

季刊

消防防災の科学

夏
2024

特集

大雨災害への防災・減災（その2）
令和6年能登半島地震（その1）

連載講座

歴史に学ぶ（第1回）

なぜ、火事と喧嘩は江戸の華なのか？…… 歴史家・作家 賀来 耕三

知っておきたい気象用語の豆知識（第5回）

「熱中症警戒アラート」と「熱中症特別警戒アラート」

..... 気象予報士（元気象庁） 饒村 曜

157

一般財団法人 消防防災科学センター

この季刊誌は、宝くじの社会貢献広報事業として助成を受け作成されたものです。





一輪車



宝くじ桜



子宮がん検診車



宝くじは、みんなの暮らしに役立っています。



救急普及啓発広報車



宝くじドリームジャンボ絵本



集会用テント



「健康手帳」(冊子)



ベンチ



リスザル展示施設

宝くじは、少子高齢化対策、災害対策、公園整備、教育及び社会福祉施設の建設改修などに使われています。



一般財団法人日本宝くじ協会は、宝くじに関する調査研究や公益法人等が行う社会に貢献する事業への助成を行っています。

一般財団法人
日本宝くじ協会
<https://jla-takarakuji.or.jp/>





兼六園（金沢市） 写真協力：公益社団法人 石川県観光連盟



手取峡谷（白山市） 写真協力：公益社団法人 石川県観光連盟

消防防災の科学

No.157 2024. 夏

巻頭随想

能登に学び、まちや建物の安全を考えてみる

名古屋大学 名誉教授 福和 伸夫 2

特集 大雨災害への防災・減災（その2）

- 1 地域気候モデルによる日本を対象とした将来の降水量の予測方法
気象庁気象研究所 応用気象研究部長 村田 昭彦 5
- 2 頻発する局地的豪雨と都市で発生する水害について
京都大学 名誉教授 戸田 圭一 9
- 3 大雨・突風等をもたらす激しい気象現象と観測
高知大学 理工学部 教授 佐々 浩司 14

特集 令和6年能登半島地震（その1）

- 1 令和6年能登半島地震と群発地震と海底活断層
国立大学法人金沢大学 理工研究域地球社会基盤学系 教授 平松 良浩 21
- 2 令和6年能登半島地震における輪島市大規模火災の延焼状況
消防庁消防大学校消防研究センター 技術研究部 大規模火災研究室長 篠原 雅彦 29
- 3 令和6年能登半島地震に伴って発生した輪島市大規模火災の市街地火災延焼シミュレーション
消防庁消防大学校消防研究センター 技術研究部 地震等災害研究室 主幹研究官 高梨 健一 36

■地域防災実践ノウハウ（120・最終回）

ー「釜石の奇跡」と真の「奇跡」ー

Blog 防災・危機管理トレーニング 日野 宗門 45

火災原因調査シリーズ（113）

冷蔵ショーケースの過熱防止器から出火した事例について

熊本市消防局 48

■連載講座

歴史に学ぶ（第1回）

なぜ、火事と喧嘩は江戸の華なのか？ 歴史家・作家 加来 耕三 56

知っておきたい気象用語の豆知識（第5回）

「熱中症警戒アラート」と「熱中症特別警戒アラート」 気象予報士（元気象庁） 饒村 曜 58

編集後記

カラーグラビア

バックナンバー

消防防災の科学バックナンバーは、右記のQRコードからご覧いただけます。



能登に学び、まちや建物の安全を考えてみる

名古屋大学 名誉教授 福 和 伸 夫

元日に起きた能登半島地震では、奥能登を中心に多数の家屋が倒壊・焼失・流失し、多くの尊い命が失われた。全壊戸数は熊本地震に匹敵する。震度6強以上の揺れを観測した市町村の総人口は熊本地震の約1/6なので、家屋被害が甚大だったことが分かる。奥能登の耐震化率は50%前後に留まっており、倒壊家屋の多くは、沿岸の低地に建つ古い木造家屋だった。被災地の様相は神戸や熊本に重なるが、過去の震災に比べ復旧に時間を要している。高齢化と過疎に直面する半島先端の奥能登の厳しさを実感する。最近、消滅可能性自治体の問題が話題になったが、地方都市、なかんずく、半島先端部や河川上流部の状況は深刻である。

日本に住む限り、自然災害とは無縁では生きられない。それ故、先人たちは自然を畏れ、災害文化とも言える日本文化を育み、自然とうまく折り合う術を身に着けてきた。今でも、地方都市に出かけると、災害危険度の低い場所に集落があることに気づく。しかし、都会への若者の流出で、昔ながらの集落の持続が難しくなっている。一方、人口が集中した都会では、災害危険度の高い場所に広がったまちに、家屋が密集したり高層ビルが林立したりしており、ライフラインや高速交通に過度に依存した高効率な社会となっている。

持続可能な社会では、人間社会と自然との協調が望ましい。山や海の幸や田園に囲まれたかつての集落は、災害危険度が低いことに加え、湧き

水・井戸、くみ取り便所・浄化槽、プロパンガスの軒下備蓄、田畑や保存食、共助の仕組みなど自立力が高く、地球環境や食料自給の面でも有利である。既存家屋や空き家を耐震化し、再生可能エネルギーや蓄電システム、衛星通信システムを整備すれば、たとえ長期間孤立したとしても凌ぐことができる。空き家を活用した2地域居住を促進すれば、地域の活性化と大都市被災時の2次避難の両面に活用できる。これは、昨年7月に策定された新たな国土形成計画の考え方にも合致する。

そんな中、気がかりなのは耐震化の遅滞である。長らく耐震化の促進に取り組んできたが、奥能登での家屋倒壊の甚大さに衝撃を覚えた。地震後、中日新聞と行った中部9県の市町村アンケートによると、自治体による耐震化率の差は著しく、耐震化率と高齢化率には見事な相関があった。耐震化率が20%台の自治体もあり、全国平均87%との乖離が目立つ。もともと耐震化率の算定は戸数ベースであり、空き家が除外されていることもあり、新しい大規模マンションが多い大都市の高耐震化率に引きずられ、地方の中小自治体の実状を反映していない。現状を把握するためにも、市町村別の耐震化率の開示が必要である。

また、最近になって開示されるようになった緊急輸送道路を閉塞する可能性のある既存不適格建物の耐震診断結果によると、耐震性が確保された建物は2割程度に留まっている。災害時に緊急車

両が通行する道路沿いの建物でこの程度であることを考えれば、90%を超える耐震化率の防災拠点に比べ民間建築の耐震化は殆ど進んでいないことが分かる。生業を支える民間建築の耐震化を促進するために、そろそろ申請主義のプル型耐震化から、プッシュ型の耐震化へと施策を転換するときのように感じる。国民は普段利用している建物の安全性を知る権利を持っているはずであり、少なくとも耐震診断に関しては行政主導で公費を投入して実施し、診断結果を広く公表する仕組みを作すべきだと思う。

耐震改修の主目的は、生命を守ることにあることについても周知が必要である。建物が潰れないように上部構造を補強してはいるが、建物を支える基礎を補強することは殆どない。軟弱な地盤では建物が沈下しないように杭基礎で建物重量を支えているが、20世紀までは杭基礎の耐震設計は義務付けられていなかった。耐震改修の対象となる1981年以前の建物では杭の耐震設計は行われておらず、耐震改修しても、強い揺れを受けて杭が損傷し、建物が沈下・傾斜して継続使用できなくなる可能性はある。

もう一つ気になるのは耐震基準の在り方である。1950年に制定された建築基準法は、第一条に「この法律は、建築物の敷地、構造、設備及び用途に関する最低の基準を定めて、国民の生命、健康及び財産の保護を図り、もつて公共の福祉の増進に資することを目的とする。」と、最低基準であることを明記している。このため、現行の耐震基準は1度の大地震動に対しては生命を守るが、建物の継続使用や、繰り返す大地震動に対しての安全性は担保していない。法の制定から74年が経過し、社会状況も大きく変化している。生命に加え生活や生業を維持できる建築を目指すべきだと思う。また、新耐震基準が導入されて43年が経つ。この間に蓄積された研究知見に基づいて耐震基準を見

直していくことも必要である。

新耐震基準は2段階設計を基本にしている。1次設計では平均応答加速度が200ガル程度*の建物の揺れに対して無損傷を保証している。2次設計では弾性時の平均応答が1000ガル程度の建物の揺れに対して構造部材の損傷は許容しつつ、室内空間の保持を保証している。大地震動に対しては建物の損壊を許容していること、地盤の揺れではなく建物の揺れを規定している点に注意が必要である。

本来、建物の揺れは、地盤や建物の堅さによって異なる。すなわち、軟弱な地盤に建つ揺れやすい建物は、相対的に耐震性が低いことを意味する。本来は、地盤の揺れに対して安全性を確認すべきであり、揺れやすい軟弱な地盤では、揺れを増大すべきである。地域による差もある。例えば、福岡では8割、奥能登や高知では9割、沖縄では7割に耐震性を低減できる。近年の大地震の多くは、地震力が低減されている場所で起きていることや、最低基準の本来の趣旨を考えれば、このような地域による低減は望ましくない。

また、2次設計では、鉄骨ラーメン構造のように靱性能の高い建物では平均応答加速度が250ガル程度で損傷し始めることを許容している。一般に靱性能の高い建物では建物の揺れは地盤に比べ数倍に増幅されるので、地盤の震度が5弱～5強程度で構造的損傷を許容していることを意味する。これでは、大規模な地震後の建物の使用継続は難しい。これに対して、強度型の低層の壁式構造の建物は増幅度が小さく、構造損傷を許容しない設計をしているので、震度6強程度の揺れでも継続使用が可能だと思われる。

昨今、科学技術を駆使し、耐震基準をギリギリで満足してコストカットするバリューエンジニアリングの設計例を散見する。寺田寅彦は地震雑感の中で、「悪い年回りはむしろいつかは回って来

*実際には、基礎部分に生じるせん断力を建物重量の2割として定義

るのが自然の鉄則であると覚悟を定めて、良い年回りの間に十分の用意をしておかなければならない。」「人間は何度同じ災害にあっても決して利口にならない。」「戦争はしたくなければしなくても済むかもしれないが、地震はよしてくれと言っても待ってはくれない。」と述べている。また、天災と国防には「いやが上にも災害を大きくするように努力しているものはたれあろう文明人そのもの」と記している。寺田寅彦に馬鹿にされないように、自然への畏れを忘れず、適切なゆとりを

持っておきたい。

孫子の兵法には、「知彼知己、百戦不殆。不知彼而知己、一勝一負。不知彼不知己、每戦必殆。」との格言がある。新耐震基準による建物は、「不知彼而知己、一勝一負。」に、現行基準を満足しない既存不適格建物は、「不知彼不知己、每戦必殆。」に相当する。本来あるべき姿は、「知彼知己、百戦不殆。」である。大地震で何が起きるかを正しく想像し、危険を避け、十分な備えをして、次代に社会をバトンタッチしていきたい。

□ 地域気候モデルによる日本を対象とした 将来の降水量の予測方法

気象庁気象研究所 応用気象研究部長 村 田 昭 彦

1. はじめに

昨今、日本では、毎年のように大雨による災害が起こっている。以前と比べて雨の量が増えているのだろうか？気象庁の「日本の気候変動2020」によると、「日本国内の年降水量には、統計的に有意な長期変化傾向は見られない」とのことである。ただ、これは平均的な降水量について述べたものである。そこで、災害を引き起こすような極端な雨についての記述を探してみよう。すると、「日本国内の大雨及び短時間強雨の発生頻度は有意に増加し」とある。つまり、極端な降水については、量・回数とも増えているということになる。

さて、この傾向は将来も続くのだろうか？これに答えを出すのが、将来の気候を予測する研究である。ただ、ここでまた疑問が生じる。将来の気候など予測できるのだろうか。答えは「はい」とも言えるし、「いいえ」とも言える。予測はできるのだが、その結果に不確実性があるということである。よって、予測の誤差を考慮しつつ結果を見るといった姿勢が大事になってくる。

それでは、どのようにして将来の気候を予測するのだろうか？今のところ一般的なのは、気候モデルを使用した数値シミュレーションによって将来の気候を推定する方法である。気候モデルとはコンピュータープログラムコードの一種で、類似のモデルは日々の天気予報に使われている。ただ、気候予測は天気予報とは異なり、より長い期間の

シミュレーションが必要となるので、それに適した様々な計算手法（プログラムコード）が取り入れられている。例えば、植生の状態、積雪の有無といった地面の状態が気候に大きな影響を与えるので、気候モデルにはこれらを計算するプログラムコードが組み込まれている。日本など世界の一部分だけを対象に気候予測を行うときは、対象となる領域を設定した気候モデルを使うのが一般的である。このような気候モデルは地域気候モデルと呼ばれている。

地域気候モデルは、将来の気候の予測に関する情報を作成する際に重要な役割を担う。これまで、気象庁は日本の気候に関する予測情報を発信してきた。最新のものは前述した「日本の気候変動2020」として公表されている。このような気候予測情報のもとになっているのが地域気候モデルによるシミュレーション結果である。従って、信頼度の高い気候予測情報の発信のためには、地域気候モデルの改良、計算方法の工夫などの技術革新が必要不可欠である。本稿では前者の技術革新として地域気候モデルの空間解像度の改良を挙げる。これは、きめ細かな気候予測へ貢献することになり、将来的には市町村スケールの予測情報の発信が期待される。後者としては、アンサンブル計算の高度化を考える。これによって、予測結果における不確実性が考慮されるようになる。以下の章で、これらについて述べる。

2. きめ細かな予測

地域気候モデルの対象領域は格子と呼ばれる網目状の計算区画が設定されている。例えば縦方向に100区画、横方向に50区画あれば合計で5000の計算区画が設定されていることになる。一つ一つの区画において、気温、降水量などの各種気象要素が計算される。隣り合う区画間の距離は格子間隔と呼ばれ、この距離が短いほど空間解像度が高いことになる。よって、格子間隔をできるだけ短くすることが望ましいが、実は闇雲にそうする訳にはいかない。計算コストが大きくなってしまいうからである。

現在の地域気候モデルでよく使われている格子間隔は、数 km といったところである。例えば、前述した「日本の気候変動2020」では、格子間隔 5 km の地域気候モデルによるシミュレーション結果が用いられている。なお、ここで使われているのは非静力学地域気候モデル（NHRCM）と呼ばれるモデルである。格子間隔が狭くなると、それに応じて解像可能な大気現象の水平スケールも小さくなる。実際、研究ベースでは更に細かい 2 km、1 km といった格子間隔の地域気候モデルが使用されており、それらは雲解像（あるいは雲許容）地域気候モデルと呼ばれている。なぜ雲解像と呼ばれるのかという説明の詳細は省くが、このようなモデルを使うと大雨をもたらすような垂直に発達する雲を解像できるようになってくる。興味のある読者は少し専門的になるが村田（2018）による解説を参照されたい。

格子間隔を狭くすることによって、大気現象だけでなく地形の解像度も向上する。特に、山や谷、海岸線、島嶼などでは効果的である。日本にはこのような急峻あるいは微細な地形が多いため、高解像度化によるメリットは大きい。地形の解像度が向上すると、それに影響を受ける大気現象の再現性も向上する。例えば、降水現象で言えば、地形性降水が挙げられる。山岳の斜面に沿って上昇

する湿った気流は、頻繁に大雨をもたらす。細かい地形が地域気候モデル内で適切に解像されれば、地形性降水の位置、時間、量などの再現がより正確になる。つまり、地形の再現性の向上が間接的に大雨の予測精度の向上につながるのである。

3. 確度情報の付与

前述のように地域気候モデルの空間解像度の改善によって、予測される気候の信頼度は向上するが、完全に正確な予測を期待できる訳ではない。つまり、予測は誤差を伴う。そこで、予測にどの程度の不確実性があるか見積もることが重要となってくる。天気予報で言えば、降水の確率予報に相当するものが気候予測の分野でも必要である。このためによく行われているのが、アンサンブルシミュレーションである。アンサンブルという用語は音楽や服飾の分野で使われることが多く、複数のものが集まり一体となるというような意味である。数値シミュレーションの世界でも、複数のシミュレーション結果を用いて総合的な解析を行う。なお、個々のシミュレーションのことをメンバー、シミュレーションの数をメンバー数と呼んでいる。メンバー数が多いほど結果の信頼度が高くなるため、多くのシミュレーションを行うことが一般的である。ただし、ここでも計算機資源の制約が壁となり、闇雲にメンバー数を増やすことはできない。特に、地域気候モデルを使ったシミュレーションにおいては、長期に渡る計算が必要となるため、現状のメンバー数は多くても100程度である。

メンバー数が多いと、単一のシミュレーションでは不可能だった様々な解析が可能となる。例えば、各々のシミュレーション結果をそれぞれ統計的なサンプルとみなすことで、平均値、分散、最大・最小値などの統計量を計算できる。解釈としては、平均値を将来の気候における一般的な値、最大・最小値を極端な値と捉えることができる。

ただ、ここで一つ問題が生じる。メンバーの選び方はこれでよいのかということである。サンプルとして全メンバーを使う場合と、極端なものを外れ値と見なして除いた場合とでは、当然統計量の値は異なる。特に最大・最小値といった極端な値に対する影響が大きい。このことは、将来の気候における大雨の可能性を知りたいという立場では悩ましい問題である。各種統計量の値はシミュレーションのやり方にも依存する。例えば、多数のシミュレーションを行う際に、違う種類の地域気候モデルを使うのか、内部パラメーターを変えた同じモデルを使うのかといったことである。後者の場合は予測結果の分散を過小評価する傾向にあることが知られており、前者の方法の方が望ましいと言われている。ただ、外れ値の除き方（性能の悪いモデル結果の除外方法）についてコンセンサスが得られるには至っていない。

4. 空間解像度とメンバー数のトレードオフ

以上で見てきたように、地域気候モデルによるシミュレーションに係わる技術革新として、モデルの高解像度化とアンサンブルシミュレーションのメンバー数の増強の二つを挙げた。この二つの要素はどちらも重要である。しかしながら、計算機資源の制約のため、両者を同時に高度化することはできない。この当たりの事情を現在公開されているデータセットを例にして概観したい。このデータセットは気候予測データセット2022 (DS2022) と呼ばれているもので、地域気候モデルによる将来予測結果だけでなく、その他のモデルを用いて作られた結果も収録されている。地域気候モデルシミュレーションによって得られたデータの解像度（格子間隔）とメンバー数を2次元の散布図にしてみたのが図1である。

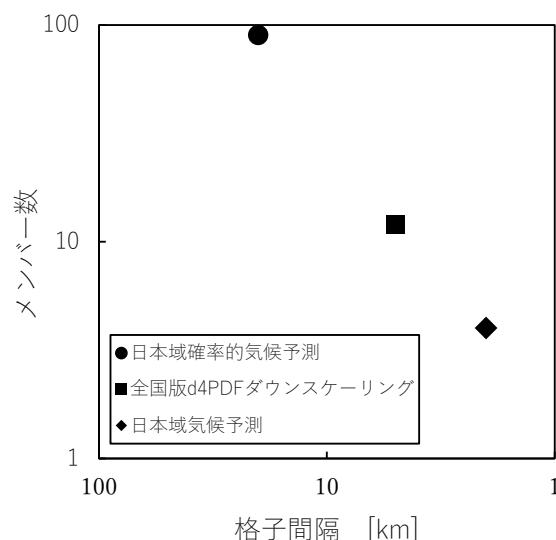


図1 地域気候モデルシミュレーションによって得られたデータの解像度（格子間隔）とメンバー数の関係。気候予測データセット2022（DS2022）に収録されているデータセットの情報から作成した。

図1によると、解像度が高く（格子間隔が狭く）なるとメンバー数が少なくなり、逆にメンバー数が増えると解像度が低く（格子間隔が広く）なるといった対応関係が見て取れる。高い解像度かつ多数のメンバーを持つデータセットは見当たらない。つまり、解像度とメンバー数の間にはトレードオフの関係がある。従って、利用者は目的に応じてデータセットを使い分ける必要がある。

5. おわりに

本稿では、日本を対象とした将来の降水量を予測する上で基本的なツールとなっている地域気候モデルの現状について、その空間解像度とアンサンブル計算に焦点を絞って概観した。空間解像度を高くすると共にアンサンブル計算のメンバー数を増強すれば、信頼度の高い予測結果が得られることを説明した。ただ、計算機資源の制約のため、両者を兼ね備えることが難しいことも述べた、

これを解決する手段はあるのだろうか？一つ考えられることは、統計的な手段を用いることであ

る。統計的な手段を使ってきめ細かなデータを作成することを統計的ダウンスケーリングと呼んでいる。一方、地域気候モデルのような物理法則に基づく手段が使われた場合は、力学的ダウンスケーリングと呼ばれている。これらには一長一短があるのだが、計算速度については、統計的ダウンスケーリングに軍配が上がる。また、最近の発展が目覚ましい人工知能（AI）の助けを借りて、気候予測データを作成することも考えられる。

ただ、現状では、統計的ダウンスケーリングとAIのどちらも力学的ダウンスケーリングを凌駕するような性能を得るに至っていない。将来予測に関して言えば、これまでになかったような大雨

などの極端現象が将来に起こる可能性があり、過去のデータの学習を基本とする統計的ダウンスケーリングやAIにとっては、予測が困難となることが想定される。当面は、特に大雨のような極端な現象の予測については、力学的ダウンスケーリングに頼ることになるだろう。

【参考文献】

- 気象庁・文部科学省，2020：日本の気候変動2020，
<https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/ccj/>
村田昭彦，2018：雲解像地域気候モデルの現状，混
相流，32，424-431，doi:10.3811/jjmf.2018.T012.
文部科学省・気象庁，2022：気候予測データセット
2022（DS2022），<https://diasjp.net/ds2022/>

□ 頻発する局地的豪雨と都市で発生する水害について

京都大学 名誉教授 戸 田 圭 一

はじめに

気候変動の影響を受けて極端事象が増え、雨の降り方の時空間的な集中度が高まっています。激しい雨が狭いエリアで数時間続くようなケースが多発傾向にあり、台風や前線単独による豪雨だけでなく、両者が刺激しあって大量の雨を降らせたり、線状降水帯の発生により、局地的に時間雨量50mmを超過する「ゲリラ豪雨」と呼ばれる激しい雨が発生したりします。最近では雷の発生とあわせて「ゲリラ雷雨」と呼ばれるものも出てきています。

都市域が豪雨に襲われた際には、都市の複雑な構造の影響から、浸水被害が増大したり、場合によっては思いもかけぬ人的被害が発生したりすることもあります。ここでは主に、短時間の豪雨で発生する都市での水害を中心に、その特徴を取りまとめるとともに、その対応策について少しばかり考えていくこととしましょう。

1. 都市域での水害の特徴

都市域での水害の特徴ならびにその危険性をまとめると以下のとおりです。

(a) 内水氾濫

水害の発生形態はさまざまですが、大きくは、河川が溢れたり、堤防が決壊したりして生じる「外

水氾濫」と、市街地に降った雨（内水）を下水道やポンプなどでうまく排水できずに起こる「内水氾濫（雨水流出）」とに分けられます。

最近では、短時間の集中豪雨の増加により内水氾濫が頻発しています。とくに、大都市圏および周辺の低平地域では、この種の水害に悩まされているところが多いのが実情です。なお、都市域の中小河川は、下水道と同様に内水の処理を受け持つことも多いことから、内水氾濫は、規模の小さい都市河川からの氾濫を含めて考えてもよいかと思っています。

(b) 地下浸水

氾濫が発生すると、氾濫水は地盤が低い場所へと流下していきますが、都市域の最深部に位置するのが地下街、地下鉄、地下室といった地下空間です。10年以上前から地下鉄や地下街への浸水が多々見られますが、過去にさかのぼると、1999年や2003年の福岡市での氾濫で大規模な地下浸水が発生しました。1999年のときは地下の飲食店の従業員が水死する事故も発生しています。

