2) 東日本大震災における消防団活動
ヒアリング調査による活動内容と活動事例
東京大学大学院 山田常圭 …… 13
11:15～11:45 (3) 大規模災害活動時の防火服内衣服の水濡れが
引き起こす危険性について
消防研究センター 森井統正 …… 23

【昼休み・実演・所内施設見学】 11:45～13:30

(4) (説明・実演) 津波浸水域用の消防車両開発
消防研究センター 久保田勝明 …… 31

【危険物施設】

13:30～14:00 (5) 長周期地震動と石油タンクのスロッシングに関する
幾つかのこと
消防研究センター 座間信作 …… 39
14:00～14:30 (6) 石油コンビナート等の防災対策
消防庁特殊災害室 渡辺剛英 …… 53

【火災】

14:30～15:00 (7) 東日本大震災に関連して発生した火災に関する
アンケート調査の経過報告
消防研究センター 鈴木恵子 …… 63
15:00～15:30 (8) 震災廃棄物の自然発火
消防研究センター 岩田雄策 …… 71
15:30～16:00 (9) 太陽光発電システムを設置した住宅の火災と
消防活動の問題点
消防研究センター 田村裕之 …… 81

【休憩】 16:00～16:15

【総合討論(質疑応答)】 16:15～16:45

【閉会】

16:45～16:50 挨拶 消防研究センター研究統括官 山田 實

趣旨説明

消防研究センター 座間信作

昨年の第15回消防防災研究講演会^{*}では、「消防の視点からみた東北地方太平洋沖地震」と題して、火災（火災調査の概要、津波火災の地域特性、気仙沼の火災）、危険物施設に係る被害（津波、スロッシング被害、コンビナート火災、地震・津波対策）及び消防活動への影響（消防活動阻害要因、消防活動計画と実際、緊急消防援助隊活動）等に関して実施した現地調査について紹介した。その際の聴講者アンケートでは、90%以上の方々から有意義な講演会であったとの回答があった一方で、更なる有効な解析・検討に基づき、情報公開、消防吏員・消防機関に対する提言等を期待する声があった。そこで、これに応えるべく、前回報告できなかった調査内容及び調査結果を踏まえた震災時消防活動や震災関連で顕在化した課題等に関する検討結果について紹介し、昨年度に引き続き、今後の震災対応のあり方を議論する場とすることとした。

東北地方太平洋沖地震では、複合的、同時多発的かつ広域に亘って甚大な被害が発生した。被災地では消防職員、庁舎、資機材等に多大な被害を生じ、極めて限られた消防力での対応を強いられた。消防庁では、このような状況における消防活動のあり方について検討してきたことから、その検討内容について報告する(井上)。厳しい活動を強いられた状況は消防団も同様であり、過去に例のない254名の方々の方が犠牲となったこと等から、現地消防団へのヒアリング調査を行った。そこから浮かび上がった消防団の共通的な活動内容や課題等について、事例を通して紹介する(山田)。また、消防職員は津波浸水地の中での活動も余儀なくされた。そこで、水濡れした防火服内衣服が消防隊員に及ぼす影響について検討を行ってきた(森井)。さらに、津波浸水域あるいはガレキ滞留域での消防活動は困難を極めたことから、そのような場においても、有効な消防活動を可能とする消防車両の開発が求められた。ここでは現時点での開発状況を実演も交えて紹介する(久保田)。

危険物施設については、津波による甚大な被害が認められ、消防庁では昨年度紹介の危険物施設の地震・津波対策の検討を実施した他、石油コンビナート等における災害影響評価についても検討を行っていることから、その検討状況について報告する(渡辺)。また、前回報告した石油タンクのスロッシングとそれを励起する長周期地震動についての継続検討結果についても紹介する(座間)。

消防研究センターでは、震災に関連して発生した個々の火災の状況について調査を実施してきた。その調査概要と集計状況について報告する(鈴木)。その中には、震災の数ヶ月後、震災廃棄物集積場からの火災が多数含まれる。このような火災は消火困難であり、煙や有害物質等による環境被害も大きいことから、類似火災予防に資するため発火メカニズム等に関して検討してきた(岩田)。また、原子力発電所事故を契機に再生可能エネルギーの利用が注目されてきている中で、例えばその一つである太陽光発電システムの設置建物からの火災が散見された。加えて、消火活動中に感電するといった事例も報告されていることから、これらシステムの今後の普及等を考慮し、火災危険性、消防活動上の危険性等について検討した結果を紹介する(田村)。

なお、以上の報告の他、消防研究センターでは今回の震災を踏まえ、津波起因の自動車火災の

出火原因究明、無人ヘリ等による偵察技術の開発、巨大地震によるコンビナート地域の被害予測のための信頼性の高い強震動予測、津波がタンクに及ぼす影響および広域版地震・津波被害シミュレーションの開発等についても鋭意研究を進めてきている。これらの成果については機会を改め報告する予定である。

本研究講演会が、今後の震災対応の一助となれば幸いである。

※ 消防防災研究講演会資料は、消防研究センターホームページからダウンロードできます。

http://www.fri.go.jp/cgi-bin/hp/index.cgi?ac1=JPP1&ac2=45&ac3=765&Page=hpd_view

第16回消防防災研究講演会
 ー東日本大震災を受けての消防防災研究ー

大規模災害時の 消防職員の活動のあり方

平成25年2月1日
 消防庁消防・救急課
 課長補佐 井上元次

大規模災害時における消防本部の初動活動

1 東日本大震災における消防活動

平成23年度「大規模災害発生時における消防本部の効果的な初動活動のあり方検討会報告書」から

東日本大震災では、災害が複合的かつ同時多発的に発生した。被災地域における各消防本部は、職員（死者・行方不明者27人）、消防庁舎及び消防車両等に多大な被害を受けた。そのため、発災直後から県内応援隊や緊急消防援助隊が到着するまでの間、限られた消防力での対応を求められた。多くの対応を求められる中、各消防本部は災害対応を継続させるため、活動拠点を内陸部の署所等に移して災害対応体制を確保するとともに、内陸部の消防署所から沿岸部の消防署所へ応援部隊を派遣するなど、津波災害の対応に全力を尽くした。

広範囲にわたって津波により浸水した区域では、家屋の損壊をはじめ、船舶、車両等の流出、がれきの散乱等による道路や空地の消滅など、街区そのものの様相が変化したことで、目標物がなくなり、位置情報が把握できなくなったため、消防活動は困難を極めた。また、多くの負傷者が発生する中、通信障害も発生したため、病院との連絡が取りにくい状況等も発生した。

火災にあつては、津波による流出油、漂流物、車両、がれき等を媒体として次々と延焼拡大し、山林まで延焼する事案が発生するなど、被災地域の数カ所において大規模な火災が発生した。さらには、道路の陥没・亀裂等の障害が発生するとともに、津波による大量のがれきや水没等の影響で火災現場へ出動しても火点に近づくことができず、また、地震による断水から消防水利の確保が困難となり、河川や防火水槽からがれき等の上を遠距離送水する消火活動を強いられた。



【津波被害を受けた消防署の状況】
 （釜石大槌地区行政事務組合消防本部提供）

【消防本部の主な被害】

消防職員	死者、行方不明者：27人
建物被害（全壊、半壊又は一部損壊）	消防本部・消防署：143棟 分署・出張所：161棟
車両等被害	車両：86台、消防艇：2艇、県防災ヘリ1機

- ※ 平成24年9月28日付 消防庁被害報第146報から
- ※ 青森県、岩手県、宮城県、福島県、茨城県、栃木県、千葉県及び長野県の各消防本部から、現時点で把握できるものとして報告を受けた数値。
- ※ 仙台市消防ヘリポート（仙台市若林区）に駐機中の宮城県防災航空隊ヘリコプターが津波により流され、使用不能となっている。



【津波により被災した消防車両】
 （宮古地区広域行政組合消防本部提供）

2 初動活動の重要性

- 地震等の災害が発生するとともに、消防本部では消防力の確保のため初動措置を行い、災害対応体制を確立したうえで、発災直後から集中する災害通報等に基づき災害対応を実施する。
- 被害状況等の把握、同時多発災害への対応など、初動期における対応が、その後の被害軽減に繋がっていくため、限られた消防力を効果的に活用することが重要となる。

○効果的な初動活動を行うには、**事前に計画を策定しておくことが重要**であり、また、当該計画に基づき十分な訓練を実施し、災害対応に備えておく必要がある。

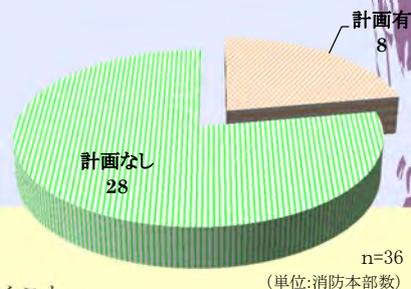
3 災害対応体制の確立

消防本部では、大規模災害が発生した際、災害に即応していくため、その人員、施設、車両、装備、資機材及び水利等の消防力を早期に確保し、災害対応体制を確立することが重要となる。

○災害対応体制を確立するうえで留意すべき事項

庁舎等の被災を想定した事前計画の策定及び職員の安全管理を含めた非常招集計画の策定が必要である。

【庁舎被災を想定した事前計画の策定状況】



【事前に計画しておくべき事項（例）】

- ・消防署所に大きな被害が生じた場合、早期に移動できる場所において消防機能を維持できる規模、機能を備えた施設等を代替場所として指定しておくこと。
- ・津波の浸水想定区域内にある署所は、重要な機器、資機材、予備電源等を上階へ配置しておくこと。
- ・庁舎の耐震化、耐浪化を促進すること。
- ・発災時の消防車両の車庫前への移動及び津波時の車両退避の実施方法等を確立しておくこと。
- ・津波の浸水想定区域内に署所がある場合、職員の招集場所を他の署所等に指定することや非常招集時における参集ルートについて津波の浸水想定区域を避けるなど職員の安全管理の徹底を図ること。

2

4 情報管理体制の確立

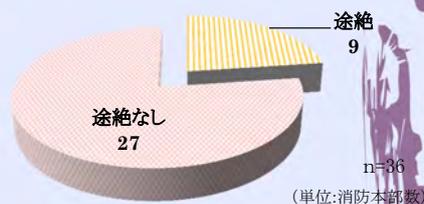
早期に情報を収集・集約・分析し、災害活動に繋げていくこと、また、災害の発生状況等から保有する消防力における対応の可否判断を行うためにも初動期における情報管理が重要となる。

○情報管理体制を確立するうえで留意すべき事項

情報通信手段の複数確保、119番通報途絶時の対応、関係機関等による情報収集及び伝達などが必要である。

【具体的に取るべき方策（例）】

- ・消防救急無線、衛星携帯電話等多様な通信手段の確保、通信設備の耐震化、無線の非常電源の容量確保及び予備電源の確保、無線のデジタル化等の高度化等の推進
- ・119番通報途絶時に備えた災害覚知方法の確立及び119番通報集中時等の情報処理体制の確立 など



【被災3県における119番通報途絶状況】



【地震発生後の管内の災害状況把握に要した時間】

【119番通報の集中例】

仙台市消防局では発災当日からの1週間で7,146件の119番通報を受信しており、これは前年平均の約10倍であり、ピーク時の3月12日には1,556件（55秒に1件）に至った。

【119番通報に代わる災害覚知の方法例】

- ・消防隊等の出動時や巡回による情報収集
- ・職員の参集途上での情報収集
- ・署所への駆けつけ
(本部によっては、119番通報が途絶したことから、消防署、消防団により巡回を行い、署所への駆けつけ通報を呼び掛けた。)
- ・町役場、警察等の関係機関への駆けつけ
- ・消防団や関係機関からの情報提供
- ・高所見張り員の配置による情報収集
- ・避難所からの情報 など

3

5 消防活動方針

大規模災害発生時の活動方針は、消防本部の消防力を最大限に発揮し、総合的な対応を図るため職員が共通認識を持つことを基本に、災害の状況に応じた活動の優先順位や部隊活動の原則等、地域の実情に応じ、災害を想定して事前に定めておく必要がある。

○消防活動方針において留意すべき事項

地震発生後に被害を増幅させるものとして、二次的に発生する火災があげられる。このため、火災への優先対応を考慮する必要があり、また、沿岸部では津波発生に備えた情報の収集、広報・避難誘導活動や津波の浸水想定区域内における活動等について活動方針を定めておく必要がある。更に、同時多発する災害に限られた消防力に対応するには、状況に応じた出動の選別を行う必要があるため、その基準等について定めておく必要がある。

【事前に計画しておくべき事項（例）】

- ・災害の発生状況を想定した具体的な活動方針
- ・活動の原則（火災対応の優先、避難場所・避難道路確保の優先、1火災1隊出動（例）、人命優先の原則等）
- ・災害に対する出動の選別の基準（人命優先、住民対応の可否、災害の拡大危険等）
- ・津波発生時の活動要領、応援要請の判断要素・判断時期、受援体制の確立 など

【消防本部の活動方針例】

＜火災対応の優先＞

同時多発する災害状況下において、人的・社会的被害を最小限とするため、火災の早期発見と一挙鎮圧に総力を挙げて消火活動に着手する。

＜市街地火災消火の優先＞

大規模な火災により多数の消防隊を要する場合、市街地に面する部分及び市街地への延焼阻止を優先した消火活動を行う。

＜避難場所、避難道路確保の優先＞

延焼火災の多発、火災が拡大する場合等には、人命を優先し、避難誘導とともに避難場所や避難道路の確保を優先した活動を行う。

＜重点防御地域の優先＞

危険物施設等の重要対象物をあらかじめ定め、災害の状況から総合的に判断して重点的に防御すべき地域へ部隊を投入する。



【宮城県気仙沼市鹿折地区における消火活動の状況】
（気仙沼・本吉地域広域行政組合消防本部提供）

4

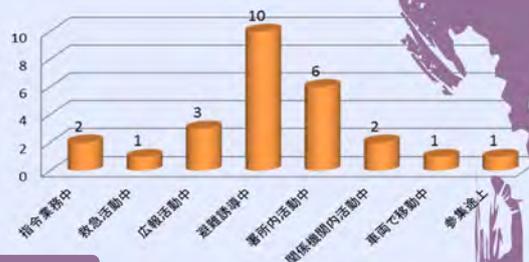
6 部隊等の安全管理

沿岸部の消防本部では、津波警報等の発表後、広報活動や避難誘導を実施するとともに、浸水想定区域内においても消防活動を継続し、一人でも多くの住民の命を守ろうと懸命の活動を実施したが、想定を超える津波により多くの職員が被災した。

【消防職員の被災者数】

27人（死者23人、行方不明者4人）

うち26人が消防活動中に被災



津波等に対する消防職員の安全管理について

消防の出動する現場は常に危険と隣り合わせである。しかし、火災現場などでは、多くの知見や災害現場経験から、資機材や装備をはじめ、状況に応じた安全管理策を図った上で活動するものであり、職員の身に危険が迫れば退避することとなる。

これに対し、津波に対する安全管理は、津波到達前に退避することが基本となる。津波到達までに一定の時間があれば退避する時間等を踏まえた上で可能な活動を実施するが、津波到達までに活動できる時間がない場合や、活動中であっても退避するために限界の時間となれば、津波後の消防活動の継続を図るため、住民の避難誘導を行いながら、消防職員も住民とともに退避することが重要である。

1 基本事項

- (1) 消防職員の安全及び消防活動の継続を図るとともに、住民の避難誘導を行うため、職員の身に津波による危険が迫れば「**消防職員も退避する。**」ということの基本とする。このことを事前に住民に周知し、理解を得ておくことが必要であり、また、訓練等により、出動・退避に係る移動の迅速化及び限られた時間内に効果的な活動を行う能力の向上に努める必要がある。
- (2) 浸水想定区域内の活動については「**活動可能時間**」を判断し、その時間の中で活動する。
 - ① 災害発生場所（地点）までの出動（移動）時間
 - ② 災害発生場所から直近の安全退避場所への退避（移動）時間
 - ③ 安全時間（想定外の事案発生も含めて、安全確実に退避するための予備時間。例：〇〇分前退避完了）
 - ④ 津波到達予想時刻までの時間

$$\text{活動可能時間} = \text{④} - (\text{①} + \text{②} + \text{③})$$

- (3) 「**情報伝達体制の強化、確立**」を図る。

- ア 消防本部と部隊が連携して、リアルタイムに情報共有が図れる複数の伝達手段を確保する。
- イ 情報内容の確認が可能な双方向性をもった伝達手段を確保する。

5

活動可能時間の判断例

※活動可能時間が終了すれば活動中でも退避する。



算定例

活動可能時間の算定例

(想定) 9:55に地震が発生し、3分後の9:58に気象庁から津波到達予想時刻は10:55と発表された。沿岸部を管轄する消防本部において10:00に津波の浸水想定区域での災害を受信し、部隊の出動を判断し、活動可能時間を決定する。
 なお、当該災害発生場所までの出動時間が10分、災害発生場所から直近の退避場所までの移動時間が10分と判断され、当該本部における安全時間は5分と設定されているものとする。

※活動可能時間 = (10:55 - 10:00 = 55分) - (10分 + 10分 + 5分 = 25分) = 30分



2 活動状況に応じた安全管理について留意すべき事項

- (1) 消防本部
津波の浸水想定区域における部隊出動の可否の決定、部隊への安全に関する情報提供（退避指示等を含む）
- (2) 活動部隊
安全退避場所及び退避ルートの確認、情報連絡体制の確保、活動可能時間の終了及び危険時における退避指示等
- (3) 広報・避難誘導活動
広報等の実施ルート及び退避ルートの事前調査及び計画、渋滞状況の確認等
- (4) 署所内活動等
署所内における活動人員数の把握、退避する場合の本部機能の維持、署外活動者の安全管理等

3 安全管理に関する事前計画の策定

地域防災計画、ハザードマップ等に基づく津波の浸水想定区域の把握を行うとともに、津波の浸水想定区域ごとの安全退避場所や津波避難ビル等の位置、距離、移動時間について検討したうえで事前計画を策定し、現地での活動や退避に係る時間等の確認、訓練の実施を行っておく必要がある。

4 地震発生後における津波以外の事故・災害に関する安全管理

余震への警戒、活動空間の確保、退路の確保、安全監視員の配置、情報共有、単独行動の禁止、交通事故の防止

7 部隊運用方策

消防本部では人命の安全確保と被害の軽減を図ることを主眼として、災害に対する消防活動の効果等を的確に判断し、限られた部隊を効果的に運用することが重要となる。

○部隊運用において留意すべき事項

災害状況等に応じた本部運用と署所運用の切替え、災害の同時多発時における1災害への部隊出動数、被害集中地域への部隊移動配置、大規模火災時の部隊運用等を想定した計画が必要である。また、地震時は災害覚知の遅れ、消防水利の不足、がれき等による現場到着遅延及び障害が発生することを考慮する必要がある。

【事前に計画しておくべき事項（例）】

- ・本部運用と署所運用の切替えの判断要素と時期
- ・災害種別ごとに出勤させる部隊数
- ・部隊の増援を行う場合の判断基準
- ・大規模な火災発生時の部隊運用方策及び延焼措置対策
- ・道路啓開等のための重機所有企業等との協定
- ・がれき等により消防隊が現場に接近できない場合の可搬式小型動力ポンプの活用 など

【東日本大震災の市街地広域火災の特徴】

- ・延焼面積の広い火災現場が多いこと。
- ・多県にわたり発生していること。
- ・市街地広域火災の合計面積が広いこと。
(消防研究センター調査結果から)

【被災地消防本部において効果があつたとされる資機材（例）】

- アルミボート、ライフジャケット
- 衛星電話、個人貸与された受令機 など

地震発生後における沿岸部消防本部の活動イメージ

地震発生	消防部隊等	消防本部	【安全管理ポイント】
津波到達が早いと想定される地域では、津波警報発表前であっても地震の状況により安全退避を優先する。			
津波警報等の発表	【広報・避難誘導活動】 ・事前計画に基づく広報・避難誘導等の実施（実施ルート確認） 【車両の移動】 ・出勤していない消防車両等を、安全な退避場所へ移動させながら広報・避難誘導を実施 【災害出勤途上・現場到着時の活動】 ・災害地点と安全退避場所の確認 ・現場での通信状態の確認 ・安全退避ルート等の確認 ・安全退避実施時の行動の徹底 ・海面監視部隊が出勤する場合は、監視位置、通信状態等の確認 【災害活動】 ・退避ルートの確保 ・活動地点周囲の津波避難ビル等の確認 ・津波到達予想時刻に基づく 活動可能時間 の確認 ・隊員への活動可能時間の周知 ・現場での通信状態の確認 ・情報連絡員の指名 ・活動範囲、安全退避実施時の合図、行動の徹底 ・指揮者は現場状況を確認し、活動の必要性について判断 【安全退避】 ・活動可能時間に基づく安全退避の実施（活動の中断） ・状況に応じた退避判断 ・状況に応じて津波避難ビル等への安全退避場所の変更 ・全隊員退避の確認	【津波に対する初動措置】 ・部隊、職員への情報伝達、機材等の移動等の実施 【車両の移動指示】 ・出勤していない消防車両等を安全な退避場所へ移動させながら広報・避難実施するよう指示 【津波の浸水想定区域における災害の受信・伝達】 ・出勤の判断（事前想定されている津波到達時間までに活動可能時間がないと判断される場合は退避が必要） ・災害発生場所の直近にある安全退避場所の確認、移動時間の確認 ・海面監視部隊の確保 ・活動部隊との通信状態の確認 ・安全管理に関する情報の発信 【津波到達予想時刻の受信・伝達】 ・津波到達予想時刻の全部隊、職員への周知 ・活動可能時間の判断 ・活動部隊の活動状況の把握 ・部隊活動の時間把握 ・安全退避場所へのルート、移動時間等の確認 ・活動地点周囲の津波避難ビル等の確認 【安全退避】 ・活動可能時間に基づく安全退避の指示 ・安全時間の確認 ・状況に応じた安全退避場所等への部隊誘導 【安全退避の確認】 ・部隊の退避確認 ・退避報告がない場合は他の部隊の派遣等により安全確認	・発災時間（昼間、夜間）に応じた情報収集体制 ・情報収集の徹底 ・部隊等と本部との情報共有 ・車両退避ルートの確認 ・安全退避場所の確認 ・部隊等の出勤判断 ・複数の情報連絡手段 ・退避ルートの確認 ・海面監視部隊等の配置位置 ・部隊との通信状態の確認
津波到達予想時刻の発表	○○分前に安全退避場所への退避完了（報告）	【津波到達状況の確認】 ・津波到達状況の確認を行うとともに、第2波等の情報収集 ・津波到達状況等により活動再開又は撤退の指示 ・状況による部隊の増援	・部隊と本部との確実な情報伝達（相互応答の確認） ・あらゆる手段を活用した情報収集の実施（ヘリ、高所カメラ、関係機関、マスコミ等） ・退避のための活動の中断 ・状況に応じた退避判断及び退避指示 ・状況に応じた部隊誘導 ・退避開始の徹底 ・退避完了の確認
津波到達予想時刻	○○分前に安全退避場所への退避完了（報告）	【安全確認及び活動の再開】 ・津波発生状況の確認と、津波の第2波等に係る情報の収集 ・安全確認された場合の活動再開の報告 ・状況による部隊増援の要請	・津波到達後の情報収集 ・活動再開の可否判断
津波到達			

> 地震発生後、津波が到達するまでの時間が早いと想定される地域では安全退避を優先する。
 > 津波に伴う事前計画の策定を行い、津波発生時における安全管理の徹底のもと活動を行う。
 > 安全退避場所への退避完了までの安全時間は、地域事情等に応じて消防本部において事前に設定しておく。

8 消防団等との情報共有及び連携のあり方

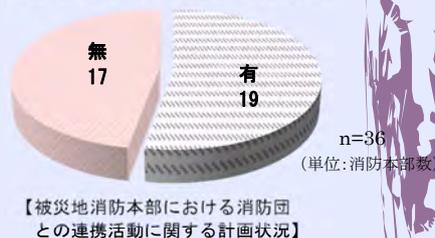
大規模災害発生時は被害の範囲が広大であることから、情報の収集をはじめ、広報・避難誘導活動、災害対応などにおいて、関係機関との連携は不可欠であり、特に消防本部と消防団との情報共有及び連携活動が重要となる。

○消防団等との情報共有及び連携において留意すべき事項

消防本部等と消防団との通信手段の確保及び連絡体制の確立を行い、災害時における活動の分担や連携方法について事前に計画を策定し、共同して平時における訓練等を実施しておくことが必要である。また、災害対応の中心となる消防本部等と消防団による合同の指揮本部を設置するなど、情報の共有と指揮系統の統一を図ることが重要となる。

【具体的取るべき方策（例）】

- ・災害発生時の消防本部及び消防団本部の合同の指揮本部の設置
- ・消防本部と消防団との情報連絡手段の整備
- ・具体的な活動についての役割分担や連携方法についての事前計画の策定及び事前計画に基づく訓練の実施
- ・安全管理及び退避時の連携方法についての事前計画の策定 など



【連携活動事例1】

通信が途絶等したことから消防団に各担当地域における被害状況の確認を要請した。そのため、消防団からの情報をもとに管内における被害状況の集約が短時間で完了した。これによって消防本部では災害対応体制が迅速に整い、県内応援隊の出動準備態勢の確保が早期に実施された。

【連携活動事例2】

地域防災計画に基づき「消防団は指定された水門の閉鎖」、「消防本部は水門の閉鎖確認」といった活動内容が明確に分担されていたことにより水門の閉鎖、確認作業に要する時間が短縮され、避難誘導を行いながら早期に安全な場所へ移動することができた。これらの活動は警報発令から数分で実施された。

【連携活動事例3】

119番通報が途絶し、災害覚知の遅れが懸念されたことから、消防団と連携して避難所や公共施設へ駆け付け通報するよう巡回広報を行った。また、避難所や消防団詰所等に待機した消防団員が、防災行政無線や消防団無線を利用して消防本部に連絡したことにより通報体制が確立でき、119番通報の代替手段としての災害覚知が有効であった。

【連携活動事例4】

大規模な火災の発生に対し、付近の水利が津波の被害により使用不能であったことから、遠距離送水の必要が生じた。消防隊、消防団連携のもと自然水利から遠距離送水体制を確保し、長時間の火災防御活動を実施した。

9 長期化活動への対策等

大規模災害発生時は活動が長期化することが想定されるため、職員の食糧、飲料水及び車両等の燃料の確保とともに、継続した活動における職員の健康・安全を考慮した休憩や交替が必要となる。

○長期活動に備えて留意すべき事項

食糧等の備蓄とともに、活動が長期継続した場合に必要な物資等を調達できるよう、署所近隣における事業所等との事前協定や協力体制の確立が重要である。また、活動時間に応じた職員の交替計画や休憩場所の確保等にも留意する必要がある。

【具体的に取り組むべき方策（例）】

- ・初動期の活動に必要な具体的期間を設定した食糧等の備蓄
- ・食糧、燃料等の確保のための事業所等との連携体制に関する協定
- ・職員の交替等による健康管理上必要な措置についての事前計画の策定
- ・職員家族の安否確認方法 など

○応援隊を受け入れるための体制づくり

応援要請の実施、受援準備の開始 など

10 今後の取り組むべき課題

津波を含む大規模災害における消防職員の安全管理のあり方については、消防本部の対応や体制だけでなく、地域住民の理解や地域全体での体制整備といったことも重要であり、今後、各消防本部において、この報告書全体を踏まえ、事前計画の整備と訓練等を進めていくことに加え、次のような課題の解決に向けて取り組んでいく必要がある。

- ・津波による身の危険がある場合には消防職員も退避することについて、地域住民への周知及び理解を求めていくこと。
- ・自助、共助の推進とともに、防災についての知識、技術の向上等を図るための教育を行うこと。
- ・災害時要援護者を含む住民の安全な避難方法等について、防災関係機関、自主防災組織、事業所、福祉関係者等、地域が一体となって検討を進め、連携訓練を実施していくことで、地域全体の災害対応力の向上を図ること。
- ・避難路や津波避難ビル等の避難施設についての地域全体による整備等を図っていくこと。
- ・消防における津波に対する安全対策の検証、知見を積み上げていくこと。

10

津波災害時の消防活動

津波災害における消防活動の困難性

平成24年度「津波災害発生時における消防活動のあり方研究会」から

1 津波災害発生後の市街地の状況

東日本大震災において津波被害を受けた地域では、津波の襲来により木造住宅等の建物の多くが破壊されるとともに、耐火構造等の堅強な建物であっても破損し、市街地を形成していた建物等の存在が原型をとどめることなく変化した。

また、建物だけでなく、船舶や車両等も津波により至る所に流出し、市街地は平常時の様相を一変させ壊滅状態となった。津波により破壊された残骸等は、あらゆる道路や空道を埋め尽くし、しかも、幾重にも堆積するがれき等の中には、家屋の残骸や収容物だけでなくガスボンベや石油ストーブ、車両燃料等の引火性の高い物も混在した。

さらには、津波により多くの地域が浸水するとともに、泥水化した状態となり、河川では津波の遡上により、がれきや油類等が入り混じった状態となっていた。

2 消防活動の困難性

津波の襲来は一気に市街地を飲み込み、広範囲に影響を及ぼした。ライフラインが壊滅したことから、地域によっては消防への通報もままならず、情報の収集にも時間を要した。このような中でも、消防職団員による発見や、関係機関、消防署所への駆け付けなどにより、多くの災害を覚知し、消防隊等が災害現場へ出動したが、上述のとおり、市街地そのものの様相が変化しているため、覚知した災害場所を特定するための目標物がなく、地図上での災害地点と一致しないため、要救助者の位置や消防隊等の位置の把握が非常に困難であった。出動に際しては、道路をがれき等が埋め尽くすとともに、浸水箇所が多いことから車両による現場到着は時間を要するとともに、ポート等を活用しなければ現場に到着できない状況もあった。

また、現場活動にあっては、がれき等による障害のため、車両等が活用できないことから、人力による資機材の搬送やホースの延長など、マンパワーに頼らざるを得なかった。消防職員は足場の悪いがれき等の上での活動を行ったが、釘の踏み抜きをはじめ、鋭利ながれきによる損傷、がれきの隙間への転落、引火性物質の混在による出火危険など、非常に危険な環境下での活動となった。

さらに、津波浸水区域内であるため、津波警報の発表や余震発生の都度、退避しなければならないという、極めて困難な活動となった。これらの危険リスクだけでなく、津波災害に適応した資機材の不足、夜間活動における照明の不足、災害発生時期が冬期であったによる積雪や寒さへの対応、活動が長期化したことによる隊員の疲労や燃料の不足など、多くのリスクを抱えた状態であった。

11



1（陸前高田市消防本部提供）



2（宮古地区広域行政事務組合消防本部提供）



3（宮古地区広域行政事務組合消防本部提供）



4（石巻地区広域行政事務組合消防本部提供）

効果的な消防活動方策

1 情報の共有

津波災害発生後は、複雑に変化した市街地での広範囲に及ぶ活動となり、平常時には想定できない場所で災害が発生している。これらの状況下で活動する場合、最も重要となるのが「情報の共有」である。

