

防災の地学： 「損失の縮減＝価値の創出」という発想

関 陽 児

1. わが国の巨大災害

「巨大災害」とは、自然の猛威が人間社会に甚大な被害をもたらす災害である。火山の大噴火や巨大津波を伴う大地震など、自然がいかに激しい振る舞いを見せたとしても、人間の居住していない極地や大洋のただ中では災害にはならない。自然の猛威が人間社会に影響を及ぼし損害を与えてはじめて災害となる。したがって自然災害は、人間社会が受ける被害の激しさと空間的分布の大きさの両面からその度合いを測ることができる。被害の激甚度が極めて高く、またその影響範囲が広大あるいはヒトやモノの高度な集積地域を含む場合、巨大災害となる。

固体地球の表層を覆う岩板＝プレートは全部で10数枚ある。個々のプレートはそれぞれ異なる方向に動いているため、プレート同士の境界は離れたり、重なったり、すれ違ったりといった相互作用を行っている。こうした相互作用により、プレート境界では地震・火山・地殻変動を始めとする固体地球の地学現象の大部分が発生する。我が国およびその周辺海域では4枚のプレートが交錯し、活発な地震・火山活動が起こっている。さらに我が国は、大気・海洋に関しては、アジアモンスーン気候のただ中にあって風上に日本海という縁海を抱え、天候変化が激しく強い風雨に見舞われる環境にある。地球上で大気と岩盤の息吹を感じるのに格好の地点に立地しており、秀峰の懐の温泉でくつろいだり、清冽な溪流で遊んだり、四季折々に紅葉や雪景色を愛でたりできるなど自然の趣にあふれた素晴らしい国土である。と同時に、台風や集中豪雨による水害や土砂災害が年中行事のごとく発生し、地球上の陸域で発生する地震や火山の約1割が狭い国土に集中する「自然災害のデパート」ともいえる地域でもある。そこに、高度に社会資本を集積させた1億人の国民が暮らしている。すなわち、我

が国は世界でも稀に見る自然災害リスクの高い国であるといえる。このような国土に、我々の先輩たちは防災のための構造物を営々と造り続けてきた。その集積が国民の安全・安心な暮らしを営むための物理的な礎となっている。我が国の防災対策は明らかな成果を挙げており、例えば同じ規模の地震が発生した際の人命損失に注目した場合、日本ではマグニチュード(M)6規模の地震による人命損失はゼロないしごく少数であることが多いのに対して、耐震性能の低い構造物の多い途上国では多くの死者が発生し、時には数千人規模の犠牲者が出ることもすらある。マグニチュードは地震で放出されるエネルギーの総量を示し、1増すごとにエネルギーは32倍になる。M6級の約30倍のエネルギーを放出するM7級の地震を見ると様相はかなり異なる。我が国のM7級地震による犠牲者数は二十世紀の後半において減少傾向を示すようにもみえたが(図1左)、1995年の阪神淡路大震災による6千名を超える死者・行方不明者の発生で大きな転換点を迎えてしまった。内陸部で発生するM7級の地震では、岩盤が破壊された震源直上の地表では震度7、すなわち重力加速度に匹敵する強度の震動が発生する。そのような強い地震動が発生すると、築年代が古くて耐震性や耐火性が劣る木造建築物の密集地域での大規模火災の発生や、何らかの理由により本来の耐震性能が発揮できない重要構造物の損壊等により、極めて甚大な被害の発生をもたらすことが明らかになった。一方、社会基盤の耐震水準が概ね同等であろうと思われる二十世紀終盤以降のM7級地震を見ると、震源付近の都市の規模と地震による被害とが強く相関していることが分かる(図1右)。

防災のための人工構築物すなわち防災ハードとして、例えば、洪水防止のための高い堤防や強固な水門、津波や高潮の陸地への流入を防ぐための堅固な防潮堤などが挙げられる。また、住居や事業所等の建築物や公共の構造物に、震度6強以上の強い揺れを受けても健全性が損なわれることのない頑健な構造をもたせるようにすることも防災力を高めたハードの構築、すなわち防災ハードの整備といえる。こうした防災ハードは、特に、流域や沿岸に大きな人口を抱える主要河川や海岸線において、あるいは公共性の高い建造物や主要な道路・鉄道等の重要施設において、また人口密集地域の高層化・耐震化・延焼防止帯の確保といった形で整備が進められてきた。20世紀中の数度にわたる関係基準の改定を経て、防災ハードの豪雨や地震に対する耐性は従前より格段に改善され、あるいは改善の途上にある。

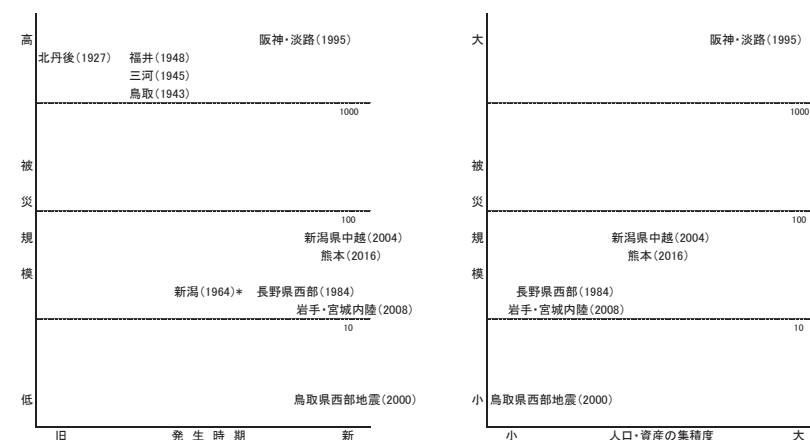


図1 左：二十世紀におけるマグニチュード7級地震の被災規模と発生時期との関係

右：二十世紀終盤以降におけるマグニチュード7級地震の被災規模と人口・資産の集積度との関係

そのように自然災害に強いハードを構築してきたはずの我が国が、1995年の阪神大震災や2011年の東日本大震災をはじめとする巨大災害に相次いで見舞われているのはどうした訳であろうか。そこには、大きく見て三つの理由があると考えられる。