氾濫水が地下空間に流れ込むと、地上に比べて面積が小さいため、急激に水深が上昇します。その際には避難が重要となりますが、地上への逃げ口は階段であり、流れに逆らっての避難は大変な困難を強いられます。実物大の階段模型を用いた体験型の避難実験によれば、地上の水深が30cmのときに階段に水が流入してくる状況が成人の避



図1 実物大の階段からの避難実験

難限界となります(図1参照)。また地下室からドアを押し開けて避難する事態もありえますが、幅80cmの実物大ドア模型の前面に水をはり、水压に逆らってドアを押し開ける実験をしたところ、水深40cm程度で成人男性が、35cm程度で成人女性が、それぞれドアを開けるのが困難となりました(文献1)。子供や高齢者では、階段でもドアでも避難の厳しさはいっそう高まります。図2は、従来の知見(文献2)も含めて、地下空間での浸水時の通路、階段、ドア部での避難限界をまとめたものです。これからわかるように、地下浸水が

起こってからの避難はことのほか危険であり、最悪、死亡事故を招いてしまうことに十分な注意が必要です。

(c) 車に関する水難事故

道路や鉄道の下をくぐるアンダーパスの地盤は、場所によっては周囲に比べてかなり低くなっており、氾濫が起こったときには氾濫水が集中します。図3に示す、水槽の横に実物大の車を設置した模型による体験型の避難実験によれば、車内が浸水していないという条件の下で、地上からおおよそ80cmの水深時に成人男性が開閉式のドアを押し開けるのが困難となりました(文献3)。この結果は、車種を変えてスライドドアの車で行ってもほぼ同じでした(文献4)。アンダーパスでは浸水時には水深が1mを超すこともあり、実験結果は、氾濫時に誤って車が進入すれば、人は容易には脱出できないことを示しています。このような箇所はどの街にも存在しており、十分すぎるくらいの注意が必要です。

一方、氾濫流の勢いが強いときには、車が漂流する危険もあります。実験水路に縮尺1/10と

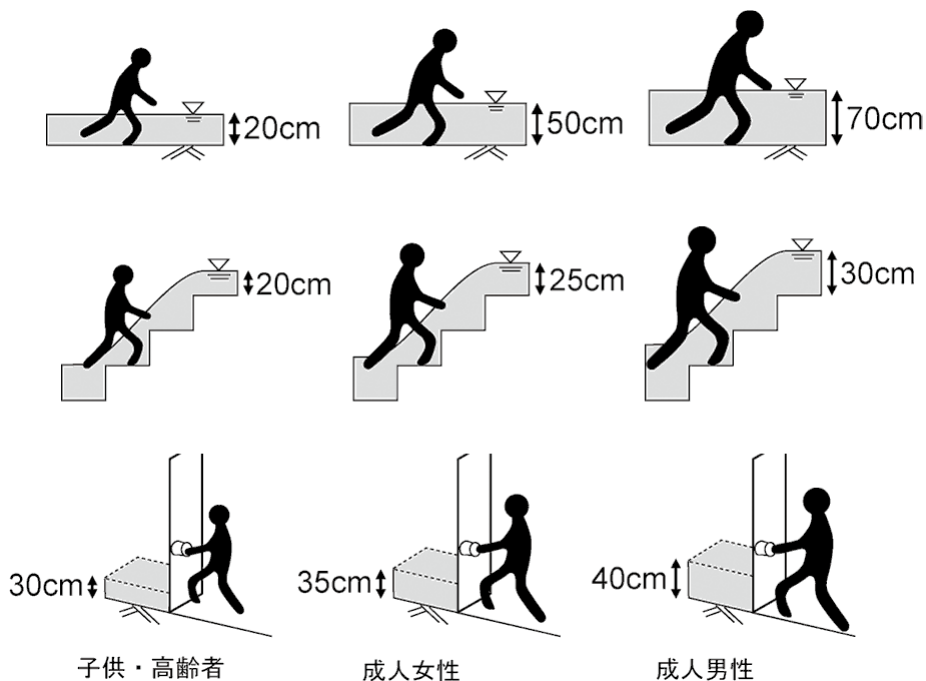


図2 地下空間浸水時の避難限界指標(平面部、階段部、地下室のドア)



図3 開閉式ドアの車からの避難実験

1/18の車模型を設置して水を流し、どの程度の流速と水深のときに車が流され始めるかを調べる実験(文献5)を行いました。車の種類や方向などさまざまな要因が影響しますが、実物値に換算して氾濫水の流速が毎秒2mを超え、かつ水深が0.5mを超えると、ほとんどの車が流される危険性が高いことがわかってきました。

また縮尺1/60程度のミニカーを用いて急傾斜の市街地模型で車の動きを実験で調べたところ、交差点付近で漂流した車が停止して衝突したり、道路終端で車が激しく重なりあったりする状況が現れました。津波だけでなく洪水氾濫でも、街の中で車が危険な状況になることは大いにあります。

2. 水害の防止・軽減策

水害、とくに都市水害の防止・軽減にあたっては、氾濫のメカニズムを知り、水の動きをある程度、正確に予測したうえで、総合的な対策を進めていくことが大切です。あわせて、都市特有の水害への対応策も考えておく必要があります。

(a) 都市水害の予測

都市の水害を予測するための、コンピュータによるシミュレーションモデルの開発が進んでいます。豪雨による氾濫の場合、洪水の発生と流下、氾濫、そして下水道による排水という水の動きを

連続的にとらえた全体モデルが作成されています。場合によっては地下街や地下鉄といった地下空間の浸水モデルも全体のモデルに組み込まれたりしています。このようなモデルを用いたシミュレーション解析により、豪雨によって、街のどこで、どの程度の浸水が発生するかを地下空間も含めて予測することが可能となります。そして、その結果をもとに、さまざまな対策を考えて被害の軽減を図っていきます。

(b) 総合的な治水対策

都市域では、構造物などの施設による対策(ハード的対策)と施設によらない対策(ソフト的対策)を組み合わせた総合的な治水対策が基本となります。

ハード的対策として内水氾濫対策では、雨水を排除するための河道の整備、下水道の整備が重要であるのは言うまでもありませんが、下水道網やポンプの排水能力の向上だけでなく、一旦、雨水を貯留する大小さまざまな規模の雨水貯留施設や雨水浸透施設を併用することも必要かつ重要です。とくに高度に都市化した地域では、これから先、地上の空間を活用した治水施設の整備を進めていくのが難しいことから、地下空間を有効に活用した雨水放流施設、雨水貯留施設などを整備していくことが望まれます。

ソフト的対策としては、都市域での氾濫を想定した「都市水害ハザードマップ」を作成し、住民に氾濫危険箇所ならびに避難を含めた水害時の対処法を知らせておく必要があります。従来の洪水ハザードマップは比較的大きな河川の破堤による外水氾濫を対象としたものが主でしたが、都市域では、内水氾濫を対象とした浸水予測も外水氾濫とともに重要となります。またハザードマップには、浸水深だけでなく、流速の大きさもあわせて示してあることが望まれます。氾濫時の避難の難しさには、流速が大きく影響するからです。さらに、地下空間や道路・鉄道の下をくぐるアンダー

パスなど、浸水時の危険箇所を明示することも大切です。

一方で、氾濫に対する警戒情報や避難情報の伝達システムを整備することも重要な課題です。また、高齢者を含む一般市民や子供達への防災教育、コミュニティでの避難訓練といった地道な活動も決しておろそかにしてはいけません。

(c) 地下浸水への対策

都市域での水難事故発生危険箇所である地下空間への対応を忘れてはなりません。

ハード的な対策としては、氾濫水の流入経路となる階段などの地下への入口に、止水板を設置したり、通路面よりも高くした段差（ステップ）を設置したりすることが重要です。地下駐車場入口の路面の盛り上げも同様です。地上の浸水深がこれらの高さまでであれば流入を防ぐことができますし、これらを越えた浸水が生じたとしても、浸水する量を減らし、かつ浸水を遅らせる効果が期待できます。

ソフト的な対策としては、地下への情報伝達と避難システムの整備が重要となります。地下街や地下鉄では、気象情報や河川情報および地上での状況が一元的に地下に伝達され、地下施設の管理者・関係者がいち早く対応できる体制づくりが望まれます。

ビルの地下室、地下駐車場は、床面積が小さく水位の上昇が速いので、浸水時の危険性はさらに深刻です。複数の避難経路や、建物の2階以上の場所への避難策などを考えておく必要があります。

(d) 車に関係する事故への対策

まず、氾濫のシミュレーションによって道路の浸水状況を予測し、車が立ち往生したり、流されたりする危険性を明らかにすることが重要です。氾濫時にどこで、どのような交通障害が発生するか、またアンダーパスの浸水が発生するかどうか、事前に状況を予測することが大切です。

対策としては、ドライバーに氾濫時の車の運転の危険性を強く訴えることに加えて、氾濫時の速やかな交通規制が望まれます。さらに、大きな浸水が予想される箇所については、道路区間の一部嵩上げや、止水機能を兼ね備えたガードレールの設置などが考えられます。

鉄道・道路の下をくぐるアンダーパスについては、万一、浸水したときに誤って車が進入することがないように、水深をセンサーで感知して緊急信号を発したり、注意喚起のカーテンが降りたりするような対策を考えていく必要があるでしょう。また最悪の場合に備えて、ドライバーが窓ガラスをたたき割るための先の尖ったハンマーを準備しておくことも大切です。

おわりに

これから先、ますます、極端な気象現象が増加することが懸念されます。各地で起こった、あるいは起こるかもしれない様々な問題を考えた災害シナリオを検討し、そして、それらをもとにした対応策の検討がいつそう重要となるでしょう。

特に人命を失う危険性があることから、「地下空間」と「車」にはとくに注意が必要であることを忘れてはなりません。

水害対策に対しては残念ながら特効薬はありません。住民も行政関係者も、水害に対して謙虚な姿勢で、「自助」「共助」「公助」のレベルアップに地道に努めていくことが強く望まれます。その努力の積み重ねと正しい知識が、いざという時の人命の確保や、被害の軽減につながることでありましょう。

ここでは、私が関西大学ならびに京都大学の研究者と共同で実施した水害研究の成果を中心に紹介しました。共同研究者の石垣泰輔先生、尾崎平先生、馬場康之先生にこの場を借りて心より謝意を表します。

【参考文献】

- 1) 石垣泰輔・戸田圭一・馬場康之・井上和也・中川一：実物大模型を用いた地下空間からの避難に関する実験的検討、水工学論文集第50巻、土木学会水工学委員会、pp.583－588，2006.
- 2) 亀井勇：台風に対して、天災人災 住まいの文化誌、ミサワホーム総合研究所、1984.
- 3) 馬場康之・石垣泰輔・戸田圭一：水没した自動車からの避難の難しさ、京都大学防災研究所年報第53号B、pp.553－559，2010.
- 4) 馬場康之・石垣泰輔・戸田圭一：水没した自動車からの避難の難しさ（その2）、京都大学防災研究所年報第54号B、pp.465－470，2011.
- 5) 戸田圭一・石垣泰輔・尾崎平・西田知洋・高垣裕彦：氾濫時の車の漂流に関する水理実験、河川技術論文集第18巻、土木学会水工学委員会河川部会、pp.499－504，2012.

□大雨・突風等をもたらす激しい気象現象と観測

高知大学 理工学部門 教授 佐々浩司

1. はじめに

我が国の気象予報に関する技術は、気象衛星、レーダーネットワーク、ウィンドプロファイラなどの観測システムや、数値予報モデルの運用も含めて世界のトップクラスにあるにも関わらず、顕著な大雨や突風は毎年のように発生し、被害を防ぐことはできていない。これを単純に気候変動のせいにして、温暖化を食い止めると気象災害が減ると考える人もいるかも知れないが、これは大きな間違いである。確かに温暖化は積乱雲の源となる水蒸気をより多く大気中に含む環境を助長はするものの、気象災害をもたらす顕著な気象現象は温暖化以前から存在しているものであり、温暖化を解消したところで無くなるものではない。気象災害への備えと温暖化対策とは切り離して考えるべきである。ここでは気象災害をもたらす顕著な雨と突風現象に焦点をあて、これらの現象についてわかっていることと、未解明なことと、それを解決するための挑戦について紹介するとともに、気象防災に有用な現状で得られる情報の活用法について述べたい。

2. 大雨をもたらす降水システム

時間雨量が30mm/hを超えるような強雨をもたらす降水システムとしては、(1) 孤立積乱雲、(2) マルチセル、(3) 線状降水帯、(4) スコールライン、

(5) 台風のレインバンド、(6) 地形性降水などが挙げられる。

(1) **孤立積乱雲**：周囲の環境風が弱い場合に生じる、水平規模が最大で10km程度の対流雲で熱雷とも呼ばれる。通常の寿命は発生から消滅まで1時間程度であり、強雨は20～30分程度しか持続しないが、局所的な強雨が時として都市部などで災害をもたらす。一般にはゲリラ豪雨と呼ばれる。周囲の環境風が強まり、上空と地上との風速差（以後、鉛直シアと呼ぶ）が大きくなると、孤立積乱雲の中に強い回転上昇流であるメソサイクロンが発生し、スーパーセルになる。通常の孤立積乱雲は自身を成長させるための上昇流と降水に伴う下降流が打ち消し合うことによって最終的に消滅するが、スーパーセルの場合は上昇流域であるメソサイクロンと降水域が水平方向に分かれて存在し上空と下層の気流循環が持続するため、長時間持続することができる。発達したスーパーセルの場合、強雨だけでなく、大粒の雹をもたらすこともある。

(2) **マルチセル**：積乱雲が広範囲に発達しやすい環境にあると、複数の積乱雲が発生し、強雨をもたらす。個々の寿命はやはり1時間程度であるが、降水に伴って積乱雲の下層に生じた冷気プールから冷気外出流が発生し、これが別の積乱雲からの冷気外出流と衝突することによって、新たな積乱雲発生のきっかけとなる気流収束が起こり、次々と積乱雲が発生・消滅を繰り返す

ため、広範囲に長時間大雨をもたらすことになる。他のシステムとして分類している(3)～(5)も広い意味ではマルチセルに属するが、特別に組織化することからここでは区別して扱う。

- (3) **線状降水帯**：鉛直シアが強い環境では、積乱雲が発生すると風下に流されるが、上流側の大気下層に新たな積乱雲発生之源となる気流収束があると、そこで次々と積乱雲が発生し、風下に流される状況が持続する。個々の積乱雲の寿命が1時間程度であっても、次々と到来する新たな積乱雲により、結果として同じ場所に強雨が長時間持続することになる。図1に示す線状降水帯は複数のレーダーを用いてデュアルドップラー解析をした事例で、反射強度の大きい部分が線状降水帯を構成する積乱雲群に相当する。線状降水帯の開始点に近い南西端では気流が収束している様子が見られる。豪雨災害は線状降水帯の発生によるものが多い。

- (4) **スコールライン**：ある時刻のレーダー画像で見ると線状降水帯と同様に積乱雲が線状に組織化されているが、移動方向が大きく異なり、降水システムの走向とは大きな角度を持った方向

に早く移動するものである。停滞することはあまりないため、強雨は短時間しか持続しないが、時としてガストフロントなどの突風を伴う場合がある。

- (5) **台風のレインバンド**：台風の旋回気流に伴って組織化される積乱雲で構成された螺旋状の雨雲の列であり、強い風と強雨をもたらす。台風目のまわりにある目の壁雲は最も強い強風と強雨をもたらすが、台風の一番外側にあるアウターレインバンドも強雨と共に時として竜巻のような突風をもたらすことがあり、注意が必要である。台風の移動速度が遅い場合は、同じ場所にレインバンドが停滞するため、豪雨災害を引き起こす。

- (6) **地形性降水**：台風環境下で太平洋上の湿潤な暖気が流入し、山地斜面を滑翔する状況では、地形上昇により積乱雲が発達し、大雨をもたらす。特に強い風が流入し続ける場合は積乱雲の源となる水蒸気が大量に供給し続けられるため、長時間にわたって同じ場所で強雨が持続する。図2にレーダーで見た一例を示す。なお、海上に見られる螺旋状の降水域が先述のレインバン

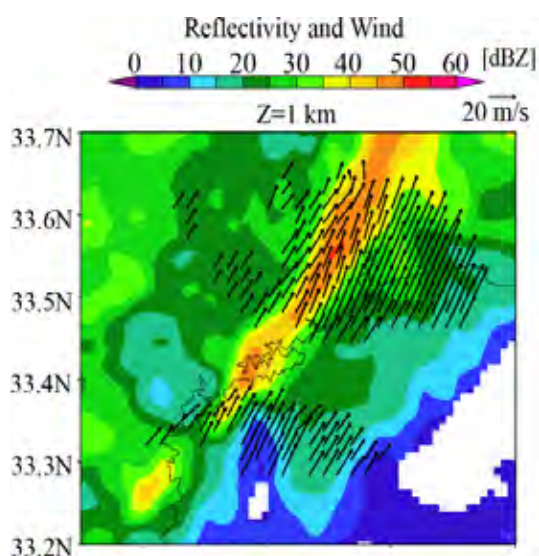


図1 高知県の南西海岸線沿いに形成された線状降水帯の高度1 kmにおけるデュアルドップラー解析結果。ベクトルは風向きを示し、シェードは反射強度を示す。

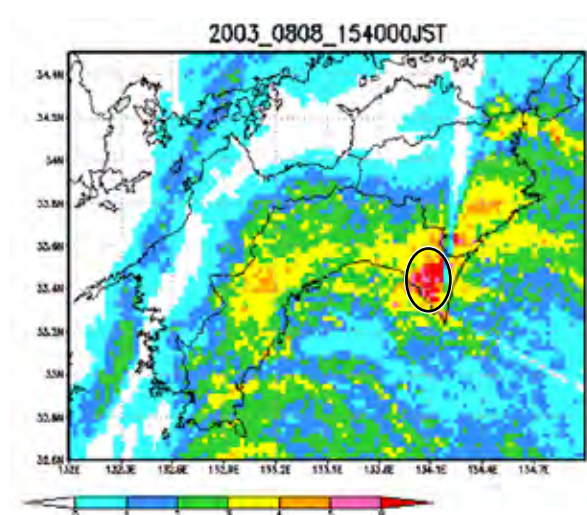


図2 レーダー降雨強度で見た台風に伴う地形性降水の例。図では四国の南に台風があり、四国東部に台風による南西風が湿潤な空気運び続けるため、図中に楕円で示す室戸岬から北に続く尾根筋の近傍で長時間強雨が持続する。

ドであるが、この例では地形性降水の方が激しい雨をもたらしている。地形性降水は図示したように地形の急峻な四国地域のみならず、九州や紀伊半島においてもよく見られるだけでなく、時として風の強い温帯低気圧に伴って発生することもある。

津口・加藤¹⁾は過去の集中豪雨について統計調査を行い、台風による大雨が全体の32%を占める一方、それ以外の環境において豪雨をもたらすのは線状降水帯が6割以上であることを示した。

3. 大雨の発生環境と予測

集中豪雨の原因として特に着目されている線状降水帯については、Kato²⁾の6条件が満たされたとき、発生しやすいとされている。6条件とは、(1)水蒸気フラックス FLWV が $150\text{g/m}^2\text{s}$ を超えること、(2)500m 高度から自由対流高度までの高さ dLFC が1km 以下であること、(3)上空500hPa 面(およそ高度5500m)もしくは700hPa 面(およそ高度3000m)における相対湿度が60%を超えること、(4)鉛直シアの大きさを表す嵐に相対的な環境ヘリシティ SReH が $100\text{m}^2/\text{s}^2$ を超えること、(5)高度700hPa 面の400km 平均領域において上昇流があること、(6)平衡高度が3000m を超えることである。これらの条件から大雨がもたらされる環境について考える。積乱雲が発達するためには、その源である水蒸気が大量に供給される環境が必要であり、その指標として(1)と(3)が挙げられる。(1)は大気下層から如何に湿った空気が流入するかをみる一方、(3)は上空の湿り具合を評価するものである。梅雨前線が存在するときは、中国大陸で発生した降水に伴う大量の水分が梅雨前線上の気流である梅雨ジェットに伴って日本に運びこまれるため、上空が湿った状態になる。梅雨期に線状降水帯が発生しやすいのは、このためである。ところで、積乱雲が発生するためには下層の水蒸気を自由対流高度まで持ち上げなければ、水蒸気

の凝結に伴う発熱が周囲の空気を上昇させることができない。(2)はこの自由対流高度が低ければ低いほど下層の水蒸気を持ち上げるためのエネルギーが小さくて済むことを表している。持ち上げるきっかけとなるのは先述のような気流収束や地形上昇の他に熱対流も挙げられる。線状降水帯の場合は、島や山など特定の地形が気流収束のきっかけとなることが多い。(5)(6)はより上空まで対流が発達する環境であることを示す。(4)は線状降水帯として積乱雲が組織化するのに必要な鉛直シアの強さを示す指標であるが、この指標はスーパーセルが発達する指標としても用いられる。スーパーセルの場合は、 $\text{SReH} > 150\text{m}^2/\text{s}^2$ が発生条件となる。これらの条件は梅雨前線のみならず、温帯低気圧接近時や台風影響下においても満たされることがある。

天気予報に用いる数値シミュレーションは、おおまかな天気についてかなりの精度で的中させることができるものの、線状降水帯や孤立積乱雲の発生を的確に予測することはまず不可能である。これは、シミュレーションに用いる気象モデルの解像度が不足しているからではない。現在気象庁で運用している局地気象モデル LFM は水平スケールで2 km の解像度を持ち、個々の積乱雲を再現することが可能である。しかし、実事例をうまく再現できた結果においても、発生位置が数10km ずれていたり、発生時刻が数時間ずれたりすることの方が多い。これは気流の運動方程式が非線形であり、データ同化される観測データのわずかなずれが予測結果に大きく反映されるためである。従って、線状降水帯の発生はピンポイントで予測されるものではなく、上記の発生条件を満たす領域を対象としてシミュレーション予測結果を用いて評価される。方程式の非線形性の問題を解消するために、初期データを意図的にずらした複数のメンバーをシミュレーションして、統計的に起こりやすい気象状況を判断するアンサンブルモデルが活用されている。台風の進路予報につい

ては、アンサンブルモデルの利用によって改善されつつあり、台風に伴う降水はかなりの確度で予測できる。地形性降水も台風の位置関係により、ある程度発生予測が可能である。しかし、積乱雲発生の源である水蒸気の流入量については観測データが不足している。近年気象庁はマイクロ波放射計を多数配置して水蒸気量の評価を始めているが、特に太平洋に面する地域では、太平洋から如何にして水蒸気が輸送されてくるかといった観測データが欠落している。線状降水帯発生の起源となる海上からの水蒸気流入を観測船によって把握するプロジェクト³⁾も行われているが、常に観測を行うことはできないため、広く海上の水蒸気分布を把握できる新たな気象衛星⁴⁾の実運用が期待されている。

4. 突風

突風は以下の3つに分類される。

- (1) **竜巻**：対流性の雲に伴って発生する鉛直軸を激しい渦であり、親雲の移動に伴って直線的な狭い領域に被害をもたらす。よく晴れた日の運動場などで見られる渦巻きは塵旋風と呼ばれ、親雲の上昇流ではなく、熱対流によって引き起こされる別の現象である。
- (2) **ガストフロント**：積乱雲の降水に伴って上空の冷氣が地上に蓄積したのち周囲に吹き出す冷氣外出流の先端部分を指し、水平渦を伴う。夕立前の冷氣はこのガストフロントの通過によるものである。しかし、上層の気流によって積乱雲が早く移動する場合はガストフロントも突風被害をもたらすことがある。図3はさいたま竜巻をもたらしたスーパーセルの後方からガストフロントが接近する様子を示している。この事例ではガストフロントが降水によって可視化されているが、比較的湿潤な環境にある日本では何も見えないことが多く、ガストフロント上空のアーク雲に（図4）によってしか接近を判断す



