

2011年東日本大震災で起きた津波火災 の発生メカニズムについて —名取市閑上7丁目ならびに気仙沼湾岸地域を事 例として—

榎本祐嗣¹・山辺典昭¹・杉浦繁貴²・近藤斎²

Possible Mechanism of Tsunami Fires That Occurred in the 2011 Great East Japan Earthquake: Case Studies of Yuriage 7-chome, Natori and Kesenuma Bay Area

Yuji ENOMOTO¹, Tsuneaki YAMABE¹, Shigeki SUGIURA² and Hitoshi KONDO³

Abstract

Tens of minutes after the 2011 Great East Japan earthquake, blackened tsunamis hit wide areas of the Sanriku coast, causing fires and devastating fire disasters. Although various research studies have been reported on this disaster, the potential mechanism of the tsunami induced fires remains unclear. Therefore, in this study, we examined the time series of information and studies that contribute to the clarification of the tsunami-fire mechanism that occurred in Natori City, Yuriage 7-chome and Kesenuma City, Shishiori district. Based on our previous research on the tsunami-fire that occurred in the Aonae harbor of Okushiri Island during the 1993 Hokkaido Nansei-Oki earthquake, we proposed a new model that the tsunami-fire occurred in the following process.

- (1) The blackened tsunami that engulfed the sludge deposited on the seabed offshore also swept up the methane generated in the sludge, and white bubbles containing methane were carried to coastal area with assist of the tsunami wind.
- (2) The methane bubbles collided with man-made objects such as quay wall on the coast, bursting, and electrified mist rose up, which result in the electrostatic ignition of the methane, or
- (3) Methane bubbles are trapped under and/or in the narrow gaps of aggregated debris floating on the sea surface, and the electrostatic static ignition of the methane occurs by collisional friction between debris with different electrification series.
- (4) Due to the process of (1) or (2), any flammable combustibles in urban areas caught fire and spread, which result in a large-scale fire.

キーワード：東日本大震災，黒い津波，津波火災，メタン，静電気着火

Key words: Great East Japan earthquake, blackened tsunami, tsunami fire, methane, electrostatic ignition

¹ 信州大学
Shinshu University

² ㈱コンボン研究所
Genesis Research Institute Inc.

本稿に対する討議は2024年5月末日まで受け付ける。

1. はじめに

津波火災は大量の海水の波が押し寄せたあと炎が上がるという、水と火との相反する組み合わせで起きるゆえ、一見すると不可解に思える現象である。しかし歴史地震史料を辿ってみると津波火災に関連していそうな情報がいくつもある。1896年明治三陸津波のあとに流布した錦絵『明治丙申三陸大海嘯之実況』（小国政画：印刷発行：日本橋区長谷川町九 神田初次郎、刊行年：明治二十九年六月十五日）には中央に朱塗りの社殿らしき建屋の火災が描かれている¹⁾。また武者資料（1932）²⁾に所載されている『風俗画報』120号の記事「（岩手県南九戸郡野田村、野田駐在所の巡査遊佐左仲氏）暫したたずみ考ふる内に、大きさ提灯程の怪火其数幾十となく野田の民家の或る所より背後の山に懸けて高低に幻光を發し...」という記事も火の気のないようなところで起きていて、これは津波火災であったかもしれない。1933年昭和三陸地震津波では尾崎神社の拝殿が津波による火災で焼失、このとき釜石の市街地では地震と津波の影響による火災が発生し街は壊滅状態になった³⁾。尾崎神社の拝殿も明治三陸津波での錦絵にある社殿火災と同様な出来事であったのかもしれない。1944年12月7日に起きた昭和東南海地震では、三重県の白浦で「沖を見ると、海の水がごっそり引いて普段は見えない海の底が見えた。それは真っ赤で、赤い火のようだった。」⁴⁾、あるいは三重県の引本では「海の方を見たら、対翠楼が火事で燃えているような土煙を上げて沈んでいくのが見えた。」⁴⁾なども、津波で誘発された火災であったかもしれない。1946年昭和南海地震でも和歌山県新宮市街地で「火災が発生し、市街地の北半分、新宮川（熊野川）に近い側の市街地がほぼ完全に火災になめつくされた。」⁵⁾が、このケースでは火災の発生は地震から10分後に繁華街の料理店付近から出火したとの報道もあった⁶⁾。また「高知県中村市、高知県洲崎市多ノ郷などでも市街地の大規模火災が発生した」⁵⁾などいづれも沿岸に近い市街地の火災情報がある。しかし上述は憶測にすぎず、このような津波が火を運んだ非日常的な情報だけでそれらの因果関係を言及す

るには至らなかった。

津波火災の怖さが注目されたのは、1993年北海道南西沖地震で奥尻島の青苗地区で起きた火災や2011年東日本大震災で気仙沼市や名取市など三陸沿岸の市街地で起きた火災である。1993年北海道南西沖地震では市街地火災を誘発した青苗港の漁船火災等の調査が土木学会により行われた⁷⁾。この事例では大量のガレキが道路をふさぎ、有効な消防活動ができないまま街一帯が焼き尽くされた状況が明らかされ、引火性の高い石油系燃料の容器や自動車の燃料のタンクが破壊し、可燃物質が流出、発火・延焼により大きな火災被害に至ったとされたものの、発火の原因は不明とされた⁷⁾。

そして2011年東北沖地震では三陸沿岸の各地で159件の津波火災が発生したが、日本火災学会の調査⁸⁾では津波火災全体件数の42%が車両や電気機器からの漏電が原因とされたものの58%が原因不明であった。

日本火災学会の報告⁸⁾ならびにいくつかの研究報告⁹⁻¹⁵⁾の論調はほぼ共通して、

- ①地震・津波によるガレキの発生、それらの衝突や衝撃による摩擦熱・火花の発生あるいは電気回路からの漏電、短絡による火花によって着火によって必要なエネルギーが付与され、
- ②「石油系危険物の備蓄タンク、プロパンボンベ、自動車燃料タンクなどから流出・噴出し、灯油、重油、ガソリンなどの可燃物質が海面に拡がり引火、そして燃えたガレキが陸域に打ち上げられて延焼したとしている。

いづれも現場調査による焼け跡の状況から判断された現象論的な考察であって、津波火災の起因となる実体と発火過程に関わる本質を解明するにいたっていない。

筆者らは、後述する1993年北海道南西沖地震で撮影された奥尻島青苗港の漁船火災のNHK録画映像や目撃証言、ラボ実験をもとに地震動によって海底に胚胎するメタンが噴出し、海面に達したメタンの泡が津波風によって沿岸に到達、岸壁と衝突して舞い上がったミストが静電気を発生させ、メタンを静電気着火させ燃焼・火災にいたったというモデルを提案した^{16,17)}。

この津波火災は、奥尻島青苗地区に限った特有の地変・地質・環境ゆえに起きたものではない。そうであれば2011年東日本大震災での津波火災にも有効な説明モデルではなからうか。本稿はそのような動機のもとに、名取市関上7丁目と気仙沼湾岸の鹿折地区や小々汐地区などで起きた津波火災を事例に資料調査などを行いメタンの静電気着火モデルの妥当性を検討した。その結果について報告する。