広範囲にわたる災害現場において目標物がない上、多くの要救助者が点在している状況であり、いかに早期かつ効果的に人命救出活動を実施するかは、活動に必要な情報を収集・伝達できなければ不可能であり、また、多くの活動障害の中で危険を回避しながら活動するためには、安全に係る情報を常に共有する必要があり、二次災害を防止する上でも部隊間、隊員間における情報の共有が重要となってくる。

そのためには、消防・救急無線だけでなく、多様な通信手段を確保するとともに、共通した合図の使用や関係機関と協力した連絡体制の確保などを図る必要がある。特に広範囲に及ぶ災害現場での活動は、消防機関だけでなく、警察等其他の関係機関も出動していることから、合同の指揮本部を設置し、災害情報や安全に関する情報等を集約、共有し、確実に伝達していくことが重要となる。

また、被災地域では多くの負傷者が発生していることから、負傷者の搬送手段、受け入れ可能病院の情報等についても関係機関の協力が必要となり、そのための情報共有も必要である。

2 部隊活動

津波災害時には複合的かつ同時多発的に災害が発生することが想定される。このような場合、早期に災害に対処できる消防力を集結させることは非常に困難となる。そのため、限られた消防力を活用して、より多くの人命救助、被害軽減を図るには、災害状況に応じた優先順位を付けて部隊活動をする必要がある。

例えば、火災を例にすると、「人命危険がない、延焼危険がない。」といった火災に対し、「人命危険が迫っている、延焼危険が高い火災が発生している。」といった場合、後者に対し優先的に部隊を出動させることとなる。また、救助活動では、「生存者の発見される可能性が高い地域・箇所を重点的に検索する。」といった活動を行うこととなり、これら優先順位を付けた活動については、災害状況や消防力に応じて活動方針を決定するとともに、時間の経過や状況の推移によって変化することも留意する必要がある。

3 連携活動

津波災害のような広範囲な災害現場において、より効率的に人命救助、被害軽減を図るためには消防機関だけの活動では対応できないため、警察、自衛隊、DMATをはじめとする各関係機関や事業所等との協力が必要となる。

津波災害においては、前述しているとおり、がれき等多くの活動障害が存在するため、主として人力による活動となってくるが、重機等の活用を図ることにより道路啓開や救助活動の効率化が図れるため、関係機関の保有する資器材や事業所の重機等を活用できるよう事前の協定や連携活動訓練の実施等が必要である。

また、広範囲にわたる現場において迅速確実に要救助者や負傷者を発見し、救出・救護するためには、関係機関が重複することなく活動する必要があり、そのためには活動の分担や指定など、共通した認識を持つ必要があることから、情報共有を図るための通信手段や連絡体制の構築を図った上での連携活動が重要となってくる。

4 安全管理

消防活動する職員の生命を津波から守るためには、地震発生後に津波が到達する時間は地域によって異なるため、あらかじめ津波の到達する時刻が早い地域における退避活動や、津波が到達するまでの間に消防活動が可能な地域においてそれぞれの実情に応じた退避ルールを事前に策定し、周知徹底しておく必要がある。

消防本部においては、それぞれの地域実情に応じた大規模災害発生時の活動計画を策定されていることが多いが、東日本大震災による職員の被災状況を踏まえて、津波による安全管理を十分に考慮した計画の見直しを行うとともに、計画に基づく訓練の実施により安全管理体制を確立しておく必要がある。

また、津波発生後の浸水区域内での活動にあっては、津波の第2波、第3波の発生が想定されることから、津波警報が発表された場合の活動の中断、退避の合図及び退路の確保等について現場指揮所を中心に関係機関とも協力した安全管理体制を構築する必要がある。

さらに、がれき等が堆積した場所や浸水地域内など、活動困難な状況下での長時間に至る活動となることから、身体を防護する装備、資機材等に配慮する必要がある、余震による建物倒壊等も含めた活動指揮など、組織的な安全管理体制を講じる必要がある。

東日本大震災における消防団活動 ヒアリング調査による活動内容と活動事例

東京大学大学院 山田常圭

東京消防庁 坂本憲昭

名古屋大学 廣井 悠

1. はじめに

東日本大震災では、地震やその後の大津波・余震等により 330 件¹⁾もの火災が発生した。図 1 は、地震発生後の火災発生および鎮火件数の時間的推移を、消防庁の災害情報詳報²⁾をもとに示したものである。図の経過時間は火災の発生時刻ではなく、詳報の公表時刻であるため時間遅れがあり、多くの火災は地震や津波直後から起きたと考えてよい。一方、消防活動も出火直後から行われたと推察されるが、約 200 件の出火に対して鎮火が 60 件程度で頭打ちとなっており、現地での消防力に限界があったことがわかる。地震後 2 日間は、約 140 件の火災が被災地で継続していたことになる。その後 2 日半頃から減少に転じ、4 日後に大半が鎮火されている。これは全国からの緊急消防援助隊が現地入りし消火活動が行われたためと考えられる。

平常時における消防力の担い手が、公設消防機関にあることは言うまでもないが、東日本大震災のように広域で甚大な被害が発生した場合、発災直後の応急対応者として地域密着性、即時対応力また数の上で公設消防機関の 5 倍の人数を擁する消防団の存在は、地域防災安全上不可欠である。特に広範にわたり同時に被災した津波浸水域では、多くの公設消防機関が無力化された。その後、緊急消防援助隊の活動なくしては、市街地火災の鎮火はなしえなかったが、援助隊到着までに被害を抑制し、救われた命は、現地の消防団の多岐にわたる活動に拠るところが極めて大きかったのではないかと考えている。

しかしながら、一方で犠牲になった消防団員は過去に例のない 254 名（内 2 名が行方不明者以下同じ）にもものぼる¹⁾。ちなみに常備消防職員 27 名(4 名)¹⁾、警察官 30 名(5 名)³⁾、民政委員 56 名(10 名)⁴⁾といずれも多数の犠牲者がでていますが、消防団員の犠牲者は他と比べて格段に多くなっている。なお犠牲者の多寡は全体の母数との比較し論議しなくてはならないが、常備消防職員数との単純比較でも被災率は倍以上ということになる。

今後、こうした災禍を繰り返さないために、消防団の震災直後からの対応行動の検証は非常に重要であり、そのための活動記録の整備が望まれる。しかしながら過去の阪神淡路大震災や新潟県中越地震等の災害においても消防団は多様な活動をしているが一連の活動が体系的にまとめられた記録⁵⁾は非常に限られている。公設消防機関等では大災害後、記録集を作成することはあるが、非常勤特別職の地方公務員とはいっても日々別の生業をもつ消防団員が記録集を残すことは容易ではない。筆者らの研究室では、今後の地域防災力の向上及び消防団の安全な活動体制を構築するうえで参考になればと考え、東日本大震災における消防団の活動について、消防団を対象にヒアリング調査を行ってきた。本講演では、現地消防団へのヒアリング調査の中で浮かび上がってきた消防団の共通的な活動内容や課題および具体的な活動事例を紹介する。

表1 調査対象消防団（分団・部）一覧

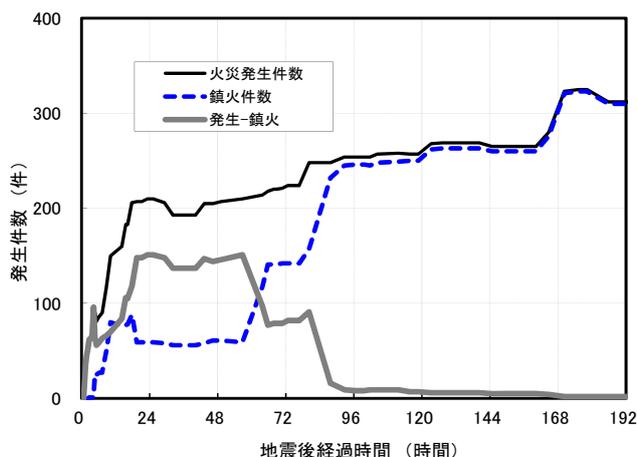


図1 地震後の火災発生・鎮火件数の時間的推移

自治体	調査分団・部	団員数(人)	アンケート対象者
A町 (人口1.8万人 分団数14分団)	A-a分団	25	分団長、副分団長
	A-b分団	26	分団長、副分団長、部長
	A-c分団	30	分団長
	A-d分団	30	分団長
	A-e分団	22	副分団長、部長、班長
	A-f分団	25	分団長、副分団長
	A-g分団	30	分団長、部長
	A-h分団	30	分団長、副分団長
	A-i分団	30	分団長、副分団長
	B町 (1.5万人 6分団)	B-a分団a部	13
B-b分団a部		14	分団長、部長、団員
B-b分団b部		14	分団長、部長、団員
B-b分団c部		13	部長
C市 (7.3万人 13分団)	C-a分団	25	分団長
	C-b分団	53	分団長、副分団長
	C-c分団	50	分団長
	C-d分団	80	副分団長
	C-e分団	79	分団長
	C-f分団	63	分団長
	C-g分団	70	分団長
	C-h分団	63	副分団長
	C-i分団	136	分団長、副分団長、部長
	C-j分団	39	分団長
	C-k分団	54	分団長
	C-l分団	94	副分団長
	C-m分団	54	分団長

A 町：岩手県山田町、B 町：岩手県大槌町
C 市：宮城県気仙沼市

2. ヒアリング調査概要と活動項目

2.1 調査目的、対象および方法

対象被災地が広域にわたるため、本調査では津波浸水域において、大規模な市街地火災が発生した表1に示す3つの消防団の分団単位で、平成23年11月から3月にかけて現地ヒアリング調査を実施した。なお大槌町(B町)では、分団の“部単位を対象としているが、他の消防団分団の機能を“部”単位で担っていたためである。

本調査の主たる目的は、地震直後から半年近く及ぶ消防団の活動実態を概括的に把握することと、震災直後の緊急対応活動を検証する上で必要な情報収集である。特に後者では、団員および所属する分団の震災直後から翌日までの活動を時系列的に地図上に表記する作業を行うとともに、時間的・空間的なスケールを把握するため消防団が活動した現場の踏査も併せて実施した。

一連のヒアリングでは、団員および分団の活動内容、活動上の支障要因および今後の課題等について多岐にわたる質問を行った。その際、団員や分団の多岐にわたる活動情報を網羅的に引き出すために、系統的な設問形式ではなく、一人あたり2~3時間かけたブレインストーミング的な方法を採用した。以下、ヒアリング内容から頻度の高い共通して使用された語彙を抽出し、その上で結果をとりまとめたものである。

2.2 消防団が行った活動実施状況

表2、3に、各地域の分団等の活動内容毎の実施状況を、地震直後から数日後までの緊急対応活動と、それ以降約半年にわたる中長期的な対応活動に分けてまとめた。地域特性や被災状況によって活動内容に多少違いはあるが、水門・門扉の閉鎖、避難誘導、消防団の車両の退避、救助活動、市街地火災防御、林野火災防御、遺体捜索・遺体搬送、夜間警戒といった多岐にわたる活動が多く分団で行われた。

水門・門扉閉鎖では、屯所への参集前に実施した分団と、参集後に実施した分団に分かれるが

各々事前の計画にしたがって実施されたとのことである。また事前に計画されていたか否かに依らず、浸水域からの車両退避が実施されている。なお、こうした初動対応の一連の活動中に津波に襲われ命を落とした団員や、助かったものの過度な危険に晒された団員が少なくない。

火災防御に関しては各分団に限られた人員・水利・装備を工夫しながら放水隊形をとり消火活動が行われた。いくつかの分団では隣接分団と積極的に連携し、管轄分団長が全体指揮を、応援分団長が局面指揮をとり効率的な活動を行った例もあった。また、林野火災では、自分の管内以外の火災の防御活動を依頼され広域の活動を行った例もあった。一方、避難者の二次避難のための避難者搬送避難所の設営準備や、公共施設の清掃、防災行政無線不能地域での巡回による広報

表2 各消防団の地震直後の緊急対応活動

自治体	分団・部	水門・門扉閉鎖		避難誘導	車両退避		被害確認	救助活動	市街地火災消火		林野火災消火	
		参集前	参集後		計画有	計画無			自己管内	自己管外	自己管内	自己管外
A町	A-a分団	○		○		○						○
	A-b分団	○		○		○		○	○		○	
	A-c分団	○		○	○							
	A-d分団	○		○		○		○	○			○
	A-e分団	○		○		○		○	○			
	A-f分団	○		○	○			○	○			
	A-g分団	○		○	○			○	○			
	A-h分団	-	-	○	-	-	○	○		○		○
	A-i分団	-	-	○	-	-	○	○		○		○
B町	B-a分団a部		○	○		○		○	○		○	○
	B-b分団a部	○		○		○						○
	B-b分団b部	○		○								○
	B-b分団c部	○		○								○
C市	C-a分団	-	-	-	○		-	-	-	-	-	-
	C-b分団		○	○	○				○			
	C-c分団		○	○	○				○		○	
	C-d分団		○	○	○				○		○	
	C-e分団	-	-	-	-	-			○			○
	C-f分団		○	○	○				○			○
	C-g分団		○	○	○							○
	C-h分団		○	○	○							○
	C-i分団		○	○	○							○
	C-j分団		○	○	○							
	C-k分団	-	-	-	-	-		○				
	C-l分団	-	-	○	○			○				
	C-m分団	-	-	○	○			○				

A町：岩手県山田町、B町：岩手県大槌町 C市：宮城県気仙沼市
記号等 ○：実施空白：未実施-：非該当（注：C-a分団は本部隊）

表3 各消防団の中長期的な対応活動

自治体	分団・部	避難所設 営等準備	公共施設 清掃	避難者 搬送	傷病者 搬送	行方不明 者捜索	遺体搬送	瓦礫撤去 等	巡回広報	夜間警戒	屯所等 詰め
A町	A-a分団	○		○		○	○			○	○
	A-b分団					○	○				○
	A-c分団					○					○
	A-d分団	○				○	○			○	○
	A-e分団				○	○	○			○	○
	A-f分団				○	○	○			○	○
	A-g分団					○	○			○	○
	A-h分団					○	○	○	○		
	A-i分団					○	○	○	○		
B町	B-a分団a部	○		○		○	○	○			○
	B-b分団a部				○	○	○			○	○
	B-b分団b部				○	○	○			○	○
	B-b分団c部										
C市	C-a分団							○	○	○	○
	C-b分団		○			○	○		○	○	○
	C-c分団		○			○	○	○	○	○	○
	C-d分団					○	○		○	○	○
	C-e分団		○			○	○	○	○	○	
	C-f分団					○	○	○	○	○	
	C-g分団					○	○	○	○	○	
	C-h分団		○			○	○		○	○	○
	C-i分団		○			○	○		○	○	○
	C-j分団	○				○	○		○	○	○
	C-k分団		○			○	○		○	○	
	C-l分団		○			○	○		○	○	○
	C-m分団					○	○	○	○	○	○

A町：岩手県山田町、B町：岩手県大槌町 C市：宮城県気仙沼市 記号 ○：実施空白：未実施

活動、といった本来消防団以外の公共機関が担うべき活動は地域によって実施状況に差がみられた。

2.3 消防団の活動上の支障要因

表4に示すように、無線機がなく情報が入手できなかったことと、これに伴い指揮系統が確保できなかったことが、多くの分団で重大な支障要因として指摘された。また瓦礫・浸水によるアクセス困難、屯所の被害も、大半の分団で挙げられた。とりわけ無線機の有無は、組織的な消防団活動への影響が大きく、団本部・分団間の双方向無線が市町村により配備されていた地域では指揮活動及び情報伝達が迅速に行われ連携や役割分担が可能となった。

一方、無線が利用できなかった分団では、指揮系統も確立されず、孤立状態で活動せざるを得なかった。なお気仙沼市の無線機が配備されていなかった地域では、C-b分団に事前に配備されていたバイク隊により分団間の情報が確保され、本部隊の下に指揮系統が確保されたケースもあった。その他、公設消防機関と合流し消防無線から情報を得て活動効率が向上した分団も存在した。

消火活動時には、瓦礫・浸水で現場へ近寄れなかったり、使用可能な水利が自然水利等に限られ、ホース延長を余儀なくされた分団も多い。例えば気仙沼市では、各分団間及び公設消防との連携で1kmを超える水利から複数回のポンプ中継により放水できたものの、かなりの時間を要することとなった。その他、屯所が流失したことにより個人装備やホースが不足した他、避難所分しか食料の備蓄がなかったため、長時間にわたる活動中ほとんど食糧を口にできなかった団員も少なからずあったときく。その一方で、消防後援会により装備や食糧の支援を受け、充実した活動を継続できたという例や、屯所が複数あり流失しなかった屯所の装備を利用できた事例等、今後の連携体制を考える上で参考となる情報を得ることができた。

3. ヒアリングによる消防団活動事例

ヒアリングでは、地震直後から数日にわたる各分団の活動を具体的に把握するため、地図上に、どのような活動をしたかを時系列に記載しながらヒアリングを行った。また、ヒアリング後、地形と併せて行動をより理解するため、行動軌跡をたどる現地踏査も行った。以下、3つの消防分団の活動事例を、分団全体の動きと関連づけて紹介する。

3.1 大槌町における消防団B-a分団a部の活動

大槌町は、地震後の大津波によって大半の市街地が浸水し、その後、山際に沿って市街地火災

表4 消防団活動上の支障要因

自治体	分団・部	無線機	指揮系統	瓦礫・浸水	屯所被害	車両被害	水利（内訳）
A 町	A-a分団	×	×	-			-
	A-b分団	×	×	●			●(防・自)
	A-c分団	△	×	●	●		-
	A-d分団	×	×	●	●		●(防・プ・自)
	A-e分団	×	×	●	●		●(防・貯)
	A-f分団	×	×	●	●	●	●(防・貯)
	A-g分団	×	×	●	●		●(防)
	A-h分団	△	×	●			●(防・自)
	A-i分団	△	×	●			●(防・自)
B 町	B-a分団a部	△	△	●	●		●(自)
	B-b分団a部	△	△	●	●		-
	B-b分団b部	△	△	●	●	●	-
	B-b分団c部	×	×	●	●	●	-
C 市	C-a分団	×	○	●	●		-
	C-b分団	×	○	●	●		●(防・自)
	C-c分団	×	○	●	●	●	●(自)
	C-d分団	×	○	●	●	●	●(防・防・自)
	C-e分団	×	○	●			●(防・自)
	C-f分団	×	○	●	●		●(防・自)
	C-g分団	×	○	●	●		●(防・自)
	C-h分団	×	○	●	●		●(防・自)
	C-i分団	×	○	●	●	●	●(防)
	C-j分団	○	○	●	●	●	-
	C-k分団	○	○	●			-
C-l分団	○	○	-	●	●	-	
C-m分団	○	○	●	●	●	-	

A 町:岩手県山田町、B 町:岩手県大槌町 C 市:宮城県気仙沼市
 記号等 ○:あり, △:あったが不十分, ×:なし(支障あり) ●:支障あり, 空白:コメント無し -:非該当
 防:防火水槽, 自:自然水利, プ:プール 貯:貯水槽



図2 大槌町消防団B-a分団a部の活動の時間経過

が発生した。大槌町消防署は街の東側の浸水域に位置し、津波で完全に破壊された。そのため大槌町の消防力は、地震翌日、緊急消防援助隊（大阪消防局隊）が到着するまで、消防団に依存することとなった。図2はB-a分団a部の活動事例を示したものである。この分団は主として町の西側を管轄し、屯所は図中の●に位置する。以下、大槌消防団のB-a分団3名からのヒアリングをもとに、広範囲かつ多様な消防活動内容を時系列的に説明する。

3.1.1 地震発生から水門閉鎖まで（3月11日 14:46～15:18頃）

地震発生から9分後、屯所に最低出場可能人数である2名が参集し、ポンプ車で水門閉鎖に出場(図2中1)。担当となっていた6つの水門を閉鎖し(図2中2)、無線機により団本部へ報告(図2中3)。この時点で団本部は広報車で市街地南西の高台に退避していた。本部機能は維持していたが、その後、津波で退路をたたれ対岸で孤立状態に陥った。同時刻、別の水門閉鎖を試みていた同分団他部からの要請により応援のため海岸方面へ移動。移動途上で屯所に待機していた団員を1名乗車させ3名で応援に向かった(図2中4)。B-b分団他部担当の水門2箇所を協力して閉鎖した直後、津波第1波が襲来した(図2中5)。

3.1.2 避難誘導および救助活動（3月11日 15:18～17:00頃）

サイレンと拡声器を使用し住宅街(図2中6)、ショッピングセンター駐車場(図2中7)、保育園・幼稚園付近等を通り高台へ移動しつつ、住民の避難誘導を行った。橋を渡り折り返して住宅地で避難誘導(図2中8)中に道路まで津波が迫ってきたため退避を開始(図2中9)。その途上に足の不自由な高齢者と介助者がいたためポンプ車に乗せ退避を再開(図2中10)。その後、高台近くまで来たところで住民にポンプ車を止められ川に流されている人がいるとの情報を得たため、住民と共に救助した(図2中11)。救助された人が負傷していたため、避難所（弓道場）へ搬送した(図2中12)。

3.1.3 避難者搬送等（3月11日 18:00～22:00頃）

夕方になり津波が引きポンプ車が走行できる程度の水深になった頃、やや低地の地域の狭い建物に避難者がいたため、ポンプ車と団員の自家用ワゴン車で前述の弓道場にピストン搬送を行っ

た(図2中13)。暗くなった頃、町の状況を確認するため中心地の方へ向かった際(図2中14)、バイパス道路上に退避・待機していた常備消防の救急車と資材搬送車と合流し弓道場に案内した(図2中15)。その後、南側道路トンネル付近の事業所に100名余りの避難者が待避していたため常備消防と連携し6台の車両でピストン搬送を行った(図2中16)。この際、トンネル付近で停滞していた車両の弓道場付近への誘導も行った(図2中17)。この時に大規模な市街地火災を確認したが、参集できた団員数が少なく、避難者が多数発生したことから避難者対応を優先し、弓道場を避難所として使用できるように環境を整えた(図2中18)。

3.1.4 火災対応 (3月11日 22:00～3月12日 3:00頃)

22時頃、徐々に参集可能な団員数が増えたが、水利が見つけれず瓦礫でポンプ車も走行できないため、火災が拡大するのを茫然と見ているしかなかった。23時頃、火災が更に住宅地に延焼してしまう直前というところで、知人の建設業者に4tトレーラーで重機の運搬を依頼した(図2中19)。12日0時頃、到着した重機によって瓦礫を撤去(図2中20)。合流した他分団のポンプ積載車2台と合わせて計3台が河川に水利部署した(図2中21)。最初は泥があり部署が困難であったため、泥を掘って除いて吸水を安定させた。周囲は暗闇であったが、車両の照明装置は水利側に全て使用したため視界が悪い中での活動であったが、3月12日午前3時頃、延焼を阻止し消火活動を終了した。

3.1.5 その後の活動 (3月12日以降)

12日午前5時ごろ、林野火災が住宅地に迫ったため住民を弓道場まで搬送した(図2中22)。12日の夜からは、瓦礫の中からの救助活動や遺体運搬等を行う一方で(図2中23)、山中の住家に迫る火災からの延焼阻止活動を転戦しながら行った(図2中24)。林野火災延焼阻止活動は1週間以上にわたった。

3.2 気仙沼市鹿折地区の消防団C-c分団の活動

気仙沼市では、広域にわたって多様な火災が発生したが、中でも湾奥部の鹿折地区は、岩手県山田町に次ぐ大きな市街地火災が発生した。C-c分団は、この鹿折地区及び気仙沼湾東岸を管轄する消防分団である。C-c分団の屯所は、図3中●に位置している、図3には、ヒアリングをした副分団長の活動を中心に、同分団の活動概要を示す。

3.2.1 地震発生～一時退避 (3月11日 14:46～15:30頃)

地震発生時、港に接岸していた大型漁船上で作業中に、これまで感じたことのない種類の揺れを感じ大地震に気付く(図3中1)。揺れが続いている中、個人装備を取るために会社に向けて車で出発。会社に行く途中では、住人の避難誘導を実施(図3中2)。会社に到着し常時個人装備を積載している自家用車に乗り換え屯所に向かう。屯所到着時、分団長を含めた12～13人が既に参集していた。2班に分かれ水門・門扉の閉鎖・確認に出場(図3中3)。副分団長は分団長と2人で副分団長の自家用車で管轄地域南側の門扉の確認を担当した。門扉への移動中、海底が見えるほど潮が引いていることに気づき(図3中4)、危険を感じ近場の高台まで退避した(図3中5)。

3.2.2 津波襲来～移動等 (3月11日 15:30～21:00頃)

退避して約5分たった頃津波が襲来した。その時、流される家屋の屋根の上から助けを求める人を発見したがどうすることもできなかった。作業をしていた漁船の北あたりから煙が上がるのを目撃したところで、近くで津波に流された高齢者がいるとの情報を受け救助に向かう(図3中6)。



図3 気仙沼市鹿折地区消防団C-c分団の活動の時間経過

近隣住民と協力して救助活動完了後、その高齢者を副分団長の住宅に預け暖を取らせるよう依頼。その後、対岸の市街地でもう1ヶ所煙が上がっているのを確認し、分団長から副分団長は火災対応との指示を受けた(図3中7)。通常の道路は浸水と瓦礫の影響で使用できないため、道の無い山中を徒歩で進むしかない状況であった。尾根を2つ越えa職業能力開発校付近の道路に出たところで、退避していたC-c分団の消防車両を発見し合流(図3中8)。団員たちに付近の避難者を職業能力開発校に誘導するよう指示し近くの中学校に避難者や備蓄の確認に向かった。中学校に着いた時、校庭には避難者が集まり火を焚いていたので、自分は消防団員であること、お互いに知恵を出し合い協力して朝まで待つてほしいことを伝えた(図3中9)。

再び火災現場を目指し尾根を越え北側幹線道路(国道45号線)まで到達。道路上に自力で歩行できない高齢者と補助者を発見し、介助しつつ小学校まで誘導(図3中10)。小学校に到着した時にはすでに二次避難して誰もいなかったため(図3中11)、自宅に連れて行き保護するよう家族に依頼し火災対応に向かう事を告げた(図3中12)。

3.2.3 火災対応 (3月11日 21:00～3月12日 16:30頃)

小学校付近の屯所に行くとき分団員が数名待機していた(図3中13)。その時、常備消防が火災状況の確認で出場して来たので呼び止め、今後の活動について話し合った(図3中14)。常備消防の無線を活用し常備消防及び同市の分団3隊に応援要請。C-c分団は小学校のプールを水利として使用、小型ポンプ2台を活用して約300mホースを延長し火災北側の防御にあたった。また、応援出場して来た分団及び常備消防と連携し、火災現場北西に位置するトンネル出口にある山水受水槽からポンプ車2台、小型ポンプ4台を活用して約1kmホースを延長し火災北西に位置する線路をラ

インとして防御にあたった(図3中15)。火災防御中に津波情報が何回も入り、安全な位置まで退避した。退避中にLPガスボンベの爆発が起こりきのご雲のような炎が上がり隣家へ延焼していった。その後も消火、退避、延焼の繰り返しであった(図3中16)。活動中、C-c分団のホースは使い切ってしまったがそれでも足りず、団員に指示して遠方の無事な屯所まで借用に向かわせた。翌朝、緊急消防援助隊(東京消防庁隊)が到着したため、水利の情報を提供する(図3中17)とともに連携して火災防御及び残火処理を行った(図3中18)。この活動は3月12日16時頃まで続いた。

3.2.4 救助活動、捜索・遺体収容等 (3月12日～3月19日)

3月12日は火災対応とは別な班を作り、自衛隊と連携した救助活動も実施した(図3中19)。14時頃に介護老人保健施設までの道路が使用可能となったため団本部からの指示で救助に向かう事となった。3月13日には同施設近辺で多数の遺体が緊急消防援助隊により発見され、団本部からの指示で遺体収容作業を実施。建設業者からトラックを手配し収容所まで搬送した(図3中20)。3月14日から19日は捜索活動及び収容を行った(図3中破線)。

3.2.5 林野火災警戒・広報活動等 (3月15日～8月頃)

3月15日は林野火災が拡大し高台にある病院の患者を緊急消防援助隊が安全な場所へ搬送することとなった。その間、病院に火災危険が迫らないように消防団が警戒活動を実施した(図3中21)。3月20日までは屯所に詰め、何かあってもすぐに対応できる体制をとっていた。3月15日以降、3月中は広報活動も行っており、住民に行政からの情報等を発信した(図3中22)。また、3月15日からは夜間警戒についても実施した。この警戒には火災予防のみならず防犯の意味も含まれており、8月中旬まで継続して実施された(図3中23)。

3.3 気仙沼市大島地区の消防団C-h分団の活動

C-h分団の管轄は、気仙沼湾入り口東側に位置する大島全体を対象としている。気仙沼市とは、海を隔て船が主要な交通機関であり、外部からの救援が困難な地域である。この分団では、海上の漂流火災から林野火災へと延焼拡大しその消火が主要な事後対応となった。以下、C-h分団副分団長からのヒアリング結果を紹介する。図4は、C-h分団の活動を示したものである。この分団の屯所は図4中の●である。

3.3.1 地震発生～避難誘導 (3月11日 14:46～15:30頃)

副分団長は地震発生時、漁船上で作業中スプリングのような揺れを感じたため(図4中1)、一緒にいた人に作業を中止するよう指示し、自家用車で高台にある屯所に向かった(図4中2)。屯所に着いたところで隣接施設勤務の団員を呼び出し、ポンプ積載車で避難誘導広報に出場(図4中3)。門扉・水門の閉鎖も併せて実施(図4中4)。なお、門扉は、ほとんどが常時閉鎖されているが、障害物があり閉鎖しづらい箇所も存在した。島の南部を回り地震発生時に作業をしていたあたりに戻ってきたところで津波が襲来したため、高台へと退避しながら屯所へ向かった。

3.3.2 火災対応 (3月11日～3月14日)

屯所に戻ったところで、分団長から災害対策本部にいるように指示を受けた(図4中5)。しばらくすると海上の養殖筏の発泡スチロールや流出油が燃えて岸に漂流し(図4中6)、島の沿岸から垂れ下がっている木の枝に延焼し林野火災に発展した(図4中7)。3月11日の夜から火災の情報が入り消火に向かった。車が通れるような道は無く、徒歩で火災現場まで向かった(図4中8)。水利は山頂直下の防火水槽を使用し(図4中9)、その水利が尽きた後は海水を汲み上げ土木会社のミキサー