一つは、防災ハードの限界である。整備されたハードは、中小規模の災害に対してはそれを封じ込めることで素晴らしい効果を発揮する。しかし、堤防や建築物は工学的な構造物である以上、その諸元を決定する際に用いた前提条件を超えた自然の猛威に直面した場合には役立たない。そのときハードは損壊し災害の発生を止められない。中小規模の災害を抑止することのできる防災構造物が破壊されるとき、物理的に抑止できなくなった自然の猛威が人々に襲いかかり巨大な自然災害となる。

二つ目は、そもそも最新のハードの整備が完了していない地域が自然の猛威に見舞われるケースである。大都市における木造家屋密集地域、重要河川でありながら堤防強化が遅れている流域の都市部、標高が海面以下でありながら防潮堤や水門の高度な整備が未了の都市部等が強烈な地震や台風襲われた場合、甚大な被害の発生する可能性が高まる。

三番目は、ハードの普及によって中小の自然災害に直面することの少なくなった市民が、災害への対応力を低下させてしまったことである。ハードの整備により、中小規模の自然災害の発生は抑制される。すると、あたかも災害対応力を養う実地訓練の機会を喪失したかのように、住民の災害への対応力すなわち防災のスキルやアイテムそれらの伝承の水準が低下する。それに輪をかけるように「堤防が・砂防ダムが・防潮堤が・水門が自分たちを守ってくれるはず」つまり「もはや自然災害の心配はない」といった慢心により防災意識が低下する。つまり、住民の間に経験不足と意識低下の相乗効果が生まれてしまう。この状態で、ハードの設計想定を超えた自然の揺らぎにより、あるいは経年劣化や設計施工時の瑕疵等により防災構築物がその機能を喪失すると、人々が潜在的にもっていたはずの災害への対応力が十分に発揮されないことにより、災害の被害が大きく拡大して巨大化する。

このように、ある程度のあるいは相当に整備された防災ハードでも抑止できないほどの強大な自然の猛威が発生し、それがヒトやモノの高度に集積した地域を狙い打ちするかのようになり、あるいはそうした地域を含む広大な地域全体に襲いかかると、何千・何万人という方が犠牲になり、数兆～数十兆円以上に達する経済的被害を生じる、通常の災害とは比較になら

ない自然災害すなわち巨大災害が発生する。我が国で発生してきた、また今後発生する可能性のある巨大な自然災害について、被災面積と激甚度との関係から見た場合（図2左）および被害規模と発生確率との関係から見た場合（図2右）をそれぞれ示す。

2. 近い将来に発生が懸念される巨大災害

我が国では過去、巨大災害は繰り返して発生してきた。第二次大戦後に限ってみても、犠牲者数の双壁となってしまったのはいずれも地震、1995年の阪神淡路大震災と2011年の東日本大震災である。台風であれば、二つの大震災が起こるまで戦後最大の犠牲者数を記録していた1959年の伊勢湾台風や、利根川と荒川の二大河川の決壊により埼玉県と首都東京の東部を水没させた1947年のカスリーン台風を巨大災害と呼ぶことに異論はないであろう。そうした巨大災害は、大自然の営みの中で起きた大きな揺らぎが人間社会に及ぶことで発生したものである。いかに強固な防災構築物を設けても防ぐことのできないほどの自然の猛威が、近い将来において我が国を来襲する可能性は極めて高いと考えざるを得ない。

こうした巨大災害を引き起こす可能性が高いと懸念されている代表的な自然の現象として、南海トラフの巨大地震、M7級の首都直下型地震、都市部における主要河川の大規模氾濫等が挙げられる。

(1) 南海トラフ巨大地震

南海トラフの巨大地震とは、北進するフィリピン海プレートが西南日本の載るユーラシアプレートの下に沈みこむ南海トラフ（舟状海盆：水深6000mに達しない海溝状地形）において、蓄積された歪が一気に開放されて発生する海溝型の巨大地震である。日本列島の太平洋岸には他にも千島カムチャツカ海溝・日本海溝・伊豆小笠原海溝・南西諸島海溝などの海溝が分布するが、高度に社会資本が集積された陸域に最も近くかつ長距離にわたり並走する沈み込み帯が南海トラフなので、発生する被害も桁違いに大きくなることが危惧されている。海洋プレートの沈み込みに伴う海溝型の巨大地震は、プレートの沈み込み速度がほぼ一定なので地震の発生エネルギーの蓄積に要する時間もほぼ一定となる。そのため、地震発生の時間