図3 2013年さいたま竜巻をもたらしたスーパーセル（押井氏撮影）。画面中央左手のやや黒い部分が飛散物などによって可視化された竜巻。その左手にガストフロントが降水粒子に可視化されて認められる。また画面右手のスカート状の雲はスーパーセル前面側のガストフロントの存在を表す。



図4 高知市葛島付近で発生したアーク雲（著者撮影）
左手奥は激しい降水で視界が悪くなり、この上空に積乱雲本体が存在することがわかる。アーク雲はガストフロントに湿潤な暖気が乗り上げることによって形成される。

ることはできない。

- (3) **ダウンバースト**：積乱雲中で雹の落下などに伴い、狭い範囲に強い下降流が発生した場合、地上に衝突したのちガストフロントと同様な水平渦を伴って進行するのがダウンバーストである。図5の再現実験で示すように、ダウンバーストの強風域は先端の水平渦ではなく、その下層にある地上付近の領域である。

これらは、台風接近時のように強風が持続する場合と異なり、極めて局所的かつ短時間に発生し

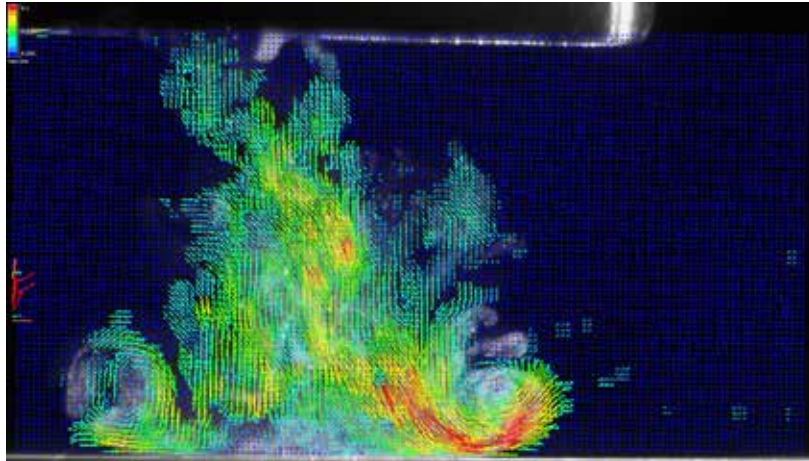


図5 水槽実験で再現したダウンバーストの速度分布。
先端の水平渦の下にある地面付近の領域が最も強い風をもたらす。

消滅または通過してしまうため、観測で捉えることが難しい。気象レーダーにより後解析で現象を調べることはできるものの、突風がスーパーセルに伴う場合を除いて事前に接近情報を得ることは難しい。

5. 突風による被害

大雨は、土砂災害や氾濫災害などの誘因であり、気象現象が直接被害をもたらすものではないが、突風は直接被害をもたらす。図6に竜巻による被害事例を示す。風上側で破壊された家屋の柱が壁を突き抜けている様子が認められる。突風被害で最も怖いのは、飛来物がミサイルのように到来す

ることである。木片がタイヤに突き刺さったり、窓ガラスを突き破ったりするようなことも起こり得る。室内にいた人がこのような飛来物によって大怪我をした事例もある。従って、竜巻注意情報が発表されている場合は、窓の雨戸を閉め、厚いカーテンを引くとともに、外壁からなるべく遠ざかる場所にいることが重要である。また、時間に余裕があれば、飛来物の元となるような家の外にある風に飛びやすいものを片付けておきたい。なお、プレハブ倉庫などは突風で簡単に転倒する事例が多くみられている。屋外にいる場合は頑丈な建物に避難したい。

6. 突風の発生環境と予測

突風は上記のように積乱雲に伴って発生する。従って、突風をもたらすような積乱雲が発生しやすいような環境の把握が重要となる。そのような積乱雲の発生指標としては、先述のSReHの他、CAPE(対流有効位置エネルギー)が挙げられる。CAPEは大気不安定度でより上層まで積乱雲が発生する様子を示す指標で、先述の6条件のうち(2)(3)(5)(6)に関連する指標である。日本では $CAPE > 2000 \text{ J/kg}$ ではかなり不安定な状況を示すが、米国では $CAPE > 4000 \text{ J/kg}$ となることもある。



図6 2006年佐呂間竜巻の被害例(著者撮影)

また、CAPE と SReH の積である EHI(エネルギーヘリシティインデックス)も用いられる。これらは主として強い竜巻をもたらしやすいスーパーセルの発生環境指標として使われる。現在気象庁が発表している竜巻注意情報⁵⁾は、数値予報モデルによりこれらの指標が発生環境を満たす場合や、気象レーダーがメソサイクロンなどの積乱雲中の渦を検出した場合に発表される。しかしながら、地表面付近に渦度を集中させるガストフロントを伴うことから本質的に竜巻をもたらす可能性が高いスーパーセルですら米国が警報を発表しても1/4程度しか当たらない。まして、親雲の多くがスーパーセルではない日本では、竜巻注意情報の的中率は5%程度とされている。スーパーセルでない積乱雲の場合、レーダーで上空の渦を捉えることができるのが竜巻発生と同時であることが発見を困難にしている。加えて、竜巻発生の原因となる下層の気流環境も十分に把握できていないことが、予測を困難にしている。これを打開するため、著者らは再現実験により竜巻をもたらす下層気流の条件を詳細に調べている⁷⁾。ただし、地上付近の気流環境はライダーなどのリモートセンシングを除いて観測ができないため、実験の成果を反映させて、可観測な情報から予測を可能とするためには、モデルシミュレーションにより、上空の積乱雲との対応関係から前兆現象を把握する必要がある。一方、竜巻親雲の形態も様々なものがあることが明らか⁸⁾になりつつある。日本においては、軽微な被害の場合は、孤立積乱雲によるものが多いが、マルチセル環境でも数多く竜巻が発生することがわかってきた。これらの降水システム毎に地域特性や発生環境を明らかにすることにより、より精度の高い注意情報の発出に寄与できるものと期待している。

7. 気象災害低減のための観測の高度化

線状降水帯や、突風をもたらす積乱雲の内部構

造はまだ十分に明らかではない。これまでに述べてきた発生環境はあくまでこれらのシステムがしやすい環境を示すものであって、内部構造をより詳細に把握する必要がある。現在、国内には気象庁の配備した気象レーダー、国土交通省のXRAIN、空港気象レーダーなどが常時運用されており、これらはいずれも降水強度のみならず、ドップラー速度により局所的な渦や収束線などの現象の検出を可能としている。さらにXRAINや気象庁レーダーの多くは二重偏波化されている。二重偏波レーダーは、降雨強度をより正確に観測できるだけでなく、積乱雲の中にある、雪や霰、雹など降水粒子の性状も判別することができるため、積乱雲の内部構造を詳細に理解することができる。積乱雲の急激な成長減衰過程を把握するためには、より高速なスキャンができるフェーズドアレイレーダーが必要となるが、まだまだ高価であり、全国配備は難しい。代わりに通常のパラボラ型二重偏波レーダーを密に配置するレーダーネットワーク⁹⁾が有用である。これは、ボリュームスキャンに用いる仰角数を制限することによって1分毎の高速スキャンを可能にするだけでなく、レーダー付近の激しい降水によって起こる降雨減衰を相互に補完して観測精度を向上させることが可能である。国土交通省のXRAINも同様な理由で都市部を中心とした密な配備がなされている。さらに、複数のレーダーを用いれば、図1に示したようなデュアルドップラー解析を行うことにより積乱雲内部の気流構造も把握することができる。これらに加えて、先述の水蒸気観測データが加われば、よりの確な情報提供がなされるものと期待される。

8. レーダー観測情報の活用

気象庁ホームページのナウキャスト <https://www.jma.go.jp/bosai/nowc/> は5分毎の雨雲の様子を示すだけでなく、竜巻発生確度ナウキャストや

雷ナウキャスト、線状降水帯の情報を随時提供している。日頃から雨雲の様子を把握することによって、外出時の時間調整などに活用できる他、自身がいる場所において通常とは異なる強い雨雲が認められれば、早期に避難することができる。現状では線状降水帯の発生予測的中率も1/4程度であり、竜巻注意情報も先述のように的確な予測は難しいが、空振りであったとしても、実訓練と捉えて常々情報発表時には適切に対応できるよう心がけておきたい。合わせて、自身の目で判断することも重要である。強雨であれば、通常と明らかに異なる激しい雨が持続することを実感でき、レーダー情報と照らし合わせて早めの避難行動を取りたい。突風の場合は、強雨に続いて起こる事例もあるが、ガストフロントのように積乱雲に先行して発生する場合もある。この場合はレーダー情報で近くに発達した積乱雲があるか、竜巻発生確度ナウキャストや雷ナウキャストが高い値を示



図7 つくば竜巻接近時(左)と通過後(右)の様子(大野氏撮影) 竜巻接近時は上空の積乱雲に太陽光が遮られ、地上が夜のように暗い。

していないかを確認するとともに、黒い雲が近くにないかを確認しておく必要がある。竜巻は積乱雲の比較的后方に位置することが多いため、図7のような積乱雲で暗くなる様子から、避難行動をとることができる。

【引用文献】

- 1) 津口裕茂, 加藤輝之, 2014: 集中豪雨事例の客観的な抽出とその特性・特徴に関する統計解析. 天気, 61, 455-469.
- 2) Kato, T., 2020: Quasi-stationary band-shaped precipitation systems, named “senjo-kousuitai”, causing localized heavy rainfall in Japan. J. Meteor. Soc. Japan, 98, 485- 509
- 3) Manda, A., Y. Tachibana,, H. Nakamura, T. Takikawa, A. Nishina, Q. Moteki, N. Zhao, and S. Iizuka, 2024: Intensive Radiosonde Observations of Environmental Conditions on the Development of a Mesoscale Convective System in the Baiu Frontal Zone, Earth and Space Science (accepted).
- 4) 静止気象衛星に関する懇談会, 2023: 次期静止気象衛星(ひまわり10号)の整備・運用のあり方に関する提言, https://www.data.jma.go.jp/sat_info/himawari/kondan/himawari10/torimatome.pdf.
- 5) 滝下洋一, 2009: 突風に関する防災気象情報の改善, 天気 56, 67-75.
- 6) Wakimoto, R.M. and H. Cai, 2000: Mon. Wea. Rev., 128, 565-592.
- 7) 佐々浩司 2020: 第6章 室内実験による竜巻の物理の理解, 気象研究ノート 第243号 竜巻を識る, 193-226.
- 8) 芝山泰成, 佐々浩司 2024: 日本に竜巻をもたらす降水システムの分類, 日本気象学会2024年度春季大会講演予稿集 125, 74.
- 9) 佐々浩司 2022: 5.1.9 小型レーダーネットワーク, 強風災害の変遷と教訓第3版, 日本風工学会風災害研究会編, 249-255.

□ 令和6年能登半島地震と群発地震と海底活断層

国立大学法人金沢大学 理工研究域地球社会基盤学系

教授 平 松 良 浩

1. はじめに

令和6年1月1日16時10分に能登半島北東部を震源とするマグニチュード（M）7.6の令和6年能登半島地震が発生した。この地震は、石川県で発生した地震としては歴史上最大であり、石川県では初となる震度7を記録した（図1）。北陸地方を中心に広い範囲で強い揺れが観測され、津波も発生した。そのため、家屋の倒壊や津波の浸水、斜面崩壊、液状化現象等が石川県を中心に、富山県、新潟県、福井県等でも見られ、石川県では2024年6月11日時点で、死者260名（災害関連死含む）、行方不明者3名、負傷者1467名の人的被害があった⁽¹⁾。

害があった⁽¹⁾。

震源地付近では、2020年12月頃から地震活動の活発化と非定常地殻変動（プレート境界面での固着による陸側プレートの引きずり込みで生じる定常的な地殻変動とは異なる地殻変動）が観測され、地震活動域が拡大し、群発地震が続く中で、2021年9月16日にはM5.1（最大震度5弱）、2022年6月19日にはM5.4（最大震度6弱）、2023年5月5日にはM6.5（最大震度6強）の地震が発生した。これらの地震活動や非定常地殻変動は水のような流体が原因となって発生したと考えられている。

本稿では、能登半島の奥能登地域での過去の地震活動や令和6年能登半島地震の震源地付近での

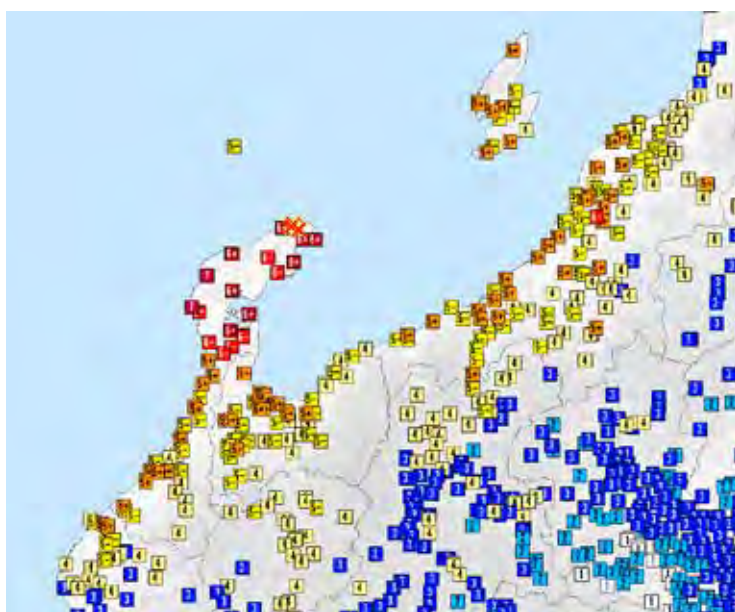


図1. 令和6年能登半島地震の震度分布（気象庁震度データベース検索より）。

群発的な地震活動を踏まえて、令和6年能登半島地震の発生メカニズムについて解説する。

2. 令和6年能登半島地震と能登半島北岸沖合の海底活断層

令和6年能登半島地震（以降、M7.6の地震）は、能登半島の北東部を震源地とする地震である。その余震（後発地震）は能登半島北岸に沿うように能登半島の北東沖（佐渡島の西方沖）から西岸沖にかけての全長約150 kmの範囲に広がっている（図2）。この範囲は、日本海における大規模地震に関する調査検討会による断層モデル⁽²⁾ではF43とF42、日本海地震・津波調査プロジェクトによ

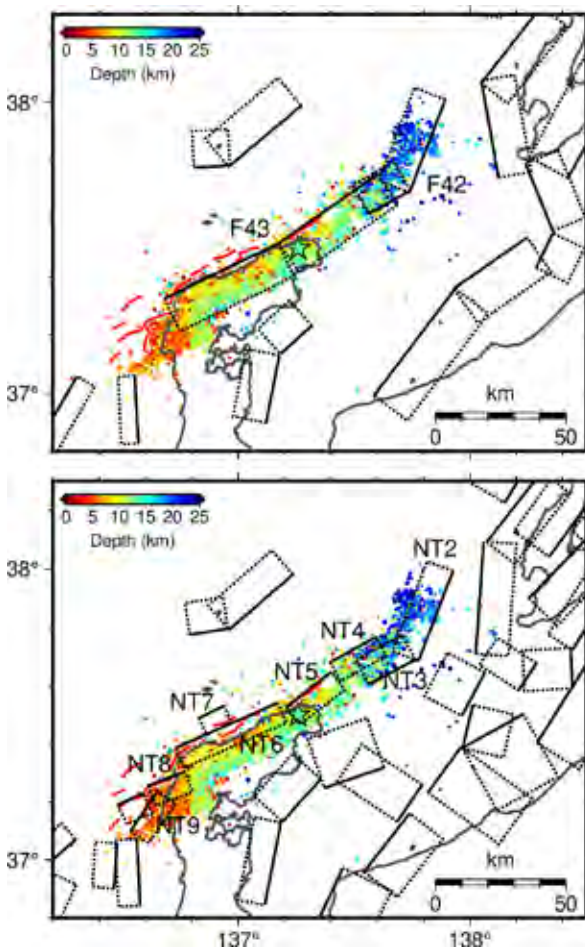


図2. M7.6の地震の余震（後発地震）の分布とM7.6の地震前に公表済みの海域の断層モデル。（上）日本海における大規模地震に関する調査検討会、（下）日本海地震・津波調査プロジェクト。

る断層モデル⁽³⁾ではNT2からNT9に概ね対応する。震源付近で始まった断層破壊は南西側と北東側にそれぞれ伝わり、複数の断層が連動して動くことにより、最終的にM7.6という規模の大きな地震が発生したことが示唆される。

上記の断層モデルの元になる複数の海底活断層が能登半島北岸から西岸の沖合にかけて連続的に分布する。これらの海底活断層は、北東側から順に、珠洲沖セグメント、輪島沖セグメント、猿山沖セグメント、門前沖セグメントと4つに区分されている⁽⁴⁾（図3）。これらの海底活断層は、日本海拡大時に正断層として活動した断層で、圧縮応力場に転換した後に逆断層として活動している。また、これらの海底活断層は南東傾斜、つまり能登半島の下に断層面が延びており、その断層運動によって能登半島を隆起させている。すなわち、能登半島を形成する活断層である。

2007年能登半島地震（M6.9）は門前沖セグメントの東半分が震源断層として活動した地震である⁽⁵⁾。また、離水生物遺骸群集を用いた能登半島北岸の海岸隆起量およびその年代のデータに基づき、現在の輪島市町野町付近で大きな被害を出した1729年の地震（推定M6.6-7.0）は輪島沖セグメントの活動により発生した地震である可能性が報告されている⁽⁶⁾。

M7.6の地震のメカニズムは北西－南東方向に

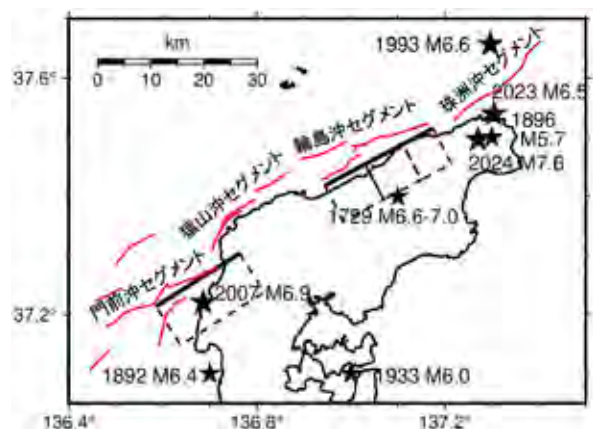


図3. 能登半島北部の被害地震（黒星）と北岸沖の海底活断層（セグメント）（赤線）の分布。

圧力軸を持つ逆断層型（横ずれを伴う）であり、その節面の1つは南東傾斜である⁽⁷⁾。これは、この地域でこれまでに発生した地震のメカニズムと同様であり、能登半島北岸沖合の海底活断層の傾斜方向とも一致する。M7.6の地震とこれらの海底活断層との関係を考える上で、M7.6の地震以前の群発地震活動が重要である。次章では、この群発地震活動について概観しよう。

3. 能登半島北東部での群発地震活動

M7.6の地震の震源地である能登半島北東部では、2018年中頃から地震数が増加し、2020年12月頃から地震活動が活発になった。地震活動域は南部、西部、北部、東部の順に拡がり、これら4つの領域に区分される（図4）。各領域でも地震活動域の拡大が見られ、西部、北部、東部の領域では、深部から浅部（南東から北西）への震源移動が顕著であった。一方、南部の領域では、深さ15

km以深での間欠的な地震発生が特徴的である⁽⁸⁾。震源再決定結果から、西部、北部、東部の領域では、主に複数の南東傾斜の震源分布が確認された。これは、主として南東傾斜の複数の断層面で地震が発生していることを意味する（図5）。さらに、時空間的な震源移動は流体の拡散モデルに整合的であることが示された^{(8),(9)}。また、電磁気学的な比抵抗構造⁽¹⁰⁾や地震波速度構造⁽¹¹⁾の特徴から、南部の15 km以深は水のような流体に富む領域であると解釈されている。

これらの特徴から、南部の地震活動域の15 km以深の領域から水のような流体が上昇し、その流体が南東傾斜の断層に浸透し、潤滑油のように働くことによって、西部・北部・東部の地震活動を活発化させたと考えられている^{(8),(9)}。これは、南部の15 km以深の地震は正断層型や横ずれ型のメカニズム、西部・北部・東部の地震は広域応力場に合う南東傾斜の節面を持つ逆断層型のメカニズムを示すことと整合的である⁽¹²⁾。南部の15 km以

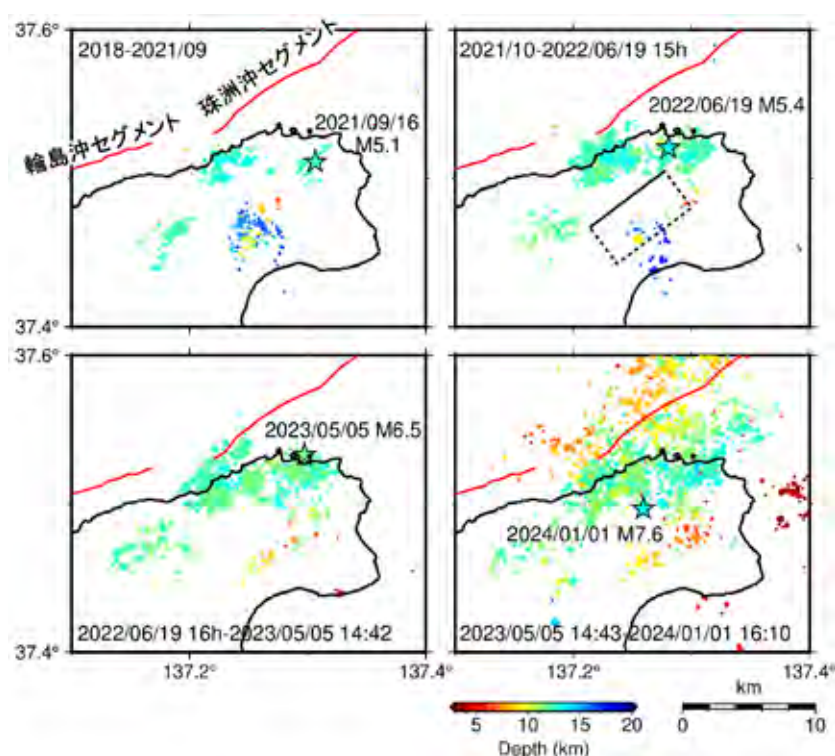


図4. 震源再決定による能登半島北東部の群発地震の震源分布（M1.5以上）。右上図中の矩形は Nishimura et al. (2023) の Period C における地殻変動源のせん断開口断層を表す。

深の地震が円環状の分布を示すこと（図4左上）やその地表付近には重力異常からカルデラ状の地下構造が推定されること⁽¹³⁾などから、日本海拡大時の火山活動に関連した構造（岩脈や火道等）を通過道として、水のような流体が上昇したと考えられる。