2. 1993年北海道南西沖地震における津波火災原因のレビュー

1993年北海道南西沖地震で起きた奥尻島青苗港に停泊していた漁船の津波火災に関して、当時奥尻島で自然番組の取材をしていたNHK函館支局のスタッフが撮影した青苗港での漁船5隻の火災映像が1993年7月16日20:00-20:50のNHKスペシャル「大津波が襲った 奥尻島からの報告」で放映された。筆者らはこの番組の録画ビデオを現地調査で入手し、目撃証言や奥尻消防署の調査報告

さらに検証のためのラボ実験をもと津波火災の原因を論究した。その結果、「はじめに」で述べたメタンの静電気着火モデルを提唱した(図1)^{16,17)}。そのモデルの根拠となったNHKによる撮影映像の2コマを写真1a, bに示す。津波第1波が青苗湾に回り込んできて防波堤に激しく衝突したとき停泊中の漁船の甲板から激しい火焰が立ち昇ったが、ここで注目すべきは漁船の右側(↑A)の白く光るミストが立ち昇った光景と、漁船の左側(↑B)にもミストが立ち昇り、その根元に炎が見える光景である。これらは防波堤の角場にメタンの泡が滞留し、立ち昇った正帯電のミストによる静電気着火でメタンが燃えたに違いないと説明した。一方漁船の激しい火焰は、津波が運んだ多くのメタン泡が防波堤を越えて漁船甲板に堆積されたため、漁船の燃料であるC重油が燃えたわけではないようだ。というのも船用エンジンはC重油の発火点(140℃)以上に空気を圧縮して加熱したところで重油を噴霧し燃えだすと稼働するが、現地消防署での聞き取りでは停泊中の



図1 メタンを含む泡だった津波が岸壁に衝突して起きた静電気火災のモデル¹⁶⁾。

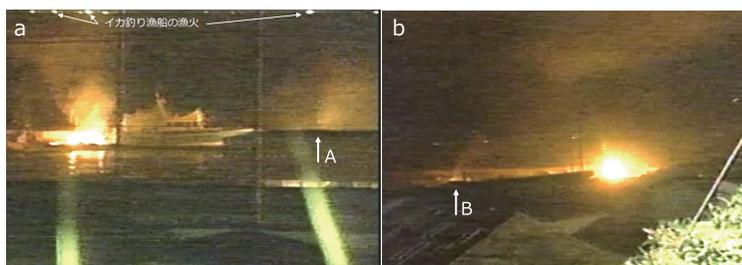


写真1 1993年北海道南西沖地震における奥尻島青苗港に停泊する一隻の漁船の津波火災 (NHK スペシャル「大津波が襲った奥尻島からの報告」, 1993年7月16日20:00-20:50放映の録画から), aとbは時系列順で↑Aと↑Bは防潮堤に衝突して立ち昇る光るミストとその元に見える炎を示す。

漁船に人はいなかったということなので、エンジンは停止していた。この状態で重油が津波を受けて自然着火することはない。

以上が奥尻島青苗港で起きた漁船の津波火災発生原因の説明であった。このことを念頭に、以下に2011年東日本大震災で発生した名取市関上7丁目、および気仙沼沿岸での火災について発生原因を検討した。

3. 関上7丁目の津波火災

3.1 関上7丁目・火災跡の状況

消防研究センターの報告¹⁸⁾によると、「延焼街区は、百数十m四方の街区であった。北西側は水田で焼け止まりが見られ、他の部分は、道路、空き地などで焼け止まっていた。この街区は住宅地だったようで、ほとんどの木造家屋は破壊され

ていたため、ガレキになっていた。北西の水田の中に、建物のガレキ、船等が散乱していた。延焼区域内には、ガレキ以外では2階建ての耐火建物と工場の鉄骨くらいしか残っていなかった。ヘリから写したニュース等のテレビ映像で確認したところ、燃焼しながら流されてきたガレキがこの場所に止まって拡大した状況があった。」ということで、ガレキが火災源と推測している。一方日本火災学会の報告⁸⁾でも「津波の影響により、流れてきたガレキからの出火であり、どのような状況で火が点いたかは判定できず、何等かの火源が瓦礫に着火し燃え広がったものと推定されている。」と述べている。道路に散乱した津波ガレキは消火活動を妨げ、火災は付近一帯に広がり、自然鎮火したのは3月13日10時であった。

写真2aは、2011年3月11日16:08に毎日新聞



写真2 a 名取市関上7丁目の津波火災の空撮映像、撮影日時：2011年3月11日16:08 (毎日新聞社提供), b 震災翌日(3月12日)の火災現場付近の航空写真 (国土地理院提供)。

社ヘリから手塚耕一郎氏が撮影した関上7丁目の津波火災で、地震発生から1時間22分後の写真である。この写真は、翌12日毎日新聞朝刊に掲載され、また週刊朝日「緊急復刊アサヒグラフ東北関東大震災全記録」¹⁹⁾にも載録された。一方、写真2bは国土地理院が震災翌日の2011年3月12日に撮影した航空写真で、火災現場ではまだ白煙が立ち昇っている。なお写真2bは図2aと位置・方位をほぼ合わせて示している。

3.2 名取市関上7丁目：関連情報の時系列整理

まず名取市を襲った津波および関上7丁目で発生した津波火災に関連する報告・証言・映像などの情報を収集し、時系列順に整理した。

14:46 地震発生。

15:06頃 [引き波] 「地震の約20分後、名取川沿いの自宅兼鉄工所の2階で片付けをしていると、川水がざーっと引き、底の土が見えました。2、3分後*、バリバリ、ガシャガシャという音を聞き、海の方を振り向くと、2階建ての鉄工所の倍の高さがある波が迫ってくるのが見えました。」(記事タイトル：<5>波に体が飛ばされた・関上2丁目²⁰⁾。

*この「2、3分後」は次の証言と合わせて考えると引き波が引き切ったあとの2・3分であろう。

15:26-15:36頃 [津波第一波～] 「燃料店を営んでいます。地震発生時は関上小の近くで仕事をしていました。すぐに店に戻ってバイクで得意先など50軒を回りプロパンガスのボンベを立て直し、元栓を閉める作業をしていました。40-50分後でしょうか。関上大橋の近くで「津波が来るぞ」という声を聞き、橋に上がりました。トラックの屋根に上ると、高さ7メートルほどの白い壁が堤防からあふれながら、名取川をさかのぼってきました。津波は3回。いずれも橋の下すれすれを通りました。」(記事タイトル：<3>川さかのぼる白い壁・関上大橋²⁰⁾。

15:50頃 [引き波・津波第一波] 「貞山堀の水門を閉める作業を手伝った時です。堀の水が引い

ていることに気付きました。間もなく名取川の河口から波がうねりながら迫ってきました。午後3時50分頃でした。」(記事タイトル：<4>荒れ狂った波が川を一・水門から関上小²⁰⁾。

15:52 [津波第一波] 「名取市関上港への津波第一波の到達時刻は15時52分、その後観測不能となる。」²¹⁾ 宮城県津波浸水想定図 No.45²²⁾によると、名取市関上での津波の影響が出始めたのは地震から16分(15:02)、第一波到達時間が60分後(15:46)、最大波到達時間が69分後(15:55)で第一波が最大波の高さは10mとされている。