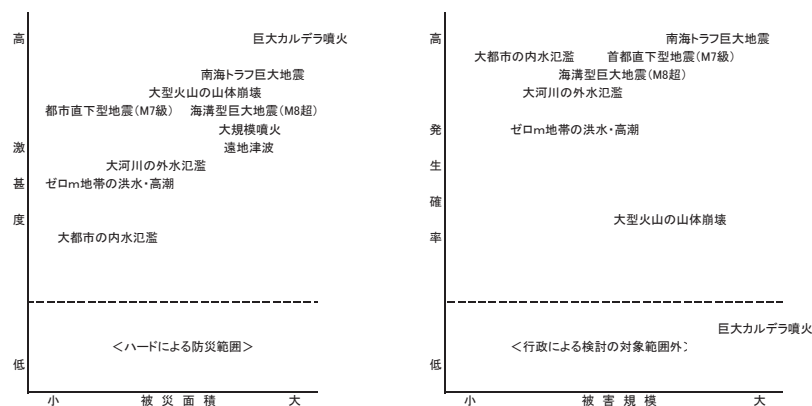


図2 左：被災面積と激甚度との関係からみた巨大災害
右：被害規模と発生確率との関係からみた巨大災害

間隔もほぼ一定すなわち周期性が高いことで知られている。ある場所で、前回に地震が発生してから年数が経過し、ついにその場所の地震の再来周期に到達することを「満期」と称することがある。南海トラフ巨大地震の場合その満期を迎えつつあり、M8以上の巨大地震がいつ起きても不思議のない状況である。南海トラフ巨大地震は、南海トラフ沿いに発生してきた「東海地震」・「東南海地震」・「南海地震」のうちの2つまたは3つが同時にまたは短期間のうちに連動して発生することが多い。瞬時に連動した場合の地震の規模は東北地方太平洋沖地震に匹敵するM9の可能性もあり被災面積が広大になる。また逐次に連動した場合は救援活動で出払って防災体制が手薄になった隣接地域で発災することにより、初期救助が遅滞することなどが心配されている。被害の態様としては震度7すなわち重力加速度並みの強震に見舞われることによる建造物の損壊、沿岸部の津波被害さらには二次的に発生する火災、域内に立地する原子力発電所が稼働している場合には原発に関連した事故の可能性等多岐に及ぶ。

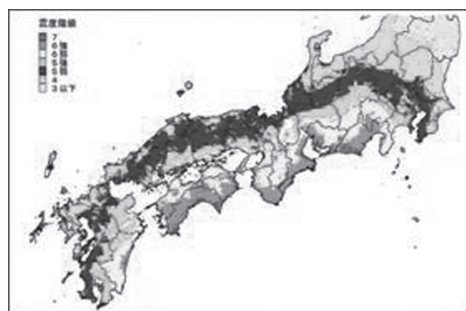


図3 南海トラフ巨大地震で想定される震度分布（気象庁）

生産においても物流においても我が国のまさに中軸である東海から近畿にかけての太平洋岸が巨大地震に見舞われた場合の被害は凄まじく、政府の見積もりで損害は200兆円以上（内閣府）とされる。この被害予想には原子力発電所で発生しうることによる損害は見込まれていない。また、土木学会の検討委員会は、震災関連の間接的被害も加えた被害見積もりとして1000兆円規模（土木学会）という空前の被害を予想している。

(2) M7級の首都直下地震

震源上方の地上で重力加速度並みの震度7が発生する可能性が高いM7級地震は、我が国および周辺海域では平均して年間に1回発生している。この規模の地震が大都市の直下で発生したことにより巨大災害となったのが1995年の阪神淡路大震災である。したがって、1995阪神と同規模のM7級の地震が首都の直下で発生した場合、巨大災害となる可能性が高い。東京の地下の岩板は北米プレートであるが、その下には南からフィリピン海プレートが沈みこんでおり、さらにその深部には東から太平洋プレートがより急角度で沈み込んでいる。このように、3枚もののプレートが相互作用する地球上で最も複雑ともいえる地下構造の上に立地するのが、我が国の首都東京である。さらに、関東平野の地下には地質学的には新しくて軟らかい地層が深部の岩盤を数kmもの厚さで覆って堆積しているために、地下の岩盤の構造が分かりにくい。岩盤中の断層は繰り返して地震を起こしながら変位（位置の変化）を蓄積させるため、岩盤の表面形態が分かると地震の震源となる断層の位置や規模を推定しやすい。首都の地下の岩盤は厚い堆積物に隠されているので、首都直下の地震の引き金になりそうな断層を推定する作業は、岩盤が露出している地域に比べると格段に難しい。岩盤の直接観察が不可能なので、地上から物理的な信号を発信してその反射を捉えて地下構造を推定する手法などで、首都の地下の地震の引き金になりそうな断層を推定しているが、地下の構造がすっかり分かったわけで

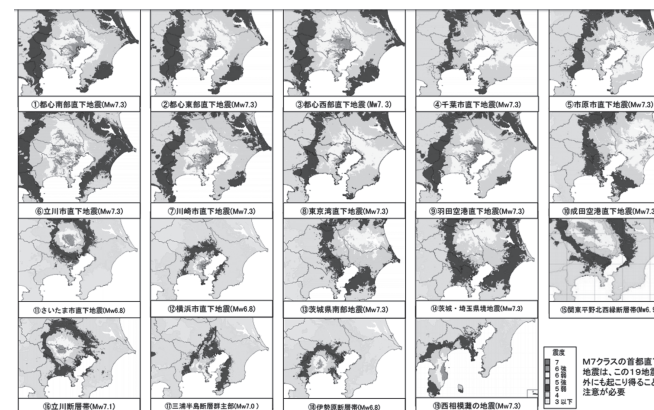


図4 複数の震源断層ごとに想定した首都直下型地震の震度分布（気象庁）

(3) 都市部における主要河川の大規模氾濫

排水には各地から応援出動した多数の消防ポンプ車を使用され、ほぼ10日を費やして排水作業を完了した。

都心を流下する荒川の流域である秩父山地において、降り始めからの累積降水量が500 mmに達する豪雨が発生した場合、2015年の鬼怒川洪水と同等または以上に深刻な事態が発生する危険が増大する。埼玉県と東京都の東部で荒川が洪水氾濫した場合の被害想定は、河川を管理する国土交通省が公表しているハザードマップで詳細を知ることができる（国交省）。それによれば、最大規模の洪水被害では最大浸水深は10m以上で最大浸水面積は500 km²を超え、浸水の継続期間は多くの地域で数日以上、特に江東ゼロメートル地帯を含む河口部周辺では2週間以上にわたって浸水が続くと予想されている。