2023年5月5日に発生したM6.5の地震は、それまでの東部の地震活動域の浅部端付近を震源とする逆断層型の地震である。その余震（後発地震）の震源分布は、それ以前の地震の震源分布の浅部延長上に位置し、それ以前の東部の地震の断層面の延長上にM6.5の地震の断層面が位置することを表している（図5：断面5）。これは、これまでの一連の地震活動に関わる疑問、すなわち南東に傾斜する海底活断層（例えば珠洲沖セグメント）に関連する活動か否かに答えるものであった。図5の断面5に示すM7.6の地震以前の震源分布（青丸）は海底活断層につながるものではなく、それらの地震が伏在する断層で起こっていたことを示している。このことは、海底活断層における地震発生リスクが高まったままであることも意味し、M6.5の地震後には市民向けシンポジウム等で沖合の海底活断層でのさらなる大地震や津波に対する注意喚起がなされていた⁽¹⁴⁾。

4. 群発地震活動と同期した地殻変動

2020年12月頃から活発化した地震活動は非定常地殻変動を伴い、臨時GNSS観測等による地殻変動データの解析から、珠洲市を中心に水平方向に放射状に拡がり、上下方向に隆起する地殻変動が確認された⁽¹⁵⁾。このような非定常地殻変動を伴う群発地震活動は能登半島のような非活火山地域では稀である。2020年12月から2023年のM6.5の地震前までの地殻変動量は水平方向で最大約3cm、隆起量は最大約6cmであった。この地殻変動に対して、2021年3月頃までは南東傾斜の断層面の開口、それ以降2022年6月頃までは南東傾斜の断層の開口と逆断層型のスロースリップが同時に起きる変動源のモデルが推定されている⁽¹⁵⁾。

変動源は地震の空白域に位置し（図4右上の図中の矩形：2021年6月から2022年6月の期間で推定された変動源の断層位置）、変動源である南東傾斜の断層の浅部側に地震を起こしている断層が位置する。この変動源は、周囲で歪の増減を生じ、断層運動を促進または抑制する力を周囲の断層に与える。西部、北部、東部の地震活動域はこの変動源によって断層運動を促進する力が増加した領域、すなわち地震の誘発域に対応する⁽¹⁵⁾。つまり、地殻変動の変動源が群発地震活動の原因となって

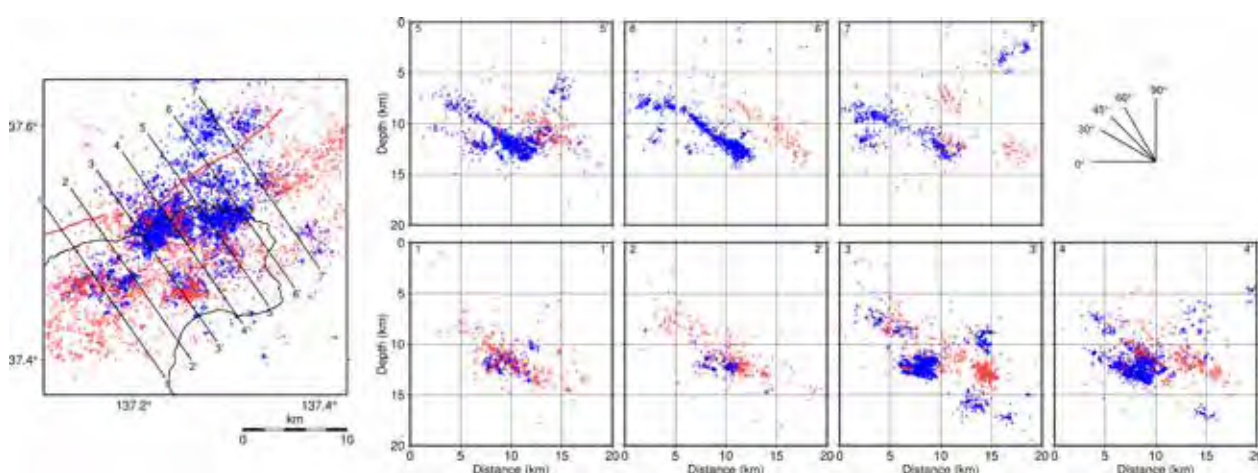


図5. 断層を横切る測線での鉛直断面での震源分布（青丸は2024/01/01 16:00以前の地震、赤丸は以後の地震）。

いることが明らかとなった。断層面の開口やスロースリップは通常地震（断層の速いせん断すべり）では生じず、断層に高間隙圧の流体が浸透していると考えられる。ちなみに、地殻変動データの解析から推定された2020年12月から2022年6月までの期間に地下深部から上昇した流体の総量は約2900万 m³（東京ドーム約23個分）である。

5. 令和6年能登半島地震の発生メカニズム

本章では、3章の群発地震活動と4章の地殻変動の解析結果を踏まえて、M7.6の地震の発生メカニズムに迫ってみよう。震源再決定結果（図5）を見ると、M7.6の地震の震源の東側に位置する断面5-7では、M7.6の地震の余震（後発地震）はそれ以前の地震の震源より浅部にほぼ平行に南東傾斜で分布し、西側の断面1-2ではそれ以前の地震の震源と重なる。断面3の余震分布を通じて、西部と東部の群発地震（M6.5の地震の余震を含む）の震源分布は繋がるように見え、これらの地震が伏在断層上で起こっていることを示唆する。震源再決定結果から、本震震源もこの伏在断層上に位置すると考えられる⁽¹⁶⁾。震源の東側の余震分布は珠洲沖セグメント付近へ、西側の余震分布は輪島沖セグメント付近へ延びており、海底活断層が震源断層であることを示唆する。海上保安庁による海底地形調査でも、能登半島北岸沖の海底活断層の南側の海底が約3 m隆起したことが報告され⁽¹⁷⁾、海底活断層が震源断層であることを支持する。

また、M7.6の地震の震源は、それ以前の地震の活動域の深部側かつ非正常地殻変動の変動源の浅部側に位置する（図6）。すなわち、変動源が与える力と流体の影響を強く受ける場所にM7.6の地震の震源は位置する。したがって、これら2つの作用により、M7.6の地震の震源を含む断層でのすべりがトリガーされた可能性が考えられる。

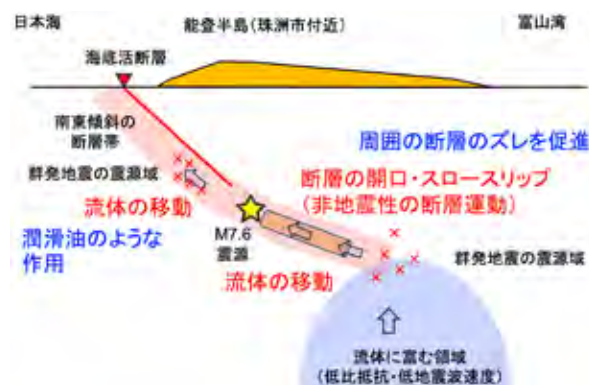


図6. 令和6年能登半島地震の発生過程の概念図
(Nishimura et al. (2023) の概念図を改変)。

では、なぜこのすべりが震源付近の海底活断層やさらにその隣の海底活断層へと広がっていったのだろうか。

震源付近には、珠洲沖セグメントと輪島沖セグメントが位置する。これらの海底活断層のM7.6の震源に近い部分では非正常地殻変動の変動源により、断層を動かそうとする力が働き続けていた。また、震源域西側に位置する断層帯、すなわち猿山沖セグメントと輪島沖セグメントの西部には2007年能登半島地震により、やはり断層を動かそうとする力が働いていた。つまり、M7.6の地震の震源周辺およびその西側では断層破壊が連鎖しやすい条件が整えられていたと考えることができよう。そのため、震源付近で始まった断層破壊が複数の海底活断層に次々と伝播し、最終的にM7.6という規模に達する断層破壊が生じたと考えられる。

M7.6の地震では、震度7を記録する強い揺れの他にも海岸の地盤隆起で代表される地殻変動や大きな被害をもたらした津波が観測されている。特に珠洲市狼煙町から輪島市門前町にかけての海岸では最大約5 mに達する大きな地盤隆起が観測された（写真1）。能登半島北岸での数m以上の隆起は、津波の浸水を防ぐ要因、言わば天然の防波堤にもなった。なお、輪島沖セグメントの範囲に対応する海岸での地盤隆起の高低の分布は1729年の地震のものとは異なり、1729年の地震で



写真1. 令和6年能登半島地震前後の輪島市輪島崎町鴨ヶ浦の様子。(左)2022年9月29日撮影、(右)2024年3月16日撮影。

すべり量が小さかった断層がM7.6の地震では大きくすべったことが示唆される。

M7.6の地震の断層破壊過程（断層上のすべり分布）については、地震や地殻変動、津波等の様々なデータに基づいて報告されつつある。図7に京都大学防災研究所の研究グループによる強震波形から推定された断層すべり分布⁽¹⁸⁾を示す。このモデルでは2枚の断層面を設定し、まず南西側にすべりが伝播し、その13秒後に北東側へのすべりの伝播が始まった。つまり13秒の時間差でモーメントマグニチュード7.3の地震が2つ発生したと見ることができる。南西側と北東側の断層浅部での大きなすべりは、能登半島北西部での大きな海岸隆起と珠洲市や能登町で大きな被害を及ぼした津波の原因となる海底での地殻変動をそれぞれ生じた。

この震源を挟んで両側に位置する大すべり域は、M7.6の地震での建造物被害や液状化被害をもたらした継続時間の長い強い揺れの原因でもある。実際、震度7を記録した1995年兵庫県南部地震の鷹取と2016年熊本地震の西原での速度波形記録と比較すると、M7.6の地震の正院や穴水では10秒以上にわたり、振幅が100cm/sを超える強い揺れが継続していることが分かる（図8）。

また、この揺れは能登半島の多くの地点で斜面崩壊を起こし、道路網の寸断のため能登半島の多

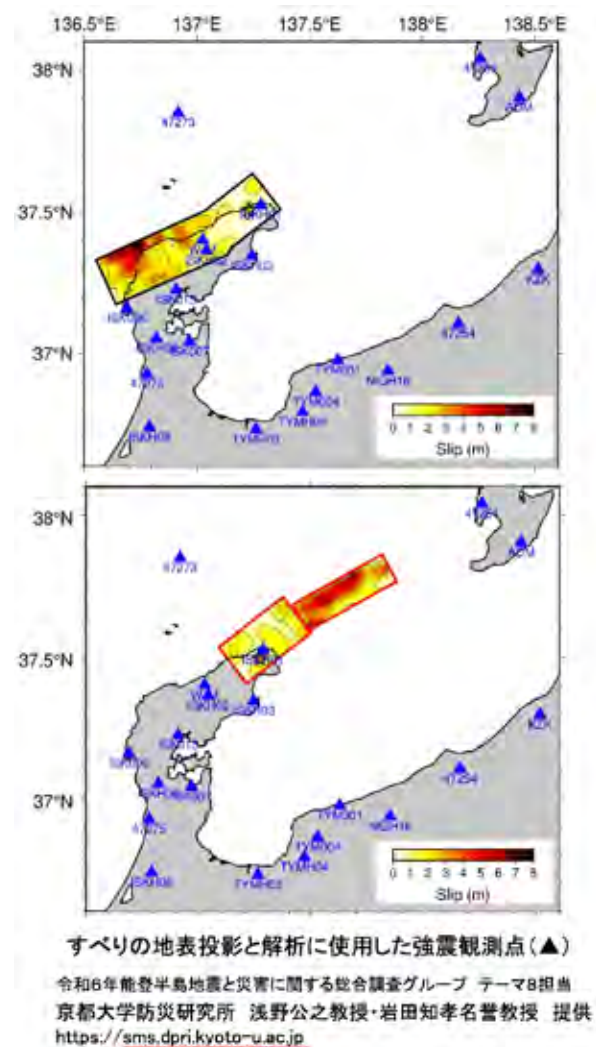


図7. 強震波形記録から推定された（上）南西側の断層面、および（下）北東側の断層面におけるすべり分布。

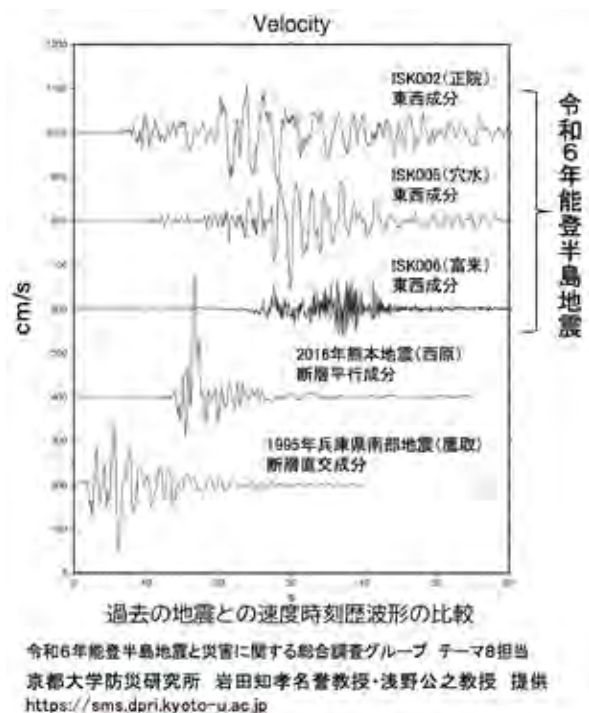


図8. 震度7を記録した過去の地震と令和6年能登半島地震の速度波形の比較。

くの場所で孤立集落が生じた。2007年能登半島地震の際にも輪島市門前町深見地区が孤立したが、住民は船で避難することができた。しかし、M7.6の地震に伴う海岸での地盤隆起や津波は港湾機能を喪失させ、港からの脱出手段を奪うとともに救援の手段をも奪うこととなった。日本の沿岸部で、将来起こる大地震により同様の被害が生じないような対策の実施や孤立を前提とした備蓄体制の強化が求められる。

6. おわりに

本稿では、能登半島北部の過去の地震や2020年12月頃から能登半島北東部で流体によって駆動された群発地震活動や非正常地殻変動を含めて、令和6年能登半島地震に至る過程を解説した。令和6年能登半島地震は、能登半島北岸沖合の海底活断層が、流体の作用（地殻変動の変動源による応力変化の影響を含む）を原因としてずれ動き、断

層破壊の連動によりM7.6の規模に達した。プレート境界の巨大地震で想定されるスロースリップと大地震の発生に関連性に関わる研究の一層の進展が望まれる。また、この地震に伴う強い揺れや土砂災害、津波等により広域で被害が生じた。特に道路被害や港湾機能の喪失により多くの孤立集落が生じた。沿岸部や山間部における集落の孤立対策やその備えのさらなる充実が必要である。

【参考文献】

- (1) 石川県危機対策課 (2024) 被害等の状況について (第137報), <https://www.pref.ishikawa.lg.jp/saigai/documents/higaihou137.pdf>
- (2) 日本海における大規模地震に関する調査検討会 (2016) 日本海における大規模地震に関する調査検討会. https://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/daikibojishinchousa/
- (3) 日本海地震・津波調査プロジェクト (2021) 令和2年度「日本海地震・津波調査プロジェクト」成果報告書, https://www.eri.u-tokyo.ac.jp/project/Japan_Sea/JSR2Report/
- (4) 井上卓彦, 岡村行信 (2010) 能登半島北部周辺20万分の1海域地質図説明書, 海陸シームレス地質情報集, 能登半島北部, 数値地質図 S-1.
- (5) Hiramatsu, Y. et al. (2008) Fault model of the 2007 Noto Hanto earthquake estimated from coseismic deformation obtained by the distribution of littoral organisms and GPS: Implication for neotectonics in the northwestern Noto Peninsula, Earth Planets Space, 60, 903-913.
- (6) Hamada, M. et al. (2016) Fossil tubeworms link coastal uplift of the northern Noto Peninsula to rupture of the Wajima-oki fault in AD 1729, Tectonophysics, 670, 38-47.
- (7) 気象庁 (2024) 令和6年1月1日16時10分頃の石川県能登地方の地震について. <https://www.jma.go.jp/jma/press/2401/01a/kaisetsu202401011810.pdf>
- (8) Amezawa, Y. et al. (2023) Long-living earthquake swarm and intermittent seismicity in the northeastern tip of the Noto Peninsula, Japan. Geophysical Research Letters, 50, e2022GL102670.
- (9) Yoshida, K. et al. (2023) Upward earthquake swarm migration in the northeastern Noto Peninsula, Japan, initiated from a deep ring-shaped cluster: Possibility of fluid leakage from a hidden magma system.

Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 128, e2022JB026047.

- (10) 吉村令慧・他 (2023) 能登群発地震域周辺の地下比抵抗構造とその不均質性, 日本地震学会2023年秋季大会, S22-02.
- (11) Okada, T. et al. (2024) Shear wave splitting and seismic velocity structure in the focal area of the earthquake swarm and their relation with earthquake swarm activity in the Noto Peninsula, central Japan. Earth Planets Space, 76, 24.
- (12) 高野彩香, 平松良浩, 行竹洋平 (2023) 能登半島北東部の群発地震活動領域の震源メカニズム解と応力場, 日本地震学会2023年秋季大会, S22P-04.
- (13) 澤田明宏, 平松良浩 (2022) 能登半島北東部の活発な地震活動の震源域に見られる低重力異常域の地質構造, 日本地球惑星科学連合2022年大会, SCG52-P16.
- (14) 平松良浩 (2024) 火山防災協議会念頭に、2年前からトップとの意見交換や住民対象シンポ, 日本災害情報学会ニュースレター, 97, 3-3.
- (15) Nishimura, T. et al. (2023) Episodic transient deformation revealed by the analysis of multiple GNSS networks in the Noto Peninsula, central Japan. Scientific Reports 13, 8381.
- (16) 吉田圭佑・他 (2024) 2024年 Mw7.5能登半島地震

の震源断層において数年間継続した微小地震のマイグレーションと本震の発生過程, 日本地球惑星科学連合2024年大会, U15-P11.

- (17) 海上保安庁 (2024) 能登半島沖の海底で約3メートルの隆起を確認. <https://www.kaiho.mlit.go.jp/info/kouhou/r6/k240208/k240208.pdf>
- (18) 浅野公之, 岩田知孝 (2024) 強震波形による2024年能登半島地震の震源破壊過程, 日本地球惑星科学連合2024年大会, U15-P20.

・謝辞

本稿で述べた研究成果の多くは科学研究費助成事業（特別研究促進費）22K19949と23K17482で得られました。現地での調査・観測では地元の自治体・住民・関係機関の方々に多大なるご協力・ご支援をいただいた。震源再決定には防災科学技術研究所のウェブサイトにて公開されている地震データを用いました。令和6年能登半島地震でお亡くなりになられた方々に深く哀悼の意を表すとともに、被災された方々に心よりお見舞い申し上げます。

□ 令和6年能登半島地震における 輪島市大規模火災の延焼状況

消防庁消防大学校消防研究センター 技術研究部
大規模火災研究室長 篠原 雅彦

1. はじめに

2024年1月1日16時10分に発生した能登半島地震では、石川県で最大震度7を観測した¹⁾。この地震で震度6強を観測した輪島市河井町では大規模な市街地火災が発生し、焼失面積約49,000 m²、焼損棟数約240棟の被害²⁾となった。本稿では、この火災の延焼状況について調べた結果を紹介する。まだ延焼状況が明らかになっていない区域も複数あるが、これまでに明らかになった範囲について報告する。

2. 延焼状況の推定方法

地上と上空から撮影された映像、写真、現地調査の結果を用い、燃えている箇所と燃えていない箇所を時間毎に調べ、その境界線を結ぶことで時間毎の火災前線を地図上に描いた。火災前線とはいえ、映像・写真からは時間的にも空間的にも断片的な情報しか得られなかったため、火災前線には火災初期から火災終盤までが混在している。

3. 風の状況

最初に、延焼に与える影響が大きい風の状況について示す。輪島市内で測定された気象データは、以下に示す通り火災覚知から鎮圧時までの間、風

が弱いことを示していた。

火災現場に最も近い気象観測地点は、火災現場から約700m南西に位置する気象庁の観測所（以後、アメダス輪島と記す）である。風のデータは1月1日18時50分から2日14時50分まで欠測している。そこで、火災現場から南東に約2km離れた奥能登広域圏事務組合消防本部（以後、輪島消防と記す）の屋上で観測されたデータも示す。ただし輪島消防のデータも1日20時10分から23時20分までは欠測している。

両地点の最大瞬間風速と平均風速、平均風向の変化をそれぞれ図1、2に示す。アメダス輪島のデータは、気象庁ホームページ「過去の気象データ検索」のデータを用いた。

図1、2より、1月1日は両地点とも日中は北寄りの風だが、夕方から南寄りの弱い風に代わることが分かる。輪島消防の1月1日の風向は、16時10分までは北寄りの風だが、その後20時まではほとんどの時間で無風又は、弱い南寄りの風が続く。火災は17時23分に消防に覚知されたが、輪島消防の17時30分から、データが欠測し始める直前である20時までの平均風速は0.2m/s、測定が再開した23時30分から火災が鎮圧された1月2日の7時30分までの平均風速は0.4m/sで、ほぼ無風に近い。

アメダス輪島の1月1日の風向も朝から16時10分までは北寄りだが、16時40分には南寄りに変わ

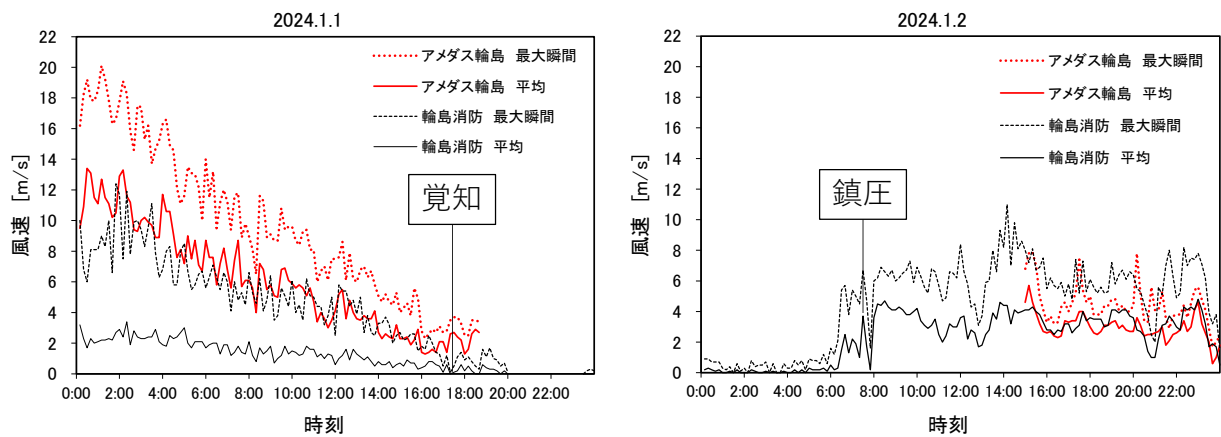


図1 1月1日、2日の最大瞬間風速と平均風速の変化

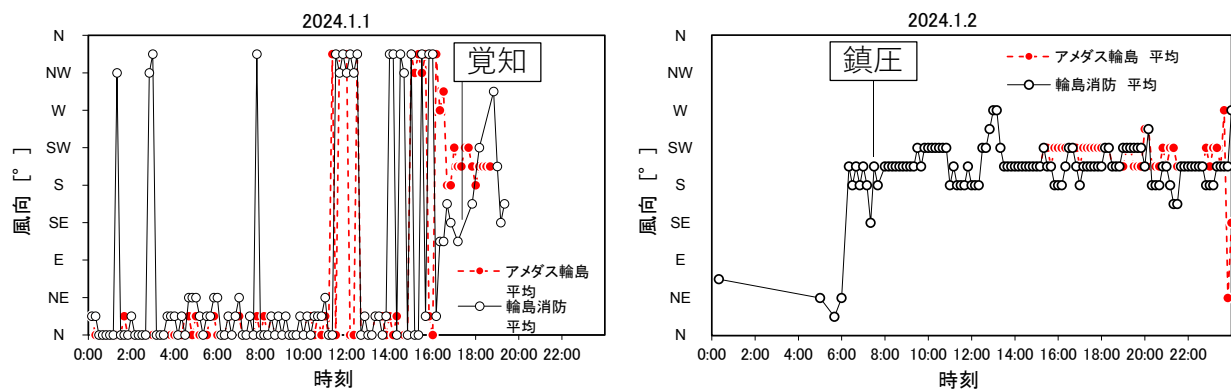


図2 1月1日、2日の平均風向の変化

り、データのある18時40分までは南寄りの風が続く。アメダス輪島の1月1日17時30分からデータが欠測する直前の18時40分までの平均風速は1.3～2.9m/sである。同じ時間帯の輪島消防の平均風速は0～0.6m/sであり、図1からも分かる通り、1月1日は風向によらずアメダス輪島の風速は輪島消防よりも大きい。

