

# 防災技術に関する最近の研究開発と展望

太田 岳洋\*

## Recent Research on and Prospects of the Disaster Prevention Technology

Takehiro OHTA

Various natural disasters have occurred in Japan due to geological and meteorological conditions, and we have suffered a lot of personal and economical damage. The disaster prevention technology in the railway has been developed through many experiences and has contributed to the decrease of damage. After the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake however the paradigm of disaster prevention has been shifted and local and extreme meteorological phenomena in recent years changes the social request for the disaster prevention technology. We are worried that low frequency-large scale disasters may occur in the near future. I will describe the necessity of preparations for the low frequency-large scale disasters and will introduce the results of our recent research on disaster prevention.

キーワード：防災技術，低頻度大規模災害，強風，地震，土砂災害，ハザードマップ

### 1. はじめに

我が国は地質学的にはプレート境界に位置し，世界でも有数の変動帯にある。そのため，非常に急峻な地形を呈し，かつ地震や火山活動が活発な地域である。例えば，世界のマグニチュード6以上の地震の約2割が我が国周辺で発生し，約2,000の活断層が確認されている<sup>1)</sup>。さらに，世界の活火山の約7%にあたる110の活火山が分布する<sup>1)</sup>。そのため，我が国は世界的に見ても新しく，脆弱な地質から構成されているといえる。一方，我が国の大部分は温帯モンスーン気候に属し，夏季には台風に襲われ，冬季には北西の季節風と豪雪に見舞われる。これらの地象気象の特徴を有する我が国では，これまでも暴風，豪雪，豪雨や土砂崩壊，土石流，地震，津波，噴火などのあらゆる自然災害が発生し，人的，経済的被害を被ってきた。

このような国土においても，鉄道は安全かつ安定した輸送の提供が求められるため，被災の経験に基づき様々な防災対策の努力を続け，近年では鉄道における災害発生件数は減少してきている<sup>2)</sup>。しかしながら，局地的に極端な気象現象の発生や平成23年東北地方太平洋沖地震後に活発化したといわれる地震活動，近い将来の発生が予想される南海トラフ沖の巨大地震や首都直下地震，さらには火山噴火など，これまで鉄道のみならず現代文明が経験したことのない地球規模の現象による未曾有の災害（低頻度大規模災害）が懸念されている。本稿では，これらの低頻度大規模災害についての概要と鉄道総研における最近の研究開発の事例について述べる。

\* 防災技術研究部 部長

### 2. 想定される低頻度大規模災害

#### 2.1 低頻度大規模災害への備えの必要性

平成23年東北地方太平洋沖地震は，我が国の防災対策の考え方の方向転換を迫る災害であった。特に災害の発生を完全に防ぐことは不可能であること，できるだけ被害を最小とする「減災」の考え方を徹底して災害対策を推進すべきこと，が認識された。災害による被害を最小限にするためには，科学的知見に基づき起こりうる災害形態と規模およびその災害によって生じる被害を適確に想定し，起こりうる災害とその被害推定に基づいて点検を行い，対策をすすめる必要がある<sup>1)</sup>。

また，東北地方太平洋沖地震のような強大な外力による災害は，発生頻度は非常に低いが被災の範囲や重大さは大きい。このような低頻度大規模災害は，実施可能なハード対策の耐力を上まわり，被害を防ぎきれないため，設計を超える外力の災害にもある程度の効果を発揮するハード対策と規制や避難などのソフト対策を組み合わせる必要がある<sup>1)</sup>。近年，我が国ではほとんど経験したことのない規模の地震や豪雨等が発生しており，これにともなって発生することが危惧される低頻度大規模災害に対する備えが必要となってきている。

#### 2.2 巨大地震・巨大津波

一般に大きな地震の後には余震や誘発地震の活動がみられる。1900年以降，マグニチュード(Mw)9.0以上の地震は，東北地方太平洋沖地震までに世界で4回発生しているが(表1)<sup>1)</sup>，そのうち2004年のスマトラ島北部西方沖地震では，その3ヶ月後と7年後にマグ

特集：防災技術

ニチュード 8.6 の地震が発生した。カムチャッカ～アラスカ地域では、1952 年 (Mw9.0), 1957 年 (Mw8.6), 1964 年 (Mw9.2), 1965 年 (Mw8.7) に Mw9 前後の地震が連続して発生した。また、東北地方太平洋沖地震後は各地で活発な地震活動が観測されているが、Mw8 前後の地震はまだ観測されていない。