図7 気仙沼市大島地区消防団C-h分団の活動の時間経過

車で運び充水した(図4中10)。また養殖ワカメの冷却用のタンク（1～2 t）と小型ポンプを各所に配置し活用した(図4中11)。ガソリンスタンドの殆どが津波被害を受け燃料が限られていたため、一度の活動は燃料10ℓまでと限定した(図4中12)。活動を終了したら災害対策本部まで戻り状況を報告、各班の報告から得た情報を元に再び出場ということの繰り返しであった(図4中13)。消防団無線は電波が届かなく伝令を出して情報伝達・指示を行った(図4中14)。出場人員は1ヶ所につき2～3班（20～30人）とした(図4中15)。

一昼夜たった頃には食糧も無く疲労が激しく水を含んだ重いホースを運ぶのも厳しかったため近場を中心とした活動となった。3月13日、14日には、気仙沼市の津波被害を受けなかった内陸山岳地域の分団が駆け付け応援活動を行った(図4中16)。各々の火は小さかったが広域に広がっていたため全ての鎮圧には時間を要したが建物への延焼は全て防ぐことができた(図4中17)。

3.3.3 避難所対応・遺体捜索他（3月11日～4月頃）

3月12日には、避難所で島が火災で燃えてしまうような不安にかられ、海に飛び込んでしまおうと考える避難者が出るなどの混乱が起こったが副分団長がなだめ説得した(図4中18)。3月14日以降は遺体捜索、搬送を行った(図4中19)。また、3月11日から1ヶ月間、夜間警戒を行っている(図4中20)。災害対策本部には1ヶ月半ほど詰めることとなった。

4. まとめ

津波火災が発生した地域の消防分団の中から3つの地域の分団の活動の全体概要と、具体的な活動事例を時系列的に紹介した。今回紹介した活動事例は限られた消防団員からのヒアリングで

あり、必ずしも分団の活動全体を表現しているものではなく、個々の消防団員の地震との遭遇時の状況に依存したエピソードの色合いが強い。しかしながら、地震直後に屯所への集合状況、その後の多様な消防団活動については、本調査で共通した姿や課題が明らかになってきたと考えている。特に、地震直後の緊急対応では、水門等の閉鎖、避難誘導、車両退避等広域にわたる多くの作業を限られた情報の下で行わざるをえなく結果として多くの団員が犠牲となった。

また、地震直後の緊急対応だけではなく、地震や津波後の困難な状況下で、約半年もの長期間におよぶ過酷な事後対応を強いられた。例えば、行方不明者捜索や遺体搬送等、本来消防団の業務ではないが、使命感、地域住民からの期待、孤立状態等により、やらざるを得ないという状況下で行われたものも少なくない。こうした長期化する活動の中で消防団活動と職場の復旧や業務との板挟みで解雇等の危険に陥り精神的及び経済的に大きな負担を感じた団員や、家庭になかなか戻れず親戚の捜索や家屋の片づけを進められなかった団員がいたとも聞く。こうした長期間の多岐にわたる消防団活動は、地域社会の住民からの期待感を表している反面、過度な責務が今回の消防団員の殉職者の多さにつながっているとしたら、消防団にとっては大きな問題である。

今後、懸念されている大地震において、住民の安心安全を守る消防団員の犠牲者を出さないためには、東日本大震災被災地での消防団の活動内容を再検証したうえで、消防団が本来行うべき活動を支える資材・装備の物的準備および身分保証等の制度的な面からの検討が必要であると考えている。なお、東日本大震災の消防団をめぐる諸課題については消防庁の検討会の報告書⁶⁾で整理、検討されているので参考にされたい。併せて本調査のような具体的な事例が、消防団の方々から自らの課題を認識し検討する上での一助になればと期待している。

【謝意】 今回の現地調査やヒアリングに際しては、多くの方々より有用な情報を頂いた。特に、気仙沼市、大槌町、山田町の消防団や所轄の消防機関からは、貴重な情報提供および便宜を図って頂いた。ここに記して感謝いたします

参考文献

- 1) 総務省消防庁：災害情報 平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震（東日本大震災（第146報） <http://www.fdma.go.jp/bn/higaihou.html> （2012年12月15日アクセス）
- 2) 同 東日本大震災（第1報）～（第61報）
- 3) 警察庁：平成23年度警察白書（平成23年6月20日現在の数値）、2011.
- 4) 河北新報社：Kolnet 記事、http://www.kahoku.co.jp/spe/spe_sys1071/20111120_01.htm（2012年12月15日アクセス）
- 5) 例えば西宮市消防団：'95.1.17 阪神・淡路大震災西宮市消防団員の活動記録集
- 6) 消防庁：日本大震災を踏まえた大規模災害時における消防団活動のあり方等に関する検討会報告書平成24年8月、http://www.fdma.go.jp/neuter/topics/houdou/h24/2408/240830_1houdou/01_houkokusyo.pdf（2012年12月15日アクセス）

【補足】 消防団の活動調査ヒアリングおよび作図は、当時研究生の坂本（現東京消防庁）が中心となり実施したものであるが、本文内容は現職務の意見を反映したものではない。なお、図は、Google マップおよび Google Earth に関する使用許諾ガイドラインにおける「Google サービスの特定の独自機能を利用」。

大規模災害活動時の防火服内衣服の水濡れが引き起こす危険性について

消防研究センター 森井 統正
若月 薫
尾川 義雄

1. はじめに

平成23年3月11日に発生した東日本大震災において、地元の消防本部に加え全国各地から多くの消防職員は、緊急消防援助隊として現地に赴き活動を行った。今回の震災では、地震や津波に起因すると思われる火災も多く発生し、消火活動や火災警戒の際には通常時の活動と同様に建物火災用の防火服が用いられた¹⁾。また、洪水等の災害活動時の救助活動において防火服を着用している消防隊員がテレビに映し出されるなど、防火服が本来の目的と異なった用途で使用されていることがしばしば見受けられる。

防火服は一般的に図1に示すとおり、表地（最外層）、透湿防水層（中間層）、断熱層（最内層）で構成され、耐熱性以外に引き裂き強度など高い機械的特性を有している（衣服外環境）。今回の震災は、冬場であったということで、夏場のヒートストレスなどを感じず、防火服に用いられる透湿防水層が水の浸透を防ぐことから、むしろ防寒服も兼ねて使用した隊員も多いと思われる。しかしながら、高温多湿の夏場など日本特有の四季を通じた気候変化に対して、現在使用されている建物火災用の防火服を常に着用して災害活動することは隊員の身体負担などのリスクにつながる。

衣服内環境に注目してみると、防火服内衣服（活動服や下着）は、災害活動時に消火水が襟元などから内部に入り込むことや消防隊員の発汗により水濡れを発生する。この水濡れは、体温のコントロールや衣服内の重量を上げることになり熱中症や運動負荷が上がることなどの危険性を伴う（図2）。

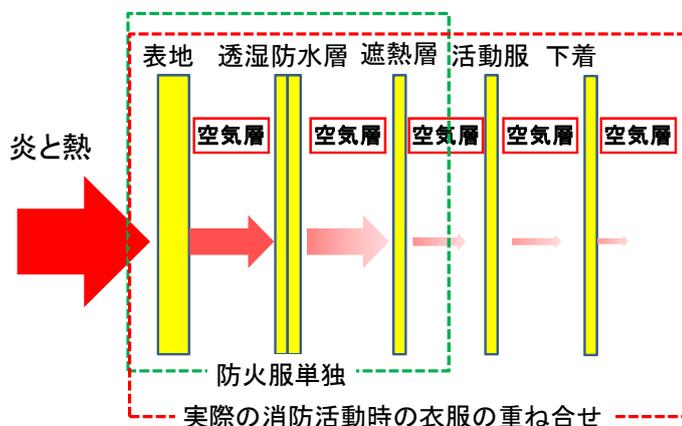


図1 防火服内の生地、活動服、下着と空気層による耐熱モデル

水は空気の約 23 倍の熱伝導率を持つ熱良導体である。ゆえに、衣服の繊維間に包含される水が、熱良導体として機能することにより防火服内部の熱伝導に影響を及ぼすことが考えられる。現状では、地震等の自然災害の対応、およびそれらに起因する住宅火災、工場火災や市街地火災などに対応する消防隊員は、耐熱服や建物火災用防火服を着用して活動することが想定される。現在の耐熱服や建物火災用防火服の着用時において、内部に着用する活動服や下着が水濡れした状態で、火炎からの放射熱を受けたとすれば衣服内の熱伝導が速くなることにより、熱傷進行を促進する可能性が考えられる。

本研究は、建物火災用防火服を一例にとり、活動中に活動服・下着生地が吸水した際に、現在流通している防火服の内部（活動服・下着）でどのような熱伝導が生じているのか、熱傷の促進に影響を与えるか検証した結果を報告する。

2. 防火服内衣服の水濡れが引き起こす熱傷危険について

消防隊員が着用している個人用防火装備は、現在、フラッシュオーバーなどの急激な火炎や熱に消防隊員が短時間ばく露される環境を評価対象としているが、短時間で強い熱を受けなくても熱傷を発生する恐れがある。建物内部で検索救助、消火活動を行う際は、個人防火装備は比較的弱い熱流束を受熱しているが、もし受熱時間が長い場合には熱傷を発生する可能性があり、客観的な検証により詳細を明らかにする必要がある。

大規模な建物火災では、消防隊員の生命を脅かす熾烈な火勢への対応に注目が集まるが、火災最盛期を過ぎた後でも、個人防火装備を着用せずに火災建物の周囲に近寄ることは困難な状態である。最近実施された木造3階建て学校の実大火災実験²⁾では、火災最盛期に建物直近で熱流束が 300 kW/m² という猛烈な数値になった後、30 kW/m² 以下の比較的弱い熱流束の状態が数十分継続したことが報告されている。大規模火災では、火災最盛期の消火および残火処理活動で長時間の活動を強いられることが想定され、本研究で用いた「比較的弱い」熱流束環境における検証結果は、消火活動にあたる消防隊員の熱傷発生危険の回避にも役立つと考える。

現在の防火服の耐炎・耐熱性能は生地が乾燥した状態で試験されているが、生地各層の間に存在する空気は良い断熱材である。これと比較して湿潤状態では生地各層間に水や水蒸気が存在することから、熱の伝わりが良くなることになる。ゆえに、防火服内における水の存在が潜在的に熱傷を促進させる危険があるかどうかについても検討が必要である。

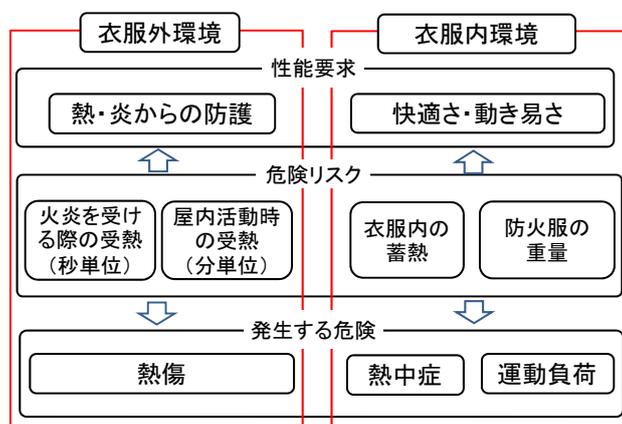


図2 防火服を取り巻く環境における危険リスクと性能要求

3. 防火服内衣服の水濡れが引き起こす熱傷危険の検証実験

本試験では、火災発生建物へ屋内進入を実施する消防隊員がさらされる際に防火服が受ける熱（ 12 kW/m^2 , 14 kW/m^2 , 17 kW/m^2 , 20 kW/m^2 、木材が口火着火する程度³⁾）条件に対して、熱傷を受けるまでの時間、温度上昇速度を測定した。熱流束と温度は一致しないが、生地表面温度としての目安は約 200°C ～約 280°C である。実験条件は、活動時に想定される着用を考慮し、活動服・下着の乾燥・湿潤の条件をそれぞれ設定したものを防火服生地と重ねて実験を実施した。

3.1 実験装置

図3は、本実験で使用した装置である。本装置は、加熱源、遮蔽シャッター、サンプルホルダから成り立つ。加熱源は電熱ヒータとし、Schmidt-Boelter 型熱流束計（Medtherm 社製）を使用し出力調節器で試験生地表面が受ける熱流束を調整した。

試験生地は図4に示すとおり、生地をたるまない様に鋼製フレームで引張固定した。生地を介して伝わった熱は ISO9151 試験装置にて使用される銅製ディスク熱量計（以下、熱センサ）を使用し、熱センサ表面における温度上昇を計測した。

3.2 実験方法

3.2.1 生地寸法、生地の重ね方、及び生地毎の空間の設定

試料生地は現在、日本で使用されている防火服、活動服、綿下着を、表地（主としてアラミド繊維）、透湿防水層（主として PTFE 膜）、遮熱層（主としてアラミド繊維）、活動服（主としてアラミド繊維）、下着（綿 100%）をそれぞれ $15\text{cm} \times 15\text{cm}$ の大きさに切断して重ね合わせた。

使用される生地の重ね方は、衣服内の空気層が部位や姿勢によってばらつくことを考慮し、以前に消防研究センターにおいて実施した着衣時における各服間の三次元計測の結果を基に防火服、活動服、下着、皮膚（熱センサ）において生じる空間（空気層）の厚みを図5のように決定した。

3.2.2 活動服・下着の乾燥・湿潤条件

実験で使用した生地の吸水条件を図5に示した。衣服内が十分に濡れたことをシナリオ想定し、活動服生地と下着は水分を十分含ませ、軽く絞った。同時に各服に使用されている生地毎の重量測定も実施した。平均吸水率は活動服及び下着それぞれ 100%及び 257%であった。

3.3 評価項目

ISO 9151 における防火服生地の熱伝達性試験の評価指標である熱伝達係数(Heat Transfer Index、以下 HTI)を利用し、

①初期温度から 24°C 上昇に必要な時間（秒）： HTI 24

意味：皮膚が II 度熱傷を発生するまでの温度上昇に費やした時間

②初期温度から 12°C 上昇に必要な時間（秒）： HTI 12

意味：皮膚が痛みを感じるまでに費やした時間

③ 12°C 上昇後 24°C 上昇に必要な時間（秒）： HTI 24－HTI 12

意味：皮膚が痛みを感じた後、II 度熱傷するまでに費やした時間

④温度上昇速度（ $^\circ\text{C}/\text{秒}$ ）： dT/dt

意味：防火服内における熱伝達（主として熱伝導）の速さに着目し、解析を実施した。

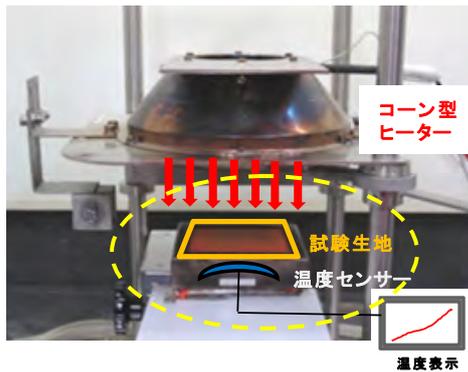


図3 防火服生地加熱装置

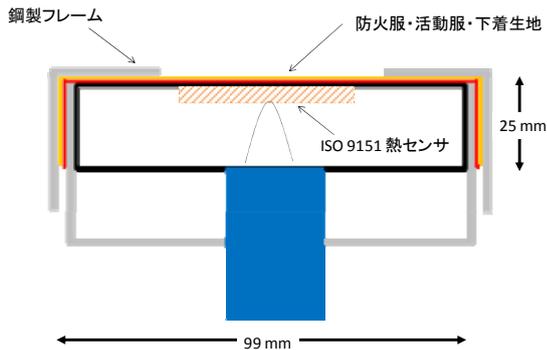


図4 防火服生地試験体断面図
(図3破線部拡大)

	下着乾燥 (Dry)	下着湿潤 (Wet)
活動服乾燥 (Dry)	<p>火炎・熱 ↓↓↓↓↓↓↓↓↓</p> <p>防火服積層生地</p> <p>空気層</p> <p>活動服生地 (乾燥)</p> <p>空気層</p> <p>下着 (乾燥)</p> <p>空気層</p> <p>皮膚</p>	<p>火炎・熱 ↓↓↓↓↓↓↓↓↓</p> <p>防火服積層生地</p> <p>空気層</p> <p>活動服生地 (乾燥)</p> <p>空気+水蒸気層</p> <p>下着 (湿潤)</p> <p>空気+水蒸気層</p> <p>皮膚</p>
	空気層：生地－生地 2mm、生地－皮膚 1mm	空気層：生地－生地 2mm、生地－皮膚 1mm
活動服湿潤 (Wet)	<p>火炎・熱 ↓↓↓↓↓↓↓↓↓</p> <p>防火服積層生地</p> <p>空気+水蒸気層</p> <p>活動服生地 (湿潤)</p> <p>空気+水蒸気層</p> <p>下着 (乾燥)</p> <p>空気層</p> <p>皮膚</p>	<p>火炎・熱 ↓↓↓↓↓↓↓↓↓</p> <p>防火服積層生地</p> <p>空気+水蒸気層</p> <p>活動服生地 (湿潤)</p> <p>空気+水蒸気層</p> <p>下着 (湿潤)</p> <p>空気+水蒸気層</p> <p>皮膚</p>
	空気層：生地－生地 2mm、生地－皮膚 1mm	空気層：生地－生地 2mm、生地－皮膚 1mm

図5 各試験条件における生地及び生地の重ね合わせ方

3.4 実験結果

表1は、防火服生地が受ける熱の強さに対する各実験条件における熱伝達係数（HTI）の比較をしたもので、図6は活動服及び下着の乾湿条件ごとに3.3で示した評価方法①HTI24、②HTI12、③HTI24－HTI12をプロットしたものである。活動服が湿潤している（Wet）状態では、活動服が乾燥した（Dry）状態と比較して、熱センサへの熱伝達は速い結果となった。これは防火服の内部（活動服及び下着）に存在する水の影響によるものである。生地が乾燥している際には熱伝達は主として生地及び空気の熱伝導率に依存するが、生地が吸水すると生地及び空気に加えて水の熱伝導率が寄与することになる。水、空気の熱伝導率はそれぞれ $0.56 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ 、 $0.024 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ で、水は空気の約23倍の熱伝導率を持つ熱良導体である。つまり生地自身の熱伝導は等しいから、活動服や下着生地の繊維の間に包含される空気と水との熱伝導率の差及び繊維に吸収される水が防火服内部の熱伝導に影響を及ぼしている。

逆に、熱伝達の悪さ（耐熱性能）の観点から分析すると、活動服が乾燥（Dry）の条件が参考となる。II度熱傷に到達する時間（HTI24）に対して活動服（Dry、Wet）と下着（Dry、Wet）の組み合わせを比較すると、もっとも耐熱性能が優れているのは活動服 Dry と下着 Dry の組み合わせである。続いて活動服 Dry と下着 Wet の組み合わせである。この2条件について比較すると皮膚が痛みを感じるとみなす時間（HTI12）はわずかに下着 Dry の条件が短い。しかし、II度熱傷に到達する時間（HTI24）に対しては、明らかに下着 Dry の条件が長くなっている。HTI12からHTI24までの時間差が大きく広がったことは、下着層から皮膚にかけて空気と水の熱伝達の差が温度上昇に影響を与えたものと考えられる。

活動服の乾・湿に関わらず、 $12^{\circ}\text{C}\sim 24^{\circ}\text{C}$ の温度上昇に必要な時間が $0^{\circ}\text{C}\sim 12^{\circ}\text{C}$ 温度上昇に必要な時間と比較して短くなっている。図7は防火服生地が受ける熱の強さに対する防火服内における単位時間あたりの $0^{\circ}\text{C}\sim 12^{\circ}\text{C}$ 温度上昇及び $12^{\circ}\text{C}\sim 24^{\circ}\text{C}$ の温度上昇、すなわち温度上昇速度 dT/dt ($^{\circ}\text{C}/\text{s}$) の平均値の比較である。温度上昇速度は活動服の乾・湿に関わらず、それぞれが $12^{\circ}\text{C}\sim 24^{\circ}\text{C}$ の温度上昇と $0^{\circ}\text{C}\sim 12^{\circ}\text{C}$ の温度上昇に二つの領域にわけることができた。活動服が湿潤している際、各熱流束に対して $12^{\circ}\text{C}\sim 24^{\circ}\text{C}$ の温度上昇速度が $0^{\circ}\text{C}\sim 12^{\circ}\text{C}$ の温度上昇速度の約2倍になっていることがわかった。

$12^{\circ}\text{C}\sim 24^{\circ}\text{C}$ の温度上昇時における活動服が湿潤した際と乾燥した際を比較してみると、各熱流束に対して温度上昇速度は約1.5倍の増加が確認された。また、もし受けている熱流束が $10\text{kW}/\text{m}^2$ よりも低い範囲については、データを外挿して考えると本実験で得られた傾向になると考えられる。

図8は、防火服生地が受ける熱の強さが $20 \text{ kW}/\text{m}^2$ （表面温度約 280°C ）時の、温度上昇（左軸）及び温度上昇速度（右軸）の比較を示す。活動服が乾燥（Dry）及び湿潤（Wet）のそれぞれの条件において温度上昇速度は下着の条件に関わらず定性的に同じ傾向が見られた。また、実験開始後の温度上昇の立ち上がりを見てみると下着が乾燥（Dry）、下着が湿潤（Wet）と続いた。湿潤した下着は、防火服から各生地を介して伝わってきた熱を一時的に吸熱させていると考えられる。温度上昇速度は下着が乾燥（Dry）の条件と異なり、徐々に高くなっていく傾向が見られる。

活動服が乾燥（Dry）している際には温度上昇速度が約20秒前後よりほぼ一定になり、その後約40秒後に再度温度上昇速度が増加する。下着が乾燥（Dry）の条件において、温度上昇速

度が一定になったことは、下着の保温が機能し、一時的に生地を介して伝わっている熱は一定になっていたことを意味する。一方、活動服が湿潤（Wet）の際は、温度上昇速度は活動服が乾燥（Dry）した条件と異なり、一定値は現れず最大値まで増加する傾向が得られた。

最後に、本実験における熱強度に対しては、痛みを感じてから II 度熱傷を受けてしまうまでの時間が、防火服内部の服が濡れることにより短くなってしまふ。これは、可能な限り速く退避しないと軽度の熱傷で済まなくなる（より高い熱傷リスクを背負う）ことになることを示している。

表 1 各試験条件における熱伝達係数（HTI）測定結果

熱流束 (kW/m ²)	12				14				17				20			
活動服	Dry		Wet													
下着	Dry	Wet														
HTI24 (s)	121	114	83	88	105	102	72	84	92	91	65	72	74	75	54	65
HTI12 (s)	68	69	55	60	59	64	49	59	53	58	44	51	47	51	38	47
HTI24-HTI12 (s)	53	45	28	28	46	38	23	25	39	33	21	21	27	24	16	18

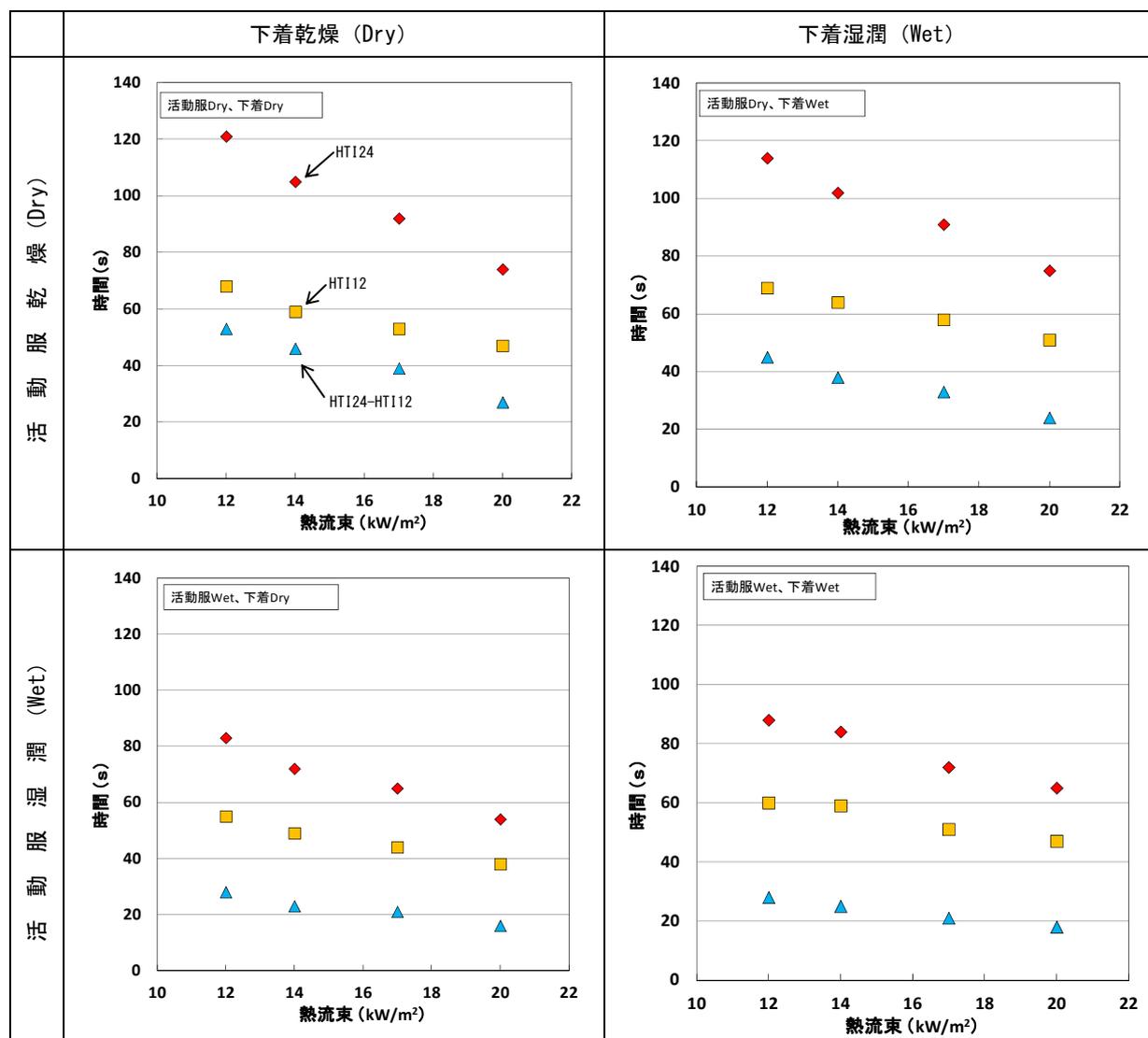


図6 防火服生地が受ける熱の強さ（熱流束）に対する各実験条件における熱伝達係数（HTI）の比較。生地乾燥・湿潤に対する整理。

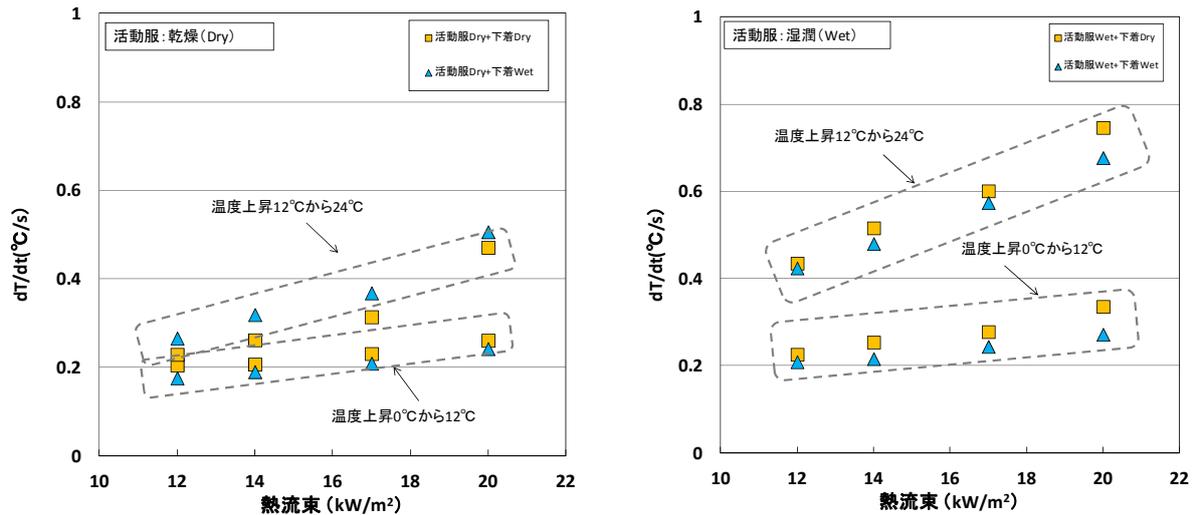


図7 防火服生地が受ける熱の強さ（熱流束）に対する防火服内における温度上昇速度の比較。生地乾燥・湿潤に対する整理。

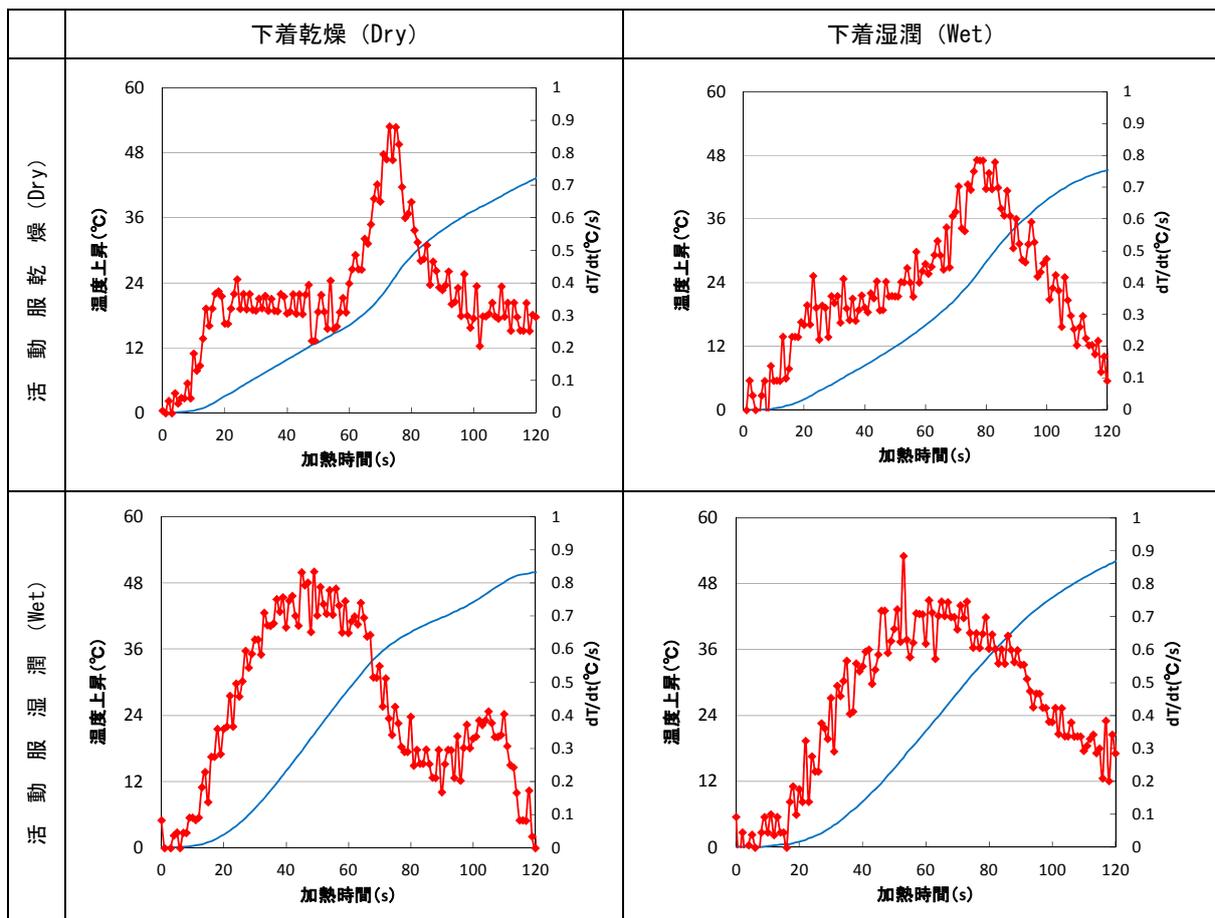


図8 防火服生地が受ける熱の強さ（熱流束）が 20 kW/m^2 （表面温度約 280°C ）時の、温度上昇（左軸）及び温度上昇速度 dT/dt （右軸）の比較。生地乾燥・湿潤に対する整理。