火災現場の風が、アメダス輪島と輪島消防のどちらの観測データにより近いかは分からないが、以後、延焼を議論する際には、欠測時間の短い輪島消防の風のデータを用いる。

延焼中の風が南寄りの弱い風であったことは、4.1節に示す通り、火災から上昇する煙の傾きからも分かった。

4. 延焼状況の推定結果と分析

4.1 延焼動態

推定した火災前線と延焼方向を示した延焼動態図を図3に示す。18時頃から20時頃までは報道機関のヘリコプターが火災の周囲を旋回しながら撮影した映像・写真が複数存在するため、街区内も含め、ある程度詳細な延焼動態が復元できた。しかしそれ以降は、午前1時頃の空撮映像を除き、断続的でピンポイントの写真しか今のところ入手できておらず、大雑把な火災前線しか復元できていない。特に灰色に塗りつぶした北部領域については、2日午前1時9分には延焼し尽くしていることが空撮映像から分かるのみで、延焼動態を復元できる写真・映像は入手できていない。ただ、



図3 延焼動態図

図3のこの範囲内には2つの矢印を記しており、これらの矢印の指すあたりが帯状に周囲より激しく燃焼していることから、矢印の方向に延焼した可能性が高いことは分かった。

4.1.1 20時頃まで

1月1日17時23分に覚知された火災は、18時頃からは主に北と南に広がっていく。19時頃からは北東、東方向への延焼も始まる。火災覚知後、約30分経過した17時52分の映像では、火災からの煙は北北東に若干傾いており、火災現場では弱い南南西の風が吹いていたと考えられる。輪島消防で17時30分から20時までの間に測定された平均風速は0～0.6m/sと無風に近く、多くの時間帯で南寄りの風である。空撮映像からは、18時6分には

倒壊しているように見える建物で、18時14分には倒壊していない建物で飛び火が発生した可能性があることが分かった。

20時頃までの各方位の延焼速度を概観するために、まず17時58分～18時6分の火災前線を内部に含む最小の円を描き、次にこの円の中心を固定して、これ以降の時間帯について各火災前線の最南端に接する円を描いた。これらの円を図3に一点鎖線で示す。円には火災前線と同じ番号①～⑤を付記した。風下方向である北方向への延焼が、風上方向である南方向への延焼に若干先行するが、ほぼ同程度の延焼速度で南北に広がっていることが分かる。20時7分～20時11分の火災前線の南北端は円⑤にほぼ一致する。南寄りの風にもかかわらず南北方向に同程度の速さで燃え広がったのは、

風下にあたる北方向には南方向よりも空き地、耐火建物が多かったためかもしれないし、延焼速度には影響しないほど弱い風だったのかもしれない。

4.1.2 20時頃以降

20時頃以降、朝市通りの南の火災は、図3に矢印で示すように東方向に向かった。ただ、21時頃以降は図に小さな丸で示した通り、道路際の写真は入手できたものの空撮情報がなく、街区内部の延焼状況が分かっていない。そのため図に示すように火災前線は、ほぼ直線的に結んでいる。

23時49分の火災前線が示すように、伊右エ門小路では小路の中央部に火災が先行して到着したことが写真から分かった。このことは、輪島消防署から聞いた「火災前線はV字型に東に進み、到来する火災前線に応じて移動しながら順次消火した」というこの小路での消火活動時の延焼状況と一致する。馬出小路への延焼と消火も同様の状況だったと輪島消防署から聞いたが、この延焼動態については写真・映像からは復元できていない。

20時13分、21時23分、翌日1時8分頃の映像に映った火災の煙の傾きからは、これらの時間帯も弱い南南西の風が吹いていたと考えられる。したがって、図3に矢印で示した20時以降の朝市通り以南の延焼方向は、風横方向ということになる。輪島消防での風速は、20時10分から23時20分までは欠測だが、23時30分から2日5時50分までは0～0.3m/sでほぼ無風である。

4.2 延焼速度

建物間の平均的な延焼速度を求めた。延焼速度

を求める際に用いる延焼距離と延焼時間の誤差を減らすために、延焼経路上にあると考えた建物間の距離ができるだけ長く、両建物の出火時刻にできるだけ近い時刻の火災状況が分かる2地点を探した。その結果、火災初期の風上方向に相当する南方向への延焼速度と、火災中期の風横方向に相当する東方向への延焼速度が1つずつ得られた。結果を表1に示す。

風上（南）方向の延焼速度は35m/hとなった。この延焼の始点は17時58分に屋根から煙が上がり、18時3分には炎上した建物の中央とし、17時58分を出火時刻と仮定した。終点は20時8分に煙が噴出している建物の中央とし、この時刻を出火時刻と仮定した。この延焼の時間帯に輪島消防で測定された風速は、20時10分の欠測時を除くと0～0.6m/sで、平均0.2m/s、単位ベクトル平均によって求めた平均風向は南南西である。

風横（東）方向への延焼速度は21m/hとなった。延焼速度の始点は19時24分に建物の西面と屋根から煙が噴出している建物の西面とし、この時刻を出火時刻と仮定した。終点は23時24分に炎上している建物の東面とし、この時刻を出火時刻と仮定した。この出火時刻はもっと早いはずだが、その情報は得られなかったため、そのかわりに建物東面を終点とした。この延焼の時間帯に輪島消防では風速は20時10分以降のデータが欠測となっているため評価できないが、欠測時間帯を除くと0～0.2m/sである。4.1節に記した通り、煙の傾きからは弱い南南西の風であったと推測できる。

これらの延焼速度を表2に示す過去の市街地火災の延焼速度と比較する。比較の対象は、弱風下

表1 輪島市大規模火災の延焼速度

風に対する 延焼方向	延焼し た方角	風向	風速 [m/s]	距離 [m]	始点 時刻	終点 時刻	時間 [分]	延焼速度 V_w [m/h]	阪神・淡路大震災(表2) の延焼速度 V_H との比 V_w/V_H	糸魚川市大規模火災(表2) の延焼速度 V_I との比 V_w/V_I
風上	南	南南西	0.2	76	17:58	20:08	130	35	1.4-1.5	0.7-1.1
風横	東	*注	*注	83	19:24	23:24	240	21	0.8-1.8	0.4-0.5

*注: 映像に映った火災からの煙の傾きからは弱い南南西の風と推測できる

表 2 過去の大規模市街地火災の延焼速度

	風上		風横		風下	
	風速 [m/s]	延焼速度 [m/h]	風速 [m/s]	延焼速度 [m/h]	風速 [m/s]	延焼速度 [m/h]
阪神・淡路大震災 $V_H^{3)}$	1.0	23, 26	1.0	23, 26	1.0	23, 26
	1.1	23	1.1	12, 18	—	—
糸魚川市大規模火災 $V_I^{4)}$	9.8	33	10.9	40, 56	12.7	28*
	11.1	48	11.4	59		

* 飛び火の影響を含まない出火直後の延焼速度

での延焼火災となった阪神・淡路大震災での風速 1.0、1.1m/s 下での延焼速度と、強風下での延焼火災となった2016年の糸魚川市大規模火災（以下、糸魚川火災）での9.8～12.7m/s 下での延焼速度である。両火災とも、一つの風速に対して複数の延焼経路上の異なる延焼速度が得られた場合があるため、表 2 には資料^{3,4)}に掲載された延焼速度を風速毎にすべて記した。

比較の結果を表 1 に示す。輪島火災の風上方向への延焼速度は阪神・淡路大震災の約1.5倍であり、糸魚川火災の0.7～1.1倍である。輪島火災の風横方向の延焼速度は阪神・淡路大震災の0.8～1.8倍、糸魚川火災の半分程度である。輪島火災の風下方向への延焼速度は、今のところ風上・風横方向と同等の精度では求められない。ただ、4.1.1節に記した通り20時頃までは風上方向とほぼ同程度である。よって、輪島火災の風下方向延焼速度が風上方向延焼速度35m/h と等しいと仮定すると、阪神・淡路大震災での風下方向延焼速度は表 2 に示した通り23～26m/h なので、輪島火災の風下方向延焼速度は阪神・淡路大震災の風下方向延焼速度の1.3～1.5倍、糸魚川火災の風下方向延焼速度は28m/h なので糸魚川火災の風下方向延焼速度の1.3倍となる。ここで、糸魚川火災の延焼速度には、飛び火の影響を含まない出火直後の値を用いている。

輪島火災の風横方向への延焼速度が風上方向に比べて遅いのは、風横方向の延焼速度を求めた区間が火災前線の端部で道路沿いであったためかもしれない。つまり、火災前線の端部は中央部に比

べて火炎からの受熱量が小さい可能性が高いため、街区内部の延焼速度よりも遅くなっている可能性がある。また、風横方向延焼速度の測定箇所にある耐火建物²⁾や、そのすぐ南側の道路からの消火⁵⁾によって延焼速度が低下した可能性もある。実際、伊右エ門小路への火災前線の到達時刻は小路の中央部が最も早いので、街区内部での風横方向への延焼速度は21m/h よりも速くなっている可能性がある。

4.3 焼損棟数の時間変化

次に、焼損棟数が数えられる20時11分までについて、その時間変化を糸魚川火災と比較した。まず、両火災の累積焼損棟数の時間変化を図 4 に示す。ここで、図 3 に示した国土地理院地図では複数棟として描かれている建物でも、Yahoo! マップの住居表示番号、Yahoo! マップ航空写真、Google マップ、Google ストリートビューなどか

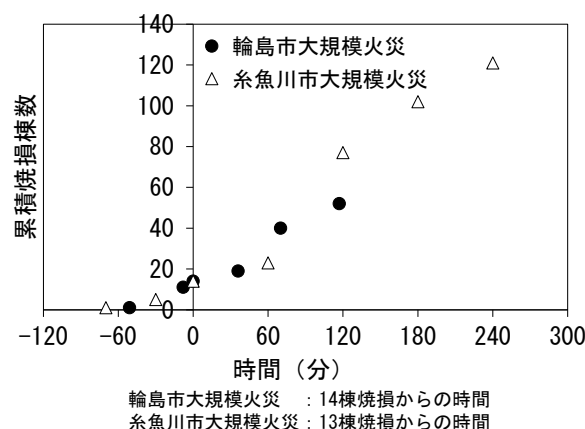


図 4 累積焼損棟数の時間変化

ら屋内でつながった建物であると判断した場合には、焼損棟数は1棟と数えた。また、糸魚川火災は出火時刻が分かっているが、輪島火災は今のところ出火推定時刻が不明で覚知時刻しか分からない。出火時刻と覚知時刻を時間軸の同じ原点とすると、焼損棟数の時間変化の比較が正しくできない。そこで両火災の焼損棟数がほぼ等しい時点、つまり輪島火災は14棟焼損時、糸魚川火災は13棟焼損時を図の横軸の原点とした。

図4より、両火災の初期の傾きに大きな違いは見られない。これについて詳細に見るために、各時刻の1時間あたりの焼損棟数の時間変化を調べたものが図5である。この図は図4から後退差分で求めたものである。ここで、輪島火災の14棟焼損時点（横軸0分）での1時間あたりの焼損棟数は、この時刻の直前の火災前線復元時刻である8分前の18時6分までの焼損棟数と比較して求めたのではなく、17時23分に1棟の火災が覚知された時点と比較して求めた。これは、8分前との比較だと、この間の焼損棟数の増加数が3棟であり、時間・焼損棟数の変化が共に小さいため、火災前線の時刻・位置の読み取り誤差の影響が大きくな

るためである。

図5より、輪島火災の20時11分までの1時間当たりの焼損棟数は、8～37棟／時の間で変化する。糸魚川火災は出火2時間後から3時間後頃間に複数の街区で急激に延焼が進み、図5で言えば120分の時点で1時間あたりの焼損棟数が54棟／時まで急増する。輪島火災ではこれほどの急増は見られないが、両火災の1時間当たりの焼損棟数は、糸魚川火災が急増するまでは、それほど大きくは異なる値を示していることが分かる。また、増減傾向は両火災で酷似している。延焼状況が異なる両火災に対して、なぜこのような結果が得られたのかについては、現在分析中である。

5. おわりに

弱い南寄りの風の下で延焼した本火災は、初期には南北方向に同程度の速度で延焼し、その後、東方向に延焼した。本火災の延焼速度は、阪神・淡路大震災の風速1.0、1.1m/s下での延焼速度と比べると風上方向は約1.5倍、風横方向は0.8～1.8倍、糸魚川市大規模火災の延焼速度と比べると風上方向は0.7～1.1倍、風横方向は半分程度であった。火災初期の1時間当たりの焼損棟数は糸魚川市大規模火災と同程度であった。ここで得られた結果についてはさらに分析を進め、また、延焼状況が分かっていない区域については情報収集を継続する必要がある。

謝辞

輪島消防署の出坂正明氏には火災、消防活動の状況を教えていただいた。防衛省には空撮映像を提供していただいた。輪島消防署には、消防庁予防課、消防・救急課、消防研究センター原因調査室経由で複数の火災写真、気象データを提供していただいた。消防研究センターの鈴木健氏には本火災の報道写真を、土志田正二氏には航空写真の

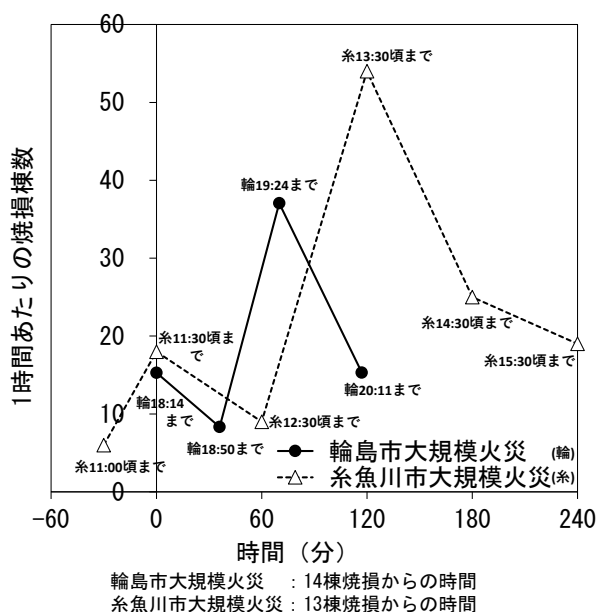


図5 1時間あたりの焼損棟数の時間変化

情報を複数提供していただいた。消防研究センターの田村裕之氏、高梨健一氏、鈴木恵子氏、藤井皓介氏には延焼動態復元の際、相談に乗っていただいた。記して謝意を表します。

【参考文献】

- 1) 気象庁，令和6年1月の地震活動及び火山活動について，震度1以上を観測した地震の表，<https://www.jma.go.jp/jma/press/2402/08a/2401jishin.html>（2024年6月27日アクセス）
- 2) 消防研究センター，令和6年能登半島地震において発生した輪島市大規模火災における消防庁長官の火災原因調査＜速報＞，2024. <https://>

nrifd.fdma.go.jp/research/saigai_chousa_shien/notohantou_jishin/files/20240215_1.pdf（2024年6月27日アクセス）

- 3) 東京消防庁防災部防災課，兵庫県南部地震に伴う市街地大火の延焼動態調査報告書，1995.
- 4) 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.
- 5) 輪島市大規模火災を踏まえた消防防災対策のあり方に関する検討会（第1回），資料6，地元消防本部と消防団の活動状況等，https://www.fdma.go.jp/singi_kento/kento/post-148.html（2024年6月27日アクセス）

□ 令和6年能登半島地震に伴って発生した 輪島市大規模火災の市街地火災延焼シミュレーション

消防庁消防大学校消防研究センター 技術研究部 地震等災害研究室

主幹研究官 高 梨 健 一

1. はじめに

2024年1月1日16時10分に発生した令和6年能登半島地震では、石川県輪島市や志賀町で震度7を記録したほか、石川県七尾市、珠洲市、穴水町、能登町で震度6強、石川県中能登町、新潟県長岡市で震度6弱を観測するなど、広い範囲が強い揺れに見舞われた。また、この地震発生に伴って、新潟県上越市で遡上高5.8 m、石川県能登町白丸で痕跡高4.7 mとなる津波が押し寄せて各地で被害がでたほか、各地で土砂災害も数多く発生して道路が各所で寸断されるなどの被害も発生した。

消防庁の6月18日14時00分時点の取りまとめによると、この地震による人的被害は死者260人（うち30人が災害関連死）、行方不明者3人、負傷者1,323人となっているほか、住家被害は全壊8,418棟、半壊21,246棟、床上浸水6棟、床下浸水19棟、一部破損95,401棟の合計125,090棟となっている。

新潟県、富山県、石川県の3県において、これらの地震、津波、土砂災害に伴う火災が合計17件報告されているが、中でも、輪島市河井町で発生した火災は、古い木造建築物が多い地域での火災だったこと、地震による電柱の倒壊等による通行障害、さらに地震によって消火栓や一部の防火水槽、自然水利などの水利が利用不能になったことなど各種の要因が重なって、焼失棟数約240棟、

焼失面積約49,000㎡の大規模な市街地火災となった¹⁾。

本稿では、この火災の市街地火災延焼シミュレーション結果について紹介する。

2. 消防研究センターの市街地火災延焼シミュレーションの概要

消防研究センターの市街地火災延焼シミュレーションソフトウェア（以下、「ソフトウェア」という）では、出火点や風向、風速、計算終了時刻などを入力することで、建築物1棟1棟の延焼時間を計算して火災の進展を予測することが可能である。図1に市街地火災延焼シミュレーションの画面例を示す。

ソフトウェアでは、火災は出火点として設定した建築物の重心で始まる。また、火災が建築物の重心まで延焼した時点で、盛期火災に至ったと考える。盛期火災の状態は別途設定可能な盛期火災の継続時間（以下、「燃え落ち時間」という）が経過した時点で終了するものとし、盛期火災に至ってから燃え落ち時間が経過するまでの間に隣棟に着火した場合に隣棟に延焼することとしている。

隣棟間の延焼時間の計算には、風速と建築物間の距離から延焼速度を求めることができる東京消防庁の開発した延焼速度式²⁾の風速補正部分を、

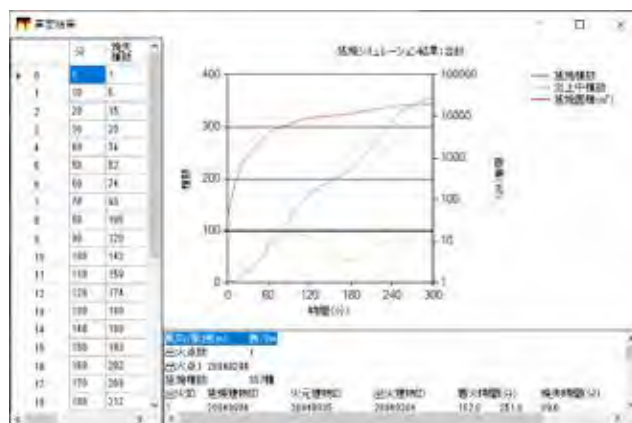


図1 市街地火災延焼シミュレーションソフトウェアの画面例

風速に応じた浜田式³⁾の増加率によって補正するよう改良した式を通常は用いており、東京消防庁が開発した元々の風速補正も利用可能である。

また、このソフトウェアでは、各出火点に計算開始からの時間遅れを設定できるため、飛び火による出火時刻が判明していれば、この機能を用いて飛び火の再現を行うことも可能である。

なお、ソフトウェアでは、多数の試行の繰り返しや計算結果の速やかな出力を可能とするため、正確さを考慮しつつ建築物条件の簡略化と延焼経路の事前計算による実行時間の短縮により高速化を図っている。建築物条件の簡略化では、構造種別を木造と耐火造の2種類とし、全ての建築物は2階建てとしているほか、地形の影響を考慮せず、全ての建築物が同一平面上に存在するものとして計算を行っている。また、延焼経路の事前計算については、図2のように建築物の外形線を20 cm 間隔に分割し、風速 0 m/s の際の延焼速度

を用いて異なる建築物の重心間の延焼時間が最短となる経路を計算しておくこととしている。そして、風速の設定に関わらずこの経路を利用することで、シミュレーション実行時の計算時間を短縮している。延焼経路と建築物の表示例を図3に示す。

さらに、ソフトウェアでは、消防活動の効果を盛り込むための方法として、延焼阻止線を設定することが可能である。延焼阻止線と交差する延焼経路を延焼計算に利用しないことで、延焼阻止効果を実現しており、計算結果には焼損棟数の減少や延焼拡大の遅延として効果が表れる。

3. Google ストリートビューを用いた延焼範囲周辺の建築物外壁に関する分析

延焼範囲における市街地の状況を把握するため、Google ストリートビューを用いて、延焼範囲の

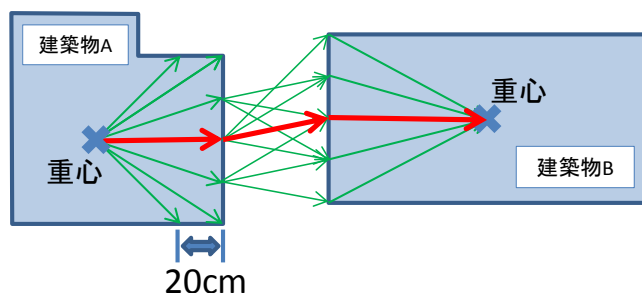


図2 延焼経路の事前計算

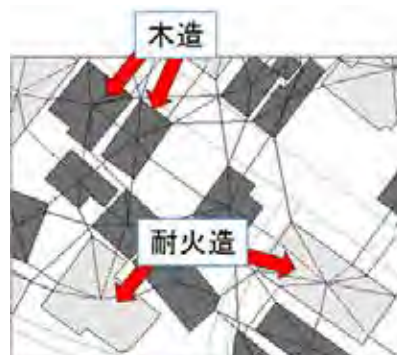


図3 延焼経路と建築物の表示例

建築物の外壁の状況について調査を行った（図4参照）。

ストリートビューで見ることのできる外壁に限られること、また、撮影された時期から火災発生までに建て替えや補修などが行われている可能性があることなどから、火災発生当時の状況を直接示しているデータとはならないものの、ストリートビューで見ることのできた建築物については、少なくとも約57%の建築物の外壁に板張り部分があることが判った。

また、ストリートビューで見ることのできない街区内部の建築物については、建て替えが進んでいない老朽化した建築物が多いことが予想された。

そこで、今回のシミュレーションでは、木造建

築物の延焼計算に、裸木造に対応した東京消防庁の延焼速度式の風速補正部分を、風速に応じた浜田式の増加率によって補正するよう改良した式を用いることとした。

4. 利用データと設定条件

延焼経路データの作成に必要な都市データは、国土地理院から公開されている基盤地図情報を一部変更して用いた。構造種別については、基盤地図情報で堅ろう建物に分類されている建築物のほか、Google ストリートビューや現地調査に基づいて判断した建築物を耐火建築物として設定し、それ以外の建築物を木造建築物として設定した。

