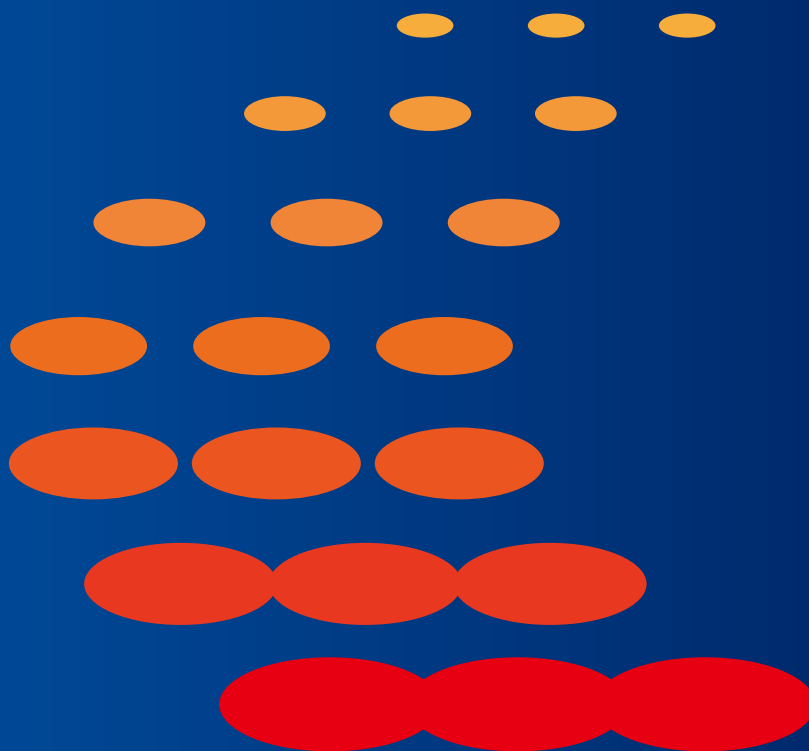


消防研究所報告

通 卷 134号

2025年12月



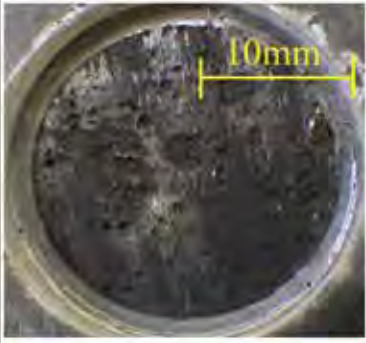
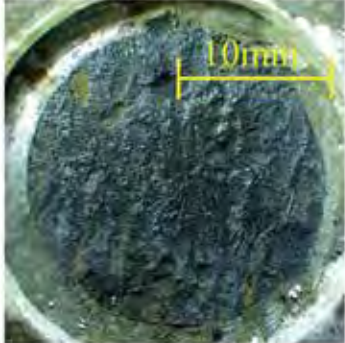
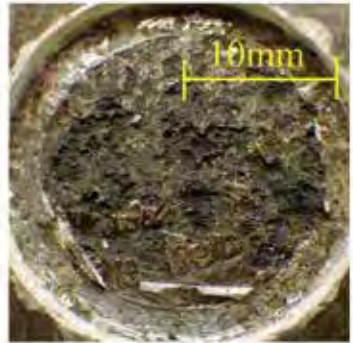
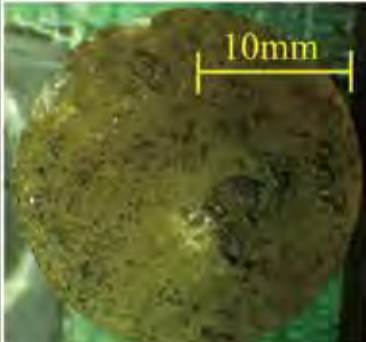
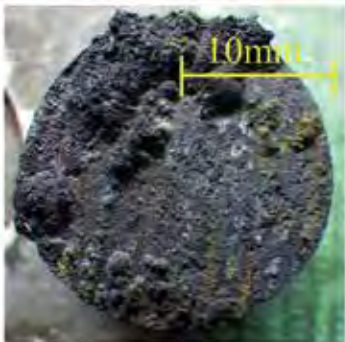
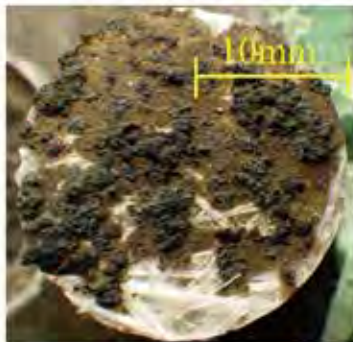
Report of National Research Institute
of Fire and Disaster



市ノ瀬地区第一サイトと土砂の状況（1月17日；本文5ページ図10参照）
Rescue site 1 of Ichinose area and landslide (17th Jan.; See also Fig.10 on page5.)



仁江町の地すべり地内の状況(2月3日)。図21の横軸80m付近の道路まで掘削を進めた状況。切り立ってしまい、これより上方の掘削が難しい状況になった。本文9ページ参照。
Situation of the landslide in Nie-machi (3rd Feb.).
Deposit had been cut for searching from toe to about 80m of Fig.21, and the slope became too steep to progress. See also page 9.

| | (a) Adhesion: 3 MPa | (b) Adhesion: 1 MPa | (c) Adhesion: 3.5 MPa |
|-------|--|---|--|
| Steel |  |  |  |
| Dolly |  |  |  |

付着性試験後に鋼板面に孔食が確認されたサンプルの鋼板面とドリー接着面の外観 本文 22 ページ参照

Surface conditions of the steel substrates (upper rows of the table) and peeled-off coatings (lower rows of the table) after pull-off tests of samples with low adhesion strength. Panels (a), (b), and (c) show samples No. 7, No. 8, and No. 9, respectively. Traces suggesting pitting corrosion were observed on the steel substrates, and rust adhesion on the peeled-off coatings. See also page 22.

目 次

技術報告

2024 年能登半島地震による大規模土砂災害

—技術支援の内容と捜索救助活動における技術的課題—

新井場公德、土志田正二 …………… (1)

地下タンク内面用ライニングにおける防食性寿命評価に関する検討

—電気特性・付着力と音速や使用年数との関係—

徳武 皓也 …………… (15)

2025 年大船渡市林野火災出火前後の大船渡市の気象状況

篠原 雅彦 …………… (25)

— Contents —

[Technical Report]

Large-scale Landslide Disaster Caused by the 2024 Noto Peninsula Earthquake-Technical Support and Technical Challenges in Search and Rescue Operations-

Kiminori Araiba and Shoji Doshida 1

Investigation of anti-corrosion performance lifetime evaluation of inner lining on underground single-shell oil storage tank

—Relationship between electrical property, adhesion, speed of sound and years of use —

Koya Tokutake 15

Weather conditions in Ofunato city before and after the 2025 Ofunato wildfire

Masahiko Shinohara 25

技術報告

**2024 年能登半島地震による大規模土砂災害
—技術支援の内容と捜索救助活動における技術的課題—**

新井場公德、土志田正二

(令和 7 年 1 月 16 日 受理)

能登半島地震により発生した土砂災害のうちの3箇所で行った捜索救助活動に係る技術支援について内容を報告する。これらのサイトでは長期に渡る活動が行われたため、土砂の掘削と移動の量が多くなった。そのことに起因する危険性の管理と効率性の維持が課題となった。今回のような長期間の活動になった場合の情報収集と蓄積のあり方、掘削の安全性の確保の必要性及び他機関連携における技術的課題について検討した。

1. はじめに

2024 年1月1日 16 時 10 分ごろに発生した能登半島地震 (M7.6) により、輪島市及び志賀町で震度7を観測するなどの強いゆれ、地殻変動及び津波が発生した。これらにより誘起された火災、建物倒壊、津波浸水、液状化及び土砂災

害により大きな被害が生じ、死者 401 名 (うち、災害関連死 174 名)、行方不明3名、住家全壊 6,421 棟などとなっている (消防庁第 111 報、2024 年 10 月 1 日現在)。

この地震により能登半島の各地で土砂災害が発生した。このうち3箇所の土砂災害地では捜索活動が難航し、長期間

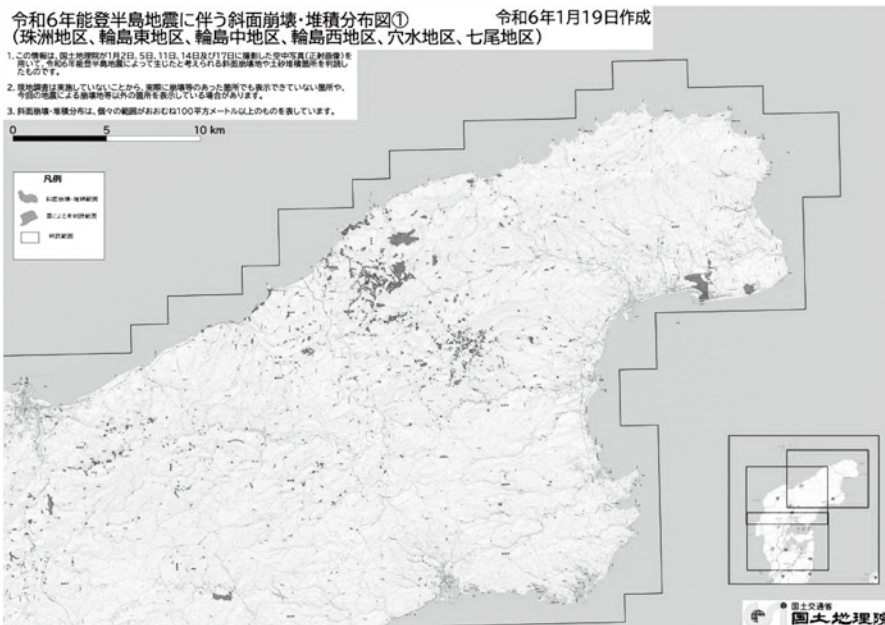


図1 国土地理院による能登半島地震に伴う土砂災害の分布図 (3区分のうちの半島先端部。1月19日作成分。同院ホームページより。)

脚注1) 本報告で用いている災害前のデータは樹木や建物の高さを除外した地盤の高さ (DEM: Digital Elevation Model) であるのに対して、災害後のデータは樹木及び建物の高さが含まれたもの (DSM: Digital Surface Model) を用いた。これは、樹木及び建物の高さの除去には手間がかかり災害直後に入手ができなかったためである。DSM は地震によって地形に変化がなくても、樹木及び建物の高さの分だけ災害前の DEM よりも高くなることに留意願いたい。

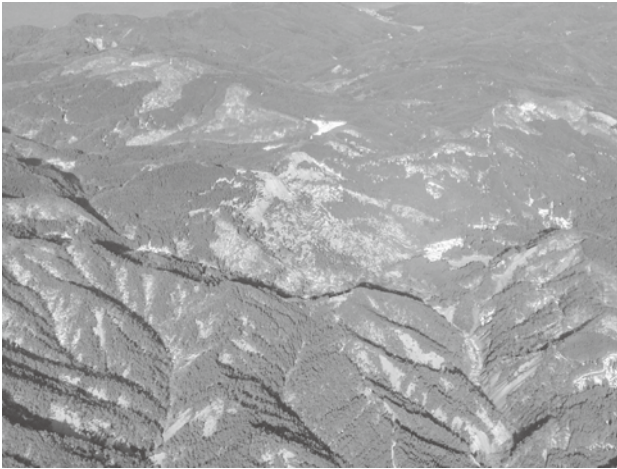


図2 町野町寺山地区周辺の土砂災害の状況（1月2日撮影）。アジア航測（株）・朝日航洋（株）による。写真中央の土砂移動が寺山地区の災害。

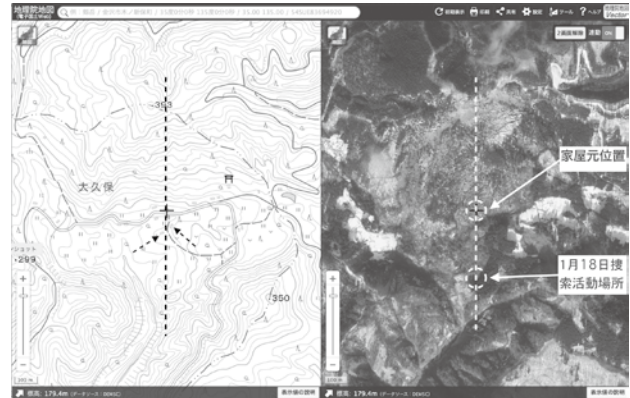


図3 町野町寺山地区の災害前の地理院地図（左）と災害後のオルソ画像(国土地理院サイト「地理院地図」より)

の消防活動が行われた。著者らはこれらのうち3箇所について現場で、1箇所について画像を用いての技術的助言を行った。本稿では、その内容について報告するとともに、その中で見出した大規模な土砂災害地での捜索活動における課題とその対策について検討する。

なお、記載する観察結果及び数値は我々が現場で控えたものやその時点で利用可能なデータに基づくものであり、その後には時間と人手をかけて精査された正確なものとは異なる可能性がある。本技術支援に関する時系列を末尾の附表にまとめた。

2. 活用した外部データ

1972年の高知県土佐市山田町繁藤、1989年の川崎市高津区、2014年の広島市安佐北区などで発生した災害で見られたように、土砂災害現場には二次災害の危険があるが、土砂の挙動は地下の土の性質や地下水の動きという見えないものに影響を受けるため、安全管理が難しい。土砂災害地における安全管理は大きく分けると、発災前後の初動期におけるもの（例えば状況把握のための出動隊の安全管理）と、ある程度時間が経過して体制が整った時期のもの（例えば大隊指揮隊が統括する現場の安全管理）に分けられる。本稿で報告するのは難航した現場におけるものであり、技術支援に入ったのは発災から約半月及び約ひと月経過した現場である。ここで述べるのはその時期における安全管理であって、初動期にはより慎重な安全管理が必要であることには留意願いたい。なお、より早い時期の安全管理については既報を参照願いたい¹⁾。

能登半島地震による災害では、国土地理院により迅速な状況把握が行われた。ホームページによれば、発災翌日から航空写真の撮影が始まり、土砂災害、津波浸水範囲及び火

災延焼範囲を写真から判読する作業が行われ、1月4日から写真及び初期的な判読結果の公開がなされている。その後も撮影及び判読の精査が続いている。図1に1月19日現在の能登半島北東部の土砂災害の分布図を示す。また、公開された航空写真を用いて多方面で分析が行われた。その中で京都大学防災研究所の松四雄騎教授は、土砂ダム²⁾の把握及びその規模の変化の確認を行った²⁾、³⁾。1月4日、9日に発表されているこの情報は、土砂ダムの決壊による二次災害の危険性が懸念される中で、きわめて重要な貢献であった。通常の消防活動では外部機関からの情報は間に合わないことが多いが、大規模な災害が発生し対応の長期化が予測される場合、このような外部データの積極的な活用が有効である。我々の技術支援においても、これらの情報を活用した。

技術支援においては、G空間情報センターが公開している（地震前に計測された）地盤の高さ（DEM）を災害前の地形データとして用い、災害後の地形データとして中日本航空（株）に提供頂いた航空レーザー計測データ（計測日：1月11、14、17日）を著者らが地表の高さ（DSM）に変換したものをを用いた。

3. 町野町寺山地区における技術支援

3.1 現地の状況

町野町寺山（「町野町大久保」とも呼ばれることもある）では、393 mの峰を含む山体が広範囲に崩れ、南にあった広い谷を埋めるとともに谷から出る沢へ一部の土砂が流下した。図2にアジア航測株式会社・朝日航洋株式会社による斜め航空写真（1月2日撮影⁴⁾）を、図3に国土地理院による1月2日の航空写真と災害前の地形図を示す。崩れたのはおおよそ800 m四方の範囲で、全体としてひとかたまりで移動したのか、いくつかの土砂移動が重なり合って発生したのか、

は明らかではない。図の中心の十字のお宅の方が行方不明とのことであった。

我々は1月16日から災害調査のために能登半島へ入っていたが、この現場の技術支援を要請され、横浜市消防局の協力をえて18日に現地へ入った。現場は道路が通じておらず、若山ダムから雪の中を徒歩で1時間程度かけて到達する場所であった。そのため、持ち込める資機材及び活動時間に限りがあった。

現地では神奈川県隊により発見されていた破壊された家屋の周辺で掘削を伴う捜索が行われていた(図4)。この家屋は行方不明の方の家のほぼ真南の土砂の先端部分で見つかるが、広大な被災範囲を考えると極めて幸運なことと思われる。神奈川県隊指揮隊に後日うかがったところ、奥能登広域圏事務組合消防本部の職員の案内のもと、行方不明者(1名)の方の家屋のあった位置を確認し、その後土砂の溜まった場所をその先端にそって捜索しているときに発見したとのことであった。

図3に点線で示した線の地形の断面を図5に示す。点線が災害前、実線が災害後の地形データであり、家屋がもともとあった場所は25mを超える土砂が積もっていることがわかる。元の地盤が残っているかどうかは定かではなく、家屋のあった深さまで掘削して確認するためには本格的な仮設工事を必要とし、道路のない状況で投入できる資機材では不可能と判断した。

3.2 安全管理に関する助言

災害発生からすでに2週間が経過し、降雨や降雪・融雪を経験している状況であった。残っている斜面はある程度の安定性を有していると全般的には評価できる。土砂はほとんどが泥岩であった(図6)。泥岩には、地表に露出した後の乾湿により強度が落ちる性質を有するものがあるが、2週間

経過している割に劣化もそれほど進行していないことから、全般的に安定していると考えた。警戒を要するのは、次の4つの機構と考えられた。

- ① 少しずつ動いている部分があれば、その崩落
- ② 地盤の強度が低下しやすい部分の崩落
- ③ 地下水の作用が変化する部分のすべり
- ④ 土砂ダムの水位上昇又はダムの侵食による土石流

これらについて、現場の堆積物の状況、周囲の斜面の状況、国土地理院の航空写真及び災害前後の地形断面図を参考に、表1の通り評価と対策を立案した。また、緊急退避先としては、土砂の先端より先に健全な杉林が残っており、もともとの災害時の主な土砂移動方向から離れていることもあり、この杉林内とした。以上の内容を、活動中の神奈川県隊のほか、翌日から増強予定の兵庫県隊及び東京都隊に伝達した。

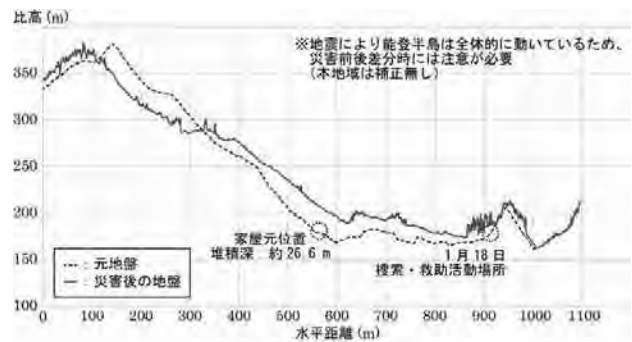


図5 町野町寺山地区の行方不明の方の家を含む地形断面図。点線：災害前(樹木の高さを含まない)、実線：災害後(樹木の高さ含む)



図4 町野町寺山地区の捜索活動状況(1月18日。京都大学防災研究所王功輝教授撮影。)



図6 町野町寺山地区で主に見られる泥岩

3.3 活動の状況

持ち込める資機材を活用して、倒木、岩及び泥を人力で除去する活動が行われていた。対象は発見された家屋とその周辺であった。家屋は土砂の先端にあり、元の地盤に土砂が乗り上げるようにして止まっている状況であった。家屋から東西へ元の地盤を出すように掘削していくのがその時点の手がかりでは合理的と考えられた。

後日あらためてこの災害の写真を詳細に確認したところ、図7に示すように、行方不明の方の家のあった場所周辺の倒木を見ると、南西方向に倒れていた。掘削サイトはこの家屋のあった場所から見て南方向にあたり、倒木が示す土砂の流下方向からはずれているように思われた。ただし、写真に写っている土砂は最後にここに到達したものであり、家屋を押し流したものの流れも同じだったとは限らないことにも留意する必要はある。図3の地図には、行方不明の方の家よりも南に2つの建物(地図上の点線矢印の先)が記載されており、また2つの谷地形が家屋と掘削サイトの間にあることから、発見された家屋が行方不明の方のものであったかどうかについては、疑問が残っている(この家屋以外に手がかりがなく、また土砂が広大に深く堆積しておりすべてを人力で捜索できないことを考慮すると、発見当初この家屋に活動を集中した



図7 町野町寺山地区周辺の災害前(右)と後(左、1月2日撮影)のオルソ画像。国土地理院HPより。白い矢印は家屋があった場所付近の倒木の方向。

ことは合理的である)。

4. 輪島市市ノ瀬地区における技術支援

4.1 災害の概要

輪島市市ノ瀬では標高276mの峰付近から山腹が大規模に崩壊し、溪流へ流れ込み、土石流のように流れ下った(図8:アジア航測株式会社・朝日航洋株式会社が1月2日に撮影)。崩れた山腹は、長さ500m、深さ50mを超え、崩壊の頂部から土砂の先端までの距離は約1,200mであった(国土交通省資料による⁵⁾)。崩れた土砂は河川をせき止めるとともに、一部は土石流のように川を流れ下り、集落を襲った。

図9に国土地理院の航空写真(1月11日撮影)と地形図を示す。写真では影になっていてわかりにくいですが、赤い丸よりも上流(写真右下方向)に水がたまっている。京都大学防災研究所松四雄騎教授が1月4日に発表した資料によれば、下流への土砂流下に注意が必要と評価されている。1月28日には国土交通省より消防庁リエゾンへ監視画像のURLが提供された。この災害では、図9に青色の三角及び黄色の三角で示した2つのサイトにおける捜索救助活動に消防研究センターが関与した(以下それぞれ「第一サイト」「第二サイト」と呼ぶ)。

この災害地については1月13日に輪島消防署に入っていた大阪府指揮支援隊からオンライン会議で相談があった。現地の土砂の物性や堆積状況などが不明ではあったが、土砂ダムに対する安全管理として、上流側に形成された大規模な湛水面については国土交通省による監視が行われていること、国土地理院の写真から5日以降水面の大きさに変化がなく流路が安定していると思われること、現場でも流況に大きな変動はないとのことであったことから、切迫した危険性はないものと評価し、流れ出てくる水の流量及び濁りの変化を監視し、異常があれば退避することで安全管理ができると考え伝達した。また、定期的にドローンを飛ばし、水面の大きさに変化がないことを確認することを提案した。その後、より正確な評価を行うため、第一サイトについては1月18日に、第二サイトについては2月4日に現地へ入った。

表1 町野町寺山地区の危険性評価とその対策案

| リスク対象 | 評価 | 対策案 |
|-------------------|--|---------------------------------|
| ①少しずつ動いている部分 | すでに変状が出ているはずだが、見受けられない。ただし能登半島には地すべりが多いため念の為注意が必要。 | 連続する落石や倒木、急な湧水が生じないか、周囲の崖を監視する。 |
| ②地盤の強度が低下しやすい部分 | 劣化しやすい泥質な岩が多く、落石になりうる。 | 崖には近づかない。 |
| ③地下水の作用が変化する部分・余震 | 前兆は見受けられず、尾根付近から崩れているものが多く可能性は低い、地形的に複雑で、また、融雪も続くため、念の為注意が必要 | ①と同じ。 |
| ④土砂ダムの水位上昇又はダムの侵食 | 活動地点より水面の標高が低いため危険性は低い。減水時に周りの地盤を引き込むかもしれない。 | 水位が急激に低下したら周辺から退避する。 |

4.2 第一サイトにおける安全管理に関する助言

第一サイトでは、2名の方が住んでいた家屋が流され、小さな丘に押しつけられて潰されかけていた(図10、11)。1月17日の調査中に通りかかったところ、三重県隊が活動中であり、土砂の中に人の体の一部見えるのだが、不安定で掘り進めないということであった。掘削箇所(図12)は、流れ