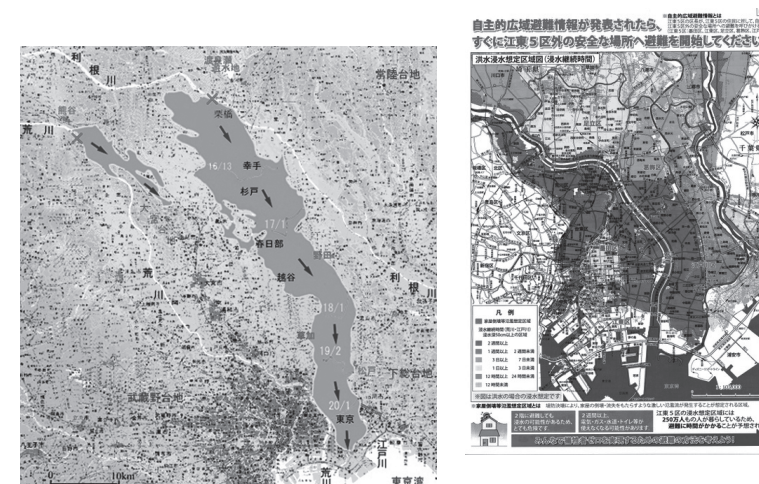


図5 左：1947年カスリーン台風での破堤地点と洪水の進展（防災科学技術研究所HP）
右：荒川洪水で予想される浸水域と浸水継続期間（江東5区）

3. 巨大災害の特徴

こうした巨大災害は、通常の自然災害と比べてその被害規模が巨大であることは当然として、注目すべきいくつかの特徴をもつ。発災時およびそ

の直後に直面する特徴だけみても「広域化」「複合化」「逐次の発災」「情報・通信環境の悪化」「救援活動の遅延・不足」「指揮命令機能の低下」「未想定・未経験事象の発生」など多岐にわたる。それらの中には互いに関係しあう特徴も含まれるが、個別に整理を試みる。

(1) 被災面積の広域化

我が国における過去の巨大災害を振り返るとき、被害面積が最も大きくなる態様は、2011年東日本大震災で現実となった海溝型巨大地震に伴う津波災害である。わが国で巨大災害をもたらす海溝型巨大地震の多くは、太平洋プレートが北米プレートの下に沈み込む日本海溝およびフィリピン海プレートがユーラシアプレートの下に沈み込む南海トラフ（舟状海盆）において発生する（図6）。それぞれの海溝には、過去に地震を起こしてきた特定の区画のような領域（セグメント）が存在し、それぞれの領域ごとに地震発生の一連の繰り返しの周期すなわち再来周期が認められている。直近の過去の大地震から経過した年数が再来周期に近づけばどの地域であれ再び巨大地震が繰り返され、それによって広大な面積が被災する巨大災害が発生する可能性が高い。

【海溝沿いの主な地震の今後30年以内の発生確率】

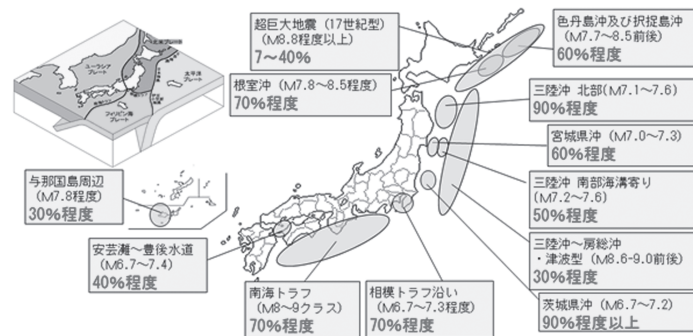


図6 今後30年以内の海溝型地震の発生確率（国土交通省HP）

また、火山の巨大噴火における噴煙の降灰範囲なども相当な広範囲で災害をもたらす可能性がある。富士山の1707年宝永噴火で放出された火山灰の総量は1 km³に達し、都心でも数cmの降灰が記録されている。火山

の噴火には、細かく破碎された溶岩である火山灰が高空に上昇してから風下に流されつつ降下する降灰、高温の火山灰と火山ガスが山腹を高速で流下する火砕流、流動性をもつ高温の溶岩が比較的ゆっくりと山腹を流下する溶岩流、いったん山腹に降り積もった火山灰が降水と混じって沢沿いに断続的に流下する火山泥流など様々な態様がある。硬い溶岩ともろい火山灰が交互に積もった成層火山が噴火や地震を契機として力学的安定性を失うと、その山体が短時間のうちに大規模に崩壊する「山体崩壊」を起こす場合がある。明治以降を見ても、磐梯山の1888年噴火では、山体崩壊により北麓の松原村が埋没して村民多数が犠牲になった。富士山の噴火で最大の人的被害が懸念されるのが実は山体崩壊であり、広範囲に及ぶ崩壊土石による生き埋めだけでなく、もし岩屑流が駿河湾に突入すると沿岸の広域で津波災害が発生する可能性が高まる。さらに地質学的な時間を対象にすれば、日本列島では数千年に一度の頻度で宝永噴火の数十倍以上の火山碎屑物を噴出する巨大カルデラ噴火が発生する。万一、そのような災害が発生した場合、巨大海溝型地震の数倍もの範囲が被災する超巨大な自然災害となる。

(2) 災害の複合化

巨大災害では、災害が単一の態様ですむことはむしろ稀であり、多くの場合は複数の種類の災害が連鎖的にあるいは同時平行に発生する。例えば、M8を超える海溝型巨大地震が発生すると、震度7に達する強烈な震動による構造物の損壊に始まり、引き続き津波の規模によっては重大な浸水・流出被害が発生し、その規模が大きい場合は漂流する船舶や瓦礫等によって破壊された貯油タンクから漏出した燃料に引火して大規模な火災が発生するといった、連鎖的な災害の複合化が起こる。

また、内陸の直下型地震では、強震により損壊した古い木造家屋から火災が発生し、瓦礫に邪魔されてあるいは消防水理の喪失により消火活動が不十分な状況で火災が拡大し、深刻な被害の拡大につながることもある。こうした木造家屋密集地域（「木密地域」）における大規模火災では、古くは1923年の関東大震災において震源から離れた東京の都心部で火災旋風が発生して数万人に及ぶ焼死者を出し、また1995年阪神淡路大震災で倒壊家屋に閉じ込められた住民多数が消火活動の遅滞する中で焼死するなど過酷な経験を強いられてきた。木密地域における大規模火災は、いずれに