15:57 陸上自衛隊東北方面隊の撮影機による映像*：「名取川に津波発生との情報」を受け、現地上空に向かう。

*この映像はYouTube「宮城県沿岸部を襲う津波」(陸上自衛隊提供映像²³⁾)で見ることが出来る。ただしここに紹介する撮影映像は、陸上自衛隊頭目方面隊から直接提供を受けた。

15:59 [黒い津波] 「宮城県セーリング連盟理事で幼稚園職員の金矢泰弘さん＝同市関上＝が名取市関上地区を津波が襲う様子を携帯電話のカメラで撮っていた。撮影日時は3月11日の午後3時59分と記録され、画像には真っ黒い津波が街をのみ込む様子が写っている。(中略) 階段を上る途中で、ガラガラともものすごい音をたてて津波が襲って来た。屋上に出ると真っ黒い津波がうねっていた。」(記事タイトル：<1>黒い津波、携帯で撮影・葬儀社の屋上から)²⁰⁾。

16:01 [津波第二波以降] 陸上自衛隊東北方面隊の撮影機が名取川を遡上する津波を捉えた。

16:02:29 [関上7丁目・津波火災] 同上機が関上大橋から少し海岸方向に離れた場所に発生した黒い煙(火焰)を映す(写真3a)。

16:08 [関上7丁目・津波火災] 関上7丁目のガレキ火災(陸上自衛隊東北方面隊撮影機による火災現場映像と同じ火災現場)を毎日新聞社ヘリから手塚耕一郎氏撮影(写真2a)。

16:09 [名取川岸に複数の小さな火災] 同上の撮影



写真3 a 名取市関上7丁目の津波火災の空撮写真と火災個所の拡大写真、撮影日時：2011年3月11日16:02。b 名取川岸ちかく（画面のなかほど）に見えるいくつもの小さな火焰（陸上自衛隊東北方面隊提供）。

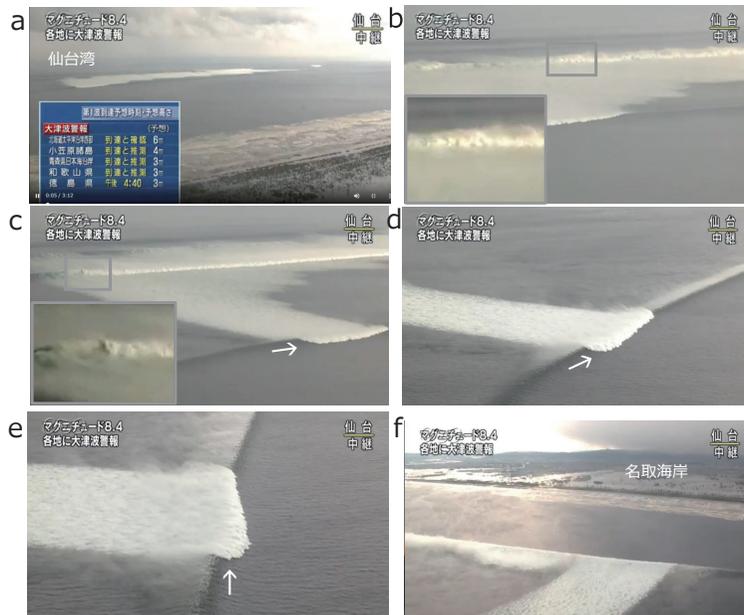


写真4 名取市沖合の白く泡立つ津波，撮影日時：2011年3月11日16:10～（NHK 東日本大震災アーカイブス「名取川河口に津波の第二波、第三波」から）²⁴⁾。b, c 内の枠の白い泡の湧き出しと見られる部分を拡大しそれぞれの写真左下に掲示，c-e の矢印は津波が運ぶメタン泡と考えられる白い泡の塊を示している。



写真5 名取市沖合の白く泡立つ津波, 撮影時刻: 2011年3月11日16:12 (陸上自衛隊東北方面隊提供)。

機が名取川岸近くに発生した複数の小さな火炎を映す (陸上自衛隊東方面隊撮影機: 写真3b)。

16:10～[白く泡立つ津波]NHK 東日本大震災アーカイブス「名取川河口に津波の第二波, 第三波」²⁴⁾に, 名取海岸に接近する白く泡立つ津波を映している (写真4 a-f)。

16:12:24 陸上自衛隊東北方面隊撮影機, 水煙をあげながら名取海岸に迫る大きな白い津波を撮る (写真5 a-d)。

16:30 [関上7丁目・津波火災]「消防本部によれば, 津波襲来直後の16時30分*頃に出火したとのことであった。津波の影響で火災現場に近づくことができず, 消防本部は3月13日10時に自然鎮火を確認した。雑誌掲載の写真 (緊急復刊アサヒグラフ東北関東大震災全記録 朝日新聞出版)を見ると, 壊れなかった建物の周りにガレキが水面上に溜まり, そこが燃えているのが確認できた。この地区を空撮したニュース映像を見ると, 燃えながら流されるガレキや内容物を噴出させながら流れるガスボンベが確認できた。」¹⁰⁾

*陸上自衛隊東北方面隊が撮影した時刻より8分遅い。

3.3 関上7丁目津波火災原因の考察

注目すべきは, 上述した15:59に黒い津波が到達したという金矢泰弘氏の証言²⁰⁾である。黒い津波は微粒の砂を含む海底のヘドロを巻き揚げ, その分密度が大きくなって破壊力が増すことが実験的に確かめられている^{25,26)}。それらの研究成果は, NHK スペシャル「黒い津波」知られざる実像²⁷⁾ (2019) で取り上げられた。この番組には名取市沖合の黒い津波とともに白い泡津波の映像も含まれていたが, これには言及されなかった。

地震から3か月後, 海上保安庁と国土交通省は航空レーザーを使った仙台湾の海底地形調査を行った²⁸⁾。その結果 (図2), 名取川河口付近で「海岸線から沖合約60-100 m の海底に幅約100-350 m のくぼみが数か所あった。周囲の水深は2-2.5 m だが, くぼみの最深部は3.2-3.8 m だった。」²⁹⁾これらのくぼみは津波によって巻き上げられたヘドロ堆積層の痕跡に違いない。そのことは図2の関上港内の右端に港内の他のところとは色相 (濃い青) の異なった元の海底面と思われる色相 (明るい青) のところがあることから推察できる。

ヘドロには河川が運んだ多くの有機物が混じる。有機物はメタン菌により分解されてメタンが発生

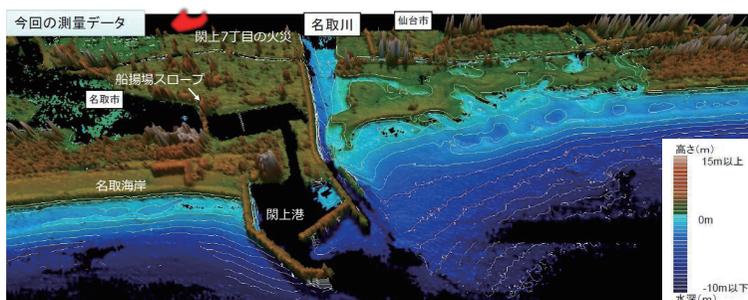


図2 海上保安庁・国土交通省水管理・国土保全局連携による東北地方太平洋沖地震による津波後の海底地形測量の実施結果²⁸⁾(海上保安庁：<https://www.kaiho.mlit.go.jp/info/kouhou/h23/k20110721/k110721-2.pdf>に火災発生場所、地名を記載)。