着いた家屋の内側から上流に向けて掘削しているところで、写真の下部に手が確認されているものの、掘削面が不安定で、ほぼ連続的に掘削面のどこかが流れ落ち、時々まとまった塊で落ちるような状況であった(そのため写真では畳で養生してある)。この時点での掘削面の高さは約2.2mで角度は約60度であった。本来であればよりゆるい傾斜に土砂を除去したいが、掘削面から1m程度奥には人力では除去できない規模の岩が積み上がっており(写真上部に一部が見えている)、下方から人力で掘削することは不安全であった。救出のためには岩を除去してよりゆるい傾斜に土を掘削することが必要であり、そのためには重機の導入が不可欠と判断し、その旨提案した。ここまで重機を上げるのに苦労したと聞いているがその後、2名の方が収容されている。



図8 輪島市市ノ瀬地区の土砂災害の状況(1月2日撮影)。アジア航測(株)・朝日航洋(株)による。



図9 輪島市市ノ瀬地区の災害後のオルソ画像(1月2日撮影)と災害前の地形図(右) 国土地理院 HPより。



図10 北東側から見た輪島市市ノ瀬地区の第一サイトの様子(1月17日)。屋根右の開口部で要救助者が発見されている。



図11 南(上流)側から見た輪島市市ノ瀬地区の第一サイトの様子(1月17日)。家屋が流され奥の丘に押し付けられている。隊員の右手の屋根の下で要救助者が発見されている。上流側には岩が堆積している。



図12 輪島市市ノ瀬地区の第一サイトの要救助者発見場所掘削箇所の様子(1月17日)。要救助者を発見したものの掘削面が崩落を繰り返し、それ以上掘り進めない状況となった。



図13 輪島市市ノ瀬地区の第二サイトの様子(2月4日)。土砂の先端から上流に向かって重機を活用して掘削している。掘削後の土砂の運搬・再検索・排出のため、ダンプの動線及び土砂の移動先の管理も重要であった。

4.3 第二サイトにおける安全管理に関する助言

第二サイトについては、2月4日の時点で1名の捜索が継続中であった。居宅の母屋及び別棟は土砂に流されて堆積物の先端付近で別々に発見されていたが、この方の発見には至っていなかった。オンラインで何度か相談があったが、画像だけでは土の性質、地形の凹凸・傾斜、湧水の場所や量などがわからないため、2月4日に現地に入った。

現地では先述の母屋の周辺から家屋があった方向へ重機を活用して、大規模な土砂移動を伴う捜索活動が展開していた(図13)。掘削している土砂は、第二サイトでは泥を主体とし、へし折られた倒木も含まれていた。図14に、母屋の発見位置からそれがもともとあった方向への断面図を示す。災害前の地形を点線で、災害後の地形を実線で表している。

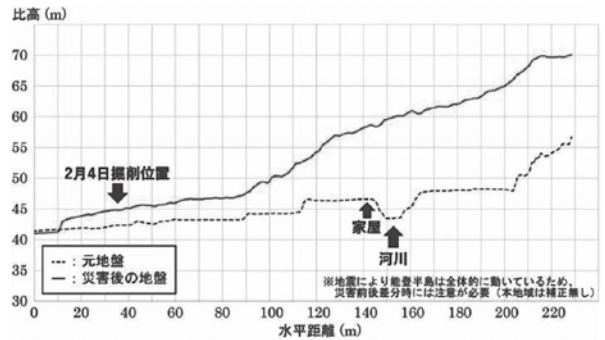


図14 輪島市市ノ瀬地区第二サイトの地形断面34図。点線：災害前の地形、実線：災害後の地形。



図15 輪島市市ノ瀬地区の上流に生じていた土砂ダムのドローンによる定期観測の一例(2月2日のもの。兵庫県隊提供)

もともとは横軸200m付近にあった母屋が図の0mより少し右で発見されたとのことである。2月4日時点では、図の横軸35m付近を左から右へ向かって掘削が進んでいた。

安全管理上の懸念としては、第一サイトで問題となった上流にある土砂ダムに加え、土砂の上に水たまりが大ききもので3箇所生じていた。そのうち2つは1~2m程度の深さと見られ、また、残り一つももとの窪地にできたもので土砂によるせき止めの高さはわずかで、これらは水位が上がらなければ危険性は低いものと評価した。以上のことから、最上流の大規模な土砂ダムに対する安全管理と同様にこれらの水たまりに対する安全管理として、現在堆積物の上を3つに分かれて流れている流路を確保し、その水量又は濁りに変化がないかどうかを地上からの目視及びドローンによる定期撮影で監視し続けることを提案した。流路の目視監視は神奈川県隊により、土砂ダムの定期的な撮影による監視は兵庫県隊により、すで実施されていた。図15に兵庫県隊から提供を受けた土砂ダムの定期観測の画像の一例を示す。兵庫県隊では、日々の活動開始時及び活動終了時にその時点での土砂ダムの様子を撮影したとのことであった。

一方、第二サイト特有の問題として、掘削している土砂が泥を主体として軟弱であり水も湧き出していることから、掘削の進行に伴い不安定化することが考えられた。2月4日時点では掘削面は高さ3mを越しており傾斜は50度程度で掘削が進められていた。より上流(図14で図の右方向)に掘削が進むにつれ、土砂は深くなり、元の地盤の傾斜は急になり、また、地下水の供給源に近くなることから、塊として一定の深さの土砂がすべり出す恐れがあると考えられた。民間重機を指揮していた大手建設企業の熟練技術者と話し合った結果、土砂の深さが4mを超えたところで、その方向へは掘削を止めることを提案した。

以上の人的な安全管理に加え、すでに設置されていた2つの傾斜型センサーの設置位置を確認し、いずれも適切な場所に設置されていることを確認した。一つは神戸市消防局が設置した(映像通話で消防研と相談しながら設置)もので、流路の水が急増した場合に備え、流路の脇に感度を落として設置してあった(図16)。もう一つは、相模原市消防局が設置したもので、万一の大規模な土砂のすべり出しを捉えられるよう、堆積土砂の末端部で全体の動きを反映しやすい

場所に設置されていた。以上の結果をまとめると表2となる。

5. 珠洲市仁江町地区における技術支援

5.1 災害の概要

珠洲市仁江町では、高さ約170m、幅約50mの山腹が崩れ、斜面下部にあった住宅と道路を押し流し、その道路にいた住民9名を巻き込み、農地へ堆積した(図17:アジア航測(株)・朝日航洋(株)1月2日撮影)。図18に国土地理院の地図と写真(1月2日撮影)を示す。もともと岩が多い尾根から崩れたようで、崩れた崖面に岩がいくつか取り残されていた。なお、この現場付近では地震による地殻変動が大きかったことから、地図と写真で座標がずれている可能性もあることに留意が必要である。この現場では2名の方の捜索が長期化し、2月3日と5日に技術支援を行った。図19は2月5日の現場の様子であるが、堆積した土砂は、上部は風化した石と倒木が多く、先端は砂を主体としていた。土砂には崖からの湧水が流れ込んでいるところもあり、平坦部はぬかるんでいた。



図16 神戸市消防局によるセンサーの設置状況。流路が溢れた場合に転倒して警報を発する場所に設置してある。



図17 珠洲市仁江町の土砂災害の状況(1月2日撮影)。アジア航測(株)・朝日航洋(株)による。

表2 輪島市市ノ瀬地区の危険性評価とその対策案

| リスク対象 | 評価 | 対策案 |
|---------------------|---|--|
| ①最上部の土砂ダム | 形成以来ひとつき水面が安定しており、崩壊が切迫しているおそれはない。 | 流下している水の流量と濁りの監視、ドローンによる撮影による水位の監視。センサーあり。 |
| ②土砂中の水たまり | 複数あるが、いずれも土砂がせき止めている水の深さは1~2m | ①と同じ。 |
| ③捜索のための下流からの土砂の切り取り | 軟弱で地下水が多いため、あまり高く切り取りすると塊として土砂がすべり出してくるおそれ。 | 掘削が一定の高さに達したら、その方向へはそれ以上掘削しない。センサーあり。 |

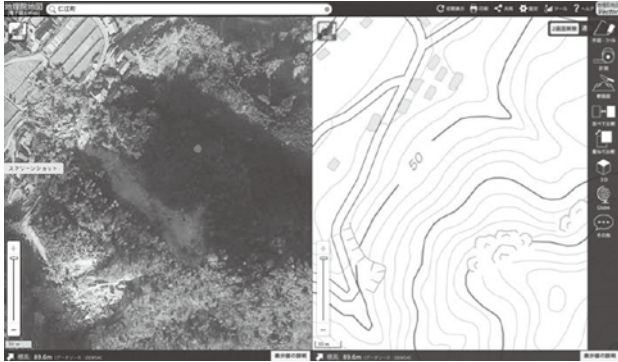


図18 珠洲市仁江町の災害後のオルソ画像（1月2日撮影）と災害前の地形図（右） 国土地理院 HP より。

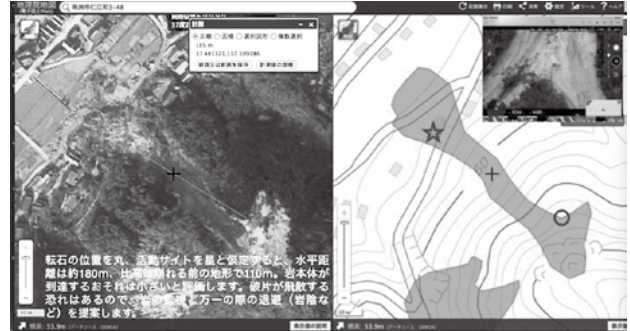


図20 地理院地図の機能を使った転落する恐れのある岩の活動地点への影響評価。



図19 珠洲市仁江町の土砂の様子（2月5日）。風化した砂を主体とする。手前の赤い杭は最後に行方不明者が目撃された場所（の直上）を示すとのことであった。

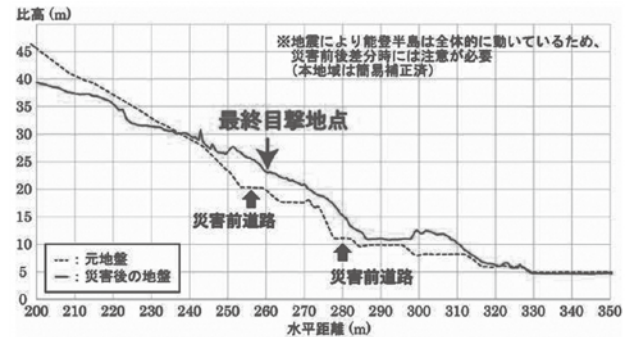


図21 珠洲市仁江町の土砂災害の地形断面図。点線：災害前の地形、実線：災害後の地形。

5.2 安全管理

崖の上部に残った岩の転落危険について1月25日に東京都隊から照会があった。国土地理院の写真に写っていたことから、「地理院地図」の機能を使い、活動地点と思われる場所と岩との位置関係を見たと、高さに対して水平距離のほうが大きく、万一転落しても到達するおそれは低いと評価した（図20）。

2月に入り、2名の方が行方不明であった。土砂の先端の平坦地での捜索は自衛隊の重機隊と連携して進みだし、徐々に斜面側へ活動を広げることとなった。ところが、麓にあった農道の場所の土砂を排除した結果、山側に急な傾斜の切土面ができてしまい、それ以上安全に斜面側へ切り上がっていけるか懸念が生じた。図21は、行方不明者が最後に目撃された場所を含む土砂の堆積エリアの断面図である。この図の横軸80m付近の道路の様子を図22に示す。これより左は図21のとおり、もともと斜面であったところに土砂が積もっている。土砂の厚さが5m近く、湧き水も見られることから図の右側から掘削を進めることは危険と考えた。図20に崩

壊地の北東に隣接している家への細い道があったため重機をこの家の高さにあげ、そこから右側へルートを開きながら重機を進め、最終目撃地点から掘り下がるのが適切と考えられた。この一連の作業には高度なスキルが求められるが、地元の建設業者は、自分たちであれば可能であるとのこととなった。一方、平坦地での活動は自衛隊の重機を活用してそのまま継続した。このとき、図22の斜面に対して平地側からレーザー型の監視装置を用いて、崩れる前兆として変形していないかの監視を行った。

この災害地では以上に述べた作業に起因する危険性が最も大きかったが、そのほかに、崩れた場所又はその両脇が再度崩壊しないか、ということも考える必要があった。地震から日数が経過していること、地下水が少なそうなこと、崩れた面に変状は見られないことから、その危険性は極めて低いと評価した。万一に備え、京都府隊は崩れた面を目視で監視する班を2箇所配置していた。

以上のことをまとめると表3の通りとなる。図23は、京都市の指揮支援隊が作られたもので、2月3日現在の安全管理体制の詳細である。このようにドローンの画像を安全管理や作戦立案に利用し、共有されており、参考になる事例であった。



図22 図22の横軸80m付近の道路まで掘削を進めた状況。切り立ってしまいこれより上方の捜索が難しい状況になった。

6. 大規模な土砂災害地における活動の課題

能登半島地震では、発災当初現地へのアクセスが困難であったため、大規模な捜索救助体制の構築が難航し、現場では限られた資源での対応を迫られ、活動期間が長期化した。そのため、これまであまり注目されてこなかった課題が浮き彫りになったと思われる。筆者が現場で感じた課題をここにまとめ、解決の方策について考察を行う。

6.1. 情報の収集

大規模な災害で長期化した今回の一連の活動において、いくつかの指揮支援隊や県隊指揮隊と活動方針を議論する中で、次のような共通的な課題があった。

- ・捜索範囲の優先順位付けのために災害直後の状況を知りたい
- ・重複検索を避けるために掘削した土砂の移動先を知りたい
- ・環境の危険を評価・監視するために、土砂ダムや流路などの変化を知りたい

緊急消防援助隊では、都道府県隊指揮隊（或いは中隊指揮隊）など現場情報を扱う隊の入れ替えがあることから、これらの問題が発生しやすいと考えられる。これを解決するた

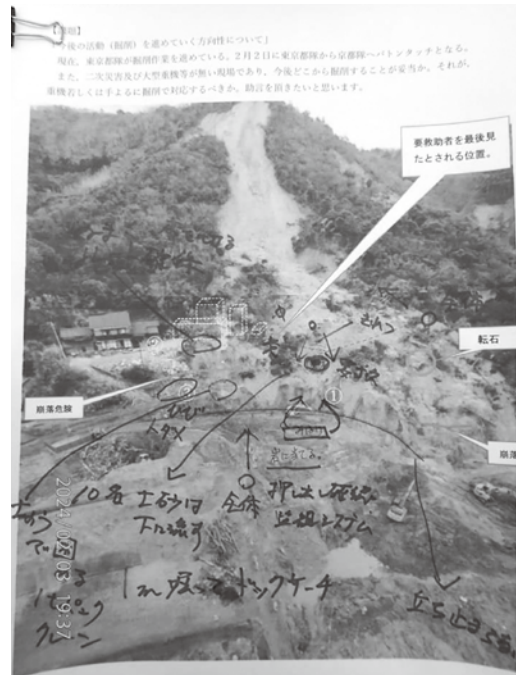


図23 現地での検討を踏まえ、京都市指揮支援隊が作成した2月3日時点での安全管理体制と活動方針。その後民間の重機の支援が得られることになり、変更があった。

めには、標準的な方法で時系列的に活動範囲を画像や地図に記録し、それを引き継いでいくことが有効であろう。具体的には、ドローンによる画像を定期的を取得し、蓄積して入れ替え後の隊も見られるようにしていくことが考えられる。

図25のような情報収集を、土砂災害を対象としたドローンによる標準的な記録（飛行）方法として提案したい。図は珠洲市仁江町の崩壊を例として、いくつかの土砂災害現場で技術支援にあたってきた筆者らの経験から整理したものである。

①の概要把握は、災害の範囲や状況を俯瞰的に捉えるため、図23のような使い方が考えられる。②のリスク評価は、亀裂、転石、湧水の位置・量や土砂ダムの有無などを調べるための飛行であり、二次的な災害の危険性評価及び時間的な変化の監視に用いるものである。③の詳細検索は、行方

表3 珠洲市仁江町地区の危険性評価とその対策案

| リスク対象 | 評価 | 対策案 |
|---------------------|---|--|
| ①再度の崩壊 | 日数の経過、地下水が少ないこと、変状がないことから極めて低い。 | 2箇所からの監視。 |
| ②落石 | 活動地点までは高さより大きな水平距離があり、到達しないと見られる。破片が飛んできるとおそれはある。 | ①と同じ。 |
| ③捜索のための下流からの土砂の切り取り | 軟弱で傾斜もあることから、塊として土砂がすべり出してくるおそれ。 | 重機を捜索予定範囲の上部へ入れて上から掘削をする。切土面にレーザーセンサを設置。 |

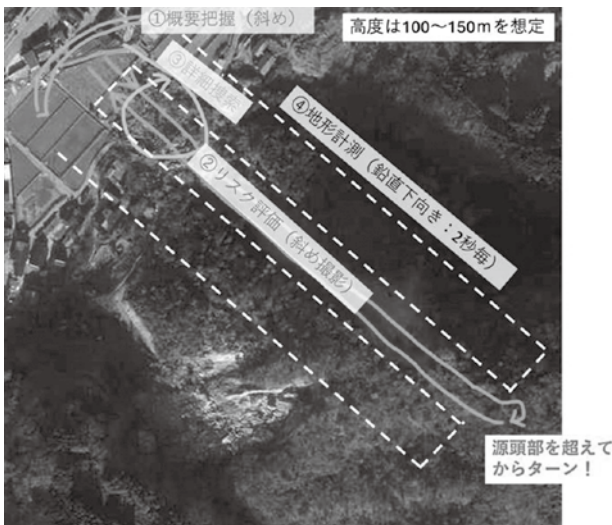


図24 単一の土砂災害地を考慮したときのドローンによる情報収集の目的と飛行経路

不明者の痕跡などを探す目的のもので、低空で巡回飛行することで様々な角度から地表を観察できると思われる。また、土砂の除去履歴も記録できる。④は、鉛直下向きの写真を2秒程度のインターバルで撮影し、SfM*という処理を行うことで対象エリアの平面画像や3次元形状を得るためのものである。この活用例として熱海の土石流災害の事例を既報⁶⁾に示した。図15と図22で用いた災害後の地形はSfMで求めたものではないが、SfMでも同様な図を得ることができる。早期にこれらの情報収集が標準的に行われるようになると、より効率的な活動が展開できると思われる。

また、活動隊の入れ替わりに伴い、災害直後の土砂の分布範囲、経時的な土砂ダム状況変化(面積、そこから流れ出ている水の経路、量、濁り)及び活動方針を後続の隊が知りたいと思う事があったと聞いている。収集分析された情報を後続の隊が活動しやすいように整理し蓄積していく仕組みが必要と思われた。

6.2. 土砂掘削の安全管理と長期的視点

人命の救出には時間特に呼吸の確保の要素が大きい⁷⁾、大規模な災害では、長期間の捜索活動が行われることもある。輪島市市ノ瀬地区や珠洲市仁江町地区はそのような例と言える。いずれの地区でも、堆積したばかりの土砂に対して大規模な掘削が行われ、その掘削が深くなるにつれて不安定化が懸念された。市ノ瀬地区では継続的に水が流入する環境、仁江町では元斜面が急傾斜であったことも安定性に対して不利な条件であり、慎重な対応が必要となった。

消防機関における土砂災害対応訓練では、深さ1m程度までの掘削を伴うものが主である。これは、地表に人が見えていることを想定していること及び人的な作業で掘削できる深さがその程度であるということの2つの要因によると思われる。さらに深く掘削する場合には、掘削面の崩落に対する配慮が必要となり、土木工事であれば仮設工事などが行われる。しかし、土の性質等をふまえた仮設工事を消防機関において設計・施工することは容易ではない(2m程度のトレンチ内での防護措置のような限定的な条件の場合は除く)。軟弱土砂の掘削の高さが数mになることが見込まれる場合には、早めに土木工事の設計・施工にたけた関係機関の協力を得る必要がある。

6.3. 様々な機関との連携

能登半島地震による大規模な土砂災害現場では、自衛隊や民間土木工事業者と連携した活動が行われたが、例えば、道路を応急的に啓開するのか、捜索救助活動の一環として土を安定的にどかしていくのか、などの活動方針で認識の共有が不足していたとの声も聞いた。

これまでの経験から、消防研究センターの技術支援にあたっては、活動中の関係機関には同じ情報を共有するようにしており、市ノ瀬地区においては図14、仁江町地区においては図21を示して現場にいる関係者の認識の共有を図り、それを踏まえ活動方針について議論した。終了後にある自衛隊の指揮官は「話し合う機会があって良かった」と呟かれていた。安全管理は活動方針と密接な関係があり、定期的に実施することで安定的な連携活動が促進されるものとする。

土砂災害対応には重機の活用が必要となるのが一般的である。消防機関が多く保有する小型の重機は、丁寧な検索作業及び住宅地内等狭隘な場所での重量物移動に向いているが、大規模な土の掘削及び土の移動には不向きである。また、走破能力も低く、不整地や斜面でスタックして動けなくなったという話も度々耳にする。多くの土砂災害現場で、より大型の重機との連携が実施されている。大型の重機の調達と操作については、自衛隊及び地元の土木工事業者が詳しく、大型重機を使うオペレーション(土砂の移動計画やリスク評価)などは、都道府県の砂防及び治山の部局やゼネコンが詳しい。このように重機を効率的に活用するうえでも、関係機関との連携を今後も深めていくことが必要と思われる。

脚注2) 対象を様々な角度から撮影した写真を合成して、対象の形状とそれぞれの写真の撮影場所と方向を求める処理をSfM (Structure from Motion) という。ドローンから鉛直下向きに一定間隔(例えば2秒おき)で写真を撮る設定にして、高い高度(例えば150m)で飛行させ、得られた写真ファイル群をSfMのソフトウェアに入力することで、地形の形を知ることができる。なお、この方法では画像に写った物の形状となるので、得られるのはDSMとなる。

まとめ

能登半島地震による土砂災害現場における安全管理に関する技術支援の内容についてまとめるとともに、その活動中及びその後の聞き取り調査で知り得た課題について検討した。

能登半島地震では、発災当初現地へのアクセスが困難であったため、現場では限られた資源での対応を迫られた。その中で、安全確保と効率性確保のせめぎあい、大規模な土の移動を伴う活動のあり方、情報及び資機材の有効活用などの課題が浮き彫りになったと思われる。一方、土砂ダムは警戒が必要であることの普及、ドローンを用いた効率的な状況の把握、画像を元に作戦を立案し共有するなど、消防機関の土砂災害対応が強化されていることも実感した。今後、課題の克服とさらなる対応力の強化の一端を担えるように我々も研究活動に努力してまいりたい。

さいごに

地震により被災された方々に心よりお見舞いを申し上げます。

おことわり

1月16～18日の現地調査は、富山県立大学教授古谷元氏及び京都大学防災研究所教授王功輝氏と合同で実施しました。著者の一名(土志田)は(公社)日本地すべり学会能登半島地震対応委員会判読WGに参加しています。本報告に含まれる見解には、これらの方々との議論を踏まえたものが含まれています。技術支援にあたっては、奥能登広域圏事務組合消防本部の皆様、現地で活動をされていた建設会社の皆様、緊急消防援助隊の皆様、消防庁現地派遣職員の皆様にお世話になりました。記して感謝します。

文献

- 1) 新井場公徳:土砂災害現場の安全管理、第24回消防防災研究講演会資料集,pp. 5-12, 2021.
- 2) 松四雄騎:町野川水系における斜面変動と河道閉塞について,京都大学防災研究所「災害調査報告」ホームページ
http://www.slope.dpri.kyoto-u.ac.jp/disaster_reports/2024NotoEQ/Noto_Machino_Hazard_1.pdf
- 3) 松四雄騎:町野川水系における斜面変動と河道閉塞について,京都大学防災研究所「災害調査報告」ホームページ
http://www.slope.dpri.kyoto-u.ac.jp/disaster_reports/2024NotoEQ/Noto_Kawarada_Hazard_1.pdf
- 4) アジア航測株式会社ホームページ,
<https://www.ajiko.co.jp/disaster/1439>
- 5) 杉本宏之:初動について,2024年度日本地すべり学会シンポジウム資料,2024.
- 6) 土志田正二・新井場公徳:2021年7月熱海市土石流災害における捜索救助活動技術支援と課題,消防研究所報告, No.131, pp. 1-16, 2022.
- 7) 新井場公徳・土志田正二:土砂災害現場における生存救出の可能性に関する考察,第57回(公社)日本地すべり学会研究発表会,2018.