来する可能性の高い首都直下型地震においてもなお克服すべき重要な課題とされている。対策が進められているとはいえ、大都市の一定範囲を大規模に再開発する事業となるため、利害関係者との調整や用地の確保等に長時間を要し進展は遅い。

山地では、強震で発生した斜面崩壊によって溪流が堰き止められて天然ダムが形成され、それが後発の地震や増加する貯水量を支えきれなくなった時に決壊して洪水災害を引き起こすことがある。こうした大地震に伴う洪水災害は、天然ダムに限らない。人工の溜池の堤体が崩壊して貯水が一気に流下し下流の村落に壊滅的な損害を与えた事例は、東日本大震災でも報告されている。

火山の山体崩壊とそれに起因する津波の多重災害として、1792年に発生した長崎県雲仙眉山の山体崩壊とそれに伴う対岸の熊本県での津波災害の前例がある。「島原大変、肥後迷惑」と呼ばれたこの複合災害では双方合わせての1万人以上が犠牲となり、我が国の火山災害史上で最多の記録となっている。

(3) 逐次の発災

前項で述べた災害の複合化は連鎖的にあるいは同時平行的に発生する一連の災害であるが、それぞれに独立性をもつ事象が次々と発生していく点で逐次の発災ともいえるべき巨大災害に特有の態様がある。

例えば、地震災害において、大規模な本震に引き続いて何度もの余震が発生することは普通である。本震の規模が大きいほど余震の規模も大きくなるが、中には2016年熊本地震のように震度7の強烈な震動が中一日をはさんで二回発生するといったケースもある。熊本地震では、第一撃で大破した家屋に戻って片付けをしていた少なくない住民が二回目の地震による完全倒壊で命を落としている。また、海溝型地震の中には、初発の大地震の発生から数日ないし数年の間隔をはさんで隣接の震源域において2度目の大地震が発生する事例が少なくない。

巨大津波の場合は、押しと引きを繰り返すために必ず数回以上の津波が押し寄せる。海岸線や海底地形によっては、必ずしも第一波が最大波高とはならず、何発目かに最大波高が来襲する地域もある。初発で逃げ延びた人が街に戻ってきたところを二発目以降の津波に襲われて犠牲になる事例が後を絶たない。

大規模な火山噴火では、多様な火山噴火の態様が逐次的に展開することがある。1783年の浅間山の天明噴火は、噴出物総量が0.5 km³に達する大規模な噴火であったが、始めに噴煙柱からの降灰が、ついで堆積した火山灰が流下する火山泥流や火砕流が、さらにそれらが堰き止めた天然ダムの崩壊による洪水災害が、最後に火口からの溶岩流の流出により一連の噴火活動が収束した。

頻度が少なくその因果関係にも不明な点が残るものの、海溝型の巨大地震に引き続く休止火山の噴火再開は、巨大な被害が発生する可能性が高い逐次タイプの災害として警戒が必要である。例えば、富士山の直近の噴火である1707年の宝永噴火では、それに先立つ49日前に南海トラフでのM9クラスの巨大地震が発生していた。

(4) 情報・通信環境の悪化

巨大地震による震動や津波の来襲などによって電波中継基地が損壊すると、個人や事業所の通信機器が無傷でも通信機能が停止することがある。通信は、救助要請や被害状況報告に欠かせない。現場の対応拠点である自治体の通信機能の低下・喪失は、後方に構える上位の意思決定機関への適宜の情報提供を困難にするために、特に広域災害において救助・救難活動の適切でタイムリーな実施を難しくする。

(5) 救援活動の遅延と不足

初発の災害が過ぎ去っても複合災害や逐次発生する災害に阻まれて、あるいは航空機による救援に制約がある場合の陸上からの接近において瓦礫や崩壊土砂等で閉塞したルートの啓開のために、あるいは通信機能の障害のために被災地域の状況が不明で適切な救助計画を作ることが困難であるがために等、巨大災害に際しては迅速な救援活動を阻害するさまざまな要因が存在する。救援を要する被災者数と被災面積の大きさに対して、救援部隊の規模が過小であると、救援の活動度の低下も懸念される。こうした状況では、負傷者や病者や高齢者などの被災者や災害弱者の収容と移送も遅れや停滞が生じかねない。

(6) 指揮命令機能の低下

地域にあっては、都道府県や市町村等の自治体の災害対策本部が機能す

ることで、発災後の必要となる様々な活動がコントロールされる。したがって、本部の置かれるはずの庁舎等が被災すると、現地における災害対応活動は大きな制約を受けることになる。2015年の関東・東北豪雨に際して、被災自治体の常総市の災害対策本部は浸水想定地域に建てられた庁舎の1階に置かれていたために真っ先に機能を喪失してしまい、住民の避難に支障をきたした。

首都直下型地震において内閣府・消防庁・自衛隊等の政府中枢の機能が低下した場合、自衛隊の災害出動等の国家としての判断や指令に混乱が生じかねず、そうなれば救援活動に重大な支障となる。首都直下型地震が恐れられる理由の一つが、国家としての指揮命令機能の麻痺である。そのような事態を回避するために、中央省庁が被災した場合に備えたバックアップ基地が立川に用意されているが、「本番」が来た場合にどれだけ上首尾に機能するかはその時が来るまで分からない。

(7) 未想定・未経験事象の発生

巨大災害においては、事前の防災計画やマニュアルでの想定を超えた事象や全く想定していなかった事象が発生する可能性が高い。工学的構造物については、そもそも設計諸元を上回るほどの自然の猛威に見舞われることで、それが目的とする防災機能を果たせなくなる事態が生じるのが巨大災害である。地震の加速度や周波数スペクトル、津波の波高や遡上高、降水強度や累積降水量、最大風速や最大瞬間風速、そうしたさまざまな自然の揺らぎの指標のいずれかが、あるいはそれらの組合せが、想定していなかったあるいは過去に経験していなかったような猛烈な値を示す。個人の生活感覚から言えば「過去に経験したことのないような」大雨・大雪・強風・水位・水量・流速・波高・遡上高・地震動・液状化・土砂崩れ・土石流・噴火等が発生する状況が巨大災害の現場ということになる。