する。だからヘドロ堆積層は大量のメタンを胚胎しているはずである。名取市沖合でヘドロ層に混じるメタンに関する調査の報告はないが、最近東京湾北部には海底下数m～数十mに胚胎するメタンガス層が地震探査と潜水によるサンプリング採取・分析調査で明らかにされている³⁰⁾。

このことから、図2の局所的な海底地形変化はメタンが混じるヘドロ堆積層が脆弱であるために津波により削りとられた地形変化と推察する。砂混じりのヘドロを巻き上げた黒い津波はヘドロに胚胎するメタンバブルをも巻き上げるため白い泡津波も発生するはずで、それがまさにNHK東日本大震災アーカイブス「名取川河口に津波の第二波、第三波」²⁴⁾の映像(写真4)や陸上自衛隊東北方面隊が撮影した映像(写真5)にある白く泡立つ津波だったと考えられる。なお写真4c, dに見るような横一線の津波ラインが部分的に白く泡立っていることからメタンが局所的に賦存していたことが推測される。

白い泡には段波がつくる空气の泡も含まれようが、映像のなかに見られる勢よく噴き出す泡(写真4b, c中の四角い枠で囲んだ箇所を拡大した挿入図の泡)は段波の波頭が崩れ空气を巻き込んでできる泡とは異なっている。

津波が立ち上がると津波の進行方向に空气を押し出す作用が働くために津波風を誘起する³¹⁾。メタン泡は空气より軽いので津波風によって沿岸に運ばれる。写真4c-eに矢印で示している‘津波

がパワーシャベルの役目を担って雪がきしている’ように見える光景がそれである。

そして写真5dに見るように、津波波頭の上付近には泡が弾けて生じたミスがもうもうと立ち昇っている。このミスはBlanchard効果³²⁾として知られていて、ミスは正帯電している。筆者らもラボ実験でこのことを確認した¹⁷⁾。既述したように、舞い上がった正帯電のミスにより発生する静電気エネルギーはメタンを静電気着火させるに必要な最低エネルギー 0.3 mJ ³³⁾を越えると静電気着火する。

2011年東北沖地震津波は昼間の出来事であったが、夜であればおそらくこの白く泡立った津波は、“光る津波”であった可能性がある。というのも1896年明治三陸津波(発生時刻, 19:20)での証言:「(地震から)およそ30分後, 巨大な黒い「波の壁」がごう音と青い光をともない三陸一体に襲来しました」²⁾や1933年昭和三陸津波(発生時刻, 02:30)での証言:「越喜来村(現在の大船渡市三陸町越喜来)で高地から津波の進行を観察した人は, 浪頭が幅4メートルくらいの帯状をなして真白に光っていた。」³⁴⁾や「安渡の海苔場に手伝いに行っていた織笠村(現在の岩手県閉伊郡山田町織笠)の人の話によると, 地震を感じて後海岸で海を眺めていると, 海面が一体にピカピカ光った。それは夜光虫の光とも違うようであった。(中略)同様の現象は越喜来村の先浜でも観察されたと言うことである。」³⁴⁾

これらからの証言から推察するに、舞い上がったミストがつくる静電気エネルギーによってメタン分子のラジカル(励起状態)が生成され、過渡的に青白く見える発光になった考えられる。つまり白い泡津波近くの大気場は化学的・電氣的に活性な状態にあったといえる。

3.4 関上7丁目、火災現場付近で起きたこと

上述した陸上自衛隊東北方面隊やNHKが撮影した白い津波の映像は、関上港の南隣りの名取海岸に押し寄せているので関上7丁目の火災現場を直撃していない。しかし、図2に見るように関上港の沖合にも海底が削り取られた地形変化があるから関上港に向かった白い泡津波もあったであろう。さらに、関上港の防波堤の内側や広浦の海底も津波で削られ深くなっているようだから、こちら辺りにもヘドロに混じるメタンが賦存して白い泡を火災現場に運んだであろう。津波火災写真2aの左上あたりに見える広浦に白い泡津波が映っている。そこに40m幅の船揚場スロープがあり(写真2b)、障壁のないそのスロープから白い泡津波がまさに流れ込もうとしている光景が見てとれる(写真2a)。そしてその流れの先に火災現場が位置している。名取市関上港への津波第一波の到達時刻は15:52、黒い津波がやってきたのが15:59。その頃に白い泡津波すなわちメタン泡が次々と運ばれてきて、16:02に陸上自衛隊東北方面隊の撮影機が関上大橋から少し海岸方向に離れた場所にたつ火災・煙を映すことに至った(写真3a)。

つぎに関上7丁目ですら起きた津波火災の発火原因を推定してみる。まず地震発生後、停電していることから電源からの漏電、そして津波第一波・直後の最大波で多くの家屋が破損・流出していることから、家庭における煮炊き用などの残り火が火源とは考えられない。一方津波第一波到達時刻15:52から関上7丁目での最初の黒煙・火災発生の時刻16:02までは約10分、この時間で自動車からの発火で火災が起きたとは考えられない。というのも2018年9月4日西宮市甲子園浜の中古車オークション会場にて台風21号による高潮に浸

かった自動車3台から発火、中古車約100台が燃えた。このとき14:00過ぎに海水の浸漬が始まり、15:30頃に火災が発生した³⁵⁾。火災発生まで約1時間半かかっていた。名古屋市消防局で行われた津波による車両火災を模擬した室内実験では、海水に浸かったあとバッテリーが海水を電気分解して水素燃焼からガソリン燃焼が発生するまで25分から4時間を要した^{36,37)}。したがって津波浸水から10分では車からの発火は難しい。むろんこの一帯に石油タンクはないので、従来研究で指摘されていたメカニズム①は発火原因としては成り立たないであろう。

上述した赤間米穀燃料店に尋ねたところ、地震後に元栓を締めてまわった場所は関上1丁目あたりの顧客であったこと、また当時この地区ではボンベからガス漏れが起きたときガスメータのところで栓が締まる機構になっていてボンベの元栓につながるホースが外れたとき元栓で締まる機構になっていなかったとのことだから、プロパンガス漏れは起きたはずである。ただ、プロパンボンベからのガス噴出や着火の投稿動画がいくつかあって、それはガレキの直接的な発火要因となりえる¹⁴⁾。ただ「ガスに引火し火災を生じたものの、数秒後には自然鎮火している」¹⁴⁾。写真3の火災映像は津波第一波から16分経過しているので、プロパンガスの燃焼の勢いが継続しているとは考えにくい。そこで、ほかの可燃物の関与、すなわち上述したメタンを含む白い泡の存在に着目してみた。

メタンを胚胎するヘドロには有機物に含まれるタンパク質などの物質が泡膜に混じり界面活性剤のような作用をする。このため割れにくい泡が形成される。このメタン泡がガレキ集合体の底面や隙間に滞留すると大気に触れる表面積が減るため、海水に濡れて難燃物となっていたガレキは、メタン泡を抱え込んだ引火しやすい可燃物のガレキに変貌すると推察できる。