附表 技術支援の時系列

1月1日

16:10 2024年能登半島地震 (M7.6) 発生

1月13日 大阪府隊指揮隊 (在輪島消防署) とのオンライン会議 (輪島市市ノ瀬地区の活動方針について)

1月17日

08:00 穴水町由比ヶ丘地区災害調査

12:20 輪島市市ノ瀬 (第一サイト) 着・調査 (大阪市指揮支援隊と合流)

15:00 現地発

15:40 横浜市消防局より技術支援の打診 (町野町寺山)

20:00 金沢市着

21:00 オンライン会議 (輪島市市ノ瀬の活動について)

1月18日

04:00 金沢市発

07:30 柳田植物公園 (神奈川県隊宿营地) 着

08:40 若山ダム着 (神奈川県隊指揮隊と合流)

10:00 寺山地区着・調査

11:30 寺山地区発

12:50 若山ダム着

18:00 金沢市着

1月24日 京都市指揮支援隊より珠洲市大谷町 (光栄寺) における土砂災害対応に関する問い合わせ (写真等活用) (搜索のための土砂の掘削の安全性について)

1月25日 東京都隊指揮隊より珠洲市仁江町における土砂災害対応に関する問い合わせ (写真等活用) (斜面に残っている転石の安全性について)

1月26日 京都市指揮支援隊より珠洲市大谷町 (光栄寺) における土砂災害対応に関する問い合わせ (写真等活用) (全体状況及び掘削の安全性について)

1月29日 東京都隊指揮隊より珠洲市仁江町における土砂災害対応に関する問い合わせ (写真等活用) (危険性評価について (画像で分かる範囲のみ回答))

2月1日 京都市指揮支援隊 (在珠洲消防署) より珠洲市仁江町における土砂災害対応に関する問い合わせ (写真等活用) (掘削の可能性について (画像で分かる範囲のみ回答))

2月3日

14:00 珠洲消防署発

15:00 珠洲市仁江町着・調査

16:30 珠洲市仁江町発

17:30 珠洲消防署着・活動調整会議

2月4日

09:00 珠洲消防署発

10:15 輪島消防署着 (大阪市指揮支援隊と合流)

11:30 輪島消防署発

11:50 輪島市市ノ瀬 (第二サイト) 着・調査

14:15 輪島市市ノ瀬発

14:30 輪島消防署着

18:00 消防活動調整会議

2月5日

09:30 輪島消防署発

10:45 珠洲消防署着 (京都市指揮支援隊と合流)

12:00 珠洲消防署発

13:00 珠洲市仁江町着・関係機関と活動方針検討

16:00 珠洲市仁江町発

16:45 珠洲消防署着・活動調整会議

Large-scale Landslide Disaster Caused by the 2024 Noto Peninsula Earthquake- Technical Support and Technical Challenges in Search and Rescue Operations-

(Abstract)

Kiminori Araibaba and Shoji Doshida

(Accepted January 16, 2025)

This is a report on the technical assistance provided for search and rescue activities at three of the Noto Peninsula earthquake - related landslide sites. These sites were active for a long period of time, resulting in a large amount of excavation and movement of earth and sand. The challenge was to manage the resulting hazards and maintain efficiency. The report discusses how information should be collected and accumulated, the need to ensure the safety of the excavations, and the technical issues involved in working with other agencies in the case of long - term activities.

技術報告

地下タンク内面用ライニングにおける防食性寿命評価に関する検討
—電気特性・付着力と音速や使用年数との関係—

徳武 皓也

(令和7年6月25日 受理)

石油燃料を貯蔵する鋼製の一重殻地下タンク内面防食用ライニング(ハンドレイアップ工法で施工された不飽和ポリエステル樹脂をマトリクスとするガラス繊維強化プラスチック)の防食性寿命評価方法を検討した。様々な油種について、長年タンク内で使用された10のライニングサンプルから得た、防食性の定量的な指標である付着性・電気特性とライニング内部の音速や使用年数との関係を調べた。

ライニングの硬さに対応する音速を用いて、非破壊かつ実用的に防食性寿命評価が可能かどうかを検証するため、音速と付着性・電気特性の関連を調べた。その結果、音速と電気特性にはよい相関があった一方、それと付着力は弱い相関があった。この結果は、膨潤によってライニングに電流がながれやすくなるかどうかは、音速により評価できる一方で、音速は、ライニング鋼板における界面の剥離の状態と直接的に対応しているわけではないことを示唆している。このことから、現時点で、ライニング防食性の寿命評価への音速の適用は慎重になる必要があるものの、数値は劣化度のある程度を目安として期待できることを示した。

最後に、電気特性・付着力データと劣化閾値や使用年数の関係から、ライニングの防食性の平均寿命を見積もった結果、寿命は安全にみると、約10年と推定された。

1. 緒言

土壤中に直接埋設される仕様の鋼製一重殻地下タンク(以降、地下タンク)は、長い間使用された場合の腐食のリスクが高い。このため、危険物流出防止対策として、長期間使用された地下タンク内面に対するFRPライニング(以降、ライニング)の施工事例が増加している。ライニングが施工された地下タンクからの腐食に起因した危険物流出事故は、これまでのところ起こっていないことから、それは非常に有効な対策と考えられる。一方、ライニングの性能は、経年劣化により徐々に低下することは避けられない。従って、ライニングの防食性能に関する寿命を定量的に評価することが重要である。しかし、現状の内面ライニングの寿命評価は、消防庁の通知¹⁾に基づき、10年に一度以内の開放点検により、ライニングの外観の異常の有無を確認するという、定性的な方法により行われている。また、ライニングの防食性の観点における寿命に関する知見は乏しい上、余寿命予測手法も確立されていない。余寿命を予測するためには、防食性に関連する定量的指標が、時間に対してどのように変化していくかの評価(劣化速度の推定)が必要である。

ライニングのような防食コーティングから、防食性の定量的指標を得る方法としては、電気化学インピーダンス(EIS)測

定及び付着性試験がよく用いられる²⁻⁴⁾。EIS測定では、ライニングの電気の流れにくさであるインピーダンスを計測する。一般には、塗膜内部に電解質溶液が入り込むほどインピーダンスは低下すると考えられている。EIS測定は非破壊検査ではあるが、狭いタンク内において限られた検査時間内で、計測セルを設置する作業(例えば、導電性ペーストを用いてアルミホイル電極をコーティング表面に張り付け、ペーストを浸透させるために一定時間静置するといった作業)が、必ずしも容易とはいえない。付着性試験は、コーティング表面に接着させた円筒治具(ドリリー)を強制的に引き剥がし、その破断状況・応力から塗装鋼板の腐食・劣化状態を直接的に評価できる破壊試験である。一方、防食性劣化を現場で評価する手法としては、非破壊検査が望ましいと考えられる。

地下タンクの開放点検では、電磁膜厚計を用いたライニングの膜厚の測定と超音波による鋼の板厚の測定が実施されることがある。これらは、プローブや超音波探触子(センサ)をライニング上に接触させて計測する方法で、比較的現場で適用しやすい非破壊検査である。超音波は鋼の板厚測定のために一般には用いられるのだが、非破壊であることや実用性を考慮すると、膜内を通る超音波をライニングの防食性の

診断に活用することは、有効な方策であると考えられる。既報⁵⁾で、地下タンク内で生じるライニングの物性劣化のメカニズムの推定に基づいた防食性診断方法の提案をした。具体的には、ライニング物性の劣化は、炭化水素のような有機物の浸透を伴い生じる網目の開放、つまり、膨潤によることを示唆した。膨潤したもののほど、腐食を引き起こす水やイオンがライニングの内部へ浸透しやすく、その結果として防食性が損なわれると一般には考えられる。このため、ライニングの防食性劣化度の目安として、超音波のライニング/鋼板界面からの反射時間の測定と膜厚の測定から推定できる「音速」を活用できる可能性を提示した。ただし、この手法を余寿命予測に活用できるか否かを判断するために、音速とライニングの防食性指標との関係を十分明らかにする必要がある。

音速のライニング余寿命予測への適用性の検証やライニングの劣化速度推定のためには、実機サンプルの評価が極めて有効である。すなわち、実際のタンク内において何年か使用されたライニングの電気特性や付着力を取得し、それらと音速や使用年数との関係を調べるものである。現実に即した極めて有用な情報が得られる一方、多数のデータ収集が容易でないことが課題として挙げられる。この課題を解決するために、長期間使用されたサンプルの経年劣化に関するデータ収集を目的とした消防庁の通知⁶⁾が近年発出され、いくつかの長期使用サンプルのデータを得ることができた。

本報では、長期間使用されたライニングサンプルより得た、ライニング内部の音速と、ライニングの電気特性・付着力の

相関関係について整理し、音速が防食性の余寿命予測に活用できる指標であるかどうかの検証を行った。また、防食性指標と使用年数の関係を整理することで、劣化速度の推定を試みた。

2. 実験

2.1 試験片製作

表1に調査したライニングサンプルに関連する情報(油種、タンク容量、タンク設置年数、ライニング使用年数、平均膜厚・偏差・測定点数、サンプリング条件)を整理した。以降の文章中では、表中の番号に()を付けた形でデータを表示する。これらは情報提供がなされた順序で並べた。タンクの設置年数やライニングの使用年数は、情報提供に基づいた開放や撤去がされる年月から、設置年月及びライニング施工年月を引くことにより推定した。このため、実質的な使用年数は多少前後している可能性がある。可能なものは、タンクからライニング付きの鋼板を50~60cm角程度で切り出した。(5)は、検査員の手でライニングが容易に剥離できる状態であったもので、ライニングを膜のみで入手した。なお、(5)のタンクと同一条件でライニングが施工されたと推定される灯油・軽油・レギュラーガソリンを貯蔵していたタンクが存在したが、これらについては、ライニングは容易に剥離できる状況にはなかった。(8)(9)の現地調査は、同一事業所内の2基のタンクを対象とした。

4300 ハンドヘルド FT-IR (Agilent Technology 社製) を用いて、ライニング樹脂部の化学構造を調べた。ライニング

表1 調査したライニングサンプルに関連する情報(油種、タンク容量、タンク設置年数、ライニング使用年数、平均膜厚・偏差・測定点数、サンプリング条件)

| No | Oil type | Capacity/kl | Years installed/ years | Age of coating /years | Average lining thickness/mm (S.T.D, n) | Sampling condition |
|----|------------------|-------------|---------------------------|--------------------------|---|--|
| 1 | Kerosene | 9.6 | 52.3 | 17.2 | 2.6(1σ=0.9, n=84) | Cutting out the lining steel plate(Side of each tank) |
| 2 | Diesel oil | 9.6 | 52.3 | 17.2 | 3.0(1σ=1.3, n=107) | |
| 3 | Regular gasoline | 9.6 | 52.3 | 17.2 | 3.0(1σ=0.8, n=110) | |
| 4 | Premium gasoline | 9.6 | 52.3 | 17.2 | 2.6(1σ=0.2, n=84) | |
| 5 | Premium gasoline | 9.5 | 47.6 | 20.0 | 2.8(1σ=0.7, n=156) | Lining film only *4 portion: Ceiling, Sides, Bottom and Head plate of the tank. |
| 6 | Heavy oil | 4.1 | 52.1 | 10.6 | 3.3(1σ=0.2, n=49) | Cutting out the lining steel plate(Head plate of the tank) |
| 7 | Heavy oil | 3 | 53.4 | 11.8 | 3.8(1σ=0.3, n=26) | Cutting out the lining steel plate(Bottom of the tank) |
| 8 | Diesel oil | 9.5 | 50.5 | 11.0 | 2.7(1σ=0.2, n=56) | Field survey *Adhesion test: Bottom |
| 9 | Diesel oil | 9.5 | 50.5 | 11.0 | 2.7(1σ=0.2, n=56) | *Thickness and ultrasonic testing: Side |
| 10 | Heavy oil | 5 | 58.3 | 12.6 | 2.9(1σ=0.4, n=102) | Cutting out the lining steel plate(Side and Bottom of the tank) |

の表面に、装置から突出したダイヤモンドATRを押し当てることで測定を実施した。サンプルの凹凸によりスペクトルの取得が難しかった場合は、サンドペーパーを用いて表面の目粗しを行い、凹凸を除去した。積分回数は16回、分解能は 8cm^{-1} とした。測定の結果、表1に示したサンプルは、全て同じようなスペクトル挙動を示した。(1) - (5)の樹脂は、イソフタル酸の不飽和ポリエステル樹脂であることが、既往研究^{5,7)}において推定されていることから、主な樹脂はそれであると判断した。

本報で示したサンプルの施工方法は、全てハンドレイアップ工法である。電動工具による素地調整を行った後、下塗りを刷毛やローラーで塗布し、その上に、ガラスマット(ガラス繊維を無方向に均一分散させたマット)に樹脂を含ませた複合層を形成させるという、一般的な工法によると推定される。膜厚は、下塗り・複合層を合わせて、2mm以上となるように施工される。図1に、典型的なライニング断面の走査型電子顕微鏡(SEM)【JSM-IT500、日本電子株式会社製】による観察結果を示す。灰色の樹脂部内に白色のガラス繊維が不均一に分布していることがわかる。

表1の中には、後述の装置を用いて、適宜選定した箇所に対する計測で得た平均膜厚値、標準偏差(1 σ)、測定点数(n)を示した。入手サンプルの中には、ライニングとライニングの継ぎ目である重ね部が存在し、膜厚が5-6mmと厚いケースもあった。付着性や電気特性は、重ね部において劣化の挙動が変わる(重なっていない部位と比べて厚い分、劣化までの時間が長くなる)可能性を考慮して、重ね部を避けた部位で評価を行った。

2.2 ナノインデンテーション測定

圧子(試験体を押し込むための硬い材料)を荷重-除荷させた際の荷重と変位などの関係から、硬さを算出した。小片に切断したライニング試験片の断面が試験実施面となるよう

にエポキシ包埋し、鏡面研磨まで仕上げた。測定装置としてI Nano (KLA社製)を用いた。試験方法は、連続剛性測定法(CSM; Continuous Stiffness Measurement)とした。CSMは、微小なAC信号を加えて圧子を振動させながら負荷-除荷試験を行うことにより、圧子の押し込み方向に対して連続的に荷重-除荷曲線の傾きに相当するスティフネスSを取得できる方法である。圧子は、バーコピッチ圧子(三角錐、内角 142.3°)を用いた。AC荷重の振幅は2nm、周波数は110Hzとした。最大押し込み深さは3000nm、最大荷重は50mNとした。押し込み深さ・荷重のいずれかが最大となる時点まで圧子を押し込んだ。各々の測定点について、圧子押し込み方向の押し込み硬さ H_{IT} の深さプロファイルデータを取得した。 H_{IT} は(1)式に基づき、試験力 F を、圧子と試験片が接している接触投影面積 A で除すことで得られる。値が大きいほど硬いことになる。

$$H_{IT} = \frac{F}{A} \tag{1}$$

接触投影面積 A は、圧子と試料表面が接触している深さを表す接触深さ h_c の関数 $A=f(h_c) = 24.56h_c^2$ であり、 h_c は変位センサにより計測される押し込み深さ h_t と圧子に依存するパラメータ ϵ (バーコピッチ圧子の場合は0.75)を用いて、(2)式のように定められる。

$$h_c = h_t - \epsilon \frac{F}{S} \tag{2}$$

データ取得の方法は既報⁷⁾で詳しく示したので、概略を説明する。各試験体について、ライニング断面の表面から約0.1~0.5mm程度内部の位置を計測の開始点とした。樹脂部の特性を得るために、ガラス繊維は避けるようにした。第一点から、ライニング樹脂部の水平方向にかけて圧子を複数箇所

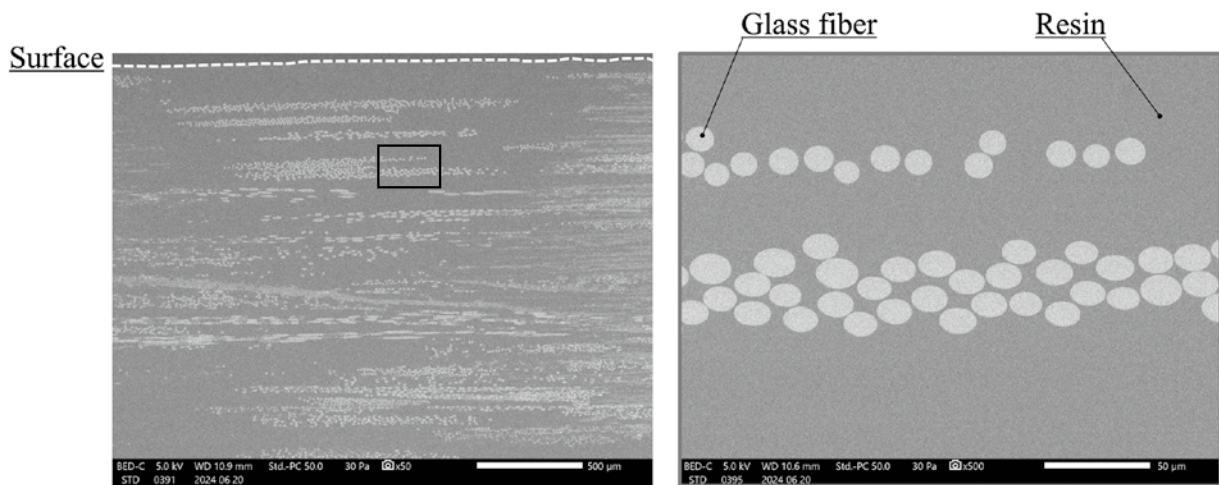


図1 典型的なライニングの断面のSEM像

押し込んだ。計測値は、圧子を押し込んで1000nm以上の領域で概ね安定した。このため、1000nmまで押し込めば、表面粗さの影響なく樹脂部の硬さを評価できると判断し、1000nm ± 50nmの範囲のH_{IT}を樹脂部の硬さと仮定した。水平方向のデータ取得を終えた後、ライニングの膜厚方向に約0.2～0.3mm移動して、上記の水平方向への測定を行う操作を繰り返すことで、ライニング内から複数のデータを取得した。なお、素地鋼板近傍には下塗り塗料であるプライマーが残存し、主たる複合層の特性と異なる可能性が考えられたため、剥離面近傍から、0.1～0.2mm程度以上離れた位置までを計測範囲とした。

2.3 音速の推定

ライニング内部の音速 C は、ライニングの膜厚 d を、超音波のライニング/各境界層（鋼板あるいは空気層）界面からの反射エコーの1/2の反射時間 t で除すことで推定した。

ライニングの膜厚の測定方法は、ライニングが鉄に密着しているか膜のみであるかによって異なる。前者のライニング鋼板では、電磁膜厚計（Elcometer 456と専用プローブ）を用いて、ライニングの上にプローブを押し当てることで計測した。電磁膜厚計では、プローブを構成するコイルと鉄（磁性体）の距離に応じて磁束が変わることで、コイルに流れる誘導電流値も変わることを利用して膜厚を計測する。後者のライニングのみの試験体については磁性体がないため、電磁膜厚計での計測ができない。このことから、シックネスゲージ（421FAV986、測定子先端：φ1.5mm、ミットヨ製）を用いて、ライニングを挟み込んで膜厚を計測した。シックネスゲージの測定子先端の径（φ1.5mm）は、後述の超音波探触子のセンサ径（φ13mm）と比べて小さかったことから、超音波センサを接触させた位置の範囲内の9箇所からデータを取得し、その平均値を膜厚とした。

図2にライニング鋼板に対する超音波厚さ計による反射時間測定

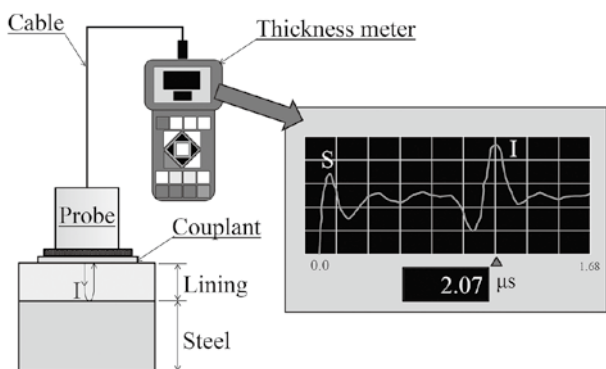


図2 ライニング鋼板に対する超音波厚さ計による反射時間測定

の概念図を示した。超音波厚さ計、ケーブル、探触子として、エビデント社製の38DL-PLUS、LCB-74-4、M1036（一振動子型探触子、センサ径φ13mm、2.25MHz）を用いた。ケーブルにより装置と接続した探触子を、接触媒質（ソニコート、太陽日酸ガス&ウエルディング株式会社）を介してライニング表面に接触させることでライニング/鋼板界面（ライニング単体の場合はライニング/空気層界面）からの超音波の反射時間を得た。計測は、厚さと音速が既知である校正用の鋼試験片を用いて、センサ接触面で $t=0$ となるように校正をした後に行った。図2の右側に示したように、ライニング表面へのセンサの接触で現れる表面（S）エコーの次に現れる大きなエコー（Iエコー）に対応する反射時間を、装置のゲインを調整しながら読み取った。

約50-60cm角のサンプルに対して、数十mm間隔で目印と通し番号を付け、同一位置の膜厚と反射時間を測定した。一例として、図3にNo10のサンプルにおいて、ライニング膜厚と鋼板界面からの反射時間を測定した箇所を数字で示した。当該サンプルでは、中央部の約30cm角内をおよそ50mmピッチで、49点の膜厚と反射時間のデータを取得した。切り出しサンプルの場合、端部近傍は切り出し時の剥離によって超音波が透過しないなど、計測に影響が及ぶことも懸念されたため、できる限り中央部付近を選定した。

電磁膜厚計と超音波厚さ計における計測データは、装置に搭載されている機能・ソフトウェアを用いて、CSV形式で出力した。各々の通し番号に対応する膜厚や反射時間を数値計算ソフトに入力することで、平均音速値を算出した。

2.4 付着性試験

#220のサンドペーパーを用いて、ドリリー（φ20mm）の表面及びライニング表面の目粗しを実施した後、瞬間接着剤を用いてライニング表面にドリリーを押しつけることで接着させて1日以上硬化させた。硬化後に専用のカッターを用いてドリリー

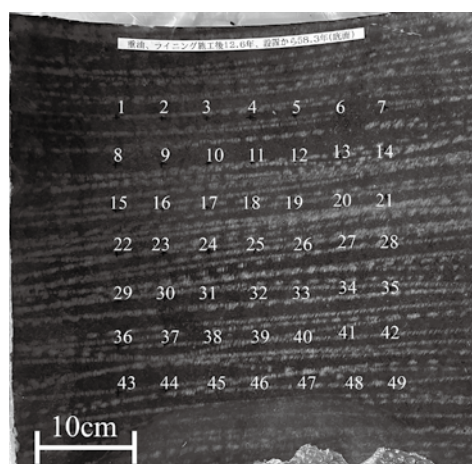


図3 ライニング膜厚と超音波の反射時間の測定箇所

の周囲に切り込みを入れた後、アドヒージョンテスター (F106-3、Elcometer 社製) を用いて、ドリローを可能な限り一定速度で引っ張り、メモリを読み取った。試験は、各サンプルの数か所に対して実施した。