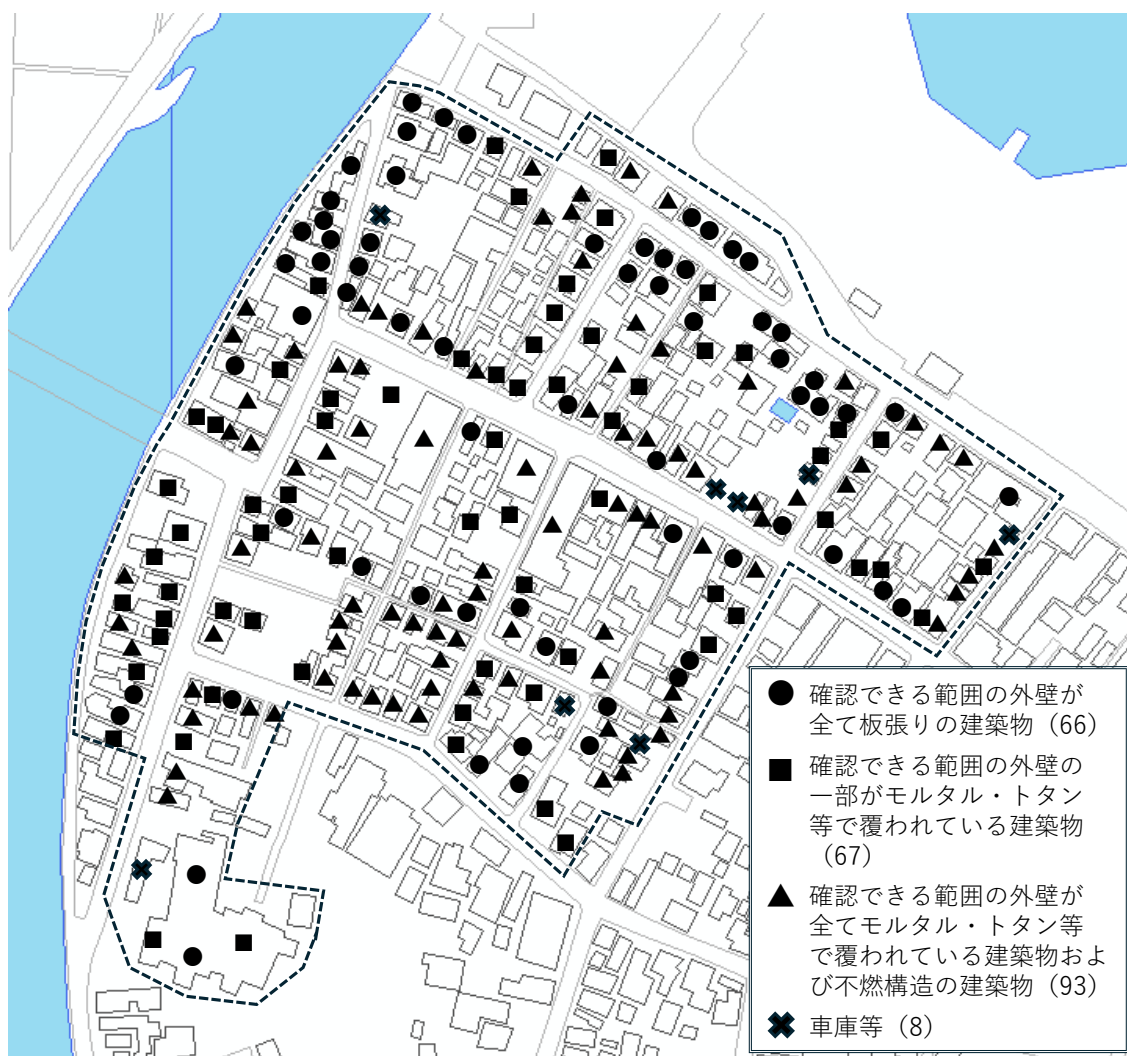


図4 Google ストリートビューに基づく焼失範囲内建築物の外壁分類結果

なお、都市データから延焼計算に用いる延焼経路データを作成する際には、延焼経路の作成に用いているソフトウェアが裸木造の延焼速度に対応していないことから、防火木造の延焼速度を利用した。

また、消防研究センターの実施した焼け止まり調査や入手した映像記録等に基づいて図5に示す条件を設定するとともに、気象条件として当日の輪島市の天気予報データを参考に南南西の風3m/sを設定したほか、燃え落ち時間として60分を設定した。

5. シミュレーション結果と映像記録との比較

基盤地図情報を一部修正して作成した都市データと実際の市街地に差があるため実際の火災の数値と単純に比較することはできないが、シミュレーションの結果、焼損棟数は298棟、焼損した建築物の建築面積の合計は約19,958㎡となった。また、延焼範囲において最後に延焼した建築物が火災盛期を越えたのは約10時間20分後だった。

図6に7つの時点（1月1日19時00分、20時30分、22時00分、23時30分、1月2日1時00分、2時30分、4時00分）におけるシミュレーション結果と映像記録によって把握できている各時点に



図5 市街地火災延焼シミュレーションの設定条件

近い時間帯での延焼状況を示す。

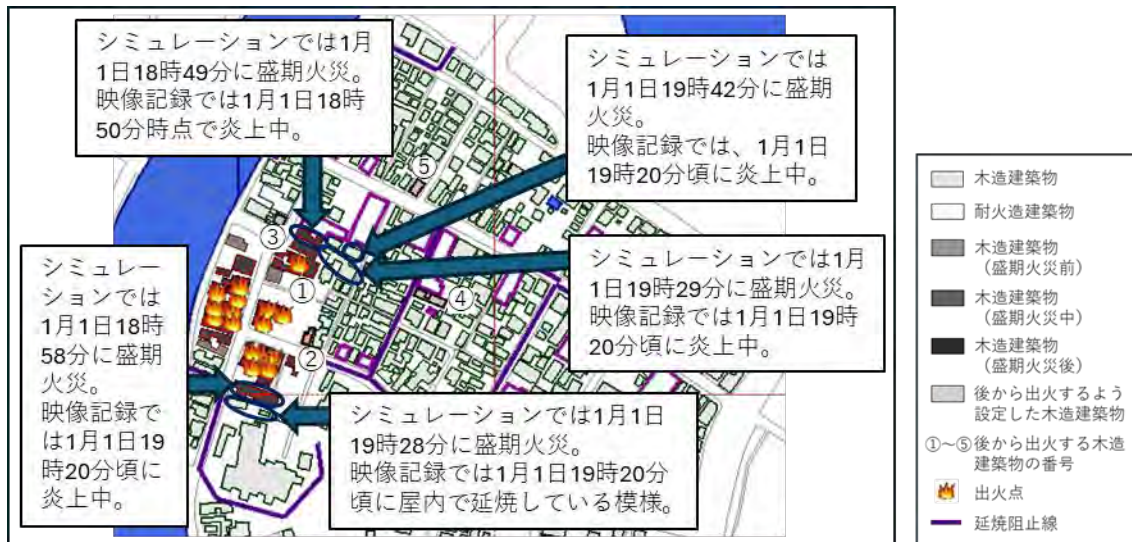
実際の延焼状況とシミュレーション結果を比較すると概ね30分程度の差にとどまっており、映像記録に近い状況を再現することができたが、延焼範囲南東側の区画や朝市通りと2棟の鉄筋コンクリート造の建築物で囲まれた区画（図6(f)中の四角で囲んだ区画）などで実際と大きく異なる結果となった。

まず、焼失範囲の南東側の区画では、区画の北側や南側でシミュレーションの結果が実際の延焼に比べて遅くなった。区画の北側では図6(c)中の左上の枠内に記したように、シミュレーション結果のほうが30分以上遅くなって延焼している。この枠から伸ばした矢印で示した建築物の西隣の鉄骨造の建築物において、西側の壁が剥がれ落ちて20:57の時点で内部に延焼するとともに、東側の壁も剥がれ落ちて、この鉄骨造の建築物の東側に隣接する建築物と思われる板張りの外壁が見えている映像記録が残されていることから、この鉄骨造建築物の内部を通過して延焼したことで、円内の建築物まで延焼する時間が短くなった可能性が考えられる。また、この区画の南側では、図6(c)の右下の枠内や図6(d)の左下の枠内に示すように大きな遅延がみられる。シミュレーションでは焼失範囲の中央部を北北東から南南西に貫く街路で行われた延焼阻止活動を再現するために延焼阻止線を設定しており、この延焼阻止線の東側に延焼阻止活動終了後の延焼を再現するための出火点④（図5）を設定しているため、この出火点からの延焼が南へ進むという結果になる。映像記録から判明している延焼箇所は出火点④のみであるが、試みの一つとして延焼阻止線を設定した街路に沿って出火点④の南側3棟に出火点④と同時刻に出火するよう設定を施してシミュレーションを行うと、図6(c)の右下の枠から矢印を伸ばした建築物が盛期火災になる時間は1月1日22時24分、図6(d)の左下の枠から矢印を伸ばした建築物が盛期火災になる時間は1月1日23時25分に早まり、

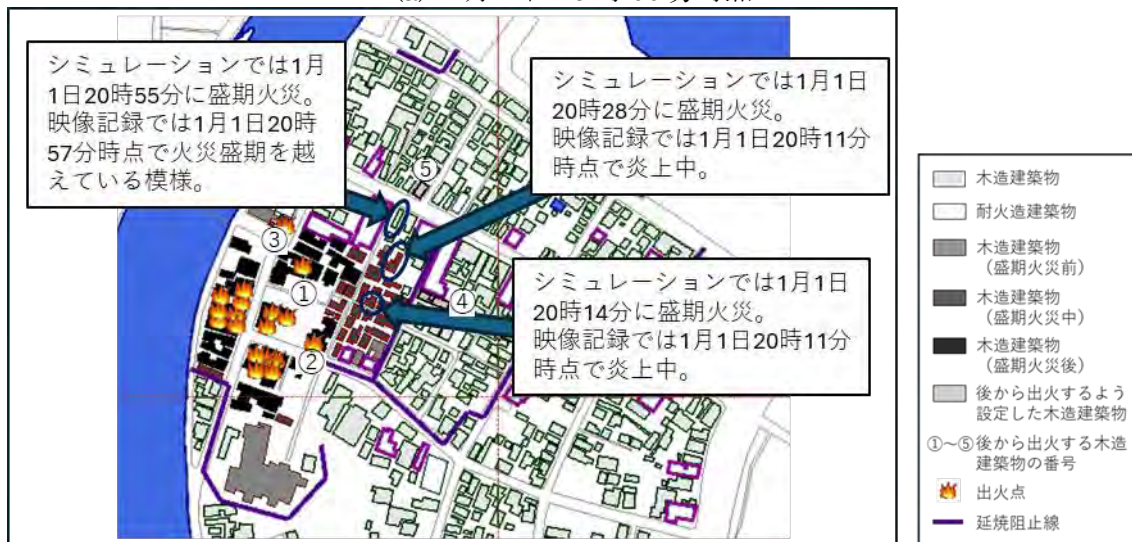
かなり実際の延焼状況に近づく。このことから、実際の火災では出火点④より南の街路沿いでも西側から東側へ延焼し、シミュレーションよりも早く街区南側への延焼が進んだ可能性があると考えられる。

また、朝市通りと2つの鉄筋コンクリート造の建築物で囲まれた区画（図6(f)中の四角で囲んだ区画）では、シミュレーションでは1月2日1時34分に北西側から延焼する結果となっているのに対して、映像記録では1月1日21時20分すぎの映像でこの区画には延焼していないことが確認できている一方、1月2日1時9分すぎの映像では区画全体が火災盛期を越えているように見える。この間、この区画に火災がどのように延焼したのかは本稿執筆時点で不明だが、区画南西側の道路沿いにある建築物2棟のうち南側1棟の1階が北側に座屈して瓦が崩れたり板が露出したりしている写真が残っていることから、これらの部分に火の粉が溜まって着火した可能性や、隣接する耐火建築物の内部に火災が延焼するとともに窓等の脱落も発生しており、耐火造建築物の換気口や窓からの噴出火炎により延焼した可能性など、いくつかの可能性が考えられる。

さらに、シミュレーションでは東側の建築物から延焼するものと仮定して出火点③（図2）を設定したが、この付近でもシミュレーションの結果と実際の火災の状況が異なっている。シミュレーションでは直近の建築物からの延焼に要する時間をあらかじめ計算して1月1日19時56分に出火させており、図6(b)の段階で既に西側の建築物へ延焼していることとなっているのに対し、実際の火災では1月1日21時20分すぎの時点では出火点③の建築物の北に隣接する耐火建築物の南側に炎は見えないものの、1月2日1時9分すぎの映像では火災盛期を越えており、この間の延焼状況は本稿執筆時点で把握できていない。なお、出火点③の建築物の1階軒先や南側にある電柱の看板が高熱にさらされていないように見える状況を考慮



(a) 1月1日 19時00分時点

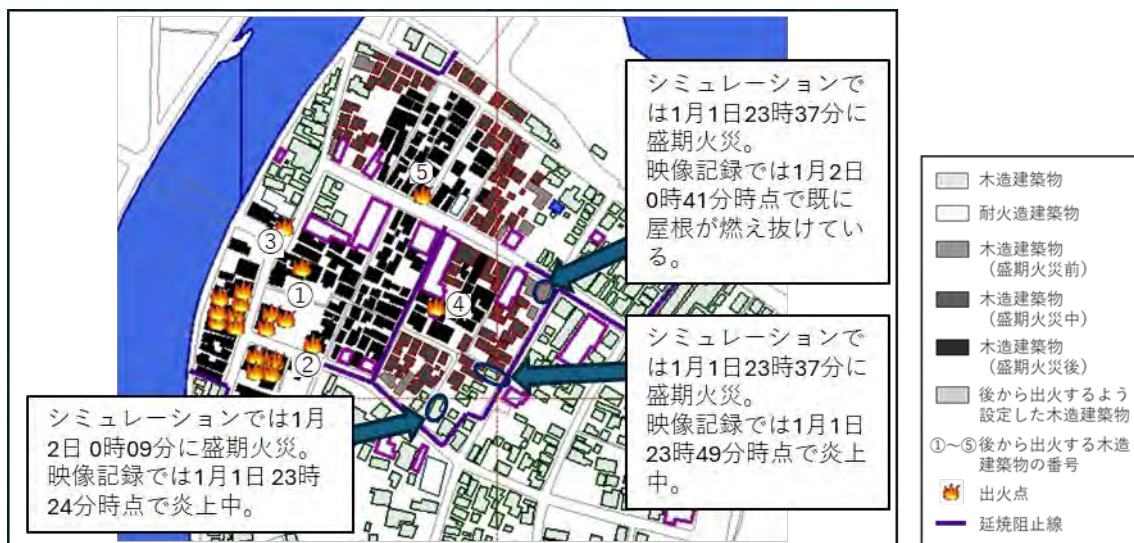


(b) 1月1日 20時30分時点



(c) 1月1日 22時00分時点

図6 シミュレーション結果と実際の延焼状況の比較



(d) 1月1日23時30分時点



(e) 1月2日1時00分時点



(f) 1月2日2時30分時点

図6 シミュレーション結果と実際の延焼状況の比較

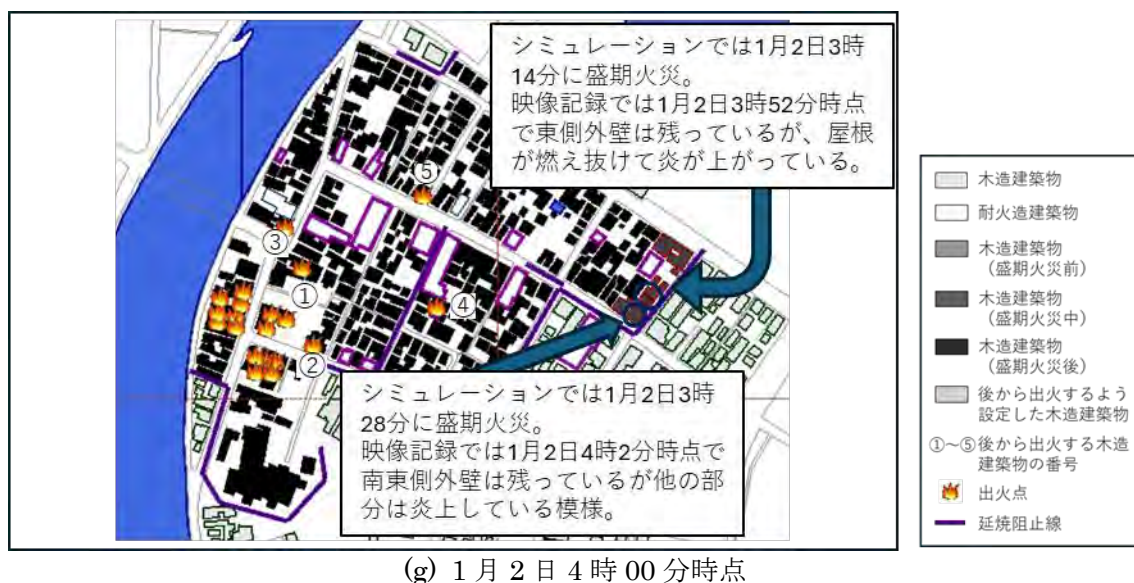


図6 シミュレーション結果と実際の延焼状況の比較

すると、出火点③の建築物の延焼は東側や南側からの延焼によるものではない可能性がある。また、1月2日1時9分すぎの映像では出火点③の建築物の北に隣接する耐火建築物の北側よりも南側のほうが早期に炎上したように見えることから、この耐火建築物の北側の火災が耐火建築物内部を延焼して南側まで至ったのではない可能性がある。これらの事を考え合わせると、出火点③を設定した建築物やその西側の建築物への延焼は飛び火によるものだった可能性も考えられる。

6. 放任火災だった場合のシミュレーション結果

試みとして、消防活動が行われていなかった場合について計算を行った結果を図7に示す。気象条件は南南西の風3m/s、燃え落ち時間は60分とした。図中の矢印は、1時間に延焼するおおよその方向と距離を示している。焼損棟数584棟、焼損した建築物の建築面積の合計約39,647㎡、国道249号線より北、錦川通りの西にある街区の木造建築物がほぼ全て焼失するという結果が得られた。この場合の焼損範囲は約11万㎡となり、実際の火

災の焼損範囲の2倍以上となった。また、最後に延焼した建築物が火災盛期を越えるまでの時間は約20時間だった。

7. おわりに

令和6年能登半島地震による輪島市河井町で発生した火災について、Google ストリートビューに基づいて延焼範囲における建築物の外壁について調査を行うとともに、ヒアリング調査や写真記録等に基づいて設定条件を検討して市街地火災延焼シミュレーションを行い、火災の検証を試みた。

出火点及び延焼阻止線を設定するとともに、木造建築物の延焼速度式として裸木造の延焼速度式を用いて計算した結果、映像記録に近い状況を再現することができた。

また、放任火災だった場合についてシミュレーションを実施したところ、消防活動が行われていなかった場合には焼損範囲が実際の火災の2倍以上になっていた可能性があることが判った。

今後の課題としては、建築物が倒壊した場合の影響に関する検討などが考えられる。

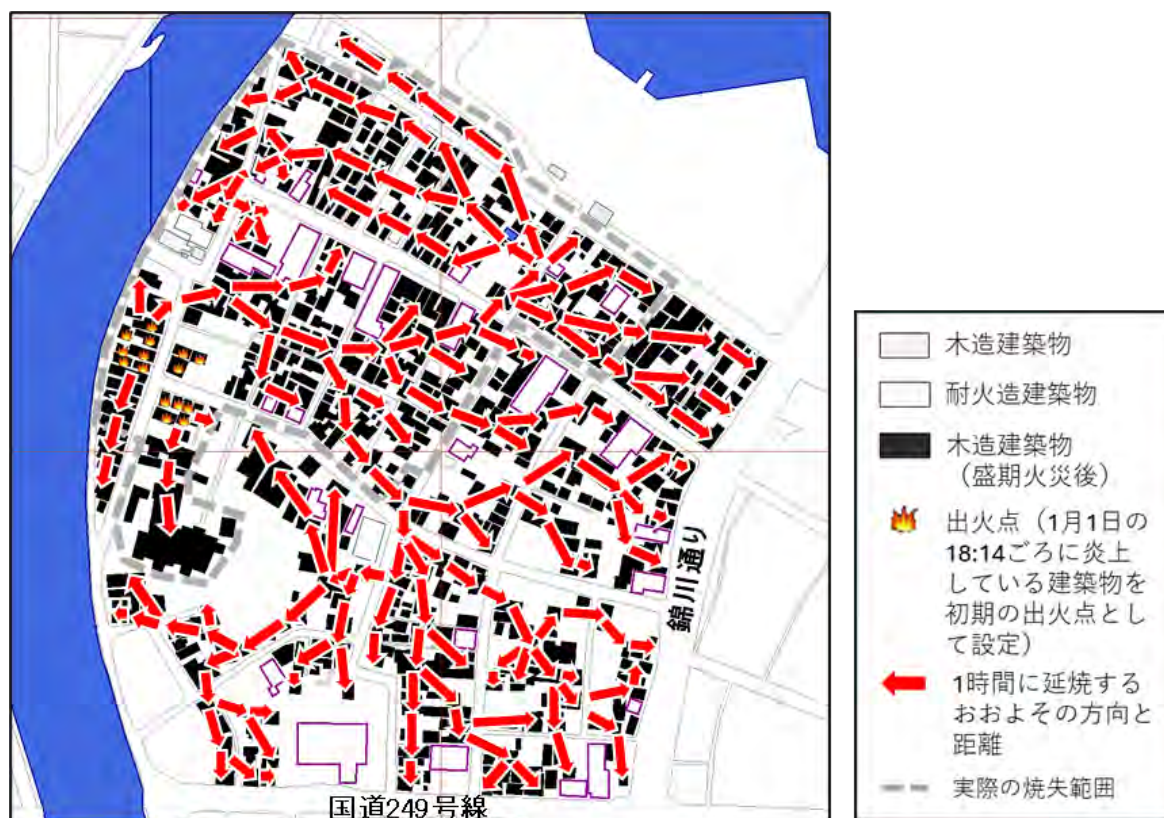


図7 放任火災だった場合の計算結果

謝辞

奥能登広域圏事務組合消防本部輪島消防署には被災後の大変な時期にもかかわらず現地調査およびヒアリング調査にご協力いただいた。心から感謝申し上げます。

【参考文献】

- 1) 総務省消防庁消防研究センター：令和6年能登半島地震において発生した輪島市大規模火災における消防庁長官の火災原因調査＜速報＞，https://nrifd.fdma.go.jp/research/saigai_chousa_shien/notohantou_jishin/files/20240215_1.pdf (2024年3月31日アクセス)
- 2) 東京消防庁：地震時の延焼シミュレーションシステムに関する調査研究，1989.
- 3) 日本火災学会：火災便覧（第4版）、p.526,2018

地域防災実戦ノウハウ（120・最終回）

—「釜石の奇跡」と真の「奇跡」—

Blog 防災・危機管理トレーニング
(<http://bousai-navi.air-nifty.com/training/>)

主 宰 日 野 宗 門

（消防大学校 客員教授）

東日本大震災時、大津波から逃れた岩手県釜石市の小中学生の避難行動に対し「釜石の奇跡」という言葉が使われ、それは「とき（時）の言葉」として多くの人の目や耳に触れました。しかし、この言葉に対しては「奇跡ではない」という意見も多くあります。

一方で、釜石市の避難事例の中には「奇跡」とも呼ばれるべきものが存在し、その「奇跡」は津波教育の根本の姿を教えるものです。筆者はそれに十分に焦点が当てられていないことを残念に感じています。本稿では、このような問題意識で「釜石の奇跡」を深掘りすることとしました。