しかし写真3bに見る名取川岸の小さな炎は、別の発火要因が関与している可能性がある。というのもYouTube映像「3月11日関上中学校からみた津波」³⁸⁾を見ると名取川河口付近を遡上するガレキ群のところどころで小さな火炎が上がって

いる。これらの炎はガレキの隙間から上がっており、それは名取川の岸近くであって川の中央ではない。川の流れと同様にガレキの動きも岸の近くでは遅く、中央に近くなると速くなる。このため遅いガレキと速いガレキの間で激しい摩擦が起きる。そこで考えられる一つの可能性は帯電列の異なる異物質との摩擦による隙間放電である。トライボロジーの分野では“トライボエミッション”として知られる現象で、摩擦を生じる真実接触面では電氣的に中和しているが摩擦面が乖離した瞬間、電荷分離が発生しそのときパッシェンの法則に従った火花放電が起きる³⁹⁻⁴¹⁾。この放電でガレキの底面に滞留するメタン泡やほかの可燃物を着火させる可能性があるが、静電気着火させるだけ

のエネルギーが発生しているかどうか、さらなる検証が必要であろう。

4. 気仙沼湾岸で起きた津波火災

宮城県気仙沼市の火災は大島を含み13か所で発生したが、なかでも鹿折地区での火災は焼失面積約10 haに及び、三陸沿岸の各地で起きた津波火災のなかでもっとも規模が大きく壊滅的な被害を受けた¹⁴⁾。「岸壁に打ち上げられた船が燃え、津波で破壊されたガレキ、林野へと延焼」あるいは「海面上でガレキが燃えていた。炎が波で移動していた」¹⁸⁾などの報告がある。気仙沼湾でおきた津波火災に関連する情報を写真6に示した。この写真では津波火災のおよその発生個所と時刻を示

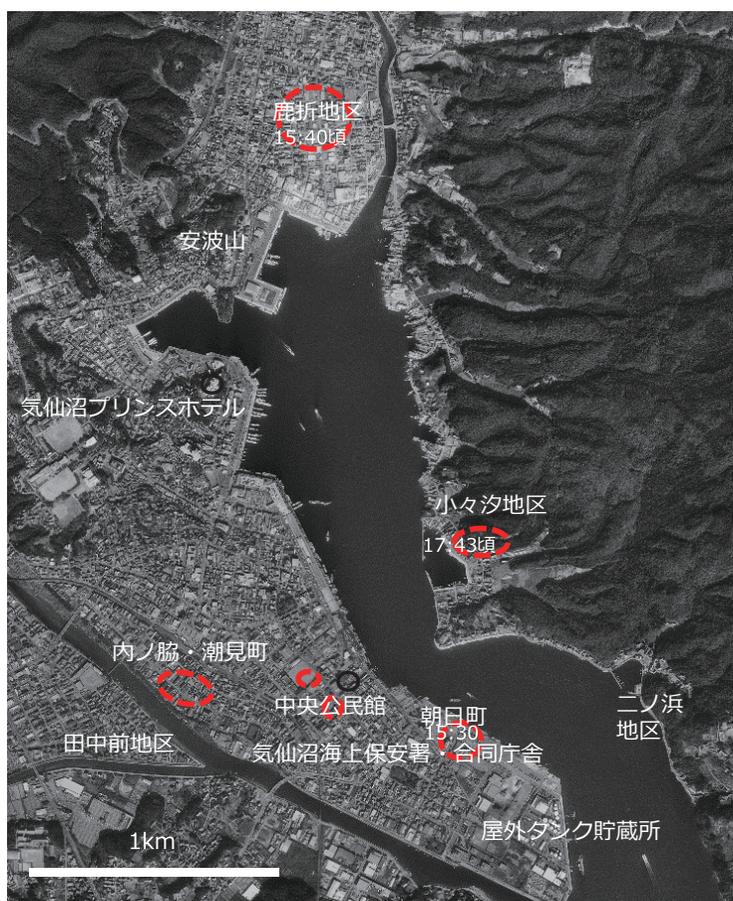


写真6 気仙沼湾沿岸で起きた津波火災（赤い点線内：括弧内は火災発生時刻¹⁴⁾発生個所などを国土地理院撮影の航空写真に追記。

すにとどめている。なお火災発生域の仔細なマップ¹⁴⁾や海上への流出油による火災拡大⁴²⁾については詳細な報告がある。ここでは名取市の津波火災と同様に気仙沼湾で起きた津波火災の発生に関する情報や映像資料を収集し、津波火災の様子を時系列に整理することから検討をすすめる。

4.1 気仙沼市津波火災関連の主な情報の時系列

- 14:46 地震発生直後に停電。
- 15:15頃 [津波第一波]「気仙沼市田中前地区には15時15分頃、津波が浸水してきた」(住民 K 氏談)、ほぼ同時時間帯に気仙沼湾北部を津波が来襲したと考えられる⁴³⁾。
- 15:26～気仙沼プラザホテルから南南東方向の映像、NHK 東日本大震災アーカイブ「気仙沼港で白波を立てて渦巻く波」⁴⁴⁾。に気仙沼に“黒い津波”(第二波)が襲来する直前からの映像、そののちに、まさに黒い津波が襲来したときの映像になって、漁船用の燃料油を貯蔵したターミナルにあった白塗りのタンクが倒壊しかけている様子が映る。
- 15:29 [黒い津波]「鹿折地区に15時29分48秒、黒い津波が到達した」(NHK スペシャル:“黒い津波”知られざる実像から)⁴⁴⁾。
- 15:30頃～気仙沼海上保安署撮影の津波映像:津波が車を押し流す様子、フェリーを押し流す様子、タンクが倒れ流される様子、気仙沼冷凍水産加工協同組合付近の火災、小々汐付近のガレキ火災などを撮影。
- 15:30頃～JNN アーカイブ「[3.11]津波で大きなタンクが流される宮城・気仙沼市」に複数のタンクが流される映像(写真7a)、そのあと白い泡津波が押し寄せる映像(写真7b)、名取市沖合の白く泡立つ津波映像と類似している。しばらくして15:30に朝日町超冷建屋付近で津波火災発生(写真7c)。
- 15:40頃 [津波火災:鹿折地区]「消防本部からの聞き取りによれば、出火時刻は、15時40分頃で、津波の到来後である。3か所から出火した。北側は火のついたガレキが押し寄せ延焼したが、油は関与していない。北側と西側は