4 まとめ

日本の防火服は一般的に表地（最外層）、透湿防水層（中間層）、断熱層（最内層）で構成される。消防隊員は、下着、活動服、防火服の重ね着をしており、防火服の耐熱設計は重ね着によって形成される空気層を利用し、受けた熱を皮膚に伝えない仕組みである。ただし、実際の防火服にはポケットや身体の部位によって着用している服の重ね方が異なり、一律に評価することは難しい。そのため、現在の防火服の耐熱試験は防火服の積層生地（表地、透湿防水層、遮熱層）にて実施し、性能を確認している。本実験ではすでに性能を確認している防火服生地に対して防火服内部の服の乾・湿の違いが各生地層間の熱伝導に及ぼす影響に関して評価を行った。消防活動の環境や着用状態も個々に異なるため、本報告が全ての火災事例に当てはまるわけではないことを付け加えておく。

活動服が湿潤している（Wet）状態では、活動服が乾燥した（Dry）状態と比較して、熱伝達は速い結果であった。生地が乾燥している際には熱伝導は主として生地及び空気の熱伝導率に寄与するが、生地が吸水すると生地及び水の熱伝導率が寄与することになる。水は空気の約 23 倍の熱伝導率を持つ熱良導体であるため、繊維間に包含される空気と水との熱伝導率の差及び繊維に吸収される水が防火服内部の熱伝導に影響を及ぼしている。

本研究で焦点を置いた、防火服内部の生地の吸水は、活動中における熱中症や運動負荷の問題にもつながる。熱防護性能と衣服内の快適・機能性は常に相反する性能の向上と追求であるが、本発表の内容が少しでも個人防火装備の性能や特徴について理解する助けとなり、消防隊員の安全な消防活動につながればと考える。

参考文献

1. 総務省ホームページ、フォトギャラリー：緊急消防援助隊の活動
http://www.soumu.go.jp/photo_gallery/1101.html
2. 吉岡、鈴木、林、木造 3 階建て学校実大火災実験における建物外部の状況, 火災, 320(Vol. 62 No. 5), p.20-25, 2012
3. J. R., Lawson, Fire Facts, NIST Special Publication 1102, National Institute of Standards and Technology, August 2009, <http://nvl.nist.gov/pub/nistpubs/sp/2009/sp1102.pdf>

津波浸水域用の消防車両開発

消防研究センター 久保田勝明

1

背景

東日本大震災
3.11の夜中
津波滞留水域内
仙台中野小学校
近隣で大規模火災

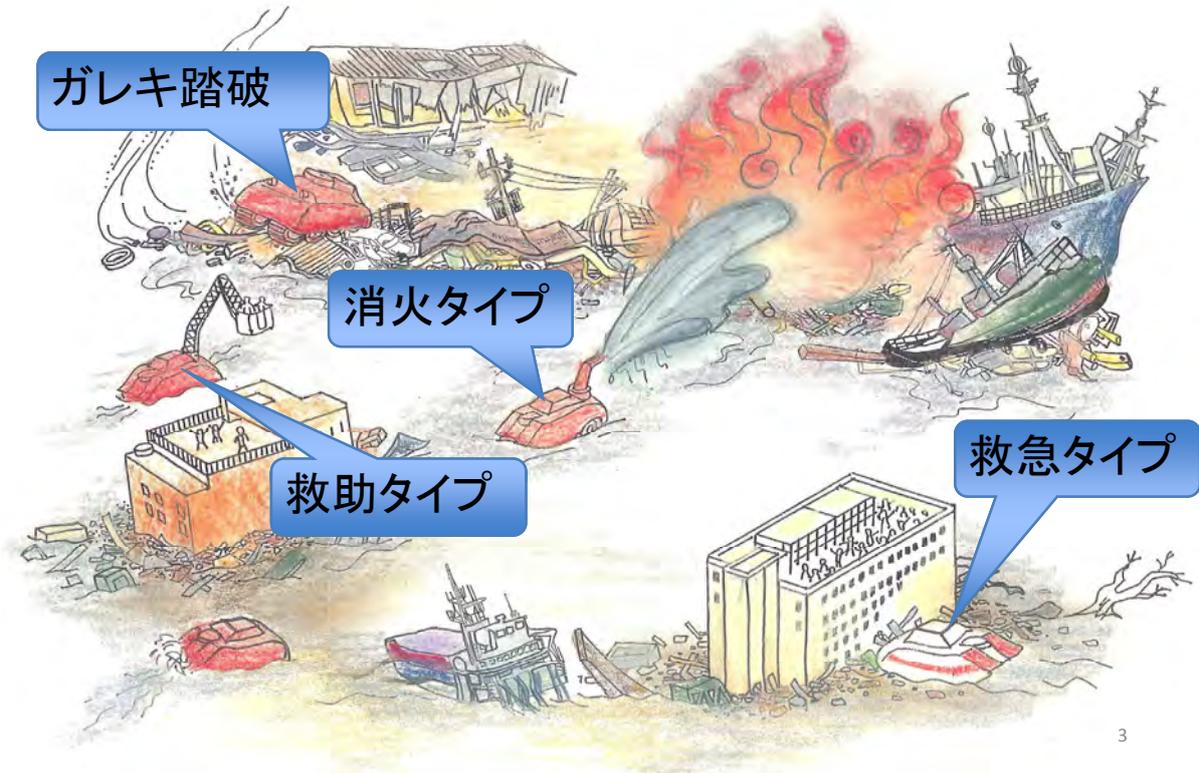
救助要請

津波滞留域のため消防車両進入不可、
ヘリも近づけず 救助困難であった



2

津波浸水域用の消防車両開発



3

平成 25 年度科学技術重要施策アクションプランの 対象施策について

－ 社会的課題の解決に向けた科学技術最重点施策 －

アクションプランとは
我が国が直面している重要課題の達成に向け最優先で進めるべき重点的取組等を明示

平成 24 年 9 月 13 日
科学技術政策担当大臣
総合科学技術会議有識者議員

政策課題	重点的取組	施策番号	施策名 【事業名】	施策概要	実施期間
命・健康を、災害から守る	④ 災害現場からの迅速な被災者救命救助	5	消防活動の安全確保のための技術に関する研究開発	津波現場にいる生存者を発見し、速やかに救出するために、無人ヘリ等による偵察技術と監視技術の開発、水やガレキが滞留している領域でも消防活動を可能とする消防車両の発達技術と救助技術の開発を行う。 平成27年度まで、技術開発、プロトタイプによる運用試験を繰返、運用方法を確立する。 【3年以内に実用化】	H23-H27
	⑤ 被災者に対する迅速で的確な医療の提供と健康の維持	6	大規模災害時の医療の確保に関する研究 【厚生労働科学研究費補助金(災害医療基盤開発推進研究事業)】	災害発生時にDMATがより効果的に活動し、中長期の災害医療への連携が円滑になれば、住民の災害死を減少させることを目的に、東日本大震災において防ぎえた可能性のある災害死の実態を把握し、急性期～中長期にわたる災害医療の対応の改善を図る。 東日本大震災で死亡した全犠牲者を対象とし、その実態についてさらなる医学的観点からの検証を行う等により、その知見等を各種マニュアルの作成やDMAT研修内容の改善等に反映し、全国にわたる災害医療体制の改善につなげる。 平成25年度中にマニュアルや研修の改善内容をまとめ、平成26年度にはそれらの周知を図る。 【2年以内に実用化】	H24-H25
	7	東日本大震災における被災者の健康状態等及び大規模災害時の健康支援に関する研究 【厚生労働科学研究費補助金(成育疾患克服等次世代育成基盤研究事業の一部、認知症予防総合研究事業の一部、長寿科学総合研究事業の一部、健康安全・危機管理対策総合研究事業の一部)】	東日本大震災の被災者の健康状態等を継続的に把握し、必要に応じて専門的なケアにつなげるとともに、今後の支援体制や将来の大規模災害発生時の保健活動の在り方について、明らかにする。特に、特別な配慮が必要な母子や高齢者(認知症患者)については、適切な支援等を行うための指針等を作成する。 平成25年度までに産産期・小児保健医療、母子保健活動について、26年度までに高齢者(認知症患者)に対する支援について、指針等をとりまとめる。また33年度まで長期的なフォローアップ調査を行い、被災者の健康状態と被災によりおかれた環境等との関係を検証する。 【一部2年以内に実用化】	H23-H33	

P7

科学技術重点施策アクションプラン

■政策課題

命・健康を、災害から守る

■重点的取組

災害現場からのより確実な人命救助

施策概要

津波現場にいる生存者を発見し、速やかに救出するために、無人ヘリ等による偵察技術と監視技術の開発、水やガレキが滞留している領域でも消防活動を可能とする消防車両の踏破技術と救助技術の開発を行う。

平成27年度までに、技術開発、プロトタイプによる運用試験を終え、運用方法を確立する。【5年以内に実用化】

5

消防本部へのヒアリング

被災地消防 仙台市消防局、塩釜地区消防事務組合
緊急消防援助隊 横浜市消防局(派遣先 仙台市)
新潟市消防局(派遣先 石巻市)

救助活動概要 発災直後(3. 11~12朝)

- ・瓦礫が水に浮いていて帯状
- ・滞留水域での救助ボート(アルミ、ゴム)、ジェットスキー等を使用
- ・見える範囲の水につかっている要救助者を最優先で救助(ゴムボート)
- ・避難ビル等の緊急に救助する必要が無い場合は後回し
- ・ゴムボートは破れた
- ・隊員が瓦礫で負傷
- ・活動に非常に体力を使った



消防本部からの要望

- ・水上瓦礫を乗り越えるもしくは啓開する性能
- ・啓開すれば後はどんな車両でも活動可能
- ・瓦礫にはまっても人力で引っ張り出せるように小さいもの、小回りが利くもの
- ・普段でも使えるもの
- ・メンテナンスが容易なもの（特殊車両はメンテナンスに費用がかかる）
- ・運搬が容易なもの
- ・職員の安全も考慮してほしい

等

7

水陸両用車



8

研究のポイント

走破性(水上、陸上)
救助
消火
救急搬送

9





ガレキ走破性
(水上)







長周期地震動と石油タンクのスロッシングに関する幾つかのこと

消防研究センター 座間信作

1. はじめに

前回の防災講演会¹⁾では、2011年東北地方太平洋沖地震による石油タンクのスロッシング被害の概要、2003年十勝沖地震を受けて実施された長周期帯域の設計地震動の見直し・浮き屋根の浮き性能の基準化・補強等の対策の検証、新潟地区の長周期地震動の空間変動について報告した。それらについて簡単に纏めると、

- ①浮き屋根耐震基準該当（適合済）屋外タンク貯蔵所（シングルデッキ）での被害は4基に認められたが、その程度は軽微であった。
- ②未適合タンク5基で大きな被害（浮き屋根沈没、ポンツーン溶接部の割れ、油漏洩など）が認められた。
- ③酒田ではアルミ製内部浮き蓋のデッキスキン、フロートチューブの破断が認められた。当該タンクのスロッシング固有周期における速度応答値が約200cm/sと極めて強いこと、被災タンクの内径が15.508mと小さいこと、フロートチューブの長さが6.72mと長いことから、フロートチューブに対して許容を超える歪みとなり破断に至ったものと推定された²⁾。
- ④川崎で認められた浮き屋根の沈没については、ポンツーン2室破損時における浮力が浮き屋根の重量に対して不足していること等の分析がなされた²⁾。
- ⑤コンビナート地区及びその周辺での長周期地震動の強さは告示での規定値をほぼ下回っていた。
- ⑥新発田地区で測定されたスロッシング最大波高から、高々2km程度離れていても長周期地震動は50%程度変わりうる事が推察された。

ここでは、上記④に関し、その後の調査で判明したポンツーンの一部破断に係る定量的検討、⑥について、東北地方太平洋沖地震の震源域で発生した余震の強震記録に基づく検証、および東京を対象とした東北地方太平洋沖地震での長周期地震動の経験的予測に関する検証等について報告する。

2. ポンツーンの強度に関する検討

川崎での浮き屋根の沈没は、地震の3日後の3月14日に確認されている(図1)。川崎市消防局によれば(私信)、タンク内の貯蔵油を他に移送したところ、浮き屋根の随所に变形が認められ、ポンツーンの開口部は全13室中8室で確認され、そのうち連続する3室が破損した側に浮き屋根が傾斜し、時間経過とともに沈没したものと考えられている。ここでは、当該事業所に近い(約1.7km)消防研究センター水江観測点の強震動データ(図2, 3)を用いて、ポンツーン破損の説明を試みる。

当該タンクは、直径38.74m、許可容量19,365kL、許可液面高さ16.429m、地震時液面高さ8.94m（スロッシング固有周期7.83秒）のシングルデッキ浮き屋根タンクである。このタンクは、容量2万kL未満ではあるが、告示第2条の2に規定する空間高さが2m以上となることから、H17年

総務省令第3号等に規定された浮き屋根の基準に適合させることが必要なタンクであったが、地震当時は未適合であった。



図1 浮き屋根が地震の3日後に沈没したタンク

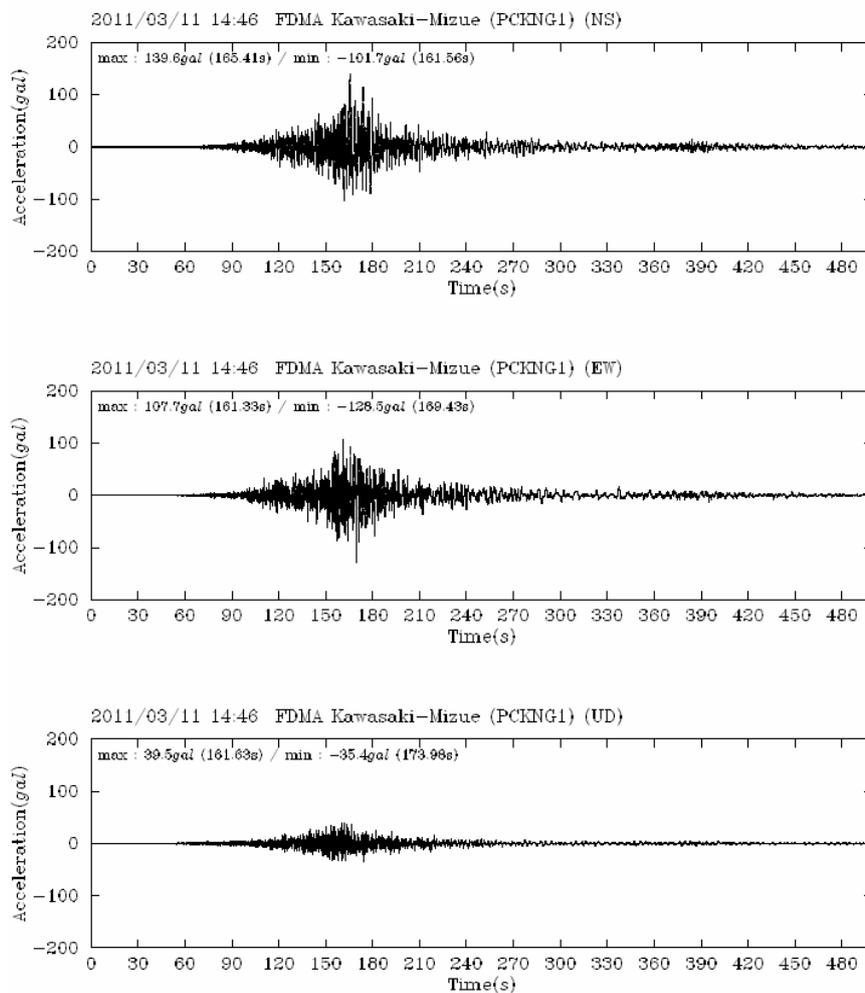


図2 川崎・水江(消防研究センター観測点)での加速度波形

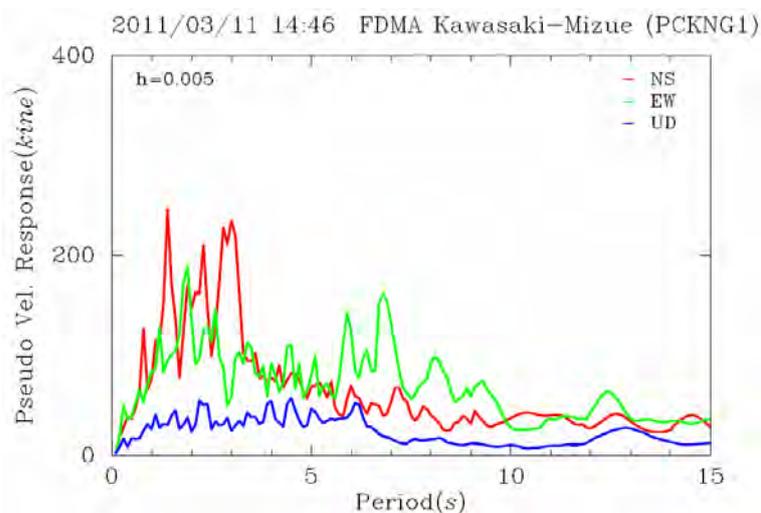


図3 川崎・水江(消防研究センター観測点)での0.5%減衰擬似速度応答スペクトル

図2の地震記録を入力とするスロッシング応答解析では、最大波高は1.3mで側板の油痕から測定された値(1.0m~1.5m)と整合する。当該タンクのポンツーンは全体で13室あり、1室辺りの周方向長さは9.3mと極めて長いことが特徴である。ポンツーン下部デッキには補強リングが周方向に一つ附置されており、それを有効として消防の技術基準に基づき浮き屋根構造評価を行ったところ、1次モード、2次モードの合成応力はポンツーン外リムで 57.4N/mm^2 、内リムで 44.2N/mm^2 となり、地震時許容応力 220.5N/mm^2 をはるかに下回る結果となった。

川崎市消防局(私信)によれば、破損ポンツーンの補強リングが下部デッキから外れていることが確認されている。そこで、補強リングを無効として同様の評価を行うと、外リムでの合成応力は 128.4N/mm^2 となり、約2倍の応力となったものの、許容応力を上回ることはならず、ポンツーン破断を説明できない。今後の更なる検討を要するが、考えられることとしては以下が挙げられる。

- ① 入力地震動の問題：用いた地震記録は当該タンクに近い地点で得られたもので、スロッシング最大波高を概ね説明するものではあるものの、当該タンクへの入力地震動として用いることができるか否かの妥当性については検討の余地がある。因みに、K-NET川崎(約3.6km)の記録では速度応答スペクトル値は60kine程度で約2/3の入力となる。また、次節で示すように2km程度離れても50%程度入力地震動が異なることもありうる。深部地下構造の更なる調査、当該地での強震動比較観測の実施等が必要である。
- ② 3次モードの影響：浮き屋根強度評価においては、スロッシング2次モードまで考慮することとしているが、より高次モードまで考慮することが考えられる。当該タンクの3次モード固有周期は3.02秒であり、速度応答値は図3から約220kineと非常に強いものとなっているからである。3次モードの減衰定数をどうするか等の基本的な検討が必要となる。
- ③ 初期浮力の影響：当該タンクのポンツーン周方向長さが長く、初期浮力の影響を考慮する必要があるかもしれない。補強リングが有効である場合にはその影響はほとんどないが、液面揺動中に補強リングが外れた場合にはその影響は大きく、許容応力を上回ることの試

算がなされている（山内、私信）。液面揺動中のポンツーン破断に至るプロセスを考える必要があるかもしれない。

3. 長周期地震動の空間変動

図4に示す新潟新発田の石油コンビナート等特別防災区域の約2km離れた事業所（Niigata-E、W）において、2011年東北地方太平洋沖地震で励起された固有周期10.5秒付近での石油タンクのスロッシングの最大波高に、図5に示すような系統的な差異が認められた。消防研究センターがNiigata-Eの構内に設置した地震計(図4の■)の記録を用いて、3次モードまで考慮した2次元スロッシング応答解析を行ったところ、Niigata-E内のタンクのスロッシング波高をよく説明することができた一方で、Niigata-Wでは約50%過小評価する結果となった(図6)。この解釈として、高々2km離れていても、長周期地震動が約50%変動することが考えられた¹⁾。

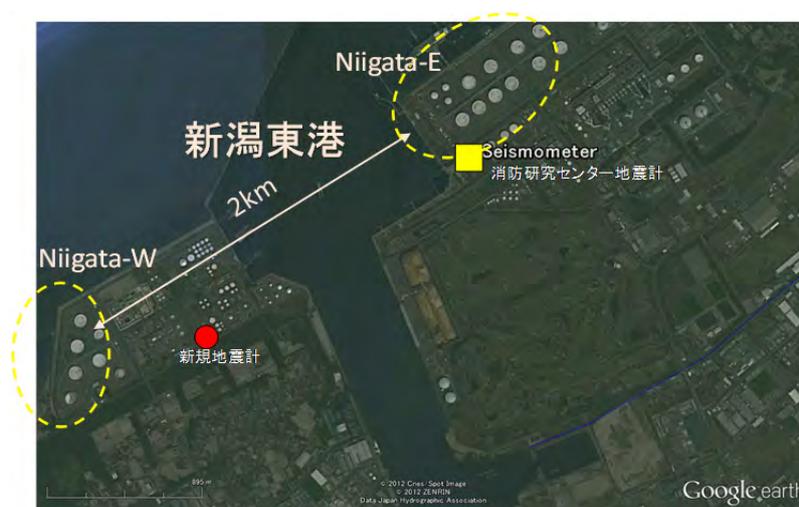


図4 新潟県新発田石油コンビナート特別防災区域

Niigata-E と Niigata-W との距離は東港を挟んで約2km、■は消防研究センター設置の地震計、●は新たに設置された地震計位置

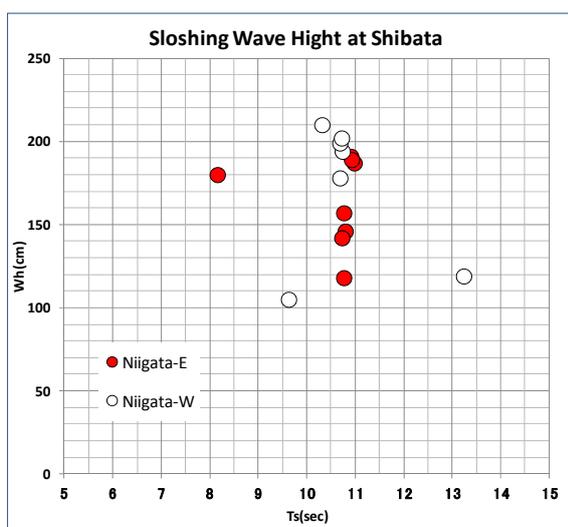


図5 スロッシング最大波高の計測値 (cm)
横軸はスロッシング固有周期

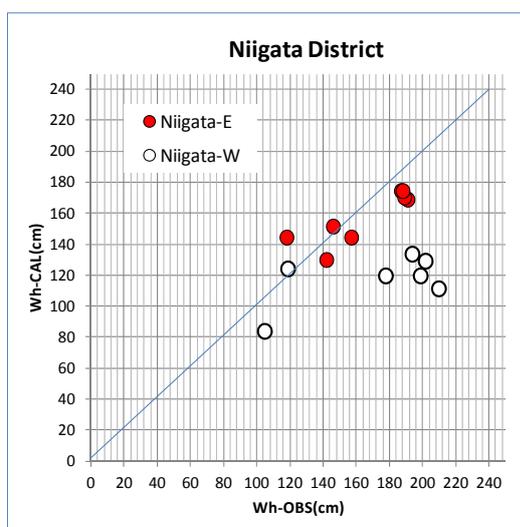


図6 スロッシング最大波高の観測 (Wh-OBS) と
2次元応答解析結果 (Wh-CAL) との比較

この推察の確認には、新たな地震計の設置による同時比較観測や地下構造の解明等が考えられるが、いずれもそれなりの費用がかかることから、検討できないままとなっていた。2012年8月末、上記2つの地区の間に位置する事業所が、スロッシング対策の一つとして地震計を設置した(図4中の●印)。ここでは、当該事業所のご厚意により提供を受けた地震動データを用いて、上記推察に関する検討を行う。

観測開始直後、10月2日7時22分頃、東北地方太平洋沖地震の余震域で、M6.3の地震（三陸沖（北緯39.8度、東経143.4度）、深さ10km）が発生した。そこでこの地震による長周期帯域の速度応答スペクトルを比較した(図7左)。これによれば、当該タンクのスロッシング固有周期である10.5秒付近では約20%、地震計新規設置地点の方が大きいことが分かる。従って、上述の推察とは調和的な結果となっている。更に、本原稿作成中の2012年12月7日には三陸沖でM7.4の地震が発生し（北緯39度50分、東経143度31分、深さ10km：暫定値）、両観測点で良好な記録が得られたことから、同様の解析を行うと図7(右)となり、この場合も東港の西側が大きいという同様の結果となった。従って西側のより大きいスロッシング最大波高は、対応する周期10.5秒付近の地震動が東側より強いということで説明される。ただし、このことは三陸沖を震源とする場合であって、他震源域にあっては成立するか不明であり、今後とも観測を継続実施することが必要である。

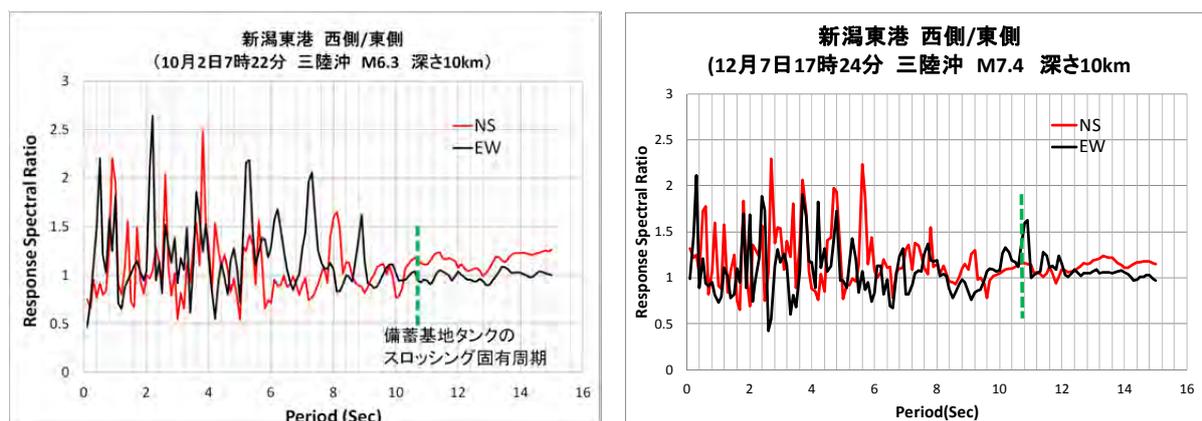


図7 2012年10月2日三陸沖の地震(M6.3)及び12月7日三陸沖の地震(M7.4)でのNiigata-E(東側)に対する地震計新設地(西側)の速度応答スペクトル比

このような非常に狭い範囲での空間変動に加え、広域の伝播特性も興味あるところである。我が国では1995年兵庫県南部地震以降、K-NET等の稠密な強震観測網が整備されたことから、Mw9という巨大地震の震源域からのやや長周期の波動の変化を検討できる。

図8は、東北地方太平洋岸から東京湾岸に至るK-NET観測点での記録に基づく周期8秒の速度応答波形を、時刻を揃えて並べたものである。なお、各波形の振幅はそれぞれの最大振幅で基準化してある。この図から、大凡宮城県から北側では2つの波群、南側では1つの波群の伝播が認められ。更に関東平野内部に入り東京湾に至る測線では、後続の位相が大きく発達し継続時間が長くなっている。更に、周期4, 6, 8秒の速度応答スペクトル値をプロットすると、距離とともに減衰するという一般的に短周期地震動で見られる特徴は持たず、震源からの距離の大きな関東平野、東京湾岸で大きくなっていることが分かる(図8右側)。長周期地震動については、このように地域・周期によって異なった特徴を示すことをよく理解しておく必要がある。