1. マスコミにつくられた「釜石の奇跡」

東日本大震災前、岩手県釜石市北部の鵜住居（うのすまい）地区の低平地に鵜住居小学校と釜石東中学校がありました。東日本大震災の当日、大槌湾から浸入した巨大津波から逃れるため、学校にいた570人の児童・生徒たちは、1.6kmもの距離を避難しました。学校管理下での児童・生徒のこの規模・距離の水平避難は他に例がありません。

避難に際し中学生が小学生の手を引き必死で逃げる様子の映像が話題となり、マスコミやインターネットで「釜石の奇跡」として何度も取り上

げられ、「とき（時）の言葉」となりました。

しかし、避難した当事者はこの状況に大きな違和感を持っていました。

当時、釜石東中学校3年生で防災を担当する委員会の委員長をしていた菊池さんへの取材記事を以下に引用します。

『菊池さんが、自分たちの避難行動が「釜石の奇跡」と呼ばれていることを知ったのは、震災からしばらく経ってからだった。「正直あの頃、自分たちがどう報じられているのかに気付くゆとりはなかったんです」「ようやく自分たちの気持ちが落ち着いてきた頃には、話がすっかり大きくなってしまっていて、もう收拾がつかない状況で」震災から半年ほど過ぎると、「釜石の奇跡」を経験した子どもたちに話を聞きたいというメディアからの依頼が増え始めた。だが菊池さんには、拭うことのできない違和感があった。まず、どうして、そんなに話が大きくなっているのだろうと驚いた。そして、「自分たちだけの力で避難できたわけじゃないのに、という違和感がありました」』^(※)

『震災の日、子どもたちの命を救おうと行動した人々は、たくさんいた。水門を閉めにいった消防団の人がいなかったら、小学生たちはきっと無事ではなかった。避難誘導してくれた住民の人たちもいた。教員も避難の指示を出してくれた。

「そうやって助けてくれた人たちがいっぱいいるのに、中学生が、自分たちで全部やったように伝えられていたことを、すごく申し訳なく感じています。』」^(※)

(※)「『釜石の奇跡』は奇跡じゃない。あの日、報じられた“美談”から私は逃れられなかった」(2021年3月9日、BuzzFeed JAPAN)

この記事からは、マスコミの報道と当事者の感覚や現場の実態との間に大きな乖離があったことが読み取れます。

2. 学校管理下での児童・生徒の死者0人は「奇跡」ではない

東日本大震災の津波により学校管理下で児童・生徒が死亡した小・中学校は、宮城県石巻市の大川小学校（犠牲となった児童：74人）と同県南三陸町の戸倉中学校（犠牲となった生徒：1人）の2校のみでした^(※)。犠牲者の多かった大川小学校のケースは世間の関心が高かったことはご記憶にあると思います。

(※)「教育機関の被災と防災管理のあり方」(中野晋ほか、土木学会論文集(安全問題)、Vol.68、2012)

この事実から1で紹介した釜石の事例を「奇跡」と呼ぶことに疑問を感じた人がいても不思議ではありません。

『釜石市に限らず、岩手県では、あの津波で学校の管理下にいた児童生徒は一人も犠牲者が出ていなかったことです。津波で校舎が全壊した25校を始めとして、県内の児童生徒は全員無事避難していたのです。

つまり、「釜石の奇跡」の「奇跡」の意味が、関連本の表紙にもなった『『犠牲者ゼロ』を生み出した』ことを指すのであれば、「奇跡」は釜石だけではなく、本県のすべての学校で起きていた

ことになるのです。先に紹介した4度も避難場所を変えた気仙中学校や、完成したばかりの橋を伝って二階から県道に避難させた越喜来小学校も全員無事でした。』」^(※)

(※)「子どもたちは未来の設計者 東日本大震災「その後」の教訓」(鈴木利典、ぱるす出版、2021年6月、p.239)

なお、上記の内容とは無関係ですが、釜石市は2013年3月以降、「釜石の奇跡」との表現は使わず、「釜石の出来事」と言うようになりました。

そのような表現を使うこととした背景には、東日本大震災のときにほとんどの児童・生徒が助かったのは日ごろの防災教育や訓練の成果であり、「奇跡」と呼ぶべきものではないという認識が関係者にあるからだといわれています。また、ほとんどの子供が助かった中であって我が子（当日学校を休んでいた）を亡くされた遺族の心情に配慮したともいわれています。

3. 学校管理下外で起きた「奇跡」―釜石小学校の事例―

釜石港近くの中心街に住む子供たちが通う釜石小学校は、街や釜石湾を見下ろす標高約25mの場所にあります。3月11日は釜石小学校では短縮授業で、児童は午後1時に下校しました。地震発生時、全校児童184人（当時）のうち、学校にいたのは卒業式の準備をしていた6年生10人程度でした。

当時の校長先生のお話では「児童たちはばらばらだった。下校途中の子、友達の家や公園で遊んでいた子、自宅にいた子…。中には海に魚釣りに行っていた子もいた」とのことです。

そのような中、午後3時25分頃、高さ10メートル以上の津波が子供たちの家がある中心街を襲いました。しかし、子供たちは大人顔負けの的確な

判断で、全校生徒184人全員が一人も命を落とすことなく無事に避難したのです。

このときの釜石小学校の子供たちの避難の様子をいくつかご紹介しましょう。

小学1年生の男児は、地震発生時に自宅に1人でいましたが、学校で教えられていたとおり、家の戸締りをした後、避難所まで自力で避難しました。

小学5年生の男児は川の近くで遊んでいましたが、地震後、両親が商店街で営む美容院に向かおうとしました。そのとき、友達が「駄目だよ。高い所に逃げなくちゃ」といって引き留め、高台の公園へ逃げました。男児の母親は「もし帰ってきていたら、津波にのまれたと思う。友達に救われた」と感謝しています。家庭では「地震の時はそれぞれ逃げよう」と話していました。母親自身も子どもの無事を祈りながら、高台に避難したということです。

小学6年生の男児は、2年生の弟と2人で自宅にいました。既に自宅周辺は数十センチの水量になっていたため、高台へ歩いて避難するのは危険だと判断し、自宅の3階に上（あが）り難を逃れました。

このほかにも、「今回も津波は来ない」と避難をしぶる祖父母の手を引いて逃げた子供や体の不自由な児童を高学年の児童が背負って避難したケースもありました。

いかがでしょうか？ 皆さんのお子さんが遊びや釣りで海岸近くにいるときに地震が発生した場合、釜石小学校の子供たちのような行動を取れるでしょうか？

お子さんと書きましたが、あなたご自身はいかがでしょう？

当時の校長先生は「大人たちでも足がすくむ状況で、子供たちは学んだことを忠実に実践してく

れた。しかも全員がそうしてくれたとは、奇跡としかいいようがない」といっています。

筆者も、ほとんどの児童が学校管理下外にあった釜石小学校で起きたことこそが真の「奇跡」だと思います。そして、その「奇跡」は日頃の防災教育・訓練の賜（たまもの）として発現したと考えています。

東日本大震災発生当時、釜石小学校の子供たちのレベルで津波の知識と避難能力を身につけていた子供は全国的にも極めて少なかったでしょう。

子供たちは成長とともに、親や学校の保護が及ばない時間や場所で行動することが多くなります。もし、そのときに子供に危険な状況が迫ったなら、彼らの頭と力で自らの命を守る行動を取れることが求められます。

私たち大人は、義務教育などの機会を生かして、彼らにその力を身につけさせる必要があります。また、私たち自身が率先して学び、能力を身につけ、彼らのお手本となることも大切と考えます。

4. 連載を終了するにあたって

阪神・淡路大震災の前年の1994年から開始した本連載は、自治体の防災担当職員の立場に立った実戦的な内容をお届けすることを目指しました。連載開始当初はここまでの長期連載になるとは想像していませんでした。しかし、毎年のように態様を変えて発生する災害やそれへの対策の進化などを追っていると、書かなければいけないことが次々と湧き上がってきたのも事実でした。ただ、連載開始から30年は節目だとも思っております。振り返ったとき、果たして皆さんのご期待に沿えたものになったか自信はありませんが、今号をもって本連載は終了させていただきます。

皆様のご活躍を祈っております。

冷蔵ショーケースの過熱防止器から 出火した事例について

熊本市消防局

1 はじめに

本火災は、業務用冷蔵ショーケース（以下「冷蔵ショーケース」）の温度過熱防止器から出火したものであり、熊本県警科学捜査研究所や製造業者（以下「メーカー」）との合同見分に加え、消防署における燃焼実験を実施し、原因を究明した調査事例である。



（写真1）冷蔵ショーケースの状況

2 火災の概要

本火災は、飲食店内に設置された冷蔵ショーケース及び店内の壁面の一部を焼損した建物火災である。

（1）発見、通報及び初期消火状況

飲食店の従業員が接客中に冷蔵ショーケース背面上部から白煙が出ているのを発見し、知らせを受けた同僚の従業員が119番通報を行った。初期消火は、冷蔵ショーケース背面が壁面に密接されていたため実施できず、従業員は店内にいた客の避難誘導を実施した。この火災により負傷者が1名発生している。

（2）消防隊の活動状況

消防隊現場到着時、店内には白煙が充満しており、冷蔵ショーケースを前方に移動させ、エンジンカッターで背面パネルを開放、CAFS（圧縮空気泡消火装置）による消火で鎮火に至った。（写真1参照）

（3）損害状況

- ア 人的被害 中等症1名（一酸化炭素中毒疑いで搬送）
- イ 物的被害 焼損表面積3㎡（壁面）、冷蔵ショーケース
- ウ 焼損程度 部分焼

3 製品情報

- （1）業務用冷蔵ショーケース
- （2）製造年 2014年（平成26年）
- （3）製造台数 2,140台
- （4）リコール等 当該製品及び同型製品においてリコールなし。

4 調査概要

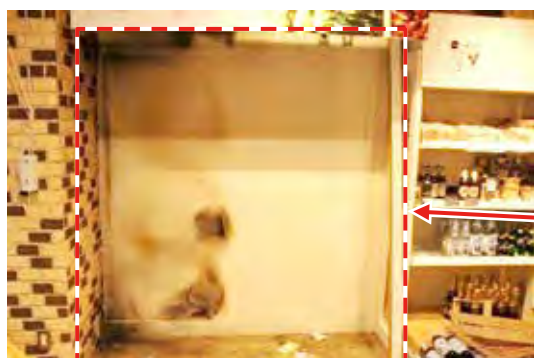
（1）現場における見分

飲食店内の壁面と冷蔵ショーケースに焼損を確認する。

壁面の焼損は表面にとどまり、壁内に焼損は認められない。

冷蔵ショーケースを見分すると、背面に変色が認められる。冷蔵ショーケースの電源コード

は三相200V（本体用）と単相100V（照明用）があるが、電源コード及びプラグに焼損は認められない（写真2、3参照）。



冷蔵ショーケースがあった位置

（写真2）壁面の焼損箇所



変色部分

（写真3）冷蔵ショーケースの背面の状況

（2）鑑識見分

ア 外観について

冷蔵ショーケースは商品陳列部と機械部に分かれている。

外観を見分すると、背面パネルの中央下部

に変色が認められる。背面パネルを取り外し、内部を見分すると、中央から右側において機械部から上方にかけて焼損が認められる。（写真4～6参照）



商品陳列部

機械部

（写真4）冷蔵ショーケース正面



(写真5) 冷蔵ショーケース背面パネル

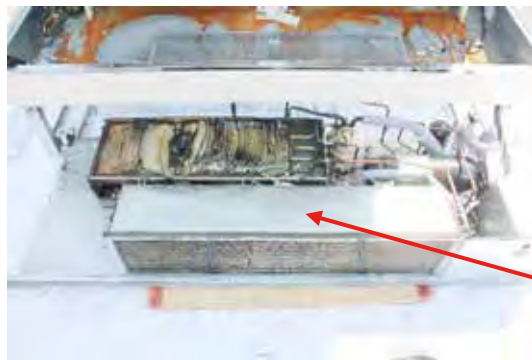


(写真6) 冷蔵ショーケース背面下部

イ 機械部について

機械部は蒸発装置、コンプレッサ、電装ボックスで構成されている。コンプレッサ、

電装ボックスの内外及び周辺の配線に焼損は認められない。(写真7参照)



(写真7) 機械部の状況 (正面)

ウ 蒸発装置について

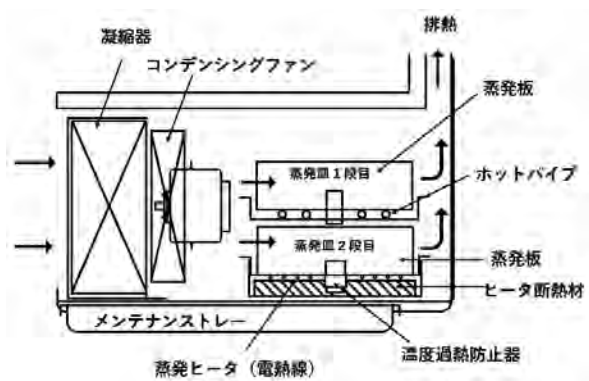
メーカーの説明によると、蒸発装置は2段の蒸発皿で構成されており、冷却の際に生じた水分を蒸発皿内に設置された蒸発板で蒸発させるものである。

水分は蒸発皿の1段目に溜り、1段目はコンプレッサの熱を利用したホットパイプが蒸発板に染み込んだ水分を蒸発させる。このホットパイプは約80℃まで上昇する。

1段目で蒸発されずに溜まった水分は中央部にある排出管から下の2段目にオーバーフ

ローされる。2段目は常時通電の蒸発ヒータにより蒸発される。このヒータは温度過熱防止器が取り付けられており70℃±3℃でオフとなり、35℃±5℃で再びオンになる構造になっている。

さらに2段目でも蒸発できずに溜まった水分は再び中央部の排出管からオーバーフローされ冷蔵ショーケース底面に設置されているメンテナンストレーに溜まり、手動で排水されるような仕組みになっている。(図1参照)



(図1) 蒸発装置

エ 凝縮器及びコンデンスファンについて
凝縮器はコンデンスファン側に一部焼損が認められる。凝縮器と蒸発皿の間に3基設けられているコンデンスファンについては、一部焼損しているが原形を留めている。配線は被覆が焼損しているが、断線は認められない(写真8参照)



(写真8) コンデンスファンの状況

オ 蒸発皿について
メーカーの説明によると、2段の蒸発皿に

はそれぞれ複数枚の蒸発板が設けられているとのことである。

カ 蒸発皿1段目について

蒸発板が焼損した状態で48枚認められる。蒸発板下部のホットパイプは一部変色が認められるが地色を留めて残存している。蒸発皿1段目の底面は一面黒く変色している。(写真9参照)



(写真9) 蒸発皿1段目及び2段目の状況

キ 蒸発皿2段目について

蒸発皿2段目上には残渣物が一部灰化状態で認められる。蒸発皿の上面(表面)の左側に直径5mm程度の孔が認められる(写真10参照)。蒸発皿2段目底面(裏面)は3箇所に変色部分が認められる。左側の変色箇所付近に温度過熱防止器が認められるが、この位置は上面の直径5mmの孔の位置と一致している。温度過熱防止器及び配線被覆は焼損しているが配線に断線箇所は認められない(写真11参照)。



(写真10) 蒸発皿2段目上面(表面)の状況

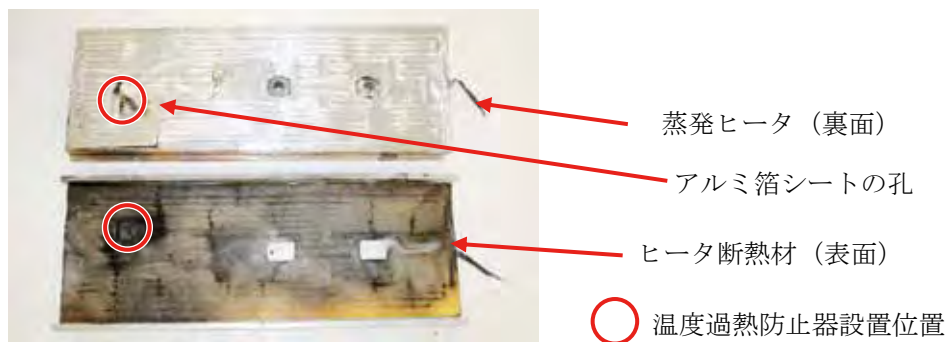


(写真11) 蒸発皿２段目底面（裏面）の状況

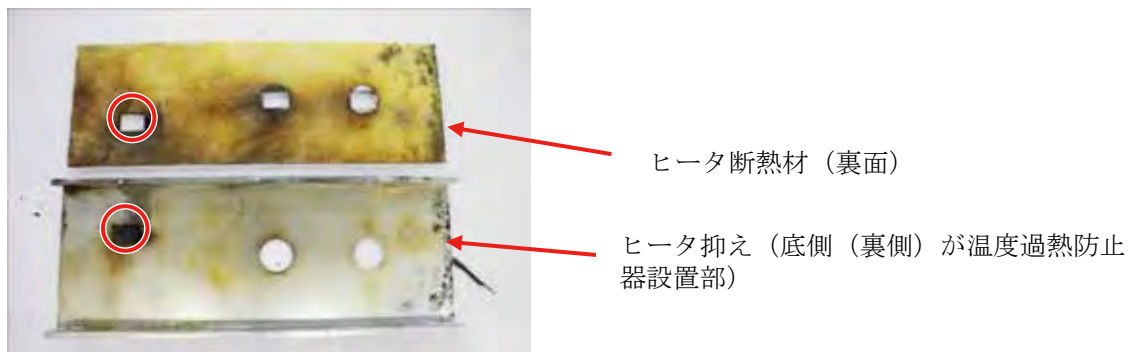
蒸発皿２段目の底には蒸発ヒータ（電熱線）があり、蒸発ヒータの下部はヒータ断熱材、ヒータ抑えとなっており、ヒータ抑えの底部に温度過熱防止器が位置している。ヒータ断熱材は温度過熱防止器部分がくり抜かれ、蒸発ヒータと温度過熱防止器が接するようになっている。蒸発ヒータはアルミ箔シートで

覆われている。

蒸発ヒータは温度過熱防止器の位置付近が一部焼失し、孔が認められる。ヒータ断熱材は全体が変色している中、温度過熱防止器付近が黒く変色している（写真12、13参照）。温度過熱防止器はヒータ抑え底面に金属板で固定されている（写真14参照）。



(写真12) 蒸発ヒータ及び断熱材の状況



(写真13) 蒸発ヒータ及び断熱材の状況



温度過熱防止器

(写真14) 蒸発皿2段目(ヒータ抑え)底面の状況

ク 温度過熱防止器について

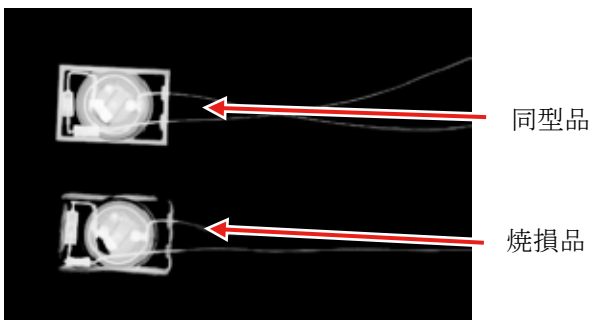
温度過熱防止器は樹脂部分（ケース部分）が炭化しており、円形の部品に孔が認められる。メーカーの説明によると円形の部分は感温部であるとのことである。（写真15参照）



孔

(写真15) 温度過熱防止器の状況

焼損品と同型品をX線撮影し確認すると、配線に断線等は認められない。（写真16参照）



同型品

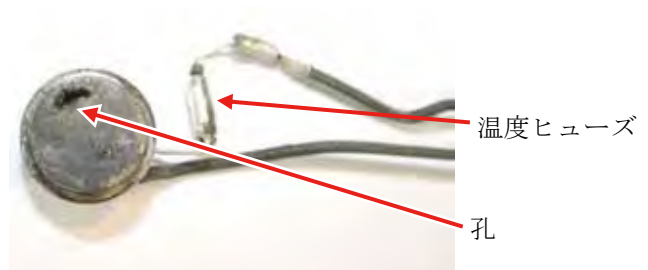
焼損品

(写真16) 温度過熱防止器のX線撮影状況

同型品を分解すると、感温部はバイメタル式サーモスタットであることが判明する（写真17参照）。焼損品のサーモスタットの外観は全体的に変色している中、上側に孔が認められる。サーモスタットに接続されている配線には温度ヒューズが確認される。温度ヒューズの導通試験を実施したところ、温度ヒューズが溶断していることが判明する。（写真18参照）



(写真17) サーモスタット（同型品）の状況



温度ヒューズ

孔

(写真18) サーモスタットの焼損状況

内部を同型品と比較しながら見分すると、感温部の孔が空いた箇所はサーモスタットの接点が位置している。焼損品の同接点部は溶

融し、接点の固定部と可動部が固着している。
(写真19、20参照)



(写真19) サーモスタット内部の焼損状況



接点部の溶融箇所

(写真20) サーモスタットの状況

5 燃焼実験

蒸発板の着火性、燃焼状況を確認するため実験を行う。

約800℃～約1000℃のガスライターで蒸発板に火をつけると、13秒後に着火し、その後勢いよく燃焼することが判明する。(写真21参照)

後日、メーカーからの回答により、蒸発板の材質はPET とセルロースを主体とした複合材であり、耐熱温度（軟化し、溶融する温度）が約265℃、発火温度が346～399℃であることが判明する。



(写真21) 蒸発板の燃焼状況

6 出火原因の検討

冷蔵ショーケースの外観、内部の焼損状況は機械部の蒸発装置の蒸発皿２段目付近からの燃烧形態が認められる。また、蒸発装置付近の電気配線に熔融痕は認められない。

このことから蒸発皿２段目付近から出火したものと考えられる。

蒸発皿２段目には蒸発ヒータが設置されており、温度過熱防止器が安全装置として設置されている。

蒸発ヒータには温度過熱防止器が設置されているため約70℃で通電が遮断される。仮に温度過熱防止器が正常に機能しなかったとしても温度ヒューズにより約105℃で通電が遮断される。また、この温度ヒューズは溶断していることから蒸発ヒータの過熱による出火は否定できる。

温度過熱防止器の状況は、接点が溶着し、感温部（上側）に孔が空いており、感温部が接する蒸発ヒータ部分にも孔が空いていることからこの部分において異常発熱があったことがうかがえる。

温度過熱防止器の作動条件は蒸発ヒータ温度の変動によるものであるが、冷蔵ショーケースの作動状況、設置位置、周辺環境などが影響するものと考えられる。焼損品は使用開始直後から約４年半の間に内部のバイメタルスイッチの接点が高頻度で開閉を繰り返し、その際に発生したアークの熱により樹脂部分が劣化した結果、絶縁抵抗が劣化し、接点部分でスパークが発生したと考えられる。スパークが発生した場合、温度加熱防止器の内部の充填材、外殻及び蒸発皿に孔を開け、蒸発板に着火することは充分考えられる。

7 結論

出火原因は、冷蔵ショーケース下部に設置され

ている温度過熱防止器内サーモスタットの接点部の絶縁抵抗の劣化によりスパークが発生、感温部及び蒸発ヒータに孔が生じ、さらに可燃性の蒸発板に着火し周囲へ延焼拡大したものと判定する。

8 予防対策等

本製品について、初回生産から約12年間においてリコールや同様の出火事例は発生していないが、今後も同様の火災が発生することが懸念されたことからメーカーに類似火災の発生防止対策を講じるよう要請した。

後日、メーカーより、火災発生当時流通している同型機においてはサービス、修理等実施の際に、温度過熱防止器の確認を行うこと、今後製造される後継機については、蒸発機構の温度制御方式を変更するなど、再発防止対策を検討するとの報告を受けた。