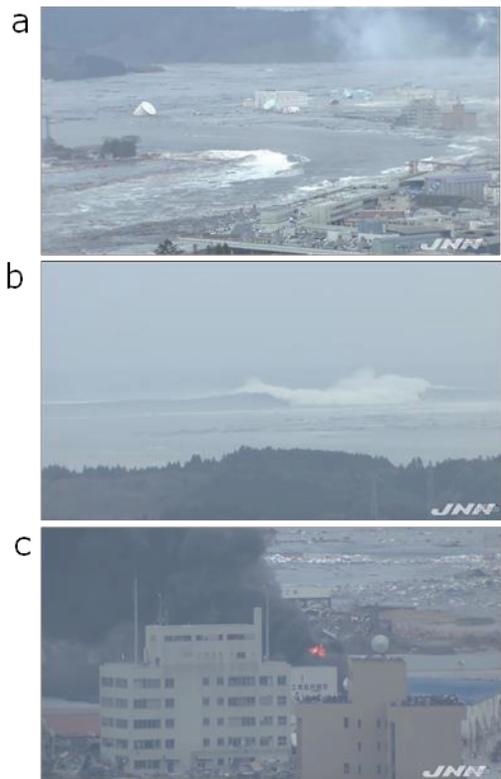


写真7 a 津波で流される燃料タンク, b 白く泡立った津波, c 朝日町の朝超冷気仙沼商港冷蔵工業で津波火災 (JNN アーカイブ「[3.11]津波で大きなタンクが流される宮城・気仙沼市」から:映像提供 tbc 東北放送)。

消防活動によって延焼を阻止した。(中略)出火点付近の現場を見分しても、原因を特定することはできなかった。」¹⁸⁾

- 15:58 [津波火災] 鹿折地区一帯で火災が発生し拡がった (NHK 番組「“黒い津波”知られざる実像」²⁷⁾による)

[津波火災] (鹿折地区)「鹿折唐桑駅付近が激しく燃え始めており、15時58分に消防本部に連絡した」

- 17:30頃 [ガレキ火災] (二ノ浜地区)「17時30分頃、二ノ浜地区の住民 (E 氏) が気仙沼湾上の浮遊物に火が着く瞬間を目撃し、17時34分に E 氏の息子が消防署に通報した。E 氏の証言を要約すると、海面火災の初期の状況は「パパ



写真8 a 小々汐地区でおきた津波火災，撮影時刻：2011年3月11日17:43頃，b 海上に浮かぶ燃えるガレキ，c 気仙沼市中央公民館隣の阿部長商店の超低温冷蔵庫付近に立つ津波しぶき，d 直後の火災（中根圭一氏撮影・提供）。

パパと白か黄色っぽい光が見えたと思うと、湾上で火が着き、瞬く間に火が大きな塊となった。火が着いた時は、海いっばいに油や筏、発泡スチロール等の細かい材料が浮いていた。火の広がりは早く、火の海になってからは、真っ黒い煙が凄かった」⁴³⁾

17:43頃～小々汐地区付近の津波火災(写真8a)

(気仙沼市中央公民館から中根圭一氏撮影)

18:03～海面に浮かぶ燃えるガレキ(写真8b)，阿部長商店の超低温冷蔵庫の建屋近傍で起きた津波火災(写真8c, d)(気仙沼市中央公民館から中根圭一氏撮影)

4.2 気仙沼津波火災についての考察

気仙沼での津波火災は、気仙沼商港冷蔵工業(15:30)つづく鹿折地区(15:40頃)で発生した。いずれもヘドロを巻き込んだ黒い津波の到着時刻(15:29)の直後のことである。焼けただけのようなプロパンガスボンベが火災現場から多数見つかっていて、実際に第一波で流され、元栓がしまっていないボンベからのガス噴出し発火した動画がいくつかあるが、数秒後には自然鎮火している¹⁴⁾。鹿折地区の火災は津波第一波の到達(14:46)から1時間近くたったの火災発生であるから、

自動車火災も排除はできないものの、それが原因している映像などの情報がない。

NHKスペシャルで紹介された「黒い津波」番組²⁷⁾では「震災前の調査で水深6メートルとされた場所は、水深13メートルに深くなっていました。巨大津波が海底を大きく削り取っていたのです。そして、深くなった海底に堆積していたのは黒いヘドロでした。海底のヘドロが、“黒い津波”の正体だったのです」²⁷⁾、「気仙沼湾全体で推定100万トンのヘドロが削り取られた」²⁷⁾と紹介している。名取市沖合の海底で起きていたこと同じである。大量のヘドロにメタンが混じらないはずがない。「火のついたガレキが押し寄せ延焼した」といういくつかの目撃証言を参考にすれば、黒い津波の直後の朝日町気仙沼商港冷蔵工業(15:30)つづく鹿折地区(15:40頃)の津波火災は、やはり気仙沼湾内のヘドロに胚胎していたメタン泡で白く泡立った津波が直撃して静電気火災を起こしたとみるのが妥当と思われる。ところが小々汐地区や内ノ脇地区などの火災発生時刻は前述2つの場所より遅い。白い泡津波の直撃で火災にいたったのは、海上を漂流する船舶、それから飛び火したガレキ類でそれらが岸に寄せられて市街地に延焼していったと考えられる。

中根氏が中央公民館屋上から撮影した映像は、17:43頃から撮影がはじまり小々汐方面の津波火災が映され、そのあと18:03頃から海面に浮かぶガレキ火災が写されていた。そしてカメラは西方向（南郷・本郷地区の方角）に向けられ、「阿部長商店の超低温冷蔵庫」建屋近傍で起きた津波火災の発生の光景をとらえている（写真8c, d）。すなわち津波によるしぶきが舞い上がり（写真8c）、その直後あたりは炎に包まれた（写真8d）。この光景は、写真1a, bに示した津波の衝撃で炎をともなったしぶきがあがる光景と類似のイベントと推測する。すなわち舞い上がったミストの帯電によるメタンの静電気着火であると考えられる。なお、西の空および海面の青白い色は、日没時に見られるブルーモーメント（ブルーアワーともいう）の空の自然光とその海面反射である。

写真8や上述した時系列の記事の海上に浮かぶガレキ火災に関連した情報に注目してみる。（気仙沼市鹿折地区）「内湾の黒い海に無数の火が浮き、文字通り火の海だった。花火のような爆発が起き海上の大型船から火柱が上がった。内湾沿い集落も燃えていた。炎は波に揺られながら少しずつ工場に近づいてきた。」⁴⁷⁾。その様子と思える映像を気仙沼海上保安署が撮影している（写真9）⁴⁵⁾。

また、上述のNHK「黒い津波」番組では、（海上に）「火柱がパチパチと上がったと思ったら一瞬に導火線に火がつくようにビャーって一直線にあっちの大島の方まで火がついた」と、船に乗っ



写真9 気仙沼湾小々汐地区付近の海上で発生した爆発：一瞬立ち昇った炎（映像提供第二管区海上保安本部）。

て漂流を余儀なくされた避難者の証言がある。このころはすでにタンクから流出した重油が海面に広い範囲に拡がっていたであろう。その重油がガレキ火災そして海上での延焼に寄与したと考えられていたようで、NHK番組で紹介された実験によると、「流れ出した重油にバーナーの火を近づけても重油は燃え出さない。しかし木材の破片などを重油に浮かべると木片がローソクの芯の役目をして燃え出す。木が激しく燃え上がると周りの重油の温度があがり液面が燃え始める。次第に燃える範囲がひろがってゆき離れたガレキに燃え移る」ということだった。しかし、バーナーに相当する火種は何だったのか？そして果たして海面に拡がった重油が前述の証言にあるような早い延焼速度で火焰が伝播できるのだろうか？疑問が残る。