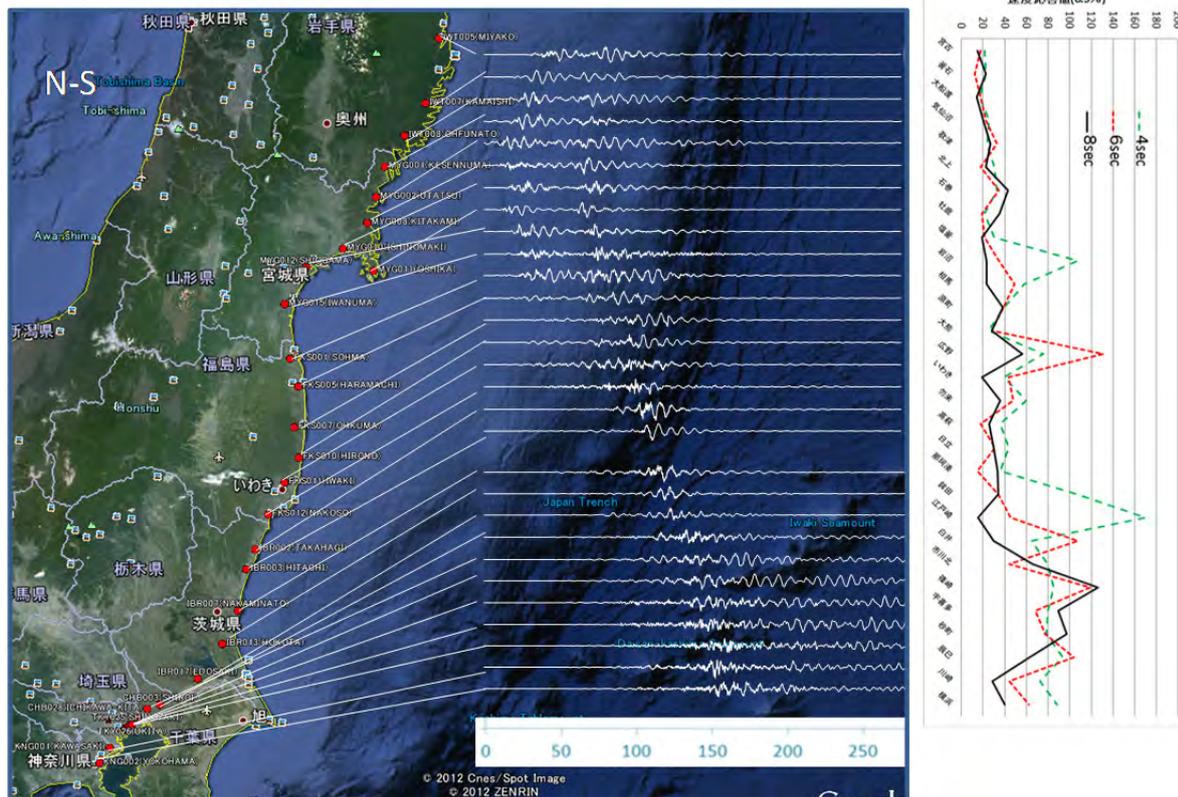


図8 太平洋岸から東京湾岸までの周期8秒の速度応答波形（左）と周期4秒、6秒、8秒の各地点での最大応答値（右）

4. 東京での長周期地震動の経験的予測に関する検証

4.1 長周期地震の経験的予測手法

Kudo(1989)³⁾は、長周期地震動が主に表面波からなるとし、簡単のため Love 波に対するスペクトルの簡易式を式(1)で与えた。

$$F_c(T) = 4.8 \cdot 10^{0.5M-2} \exp(-\alpha(T) \cdot r) / r^{0.5} \quad (T \leq T_c) \quad (1)$$

$$\log \alpha(T) = 9.11 / T - 4.26 \quad (2)$$

ここで、M は気象庁マグニチュード、r は震央距離、T は周期、また T_c はコーナー周期で、次式で与えられるとされた。

$$\log T_c = 0.5M - 2.42 \quad (3)$$

また、(1)式の導出においては、Savege(1972)の震源モデル⁴⁾を仮定し、かつ Love 波に関する正規モード解⁵⁾を用いるとともに、以下の経験式を用いている。

$$\log M_0 = 1.5M + 16 \quad (4)$$

$$\log \tau = 0.5M - 3.2 \quad (5)$$

$$\log L = 0.5M - 1.8 \quad (6)$$

ここで、M₀、τ、L はそれぞれ地震モーメント、食い違いの立ち上がり時間、断層長さである。

この方法に基づき、座間(1999)⁶⁾は東北日本太平洋沖で起こった過去の大地震に対して予測したところ、殆どの場合過小評価する事が分かった。そこで、上式等について検討を行った結果、M と地震モーメント (M₀)との関係が M ≥ 7 で大きく変わること、式(1)の長周期側の落ち込みを

規定するカットオフ周期（ T_c ）と M との関係が観測スペクトル上では成り立たないことがその原因であることを示した。更に、地震断層パラメータと M との関係についての新たな知見^{7,8)}に基づき、座間(2000)⁹⁾ はこれらの関係を取り込んだ経験式を以下のように導出した。

海溝型地震に対するスペクトルは、 $T \leq T_c$ において、

$$F_c(T) = 4.8 \cdot 10^{0.5M-1.5} \exp(-\alpha(T) \cdot r) / r^{0.5} \quad (M \geq 6.9) \quad (7)$$

$$F_c(T) = 4.8 \cdot 10^{1.25M-6.7} \exp(-\alpha(T) \cdot r) / r^{0.5} \quad (6.2 \leq M < 6.9) \quad (8)$$

$$F_c(T) = 4.8 \cdot 10^{0.5M-2.1} \exp(-\alpha(T) \cdot r) / r^{0.5} \quad (M < 6.2) \quad (9)$$

内陸地震に対しては、

$$F_c(T) = 4.8 \cdot 10^{0.5M-2} \exp(-\alpha(T) \cdot r) / r^{0.5} \quad (M \geq 6.8) \quad (10)$$

$$F_c(T) = 4.8 \cdot 10^{0.6M-2.76} \exp(-\alpha(T) \cdot r) / r^{0.5} \quad (6.4 \leq M < 6.8) \quad (11)$$

$$F_c(T) = 4.8 \cdot 10^{0.9M-4.68} \exp(-\alpha(T) \cdot r) / r^{0.5} \quad (M < 6.4) \quad (12)$$

なお、減衰係数 $\alpha(T)$ については、周期にかかわらず平均的な値として掲げられている 0.001 km^{-1} ³⁾ を、 $T > T_c$ に対しては、各々の式に $(T_c/T)^2$ を乗ずるとした。この T_c については、苫小牧地域のやや長周期地震動特性が、地下構造の影響よりも入射波動場で主に支配されるという結果¹⁰⁾に基づいて、東北日本の太平洋側の地震の観測スペクトルから読みとったみかけの T_c と M との関係

$$\log T_c = 0.046M + 0.561 \quad (13)$$

を用いることとしたが、 T_c の評価は大きな地震の予測には極めて重要であり、なお検討の余地のあるものであった。

4.2 東北地方太平洋沖地震の東京での予測

過去に東北地方太平洋沖で発生した地震の東京での地震記録から求まるスペクトルと(7)～(9)式との比の平均を $R(T)$ とすると、この地域に発生する海溝型地震 ($M \geq 6.9$) に対しては次式で予測ができる。

$$F(T) = R(T) \cdot 4.8 \cdot 10^{0.5M-1.5} \exp(-\alpha \cdot r) / r^{0.5} \quad \alpha = 0.001 \text{ km}^{-1} \quad (14)$$

$R(T)$ については、東北地方太平洋沖を震源とする地震の1930年～1987年に東京(大手町)で観測された気象庁一倍強震計記録等から求めた。

図9に、2011年東北地方太平洋沖地震のM9.0、震央距離を(14)式に代入して得られる東京での予測スペクトルと観測値との比較を示す。(14)式は遠方近似であり、点震源を仮定しているが、周期7秒付近及び周期10秒以上を除けば観測値は大凡予測値 $\pm \sigma$ に収まっている。周期7秒付近の過小評価については今後検討が必要である。周期10秒以上での観測値とのかい離については、(13)式で示した T_c が正しく設定されていないことが示唆されるため、次節で検討する。

4.3 震源スペクトルのスケージング則に関する検討

震源スペクトル（ここでは加速度フーリエスペクトル～低減衰速度応答スペクトル）が ω^{-2} モデルに従うとすると、それを規定する①長周期帯域のフラットなレベルと②周期の2乗に逆比例して落ち始めるカットオフ周期 T_c が重要である。①については、マクロ的には地震モーメント、立ち上がり時間、断層長さ $\times M$ との経験則を考慮して得られた(14)式から理解できるように、 $10^{0.5M}$ に比例することが期待される。

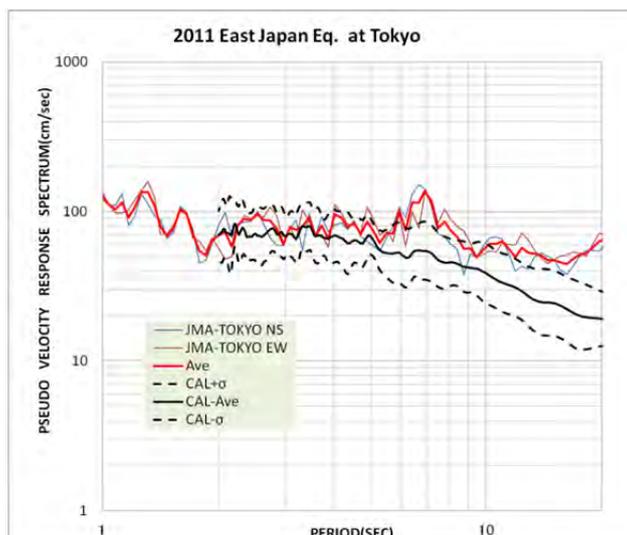


図9 観測スペクトル（JMA 東京）と予測との比較
破線は予測の平均±σ

そこで、今回の震源域とその周辺で発生したMの異なるこれら3つの大きな地震（1933年三陸地震、1978年宮城県沖地震、2011年東北地方太平洋沖地震）の東京大手町の記録を取り上げる（図10）。伝播経路の影響を小さくして、この関係を見るために、各地震間のスペクトル比（2011/1978、1933/1978、2011/1933）をとって比較した（図11）。なお、1933年三陸地震のMについては、7.9（風神・他、2003）¹¹⁾、8.1（気象庁）、8.4（Kanamori, 1977）¹²⁾があるのでそれぞれ示してある。これによれば、2011/1978は周期3から6秒付近でMの違いから期待される比率（6.3）でほぼ近似できる。2011/1933および1933/1978については、周期数秒では1933年三陸地震のMを7.9とした場合が最も観測スペクトル比に近い。

②のカットオフ周期については、各スペクトル比が周期の2乗で増大し始める周期を T_c （みかけ）とすると、

$$\log T_c = 0.5M - 2.96 \quad (15)$$

この値は従来の関係式と比べて小さな T_c を与えるので、予測精度に与える影響が大きいと思われる。因みに、式(3)、(13)および上述の T_c を用いた時の式(14)を用いた時のM7.4、M9.0地震の予測スペクトルの比を求めると、図12となって T_c 以上の周期では前2者は実際とは大きくかい離することが分かる。ただし、ここでの議論は、東北地方太平洋沖を震源とする大地震のみかけの T_c についてであり、マグニチュードが7程度より小さな地震、他の震源域の地震、他観測点で成り立つか不明であり、今後の継続的検討が望まれる。

5. 緊急地震速報を用いた石油タンクのスロッシング評価システム

石油タンクのスロッシング被害の軽減を図るための方策としては、浮屋根の耐震強度向上等の予防的方法と併せ、応急対応を効率的に行うことによって、被害を極小化することが考えられる。実際、1983年日本海中部地震直後に出された通達¹³⁾では、「自衛消防体制の整備、消火設備の維持管理の一層の徹底を図る。本震による出火がない場合でも余震に備えて消火設備の起動試験、化学消防自動車の出動準備等の措置をとる。地震によっては溢流が避けられないことがあること

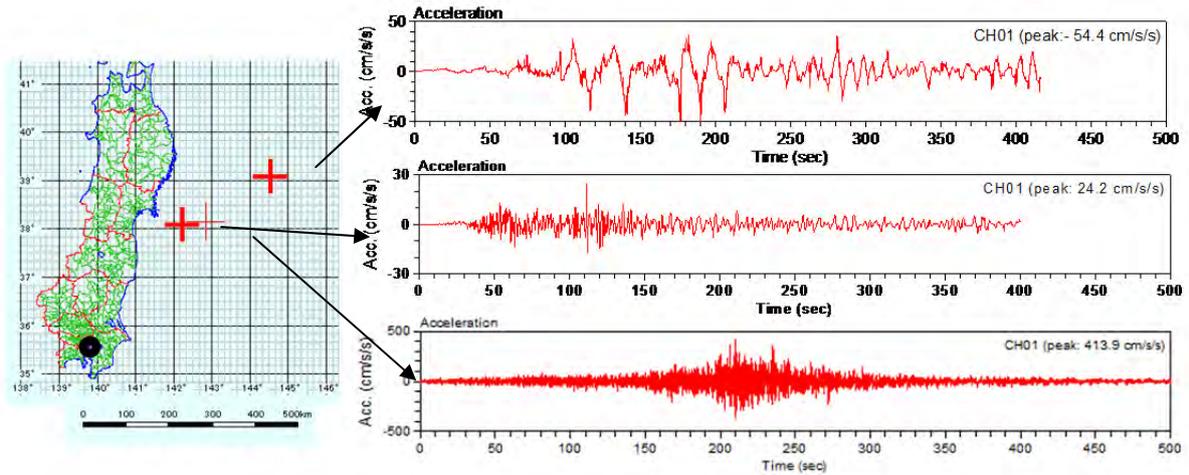


図 10 1933 年三陸地震(上段)、1978 年宮城県沖地震(中段)、2011 年東北地方太平洋沖地震(下段)の東京(大手町)での加速度記録

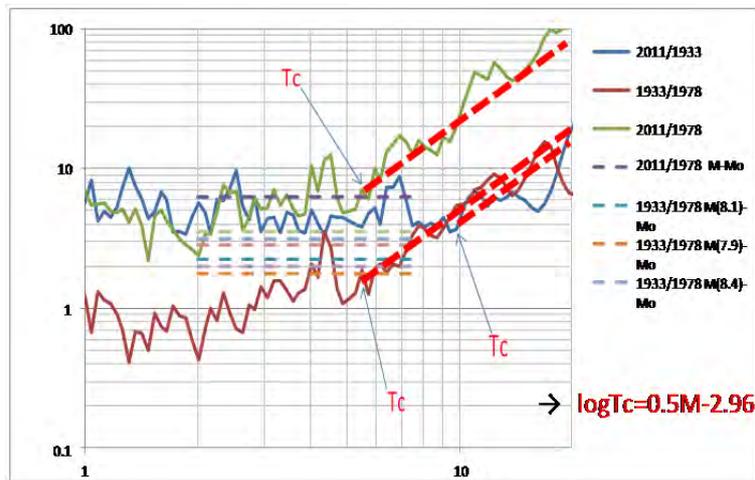


図 11 1933 年三陸地震、1978 年宮城県沖地震、2011 年東北地方太平洋沖地震間のスペクトル比と式 (14) に基づくスペクトル比
太破線はカットオフ周期以上の周期での各スペクトル比を T^2 で近似したもの

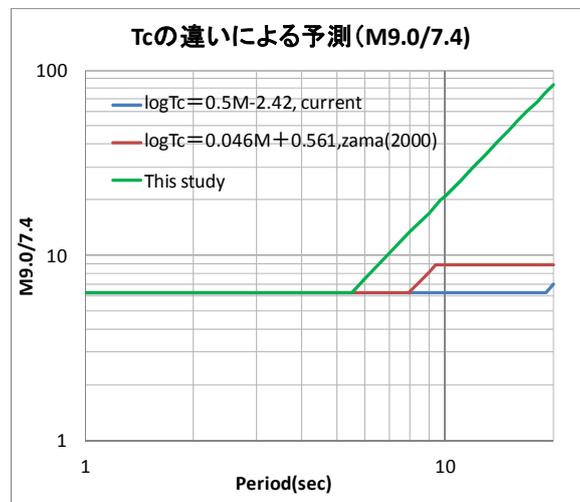


図 12 M7.4 地震と M9.0 地震に対する T_c の定義の違いによる予測スペクトル

から、引火防止、溢流危険物の拡散防止等を図るための可燃性蒸気の濃度測定、泡放射による流出油面の被覆、土嚢積み等の措置を直ちに講ずること」が挙げられている。2003年十勝沖地震後においては、「効率的なパトロールの実施、職員の非常参集、人員、資器材の効率的運用等」も掲げられた¹⁴⁾。

このような措置をできるだけ迅速・的確に行うためには、まず地震直後にどのタンクでどのような被害が発生し得るのかを即時的に判断し、それに基づいた効率的な点検、対応を行うことが重要である。この目的のために、地震動観測記録に基づくリアルタイムシステムが構築されてきている^{15,16)}。しかし、地震記録が得られた後での情報周知には通信の輻輳による遅延が考えられる。より確実な周知のためには、大地震直後に懸念される通信の輻輳が始まる前のより早い段階で情報受発信できることが望ましいことから、2007年から運用が開始された緊急地震速報を用いたスロッシング評価システムを構築してきた¹⁷⁾。ここでは、東北地方太平洋沖地震を対象にその有用性に関する検証を行う。

5.1 石油タンクのスロッシングによる被害予測

スロッシングによる被害として2003年十勝沖地震で認められた2つのタンク火災のうち、最初の火災については、浮き屋根が大きく揺動し、側板トップよりも高い所に設置された観測小屋等の施設に衝突したことが原因とされている¹⁸⁾。従って、スロッシングの最大波高が重要な情報となる。最大波高 $\eta^{(1)}_{\max}$ は近似的に以下の速度応答スペクトル法で与えることができる。

$$\eta^{(1)}_{\max} = \frac{R}{g} \cdot 0.837 \cdot \frac{2\pi}{T_{s1}} S_v \quad (16)$$

$$T_{s1} = 2\pi \sqrt{\frac{R}{1.841g} \coth\left(\frac{1.841H_L}{R}\right)} \quad (17)$$

ここで、 S_v 、 T_{s1} 、 R 、 H_L 、 g はそれぞれ速度応答スペクトル、スロッシング1次固有周期、タンク半径、液高、重力加速度である。上式から分るように、最大波高の算出にはタンクの諸元（タンク直径、液高）と速度応答スペクトル S_v が与えられればよい。

2つ目のタンク火災は、大きな揺動により過大な力が浮き室(ポンツーン)に加わり、ポンツーンの一部が破断し、大量のナフサが浮き屋根上に流出したため、浮き屋根が沈没したことが遠因となっている¹⁸⁾。スロッシングによりポンツーンにかかる応力の算出については消防法¹⁹⁾に与えられている。ここでは紙数の関係から省略するが、ポンツーンに働く応力は、タンク諸元（ポンツーン諸元、タンク直径、液高）と速度応答スペクトル S_v が与えられれば算出でき、ポンツーンが損傷するか否かの判断が可能となる。

一方、忘れてならない被害として、内容液の溢流が挙げられる。特に最初の火災においては、溢流した原油がタンクヤード内で燃え、タンク付属の消火設備が焼損したため、その後の消火活動に多大な影響を及ぼした。溢流の有無は最大波高から判断できるが、問題はその量である。溢流量の算出については、西・他(2008)²⁰⁾が直径7.6m（容量約300kl）の浮き屋根式の大規模模型タンクを用いて実験式を導出し、1964年新潟地震等での実際の溢流量との比較を行い、その妥当性を示している。この実験式も速度応答スペクトル S_v が与えられれば算出できる。

従って、スロッシング最大波高、ポンツーン被害、溢流量の予測に関しては、速度応答スペクトル S_v を予測できればよいことになる。

5.2 システム化

前述の長周期地震動の経験的予測手法、5.1 で示したスロッシング被害予測手法およびインターネット配信された緊急地震速報を用いて、種々の演算を行った結果をメール配信できるシステムを市販の手のひらサイズの Linux サーバー（OpenBlockS 600）で構築し(図 13)、その適用性を検討した²¹⁾。このサーバーの CPU クロックは 600MHz、1 GB メモリを搭載しており、12 基のタンクを対象としたスペクトル評価、溢流危険度評価、浮き屋根損傷度評価を、地震情報の取得後 0.4 秒以下という短時間で行うことができる。危険度評価結果の表示例を図 14 に示す。



図 13 緊急地震速報に基づくスロッシング被害予測、配信システム²¹⁾

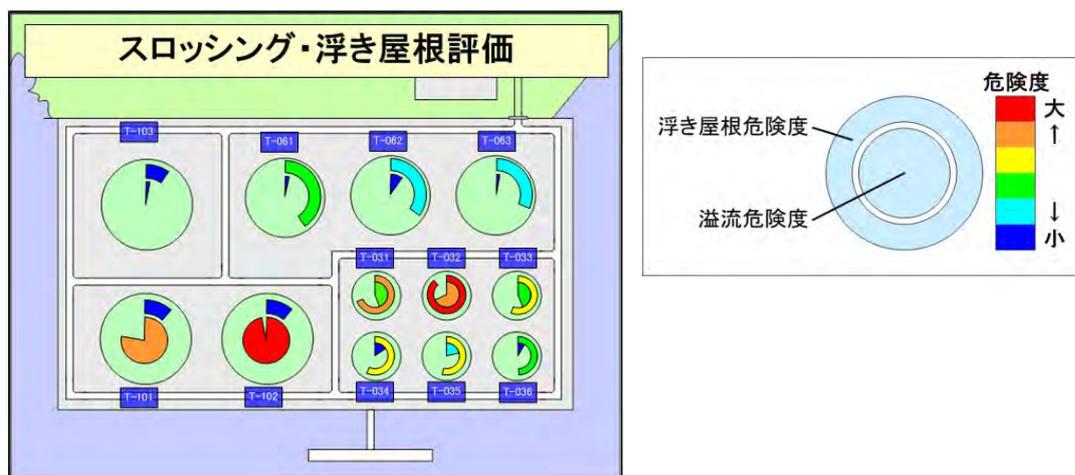


図 14 スロッシング被害予測の出力例²¹⁾

5.3 東北地方太平洋沖地震での検証

上記システムに対し、六ヶ所、男鹿、大分において受信された緊急地震速報の情報を入力し、システムの有用性についての検証を行った。緊急地震速報の最終報は地震発生の約 2 分後、14 時 48 分 37.0 秒に発表され、地震規模は M8.1 であった。震源位置と地震規模の情報を本システムに入力した結果を表 1 に示す。観測値と比較すると過小評価となつてはいるが、地震発生後極めて早い段階でおよそ（この場合は対応の必要性は低い）を把握することができるため、初動体制の確立に寄与できるものと期待される。

表1 六ヶ所、男鹿、大分での緊急地震速報を用いたスロッシング最大高さの予測と測定値²¹⁾

Site	Tank	Tank Size		Sloshing Height(cm)			PGA(Gal)		Δ(km)
	Cat.	D(m)	H(m)	Obs.	M=8.1	M=9.0	Hor.	UD	
Rokkasho	Ground	81.5	20.8	50	34	117	130.6	56.8	342
Oga	Ground	82.4	20.6	63	35	122	22.7	14.5	324
	In-Ground	90.0	48.0	76	45	156			
OOita	Ground	83.3	22.0	11	7	22	2.7	1.4	1145

6. おわりに

2011年東北地方太平洋沖地震による石油タンクのスロッシング被害の説明と長周期地震動特性の予測精度向上、緊急地震速報を用いたスロッシング被害予測システムについての検討結果を示した。特に、今後の発生が危惧されている南海トラフ沿いのM8クラスの地震でも今回の地震動以上になることも考えられる²²⁾ことから、今後の更なる地震動予測に関する検討とスロッシング対策の一層の充実が望まれる。

謝辞

本稿では、防災科学技術研究所のK-NETによる強震記録、(株)海洋運輸による強震観測データ、元地震研究所吉沢静代氏提供の1933年三陸地震、1978年宮城県沖地震の東京での数値化データを利用させて頂きました。また、川崎市消防局、JXエンジニアリング(株)山内芳彦氏には未発表の資料を提供して頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 座間信作：石油タンクのスロッシングによる被害、第15回消防防災講演会資料、pp.71-84(2012)
- 2) 消防庁：東日本大震災を踏まえた危険物施設等の地震・津波対策のあり方に係る検討会報告書(2011)
- 3) Kudo, K. :Significance of long-period strong Motion in seismic risk evaluation, Proc. 4th Int. Symp. on the Analysis of Seismicity and Seismic Risk., pp.433-439(1989)
- 4) Savage, J. C. : Relation of corner frequency to fault dimensions, J. Geophys. Res., 77, pp.3788-3795(1972)
- 5) Harkrider, D. G.: Surface waves in multi-layered elastic media, part 2., Bull. Seism. Soc. Am., 60, pp.1937-1987(1970)
- 6) 座間信作：東北日本東方沖の地震によるやや長周期地震動特性，消防研究所報告，88，pp.11-24(1999)
- 7) 武村雅之：日本列島およびその周辺地域に起こる浅発地震のマグニチュードと地震モーメントの関係，地震 2，43，pp.257-265(1990)
- 8) 武村雅之：日本列島における地殻内地震のスケーリング則，地震 2，51，pp.211-228, 1998
- 9) 座間信作：やや長周期帯域における加速度スペクトルの半経験的表現，消防研究所報告，89，pp.1-10(2000).
- 10) 座間信作：苫小牧におけるやや長周期地震動特性，消防研究所報告，86，pp.11-21(1998)
- 11) 風神朋枝，谷岡勇市郎，菊地正幸：日本海溝アウターライズで発生した1933年昭和三陸地震

の震源過程，地球惑星科学関連学会 2003 年合同大会、S052-003（2003）

12) Kanamori, H. : The Energy Release in Great Earthquakes, J. Geophys. Res. 82, pp.2981-2987 (1977)

13) 消防庁危険物規制課長通達；“危険物施設の地震対策について”，昭和 58 年 5 月 31 日 (1983).

14) 消防庁；“危険物の規制に関する規則の一部を改正する省令等の施行について”，消防危第 14 号 (2005)

15) 座間信作，畑山 健，吉田聖一，河野和間，関根和喜，丸山裕章；“石油備蓄基地のリアルタイム地震被害評価システムの構築”，圧力技術 40-3, pp.26-37 (2002).

16) 大保直人，加藤健治；“リアルタイムスロッシング評価システム”，大型タンクのスロッシングに関する耐震・制振・免震等技術のミニシンポジウム講演概要集，pp.15-18 (2005).

17) 大保直人，座間信作，佐藤正幸，高田史俊；“地震の震源情報を用いたタンクの安全評価システムの開発”，地域安全学会梗概集 No.26, pp.3-4 (2010)

18) 西 晴樹，横溝敏宏；出光興産（株）北海道製油所タンク火災に係る調査概要について（最終報告），消防研究所報告，100, pp.59-63 (2006)

19) 総務省消防庁；液面揺動に伴い浮き屋根に作用する荷重の算出方法の一部見直しについて、平成 18 年 6 月 30 日消防危第 157 号 (2006)

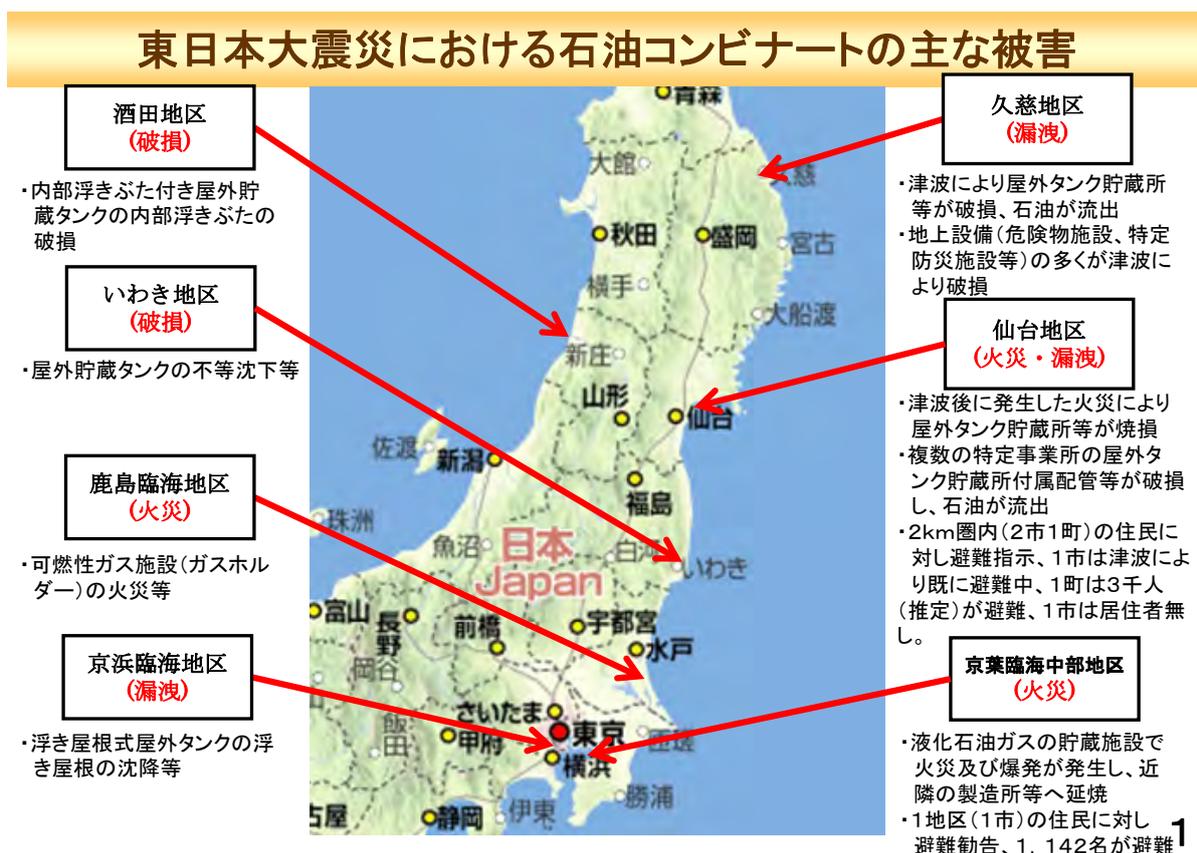
20) 西 晴樹，山田 實，座間信作，御子柴 正，箕輪親宏；“石油タンクのスロッシングによる溢流量の算定”，圧力技術，46, pp.276-284 (2008)

21) Ohbo, N., S. Zama, T. Tsuchida, F. Takada : Development and verification of tank damage evaluation system using Earthquake Early Warning information, 15th World Conf. Earth. Eng., WCEE2012_1198 (2012)

22) 太田外氣晴、座間信作；巨大地震と大規模構造物—長周期地震動による被害と対策—、共立出版 (2005)