付着力の劣化閾値としては、3.5MPaを設定した。この数値は、以下に示す指針や既往研究を参考としたもので、これ以下で、ライニング下の鋼板での腐食が発生しているおそれがある数値と仮定した。日本高圧力技術協会の「石油タンクの防食及び腐食管理指針」(HPIS TR G105 2017)⁸⁾において、地上タンク内面用のガラスフレックコーティングのコーティング/鋼板界面の剥離については、3.5 MPa 未満が不良とされている。Tianら⁹⁾は、潜水艦外面に施工されるコーティングの劣化加速試験後に付着性試験を実施した。それによれば、10 MPa 以上の初期付着力を有している試験片に対しての加速試験を行い、概ね 4 MPa 程度に至ったものは、素地鋼板の腐食は観察されなかったものの、塗膜の全てが素地鋼板から剥離した。さらに、概ね 3MPa 程度に至ったものでは、鋼板の腐食が確認され、加速試験時間とともに、腐食のサイトが増えた。

2.5 EIS 測定

既報⁵⁾において示した、2電極構成のEIS測定による接液モニタリング試験で得た、未使用材と(1)～(4)サンプルの $\tan \delta_{1\text{kHz}}$ を本報告でも用いた。この指標は誘電正接と呼ばれ、絶縁体の絶縁性の損失の度合いを示すものである。防食用のライニングについては、数値が大きくなればなるほど、水やイオンが浸透し、絶縁性が損なわれたことに対応することとなる。先述の日本高圧力技術協会における技術指針

では、この数値が0.35以上になると不良であると判定される。これは元々、屋外貯蔵タンクの底板内面に施工されるガラスフレックコーティングの現地調査で得たデータから経験則に基づいて定められたものである。当該コーティングを対象とした劣化加速試験を行った研究¹⁰⁾のデータにおいては、この数値を超えると塗膜のふくれ(外観異常)が生じ始め、鋼板面の腐食も相当に進展した。従って、 $\tan \delta_{1\text{kHz}} > 0.35$ とは、コーティングに相当電気が通りやすくなり、鋼板界面で激しい腐食が進展している状況に対応する可能性がある。ただし、地下タンク内面ライニングに対して、この基準値をそのまま適用できるかについては、検討の余地がある。

3. 結果と考察

3.1 音速の防食性寿命評価への適用性検証

本節では、各サンプルから取得した硬さ、音速、 $\tan \delta_{1\text{kHz}}$ 、付着力の関係を整理した結果について示す。表2に、各試験体における硬さ・音速・付着力の平均値(Ave.)、標準偏差(1 σ)、測定点数(n)を示した。(0)は疑似的な初期特性である。初期特性について、硬さと音速では、類似の仕様で製作した未使用材のデータを、付着力では、(1)～(10)までで取得したデータの内、接着剤での破壊が生じた箇所(高い応力でライニングが剥がれなかった箇所)の平均値を採用した。

3.1.1 硬さと音速の関係

図4にライニング樹脂部の硬さと音速の関係を打点した結果を示す。樹脂部硬さと音速を打点するという考えは既報⁵⁾に示したものであるが、ここでは本報で示したハンドヘルド型

表2 各試験体における硬さ・音速・付着力の平均値(Ave.)、標準偏差(1 σ)、測定点数(n)

| | Hardness /MPa | Speed of sound(C_{lining}) / m · s ⁻¹ | Adhesion / MPa |
|------|--|--|--|
| (0) | Ave.=323, 1 σ =5, n=90 (Non-used sample.) | Ave.=2440, 1 σ =77, n=12 (Non-used sample.) | Ave.=6.1, 1 σ =1.5, n=28 (Sound data) |
| (1) | Ave.=195, 1 σ =8, n=90 | Ave.=2245, 1 σ =107, n=78 | Ave.=6.6, 1 σ =1.9, n=11 |
| (2) | Ave.=190, 1 σ =26, n=89, | Ave.=2254, 1 σ =116, n=94 | Ave.=4.8, 1 σ =1.4, n=10 |
| (3) | Ave.=30, 1 σ =10, n=90 | Ave.=2056, 1 σ =112, n=104 | Ave.=2.3, 1 σ =1.1, n=8 |
| (4) | Ave.=16, 1 σ =4, n=88 | Ave.=1911, 1 σ =80, n=83 | Ave.=1.6, 1 σ =0.6, n=7 |
| (5) | Ave.=13, 1 σ =11, n=360 | Ave.=2055, 1 σ =56, n=129 | Delamination, Assuming 0 (Ref) |
| (6) | Ave.=311, 1 σ =10, n=65 | Ave.=2433, 1 σ =50, n=49 | Ave.=4.0, 1 σ =1.3, n=8 |
| (7) | Ave.=293, 1 σ =13, n=80 | ①. Ave.=2645, 1 σ =130, n=24 ②. Ave.=2466, 1 σ =78, n=26) | Ave.=3.4, 1 σ =1.4, n=4 【Pitting Fig.8(a)】 |
| (8) | Ave.=321, 1 σ =6, n=50 | Ave.=2382, 1 σ =56, n=56 | Ave.=2.9, 1 σ =2.7, n=6 【Pitting Fig.8(b)】 |
| (9) | Ave.=325, 1 σ =5, n=55 | Ave.=2418, 1 σ =53, n=56 | Ave.=3.6, 1 σ =1.1, n=5 【Pitting Fig.8(c)】 |
| (10) | Ave.=311, 1 σ =15, n=120 | Ave.=2391, 1 σ =75, n=102 | Ave.=5.2, 1 σ =1.2, n=15 |

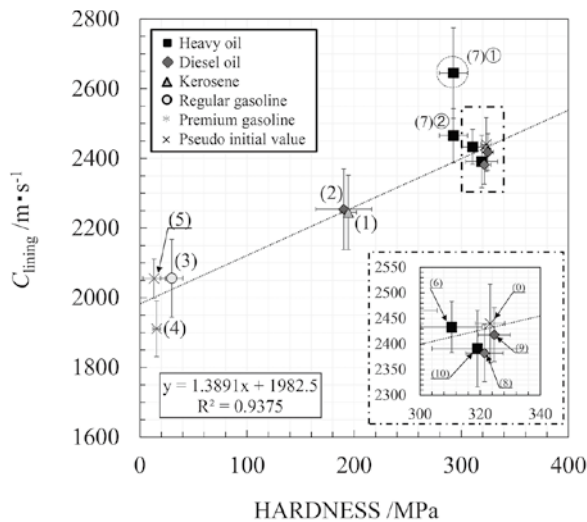


図4 硬さと音速の関係。図中に一点鎖線部の拡大図を挿入した

の装置による測定構成計測を実施するとともに、試験点数を増加させることでデータの拡充を図った。プロットは平均値を、エラーバーは1σ標準偏差を示す。一点鎖線の範囲の拡大図を図中に挿入した。(7)のデータについては、①. 付着性試験後に測定した結果と②. 付着性試験前に測定した結果(既報⁵⁾で示した超音波探傷器による測定構成により実施)を記した。

本図から、樹脂部の硬さと音速にはよい相関があることがわかる。樹脂部が柔らかいほど、ライニング内の音波が伝わる速度が遅い挙動を検知できたと考えられる。(7)①のプロットについては、回帰直線からのずれが生じた。このずれは、付着性試験の影響でライニングが鋼板面から剥離したことにより生じた計測誤差であると考えられる。実際、付着性試験実施前の(7)②データは、回帰直線に近づいている。以上のことは、超音波の測定が、周辺の影響を受けることを示している。なお、(7)以外のサンプルについても、本報の測定構成で得た平均音速値と先述の超音波探傷器で得た平均音速値の関係を調べたが、それらは、原点を通る回帰直線の周辺で打点できた。以上の結果から、既報で述べた音速を計測することでライニングの硬さを非破壊で検知できることの再現性を確認できたものと考えられる。

3.1.2 音速と電気特性・付着力の関係

先述の結果から、ライニング内部の音速は、樹脂部の硬さ、すなわち、膨潤度と相関すると解釈できるかもしれない。そこで、膨潤と結びつく可能性のある音速と防食性の関係を調べるため、 $\tan \delta_{1\text{kHz}}$ ・付着力と音速の関係を打点した。図5(a)(b)に結果を示す。(7)の音速のデータについては、3.1.1の検討結果から②のデータを採用した。

$\tan \delta_{1\text{kHz}}$ は、約1か月間3wt%NaCl水溶液を浸透させた後のデータとした。(0)は、ハンドレイアップ工法で施工し

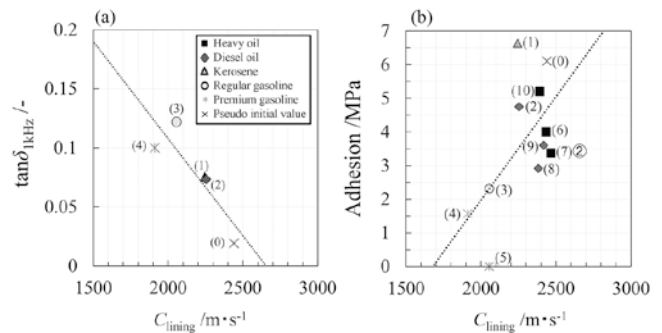


図5 $\tan \delta_{1\text{kHz}}$ 及び付着力と音速の関係

た未使用のイソフタル酸不飽和ポリエステル材より得た。(1)~(4)は、任意の3か所から得た $\tan \delta_{1\text{kHz}}$ の平均値とした。

付着性については、同一タンク内サンプルから得たデータ群であっても不良の箇所が局所的に存在し、数値のばらつきが大きい場合もあったが、ここでは「ランダムサンプリングで得た付着力の平均値」が「タンク内面ライニングの平均的な健全度」に相当すると仮定して評価することとした。また、側面や底部などの部位別には分けず、一つのタンクから得たデータは、一つデータ群として取り扱った。(5)のサンプルは、ライニングが開放時に容易に剥がれる箇所であったことから付着力は0と仮定した。従って、(5)の数値は参考値であることに留意しなければならない。図5(b)のデータの元となった個々の破断状況・付着力については、(1)~(4)は既報¹⁰⁾のデータを、(6)~(10)は表3で整理したデータを用いた。Aは接着剤(Adhesive)、Cは複合層(Composite layer)、Pは下塗り層(Primer)、Sは素地鋼板(Steel substrate)である。/は界面を示している。Cの場合は、ガラス繊維が目視で確認できた。下塗り層近傍で破断した場合、内部破壊と鋼界面の剥離を厳密に特定することは難しかった。従って、この場合は下塗り層の内部破壊と鋼界面の剥離が、複合的に生じているものとした。図6にドリリーを接着させたライニング鋼板断面概略図を示した。

図5(a)を確認すると、 $\tan \delta_{1\text{kHz}}$ と音速の間には、よい相関があること(相関係数:0.76)がわかる。ライニング樹脂部の高分子の網目が開く膨潤により、ライニング内へ電解質溶液が染み込みやすくなった挙動を、電気特性の代わりに音速で検出できたものと推定される。図5(b)の付着力と音速については、柔らかいものほど付着力は低下する傾向はある一方で、必ずしもよい一致を示しているとはいえない(相関係数:0.36)。これは、ライニング/鋼板界面あるいはライニング内部の層間が引きはがされるような付着性の劣化は、膨潤のみならず、水やイオンの拡散浸透の影響も受けるためであると考察される。(付着性劣化を引き起こすのに十分な量の水やイオン種が、塗膜内あるいは鋼板面へ到達するには、濃度差を駆動力として開放された網目を拡散する現象や、図

表3 No6～No10のライニング鋼板に対して実施した付着性試験結果の総括表

| (6) | | (8) | | (10) | | |
|-------------|---------------------------|-------------|---------------------------|-------------|---------------------------|--|
| Break point | Adhesion /MPa | Break point | Adhesion /MPa | Break point | Adhesion /MPa | |
| 1 | A: 100% | 1 | A: 100% | 1 | A: 100% | |
| 2 | | 2 | C: 70%, P and/or P/S: 30% | 2 | | |
| 3 | C: 100% | 3 | C: 10%, P and/or P/S: 90% | 3 | | |
| 4 | | 4 | | 4 | | |
| 5 | C: 60%, P and/or P/S: 40% | 4 | | 5 | | |
| 6 | C: 50%, P and/or P/S: 50% | 5 | P and/or P/S: 100% | 6 | | |
| 7 | C: 20%, P and/or P/S: 80% | 6 | | 7 | | |
| 8 | C: 5%, P and/or P/S: 95% | | | 8 | | |
| (7) | | (9) | | 9 | | |
| Break point | Adhesion /Mpa | Break point | Adhesion /MPa | 10 | | |
| 1 | A: 100% | 1 | A: 100% | 11 | C: 100% | |
| 2 | | 2 | C: 55%, P and/or P/S: 45% | 12 | C: 75%, P and/or P/S: 25% | |
| 3 | P and/or P/S: 100% | 3 | C: 25%, P and/or P/S: 75% | 13 | C: 45%, P and/or P/S: 55% | |
| 4 | C: 5%, P and/or P/S: 95% | 4 | C: 20%, P and/or P/S: 80% | 14 | C: 35%, P and/or P/S: 65% | |
| | | 5 | C: 10%, P and/or P/S: 90% | 15 | C: 50%, P and/or P/S: 50% | |

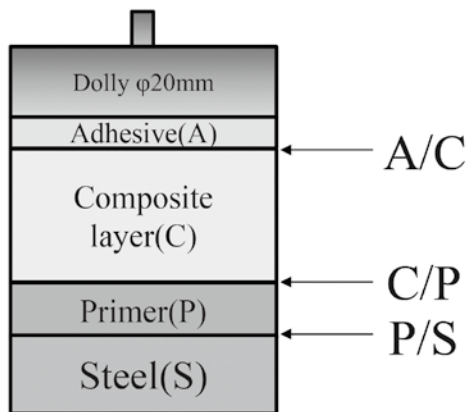


図6 ドリーを接着させたライニング鋼板の断面概略図

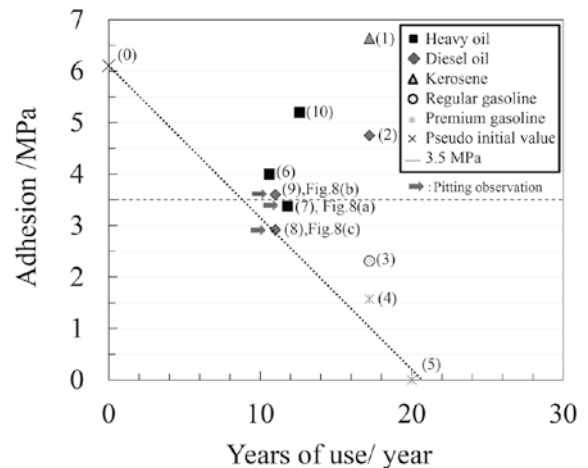


図7 平均付着力と使用年数の関係 (付着力の疑似的な時間変化)

1に示したようなガラス繊維と樹脂の界面を辿る現象が、複雑に関与するものと推定される。) 以上のことから、音速は、界面の腐食・劣化の状況を厳密に表現しているわけでないことに留意する必要があるものの、防食性劣化度のある程度の目安にはできるものと考えられる。

次に $\tan \delta_{1\text{kHz}}$ と付着力データと劣化閾値 ($\tan \delta_{1\text{kHz}} > 0.35$, Adhesion $< 3.5\text{MPa}$) との関係を確認すると、 $\tan \delta_{1\text{kHz}}$ は閾値を上回っていないものの、付着力は 3.5MPa を下回っているものが見受けられる。このことから、主に石油燃料と接する地下タンク内面ライニングにおいて、水やイオンの影響により、電気特性が劣化するまでの時間と比べて、付着力が劣化するまでの時間の方が早いものと考えられる。

3.2 防食性劣化指標の疑似的な時間変化と劣化挙動の考察

3.2.1 付着力の疑似的な時間変化

図7に各サンプルの平均付着力に対する使用年数の関係 (付着力の疑似的な時間変化) を示す。矢印で示したプロットのデータ群には、目視で鋼板面に孔食の痕跡が観察された。図8には、試験後の鋼板面とドリー面の外観を示す。鋼板面については、(a) では、黒さびが孔に堆積している様子が、(b) (c) では、赤錆の形成や鋼板面が凹凸している様子がわかる。また、いずれのサンプルも、ドリー面には、黒錆が付着していると見受けられ、特に (b) (c) では顕著である。このような特徴が観察されたタンクについては、平均付着力が 3.5MPa 付近にある。このことから、劣化閾値設

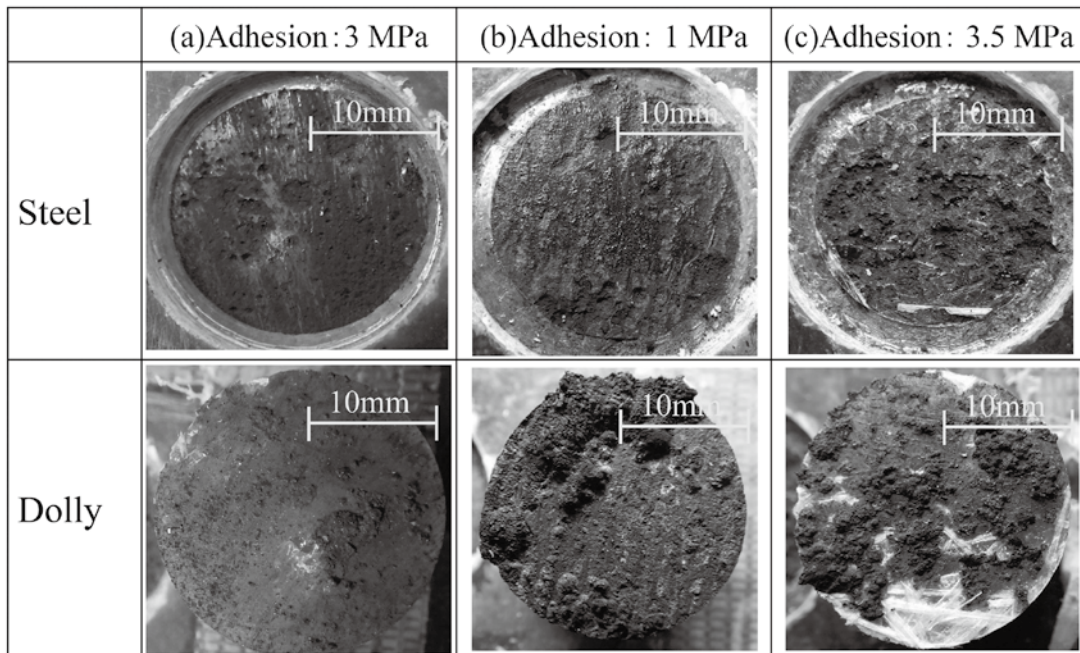


図8 付着性試験後に鋼板面に孔食が確認されたサンプルの鋼板面とドリリー接着面の外観

定の妥当性が示唆される。

図7から、各サンプルの平均的な付着力は時間に対して明確に低下する傾向があるわけではなく、大きくばらつくことがわかる。これは、各々のタンクの施工・環境条件などが同一でない状況が反映されているものと考えられる。ここで、安全側で(全てのプロットが直線の上側になるように)、疑似初期値とした(0)と最も早く付着力が低下したと考えられる(8)のデータを結んだ線を、付着力が0に至るまで外挿したものが点線ようになる。この点線から、施工・環境といったタンクの個々のばらつきを考慮しない場合におけるライニング施工後の安全側での平均的な寿命は、およそ10年程度と推定される。

3.2.2 長期ライニングの典型的な劣化状況の考察

上記の結果を踏まえると、10年程度経過した際の安全側に見た内面ライニングの典型的な状況としては、水やイオンの浸透などにより付着性が損なわれているものが考えられる。一方、図5(a)の(1)～(4)のサンプルでは $\tan \delta_{1\text{kHz}}$ が0.35を下回っていることから、長期間使用後であっても、ライニングは電気がながれにくい(ライニングそのものは未だに健全である)状況にあることが期待できる。このような場合にあっては、塗膜下の素地面に形成したアノード・カソード(水やイオン種が鋼板界面に達することで発生する腐食サイトで必ず対になるもの)の間で、酸化還元電流がライニングを介して流れようとするだろう。しかし、ライニングの抵抗が未だに高ければ、当該電流は抑制されるため、鋼板界面で激しい腐食が生じるまでには至らないと考えられる。ただし、電

気特性については、入手サンプルの制約(ライニングを膜のみで入手、現地調査、セルを設置できる箇所が取れないなど)により計測できないことも多かったため、今後のデータ蓄積により、長期的な劣化状況をより明確にしていく必要がある。また、化学分析により、ライニング下での鋼板の腐食量を確認し、腐食速度を明らかにすることも有効であると考えられる。

4. 結言

本報では、様々な石油燃料を長年貯蔵した実際のライニングサンプルの付着力・電気特性と音速や使用年数との関係を調べることで、ライニングの防食性寿命評価方法について検討した。その結果、以下のことを明らかにした。

- ・ライニング樹脂部の硬さ、すなわち膨潤度と関連する可能性がある音速は、電気特性とよい相関がみられた一方で、付着力とは弱い相関が確認された。このことから、膨潤によって、ライニングに電気が通りやすくなるかどうかは音速により検知できうる一方、音速は、界面の剥離の状況を必ずしも厳密に表現しているわけではないことが示された。従って、ライニング防食性寿命の評価に音速を活用することについては現時点では慎重になる必要があるものの、それは劣化度のある程度の目安になると考えられる。今後も長期使用サンプルのデータを収集・蓄積し、油種による物性劣化の違いや施工時期などの条件を整理すれば、開放点検時の非破壊検査で得た音速値を用いた余寿命評価が達成できる可能性がある。

・電気特性・付着力データと劣化閾値の関係から、付着力が劣化に至るまでの時間の方が、電気特性が劣化に至るまでの時間よりも速いと想定された。そこで、付着力と使用年数の関係をプロットして、安全側で寿命を見積もったところ、約10年と推定された。この結果から、10年程度使用された際のタンク内面の腐食・劣化が比較的進行している状況としては、水やイオンの浸透などによりライニングが鋼板に接着する機能は損なわれている一方、ライニングそのものは電気が通りにくい状態が維持されており、ライニング下での活性な腐食は生じにくいものが推測された。

謝辞

消防庁の危険物保安室には、長期使用されたサンプルの情報収集に関する通知発出のために多大なる協力を頂きました。施設等災害研究室の松下人美さんには実験室試験や解析等の、吉田祐一研究官には現地調査のデータ取得の補助をしていただきました。消防本部の皆様から、開放・撤去に伴う情報提供及びサンプリング・現地調査に関するご協力を賜りました。地下タンクを保有していた事業者の方からは、たいへん貴重なサンプルを提供いただきました。ここに謝意を記します。

参考文献

- 1) 消防危第144号平成22年7月8日付、既設の地下貯蔵タンクに対する流出防止対策等に係る運用について、https://www.fdma.go.jp/laws/tutatsu/assets/220708_ki144.pdf
- 2) Liu Y., Wang J., Liu L., Li Y. and Wang F. Study of the failure mechanism of an epoxy coating system under high hydrostatic pressure, *Corrosion science*, Vol.74, pp.59-70, 2013.
- 3) H. Hayashibara, E. Tada and A. Nishikata, Evaluation of Epoxy Coating for Ballast Tanks under Thermal Cycling by Electrochemical Impedance Spectroscopy, *ISIJ International*, Vol. 56 (11) , pp. 2029-2036, 2016.
- 4) Wang X., Wang G., Jing Y., Zheng K., Wang R., Liu X., Gao K., Sun J., Yuan Y. and Meng F. Aging Behaviors of Organic Electrophoretic Coating on Magnesium Alloy, *Coatings* 14 (8) , 952, 2024. (<https://doi.org/10.3390/coatings14080952>)
- 5) 徳武皓也：石油燃料中で長期間使用された不飽和ポリエステル樹脂系ガラス繊維強化プラスチックの物性評価に基づく防食性の実用的推定方法，*材料と環境*，72(1)，pp.10-21，2023
- 6) 消防危第346号令和5年12月13日付、内面の腐食を防止するためのコーティングを施工した地下貯蔵タン

クの開放点検等に係る情報提供等について(依頼)，<https://www.fdma.go.jp/laws/tutatsu/items/663c947d1e15593a71c4818849215800df9ec7af.pdf>

- 7) 徳武皓也：高温のレギュラーガソリンと蒸留水浸漬で生じるガラス繊維強化プラスチック製ライニングの劣化挙動，*消防研究所報告*，第133号，pp.7-16，2024
- 8) 日本高圧力技術協会規格；“石油タンクの防食及び腐食管理指針”，2017，HPISTRG105 (2017) (<https://www.hpij.org/file/1348>) .
- 9) Tian W., Liu L., Meng F., Liu Y., Li Y. and Wang F., The failure behaviour of an epoxy glass flake coating/steel system under marine alternating hydrostatic pressure, *Corrosion science*, Vol.86, pp.81-92, 2014.
- 10) 徳武皓也：長期間使用された地下タンク内面防食用ライニングの電気特性・付着性評価及び防食性能劣化に関する考察，*圧力技術*，62 (2) ，pp.23-32，2024

**Investigation of anti-corrosion performance lifetime evaluation of inner lining on
underground single-shell oil storage tank
—Relationship between electrical property, adhesion, speed of sound and years of use—**

(Abstract)

Koya Tokutake

(Accepted June 25, 2025)

A method to evaluate the lifetime of the anti-corrosion performance of the inner lining (Composed of glass fiber-reinforced polymer with an unsaturated polyester resin matrix applied by the hand layup method) for single-shell underground steel tanks storing petroleum fuels was investigated. The relationships between electrical properties and adhesion, which are typical quantitative indicators of anti-corrosion performance, and the speed of sound in the lining (C_{lining}) were examined for ten lining samples that had been used in tanks for many years with various oil types. C_{lining} is the non-destructive indicator corresponding to the hardness of the lining.