「未経験・未想定事象の発生」するのが巨大災害であるとする、防災行政の一環として住民に周知・配布されるさまざまなハザードマップについても、注意すべき問題の存在に気付く。ハザードマップには、津波や洪水の際の浸水域や浸水深、地震の場合の予想震度や火災の発生範囲、火山噴火の場合の降下火山灰の厚さや溶岩流の到達範囲等、さまざまな指標の分布が地図上に示されている。しかし、それらは全て、自然の揺らぎの強度についての一定の水準や風向き・温度・湿度等の気象条件等の設定をした

場合の予想される事象である。したがって、想定する強度や条件が異なれば、予想される事象の程度や発生範囲は違ってくる。もしも実際に起きた自然現象が想定した水準よりも強い場合には、そのハザードマップは致命的な問題を抱えてしまう。津波が・洪水が、来ないはずの所に水が来てしまう。東日本大震災に際して、ハザードマップを熟知していたがゆえに「この場所には絶対に水は来ない」と信じつつ波に飲まれた被災者や防災関係者が少なからずおられたと思われる。そうした無念の犠牲者に想いをさせつつ、巨大災害に際しては、あらゆる想定を疑ってかかる必要があることを肝に銘じなければならない。

前例がないため、あまり周知されていない態様の災害が考えられる。ゼロメートル地帯を伴う三大都市圏で直下型地震が起きた場合、海水面以下の土地の周りを取り囲む護岸壁が損壊すると、大規模な水害の発生が懸念される。この種の「ゼロメートル地帯の地震洪水」の重大な問題は、通常の水害と異なり流入する水は無尽蔵の海水と連なっているため、浸水域の水面が海面と同じ水準になるまで水の流入が止められない可能性が高いことである。また、通常の流域の豪雨によって発生する洪水は、規模や時期がある程度は予想できるので避難の時間も一定は確保できるのに対して、大地震という予測不可能な突発的事象に伴って発生する地震洪水の場合、避難のための時間がたいへん限られていることも重大な問題である。高齢者・病者・幼児などの災害弱者にとって極めて危険な災害となる。浸水域が短時間に形成された場合、地下街や地下鉄などの地下施設への水の流入を抑止することは困難と考えられる。例えば東京の場合、ゼロメートル地帯にいくつもの開口部をもつ地下鉄路線は、ほぼ全ての地下鉄路線や大規模な地下街と水理的に連絡すなわち連通しているので、時間の経過とともに都内の地下街が大規模に水没する可能性が危惧される。

巨大災害の防災を考える場合、避けて通れないのが被災域内の原子力発電所である。東日本大震災での極めて重大な放射能放出事故を受け、一時は国内の原発の全てが運転を休止していた。その後の安全審査を経て、安全が確認されたとされる原発については再稼動がなされている。基本に忠実に考えるとすれば、巨大災害においては想定ができないような猛烈な自然現象が発生する可能性が高い以上、原発の再稼動に際しては、工学的な想定を上回る巨大災害に遭遇して重大な事故が発生した場合に備えて、適切な避難計画を策定することが最低限必要な対応であろう。重大事故とは、

事故発生から数時間以内に、原発から数10km 圏内の住民の全員避難を完了しなければならないような事故である。家屋の多くが倒壊し閉じ込まれて身動きの取れない住民もいるかもしれない。鉄道や高速道路は麻痺し、短時間での大勢の住民の避難は困難を極めるかもしれない。通信機能や指揮命令機能の低下により大規模な救援部隊の迅速な到着は期待できそうにない。こうした状況で、逐次の発災の危険もある中で、必要とされる住民避難を確実に実施することができるのか、原子力発電所の再稼動にあたっては、その点の合理的な検討が必要である。

4. 巨大災害に対する防災の考え方

巨大災害の特徴を踏まえてその被害を抑える対策を考えると、通常の規模の自然災害を念頭にした防災とは大きく異なる点があることに気付く。

第一は、通常規模の自然災害に対する防災は「命も財産も守る」考え方が基本となる一方、巨大災害に対する防災は「少なくとも命だけは守る」に後退することもありうるということである。

地震に対する生存性の高い構造（耐震・免震・制震等）、津波や高潮に対する防潮堤・防波堤、河川の外水氾濫に対する堤防や水門、火山噴火に対するシェルターなど、地域を守るあるいは個別の施設・家屋を守る様々な防災ハードが整備されている。しかし、これらのハードは工学的に設計・製造されたものであって、一定水準の外力を想定した諸元を有している。したがって、諸元を決定する際に想定した水準を超える加速度・波高・熱・圧力等に見舞われた場合は、防災性能が著しく損なわれる、つまり壊れてしまう。過去に何度も悲惨な津波被害に遭ってきた三陸沿岸の町の人々は、世界的規模の長さ高さ誇る巨大な津波堤防を構築したが、残念ながらその多くは東日本大震災に際して10mを優に超える波高の津波に襲われて破壊された。しかし、破壊されながらも市街地へ侵入する津波の波高を低下させかつ到来時間を遅らせることで、巨大堤防がなければ失われていたであろう多くの命を救った可能性が高い。巨大堤防は街を、住民の財産を守ることはできなかったものの、少なくとも一定の人々の命を救ったと考えられる。復興に際して、それぞれの街の人々は、膨大なコストをかけてより高い堤防を構築するのか、高さは従前並としつつ街の造り