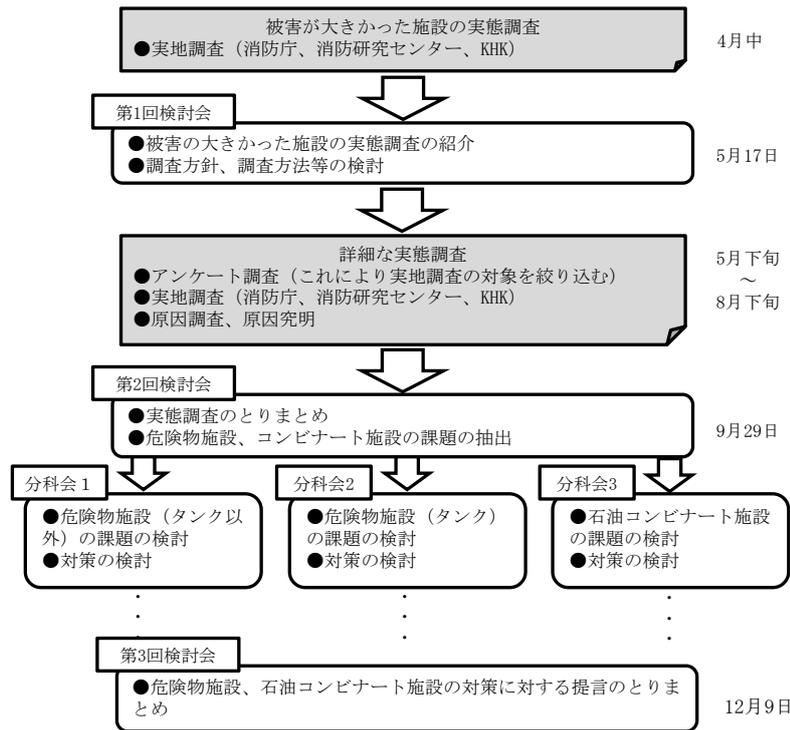
石油コンビナート等の防災対策

総務省消防庁 特殊災害室長 渡辺剛英



東日本大震災を踏まえた危険物施設等の地震・津波対策のあり方に係る検討会

（総務省消防庁）



2

石油コンビナート施設の被害状況等

震度5弱以上又は津波観測値が2.0m以上であった特別防災区域内に存する249事業所に対して行った特定防災施設等の被害状況等についての調査及び特定事業者に対して行った聞き取り等の結果をもとに、石油コンビナート施設について被害状況を取りまとめた。

（特定防災施設等の被害状況）

1. 流出油等防止堤

地震により流出油等防止堤の目地が切れた事例、津波により崩落や基礎に空洞が発生した事例があった。流出油等防止堤内に石油や海水が滞留した事例があったが、流出油等防止堤外に石油が漏えいしたものはなかった。

2. 消火用屋外給水施設

地震により消火栓が損壊した事例、津波により消火栓が損壊、加圧送水設備が冠水した事例があり、火災発生時に使用できなかったものがあった。

3. 非常通報設備

地震による断線や電源断となった事例、津波による断線や無線機が冠水した事例、通信回線に輻輳が発生した事例があった。通信回線に輻輳が発生した事業所は、67事業所であった。これらの事例で、消防機関への通報が遅れたものがあった。

（特定防災施設等の被害状況）

施設等区分	設置事業所数	被害事業所数	被害原因	
			地震	津波
流出油等防止堤	46	10	7	3
消火用屋外給水施設	179	33	17	16
非常通報設備	249	39	22	17

注) 1 設置事業所数は、消防庁の実態調査による数値（平成22年4月1日現在）である。
 2 被害原因の「津波」は、地震・津波（地震及び津波、地震又は津波）による被害を含む。
 3 施設等区分の「非常通報設備」の被害事業所数には「輻輳」による被害は含んでいない。

3

石油コンビナート施設の被害状況等

（防災資機材等の被害状況）

1. 消防車両

被害を受けた10台全てが津波による被害で使用不能となっており、火災発生時に使用できなかった事例があった。被害を受けた車両としては、大型化学消防車・大型高所放水車・泡原液搬送車が各2台、甲種普通化学消防車が4台となっている。

（消防車両の被害状況）

区分	総数	被害車両数
消防車両	208	10
船舶	49	11

（その他の防災資機材等の被害状況）

防災資機材等区分	被害事業所数
オイルフェンス	16
その他	6

2. その他の防災資機材等

オイルフェンス展張船等の船舶、オイルフェンス、耐熱服及び空気・酸素呼吸器等に津波による流出や水没等の被害が発生している。

注：消防車両、船舶及びその他防災資機材等の被害は津波による被害のみ発生している。オイルフェンスは、地震による被害が1事業所、津波（地震・津波による被害を含む）による被害が15事業所で発生している。

（構内通路の被害状況）

地震により陥没や崩落等が発生した事例や津波により土砂堆積や障害物堆積等の事例があり、消火活動の障害となったものがあつた。

施設等区分	設置事業所数	被害事業所数	被害原因	
			地震	津波
構内通路	248	69	51	18

注）被害原因の「津波」は、地震・津波（地震及び津波、地震又は津波）による被害を含む。

（自衛防災組織等の活動）

1. 大容量泡放射システム

屋外タンク貯蔵所の浮き屋根の沈降が疑われた事案と高圧ガス施設の火災・爆発事案に対して大容量泡放射システムが出動した。

大容量泡放射システムを搬送する車両の確保や通信網の輻輳による車両の手配や防災要員の確保のための連絡が困難であつた。道路渋滞が発生し計画より搬送に時間を必要とした。

2. 応急措置

地震発生後、大津波警報が発令されたため、事業所内の状況調査を中断した事例、従業員及び消防車両を高台へ避難させた事例があつた。

4

石油コンビナート施設等における地震・津波被害を踏まえた地震・津波対策のあり方

1 特定防災施設等及び防災資機材等

地震・津波の発生頻度に応じた特定防災施設等及び防災資機材等の地震・津波対策について取りまとめられた。

(1) 地震

ア 発生頻度が高い地震

機能が維持されること。ただし、応急措置により直ちに機能を回復できるのであれば、軽微な損傷の発生はさしつかえない。

イ 甚大な被害をもたらす発生頻度が低い地震

応急措置又は代替措置により、機能を速やかに回復することができるように計画を策定する。

(2) 津波

ア 発生頻度の高い津波

直ちに復旧できるようにするために、浸水対策を講ずるとともに、応急措置の準備を行う。

イ 発生頻度は低いものの甚大な被害をもたらす津波（最大クラスの津波）

応急措置又は代替措置により、機能を速やかに回復することができるように計画を策定する。

○ これらを踏まえ、平成24年3月に関係道府県あて通知を発出した。

「特定防災施設等及び防災資機材等に係る地震対策及び津波対策の推進について（通知）」
（平成24年3月30日 消防特第63号）

2 自衛防災組織等

(1) 大容量泡放射システム

大容量泡放射システム運搬車両の確保や運搬経路の複数化等の検討すべき事項を整理し、今後検討

(2) 自衛防災組織等の活動

地震発生時、津波警報発令時及び津波襲来後の活動について他の防災組織等との連携等の検討すべき事項を整理し、今後検討

(3) 周辺住民の避難

避難対象区域の設定方法等の検討すべき事項を整理し、今後検討

5

特定防災施設等の被害状況

地震及び津波により特定防災施設や防災資機材にも被害があった。



消防研究センター

消失した消防用ポンプ設備



仙台市消防局

津波により崩落した流出油等防止堤



消防研究センター

津波により破損した消火用屋外給水施設

6

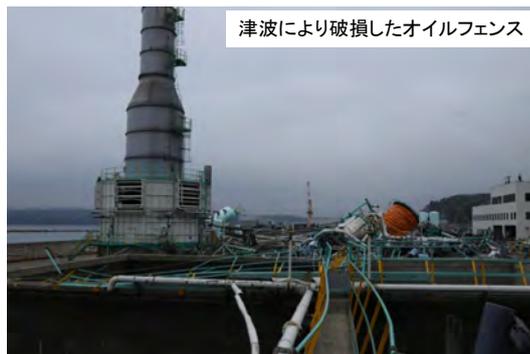
防災資機材等の被害状況

事業所提供



津波により破損した化学消防車

消防研究センター



津波により破損したオイルフェンス

事業所提供



津波により陸上に打ち揚げられた油回収船

消防研究センター



津波により転覆したオイルフェンス展張船

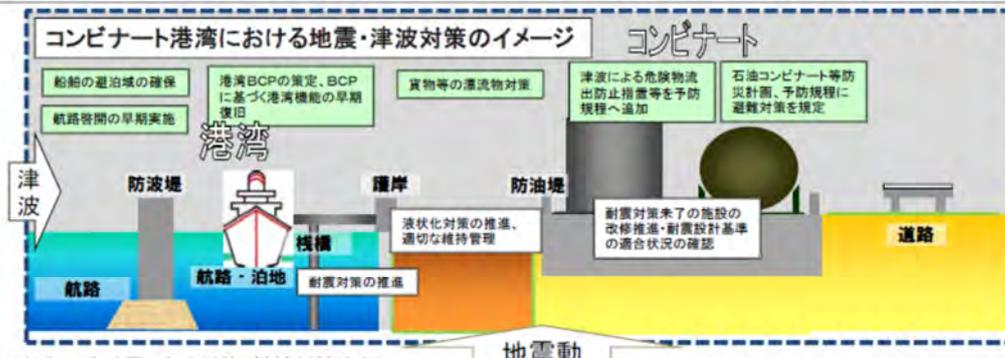
7

コンビナート港湾における地震・津波対策検討会議(国土交通省、経済産業省共同開催)

コンビナート港湾における地震・津波対策について

基本認識:

- ◆大規模な石油タンク等については、概ね耐震対策が完了しており、既知の地震動による石油等の大規模な流出の危険性は極めて低い。一方、耐震対策が未了の施設も残ることから早期改修を促進するとともに、津波対策を推進していく必要がある。高圧ガス施設等については、一部の球形貯槽を除き、既知の地震動による高圧ガスの大規模漏えいの危険性は低いと考えられる。今後、地震対策として球形貯槽の耐震基準の見直し、耐震基準の適合状態の確認等を進め、津波対策として高圧ガス設備を安全に維持できる状態にするための機能を義務づけ等する必要がある。
- ◆一方、中央防災会議において検討されている最大規模の地震・津波に対しては、各事業所の対策にも限界があることから、コンビナートや船舶の被災等、最悪の事態も想定した上で、東京湾等の物流機能を維持するための対策を併せて取る必要がある。



今後取り組むべき地震・津波対策(継続対策含む):

- 中央防災会議で検討中の最大クラスの地震・津波予測を踏まえ、従来の地震・津波対策の検証を行った上で、以下の通り取り組む。
- 事業者による石油タンク、高圧ガス施設(配管等含む)等の耐震性・耐津波性向上
 - 護岸の耐震性の簡易評価手法提供を通じた液状化に関する技術的支援及び適切な維持管理、石油出荷設備の耐震化支援
 - 従業員の避難対策や復旧のためのコンビナート周辺の道路や避難施設の確保
 - 東京湾等における震災時の物流・産業・エネルギー供給の確保のための物流機能の早期復旧に向けた取組
 - コンビナート及びその周辺への地震・津波被害を防止・軽減するための防波堤や防潮堤等の機能の強化

(出典) 国土交通省ホームページ掲載「第3回コンビナート港湾における地震・津波対策検討会議の概要について」の概要より http://www.mlit.go.jp/kowan/kowan_tk7_000012.html

東日本大震災を踏まえた課題と現状

コンビナート港湾における地震・津波対策検討会議
(国土交通省、経済産業省共同開催)

コンビナート港湾における地震・津波対策について(抜粋)

2. コンビナート港湾における地震・津波対策に関する基本的考え方(総務省消防庁、経済産業省部分抜粋)

コンビナート港湾における大規模な石油タンク等については、液状化対策も含めた耐震対策は概ね完了しており、既知の地震動による石油等の大規模な流出の危険性は極めて低い。一方、耐震対策が未了の施設も残ることから、早期改修を進めるとともに、予防規程等の充実など津波対策を推進していく必要がある。

また、高圧ガス施設等については、東日本大震災において、球形貯槽の脚部の筋交いに損傷を受けたため、球形貯槽の脚部の筋交いについて耐震設計基準を見直す必要がある。それ以外に新たな義務づけを必要とする事故、損傷はなかった。また、事業者における既存設備の耐震設計基準等への適合状況の確認を進める必要がある。津波対策としては高圧ガス設備を安全に維持できる状態にするための機能を義務づける必要がある。また、事業者は設備の破損等の想定を行い、被害低減策の実施のほか、自治体に提示し、地域の津波対策に反映する必要がある。

3. 今後取り組むべきコンビナート港湾における主な地震・津波対策(総務省消防庁、経済産業省部分抜粋)

- ・事業者による危険物タンク、高圧ガス施設等の耐震性・耐津波性向上
- ・従業員の避難対策や復旧のためのコンビナート周辺の道路や避難施設の確保

(出典) 国土交通省ホームページ掲載「第3回コンビナート港湾における地震・津波対策検討会議の概要について」の資料-1より抜粋 http://www.mlit.go.jp/kowan/kowan_tk7_000012.html

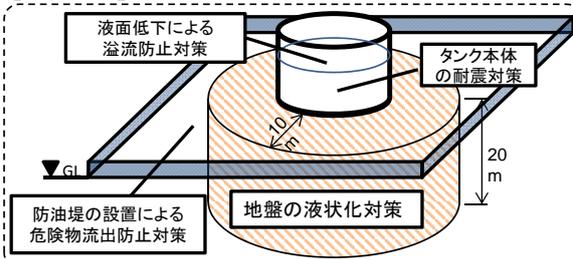
大規模な石油タンクの地震・津波対策等（総務省消防庁）

【東日本大震災における被害状況】

東日本大震災では、右表のとおり調査対象危険物施設211,877の約1.6%（3,341施設）で何らかの被害が発生した（被害の93%は「火災」及び「流出」を伴わない破損等）。
 なお、屋外タンク貯蔵所では、調査対象施設26,572の約3.2%（841施設）で何らかの被害が発生した（被害の85%は「火災」及び「流出」を伴わない破損等）。

	火災	流出	破損等	合計
地震	5	79	1,325	1,409
津波	36*	106	1,679	1,821
判別不明	1	8	102	111
合計	42	193	3,106	3,341

【地震対策】（既知の地震動に対し現行基準は概ね妥当と評価）

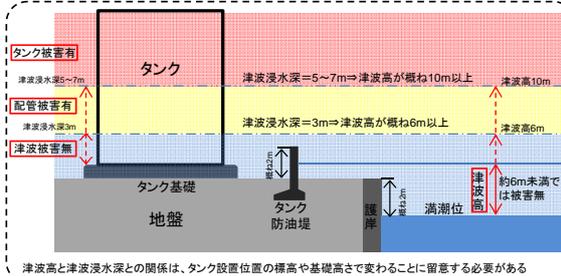


石油タンクの耐震基準が策定された昭和52年以降に設置された屋外タンク貯蔵所のみならず、それ以前に設置された屋外タンク貯蔵所にも次の対策を要求。

- 屋外貯蔵タンクの地盤条件やタンク特性に応じたタンク本体の耐震設計
- 液状化対策を講じた屋外貯蔵タンクの堅固な基礎地盤の設計・施工
- 屋外貯蔵タンクからの万が一の危険物流出に備えた防油堤の設置
- スロッシングの影響による溢流防止を考慮した液面高さ制限の設定

【津波対策】

※ 全て宮城県内の同一事業所で発生



東日本大震災における屋外貯蔵タンクの津波被害分析結果を踏まえ、津波に対して危険物施設で講ずべき応急措置を予防規程に定めることを要求。（詳細は津波被害シミュレーションで検証）

- 津波浸水深が3m未満（津波高が約6m未満）
⇒タンク本体・付属配管ともに被害は無いと想定
- 津波浸水深が3m以上（津波高が約6m～10m）
⇒タンク付属配管が被災する可能性があることから、危険物の流出防止措置を要求
- 津波浸水深が5～7m以上（津波高が約10m以上）
⇒タンク本体・配管に被害が発生する可能性有

- 【今後の課題】
- 1 引き続き屋外タンク貯蔵所の地震対策に取り組むことが必要。
 - 2 津波対策を推進することが必要。

10

高圧ガス施設等の地震対策・津波対策（経済産業省）

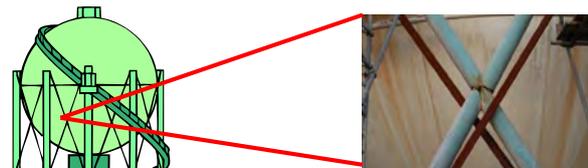
- 地震対策として、球形貯槽の脚部の筋交いの耐震設計基準の見直しや補強の方法を検討する。既存設備の耐震設計基準等の適合状況について、事業者は確認及び有価証券報告書等による公表を行う。液状化によるリスク調査、対策も実施する。
- 津波対策として、高圧ガス設備の安全な停止等により設備を安全に維持できる状態にするための機能を持たせることを義務づける。事業者は設備の破損・流出による被害を想定し、被害低減策を実施するほか、自治体に提示すること等を危害予防規程に基づき規定する。自治体は、想定を地域の津波対策に反映させる。

地震対策

東日本大震災では、球形貯槽の脚部の筋交いに損傷を受けた。それ以外に、新たな義務づけを必要とする事故、損傷は無かったことから以下の対策を行う。

- ・球形貯槽の脚部の筋交いの耐震設計基準の見直し、補強の方法の検討
- ・既存設備の耐震設計基準等への適合状況について、事業者は、確認及び有価証券報告書等による公表。自治体及び国によるフォローアップ
- ・事業者による液状化のリスク調査と対策実施の推進
- ・地震調査研究推進本部等の地震動予測地図の改訂に併せ、地域係数等の見直しを検討 等

（例）貯槽の筋交いの耐震基準の見直し



津波対策

東日本大震災では、浸水深に応じ、貯槽等の倒壊、転倒及び高圧ガス設備の流出など重大な事象の発生件数が多くなる傾向があり、1m未満の浸水深でも緊急遮断装置、計装設備等の破損、不具合により想定される被害のリスクが大きい事象が発生したことから以下の対策を行う。

- ・高圧ガス設備の安全な停止、高圧ガスの封じ込め、ガスの廃棄などにより、津波到達までの間に高圧ガス設備を安全に維持できる状態にするための機能を持たせることを義務づけ。
- ・事業者は、設備の破損・流出による被害を想定し、被害低減策の実施のほか、自治体に提示し、地域の津波対策に反映
- ・事業者は、事業所内の人命を保護するための対策（情報伝達、避難方法等のルール化、定期的な訓練）を実施
- ・設備が波力、浮力及び漂流物により受ける影響を評価するための手法を新たに検討 等

11

石油コンビナート等災害防止法の概要（1）

～石油コンビナート等の防災対策～

石油コンビナートなど、大量の石油や高圧ガスが取り扱われている区域は、石油コンビナート等災害防止法により、都道府県・市町村・特定事業者が相互に協力・連携する総合的な防災体制が確立されている。

○石油コンビナート等特別防災区域（法2条）

大量の石油や高圧ガスが取り扱われている区域を政令で指定
（33道府県、85区域）

（区域の主な考え方）

$$\frac{\text{石油の貯蔵・取扱量}}{10万kl} + \frac{\text{高圧ガスの処理量}}{2,000万m^3} \geq 1$$

○特定事業所

$$\frac{\text{石油の貯蔵・取扱量}}{1万kl} + \frac{\text{高圧ガスの処理量}}{200万m^3} \geq 1$$

$$\frac{\text{石油の貯蔵・取扱量}}{1,000kl} + \frac{\text{高圧ガスの処理量}}{20万m^3} + \dots \geq 1$$

第1種事業所（380事業所）

大量の石油又は高圧ガスを取り扱う事業所

レイアウト事業所（184事業所）

第1種事業所のうち石油と高圧ガスを取り扱う事業所

第2種事業所（328事業所）

一定量以上の石油又は高圧ガス等を取り扱う事業所

石油コンビナート等災害防止法

消防法など他の法律による規制・義務のほか、本法による規制・義務が課せられる

消防法

高圧ガス保安法

特定事業所

○総合的な防災体制

石油コンビナート等防災本部（法27条）

防災対策に関する石油コンビナート等防災計画を作成（法31条）

- ▶ 本部長：都道府県知事
- ▶ 本部長：特定地方行政機関の長、市町村長、消防機関の長、特定事業所の代表者等

<石油コンビナート等防災計画の内容>

- ・関係機関等の防災に関する組織の整備及び防災に関する事務
- ・特定事業所及びその他の関係機関等の職員への防災教育及び防災訓練に関する事項
- ・防災のための施設、設備、機械器具、資材の設置、維持、備蓄、輸送等に関する事項
- ・災害の想定に関する事項
- ・災害が発生した場合等における情報の収集及び伝達並びに広報に関する事項
- ・災害に対する応急措置の実施に関する事項
- ・災害時における避難、交通の規制、警戒区域の設定等に関する事項 等

石油コンビナート等現地防災本部（法29条）

災害時に緊急に統一的な防災活動を実施する必要があるときに設置

- ▶ 現地本部長：本部長が指名する者
- ▶ 現地本部長：本部長が指名する者

※ 都道府県数、区域数、事業所数は、平成24年4月1日現在である。

12

石油コンビナート等災害防止法の概要（2）

～特別防災区域内の特定事業者の義務～

特定事業者は、特定事業所における災害の発生及び拡大の防止に関し万全の措置を講ずるとともに、特別防災区域内の災害の拡大の防止に関し、他の事業者と協力し、相互に一体となって必要な措置を講ずる責務を有する。

特定事業者の義務

特定事業所毎に行う。

○自衛防災組織の設置（法16条）

災害の発生又は拡大を防止するために必要な業務を実施

- ▶ 防災管理者の選任
→自衛防災組織の統括
- ▶ 防災規程の策定
→防災業務に関する事項
- ▶ 防災要員の配置
→配備する防災資機材に必要な人数を配置
- ▶ 防災資機材の配備
→取り扱う石油類の種類・量に応じた化学車等の配備

○特定防災施設等の設置（法15条）

災害の拡大防止のために設置

- ▶ 流出油等防止堤
- ▶ 消火用屋外給水施設
- ▶ 非常通報設備

○異常現象の通報（法23条）

○災害応急措置（法24条）

<共同防災組織>（法19条）

一の特別防災区域内に所在する特定事業所は、業務の一部を行わせるため共同防災組織を設置することができる。

<広域共同防災組織>（法19条の2）

二つ以上の特別防災区域にわたる区域であって、政令で定めるもの（※1）においては、特定事業所の自衛防災組織の業務のうち政令で定めるもの（※2）を行わせるための広域的な共同防災組織を設置することができる。

（※1）現在12地区が指定

（※2）大容量泡放射システムに関する業務

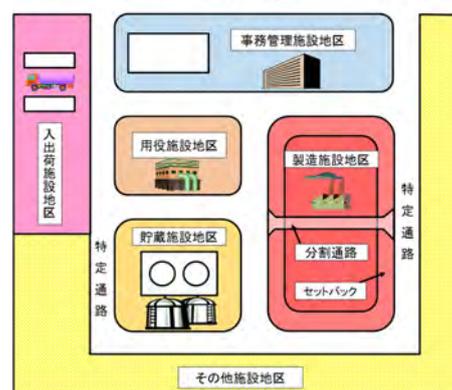
レイアウト規制

大量の石油と高圧ガスを取り扱う第1種事業所に対する災害の拡大を防止するための規制

<主な内容>

- ▶ 用途に応じた施設の配置及び面積の制限
- ▶ 基準に応じた通路の幅員の確保
- ▶ 通路を横断する配管の高さ制限
- ▶ 消防隊が活動するための空地の確保 等

（レイアウトのイメージ）



13

石油コンビナート等防災体制検討会

（総務省消防庁）

1 背景・目的

昨年開催された「東日本大震災を踏まえた危険物施設等の地震・津波対策のあり方に係る検討会」において、大容量泡放射システム、自衛防災組織等の活動、石油コンビナート周辺住民の避難について、今後検討を行うこととされたところです。

また、昨今の石油コンビナートでの災害では、爆発や火災により、当該事業所外に被害が及ぶ事案も発生しております。

このような状況を踏まえ、石油コンビナートにおける事業者の自衛防災体制、関係地方公共団体における防災体制、周辺住民の安心・安全確保のあり方等について検討するため、有識者等による検討会を開催しているところです。

2 主な検討内容

- (1) 石油コンビナート等防災本部における情報把握のあり方
- (2) 地震及び津波発生時の自衛防災組織等の活動のあり方
（大容量泡放射システムの運用、緊急停止や防災活動を行う従業者の安全管理等）
- (3) 災害発生時の事業所内及び異なる事業所間の情報伝達、応急対策のあり方
- (4) 関係市町村における周辺住民への災害情報伝達、避難誘導のあり方
- (5) コンビナート周辺の社会的に重要な施設への災害情報伝達、影響防止のあり方

3 第1回、第2回検討会の開催

第1回（7月12日）は、検討の進め方、最近の主な事故事例等について、第2回（9月11日）は、県及び消防本部の事例発表、石油コンビナート防災の枠組みと検討課題について議論が行われました。

4 今後の検討スケジュール

本検討会は、今年度中に計4回程度開催し、検討結果を取りまとめる予定です。

16

石油コンビナート等防災体制検討会 委員名簿

（敬称略）

座長	小林 森一	東京理科大学大学院 国際火災科学研究科教授
座長代理	中村 功	東洋大学 社会学部メディアコミュニケーション学科 教授
委員	浅本 邦裕	(独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構 石油備蓄部環境安全課 担当調査役
	阿部 則章	和歌山県 総務部 危機管理局 消防保安課 課長
	石井 俊昭	石油連盟 環境安全委員会 安全専門委員会 消防・防災部会長
	伊藤 英男	危険物保安技術協会 事故防止調査研修センター長
	岩岡 覚	電気事業連合会 工務部 副部長
	越谷 成一	川崎市消防局 予防部 危険物課 課長
	白木 邦治	(社)日本鉄鋼連盟 防災委員会委員
	白井 繁光	千葉県防災危機管理部 消防課 課長
	塚目 孝裕	消防研究センター 特殊災害研究室 室長
	土井 純二	(社)日本ガス協会 技術部 製造技術グループマネジャー
	中野 恵	山口県 総務部 防災危機管理課 課長
	村上 ひとみ	山口大学大学院 理工学研究科 准教授
	森 秀信	北九州市消防局 予防部指導課 課長
	吉田 一史	石油化学工業協会 消防防災専門委員長
オブザーバー	菅原 賢	内閣府政策統括官(防災担当)付 参事官(調査・企画担当)付 参事官補佐(直下型地震対策担当)
	村上 森司	文部科学省 科学技術・学術政策局 原子力安全課 原子力規制室 統括原子力保安検査官
	佐々木 正大	厚生労働省 医薬食品局 審査管理課 室長補佐
	野村 秀徳	経済産業省 製造産業局 化学課 課長補佐
	沼館 建	経済産業省 資源エネルギー庁 石油精製備蓄課 課長補佐
	福原 和邦	経済産業省 商務流通保安グループ 保安課 高圧ガス保安室コンビナート保安班長
	平井 洋次	国土交通省 港湾局 海岸・防災課 津波対策企画調整官
	石上 幾久夫	海上保安庁 警備救難部 環境防災課 専門官

17

石油コンビナート等における災害時の影響評価等に係る調査研究会（総務省消防庁）

1 背景・目的

東日本大震災等における石油コンビナートの事故や被災状況を踏まえ、石油コンビナートの被害予測等について技術的な検討を行うため、有識者等による調査研究会を開催しているところです。

2 主な検討内容

- (1) 関係道府県の石油コンビナート等防災計画での災害想定に活用されている防災アセスメント指針について、東日本大震災を踏まえた見直し。また、想定される災害の影響範囲、地域の人口や交通事情等を踏まえた避難計画策定の考え方
- (2) 特定事業所に設置が義務付けられている特定防災施設等及び防災資機材等が地震動等により受ける影響に係る評価方法。また、影響評価を踏まえた当該施設・資機材の被害防止及び影響軽減の方法
- (3) 上記(1)及び(2)の実効性を担保する方策

3 第1回研究会の開催

7月10日に第1回、9月19日に第2回研究会を開催しました。これまでの会議において、検討の進め方、防災アセスメント指針の見直しのための調査計画、特定防災施設等が地震動等により受ける影響に係る評価方法のための調査計画、特定防災施設の技術基準の検討について議論が行われました。

4 今後の検討スケジュール

本研究会は、今年度中に計4回程度開催し、検討結果を取りまとめる予定です。

18

石油コンビナート等における災害時の影響評価等に係る調査研究会

(敬称略)

座長	大谷 英雄	横浜国立大学大学院 環境情報研究院 教授
座長代理	佐藤 慎司	東京大学大学院 工学系研究科 教授
委員	石井 俊昭	石油連盟 環境安全委員会 安全専門委員会 消防・防災部会長
	市川 芳隆	四日市市消防本部 予防保安課 課長
	伊藤 英男	危険物保安技術協会 事故防止調査研修センター長
	岩岡 覚	電気事業連合会 工務部 副部長
	尾川 文彦	大阪府 政策企画部 危機管理室 保安対策課 課長
	加藤 洋	神奈川県 安全防災局 危機管理部 工業保安課 課長
	越谷 成一	川崎市消防局 予防部 危険物課 課長
	座間 信作	消防研究センター 火災災害調査部 部長
	高橋 伸夫	宮城県 総務部 消防課 課長
	土井 純二	(社)日本ガス協会 技術部 製造技術グループマネジャー
	長尾 賢治	(財)エンジニアリング協会安全法規部会委員・テーマ分科会長
	福島 啓介	(独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構 石油備蓄部基地管理課 担当調査役
	水内 千明	(社)日本鉄鋼連盟 防災委員会委員
	吉田 一史	石油化学工業協会 消防防災専門委員長
関係行政機関	福原 和邦	経済産業省 商務流通保安グループ 保安課 高圧ガス保安室 コンビナート保安班長

19

東日本大震災に関連して発生した火災に関するアンケート調査の経過報告

消防研究センター 鈴木恵子

消防研究センター 田村裕之

－おことわり－

ここに掲載されている資料は、著者の意向によりインターネット上では公開しておりません。
閲覧を希望される方は消防研究センターまでお問い合わせください。

震災廃棄物の自然発火

消防研究センター 岩田雄策

1. はじめに

東日本大震災後に発生した有機系廃棄物を含む震災廃棄物の堆積場から蓄熱発火し火災となった事例がある。このような堆積場の火災は一旦発生した場合、広範囲で燃焼することから消火が困難であり、煙や有害物質等による環境被害も大きい。そのため、震災廃棄物に対する熱的危険性を把握しておくことが火災予防上重要である。

しかしながら、蓄熱発火による火災の初期段階の発熱は非常に微少であることから蓄熱発火の危険性を適正に評価することは困難である。そのため、蓄熱による自然発火の火災危険性を調べるためには高感度熱量計を用いて微少な発熱を捉えることが必要となってくる。本報告では有機系廃棄物について自然発火に関する熱分析手法とともに、測定結果を基に発火の温度条件およびメカニズムについて解説し、類似火災の予防のための情報提供を行う。

2. 火災事例

名取市における震災廃棄物の蓄熱による自然発火が原因で火災となった事例について、その一例をまとめた。図1に名取市閑上（ゆりあげ）の火災現場の写真を示す。この他、石巻市等でも同様な火災が発生したことが報告されている。

2.1 火災事例1

発生日時：2011年9月16日(金) 午前7時39分

場所：宮城県名取市閑上字東須加地内 東須加地区第一次仮置場西側（未分類の瓦礫山より出火）

鎮火時間：2011年9月20日 午後4時40分

燃焼面積：幅40m 奥行き30m 高さ15m

燃焼量：約18000m³

燃焼面積：約1200m²

2.2 火災事例2

発生日時：2011年9月19日(月) 午前3時6分

場所：宮城県名取市閑上字東須加地内 東須加地区第一次仮置場東側(未分類の瓦礫山より出火)