その疑問に答えることにかもしれないと、海水を入れた水槽に模擬ガレキを浮かせ、水槽底面のバブルストーンからメタンの泡を発生させてBAM（ドイツ連邦材料試験所）式着火試験に準じた着火・延焼実験を試してみた⁴⁸⁾。この実験で、火災の伝播の様子を写真10に示す。火災の伝播速度は0.2 m/sであった。なお、NHKの番組では「火はわずか10分ほどで3 kmにまで延びていました」と紹介されていたので、伝播速度は約5 m/sになる。室内実験よりもかなり早い、湾内では大量のメタン泡が海上に浮かび弾けていたため、ラボ実験より早い伝播が可能だったのであろう。大気中のメタン濃度が5%を超えると爆発が起き、約8%を越えると爆轟が起き衝撃波が発生する。上述の「花火のような爆発が起き上の大型船から火柱が上がった」という証言は、甲板に溜まった大量のメタン泡が爆轟したからであろう。

ラボ実験で津波火災の素過程を調べることは出来ても津波火災が発生する現場でどのくらいの濃度のメタンが時空間的にどのように振舞ったのか可視化できない限り仮説の検証には限界がある。しかし最近カナダGHGsatがメタンの吸収スペクトルを高精度の分光器を搭載した衛星群をつかって高分解の時空間分布の観測に成功している⁴⁹⁾。宇宙からの観測の目が加われば、今後地震津波によるメタンハザードの研究は格段に進展

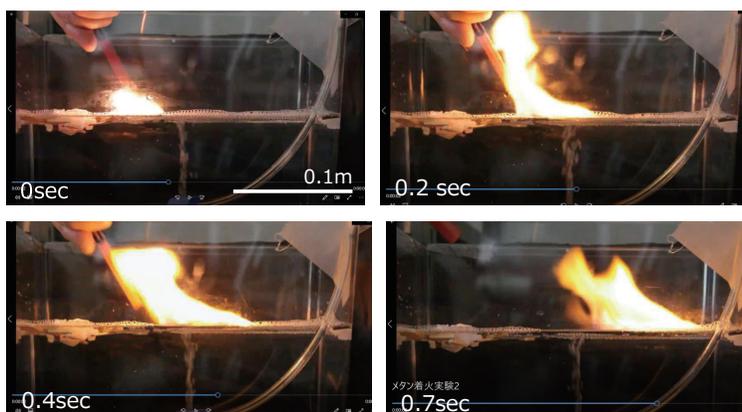


写真10 海水で満たした水槽中でのメタン泡 / モデルガレキ系のピストル型ライターによる着火 (0 sec) と火焰伝播の時系列変化 (0.2 sec → 0.7 sec)。

していくことを期待している。

5. 結言

2011東北沖地震津波で名取市関上7丁目ならびに気仙沼湾岸で発生した津波火災を事例としてその原因について考究した。そして沿岸海底のヘドロとともに舞い上げられたメタン泡が津波風によって沿岸に達して、泡の衝突 / 破壊・ミスト発生やガレキ摩擦帯電により発生した静電気エネルギーがメタンを賦活化・燃焼させたことが起因し、さらにほかの可燃物に引火して大規模火災に至ったという一連のプロセスで説明が可能であることを示した。沿岸海底のヘドロ層は大量のメタンを胚胎するゆえ、上記のメカニズムはヘドロが溜まりやすいリアス式湾岸の他の地域で起きた津波火災の原因にもなっていたと推測する。海底の泥土を巻き上げて生じた黒い津波は、津波火災が発生した宮古市や大船渡市など、リアス式海岸の入り組んだ港湾のある各地でとられた映像で確認されている。

メタンは空気よりも軽く、無色・無臭・無毒であるからメタン泡が押し寄せても住民は気づかないし、焼け跡を調査しても証拠が残らないからメタン原因にたどりつきにくい。将来地球上のメタン排出状況を監視する衛星群からの精細画像が利用できるようなれば地震・津波とメタンの因

果関係の研究は格段に進展していくと思われる。

おわりに、今後起きる可能性のある首都直下地震や南海トラフ地震に伴うであろう沿岸海底の泥土 / メタンの巻き上げは、ジオハザードリスク要因として留意すべきではなからうか。すなわち湾岸・河口のヘドロ / メタン量、津波想定高さ、防波堤の高さ、燃料タンクの津波安全性、垂直避難所の安全性、ガレキの発生など津波火災の要因の健全性・危険性を調べ、それらの情報を地元と共有するなど津波火災の防災・減災に向けての新たなアプローチを期待したい。

謝辞

本稿をまとめるにあたり国土地理院、海上保安庁、国土交通省、NHK、tbc、陸上自衛隊東北方面隊、毎日新聞社からの映像・写真の提供、中根圭一氏、赤間直哉氏から頂いた貴重な情報・資料提供、そして3名の査読者からいただいた有益な査読コメント、さらに(株)コンボン研究所からいただいた研究支援に厚く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 榎本祐嗣：史料に見る地震津浪発光，地学雑誌，Vol.108，pp.433-439，1999.
- 2) 武者金吉：地震発光現象の研究及び資料，岩波書店，1932.