や避難の工夫でいつかは来るであろう次の大津波に備えるのか等、巨大災害にどう向き合うかの問題に直面した。コスト面を考えても、例えば人口5000人の町に1000億円の防波堤を造るかどうかは、一戸に1億円ずつ渡して従前より安全な立地に街ごと移転することと比較検討すべき課題となる。巨大災害に対しては、「命も財産も守る」考え方は、必要となる防災ハードの規模や強度が過大になることから、コスト的にも成り立ちにくいものとなる。

第二は、発災後の一定期間は自助・共助でしのぐしかないということである。巨大災害が発災してから一定期間は、通信が途絶して現況報告や救援要請もできず、飲料水や食料を始めとして、医薬品・衣類・燃料等の救援物資の到着がいつになるかも分からない状況、つまり行政にも自衛隊にもボランティアにも頼ることのできない状況に置かれる可能性が高い。こうした状況では、災害から生き延びた人々が、公的な救助・救援が到来するまでの間、仲間同士の自助と共助で当面の避難生活を続けなければならない。

第三は、巨大災害に対するレジリエンス（強靱性）は、防災ハードの整備や強度のみで決まるものではないということである。巨大災害で大きな被害を受けながらも、可能な限り人命損失を減らし、外部からの救援部隊が到着するまでの間の自助・共助を主体とする被災生活の水準を確保することは、防災を目的とした構造物の諸元や行政関係施設・重要施設等の機能や立地といったハード面と、街の実情に合わせたきめ細かい避難計画や発災時の災害弱者への支援方法などのソフト面の双方の構成次第で大きく変わりうるということである。利便性や経済性だけに注目した街づくりと、万一の巨大災害に見舞われた際の重要施設の生存性や自助や共助がスムーズに行えるように配慮した街づくりでは、巨大災害に見舞われた際の街のレジリエンスに決定的な差が生じる可能性が大きい。

5. 地学リテラシーを巨大災害の損失の縮減に役立てる

巨大災害に対する防災の考え方を踏まえると、地域の住民として巨大災害に立ち向かうためにどのような対応ができるのかが見えてくる。

巨大災害に際しては、発災直後の避難行動に始まり、外部との交流・連

絡を絶たれて孤立した被災地域の中で、住民同士が自助・共助で支えあいつつ救助・救援を待つ局面が予想される。このような孤立して状態では、専門家や技術者の助言も期待できない。その中で刻々と変化する自然の事象や災害の様相に的確に対応するためには、自然や災害に関する基本的な知識に基づいて的確な判断を下していくことが必要となる。このときに、住民の一人ひとりの地学リテラシー、つまり地震・火山・地形・水理・水文・気象・海象・天文等についての基本的な知識が大いに役立つはずである。

巨大災害を生き延びて、街の復興を目指す局面では、重要施設や居住地域の立地をどうすべきかが重要な検討事項になるであろう。その場合、やはり立地による経済性の優劣だけでなく様々な規模や態様の自然災害が発生した場合の機能の維持や二次災害の防止についても適切な検討が必要となる。ここでも、地学のリテラシーが必要となる。工学的対応をする場合に必ず設けることになる設計諸元の根拠とする自然の猛威の水準をどのように置くか、これは工学者だけでなく行政や住民も関与して結論を導くべき課題である。防災施設のモノ造りを担当する工学者は、自然の猛威に対抗するために必要な性能諸元を達成しつつ、同時に経済的な合理性を保持しなければならない立場にある。重要施設の立地や防災関連の諸元の検討を工学者とステークホルダーとが協働して実施し、必要に応じて地学リテラシーを踏まえて工学者を支援することで、設計に際して重要不可欠な自然災害に対する的確な検討と判断が可能になると期待される。津波対策の防波堤の再構築などでのこうした対応が話題にのぼることがあるが、原子力発電所のような重要施設についても、万一の重大事故に際しては多数の住民が巻き込まれる可能性が高い以上、ステークホルダーとしての住民も含めて地学のリテラシーを活用しながら関係者の間で合意できる解答を見つけていくというプロセスが、最も合理性の高い対応方法であると考えられる。

上の文脈において、東日本大震災で被災した二つの原子力発電所の辿った経過の比較から大きな教訓が得られる。二つの原発とは、津波で冷温停止機能を喪失したことにより炉心の溶融と核分裂生成物の環境への放出という重大事故を起こしてしまった東京電力福島第一原子力発電所（福島県双葉郡大熊町）と、地震と津波による深刻な被害を受けることなく地域住民の避難所として活躍した東北電力女川原子力発電所（宮城県牡鹿郡女川町・石巻市）である。

原子力発電所は、ウランの核分裂反応で生じる熱で水を加熱し、発生した過熱水蒸気の圧力でタービンを回すことで連結した発電機から電力を得る。熱源が核分裂反応であること以外は、基本的には通常の石油火力や石炭火力等の火力発電と同様のプロセスであり、発電過程で使用した水蒸気の冷却が必要となる。ウランの核分裂で発生したエネルギーのうち電力に変換されるのは1/3程度であり、残りの約2/3は水蒸気の冷却で海水を温めることとなる。巨大な発電容量をもつ原子力発電所では、その規模に応じた大きな冷却能力が必要となる。そのため、我が国の原子力発電所は必ず冷却用海水の取水が容易な沿海に立地する。冷却用の海水を汲み上げるためには、発電施設の設置面の海拔高度は低いほど有利である。一方で、地震等による津波の来襲を考えると、それによる施設の損壊を防ぐために一定の海拔高度が必要である。この二つの条件の折り合いをつけた高度が、実際の原子力発電所の設置高度となる。