9 おわりに

本火災では、消火活動時において、焼損状況が比較的小規模であったことに加え、焼損物が製品であることから、現場保存を考慮、CAFSを活用し消火活動を行った。これにより焼損した蒸発板が放水圧で流失することなく残存しており、原因究明の一助となった。消防活動と並行して行う原因調査のための現場保存の重要性を改めて感じた。

今回の調査結果を基に、再発防止対策がなされ、今後、類似火災の発生が防止されることを切に願う。

発生した火災の原因を常に探求心で解明し、調査することで得た情報を最大限に活用し、火災の予防に努めていきたい。

連載
講座

なぜ、火事と喧嘩は江戸の華なのか？

歴史家・作家 加 来 耕 三

江戸中後期の浮世絵師として、一世を風靡した喜多川歌麿を、世に売り出したのは令和七年（2025）度のNHK大河ドラマ『べらぼう〜^{つた} 鷲重^{じゅう} 栄華^{えい}乃^が夢^{ゆめ}』の主人公・鷲屋重三郎であった。

が、二人が出会ったのは天明元年（1781）頃といわれ、「歌麿」と改名したのもそれからのこと。

それ以前は、「北川^{きたがわ}豊^{とよ}章^{あき}」と称して役者絵や黄表紙、洒落本などの挿絵を描いていた。

のちの美人画にも多大な影響を与えたといわれる黄表紙とは、「通と滑稽を表裏一体のものとして」表現する洒落本の発想と手法に、さらに挿絵を取り込む手法に基づいた「視覚的文学」であり、わかりやすくいえば、今日の漫画^{コミック}の元のようなものであった。

若き日の歌麿は懸命に絵の腕を磨いていたのだが、彼がちょうど二十歳の時、江戸で経験したのが、明和九年（1772）—文字通り「迷惑^{めいわく}（明和九）な、大火であった。

江戸の西南部、目黒行人坂の大円寺から出火した火事は、おりからの南西の強風にあおられて麻布から江戸城東域、さらに日本橋、神田、下谷、浅草、吉原、千住まで延焼して、翌日の正午過ぎにようやく鎮火した。

このおりの火事は、明暦三年（1657）、文化三年（1806）の両大火と並ぶ、「江戸の三大火事」の一つに数えられている。

一説に焼失した大名屋敷は169軒、旗本屋敷は300軒余、寺社院は382カ所、町屋は934町。類焼地域は江戸の3分の1に及んだ。

死者1万4700人、行方不明者4060人余。

あまりの酷さに、元号が「安永^{あんえい}」と改められる一因になったともいわれている。

出火原因は、大円寺に盗みに入った願人坊主の真秀^{しんしゅう}による放火とされ、この後、彼は浅草で火刑に処せられた。

ちなみに、この真秀を捕らえたのが、火附盗賊改方^{あらためかた}（役）を拝命していた長谷川平蔵^{はせがわへいぞう}—。

ただし、この平蔵は池波正太郎の小説『鬼平犯科帳』の主人公・平蔵宣^{のぶ}宜^おではなく、その父の平蔵宣雄^{のぶお}であり、将来の江戸町奉行と大いに期待されたが、その後、病没していた。

それはともかく、筆者は以前に明和の大火の火元となった、目黒の大円寺を訪れたことがある。

当時の犠牲者の冥福を祈って作られたという五百羅漢を、このおり拝見したのだが、悲しみの中にもどこか大らかでユーモラスな表情に、大いなる違和感というか、江戸人の意外に楽天的な気風に、ある種の戸惑いを感じた。

今にして思えば、それこそが火事が「江戸の華」となる根源でもあったように思われる。

江戸時代、火事は頻繁に起きているが、どういうわけか江戸は、火事が起こる度に発展する不思議さを備えていた。現に明和の大火は焼けるのも速かったが、その復興、そして以前にも増す繁栄を見せている。

「鷲重^{プロデュース}」の演出による江戸の文化が花咲き、歌麿の浮世絵の美人画が一世を風靡するの也被災後のこと。

明治二十六年（1893）の小鹿島果が編纂した『日本災異志』に見える災害を、百年ごとに飢饉・大風・早魃・霜雨・洪水・疫病・火災・噴火・地震・津波に分類し、集計したものを見たことがある。

元禄十四年（1701）から寛政十二年（1800）にかけては、火事が205件記録されており、次の享和元年（1801）から明治二年（1869）にかけては402件とあった。

慶長六年（1601）から元禄十三年（1700）までが170件とあるから、江戸時代は「無事泰平」の世が続き、人口が増えてくると火災はそれに応じて増えたようだ。

まして江戸の人口は、十八世紀の初めに町方人口約50万人（地主・家持など上層町人は、うち36パーセント）、これに武家・神官・僧侶などの人口を加えると100万台に達していた。

町人の64パーセントは裏店（俗に九尺二間の裏長屋）に住んでおり、一住まい平均3・75坪（七畳半）の棟割長屋で、熊さん八さんの生活を送っていた。多くは職人を生業としており、商人に比べると概して低収入であった。

職人を代表する「三職」と言われたのが、大工・左官、仕事師（鳶）で、いずれも火事のあとに、大活躍をした。

だが、生活レベルが高いと言われた彼らでも、その年収は衣食住の支出を引けば、年間わずかなお金しか残らなかった。夫婦に子供一人の家庭ならばまだしも、家族がそれ以上に多くなると、おそらく家計は赤字になったかと思われる。

比較的收入のよい「三職」でさえこのありさまであった。

火事が起きれば、復興の仕事が発生する。大火であれば、労銀も上がったろう。

けれども職人たちの収入は常に不安定であり、稼ぎさえすれば生活に困ることはないとの自負があるものの、一方では金を残し、溜たいと思っても、その余裕がないのが実情であった。

「宵越しの金を持たぬ」

という威勢のいい「江戸っ子」の啖呵も、火事を「江戸の華」とするその心情も、ある種のやせ我慢、負け惜しみととれなくもなかった。

ついでながら、もう一つの華＝喧嘩だが、これはコミュニケーション不足——言葉が通じないことによって起きたものである。

そもそも江戸は中世において、関東の片田舎であり、小田原のように開けてはいなかった。

アメリカの西部劇よろしく、新興都市が開発されるに及び、土木工事に従事する人々が、諸国から江戸に流れ込んできた。

お互い相手の言葉＝方言が理解できず、喧嘩となる。心のいこいを家族に求めたくとも、江戸は男性の単身赴任先。危なくて、女性を迎え入れることができない。

それゆえ、遊廓の吉原が元和三年（1617）に早くも幕府公認で誕生している。

やがて治安も安定し、ようやく女性も安心して住むことができるようになり、裏店にも夫婦連れの姿が見られるようになった。子供も生まれて、家族が暮らすことのできる都市となる。

この子供の両親が、ともに江戸生まれであって、はじめて子供は「江戸っ子」と呼ばれた。

——江戸っ子の誕生は、多くの人々が思う以上に遅かったのである。

筆者は葛屋重三郎のもとに居候をしていて、その死後、『東海道中膝栗毛』を発表してベストセラーとなった、十返舎一九の活躍していた頃が、ようやく江戸っ子誕生と重なると考えてきた。

江戸落語の寄席が、成り立つようになったのも同じ頃。江戸弁が理解できなければ、寄席ブームはそもそもあり得ない。

江戸の「御府内」＝江戸の範囲も、火事ごとに広がり、文政元年（1818）になってようやく「朱引」として、範囲が示された。品川大木戸、四谷大木戸、板橋・千住・本所・深川の以内を、江戸御府内ということになった。

連載
講座

「熱中症警戒アラート」と 「熱中症特別警戒アラート」

気象予報士（元気象庁） 饒 村 曜

1 「高温注意情報」と「暑さ指数」

平成23年3月11日に発生した東日本大震災により、全国的に省エネルギーや節電対策がとられました。福島原子力発電所の事故を受け、全国の原子力発電所が一斉に発電を停止したためです。このため、気温の上昇による熱中症が問題となり、気象庁では、同年7月から北海道と沖縄を除く45都府県で「高温注意情報」を發布することにしました。北海道と沖縄が除かれたのは、電力需給に余裕があったためですが、翌24年からは47都道府県に拡大となっています。高温注意情報の発表基準は、最高気温の予想が35℃以上の猛暑日になったときでした。猛暑日を基準とすることはわかりやすいのですが、熱中症の危険性は、気温だけで決まるのではなく、湿度など含めた体感温度で決まります。

人間が感じる暑さ、寒さの温度感覚（体感温度）は、皮膚温度と気温との差だけで決まるのではなく、体の表面からの熱の出入りできまりますので、気温、湿度、輻射熱、風速などによって大きく違います。昔から体感温度を客観的に観測するため、様々な工夫がおこなわれてきました。人体に与える影響が大きい気温、湿度、輻射熱から求めた体感温度が、暑さ指数（WBGT:

wet-bulb globe temperature）です。昭和32年に米国陸軍での訓練のときに、熱中症を予防するために作られました。

温度計感部を布でおおって湿らせた湿球温度計で求めた湿球温度は、空気が乾いていればいるほど蒸発熱を奪われて気温（乾球温度計で求めた温度）との差が大きくなり、このことを使うと湿度を求めることができます。また、輻射熱は、黒色に塗装された薄い銅板の球の中心に温度センサーを入れた黒球温度計で測定することができます（図1）。

暑さ指数は、次の式で計算されます。つまり、気温が高いほど、湿度が高いほど、輻射熱が強いほど暑さ指数は大きな値となります。

$$\text{暑さ指数(WBGT)} = 0.7 \times \text{湿球温度} + 0.2 \times$$

$$\text{黒球温度} + 0.1 \times \text{乾球温度}$$

熱中症対策は、暑さ指数が有効ですが、暑さ指

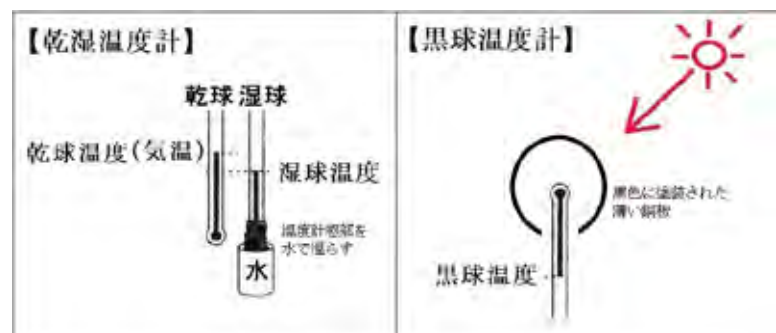


図1 乾湿温度と黒球温度計のイメージ図

出典：筆者作成

数の単位は℃と、気温の単位である℃と同じです。このため、誤解を避けるため、気象庁では令和5年から、環境省では令和6年から、ホームページ等で発表する暑さ指数には単位をいれていません。よって、本文も、暑さ指数の単位を省略しました。

2 「熱中症警戒アラート」の発表

20世紀の終わりころには年間200人位だった熱中症による死亡者は、最近では1000人を超えるという急増をしています（図2）。

環境省では、平成18年から、熱中症の危険性を示す「暑さ指数」の情報提供をホームページで始めていますが、基準が分かりにくいこともあって一般への認知度が低く、あまり活用されていませんでした。また、気象庁が発表する高温注意情報も、熱中症対策には不向きでした。

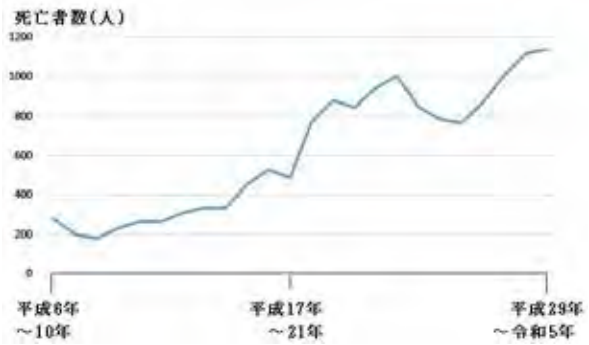


図2 熱中症による死亡者（5年移動平均の推移）
出典：環境省ホームページをもとに筆者作成

そこで、環境省と気象庁は、広く情報を知ってもらい、熱中症で救急搬送される人を減らそうと令和2年7月から「熱中症警戒アラート」を共同で関東甲信の1都8県で始めました。そして令和3年夏から全国に広がりました（表1）。

暑さ指数31以上が危険ですが、熱中症警戒アラートの基準は、さらにその上の33です。

3 「熱中症特別警戒アラート」の運用開始

熱中症対策のさらなる強化のため、令和5年4月に気候変動適応法（平成30年法律第50号）の一部が改正が行われ、熱中症対策実行計画の法定計画への格上げ、熱中症警戒情報（熱中症警戒アラート）の法定化及び熱中症特別警戒情報（熱中症特別警戒アラート）の創設、市町村長による指定暑熱避難施設（クーリングシェルター）及び熱中症対策普及団体の指定の制度等が決められました。

熱中症警戒アラートと熱中症特別警戒アラートの運用期間は、4月の第4水曜日から10月の第4水曜日までとなっていますので、令和6年は、4月24日から10月23日までとなります。また、熱波は広域性があること、発表単位の地域内すべてに指定暑熱避難施設の開放義務がかかることから熱中症特別警戒アラートの発表地域範囲は都道府県となっています（表2）。

表1 熱中症へ警戒を呼び掛ける情報

期間	情報名	発表基準等
平成23年7月～令和2年6月	【全国（北海道と沖縄は平成24年から）】高温注意情報	最高気温が35℃以上（猛暑日）
令和2年7月1日～10月	【関東甲信以外】高温注意情報	最高気温が35℃以上（猛暑日）
	【関東甲信】熱中症警戒アラート	暑さ指数33以上
令和3年4月28日～（現在）	【全国】熱中症警戒アラート	暑さ指数33以上
令和6年4月24日～（現在）	【全国】熱中症特別警戒アラート	予報区内すべての地点で暑さ指数35以上

出典：筆者作成

表2 「熱中症警戒アラート」と「熱中症特別警戒アラート」の比較

	熱中症警戒アラート	熱中症特別警戒アラート
目的	熱中症の危険性に気づいてもらう	熱中症を防ぐ行動を実践してもらう
発表地域単位	気象庁の天気予報を発表する都道府県を分けた単位（府県予報区）	都道府県単位
発表基準	府県予報区内の暑さ指数情報提供地点のどこかで「暑さ指数 33 以上」	都道府県内の暑さ指数情報提供地点のすべてで「暑さ指数 35 以上」（ただし、災害などで断水などの事態が生じた場合は 35 に達しなくても発表する）
発表時刻	前日の 17 時 当日の 5 時	前日の 14 時
伝達ルート等	気象庁と環境省が共同発表 気象庁からは気象情報・防災情報と同じルートで周知、環境省はホームページ等で発表	環境省が発表 環境大臣→都道府県知事→市町村長（特別区長） 気象庁は気象に関する今後の見通しや解説を行うための情報の中で言及

出典：環境省ホームページをもとに筆者作成

熱中症特別警戒アラートが発表となったときは、住民に命を守る行動をとるように強く警戒を促し、市町村には冷房を備えた公共施設や商業施設を「クーリングシェルター」として開放することが求められます。

熱中症特別警戒アラートの発表基準である発表地域内のすべての暑さ指数情報提供地点において暑さ指数の予測値が35以上となった時というのは、簡単には達しない条件です。平成18年以降、暑さ指数が最も高かったのは、令和2年8月11日の埼玉県で、紀伊半島の南海上にある熱帯低気圧（のちに台風8号に発達）により湿った空気が流入したときです（図3）。このため、埼玉県のさいたま、越谷、久喜の3市で暑さ指数が35となり、越谷市では熱中症による救急搬送者数が前日の倍以上となっています。ただ、このとき、埼玉県の3地点以外の5地点（寄居・熊谷・秩父・鳩山・所沢）は暑さ指数が34と、埼玉県内すべてで35以上ではないため、ただし書きに該当しない限り、熱中症特別警戒アラートの発表はしません。つまり、最初に熱中症特別警戒アラートが発表になった時は、これまでにない高い暑さ指数になった時ということです。

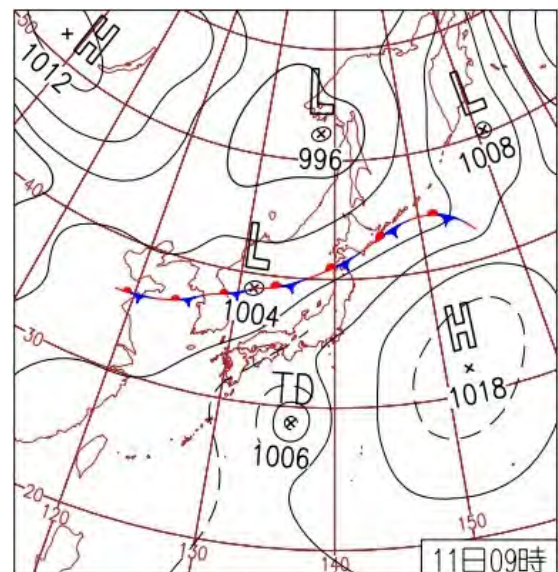


図3 地上天気図（2020年8月11日9時）

出典：気象庁ホームページ

4 地球温暖化と極端な高温の日が増加

1970年頃（昭和40年代後半）から、世界的に大洪水や干ばつ、暖冬などの異常気象による社会・経済の深刻な打撃が増えはじめたことから、昭和63年に「気候変動に関する政府間パネル（IPCC：Intergovernmental Panel on Climate Change：2007年のノーベル平和賞）」が世界気象機関と国際連

合環境計画によって設立されました。

令和 5 年（2023 年）3 月に発表された最新の IPCC の報告書（第 6 次）では、①気候の温暖化は疑う余地がない、②20 世紀後半の気温上昇のほとんどは人為起源の温室効果ガスの増加による可能性が非常に高い、③極端な大雨や高温の頻度の増加が始まっている可能性が高い、④強い台風が増加する可能性が高いなどが示されています。例えば、50 年に 1 回の高温は、嘉永 3 年（1850 年）からの平成 8 年（1900 年）の 50 年間に 1 回とすると、その時から平均気温が 1.0℃上昇している現在では、50 年間で 4.8 倍の 4.8 回発生しているというものです（表 3）。これが 4.0℃上昇した場合は、50 年に 1 回の高温が 50 年に 39.2 回、つまり、ほとんどの年で 50 年に 1 回の高温が発生していることになります。また、頻度が増えるだけでなく、高温の程度（強度）も増加しています。

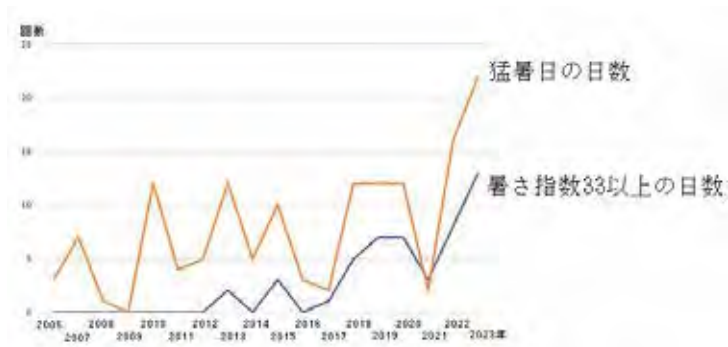


図 4 東京の猛暑日の日数と暑さ指数33以上の日数の推移
出典：気象庁ホームページと環境省ホームページをもとに筆者作成

世界的に気温と湿度が高くなっており、日本も例外ではありません。このため、最高気温が 35℃以上という猛暑日の日数の増加より、最高暑さ指数が 33 以上の日数の増加が目立っています(図 4)。今後、出現する可能性がある、これまでにない暑さに備えての対策が、熱中症特別警戒アラートで、熱中症警戒アラートとともに、その活用が期待されています(表 4)。

表 3 陸域における極端な高温の予想される変化（50年に1回の現象）

	1850 年 ～1900 年	【現在】 + 1 . 0℃	+ 1 . 5℃	+ 2 . 0℃	+ 4 . 0℃
50 年に 1 回 の頻度	1	4 . 8 倍	8 . 6 倍	1 3 . 9 倍	3 9 . 2 倍
強度の増加		+ 1 . 2℃	+ 2 . 0℃	+ 2 . 7℃	+ 3 . 3℃

出典：環境省ホームページをもとに筆者作成

表 4 暑さ指数に応じた熱中症対策

熱さ指数	暑さ指数の説明	熱中症対策
35以上	特別警戒アラート（重大な健康被害の恐れ）	学校や会社は運動、外出、イベントの中止を検討
33以上	警戒アラート（健康被害の恐れ）	エアコンがきいた室内の涼しい環境で過ごす
31以上	（危険）	外出はなるべく避ける。子どもの運動は中止
28以上	（厳重警戒）	外出時は炎天下を避け、室内では室温の上昇に気をつける
25以上	（警戒）	激しい運動の際は30ごとに休憩
21以上	（注意）	激しい運動や重労働で熱中症の危険性。積極的に水分補給

出典：気象庁ホームページと環境省ホームページをもとに筆者作成

編集後記

今回は、特集のテーマについて、関心の集まっている「大雨災害への防災・減災（その2）」と「令和6年能登半島地震（その1）」の二つテーマに特集を組み編集させていただきました。

毎日のように猛烈に暑い日が続いておりますが、この状況は地球温暖化というより、まさに地球沸騰化というべき状態だと思われます。近年は、温度が上昇するに伴って気象現象が極端化し、大雨が降り続くことにより、大きな災害をもたらすようになってきています。

ところで、縄文時代においても温暖化した時期と寒冷化した時期が繰り返しあったようで、そうした時期に縄文人がどう対処していたのかというと、熱い時期と寒い時期とで住居を移動していたことがわかってきました。つまり、寒い時期には南側の斜面に住い、熱い時期には北側の斜面に移住して、災害から身を守っていたとのこと。まさに縄文時代人の知恵と言えます。

それを現代に置き換えて考えてみると、『危険な場所やその近くには、できるだけ住まないようにする。』ということになります。これがなかなかできません。現代は、貨幣経済が発達しており、安全な場所は当然地価が高くなっているため、そう簡単には安全な土地を取得できないという問題があります。そこで考えたの

ですが、例えば、『市町村等の地方自治体において比較的安全な場所を取得し、地主である自治体が住民に土地を安価に貸し出して、家を移転してもらうような対策』が有効と思われます。災害が起きてから避難所や仮設住宅等を設置する経費を考えると、災害の起きにくい場所を事前に取得して、そこに住んでもらうような街づくりを、地道に続ける政策の方がより経済的で望ましいことであることは当然であり、『街づくり』という視点も交えて、現代人の知恵を見せてほしいところです。

今回は、「特集：大雨災害への防災・減災（その2）」において、将来降水量の予測方法、都市水害、激しい気象現象等をテーマとして編集を組み、そして「特集：令和6年能登半島地震（その1）」において、能登半島地震の特徴や地震のメカニズム等、輪島市大規模火災に関する研究等をテーマとして特集を組ませていただきましたが、次回以降も今回と同様に、「大雨災害への防災・減災」と「令和6年能登半島地震」をテーマに、特集を組ませていただきたいと考えております。

今回の特集が、消防・防災関係者にとって、地震災害への防災・減災を考える上で、少しでもお役に立てば幸いです

〔本誌から転載される場合にはご連絡願います。〕

季刊「消防防災の科学」 No. 157 2024. 夏季号

発行 令和6年8月22日

発行人 福浦裕介

発行所 一般財団法人 消防防災科学センター

〒181-0005 東京都三鷹市中原三丁目14番1号

電話 0422 (49) 1113 代表

ホームページ URL <https://www.isad.or.jp>