鎮火時間：2011年9月22日 午後12時26分

燃焼面積：幅30m 奥行き10m 高さ10m

燃焼量：約3000m³



図1 名取市閑上の火災現場の写真

燃焼面積：約 300m²

2.3 火災事例 3

発生日時：2011 年 9 月 22 日(月) 午前 5 時 59 分

場所：宮城県名取市小塚原字西土手外地内 小塚原地区第一次仮置場（廃置類を集積した瓦礫山より出火）

鎮火時間：2011 年 9 月 22 日 午後 11 時 35 分

燃焼面積：幅 10m 奥行き 10m 高さ 8m

燃焼量：約 800m³

燃焼面積：約 100m²

3. 測定装置および可燃性ガスの発生に関する危険性評価方法

震災廃棄物からの発熱は非常に微少なため、高感度な熱量計でなければ検知することは難しい。また、震災廃棄物から発生する可燃性ガスも火災危険性を評価する上で考慮する必要がある。ここでは震災廃棄物に関して自然発火の危険性評価に用いた熱量計および発生する可燃性ガスの評価方法の概略について説明する。

3.1 C80（双子型高感度熱量計）

C80（双子型高感度熱量計）は震災廃棄物微少発熱に関して、発熱を開始する温度を測定するために使用した。双子型熱量計は基準容器および試料容器を持ち、周囲を昇温することにより試料容器からの発熱を熱流束として検知する熱流束型熱量計である。基準容器および試料容器の周囲温度を昇温して測定を実施する。密閉式の試料容器を用いるため水分の蒸発による影響を抑えて測定できる。なお、C80 より高感度な MS80（双子型超高感度熱量計）も使用することができる。

3.2 TAM（等温型高感度熱量計）

TAM（等温型高感度熱量計）は廃棄物微少発熱に関して、発熱量を測定するために使用した。C80 と同様に基準容器と試料容器を持つが、C80 と異なり、周囲温度が一定の条件で試料容器からの熱流束を検知する装置である。C80 よりも高感度な装置である。TAM は装置の熱安定性も良く、微少発熱の危険性を調べるために有効な装置である。C80 と同様、密閉式の試料容器を用いるため水分の影響も検討できる。

3.3 可燃性ガスの発生に関する危険性評価方法

有機系廃棄物を含む震災廃棄物や再生資源燃料の貯蔵時の火災危険性を知る上で、発生した可燃性ガス（水素、メタン、一酸化炭素）の分析は火災予防上重要であるため、可燃性ガスを測定して危険性評価に用いた。また、水添加の有無で発生ガスの比較も行って危険性評価に適用した。試料 50g を 1000ml ガラス瓶中に入れ 26°C±1°C の環境下で 10～11 日間密栓保持した。水を添加する場合は水 12.5g（水分量：20%）を添加した。発生ガスを水上置換によってテドラーバッグに採取した。次いでテドラーバッグにシリンジを接続し、試料ガスを均一に混合した後、全量をガスサンプラーに流し込み、ガスクロマトグラフによって一酸化炭素、二酸化炭素、水素、メタンについて調べた。

4. 木材チップの火災

一般に木材チップはリサイクルを目的に建築廃材等から大量に作られ、その処理が追いつかず、野外に大量に放置されている例も見られる。木材チップは震災廃棄物にも含まれていて自然発火のおそれがある。実際、野積された木材チップやコンテナ中のものが蓄熱によって、自然発火した例も報告されている。ここではコンテナ中の木材チップが蓄熱により自然発火し、火災となった疑いのある事例について検討を行った。

4.1 試料および測定条件

4.1.1 試料

コンテナの火災現場から採取した湿った木材チップの小片を、次の二通りの状態で測定を行った。

[1]現場から採集したままの状態（湿った状態）。

[2]室内（温度約 25℃、湿度約 60%）で約 4 日間自然乾燥したもの。

4.1.2 C80 の測定条件

C80 による測定目的は、蓄熱火災の開始点となる室温付近からの発熱挙動（微生物の活動によると考えられる発熱）と水分による影響を把握することである。試料量は 1.5g とした。昇温速度は 0.1K/min に設定し、空気中で測定を行った。試料容器として高圧型密封容器を使用した。

4.1.3 TAM の測定条件

TAM による測定目的は、温度を一定に保持し、このとき発生する微生物の発熱挙動の有無と発熱量に加えて発熱挙動の水分による影響を調べることである。試料量は 1.0g とした。保持温度は 50℃に設定して測定雰囲気は空気中とした。試料容器として 4ml の SUS 製密封容器を用いた。

4.2 測定結果

C80 および TAM による測定の前に、試料の熱的性質等を前もって知っておくために TG-DTA で測定を行った。

4.2.1 TG-DTA の測定結果

現場から採集したままの状態の試料の TG-DTA の測定結果から、室温から 100℃付近までに主に脱水と考えられる減量が 23.8%見られる。その後 170℃付近から 500℃付近まで数段階の分解と燃焼による大きな発熱が観測された。100℃付近までに観測された水分量 23.8%は通常の木材に比べかなり多く、微生物が活動するために必要な水分が充分あると考えられる。自然乾燥した試料の測定結果も採集したままの状態の試料と同様な傾向であった。100℃付近までに主に脱水と考えられる減量は 11.5%で、微生物が活動するために必要な水量がかなり少なくなった。

4.2.2 C80 の測定結果

現場から採集したままの状態の試料とそれを乾燥させた試料の測定結果を図 2 に示す。図 3 に室温から 140℃を拡大記録したものを示す。現場から採集したままの状態の試料は室温付近から 58℃付近にかけて発熱ピークがあり、その後引き続き高温領域まで発熱ピークが続いた。一方、自然乾燥した試料には室温付近から 58℃にかけて発熱ピークは見られなかった。室温付近からの発熱ピークは微生物の活動（発酵、増殖など）によるものと考えられ、微生物の栄養となる植物に水、空気、温度、菌などの条件がそろったときによく観測される現象である。この発熱が蓄熱し、温度が上昇して、高温側の油脂分の酸化や、木材の分解による発熱に繋がり火災に至るも

のと推定される。実際に火災の場合にも、廃棄物に適切な水分量が含まれた場合、この室温付近からの発熱ピークが観測されている。

4.2.3 TAMの測定結果

現場から採集したままの状態の試料および自然乾燥した試料について TAM による測定結果を図 4 に示す。TAM の測定は C80 の測定結果から発熱反応が活発に起こっている 50℃に温度を保持して測定を行った。現場から採集したままの状態の水分を含んだ試料と乾燥させた試料の測定結果を比較した。各試料の測定開始から 24 時間までの発熱量と、24 時間から 72 時間までの発熱量について検討した。水分を含んだ試料の場合、測定開始から 12 時間の間に微生物の活動と思われる大きな発熱ピークが観測された。一方乾燥した試料にはこの発熱ピークは観測されなかった。この傾向は C80 の測定結果とよく一致している。受領した水分を含んだ試料の、測定開始から 24 時間までの発熱量は 14.1J/g であった。この値は過去に木材チップの大量蓄積で火災になった木材チップの試料の発熱量

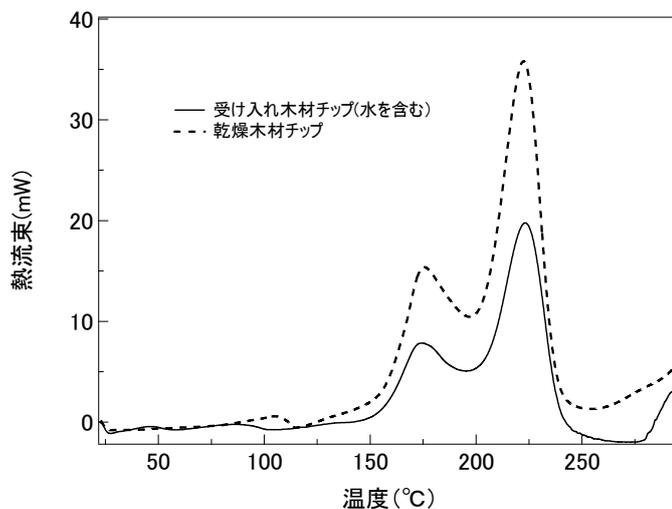


図 2 C80 によるコンテナ火災の木材チップの測定結果

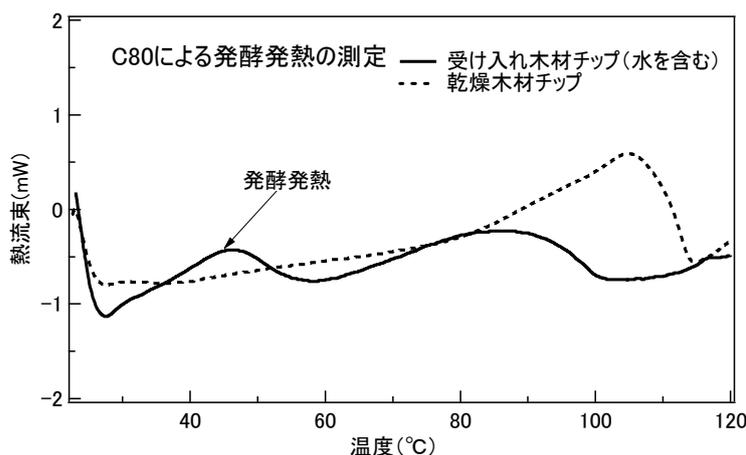


図 3 C80 によるコンテナ火災の木材チップの測定結果（拡大図）

(50℃保持で 14.9J/g) とほぼ同じで、この程度の発熱量があれば火災に至る可能性があることを示している[1]。

4.3 木材チップの測定結果のまとめ

TG-DTA から得られた水分量 (24%)、C80 や TAM から得られた室温から発生している発熱ピークと温度範囲 (室温から 58℃)、TAM から得られた発熱量 (14.1J/g)、過去の木材チップ堆積場の火災例の情報などを総合し判断すると、今回の火災現場から採取された試料は、自然発火に至る可能性を十分に含んでいるものと考えられる。実際に、今回の火災現場から得られた古い廃材のチップには、いろいろな菌が付着していることが考えられる。また、チップに破碎する過程で発生する熱を下げるために行われていた散水作業により、微生物の活動に適した水分が含まれ、場合によっては木材チップの温度も上がっていたことが予測される。さらに当日の最高気温は

32.9℃であり、コンテナに木材チップを積載してから火災までの経過時間（およそ 5-6 時間）を考慮すると火災現場に置かれたコンテナ内の温度は外気温より高くなっていたことが予想され、コンテナ内に空気も充分にあった。これらのことは、微生物が活動し発熱するための条件がそろっていたと考えられる。

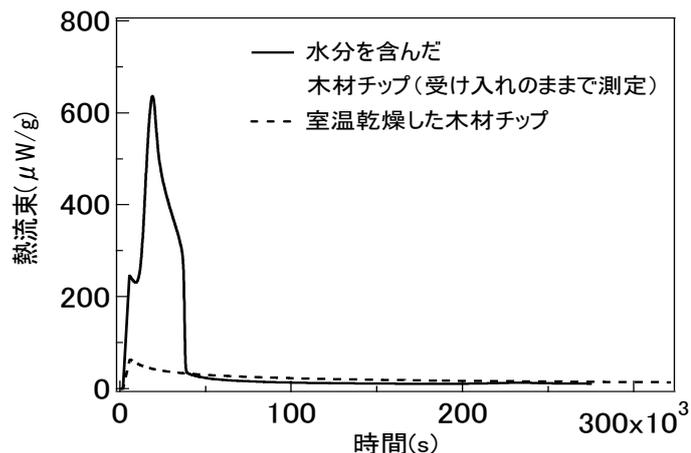


図 4 TAM による水分を含んだ（受け入れのまま）木材チップと乾燥させた木材チップの測定結果（水分を含む場合、発酵による発熱が見られる）

5. 酸化発熱機構

木材チップは発酵による発熱の後、酸化発熱に移行し、くん燃や有炎燃焼に至ると考えられる。酸化発熱の

機構として図 5 の様な反応機構が考えられている。植物油の成分は数種類の脂肪酸の混合物である。脂肪酸の中には分子中に二重結合を持つものがある。以下、図 5 に示す①～④の反応について解説する。R は炭化水素基を示す。①「熱および金属等の作用により二重結合の隣の水素が引き抜かれてラジカル（遊離基）が発生する。」一般にラジカルは高い反応性を持つ。②「発生したラジカルが空気中の酸素と結合してパーオキシドラジカルとなる。」この反応において酸化熱が発生する。③「次にパーオキシドラジカルが他の脂肪酸から水素を引き抜き、新たにラジカルを形成させるのと同時に自らはヒドロパーオキシドとなる[2,3,4]。」②と③を繰り返すことにより連鎖的にヒドロパーオキシドが生成することになる。「連鎖的に」とは、③で発生したアルキルラジカル (R·) が酸素と反応した後、再びヒドロパーオキシドとアルキルラジカルを生成することをいう。ヒドロパーオキシド基 (-OOH) は、二重結合の隣の炭素に形成される。④「ヒドロパーオキシドは不安定なため、アルデヒド類やケトン類に分解して分解熱を発生させる。また、脂肪酸を酸化してエポキシ化合物を生成させ、酸化熱を発生させる。

6. 震災廃棄物の火災

宮城県名取市閑上と小塚原から採取した合計 6 種類の試料を用いた（表 1）。小塚原の瓦礫火災に関しては、畳が集められた山から出火していることが報告されている。また、発酵による影響を確かめるため、エチレンオキシドガス (EOG)を用いて、滅菌装置内にて 17 時間滅菌処理を施したものも用いた。C80 および TAM による結果を述べる。C80

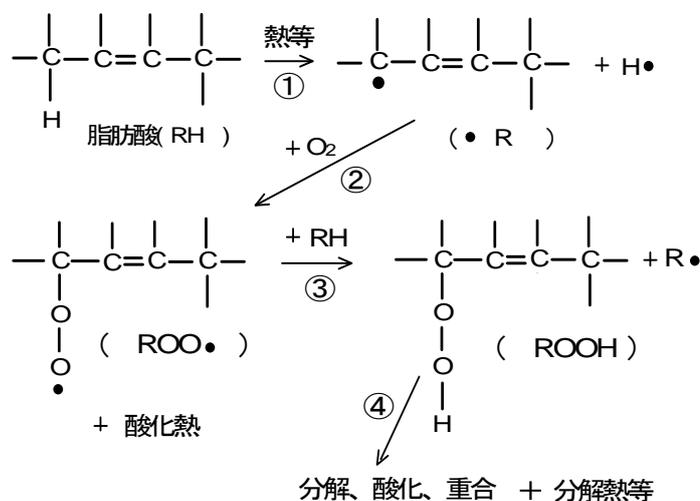


図 5 脂肪酸の酸化反応機構

の測定条件に関して、試料量は 1.5 g とし、昇温速度は 0.1K/min に設定した。C80 による発熱開始温度および発熱量の結果を表 1 に示す。表 1 で木材チップは集められた木質の瓦礫類をチップ状にしたものである。閑上腐食畳は常温から発熱し、発熱量も大きいことが分かる。また、C80 の測定において小塚原畳に関しては、水分を添加した場合、添加しないものと比べて発熱量が 6 倍以上になった。

TAM 測定に関して 1g の試料を密閉型試料容器(4ml)に入れて、50℃ で 2 日間等温保持し、発熱量の測定を行った。図 6 に TAM の代表的な

結果として小塚原腐食畳を試料とした測定結果を示す。含有水分の影響を検討するため試料量に対して蒸留水 20%を添加したものについても測定を行った。TAM の保持温度について 50℃に設定した理由は、50℃近辺で微生物による活動が活発におこりそれ以降の温度領域においては徐々に微生物の活動が不活性となっていくからである。

表 2 に TAM による発熱量(EOG 未処理)の結果をまとめた。TAM による水を添加しない場合の測定結果を比較すると、発熱量は小塚原腐食畳が最も高い結果となった。小塚原腐食畳は TG-DTA の測定によると 16.6%程度の水分を含むことが分かっている。TAM の測定結果において、小塚原腐食畳は測定開始直後に発熱し数時間後に急激に熱流束が増加した。これは時間経過に伴って、微生物の活動が活発となっていくためと考えられる。その後、酸素を消費したため熱流束が低下した可能性が考えられる。顕著な熱流束のピークは好気性菌の発酵によるものである可能性が高い。小塚原腐食畳に関して可燃性ガスの分析では水添加の有無にかかわらず嫌気性菌によって発生した水素およびメタンが確認された。水分を添加した TAM の測定結果から、閑上汚泥を除いていずれの試料もそのまま測定を行った結果に比べて発熱量の増加が見られた（表 2）。多くの試料は 50℃で急激に発熱し測定開始から約 10 時間程度で発熱が終息していく傾向がみられたが、小塚原畳に関しては、長時間発熱が持続する傾向がみられた。閑上汚泥に関して、急激な発熱は見られなかったが、長時間発熱が持続した。

エチレンオキサイドガス (EOG) は、ほとんどの微生物を死滅させることができ、医療用器具や精密機械を隅々まで滅菌するのに幅広く用いられている。代表的な測定例として EOG 処理した小塚原腐食畳の TAM 測定結果を図 7 に示す。エチレンオキサイドガスで滅菌処理を行ってから測定を行った試料に関しては、測定開始 12 時間以内に現れていた発熱ピークの減少がみられた。

表 1 C80 による測定結果(測定開始直後から 80℃ まで)

試料名	発熱開始温度 (°C)	発熱量(J/g)
		測定開始直後 ~80℃
閑上腐食畳	30.0	10.0
閑上木材チップ	29.0	1.47
閑上汚泥	-	≒0
閑上魚網	-	≒0
小塚原腐食畳	25.5	9.4
小塚原畳	-	≒0

7. 自然発火危険性の相対的評価方法

蓄熱による自然発火の危険性を有する再生資源燃料について、発熱開始温度、発熱量およびガス発生量を指標として相対的な危険性評価を試みた。発熱開始温度は「発熱反応の起こりやすさ」を、発熱量は「発熱の強度」を表すものと考えられる。各再生資源燃料に水を添加した場合についても同様な判定方法で危険性評価を行った[5]。低い発熱開始温度のものほど危険性が高いことから高い点を与えた。発熱量について TAM による 64 時間または 74 時間の発熱量によって評価を行った。64 時間の発熱量と 74 時間の発熱量の間に大きな差は無い。発熱量が大きいものほど危険性が高いことから高い点を与えている。可燃性ガス発生量について可燃性ガスの可燃限界を考慮して危険性評価点を与えた。点数が高いほど可燃性が大きく燃焼危険性が高いことを示す。各試料において、次のような基準に基づいて点数を設定した。括弧内は評価点数で、点数が高いものほど危険性が高い。

表 2 TAM による発熱量(EOG 未処理)

試料名	発熱量(J/g) 0~48 時間
閑上腐食量	12.9
閑上腐食量+蒸留水	15.6
閑上木材チップ	7.9
閑上木材チップ+蒸留水	13.3
閑上汚泥	11.6
閑上汚泥+蒸留水	11.5
閑上魚網	0.1
閑上魚網+蒸留水	8.7
小塚原腐食量	15.3
小塚原腐食量+蒸留水	20.0
小塚原量	3.2
小塚原量+蒸留水	22.9

C80 の結果を基に設定した発熱開始温度の点数。

0℃ ≤ (5) < 30℃ ≤ (4) < 60℃ ≤ (3) < 90℃ ≤ (2) < 120℃ ≤ (1) < 150℃

TAM の結果を基に設定した発熱量の点数。

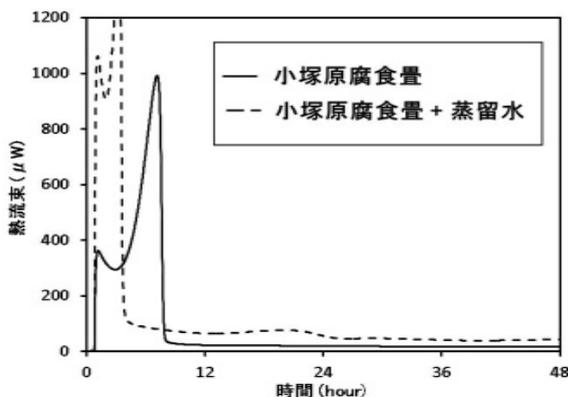


図 6 小塚原腐食量の TAM 測定結果

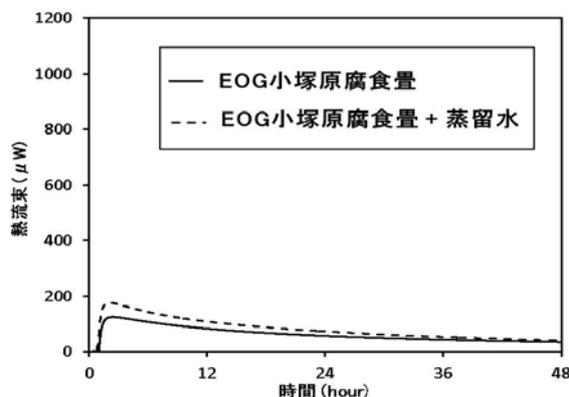


図 7 EOG 処理した小塚原腐食量の TAM 測定結果(50℃)

0J/g ≦ (1) < 10J/g ≦ (2) < 20J/g ≦ (3) < 30J/g ≦ (4) < 40J/g ≦ (5) < 50J/g ≦ (6) < 60 J/g

可燃性ガスの発生量について、次式のように GC によって検出された可燃性ガスの発生量を、それぞれの可燃下限界濃度で除した値を足し合わせてガス発生危険性の指標とした。今回の試算では、二酸化炭素の影響については除外して行った。

$$\text{可燃性ガスの危険性} = \frac{[H_2]}{4.0\%} + \frac{[CO]}{12.5\%} + \frac{[CH_4]}{5.0\%}$$

GC の結果を基に設定した可燃性ガスの危険性の点数

0 ≦ (1) < 0.001 ≦ (2) < 0.01 ≦ (3) < 0.1 ≦ (4) < 1 ≦ (5) < 10

発酵発熱には水分の有無が大きく影響するため、危険性評価において水分の影響について考慮した。「水添加無し」および「水添加有り」の場合について、各試料の相対的な危険性を比較し易くするために、危険性評価結果を図 8 にまとめた。横軸は発熱開始温度に関する危険性を表し、縦軸は TAM の 50°C における発熱量の危険性評価点を示す。グラフの右上にある試料ほど、熱的危険性がより高いことを示す。反対にグラフの左下にある試料が、熱的危険性がより低いことを示す。円の面積は発生した可燃性ガスの種類および発生量による燃焼危険性を表している。水分が添加されると熱的危険性および可燃性ガスの危険性も増加することを示している。例えば、生ごみの固形化燃料である RDF では水を添加すると熱的危険性も増加し、水素の発生が検知された。プラスチック・紙類の固形化燃料である RPF は比較的、熱的危険性や可燃性ガス発生による燃焼の危険性が小さい。震災廃棄物である腐食量は水分なしでも危険性が相対的に高く、水分添

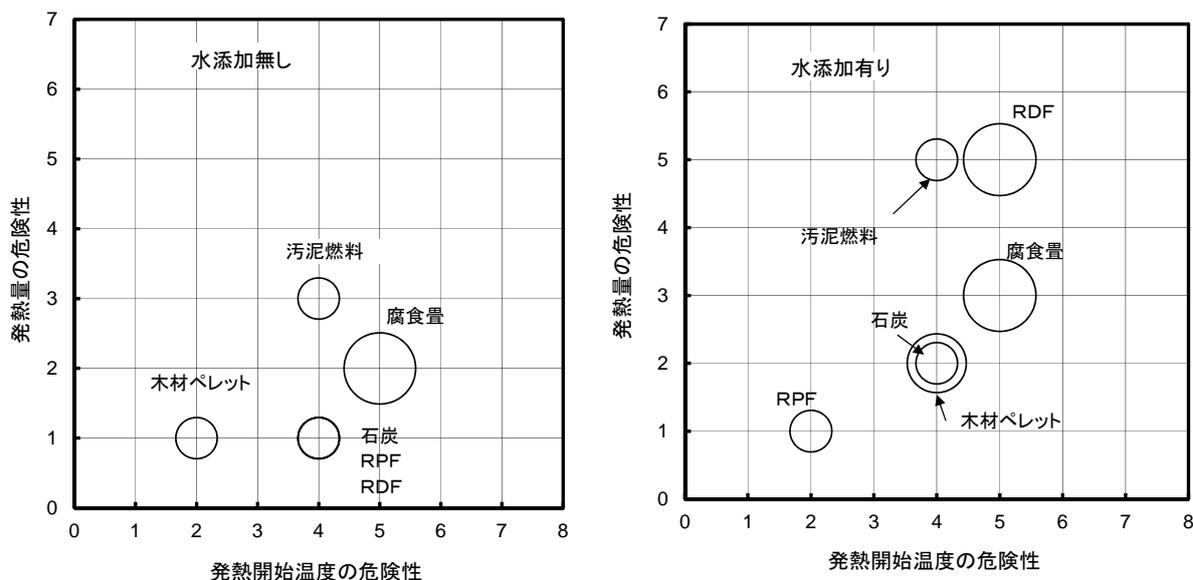


図 8 再生資源燃料の火災に対する総合的危険性評価の例

左図が水添加なし、右図が水添加あり。発熱開始温度、発熱量および可燃性ガス発生量でもって総合的に評価する。グラフ右上に位置し、円の面積が大きい試料ほど火災危険性が高い。

加によってさらに自然発火の危険性が増すことが分かる。この危険性評価手法はまだ研究段階であるため確定的なものではないが、新規の試料についても適用可能であることが期待される。

8. おわりに

本報告では震災廃棄物の蓄熱発火危険性とその危険性を評価するために高感度な熱分析装置を用いた危険性評価手法について紹介した。有機系の震災廃棄物について常温からの発酵、植物油の酸化に移行した後、くん焼を経て燃焼するプロセスについて説明した。また、現在研究中である再生資源燃料を対象とした自然発火危険性の相対的評価手法について述べた。その危険性評価手法を東日本大震災で発生した震災廃棄物に適応した。その結果、震災廃棄物の中で腐食量の自然発火危険性が高く、水分の添加によってその危険性が増すことを示した。さらに、その自然発火の危険性が発酵に起因することも示した。

参考文献

- 1) J.of Hazardous Materials, A135pp.15-20 2006
- 2) 新版 油脂製品の知識、安田 耕作他、幸書房(1993)
- 3) 改訂増補 油脂化学の知識 第3版、幸書房(1994)
- 4) 自然発火の原因となる油類の熱分析による発熱特性とその生成物（アクロレイン）の検出について、柴田 靖史、第51回全国消防技術者会議(2003)
- 5) 再生資源燃料等危険性評価に関する研究報告書、消防研究技術資料 第79号（2007）

太陽光発電システムを設置した住宅の火災と消防活動の問題点

消防研究センター 田村裕之、阿部伸之、松島早苗、
塚目孝裕、高梨健一、尾川義雄、河関大祐

1. はじめに

東日本大震災における原子力発電所事故を契機に再生可能エネルギーが改めて注目されている。特に太陽光発電システムは、従来の一般住宅用だけでなくメガソーラー発電所も建設され、その需要は急速に高まっている。一方で、太陽光発電システムが火災に見舞われたことを想定した時、その燃焼性状、消火方法、消防活動上の危険性について知見がなく、さらに消防隊員が消防活動中に感電する事例があり、また、東日本大震災においては火災も生じており、太陽光発電システムの社会への普及の速度に見合った対応がなされていないのが現状である。太陽光発電システムの出火の可能性の調査、消防活動における感電等の危険性に関する調査を行い、それらに対する対策を検討する必要がある。

ここでは、太陽光発電システムの概要、火災および消防活動事例、火災実験などを紹介し、現状での対策について報告する。

2. 太陽光発電システムの概要

一般的な住宅用の太陽光発電システムについて紹介する。システム構成の概略図を図1に示す。太陽電池、接続箱、パワーコンディショナ、漏電遮断器、売電積算電力計、買電積算電力計などからなる^{1) 2)}。主な働きは次のとおり。

(1) 太陽電池 太陽からの光エネルギーを電気エネルギーに変換する装置である。電池材料には、結晶シリコン、薄膜シリコン、化合物半導体などがある。結晶シリコン系の太陽電池モジュールの断面構造を図2に示す。太陽光の当たる表面は強化ガラス、太陽電池セルを固定する

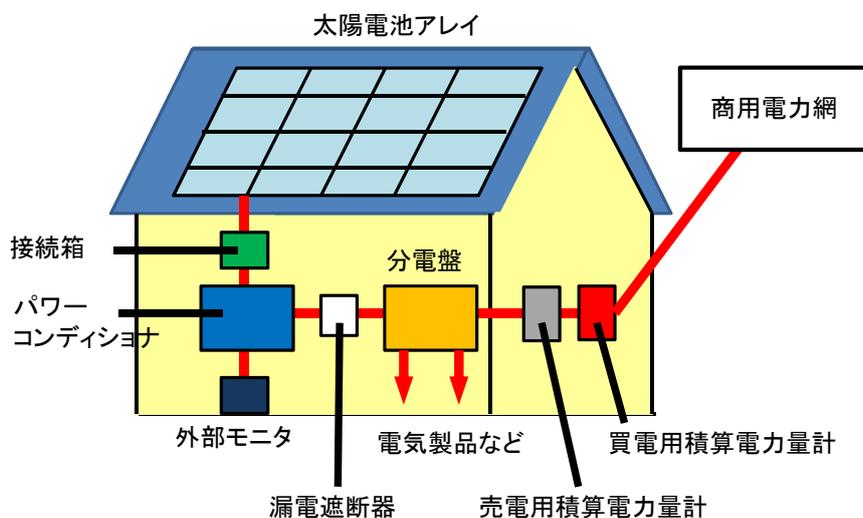


図1 太陽光発電システムの概要

樹脂製の封止材、裏面保護用の耐候性のあるバックシートで構成されている。太陽電池を小さい単位から表現すると、セル、クラスタ、モジュール、ストリング、アレイとなる（図2参照）。モジュールが一般的なパネル1枚に相当し、モジュールをいくつかひとまとめにしたものをストリングと呼び、ストリングが数個集まってアレイを形成する。アレイが住宅一軒分の太陽電池全体である。モジュールの中はいくつかのクラスタに分かれていて、不具合のあるセルの異常が大きくなるようにするためのバイパスダイオードがクラスタ毎に組み込まれている。