表 1 1900 年以降発生した Mw9 以上の地震と火山噴火

発生日時 (日本時間)	発生場所	マグニチュード (Mw)	地震後の噴火
1960 年 5 月 23 日	チリ	9.5	コンドンカウゼ (2 日後) 他 3 火山が 1 年以内
1964 年 3 月 28 日	アラスカ湾	9.2	トライデント (3 日後), リダウト (2 年後)
2004 年 12 月 26 日	インドネシア, スマトラ島北部西方沖	9.1	タラン (4 カ月後), メラビ (1 年 3 ヶ月後), ケルト (3 年後) カルピンスキ (翌日) ほか 2 火山が 3 カ月以内, ベズイミアニ (3 年後, 1,000 年の休止後)
1952 年 11 月 5 日	カムチャッカ半島	9.0	?
2011 年 3 月 11 日	日本, 三陸沖 (東北地方太平洋沖地震)	9.0	?

一方、南海トラフでは 100 ～ 150 年程度の周期でマグニチュード 8 クラスの海溝型地震が発生しており、東海、東南海、南海の 3 つの震源域が同時に活動した地震も確認されている。東海地震は前回の発生から約 160 年、東南海、南海地震は前回から約 60 年が経過しており、これらが連動した地震の発生が危惧されている<sup>1)</sup>。このため、内閣府ではあらゆる可能性を考慮した巨大地震モデルを構築し、地震規模としてマグニチュード 9 クラスを想定した震度分布、津波高の推定を進め、推計結果を取りまとめている<sup>1)</sup>。また、最近の地震活動の活発化を踏まえ、東京湾北部地震などのマグニチュード 7 クラス以上の首都直下地震の発生の切迫性が指摘されている<sup>1)</sup>。

2.3 火山災害

我が国には前述のように 110 の活火山が分布し、有史以来繰り返し甚大な火山災害に見舞われてきた。1990 年～ 1995 年の雲仙岳、2000 年の有珠山や三宅島、2011 年の霧島山などで大きな被害をもたらす噴火が発生している。雲仙岳や有珠山の噴火では鉄道も大きな被害を被った。また、桜島でも 2009 年以降爆発的噴火が毎日のように発生し、現在も活発な活動を続けている。

これまで発生したマグニチュード 9.0 以上の地震の発生後には、数年のうちに周辺の火山で噴火が生じていることが確認されている (表 1)。東北地方太平洋沖地震後には顕著な火山噴火は確認されていないが、現在は三陸沖で大きな地震が発生し火山活動が活発であった 9 世紀の状況と類似するとの指摘もある<sup>1)</sup>。そのため、火山噴火災害への備えが必要であるとされている。

火山噴火による災害を予測し、その被害を軽減させるためには、事前に噴火シナリオを想定したうえでハザードマップを作成し、これに基づいた避難計画を策定しておく必要がある。噴火時には策定した計画に基づき行動することとなるが、事前の想定と同一の現象が生じるこ

とはないため、噴火活動の状況に合わせてハザードマップを変更し、対応する必要がある<sup>1)</sup>。

2010 年のアイスランドのエイヤフィヤトラヨークトルの噴火では  $2.5 \times 10^8 \text{m}^3$  もの火山灰が放出され (火山爆発指数 VEI=4)、欧州全域で航空便が多数欠航し、鉄道などの陸上交通機関も混乱した<sup>1)</sup>。我が国最大の火山噴火は約 9 万年前の阿蘇カルデラの噴火で  $6 \times 10^{11} \text{m}^3$  もの火山噴出物が放出され (VEI=7)、その他始良カルデラ (鹿児島湾) や鬼界カルデラでも同レベルの噴火が発生した。国が設置した「広域的な火山防災対策に係る検討会」は、このような大規模火山災害に備えて、溶岩流や火砕流等に対する避難計画の策定、降灰の影響評価と対策に関する調査研究の推進等の重要性を指摘している<sup>1)</sup>。

2.4 大規模水害災害・大規模土砂災害

2005 年のハリケーン・カトリーナによるニューオーリンズでの浸水被害、2011 年のタイの水害など、近年世界的に大規模な水害が多発している<sup>1)</sup>。我が国でも近年は短時間豪雨が増加傾向にあり (図 1)、さらには地球温暖化によるといわれる大雨の頻度の増加、極めて強い台風の発生などが予測されている<sup>1)</sup>。