- 3) 釜石市：「昭和三陸津波」, https://w.city.kamaishi.iwate.jp/kyoudo/kamaishi/tsunami_shouwa.htm, 2022年1月14日.
- 4) 海山町郷土資料館：昭和19年12月7日発生 東南海地震津波体験談と記録集, 1994.
- 5) 和歌山県：南海道地震から50年, 都司嘉宜監修, 和歌山県総務部消防防災課編, 1996.
- 6) 大阪朝日新聞：昭和南海地震津波続報, 昭和21(1946)年12月24日.
- 7) 土木学会：1993年北海道南西沖地震震害調査報告, 1997年2月.
- 8) 日本火災学会：2011年東日本大震災火災等調査報告書【要約版】, 2015年3月.
- 9) 廣井悠・山田常圭・坂本憲昭：東日本大震災における津波火災の概要と特長, No.29, pp.1-4, 2011.
- 10) 田村裕之：東日本大震災における火災調査の概要, 第15回消防防災研究講演会資料, pp.5-24, 2012.
- 11) 関澤愛：東日本大震災における火災の全体像と津波起因火災の考察, 季刊消防科学と情報, Vol.108, pp.6-11, 2012.
- 12) 山田常圭：東日本大震災による三陸沿岸津波火災と消防団の活動, 108, pp.12-20, 2012.
- 13) Hokugo, A., Nishino, T., Inada, T.: Tsunami fires after the great east Japan earthquake, Vol.8, pp.584-593, 2012.
- 14) 今津雄吾・野竹宏彰・北後明彦・今村文彦：東日本大震災で発生した津波火災における地形的影響の考察と津波火災危険度評価指数の提案, 自然災害科学, Vol.33 (2), pp.127-143, 2014.
- 15) 北村芳嗣：東日本大震災の津波火災, 気仙沼のケース, <http://www7a.biglobe.ne.jp/~fireschool2/d-D1-26.tunami%20fire.pdf>, 2021.
- 16) 榎本祐嗣・山辺典昭・近藤齋：1993年北海道南西沖地震で青苗地区の津波火災は何故起きたのか?, 目撃証言. NHKTV 映像の検証と着火原因の考察, 歴史地震, No.34, pp.55-63, 2019.
- 17) Enomoto, Y., Yamabe, T., Sugiura, S., Kondo, H.: Possible mechanism for the tsunami-related fires that occurred at Aonae harbor on Okushiri island in the 1993 Hokkaido Nansei-Oki earthquake, *Geosciences*, Vol.9, 253, pp.1-12, 2019.
- 18) 消防庁消防研究センター：平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震の被害及び消防活動に関する調査報告書(第1報), 消防研究技術資料第82号, 2011年12月.
- 19) 週刊朝日：「緊急復刊アサヒグラフ全記録 東北関東大震災, 2011.3.30号.
- 20) 河北新報：関上(ゆりあげ)・名取市を襲った大津波の証言, 2011年4月から10月, http://memory.ever.jp>tsunami>hogen_natori.html, 2022年7月15日.
- 21) 一般社団法人名取市観光物産協会・名取市：東日本大震災 関上・仙台空港被災地復興マップ, 2016年3月.
- 22) 仙台市：宮城県津波浸水想定図, <chrome-extension://efaidnbnmnibpcjpcglclefindmkaj/https://www.pref.miyagi.jp/documents/39258/11sendai-2.pdf>, 2022年8月14日.
- 23) YouTube：宮城県沿岸部を襲う津波【陸上自衛隊提供映像】3/11/2011宮城県沿岸部, 2022年7月7日.
- 24) NHK 東日本大震災アーカイブス：「名取川河口に津波の第二波, 第三波」, 2022年7月7日.
- 25) 高橋智幸・黒川貴博・藤田将孝・島田広昭：津波による土砂移動の粒径依存性に関する水理実験, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 67, pp. I_231-I_235, 2011.
- 26) 木瀬晃周・有川太郎：土砂・シルトを含んだ津波の波力に関する実験的研究, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.76 (2), pp.I_385-I_390, 2020.
- 27) NHK スペシャル「“黒い津波”知られざる実像」2019年4月12日放映.
- 28) 国土交通省・海上保安庁：プレスリリース「海上保安庁・国土交通省・国土保全局連携による東北地方太平洋沖地震による津波後の海底地形測量の実施結果について」, 2011年7月21日.
- 29) 日本経済新聞電子版：津波で海底地形も変形か海保などが測量結果公表, 2011年7月22日.
- 30) Tsuru, T., Amakasu, K., Park, J.O., Sakakibara, J., Takahashi, M.: A new seismic survey technology using underwater speaker detected a low-velocity zone near the seafloor: an implication of methane gas accumulation in Tokyo bay, *Earth, Planets and Space*, 71:31, 2019.
- 31) Goddin, O.A. :Air-sea interaction and feasibility of tsunami detection in the open ocean. *J. Geophys. Res.* Vol.109, C05002,2004, 2004.
- 32) Blanchard, D.C.: Electrically charged drops from bubbles in sea water and their meteorological significance, *Journal of Meteorology*, Vol.15, pp.383-396, 1958.
- 33) Pratt, T.H.: Electrostatic Ignitions of Fires and

- Explosions; Center for Chemical Process Safety of the American, Institute of Chemical Engineers: New York, USA, 182p., 2000.
- 34) 武者金吉：地震なまず，明石書店，192p., 1995.
- 35) 朝日新聞：駐車場付近で火災，車100台が炎上兵庫・西宮，2018年9月5日朝刊27面.
- 36) 井澤義仁：津波による車両火災に関する研究，消防研究室年報（名古屋市消防局）No.41, pp.33-40, 2012.
- 37) 井澤義仁：津波による車両火災に関する研究（第二報），消防研究室年報（名古屋市消防局）No.42, pp.18-23, 2013.
- 38) YouTube 映像：「3月11日関上中学校からみた津波」<https://www.youtube.com/watch?v=qxJ5BKqbJdg>, 2022年8月22日.
- 39) 高橋修・村田雄司：摩擦による荷電粒子放出と帯電現象，静電気学会誌，Vol.20, pp.252-254, 1996.
- 40) Nakayama, K., Suzuki, N., Hashimoto, H.: Triboemission of charged particles and photons from solid surfaces during frictional damage, J. Phys. D: Applied Physics D, Vol.25, pp.303-308, 1992.
- 41) Zou, H. et al.: Quantifying and understanding the triboelectric series of inorganic non-metallic materials, Nature Communications, Vol.11: 2093, 2020.
- 42) Nishino, T., Imazu, Y., A computational model for large-scale oil spill fires on water in tsunamis: Simulation of oil spill fires at Kesenuma Bay in the 2011 great east Japan earthquake and tsunami, 54, 39-48, 2018.
- 43) 消防庁，「東北地方，太平洋沖地震」報（3月21日時点）及び一部の消防本部によるデータに基づき作成された「東日本大震災による火災の状況」.
- 44) NHK 東日本大震災アーカイブス 地震発生から72時間「気仙沼港で白波を立てて渦巻く波」2011年3月11日15:26～.
- 45) YouTube 気仙沼海上保安署撮影津波映像，（撮影：気仙沼海上保安署，撮影場所：気仙沼合同庁舎）
- 46) JNN アーカイブ「[3.11]津波で大きなタンクが流される宮城・気仙沼市」（tbc 東北放送撮影，撮影箇所，安波山から南南東方向）2022年10月27日.
- 47) 天笠雅章，糸井川栄一，梅本通孝：津波起因火災における消防活動と消火活動困難性に関する研究，2011年東北地方太平洋沖地震における被災地域を対象として，Bull. Japan Association for Fire Sci. Eng., 62, 33-48, 2012.
- 48) 日本カートリット(株)：燃焼性の試験，https://www.carlit.co.jp/assessment/evaluation_test/common/combustibility.html, 2022年8月5日.
- 49) European Space Agency, GHGSat-ESA Earth Online, <https://earth.esa.int/eogateway/missions/ghgsat>, 2022年6月21日.
- （投稿受理：2022年10月30日
訂正稿受理：2023年3月1日）

要 旨

2011東北沖地震発生から数十分たって，三陸沿岸各地を黒い津波が襲い，火災が発生，甚大な火災害にいたった。この火災害に関して，さまざまな調査研究が報告されたものの，津波火災の発生の根本的原因については不明なままである。そこで本研究は名取市関上7丁目および気仙沼市鹿折地区で起きた津波火災の原因解明に資する証言・記録や映像などの情報の時系列を整理し検討を行った。そして，1993年に起きた北海道南西沖地震における奥尻島青苗地区で起きた津波火災の我々の調査研究も参考にしつつ，次のようなプロセスを提唱した。

- ① 沖合海底に堆積するヘドロを巻き込んだ黒い津波がそのヘドロの中で生成されたメタンをも巻きあげ，メタンを含む白い泡が津波風によって陸に運ばれた。
- ② メタン泡は岸壁などに衝突・立ち昇った帯電ミストによる静電気エネルギーによってメタンを着火させた。もしくは
- ③ 海面に浮かぶ凝集したガレキの下や隙間にメタン泡が滞留し，帯電列の異なるガレキ同士の衝突摩擦によって静電気着火させた。
- ④ ①もしくは②のプロセスのため名取市関上7丁目や気仙沼鹿折地区などの市街地にある他の可燃物に引火して火災が広がった。