The study examined the relationship among C_{lining} , electrical properties, and the adhesion to assess whether C_{lining} can be used to non-destructively and practically evaluate the lifetime of the anti-corrosion inner lining. As a result, C_{lining} showed a strong correlation with the electrical properties, whereas only a weak correlation was observed between C_{lining} and the adhesion strength. These results suggest that C_{lining} can be used to evaluate whether current flows easily through the lining due to swelling, although it does not directly correspond to lining delamination or steel corrosion. Therefore, although caution is still required when applying C_{lining} to the lifetime evaluation, it is expected that C_{lining} can serve as an indicator of the degradation of the lining's anti-corrosion performance to some extent.

Finally, based on the relationship between the electrical properties, adhesion, degradation threshold, and years of use, the average lifetime of the anti-corrosion performance of the lining was estimated. The lifetime was conservatively estimated to be about 10 years.

技術報告

2025年大船渡市林野火災出火前後の大船渡市の気象状況

篠原 雅彦

(令和7年11月4日 受理)

大船渡市大規模林野火災の出火前約60年間の大船渡市の気象変化傾向と、出火前後の短期の気象状況について調べた。2010年頃から夏の降水量は増加傾向に、冬の降水量は減少傾向にあるように見える。1995～2024年の30年間の2月の平均降水量は、1965～1994年の30年間の2月の平均降水量にくらべて4割減少しており、標準偏差は6割減少している。年平均湿度は2010年代から増加傾向にある。平均風速は1980年頃から、最大風速は1990年頃から増加傾向にある。最大瞬間風速は2000年代から減少傾向にある。本火災の発生した2025年2月は、観測が開始して以降の61年8ヶ月の間で降水量が2番目に少ない月で、2月としては最も少ない月であった。出火した2025年2月26日までの31日間には0.5mmを超える降水はなかった。出火後0.5mm以上の降水があったのは出火から7日目の3月5日で、この日の降水量26.5mmは、この冬の1日の降水量の最大値であった。出火当日の日平均湿度は降水量のように観測開始以来まれに見る低さという訳ではなかった。出火日からの7日間は、3月2日を除き最小湿度が40%未満となった。この期間の最小湿度は午後に現れることが多かった。2月26日の火災覚知から間もない13時30分に最大瞬間風速はこの日の最大値18.1m/sを記録した。翌日27日も昼過ぎに風は最大となった。出火から出火5日目までの日照時間は連日平年値を上回った。出火日とその翌日は、午後の方が午前よりも日照時間が長かった。

1. はじめに

2025年2月26日に大船渡市で発生した火災は3,370ha^{注)}を焼失する大規模な林野火災となり、222棟の建物が被害を受けた¹⁾。林野火災の出火、延焼、鎮火には気象条件が大きな影響を及ぼす。大船渡市の気象状況が長期的に見て現在どのような傾向にあるのかを知るために、約60年間の大船渡市の気象状況を調べた。また、本火災に直接影響を与えた可能性のある出火前年の12月から鎮圧後までの気象状況について調べた。

注) この火災は、同年2月19日に発生した林野火災の範囲内にも延焼した。3,370haは2月19日からの火災の延焼範囲を除いた面積である。

2. 方法

本報告で用いた気象データは、出火点の北西約6kmに位置する気象庁の大船渡特別地域気象観測所(以後、大船渡(アメダス)と記す)のデータ²⁾である。分析には、資料不足値、準正常値³⁾は用いていない。

3. 出火前の約60年間の気象変化傾向

出火前の過去61年間に大船渡(アメダス)で観測された降水量、湿度、風の変化傾向を以下に示す。

3.1. 降水量

雨は可燃物の含水率を左右し、含水率は出火を左右する。出火前までの降水量の変化について、過去61年間の年間降水量の変化を示し、続いてこの期間の季節ごと、月ごとの変化を示す。

3.1.1 年間降水量の変化

観測開始は1963年8月であるため、1964年1月から2024年12月までの61年間について1年ごとの降水量を図1に示す。

移動平均のグラフを見ると、1970年代から1990年代にかけてやや増加傾向にあるが、その後はほぼ一定である。つまり、年間降水量が近年減少傾向にあるようには見えない。1960年代中頃と2020年頃からの年ごとの変動幅は、1970年代から2000年代の変動幅にくらべて小さい。

3.1.2 季節ごとの降水量の変化

大船渡の季節ごとの降水量の変化を図2に示す。ここで、図2(d)に示す冬のグラフの各点の値は、横軸が示す年の12月から翌年の2月までの連続する3ヶ月の値である。例え

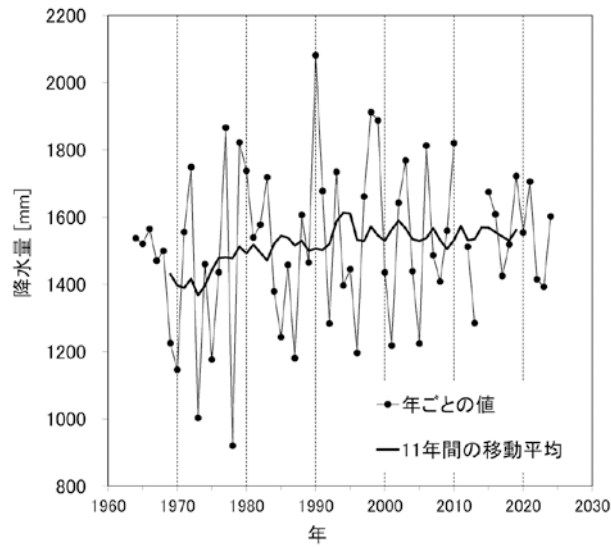


図1 1964～2024年の大船渡（アメダス）の年間降水量の変化

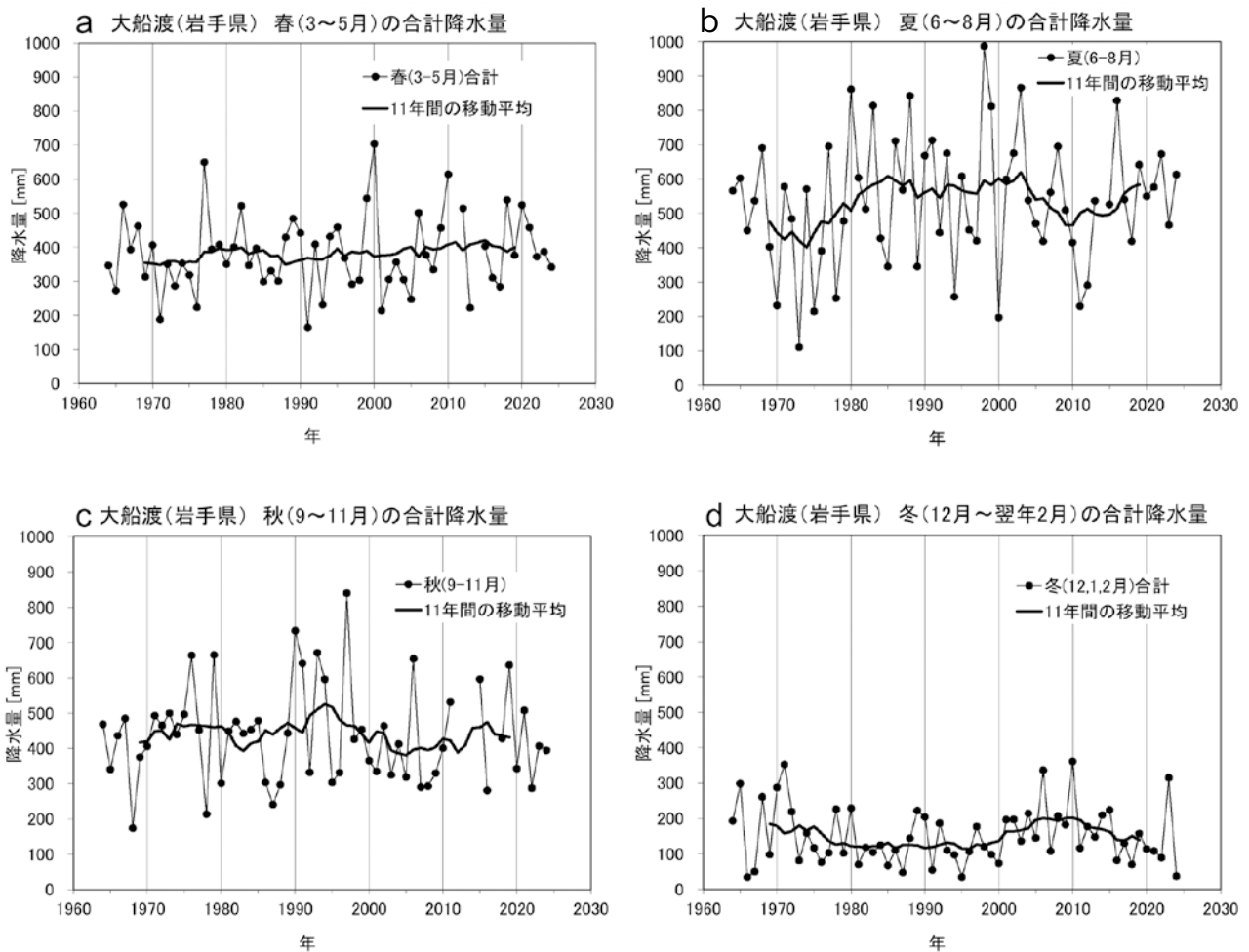


図2 1964～2024年の大船渡（アメダス）の季節ごとの降水量の変化

ば一番右の点は、2024年12月、2025年1月、2月の降水量の合計値を示す。

夏の移動平均のグラフを見ると、2010年頃から増加傾向にあるように見える。一方、冬は2010年頃から減少傾向にあるように見える。とはいえ各年の値としては、2020年頃からの夏の降水量は2000年前後の夏のピークに比べれば少なく、近年の冬の降水量程度の低い値は他の年にも記録されている。

図2(a) - (c) に示す春から秋までの年ごとの変動幅の傾向は、図1に示した年間降水量の変動幅の傾向と似ている。冬は2022年以降、変動幅が大きい。

表1に、季節ごとの60年間の年間降水量の平均値と標準偏差を示す。平均値、標準偏差ともに、冬が最も小さく、次いで春、秋、夏の順に大きくなっていく。一方、標準偏差を平均値で割った割合(%)は、最下欄の括弧内に示したとおり、冬のばらつきが最も大きく、他は同程度である。

日本の林野火災の件数は1月頃から増加し、4月にピークを迎える⁴⁾。降水は林野火災の出火を左右する。そのため、年によって冬の降水量のばらつきの割合が大きいということは、林野火災が多い年と少ない年があることを示唆しているのかもしれない。次節ではさらに詳しく、月ごとの降水量の変化を調べる。

3.1.3 月ごとの降水量

統計データは1963年8月からあるので、最初に1965年

～1994年と1995～2024年のそれぞれ30年間について、各月の合計降水量の変化を調べた。次に、本火災地域の火災時の可燃物の含水率に影響を与えた可能性がある2024年12月～2025年2月の月ごとの降水量が、1963年8月から2025年3月までの61年8ヶ月の間の月ごとの降水量の中でどのような順位であるかを調べた。

ア 月合計降水量の変化

1965～2024年の60年間を1965～1994年(以下、第1期と記す)と1995～2024年(以下、第2期と記す)の2つの期間に分け、両期間の月ごとの降水量の平均値を比較した。結果を図3に示す。エラーバーは標準偏差を示す。

2月の第2期の降水量は、第1期にくらべて大きく減少していることが分かる。図4は、図3で示した月合計降水量の(a)平均値と(b)標準偏差について、第1期と第2期の比を示す。2月の第2期の月合計降水量の平均値は38mmで、第1期の平均値63mmの60%と大きく減少しており、標準偏差も42%と大きく減少している。その前の時期である1月、12月は逆に第2期の方が第1期よりも平均降水量は約40%増加しており、標準偏差も30～40%増加している。つまり、第1期と第2期の降水量をくらべると、冬の初期から中期である12月、1月の降水量は、年による変動が多いものの平均的にはこの30年は増加しているが、冬の後期である2月の降水量は減少していると言える。

図5に、1963年から2024年までの12月と、1964年か

表1 1964～2024年の大船渡(アメダス)の季節ごとの降水量の平均と標準偏差:平均の欄の括弧内は、年間合計降水量に対する割合(%)を示す。標準偏差の欄の括弧内は、各季節の降水量の標準偏差をその季節の降水量の平均値で割った割合(%)を示す。

| | 春(3-5月) | 夏(6-8月) | 秋(9-11月) | 冬(12,1,2月) | 年間合計 |
|----------|----------|----------|----------|------------|------|
| 平均(mm) | 382 (25) | 536 (35) | 436 (29) | 151 (10) | 1515 |
| 標準偏差(mm) | 111 (29) | 185 (35) | 137 (31) | 81 (54) | 232 |

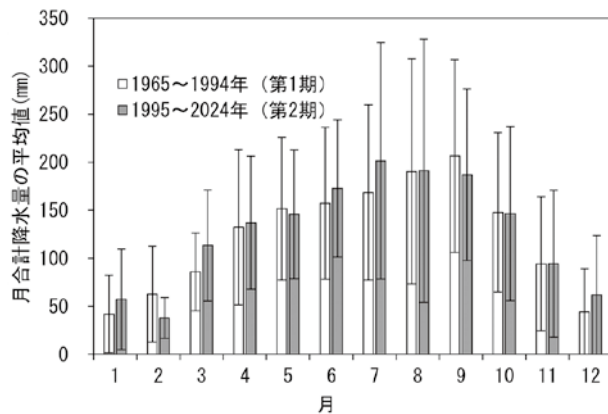


図3 1965～2024年の60年間を2つの期間に分けた時の大船渡(アメダス)の月ごとの降水量の平均値

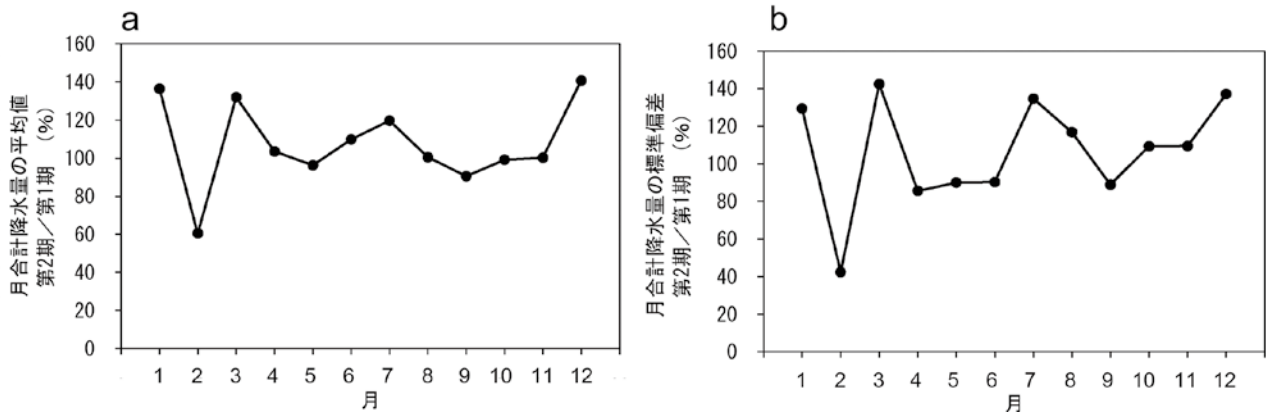


図4 大船渡(アメダス)の月ごとの降水量の(a)平均値と(b)標準偏差について1965～1994年(第1期)と1995～2024年(第2期)の比

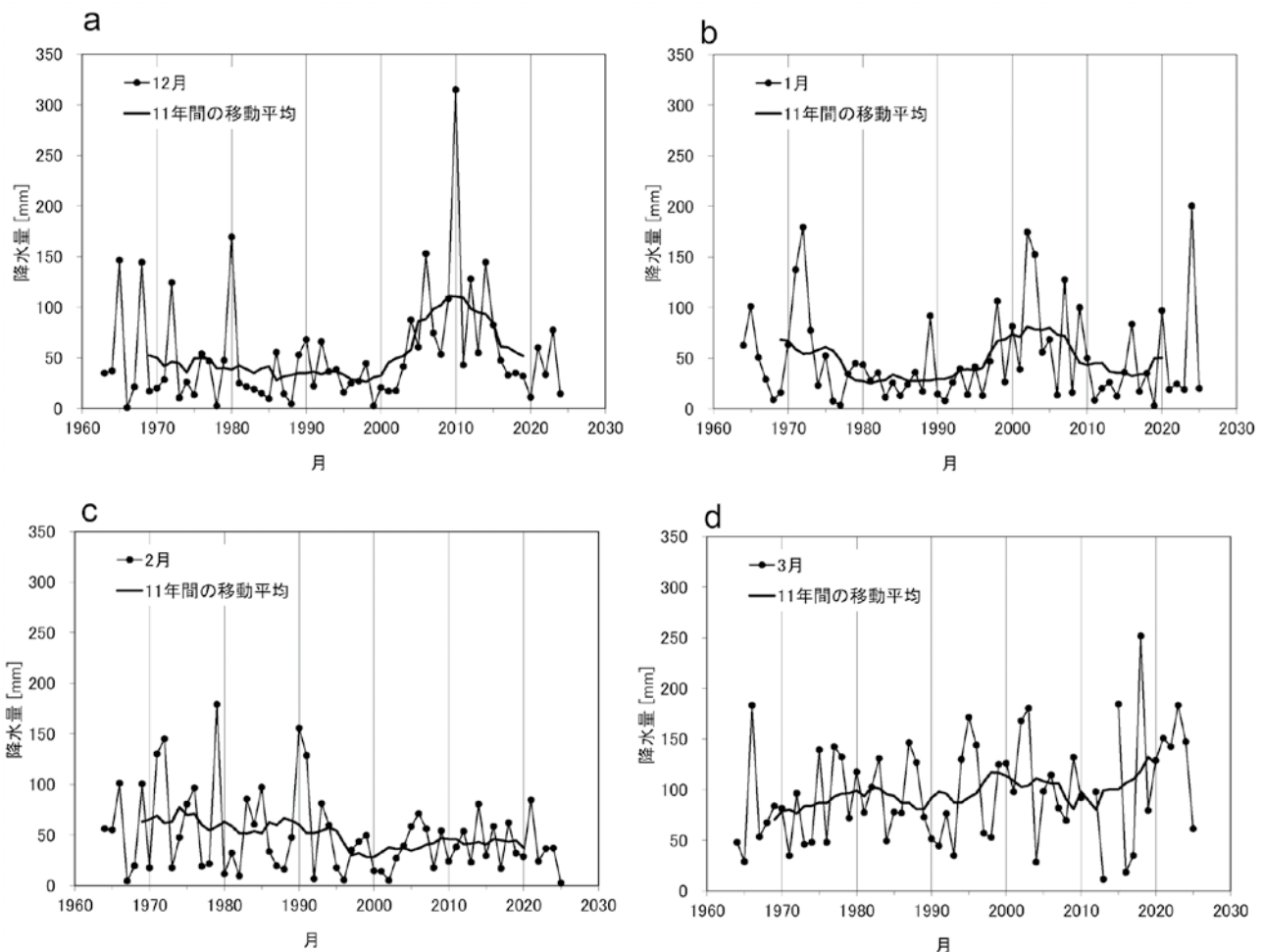


図5 1963年から2024年までの大船渡(アメダス)の月別合計降水量の年変化:(a)12月、(b)1月、(c)2月、(d)3月

ら2025年までの1月から3月の各月の合計降水量の年変化を示す。2月は1995年頃を境に降水量の移動平均値と変動幅は、共にそれ以前に比べて小さい値を保っていることがこのグラフでも分かる。12月は2010年に大きなピークがあり、それ以降は減少傾向にある。1月は2023年から2025年に

かけての変動が非常に大きい。つまり各年の変化傾向を見ると、12月、1月の降水量は近年については、増加傾向にあるとは言えそうにない。3月は全体的に増加傾向にある。

第1期と第2期の年合計降水量の平均値は表2に示す通りほぼ等しいが、標準偏差は第2期が第1期よりも24%減

表2 1965～1994年(第1期)と1995～2024年(第2期)の大船渡(アメダス)の年合計降水量の平均値、標準偏差および第1期と第2期の各値の比

| | (1) 1965-1994年 | (2) 1995-2024年 | (2)/(1) |
|-----------------|----------------|----------------|---------|
| 年合計降水量の平均値(mm) | 1483 | 1548 | 104 % |
| 年合計降水量の標準偏差(mm) | 262 | 199 | 76 % |

表3 1963年8月から2025年3月までの間の月合計降水量の少ない方からの順位

| 順位 | 年月 | 月合計降水量 (mm) |
|----------|----------------|----------------|
| 1 | 1966年12月 | 0.8 |
| 2 | 1978年12月 | 2.5 |
| 2 | 1999年12月 | 2.5 |
| 2 | 2025年2月 | 2.5 |
| 5 | 2019年1月 | 3.0 |
| 6 | 1977年1月 | 3.5 |
| ⋮ | | |
| 730(最下位) | 1998年8月 | 651.5 |

表4 1964年から2025年までの12月の月合計降水量の少ない方からの順位

| 順位 | 年 | 月合計降水量 (mm) |
|----------|-------------|----------------|
| 1 | 1966 | 0.8 |
| 2 | 1978 | 2.5 |
| 2 | 1999 | 2.5 |
| ⋮ | | |
| 9 | 1987 | 14.5 |
| 9 | 2024 | 14.5 |
| ⋮ | | |
| 62(最下位) | 2010 | 315.0 |

表5 1964年から2025年までの1月の月合計降水量の少ない方からの順位

| 順位 | 年 | 月合計降水量 (mm) |
|-----------|-------------|----------------|
| 1 | 2019 | 3.0 |
| 2 | 1977 | 3.5 |
| 3 | 1976 | 7.5 |
| ⋮ | | |
| 20 | 2012 | 20.0 |
| 20 | 2025 | 20.0 |
| ⋮ | | |
| 62(最下位) | 2024 | 200.5 |

表6 1964年から2025年までの2月の月合計降水量の少ない方からの順位

| 順位 | 年 | 月合計降水量 (mm) |
|----------|-------------|----------------|
| 1 | 2025 | 2.5 |
| 2 | 1967 | 4.4 |
| 2 | 2002 | 5.0 |
| ⋮ | | |
| 62(最下位) | 1979 | 179.0 |