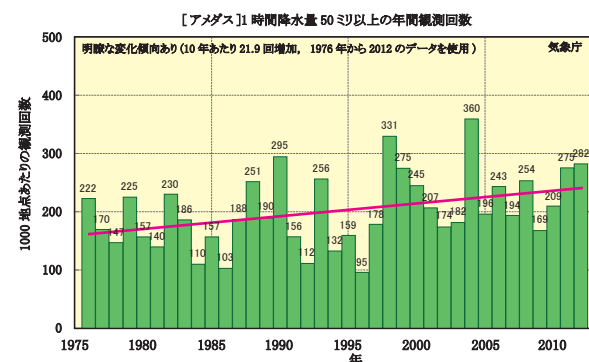


図 1 近年の 1 時間降水量 50mm 以上の年間観測回数<sup>1)</sup>

我が国における土砂災害の発生件数は年平均約 1,000 件以上で推移しており、降雨の強大化にともない大規模な土砂災害が発生するようになってきた<sup>1)</sup>。例えば、2011 年台風 12 号に伴う大雨により紀伊半島で複数発生した、いわゆる深層崩壊による河道閉塞や、2012 年 7 月の九州北部豪雨による多数の土砂災害の発生などがあげられる。特に後者では、熊本県阿蘇地区で最大時間雨量 106.0mm、最大連続雨量 816.5mm を観測し、鉄道における災害件数が 201 件にのぼり、供用中のトンネルの崩落などこれまで事例のない災害が発生した<sup>3)</sup>。

以上のような豪雨などともなう大規模土砂崩壊については、発生機構や要因が不明な点が多く、さらなる調査研究や防災対策の検討が必要であると指摘されている。国土交通省は「深層崩壊推定頻度マップ」「深層崩壊溪流レベル評価マップ」を公表し、雨量レーダー、振

動による大規模土砂移動検知システム、衛星画像解析などの技術を活用した大規模崩壊監視計画システムの整備を進めている<sup>1)</sup>。今後の課題として、大規模崩壊の規模や影響範囲を事前に特定する手法の確立があげられている<sup>1)</sup>。

### 3. 鉄道総研における最近の研究開発

これまで鉄道総研では、地震や豪雨などの外力の大規模化に対する減災・防災技術について研究開発を進めており、その成果を本号に掲載している。本号に掲載されていないその他の成果について以下に概略を述べる。

#### 3.1 変動要素を考慮した強風時の車両安全性評価手法の開発

これまで鉄道総研が提案してきた強風時における車両の安全性を評価する手法<sup>4) 5) 6)</sup>では、時間的に不規則な変動をするためにその値を確定的に定めることが困難な2つの要素（車両の左右振動加速度および自然風の風向、以下、変動要素という）に対して、危険性の過小評価を防ぐ目的からそれぞれ転覆限界風速を最も低く見積もる値を採用してきた。そこで、2つの変動要素について、実測結果に基づき発生確率をモデル化して転覆限界風速の発生確率を求めたうえで、これを上回る強風発生確率  $P_x$  の大小で安全性を評価する手法を検討した。以下に、自然風の風向を考慮した  $P_x$  の検討例を示す。

$P_x$  の検討は、直線状の単一の線路構造物のみで構成された駅間約16kmの仮想区間を100km/hで走行する車両を対象とした。車両の転覆限界風速は、一般的な通勤型車両の中間車を想定して総研詳細式<sup>7)</sup>を用いて風向別に求めた。一方、自然風の強風発生確率は、強風地に位置するアメダスで観測された10分間最大瞬間風速データを風向別に区分して風向発生頻度を得るとともに、風向別の強風発生確率をWeibull分布により求めた(図2)。

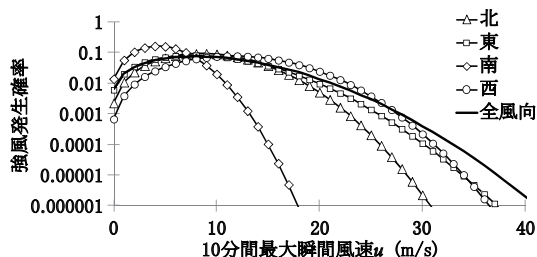


図2 風向別の強風発生確率モデルの例

(北、東、南、西の各モデルと全風向モデルを例示)

線路方位を0度とした風向角  $\theta$  での転覆限界風速を  $Uc(\theta)$ 、自然風の風向を  $d$ 、風向別のワイブル係数を  $c_d$ 、 $k_d$ 、風向発生頻度を  $w(d)$  とすると、駅間で転覆限界風速を上回る強風に遭遇する確率  $P_x$  は(1)式より求める。

$$P_x = \sum_{d=1}^{16} \left[ \exp \left\{ - \left( \frac{Uc(\theta)}{c_d} \right)^{k_d} \right\} \times w(d) \right] \quad (1)$$