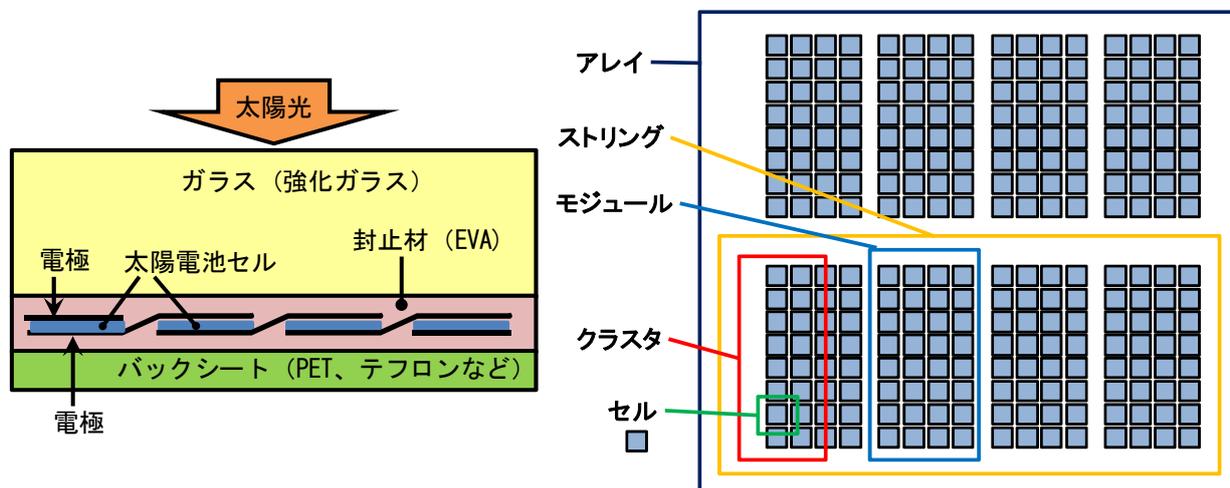


図2 結晶シリコン系太陽電池の断面構造(左図)と一般的な構成(右図)

- (2) 接続箱 並列に構成された複数のストリングの出力を合成しアレイの出力としてパワーコンディショナへ送り出す、接続端子を持った箱である。電流の逆流を防止するブロッキングダイオード、電路を遮断する開閉器、雷対策としての避雷器が内蔵されている。
 - (3) パワーコンディショナ 太陽電池からの直流電力を最大限に引き出せるように制御するとともに、接続箱より供給されてくる直流電力を交流電力に変換し、住宅内コンセントへの供給や売電を行う。商用電力網に悪影響を及ぼさないような連係保護装置を内蔵している。
 - (4) 分電盤 電力をコンセントなどの電気機器に分配する。太陽光発電システム専用のブレーカを持つ。
 - (5) 漏電遮断器 電力系統から漏電があった場合に電力を遮断する。
 - (6) 売電積算電力量計 電力会社へ売った電力の積算を行う。
 - (7) 買電積算電力量計 電力会社から購入した電力の積算を行う。逆電防止機能が付く。
- これらのほかに、外部モニタ、蓄電池、日射計などが付加される場合がある。

3. 火災および感電のあった消防活動事例

東日本大震災で発生した火災の中で、太陽光発電システムに焼損被害のあったものは、3件を把握している。この3件は、津波の被害を受けた地区で発生している。また、震災とは関係ないが、消火活動をしているときに消防隊員が感電した事案があった。

3.1. 東日本大震災での火災事例

(1) 3階建て住宅の1階車庫内に設置された太陽光発電システムのパワーコンディショナが津波により浸水し、パワーコンディショナ内部の配線から出火した。津波被害を受けた翌日の午前中に焼損を発見した。発見時は日射のある天気で、発電による電力で発火したものである。住民

は避難所にいたため無人であった。発見時、パワーコンディショナ内はまだ湿っていた。駆け付けた消防隊員が粉末消火器で消火した。被害はパワーコンディショナ内部だけである。

(2) 2階建て住宅に設置された太陽光発電システムのパワーコンディショナが津波により浸水し、配線に付着した塩分などの影響で絶縁が劣化し、微小電流が流れ続けることで発熱が起り、約2ヶ月後に発火したと思われる。住民は避難所にいて無人であった。火災を発見したのは近くにいた作業員である。消火活動はなかった。被害は金属筐体でできたパワーコンディショナ内部だけで、配線被覆部分が焼損した。

(3) 建物1階外壁に設置された太陽光発電システムのパワーコンディショナ（接続箱機能も内蔵）と思われる機器が津波で浸水した。屋根上の太陽電池からの電力入力配線に力がかかり機器筐体から配線が脱落したことにより短絡し、配線被覆が焼損したと考えられる。被害は筐体付近の配線のみである。焼損が発見されたのは津波被害から約2週間後であった。

これらの火災はすべて津波の被害を受けた住宅において発生している。配線が脱落したものを除き、海水の塩分等が端子部分に付着することで、端子の腐食、端子台等の絶縁劣化等が起こったのではないと思われる。内陸の火災には消防本部が把握した太陽光発電システムに関係した火災はなかった。

3.2. 感電のあった消火活動事案

3.2.1. 断熱材で感電した事案

屋根一体型の太陽光発電システムを設置した2階建て住宅が火災となった。出火原因は太陽電池モジュールの配線部分からと疑われる。消火により火災が収まり2階屋根裏の残火確認を行おうとした際に隊員が感電した。住宅の壁や屋根には断熱材が使われており、火災の影響により、断熱材がむき出しの状態となっていた。2階の屋根裏を確認するため、吹き抜けの玄関に梯子をかけ、隊員が2階上部に上った。この際、隊員は一般的な消火活動で身につける個人装備を着装していた。梯子に乗った隊員が、片手を梯子に、もう一方の手で断熱材に触れた時、手に電撃を感じた。幸い梯子から転落するなどの被害はなかった。

3.2.2. 小屋裏での活動中に感電した事案

屋根一体型の太陽光発電システムを設置した2階建て住宅が火災となった。出火原因は太陽光発電システムとは無関係と思われる。発見時、太陽電池モジュールのある屋根の隙間から煙が登っていることが確認できモジュールに焼けはなかった。消火活動を行った後、消防隊員は、屋根上でのモジュールの引きはがし作業や2階小屋裏内でモジュールを外に押しはがす作業をしていた。隊員は一般的な消火活動で身につける個人装備を着装していた。屋根上での引きはがし作業中、とび口等の破壊器具をモジュールの間に差し込み、てこの原理でモジュールを浮かし、手で引きはがそうとしたときにびりびりと手に感じた。また、小屋裏での押しはがし作業中、片手を建物の金属柱に置き、もう一方の手でモジュールの裏面を押したときに、バーンという電撃を感じた。幸い屋根から転落するなどの被害はなかった。

3.2.3. 隊員装備品の抵抗測定

どちらの事案も隊員はヘルメット、手袋、防火衣、長靴などの個人装備を着装していた。感電している状況としては、消火活動後の濡れた現場で、濡れた手袋（ケブラー製）を着け残火の確認をしているときである。濡れた現場では、断熱材や壁なども導電性が高くなるため、どこかで太陽光発電システムの配線が脱落などで建物部材に触れていると、建物部材を通して電流が流れ

てくる可能性が高まる。その部分に濡れた手袋で触れたため感電したと思われる。

消防隊員が使用していた手袋（ケブラー製）を水道水で濡らして、手袋の内側から外側への抵抗を絶縁抵抗計（250 V）で測定すると1 k Ω 以下であった（図3参照）。太陽光発電システムが100 Vを発電していたとすると1 k Ω の抵抗を流れる電流は0.1 Aとなり、人体にとっては痙攣が起こる電流値となり、屋根や梯子からの落下につながる危険がある。

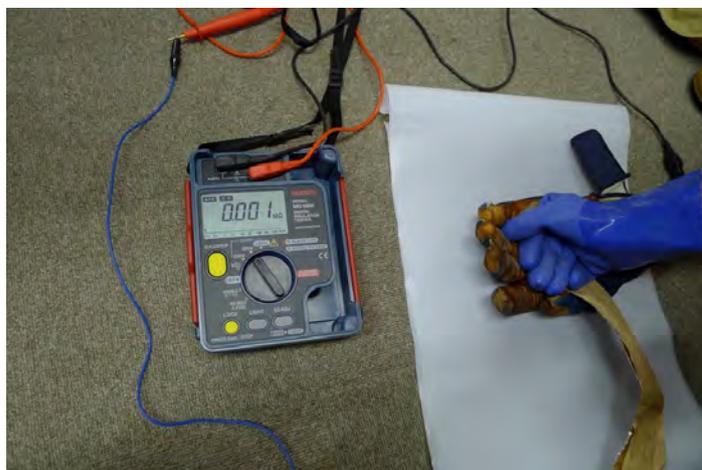


図3 濡れたケブラー製手袋の抵抗値測定（絶縁抵抗計 500 V）

4. 消防研究センターにおける火災実験

太陽光発電システムが設置された住宅が火災になった際、システムがどのように振る舞うかを把握するために、次のような実験を行った。

4.1. 火災からの放射による発電

火災時に生じる火炎から放出する光を受けたモジュールが、太陽光を模擬した照明灯の有無によって、どのような発電特性を示すかを実験室レベルで確認する。

地面に対して長手方向を垂直に立てたモジュール（図4参照）に正対した鉄製の円形火皿（内法として直径454 mm、高さ100 mm、厚さ3 mm）にn-ヘプタン1ℓ及び水5ℓを入れ着火した。モジュールと火皿の中心との離隔距離は1 mである（図5参照）。用意した火皿の大きさ及び燃料の量については、実火災を想定した想定火源を考える必要があるが、本研究では試験室において周囲環境を熱により損傷させないという制限を考慮の上選択した。太陽光と同じスペクトル分布を持つ人工太陽照明灯（ランプ容量500 W、セリック株式会社、SOLAX XC-500E）を6台使い、それぞれの光軸がモジュール中央に向くように目視により調整した。

図4に示した丸囲みの数字はモジュールの表面温度の経時変化を、丸囲みの英字はアルミニウム製枠の表面温度の経時変化を計測するためのK型熱電対（直径0.32 mm）の設置位置である。サンプリング時間1秒である。熱電対を設置したことによるモジュールの出力電圧の低下は1～2%である。

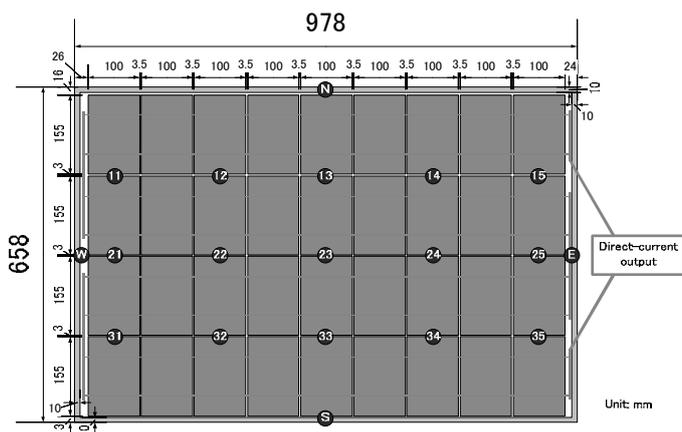


図4 実験で使用した太陽電池モジュール
（丸囲みの英数字は熱電対設置位置を示す）

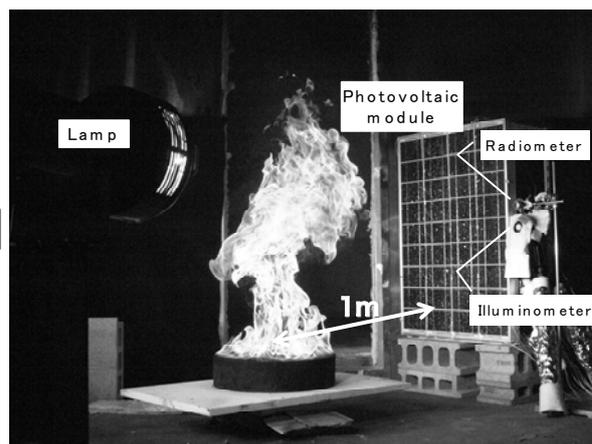


図5 モジュール及び機器類の設置状況

モジュールの脇に、放射計（株式会社チノー、RE-III 型）と照度計（コニカミノルタセンシング株式会社、T-10）を設置した。放射計はモジュールへの放射受熱量の経時変化を、照度計は人間が感覚的に感じる光の明るさの目安として照度の経時変化を、それぞれサンプリング時間1秒で取得した（図5参照）。モジュールの出力端子には負荷抵抗として5Ωの抵抗器を接続し、通常の使用状態に近づけた。

照明灯の光の有無及びヘプタン火炎の光の有無の組み合わせとして、実験条件は4通りである。照明灯の光のみの場合のモジュール中央における平均照度（5回計測した平均）は、19300 lxであった。

実験中のモジュール表面の最高温度は、91℃であった。外観上、特に損傷はなかった。また、アルミニウム製のモジュール枠の最高温度は53℃であった。モジュール表面温度よりもモジュール枠温度の方が約40℃低く、モジュールを加熱した時にモジュール枠が放熱に寄与すると考える。

図6にモジュールの出力電圧とその時の照度の関係を示す。ここで、出力電圧と照度の瞬時値は同期が取れていないため、それぞれのデータに10秒の移動平均を施してある。

照明灯をつけない場合は、電圧の出力はない。

ヘプタン火炎があるとその照度に従って、図6の2000 lx以下の測定点群のように、線形的に

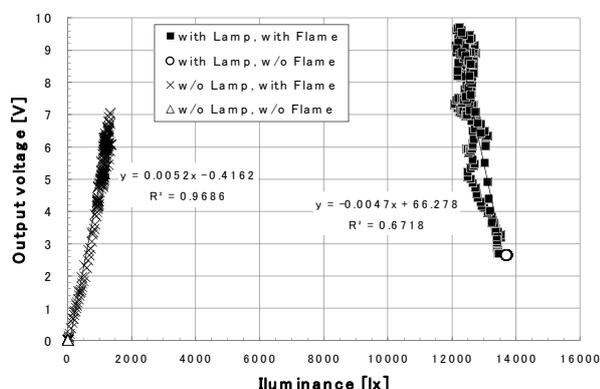


図6 モジュールの出力電圧と照度の関係

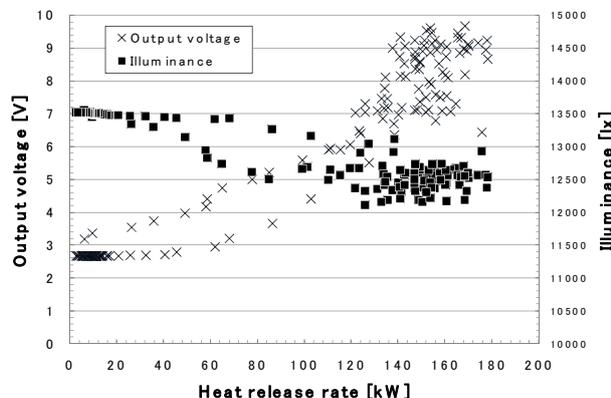


図7 発熱速度とモジュールの出力電圧及び照度の関係（照明灯点灯）

出力電圧が増加する。約 2.6 V の出力には約 670 lx のヘプタン火炎の照度が必要である。

一方、ヘプタン火炎がなく照明灯を点灯した場合には、照度約 13700 lx で約 2.6 V の出力電圧がある。つまり、ヘプタン火炎の照度が照明灯の 5%程度で同じ出力電圧を生じることになる。

照明灯を点灯した状況でヘプタン火炎が存在する場合、照度が下がると出力電圧が上昇する（照度が上がっているにもかかわらず出力電圧が低下する）傾向が見られた。ヘプタン火炎の発熱速度が増加するとモジュール出力電圧は増加するものの照度が低下する傾向もある（図 7）。図 5 に示す位置関係として、照明灯とモジュールの間にあるヘプタン火炎の発熱速度が大きい時に大きい火炎となりモジュールに影響をすることから、照度が低下すると考える。

消防活動中では消防隊員が感覚的に感じる光の明るさが、太陽光発電システムの発電量に直接関連付けられれば単純であったが、太陽光とは異なる火炎からの光のスペクトルや各波長の保有エネルギーにより結果としては複雑な発電特性であった。

本実験では、ヘプタン火炎から放出する光によるモジュールの発電性状を調べた。その結果、同じ照度での照明灯とヘプタン火炎では、ヘプタン火炎の方が高いモジュール出力電圧であり、太陽光発電システムが設置された建物が火炎に見舞われた際、夜間の消防活動であっても火炎の光により発電している恐れがあるという知見を得た。

4.2. 太陽電池モジュールの火炎曝露による挙動

モジュールからの出火や、出火建物に設置したモジュールが火炎に曝露された場合にどの程度の損傷をモジュールが受けるのか、また、その時の発電特性を調べようとするものである。

モジュール長手方向の一边を軸に地面に対して約 23° 傾けた状態で設置した。この設置角度は、「太陽電池モジュールの安全適格性確認－第 2 部：試験に関する要求事項 JIS C 8992-2 (IEC 61730-2)」で設定するモジュール傾斜角度と同じである。助燃剤を入れる容器として、鉄製の角形火皿 1（内法として一辺 355 mm、高さ 68 mm）を用意した。角形火皿には n-ヘプタン 3 l、水 1 l を入れた。先の人工太陽照明灯を 6 台用い、それぞれの光軸がモジュール中央に向くように目視により調整した。この時のモジュール中央における平均照度（照度計（コニカミノルタセンシング株式会社、T-10）により 5 回計測した平均）は 29300 lx である。これら機器類の設置状況を図 8 に示す。

4.1 の実験同様、モジュールの表面温度及びアルミニウム製枠の表面温度の経時変化を計測するための K 型熱電対（直径 0.32 mm）を設置した。サンプリング時間 1 秒である。

モジュールの出力端子には、先の実験と同様に負荷抵抗として 5 Ω の抵抗器を接続した。

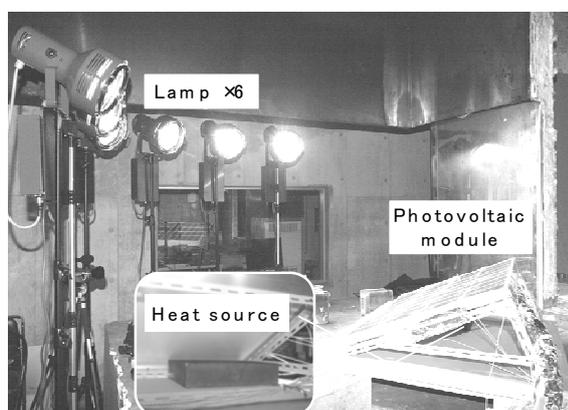


図 8 モジュール及び機器類の設置状況

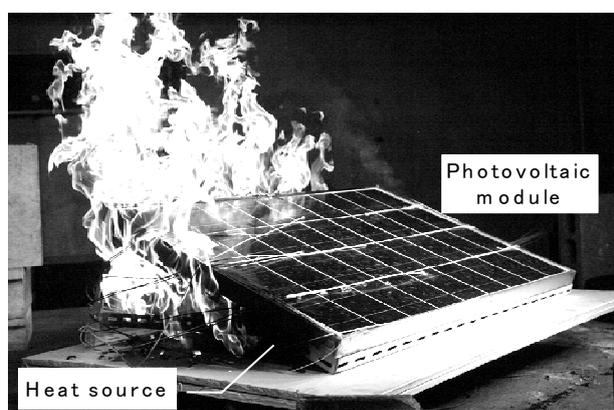


図 9 ヘプタン火炎によるモジュールの加熱

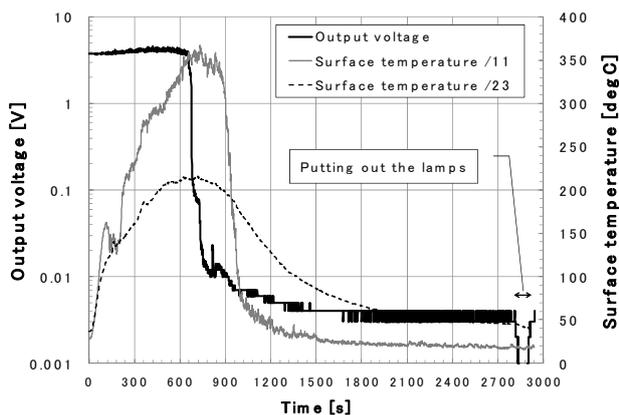


図 10 モジュールの出力電圧及び表面温度

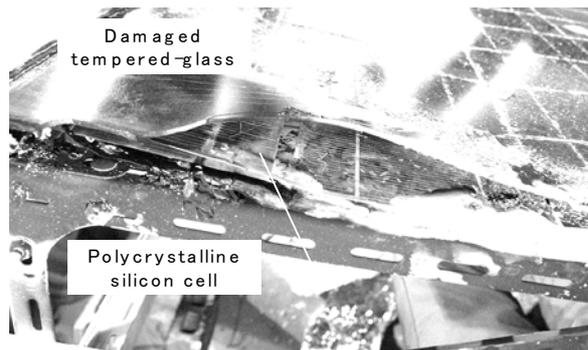


図 11 燃焼後のモジュールの損傷の様子

モジュールの燃焼性状を見るため、照明灯をつけた状態で角形火皿を用いて n-ヘプタン 1ℓ を燃焼させ、モジュールの出力電圧及び損傷状況を観察した。

モジュールは、樹脂（封止材）に包埋された多結晶シリコンを強化ガラスとバックシートで挟んだ構造であった。燃焼後の状況から、バックシートはアルミニウムシートを含む多層構造であった。実験に供したモジュールは 10 年以上前の製品であったためアルミニウムシートが使われていたが、現在の製品ではほとんど使われていない。アルミニウムシートは火皿の火炎を曝露しただけでは貫通（溶融）しなかった。そのため、封止材の燃焼までは観察されなかったため、本実験では途中、火炎により貫通しなかったアルミニウムシートを除去して、実験を続けた。

モジュールがヘプタン火炎により加熱されている様子を図 9 に示す。実験中のモジュール表面の最高温度は、熱電対で 367 °C、サーモグラフィ装置で表面の最高温度を調べると 383 °C であった。損傷の激しい部分については、概ねこのような温度であったと考えられる。

モジュール出力電圧は図 10 のように、最高温度に到達した付近で急激に降下した。助燃剤である n-ヘプタンの燃焼が終わったのが 16 分 18 秒（978 秒）であるが（モジュール自体が自発的に燃焼することはなかった）、それ以降も徐々に電圧は降下し実験後に 0.003~0.004 V で一定となった。このときのモジュールの破壊状況を図 11 に示す。この状態で照明灯を消灯したところ出力電圧は 0V になったので、わずかながら電圧が出力していたことになる。実験後、モジュールの損傷状況を調べている際に電圧が回復していることに気づき、その時に 1 分間データを取得した時間平均出力電圧は 3.2 V であった。実験前の電圧が 3.8 V であったので出力電圧がほぼな



図 12 モジュール裏面の自己燃焼
（円内の白色が炎）



図 13 モジュールの部分脱落の状況

かった状態から 84 %まで電圧が回復した。電圧が急激に低下したと回復したことの明確な理由は不明であるが、一部のセルの異常によりバイパスダイオードが働いたことやモジュール内で溶けた配線が冷えて再び接続する現象などが考えられる。

また、バックシートにアルミニウムシートが使われていない別の新しいモジュールでの火炎曝露による燃焼実験を行った。燃焼用の火皿は同じ角型火皿を用いた。その時のモジュールの状態を図 12 と図 13 に示す。図 12 中央の明るい部分が炎であるが、n-ヘプタンが燃え尽きていても、バックシート素材または封止材の樹脂が数分間継続燃焼した。バックシートの一部にアルミニウムシートが使われたモジュールでは見られなかった現象である。また、図 13 のように、火勢がなくなった後に、表面のガラスが割れ、部分的に脱落する状況が見られた。その時のガラス破片は図 14 のように 15~20 cm の大きさの破片となっていた。これが屋根から落下した場合には、消防隊員の受傷の可能性があるため、注意が必要である。また、この状態のモジュールでも電圧出力を継続していた。

本実験では、ヘプタン火炎に曝露したモジュールの損傷及び加熱中の発電特性を調べた。その結果、モジュールは損傷を受けて出力電圧が低下もしくは出なくなっても、時間の経過を追って電圧が回復することがあることに注意を要すると言う知見を得た。



図 14 モジュールから脱落したガラス片

4.3. 光遮蔽実験

消火活動で行う残火確認の際、日射がある場合、太陽電池モジュールは発電を継続している。火災と消火活動の影響により、配線被覆の熔融、配線の切断や脱落、建物の断熱材や木材への水のしみ込みなどにより、通常では太陽電池モジュールからの電流が流れ込まないような部分に流れ込む場合が想定できる。先の消火活動事例なども、残火確認の際の事例である。太陽電池モジュールは見た目の破壊が進んでも、出力を継続する回路構造になっているため、感電の危険がなくなる。そこで、簡単な実験ではあるが、モジュール表面を覆い遮光することで出力をどのくらい抑えられるかを試した。

実験方法は、消防研究センター本館屋上に南向きに約 23° モジュールを起こして日射を当てた。普通の状態のモジュール、市販のブルーシート 1 枚でモジュール表面を覆ったものと 2 枚重ねで覆ったものを用いた（図 15 参照）。使用したブルーシートはポリエチレン製で大きさが 1.8

×2.7 m、#3000（厚さ不明）という標記のあるものである。モジュールの出力端子に負荷抵抗として 2Ω の抵抗をつなぎ、その両端の電圧を計測した。実験日は 2012 年 11 月 8 日の午前中で、天気は晴れのときのデータである。

図 16 に各モジュールの出力電圧の変化を示す。7 時前から日射を受け始めている。このモジュールの最大出力動作電圧は 15.16 V で、図 16 の普通モジュールのグラフのように、日射を受けても最大電圧までは上がっていない。今回の計測範囲でブルーシートの影響を見ると、普通のモジュール出力電圧に対して、ブルーシート 1 枚では 12～16% に、ブルーシート 2 枚では 5～7% になった。ブルーシート 1 枚でも 6 分の 1 程度の電圧に抑えることができる。シートの色や厚さ、材質により大きく遮光性能は変化すると思われるので、性能を正確に把握するには個別の計測が必要である。

今回の実験では太陽高度が低いため日射が弱く、モジュールの最大出力動作電圧を超えることはなかった。最大出力を超える日射があった場合には、普通モジュールでは出力電圧が頭打ちになるが、ブルーシートで遮光したモジュールの出力電圧は最大電圧までの範囲で上昇することが予想される。太陽高度が高く日射が強い場合には、ここでの遮光効果よりも低い効果しか得られないので、注意が必要である。



図 15 遮光効果の観測

（右から、ブルーシート 2 枚、ブルーシート 1 枚、普通モジュール）

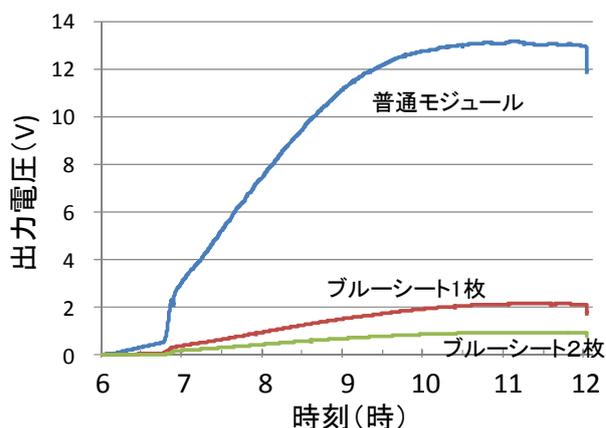


図 16 遮光による出力電圧の変化

5. 対策

火災事例や消防活動事例、燃焼実験などから、太陽光発電システムが設置された建物火災に対する注意点をここではまとめてみたい。

5.1. 装置自体の危険性

(1) 出火の危険性

一般的な電気製品と同様に、配線部分、接続端子部分、回路基板部分などから出火する危険性がある。決してメンテナンスフリーの安全な装置ではない。また、消火活動に伴うモジュールの破壊によって破壊時に短絡回路を形成するとアーク放電が起こる可能性がある。

モジュールを屋根から外し、火災現場等で屋外に置いておく際、日射があればモジュールは発電し出火の原因となるため、裏返しに置くか光を通さない物で覆う必要がある。

(2) 落下の危険性

梁や柱、屋根等が火災の影響で炭化してもろくなっていると、太陽電池モジュールの自重で落下する危険性がある。

高い熱を受けた太陽電池モジュールのガラスは、強化ガラスからフロートガラス（板硝子）に変化している場合がある。そのため、割れた時の破片が細かくならず 20 cm 前後の大きな破片となる。残火確認、原因調査などの作業中に大きなガラスの破片が落下することがあるので注意する。できるだけ屋根上からモジュールを除去しておくことが安全である。

5.2. 消防活動中の危険性

(1) 感電の危険性

残火確認等でモジュールを屋根からはずす作業の際に、モジュールに触れた破壊器具やモジュールを握った手から感電する場合がある。太陽光発電システムの配線が切断されて建物に触れている場合、建物の断熱材や金属の柱や梁を伝い感電する場合がある。消火活動により水が内部にまで浸み込んでいる手袋では感電の危険性が高まる。建物に近づき活動する時は、絶縁性の高い手袋（高電圧用ゴム手袋など）を活用するほうが安全である。

棒状注水で水が粒にならずに建物に掛かる場合は、水を伝わっての感電の可能性もあるため、粒状で建物に水がかかるように距離や筒先の調節を行う。

感電により心臓の停止などの致命的な症状を被らなくとも、感電のショックで屋根から落下するなどの二次的な危険性がある。高所での作業では、落下防止の措置をとる。

夜間であっても炎の光を受けて発電するので、感電の危険はなくなる。

モジュールの燃焼実験で分かったように、見た目の破壊が進んでいる太陽電池モジュールであっても、日射があれば発電をすることもあるので、感電の危険性はなくなる。

(2) 消火の困難性

屋根上でモジュールが燃えている場合、主な可燃物はモジュール裏面の樹脂製のバックシートや封止材である。燃焼しているこれらを消火するとき、モジュール表面のガラスが水を遮ることや裏面に直接水をかけづらい構造であることから、消火に時間がかかる。

(3) 活動での注意点

太陽光発電システムが設置されている建物であるかを活動開始までに把握する。また、可能であれば、接続箱やパワーコンディショナ部分の開閉器を切る。

6. まとめ

津波の浸水により発火した事例もある太陽光発電システムが設置されている建物での火災危険性、消防活動危険性等について、事例や実験を元にまとめた。太陽光発電システムの設置が拡大しているが、火災に関しての対策・対応はまだ不十分である。今後、調べるべき点は多いが、この報告が消防活動を行う上で少しでも参考なれば幸いである。

参考文献

- 1) 住宅用太陽光発電システムに係る施行研修専門知識講習テキスト B、一般社団法人太陽光発電協会
- 2) 加藤和彦、太陽光発電システムの不具合事例ファイル、日刊工業新聞社(2010)

第 16 回 消防防災研究講演会資料

平成 25 年 2 月 1 日 発行

禁無断転載

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

TEL 0422-44-8331 FAX 0422-42-7719

<http://www.fri.go.jp/>