表7 1964年から2025年までの1月と2月の合計降水量の少ない方からの順位

| 順位 | 年 | 月合計降水量 (mm) |
|----------|-------------|----------------|
| 1 | 1996 | 18.5 |
| 2 | 1977 | 22.5 |
| 2 | 2025 | 22.5 |
| 4 | 1968 | 28.5 |
| ⋮ | | |
| 62(最下位) | 1972 | 324.5 |

表8 1964年から2025年までの12月、1月、2月の合計降水量の少ない方からの順位

| 順位 | 年 | 月合計降水量 (mm) |
|----------|------------------|----------------|
| 1 | 1996-1967 | 34.5 |
| 2 | 1995-1996 | 34.5 |
| 3 | 2024-2025 | 37.0 |
| 4 | 1987-1988 | 47.5 |
| ⋮ | | |
| 62(最下位) | 2010-2011 | 361.5 |

少している。

イ 月合計降水量の順位

観測が開始した1963年8月から2025年3月までの61年8ヶ月の間の月合計降水量を少ない順に並べると表3の通りとなる。本火災が発生した2025年2月は、1963年8月以降2番目に降水量が少ない月である。この月の降水量2.5mmは、1991～2020年の30年間の2月の平年値41mm²⁾の6%、1965年から2024年の60年間の2月の平年値50mmの5%である。

ウ 月ごとの合計降水量の順位

1964年から2025年までの12、1、2月の降水量と、1～2月、12～2月の合計降水量を少ない順に並べると、表4～8の通りとなる。

表より、本火災の発生した2025年2月は、過去61年間で2月としては降水量が最も少ない月であることが分かる。2025年1月から2月の2か月間、2024年12月から2025年2月の3ヶ月間は、過去61年間の同じ月の期間の中でそれぞれ2番目、3番目に降水量が少ない期間である。

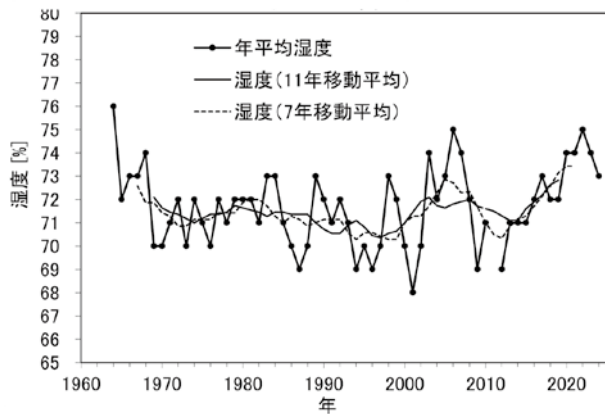


図6 1964～2024年の大船渡(アメダス)の年平均湿度の変化

3.2. 湿度

湿度は可燃物の含水率に影響を与え、出火を左右する。1964年から2024年間の年平均湿度の変化を図6に示す。平均湿度は2010年代から増加傾向にあることが分かる。実線で示した一年毎のグラフからは数年周期の変動が、移動平均の線からは1990年代の終わり頃から10数年程度の周期の変動があるように見える。

1990年4月1日～2025年3月31日までの35年間について、日ごとの湿度と実効湿度の度数分布をそれぞれ図7(a)、(b)に示す。実効湿度は以下の式で求めた⁵⁾。

$$H_e(0) = (1 - r)[H_m(0) + rH_m(1) + \dots + r^n H_m(n)] \quad (1)$$

ここで、 H_e は実効湿度、 H_m は日平均湿度、 r は係数、 $n=0$ は当日、 $n=1$ は前日を意味する。 $r=0$ は当日のみの湿度に相当し、 r が大きくなるほど過去の湿度の影響が大きくなる。ここで r は、林野火災に用いられる0.5⁶⁾を用いた。 n は最近の大規模市街地火災の分析時⁷⁾と同様に13とし、13日前までの湿度を用いた。

出火日2025年2月26日の湿度が属する階級を白抜きで

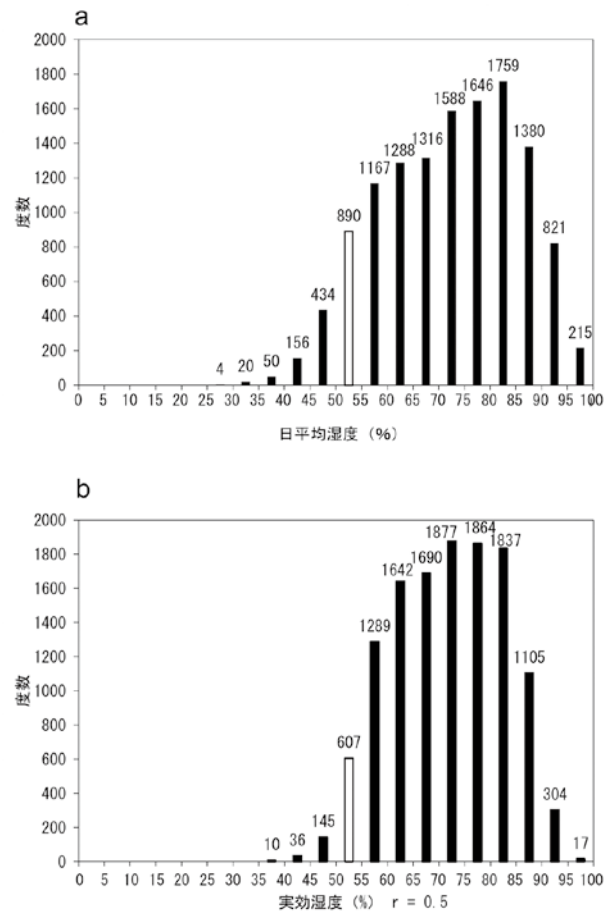


図7 1990年4月1日～2025年3月31日の35年間についての大船渡(アメダス)の日ごとの(a)湿度、(b)実効湿度の度数分布

示した。この日の湿度は52%で、この期間の湿度の低い方から数えて988番目となる。この順位は、資料不足値、準正常値を除く12,738データのなかで、低い方から7.8%の順位に相当する(表9)。同様に、この日の実効湿度は53.6%で低い方から4.4%の順位に相当する。表9には、参考までに大船渡市で本火災の直前に発生した2件の林野火災の出火日2月19日と2月25日の湿度、実効湿度の順位も示した。この3件の火災の日は、湿度に比べて実効湿度の方がこの35年間の順位としては、より低い側に位置していたことが分かる。ただ、前節で示した降水量のように、統計開始以来まれに見る低さという訳ではなかった。

3.3. 風

風は可燃物の含水率に影響を与え、出火を左右する。

1964年から2024年間の年ごとの平均風速、最大風速、最大瞬間風速の変化を、それぞれ図8(a) - (c)に示す。最大風速は1990年頃から、平均風速は1980年頃から増加傾向にある。最大瞬間風速は2000年代に向かって増加し、その後減少傾向にある。2000年代は変動幅が大きく、次第に変動幅が小さくなっている。

1990年4月1日～2025年3月31日までの35年間について、日ごとの最大瞬間風速、最大風速、平均風速の度数分布をそれぞれ図9(a) - (c)に示す。出火日2025年2月26日が属する階級を白抜きで示した。どの図でも出火日の風速は、頻度が最も高い風速帯よりも大きい側にある。2025年2月26日の最大瞬間風速は18.1m/sで、全期間の最大瞬間風速の強い方から数えて1440番目である。この順位は、資料不足値、準正常値を除く12,647個のデータのなかで値が大きい方から11.4%の順位に相当する(表10)。同様に、この日の最大風速は8.3m/s、大きい方から14.4%の順位に相当し、平均風速は3.2m/sで大きい方から20.9%の順位に相当する。表10には、大船渡市で本火災の直前に発生した林野火災の出火日2月19日と25日の同様のデータも示した。最大瞬間風速は3件の火災のなかで2月26日が最も強いが、最大風速、平均風速はこの日が最も弱い。

4. 出火前年の12月から鎮圧後までの短期間の気象状況

4.1 日ごとの変化

図10に、出火前年の2024年12月1日から鎮圧後の2025年3月31日までの日ごとの(a)湿度、降水量、(b)気温、日照時間、(c)風速の変化を示す。ただし、気象庁ホームページ²⁾に記された通り、降水があっても0.5mmに足りない場合は0.0と表記されているため、0.5mm未満の値をこのグラフから読み取ることはできない。

4.1.1 降水量

雨は可燃物の含水量に直接影響を与えることで、着火、延焼のしやすさに影響を与える。さらに雨は、消火に直接寄与する。

2月17日15時に0.5mmの降水があった後、出火した2月26日までの9日間は0.5mm以上の降水はない。さらにさかのぼると1月26日に3.5mmの降水を記録した後は、出火日の2月26日までの31日間、0.5mmを超える雨は降っていない。出火後0.5mm以上の雨が降るのは出火から7日目の3月5日で、日降水量は26.5mmを記録した。この日の雨は、3.5mmの降水があった1月26日から数えて38日ぶりの0.5mmを超える雨であり、この冬の1日の降水量の最大値でもある。

4.1.2 湿度、気温、日照時間、風

湿度、実効湿度は図10に示す通り、共に上下はするものの、全体的な傾向としては1月23日頃から低下していき、2月15日にはこの冬の日平均湿度の最小値44%に達する。出火日の2月26日は表9にも示した通り52%となっている。図10では、火災予防に用いられる $r = 0.7^5)$ を用いて求めた実効湿度も示した。

降水がある日は、ほとんどの日で湿度が上昇している。特に26.5mmの降水があった3月5日は、前日の湿度49%から91%まで急上昇している。

日照時間と気温の変化は連動しているように見える場合もあれば、連動していない場合もある。

風速は、本火災の出火から鎮圧までの期間、それ以前にくらべて特段強いとは言えない。

表9 大船渡(アメダス)の1990年4月1日～2025年3月31日の35年間の中での3件の林野火災出火日(2025年2月19、25、26日)の湿度と実効湿度の順位

| | 湿度 | | 実効湿度($r = 0.5$) | |
|------------|-----|-------------------|-------------------|-------------------|
| | (%) | 値が小さい方からの順位の割合(%) | (%) | 値が小さい方からの順位の割合(%) |
| 2025年2月19日 | 52 | 7.8 | 52.9 | 3.6 |
| 2025年2月25日 | 53 | 9.1 | 55.2 | 6.7 |
| 2025年2月26日 | 52 | 7.8 | 53.6 | 4.4 |

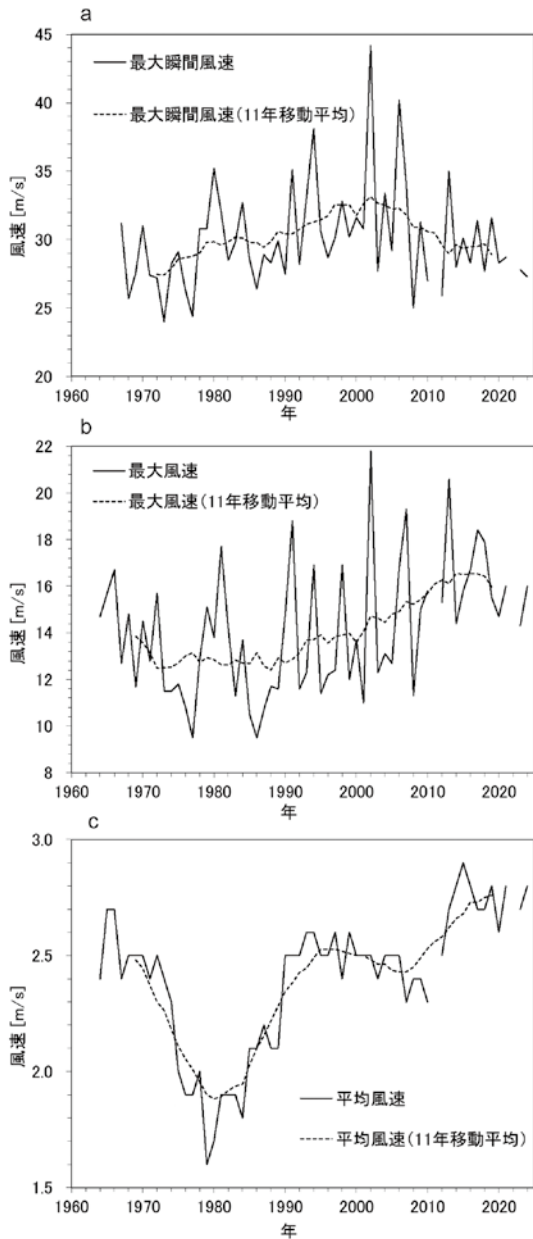


図8 1964～2024年の大船渡(アメダス)の(a)最大瞬間風速、(b)最大風速、(c)年平均風速の変化

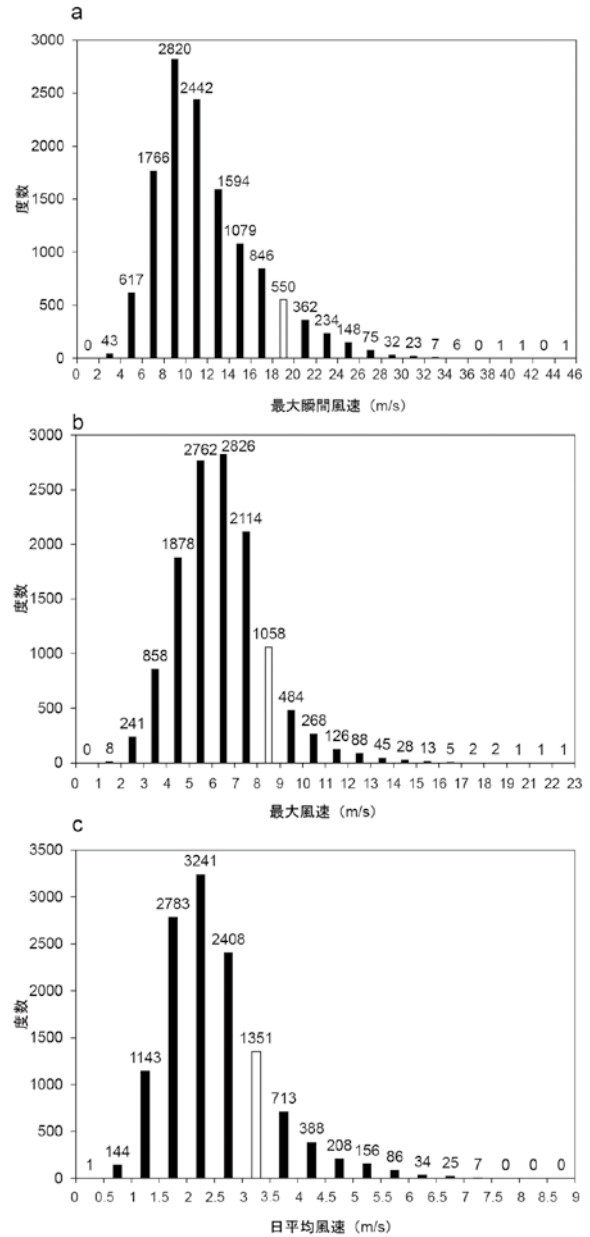


図9 1990年4月1日～2025年3月31日の35年間についての大船渡(アメダス)の日ごとの(a)最大瞬間風速、(b)最大風速、(c)平均風速の度数分布

表10 大船渡(アメダス)の1990年4月1日～2025年3月31日の35年間の中での3件の林野火災出火日の最大瞬間風速、最大風速、平均風速の順位

| | 最大瞬間風速 | | 最大風速 | | 平均風速 | |
|------------|--------|-------------------|-------|-------------------|-------|-------------------|
| | (m/s) | 値が大きい方からの順位の割合(%) | (m/s) | 値が大きい方からの順位の割合(%) | (m/s) | 値が大きい方からの順位の割合(%) |
| 2025年2月19日 | 17.9 | 12.0 | 8.6 | 11.8 | 4.4 | 5.2 |
| 2025年2月25日 | 17.4 | 13.4 | 8.9 | 9.6 | 4 | 8.2 |
| 2025年2月26日 | 18.1 | 11.4 | 8.3 | 14.4 | 3.2 | 20.9 |

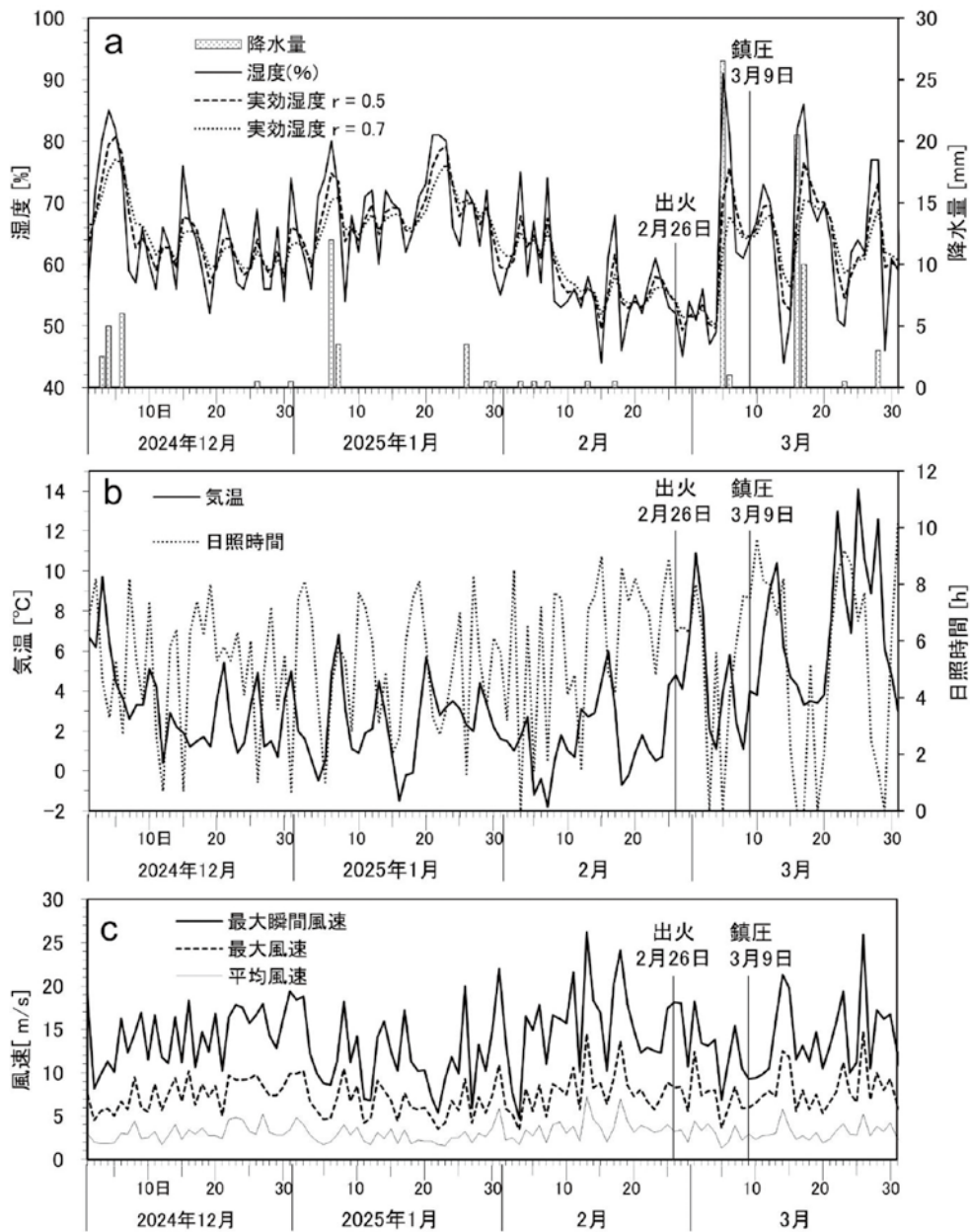


図10 2024年12月1日～2025年3月31日の大船渡(アメダス)の日ごとの(a)湿度、降水量、(b)気温、日照時間、(c)風速の変化

4.1.3. 雪

雪は降水量にカウントされているが⁸⁾、着火、延焼に対する影響は異なるかもしれないので記しておく。

火災前の2025年2月5日、6日にそれぞれ降雪、積雪共に1cmを記録して以降、この冬に降雪、積雪は記録されていない。

4.2 10分ごとの変化

出火した2月26日から鎮圧した3月9日までの10分毎

の気象要素の変化を以下に示す。

4.2.1 風

風速、風向の変化を図11に示す。火災覚知は2月26日13時2分であるが、13時30分に、この日の最大瞬間風速18.1m/sを記録している。この時の平均風速は7.7m/s、この日の最大風速は8.3m/sである。ここで、日最大風速は「任意の時分の極値」である⁹⁾ため、図11に示した10分ごとの風速値には現れない場合もある。翌日27日も昼過ぎに風は