風向別の転覆限界風速の最低値とこの最低値をもたらす風向からのみ強風が生じると想定した場合(図2の全風向モデルを使用)と、風向別の転覆限界風速および風向別の強風発生確率を考慮した場合とで試算した  $P_x$  はそれぞれ  $2.40 \times 10^{-4}$ 、 $5.73 \times 10^{-7}$  となり、風向の考慮の有無で  $P_x$  の評価結果が大きく変わることがわかった。

#### 3.2 地震後の土構造物の降雨耐力に関する研究

大規模地震が発生した後、地震動が土構造物の安定性に与える影響を考慮して、降雨時の列車の運転規制値を一時的に低く設定する場合がある。この規制値の低下幅は経験的に決定されており、より適切な運転規制値の設定が求められている。そこで、地震動が作用した土構造物の降雨耐力を解明することを目的に、振動台で加振した模型盛土を用いて散水実験を実施し、地震後における盛土の降雨耐力低減メカニズムの解明に取り組んでいる。

図3に模型盛土の概要、表2に実験ケースを示す。加振はsin波、5Hz、20波の波形で100Galから900Galまでは100Galずつのステップ加振とし、それ以降は任意の加速度振幅を適用してのり肩部の鉛直変位が所定の値となるまで実施した。実験の結果、加振終了後ののり肩部の鉛直変位が大きいと、のり面変状発生までの累積雨量は少なくなることがわかった<sup>8)</sup>。本実験結果の範囲では、のり肩部の鉛直変位が大きい場合には、鉛直変位が無い場合の60%程度の累積降雨でのり面変状が発生した<sup>8)</sup>。

今後は、上記の模型実験結果を反映した解析モデルを開発し、パラメトリックスタディーにより実盛土の高さや勾配など構造形式の影響について検証し、加振履歴と降雨耐力の定量化を目指す。

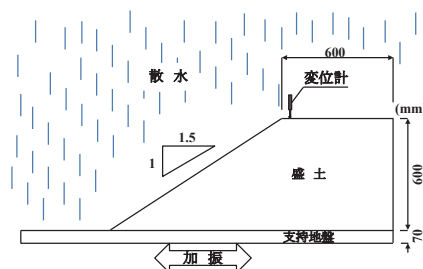


図3 実験の概要

表2 実験ケース

Case No.	加振波形	のり肩部の鉛直変位 $d_v$ (mm)	降雨強度 (mm/h)
1	加振無	0.00	30 → 40
2	sin波、5Hz、20波	1.66	30 → 40
3		12.35	30

#### 3.3 早期地震防災システムで海底地震計データを活用するための基礎検討

海域で発生する地震に対してより早く警報を出力する

特集：防災技術

ためには、海底地震計データを早期地震防災システムに活用することが効果的である。一方、海底地震計と既存の陸上地震計とでは設置環境などが異なるため、警報手法を検討する際に、事前に海底での地震動の特性を把握する必要がある。そこで、現在入手可能な海底地震計記録として、東京大学地震研究所の三陸沖光ケーブル式海底地震・津波観測システムの海底地震計の観測記録を用いて、海底の地震動記録の基礎的な分析を実施した。

分析結果から、同一の地震に対する海底地震計のS波主要部のスペクトル特性は陸上の地震計の記録と比べて大きく異なることがわかった(図4)。特に5Hz以下の周波数帯域が顕著に増幅され、5Hz以上で大きく減衰することが示された<sup>9)</sup>。この特性は、規定値超過による警報を扱う際のしきい値の設定に大きな影響を与える。また、地震規模を推定する際には値の過大評価に繋がる。

このような海底地震計で記録された地震動の特性や地震が発生していない時間帯における常時ノイズの特性などを総合的に考慮して、早期地震防災システムにおける効果的な海底地震計データの活用法を現在検討中である。

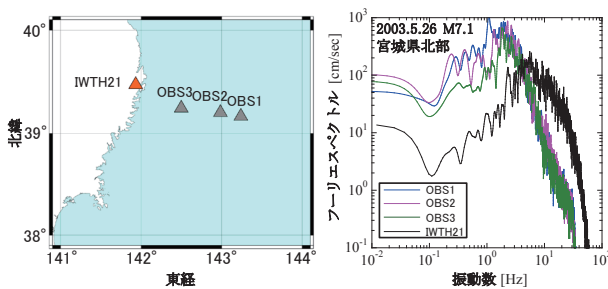


図4 解析に用いた海底・陸上の地震計設置位置と地震動のフーリエスペクトルの比較

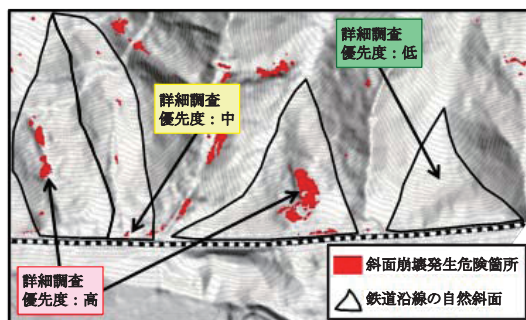


図5 斜面崩壊危険箇所の抽出結果

3.4 空間数値情報を用いた斜面崩壊の発生危険箇所抽出手法

近年、鉄道用地外の自然斜面が崩壊し、鉄道が被災する事例がしばしば発生している。しかし沿線に存在する多数の自然斜面を定期的に点検するためには膨大な時間と費用がかかるため、より効率的な自然斜面の管理手法の確立が望まれている。そこで、降雨による斜面崩壊を対象とし、斜面崩壊の発生に関わる要因として地形条件(斜面の傾斜、形状)と植生条件(伐採)が挙げられる

ことを明らかにし、これらの要因を航空レーザ測量から得られた数値標高モデルおよび数値表層モデルを用い数値化した<sup>10)</sup>。そして斜面崩壊の発生への寄与度に応じて各要因に重みづけを行い、重ね合わせることで、斜面崩壊が発生する可能性がある箇所を抽出する手法(図5)を開発した<sup>10)</sup>。本手法は広域を概略的に調査する一次スクリーニング手法として有用と考える。

4. おわりに

現在、3.4に述べた災害ハザードの可視化手法を基礎として、その影響範囲をマッピングする手法と面的な気象状況を計算する数値気象シミュレーション手法の開発を進めており、これらを統合して算出外力に基づく総合的ハザードマッピング技術の構築に取り組んでいる<sup>11)</sup>。さらに今後は、発生が懸念される低頻度大規模災害に対して、鉄道の安全で安定した輸送を確保しつつ、被害を最小にとどめる減災の考え方を取り入れた災害規模等の推定や非常時の列車運行、避難を考慮した運転規制方法について、鉄道総研でも検討すべきと考えている。

文献

- 1) 内閣府：平成25年度版防災白書, <http://www.bousai.go.jp/kaigirep/hakusho/>, 2013
- 2) 太田直之, 杉山友康：災害の推移と今後の防災, 日本鉄道施設協会誌, Vol.47, No.6, 2009
- 3) 橋倉涼一：平成24年度 災害の概要 JR九州, 日本鉄道施設協会誌, Vol.51, No.6, pp.426, 2013
- 4) 今井俊昭, 荒木啓司, 福原隆彰, 谷本早紀, 種本勝二, 日比野有：規制区間で転覆限界風速を超える強風が発生する確率の評価方法, 鉄道総研報告, Vol.26, No.9, pp.47-52, 2012
- 5) 今井俊昭, 荒木啓司, 福原隆彰：規制区間で列車が強風に遭遇する確率の評価方法, 鉄道総研報告, Vol.23, No.3, pp.5-10, 2009
- 6) 福原隆彰, 島村泰介, 今井俊昭：風速の時間変動を考慮した強風時運転規制の評価法, 鉄道総研報告, Vol.21, No.1, pp.13-18, 2007
- 7) 日比野有, 石田弘明：鉄道車両の転覆限界風速に関する静的解析法, 鉄道総研報告, Vol.17, No.4, pp.39-44, 2003
- 8) 川尻峻三, 松丸貴樹, 杉山友康, 布川修, 伊藤賀章, 西田幹嗣, 太田直之：水分挙動に着目した地震後の降雨による盛土崩壊メカニズムについて, 第48回地盤工学研究発表会講演概要集, pp.1053-1054, 2013
- 9) 宮腰寛之, 津野靖士, 岩田直泰, 山本俊六, 酒井慎一, 篠原雅尚：早期地震警報システムに海底地震計を利用するための基礎検討, 日本地球惑星科学連合2013年大会予稿集, 2013
- 10) 長谷川淳, 太田岳洋：空間数値情報を用いた斜面崩壊の発生危険箇所抽出手法, 鉄道総研報告, Vol.26, No.9, pp.23-28, 2012
- 11) 鈴木康文, 渡辺郁夫, 石塚弘道, 杉山友康, 館山勝：鉄道システムの安全性・信頼性向上, RRR, Vol.68, No.1, pp.14-17, 2011