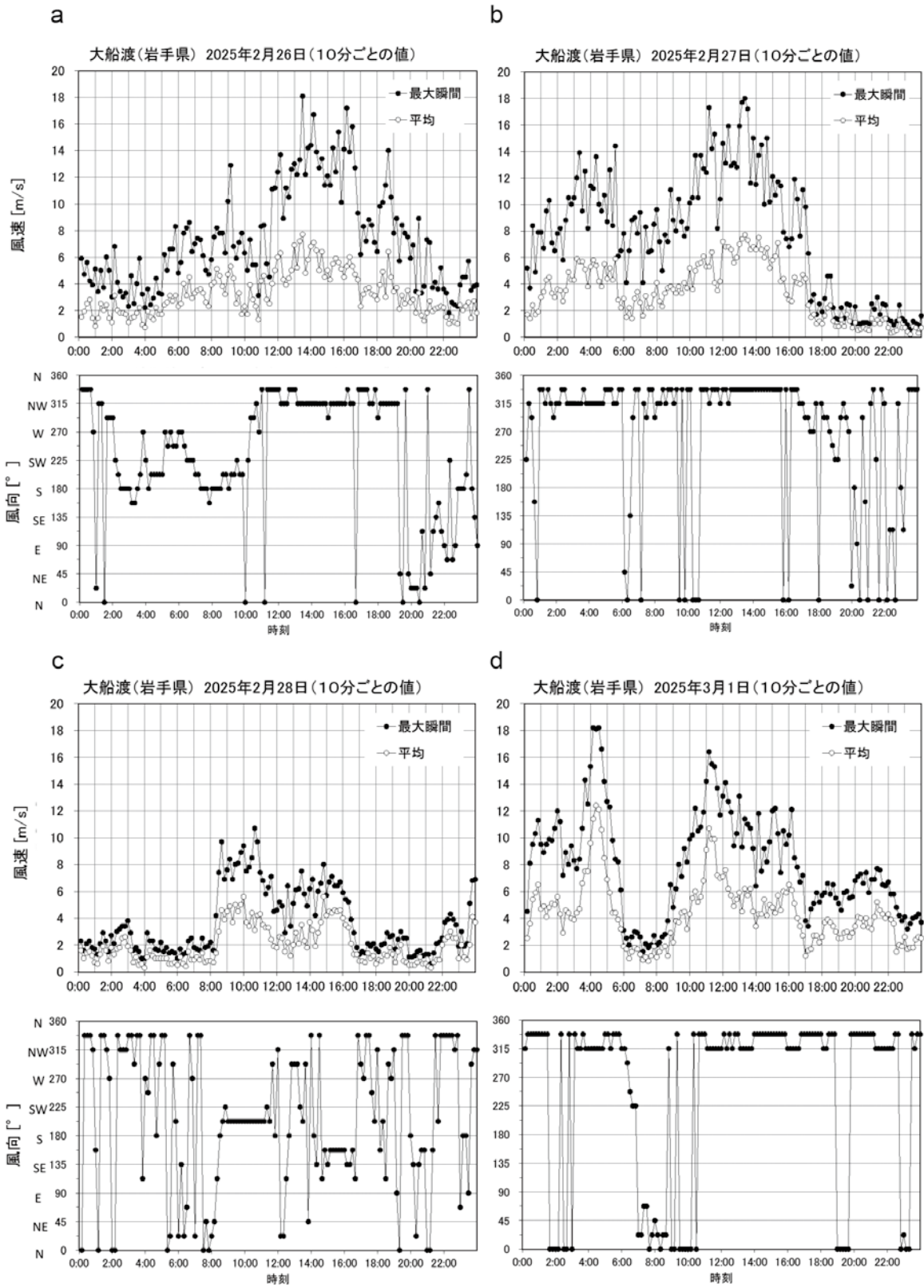


図11 2025年2月26日～3月9日の大船渡(アメダス)の10分ごとの(a)風向、(b)風速の変化

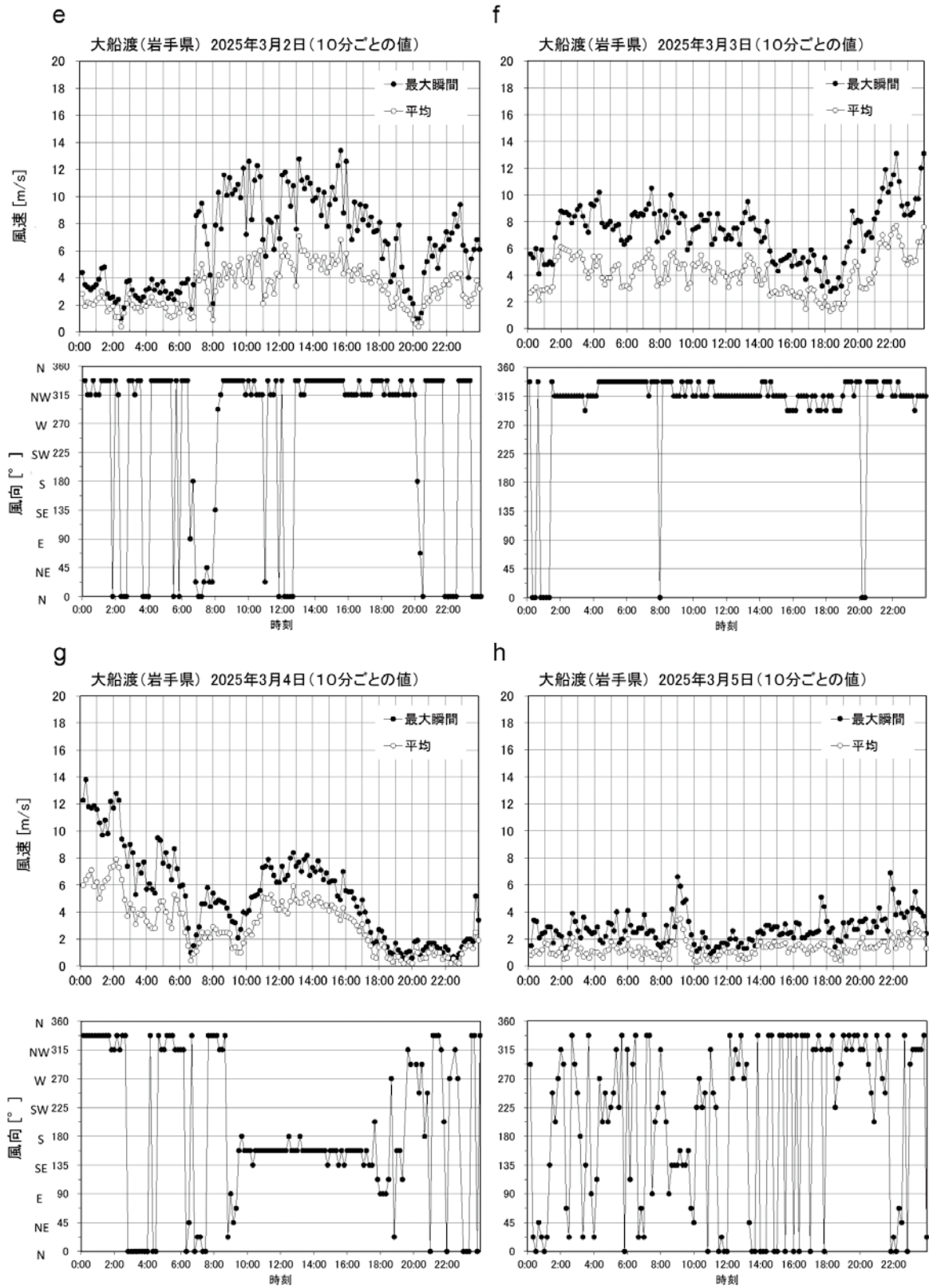


図11 続き

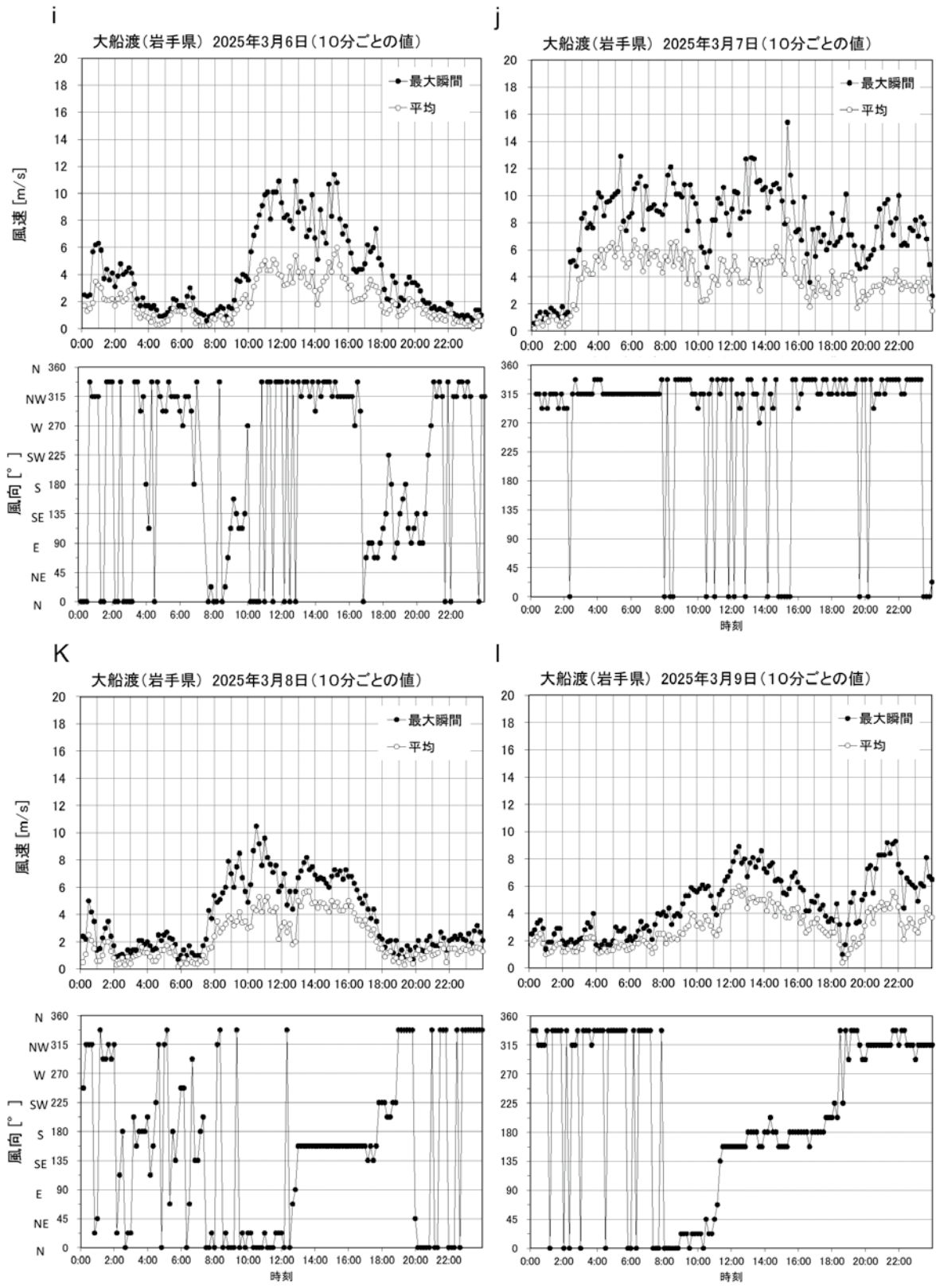


図11 続き

最大となり、13時20分に平均風速7.7m/s、最大瞬間風速18m/sとなる。この日は昼だけでなく、午前3時頃から5時過ぎにかけても風のピークがある。26、27日の強風時は概ね北西風である。28日は日中、南寄りの風が吹く。

3月1日は出火から鎮圧までの間で最も風が強くなり、4時20分に平均風速が12.4m/s、最大瞬間風速は4時10分、4時30分に18.2m/sとなる。風のピークはこの日も昼と明け方の2度あり、11時10分に平均風速10.7m/s、最大瞬間風速16.4m/sとなる。この日も概ね北西または北からの風である。3月2日から4日にかけては平均風速は最大で7～8m/s、最大瞬間風速は最大で13m/s台となる。3日から4日にかけての風のピークは真夜中に現れる。4日の9時過ぎまでは北寄りの風であったが、その後、南寄りの風となり4日の夜に向かって風は弱まる。雨の降った3月5日は風が弱く、平均風速は最大でも9時10分の3.5m/s、最大瞬間風速は21時50分の6.9m/sが最大となる。6日は昼に風のピークがあり、その間、概ね北寄りの風である。7日は一日を通して北寄りの風が続き、午前中の平均風速は6m/s前後だが、徐々に風は弱まる。最大瞬間風速は15時20分に15.4m/sとなる。8日、9日は昼頃から夕方にかけて南寄りの風となる。

4.2.2 湿度

湿度の変化を図12に示す。2月18日に発表された乾燥注意報は3月4日まで継続した。2月26日11時20分に83%あった湿度は、その後急激に低下し、出火直前の13時には44%となった。この日の最小湿度は15時の38%である。

2月26日から鎮圧された3月9日までの日ごとの最小湿度とその発生時刻を表11に示す。最小湿度は午後に見えることが多いことが分かる。2月27日の湿度はさらに低下し(図12(b))、最小湿度はこの期間で最も低い27%を14時台に記録する。夜間は気温の低下と連動するように湿度は60%台まで上がるが、28日の14時台には再び最小湿度は27%まで低下する。2月28日から翌日の3月1日にかけては、夜中に湿度が30%近くまで低下する。出火日である2月26日から3月4日までの7日間は、3月2日を除き最小湿度が40%未満となる(表11)。

3月4日8時40分以降、湿度は上昇し、降雨のあった5日の16時30分には湿度100%となる。7日以降は再び日中の湿度が30%台まで低下する。

4.2.3 気温

気温の変化を図12に示す。出火直前の2月26日13時の気温は7.7℃である。図12に示した10分毎の値では、この日の気温は12時40分の8.6℃が最も高い。最高気温は8.7℃である。27日は昼過ぎの8.1℃が最も高い。2月28日から3月2日は日中14～15℃まで気温が上がる。3月3日、4日は最高でも4～5℃となる。その後は上がっても10℃程度である。

4.2.4 日照時間

日射は気温、湿度、降水、風、可燃物の含水率に影響を与える。山の斜面への直達光の入射量は太陽の位置により変化する。南東側斜面には午前中、南西側斜面には午後、直達光が多く入射する。火災現場の山の斜面への直達光の入射量が斜面の方位によってどの程度違っていたかを知るために、出火日から鎮圧日までの午前と午後の日照時間を比べた。日照時間を用いたのは、日射量データがないためである。ここで、出火現場付近の南中時刻以前である11時40分までの日照時間を「午前の日照時間」、11時50分以降の日照時間を「午後の日照時間」と定義した。値は10分毎の日照時間を合計することによって求めた。

結果を図13に示す。出火日の2月26日と27日は、午後の方が午前よりも日照時間が長い。図12(a)より、2月26日は9時過ぎから12時頃まで日照時間が大きく減少しているが、午後は長時間の減少はない。27日は10時前まで日照時間が短い、11時40分から16時までには減少がまったくない。

2月26日から3月6日の間の日照時間の平年値(1991～2020年)は4.8～4.9時間で、約290分である。出火から5日目までは、連日平年値を上回っている。

仮に平年の午前、午後それぞれの日照時間が、1日の日照時間の平年値の半分である約145分だとすれば、2月26、27日の午後の日照時間は平年の午後の日照時間よりもそれぞれ32%、80%長かったことになり、この午後の日射が、両日の南西斜面の可燃物を平年よりも乾燥させる方向に働いていた可能性がある。

4.2.5 降水量

2月26日から3月9日までの期間で0.5mm以上の降水があったのは、3月5日と6日のみである。この2日間の10分ごとの降水量の変化を図14に示す。5日6時50分から6日1時30分まで0.5mmの雨が断続的に記録されている。3月5日の降水量は前述の通り、この冬の1日の降水量の最大値26.5mmを記録した。

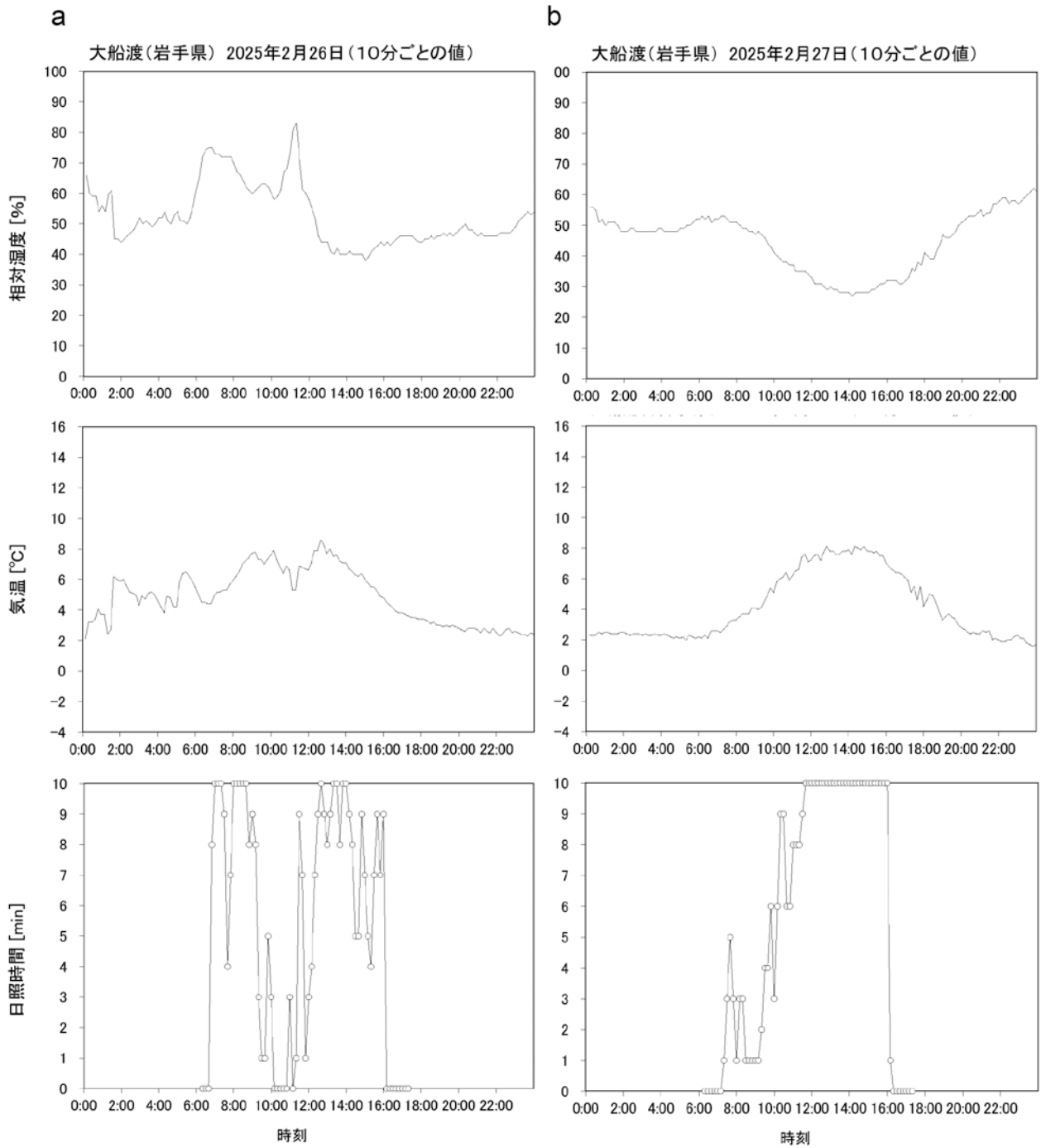


図12 2025年2月26日～3月9日の大船渡(アメダス)の10分ごとの(a)相対湿度、(b)気温、(c)日照時間の変化

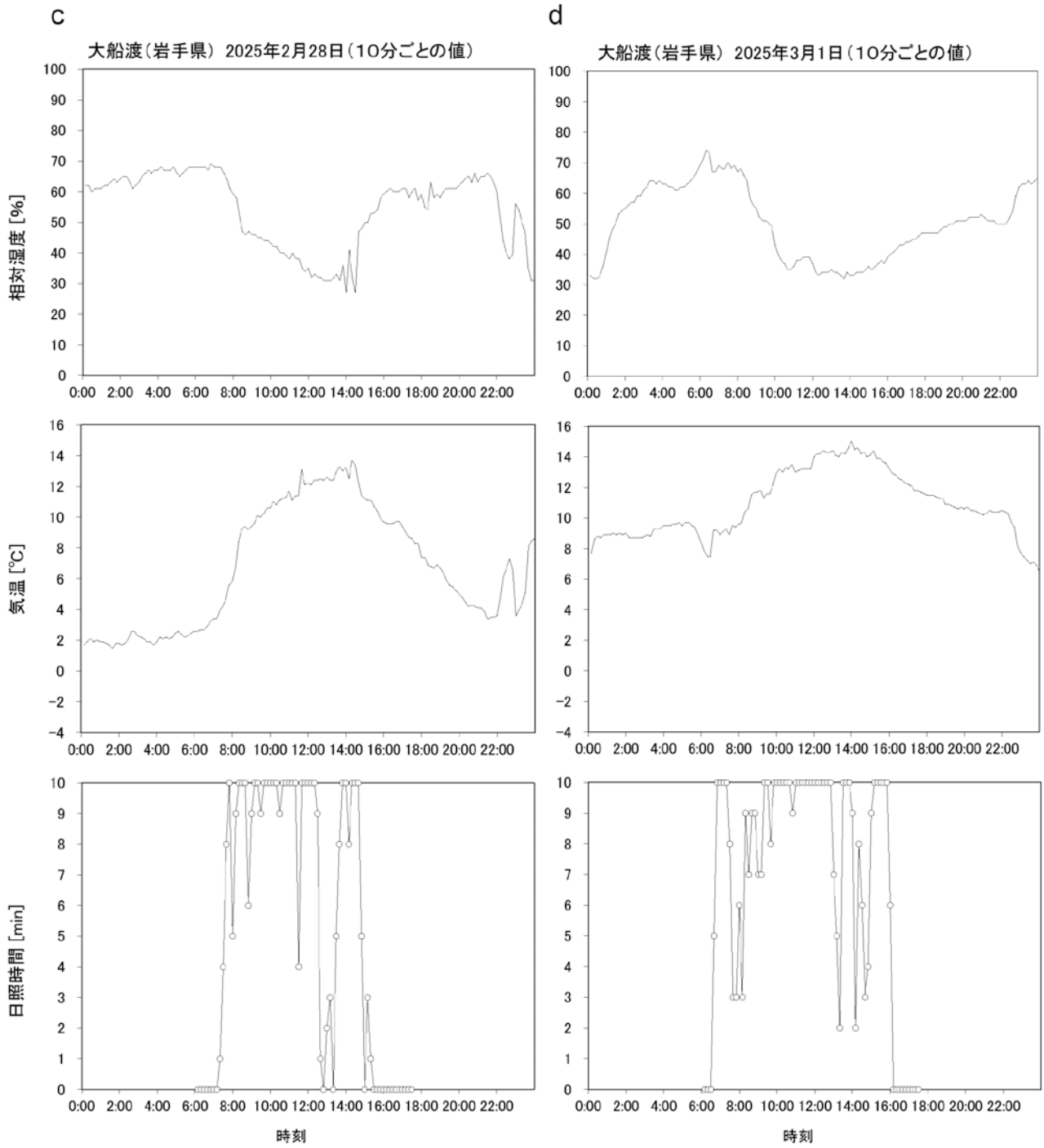


図12 続き

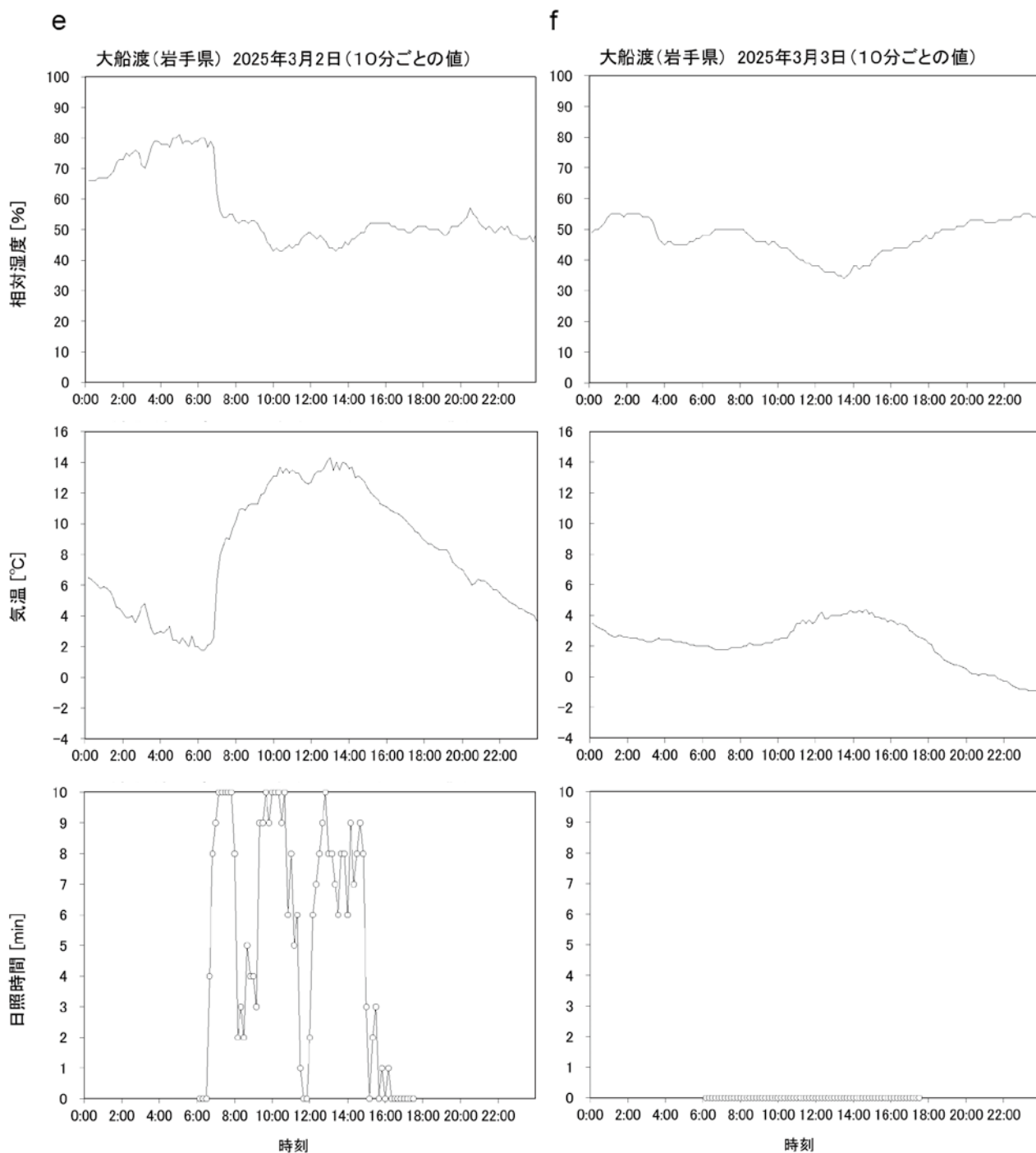


図12 続き

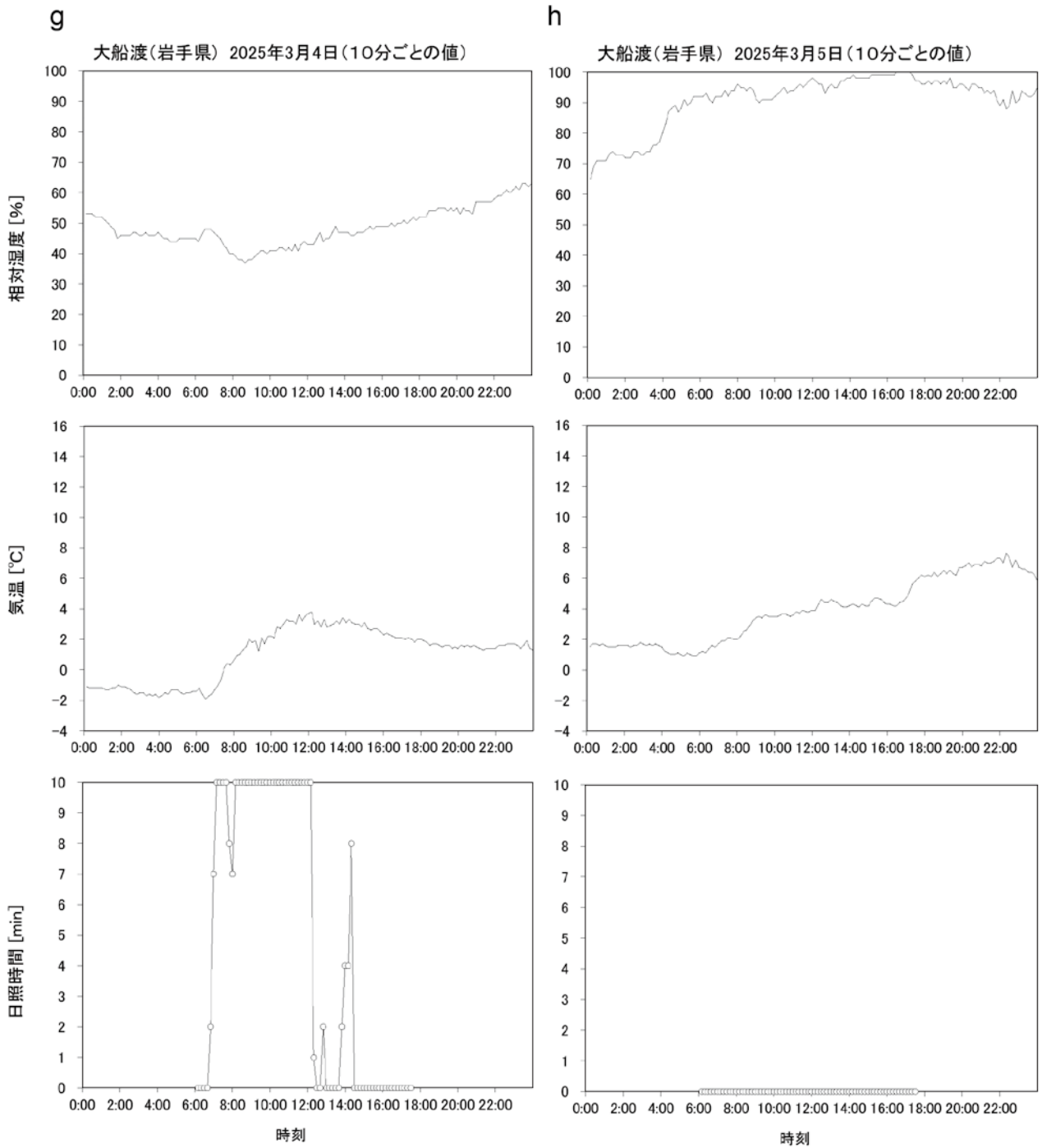


図12 続き

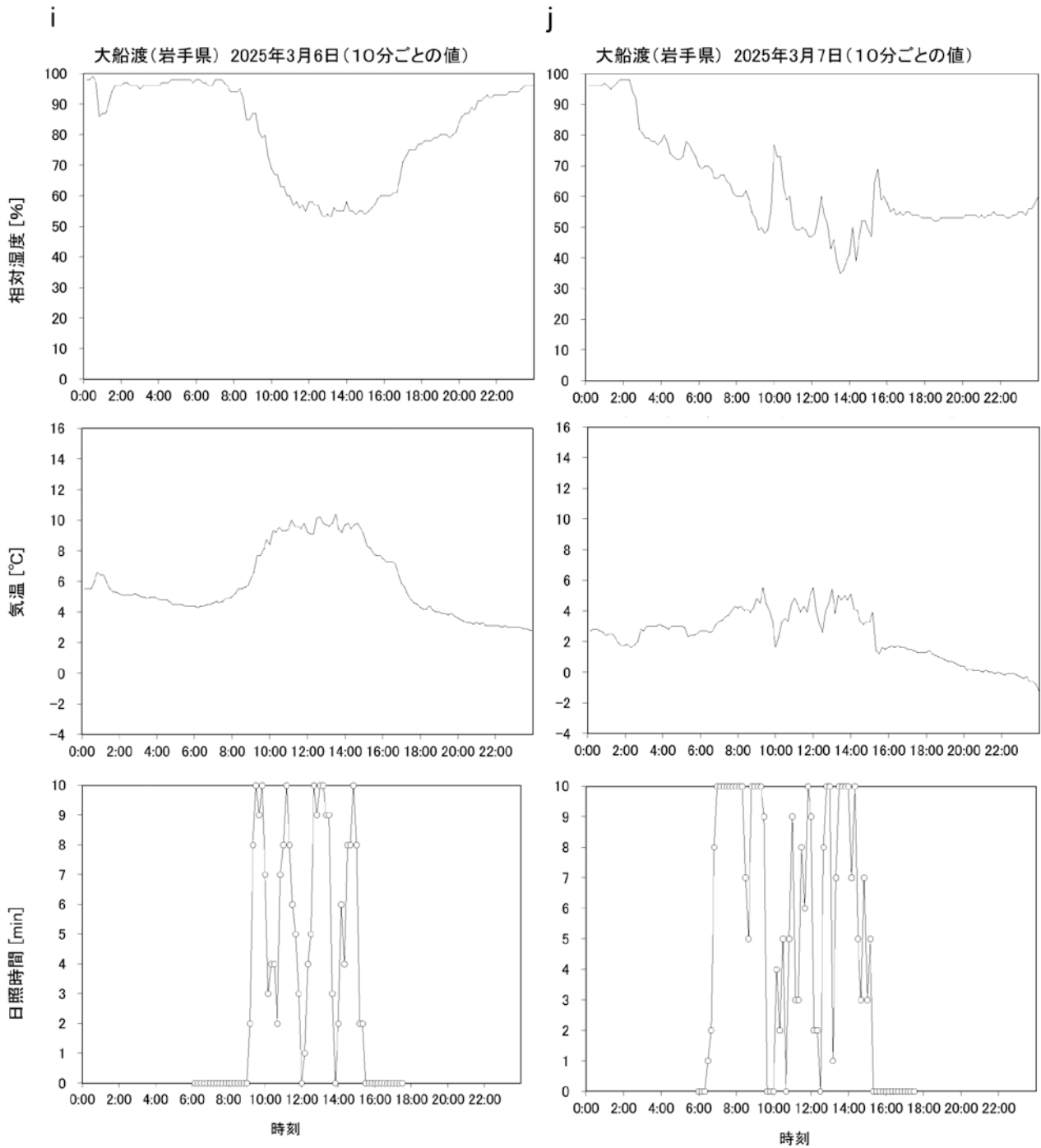


図12 続き

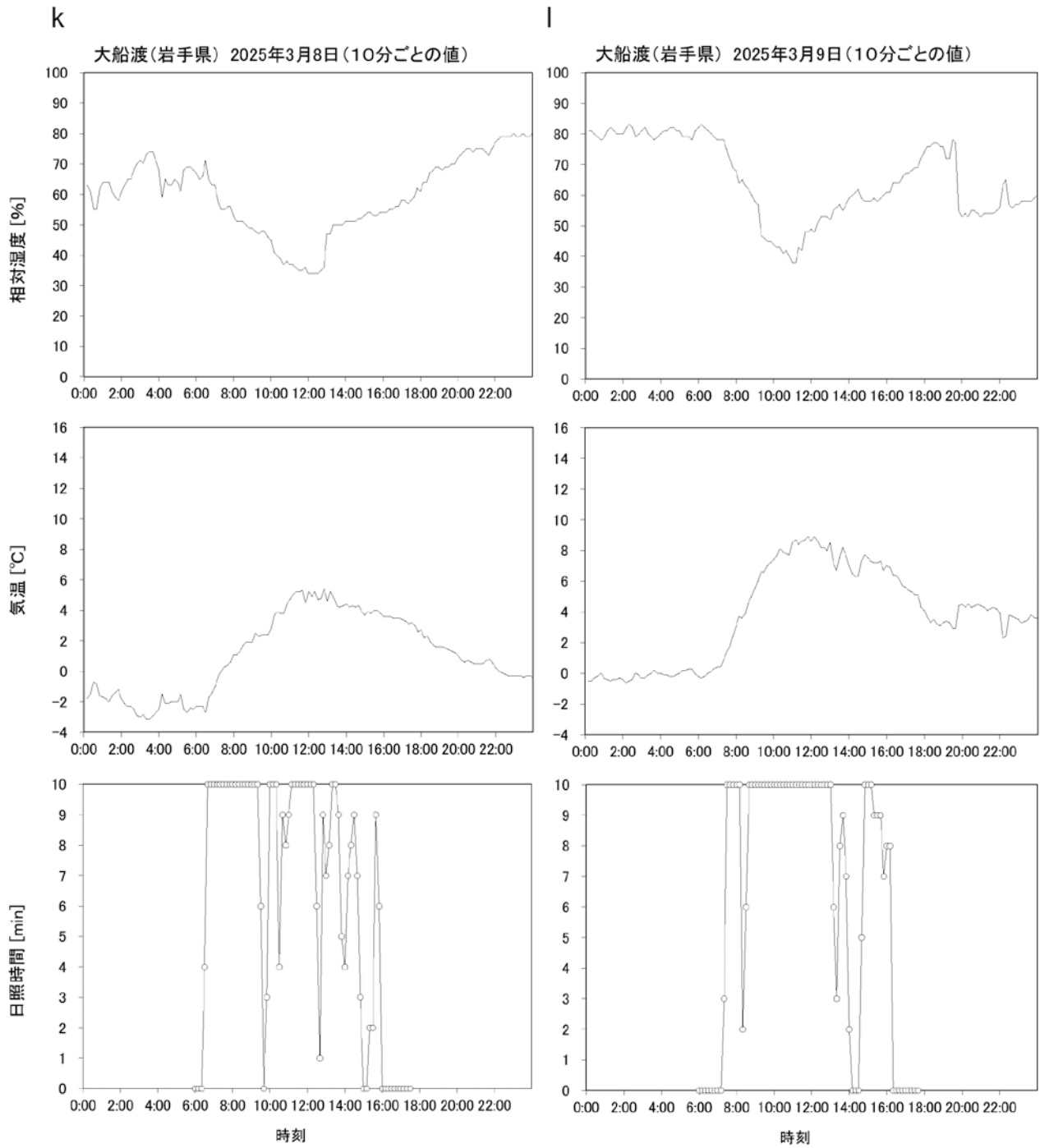


図12 続き

表11 2025年2月26日～3月9日の大船渡（アメダス）の日ごとの最小湿度とその観測時刻

| 月日 | 時刻 | 最小湿度 |
|-------|--------------|------|
| 2月26日 | 15:00 | 38 |
| 2月27日 | 14:10 | 27 |
| 2月28日 | 14:00, 14:30 | 27 |
| 3月1日 | 不明 | 31 |
| 3月2日 | 不明 | 42 |
| 3月3日 | 13:30 | 34 |
| 3月4日 | 8:40 | 37 |
| 3月5日 | 不明 | 63 |
| 3月6日 | 不明 | 50 |
| 3月7日 | 不明 | 33 |
| 3月8日 | 12:00-12:30 | 34 |
| 3月9日 | 不明 | 36 |

注：気象庁ホームページの日ごとの最小湿度が記載された「日ごとの値」のページには、その発生時刻は記入されていない。湿度とその発生時刻の両者が確認できるデータは10分ごとのデータであるため、たまたま一日の最小湿度の記録が10分ごとのデータと一致している場合はその時刻を記入した。そのため、ここに記入した時刻以外にも最小湿度を記録した時刻がある可能性がある。10分ごとのデータに最小湿度の値がない場合は「不明」と記した。

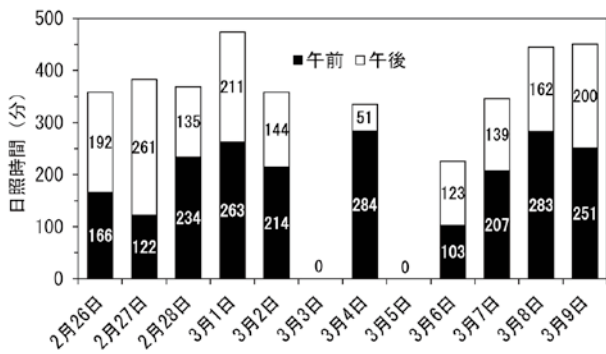


図13 2025年2月26日～3月9日の出火現場付近の南中時刻以前(午前)と南中時刻以後(午後)の日照時間

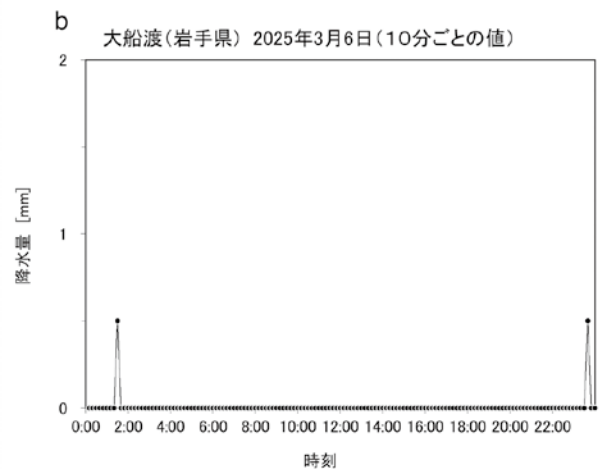
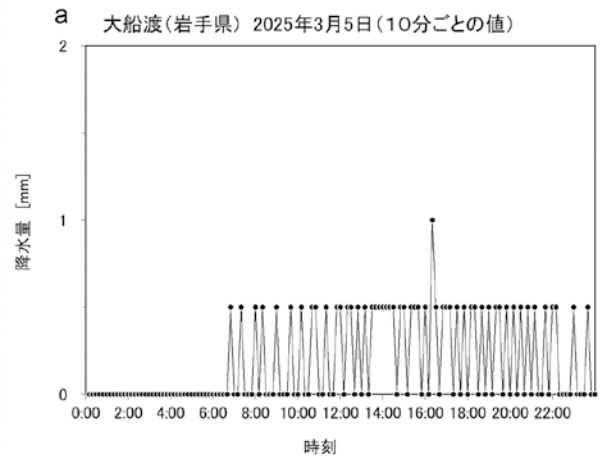


図14 2025年3月5日と3月6日の大船渡（アメダス）の降水量の変化

5. まとめ

2025年2月26日に発生した大船渡市大規模林野火災の出火前約60年間の大船渡市の気象変化傾向と、出火前年の12月から鎮圧後までの気象状況について調べた。その結果、以下のことが分かった。

1) 降水量

- ・1990年代以降の年間降水量の移動平均値はほぼ一定である。しかし2010年頃からは、夏(6~8月)の降水量は増加傾向に、冬(12~2月)の降水量は減少傾向にあるように見える。
- ・1964年から2024年までの61年間について、各季節の合計降水量の標準偏差を各季節の平均値で割って求めた年によるばらつき割合は、冬が最大であった。
- ・1965~1994年(第1期)と1995~2024年(第2期)のそれぞれ30年間の各月の降水量の平均値を比較したところ、冬の後期である2月の降水量は、第2期の方が第1期にくらべて4割減少しており、標準偏差も6割減少していた。1995年以降の2月の降水量の移動平均値と変動幅は、それ以前に比べて継続的に小さい値を保っていた。
- ・本火災の発生した2025年2月は、観測が開始した1963年8月以降の61年8ヶ月の間で降水量が2番目に少ない月で、2月としては最も少ない月であった。
- ・出火した2025年2月26日までの9日間には0.5mm以上の降水はなかった。1月26日に3.5mmの降水を記録した後は、出火日までの31日間に0.5mmを超える降水はなかった。出火後0.5mm以上の降水があったのは出火から7日目の3月5日で、この冬の1日の降水量の最大値26.5mmを記録した。この雨は、3.5mmの降水があった1月26日から数えて38日ぶりの0.5mmを超える雨となった。

2) 湿度

- ・年平均湿度は2010年代から増加傾向にある。
- ・出火日2025年2月26日の湿度52%と、 $r=0.5$ とした時の実効湿度53.6%は、1990年4月1日から2025年3月31日までの35年間の日ごとの湿度と実効湿度の低い方からそれぞれ7.8%、4.4%の順位に相当した。つまり、出火当日の日平均湿度は、降水量のように観測開始以来まれに見る低さという訳ではなかった。
- ・日平均湿度、実効湿度は、1月23日頃から全体的な傾向としては低下していき、2月15日にはこの冬の日平均湿度の最小値44%に達した。
- ・2月26日正午前に83%あった湿度は急激に低下し、出火直前の13時に44%、15時にはこの日の最小湿度38%となった。
- ・出火日から3月4日までの7日間は、3月2日を除き最小湿度が40%未満となった。この期間の最小湿度は午後に見れることが多かった。
- ・26.5mmの降水があった3月5日の日平均湿度は、前日の

49%から91%まで急上昇した。

3) 風

- ・平均風速は1980年頃から、最大風速は1990年頃から増加傾向にある。最大瞬間風速は2000年代から減少傾向にある。2000年代は最大瞬間風速の変動幅が大きく、次第にその変動幅は小さくなっている。
- ・出火日の最大瞬間風速18.1m/s、最大風速8.3m/s、平均風速3.2m/sは、1990年4月1日から2025年3月31日までの35年間の日ごとの風速の強い方からそれぞれ11.4%、14.4%、20.9%の順位に相当する。
- ・本火災直前に大船渡市で林野火災が発生した2月19日と25日の風速を2月26日の風速と比べると、最大瞬間風速は3件の火災のなかで2月26日が最も強かったが、最大風速、平均風速はこの日が最も弱かった。
- ・2月26日の火災覚知から間もない13時30分に最大瞬間風速は18.1m/sとなり、この日の最大値を記録した。翌日27日も昼過ぎに風は最大となり、13時20分に平均風速7.7m/s、最大瞬間風速18m/sとなった。28日は日中、南寄りの風が吹いた。3月1日は出火から鎮圧までの間で最も風が強くなり、4時20分に平均風速12.4m/s、最大瞬間風速は同じ頃18.2m/sとなった。2月27日と3月1日は昼だけでなく、明け方にも風のピークがあった。雨の降った3月5日は風が弱まった。

4) 日照時間

- ・出火から出火5日目までの日照時間は連日平年値を上回った。出火日とその翌日は、午後の方が午前よりも日照時間が長かった。この午後の日射は、南西斜面の可燃物を平年よりも乾燥させる方向に働いていた可能性がある。

5) 気温

- ・2月26、27日の最高気温は8℃台、2月28~3月2日の最高気温は14~15℃であった。

6) 雪

- ・火災前の2025年2月5日、6日にそれぞれ降雪、積雪共に1cmを記録して以降、降雪、積雪はなかった。

なお本稿は、「令和7年2月26日に発生した大船渡市における林野火災に係る消防庁長官の火災原因調査報告書」¹⁰⁾第2章気象で報告した内容に、ページ数の制限により報告書から割愛した内容と、その後の分析結果を追記したものである。

参考文献

- 1) 消防庁、岩手県大船渡市の林野火災による被害及び消防機関等の対応状況(第37報)、2025。
https://www.fdma.go.jp/disaster/info/items/20250228_iwatekenofunatorinya37.pdf (2025年9月16日アクセス)
- 2) 気象庁ホームページ、過去の気象データ検索

https://www.data.jma.go.jp/stats/etrn/index.php?prec_no=33&block_no=47512&year=&month=&day=&view=
(2025年5月30日アクセス)

3) 気象庁ホームページ、値欄の記号の説明

<https://www.data.jma.go.jp/stats/data/mdrr/man/remark.html> (2025年5月30日アクセス)

4) 日本火災学会編、火災便覧第4版、4.2火災と気象、共立出版、2018.

5) 宮沢清二、防災と気象、朝倉書店、1982.

6) 自治省消防庁、大規模林野火災発生予知システム開発調査報告書、1986.

7) 消防研究センター、平成28(2016)年糸魚川市大規模火災調査報告書、消防研究技術資料第84号、2018.

https://nrifd.fdma.go.jp/publication/gijutsushiryo/gijutsushiryo_81_120/files/shiryo_no84.pdf (2025年9月7日アクセス)

8) 気象庁ホームページ、雨・雪について

<https://www.jma.go.jp/jma/kishou/knownow/faq/faq1.html>
(2025年5月30日アクセス)

9) 気象庁ホームページ、要素ごとの値の補足説明

<https://www.data.jma.go.jp/stats/data/mdrr/man/sampling.html>

10) 総務省消防庁、令和7年2月26日に発生した大船渡市における林野火災に係る消防庁長官の火災原因調査報告書、2025

https://www.fdma.go.jp/singi_kento/kento/items/post-167/05/sankou3.pdf (2025年9月7日アクセス)

Weather conditions in Ofunato city before and after the 2025 Ofunato wildfire

(Abstract)

Masahiko Shinohara

(Accepted November 4, 2025)

We investigated weather trends in Ofunato city over approximately 60 years prior to the large-scale wild fire, as well as short-term weather conditions before and after the fire. Since around 2010, summer precipitation appears to have increased, whereas winter precipitation appears to have decreased. The average precipitation in February over the 30-year period from 1995 to 2024 decreased by 40% compared to that from 1965 to 1994, with the standard deviation decreasing by 60%. Annual average humidity has shown an increasing trend since the 2010s. Average wind speed has shown an increasing trend since around 1980, and maximum wind speed has shown an increasing trend since around 1990. However, maximum instantaneous wind speed has shown a decreasing trend since the 2000s.

February 2025, when the fire occurred, was the month with the second-lowest precipitation in the 61 years and 8 months since observations began, and it had the lowest precipitation ever recorded for February. There was no precipitation exceeding 0.5 mm during the 31 days up to the day the fire started on 26 February 2025. The first precipitation of 0.5 mm or above was observed on the seventh day after the fire began, 5 March. The precipitation on this day was 26.5 mm, which was the highest precipitation recorded in this winter. The daily average humidity on the day the fire began was not extremely low, unlike the precipitation. For seven days from the fire start, the minimum humidity was below 40% except for 2 March. During this period, minimum humidity was frequently recorded in the afternoon. On 26 February, the maximum instantaneous wind speed was 18.1 m/s at 13:30, immediately after the fire started, which was the peak value for that day. On 27 February, the peak wind speed was also observed in the early afternoon. The daily sunshine duration exceeded the climatological normal from the day the fire began to the fifth day. On the day the fire started and the following day, the afternoon sunshine duration was longer than that of the morning.

消防研究所報告

通巻 134 号

令和 7 年 12 月 26 日発行

禁無断転載

編 集
発 行

消防庁 消防研究センター

〒 182-8508 東京都調布市深大寺東町 4 - 35 - 3

電話 (0422) 44 - 8331 (代表)

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

印 刷

(株)三州社

〒 105-0012 東京都港区芝大門 1 丁目 1 番 21 号



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

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

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