福島第一原発の敷地の海拔高度は10mであった。もともとの地盤高度35mから25m掘削して低い敷地地盤を造成した。東日本大震災に際しては波高15mの津波が来襲し、地盤高度10mの原発敷地内は全て水没した。その結果、水密構造ではない地下に設置されていた非常用発電機は水没して機能を喪失した。津波に先立って、地震による強震で送電塔が倒壊して外部からの送電系統が失われていたこととあわせて、福島第一原子力発電所は全交流電源を喪失した。さらに、救援に駆けつけた電源車との接続もできないまま最後の電源であるバッテリー電源も枯渇し、炉心の冷却水の循環が止まり冷温停止を維持できなくなった。その結果、炉内の核分裂生成物から発生する多量の崩壊熱により炉心の温度が上昇して、放射性物質の封じ込め機能に深刻なダメージが生じ、大量の放射性物質の周辺環境への漏出に至った（福島原発事故独立検証委員会、2012）。

女川原発が送電を開始したのは1983年であり、福島第一原発の開始から12年後である。日本海溝における巨大海溝型地震による津波のリスクを抱えている点で福島第一原発と同様であるが、女川原発はその建設に際して、地震や津波に対する耐性を重視した。冷却水の取水コストが不利になるにも関わらず敷地の標高を福島第一原発よりも5m近く高い14.8mとした。その結果、東日本大震災では福島第一にわずかに及ばない波高13mの津波が来襲したが、地震による約1mの地盤の沈降があったにもかかわらず原発敷地への浸水を辛くも免れた。外部電源系統と非常用発電装置も

一部が生き残ったため、冷温停止機能を維持することができた。地震時に原発施設が受けた強震の加速度は0.5G程度で福島第一原発と同程度であった。繰り返し襲い掛かる津波が到達しない高度に立地する女川原発は、震災直後に孤立した地域住民に避難拠点を提供した（石井、2018）。

女川原発が、福島第一原発と同程度の津波に襲われたにもかかわらず冷温停止状態を維持して重大な放射性物質の放出事故に至らなかったのは、地学の知見を重視したからに他ならない。東北地方の太平洋岸は、日本海溝で発生する海溝型地震による津波が周期的に来襲するが、時として際立って高い波高をもつ津波になることがある。そうした特異的に高い波高をもつ津波として、869年の貞観地震に伴う津波（菅原・箕浦、2013）が知られていた。女川原発を建設した東北電力は、その建設に先立つ立地仕様の検討段階でいち早く貞観地震津波に注目して独自調査も含む詳細な検討を行い、その結果に基づいて敷地標高を決定した。一方の福島第一原発は、その開設時期が古いために建設段階で巨大地震津波への理解が不十分だったので敷地標高が低くとられたのはやむを得ないと思われる。しかし、2011年の被災に先立つ津波についての検討過程では、貞観地震級の巨大地震津波に対する不備を指摘されていた。にもかかわらず対応を先送りしていたところ、深刻な津波被害を受けることとなった。この間の貞観地震津波についての東京電力の理解の仕方や対応の是非は現在も係争中である。客観的に見ると、貞観地震津波級の千年に一回あるかどうかと言われているような自然災害に対して、そのリスク対策への投資を行うかどうかは「依拠する科学知に不定性を有するリスク」（平野、2014）に対する企業行動の選択範囲に含まれるということになろう。しかし、結果として、貞観地震津波の危険性を重視してその詳細を検討し立地仕様に反映させた東北電力が重大事故を起こさずにすみ、危険性を指摘されていたにも関わらず対策を先送りしていた東京電力が重大事故を起こした。それにより広大な地域が長時間にわたって放出された放射性核種により深刻な放射能汚染を被ることになった。メルtdownにより重大な損傷を受けた原子炉の廃炉作業、放出された核種の除染作業、被災者に対する損害賠償、汚染物質の処理作業等、事故による損害は計り知れない。監督官庁である経済産業省の試算で22兆円、民間シンクタンクからは80兆円という驚くべき試算額も発表されている（日本経済研究センター、2019）。

筆者が主張したい点はここである。原子力発電所のようないったん重大

事故を起こすと途方もない損失を生じる重要施設については、自然災害リスクの評価に地学の知見を最大限活用すべきである。福島第一原発が重大事故を起こしていなければ、何十兆円もの金を使わずに済み、その余力は復興への原資にも回ったであろう。また、原発のような巨大施設だけでなく、個人生活の範囲で見ても、地学リテラシーを活用できれば様々な自然災害に対する有効な対策を講じたり命を失わずにすむ機会が格段に増える。そのことは、自治体や一般企業にも全て当てはまる。自然災害、特に防災ハードでカバーしきれない巨大災害においては、あらゆる社会階層において、地学リテラシーの活用で発生損害を低減させることが期待できる。損害額を圧縮できれば社会の受けるダメージは少ないし、事後の復興の負担も軽くてすむ。「損失の低減＝価値の創出」という発想をもってよいのではないだろうか。

文献

- 土木学会・レジリエンス確保に関する技術検討委員会（2018）「国難」をもたらす巨大災害対策についての技術検討報告書. 82p
- 福島原発事故独立検証委員会（2012）福島原発事故独立検証委員会 調査・検証報告書.
- 平野 琢（2014）東日本大震災における電力会社のリスク対応評価の再検討―“歴史津波”に対するリスク対応の事例分析を通じて―. 日本経営倫理学会誌、21、71－85
- 石井孝明（2018）大震災に耐えた女川原子力発電所の今 ―安全確保に終わりのない取り組み. 日本エネルギー会議HP
- 日本経済研究センター（2019）事故処理費用、40年間に35－80兆円に. 日本経済研究センター HP
- 菅原大助・箕浦幸治（2013）2011年東北地方太平洋沖地震津波と869年貞観地震津波との浸水域と堆積物. 地質学雑誌、119、補遺、1－17.

要旨

未曾有の大災害となった東北日本大震災は、死者・行方不明者が二万人を超える未曾有の大惨事であるとともに、原発事故関連を除いても20兆円に達する莫

大な経済的損失をもたらした。1995年発生の阪神淡路大震災の損害額が約10兆円、発生が確実視される南海トラフ地震での予想損害額は数100兆円、危惧されている首都直下型地震での予想は100兆円といわれている。防災対策のハードの整備が進む今日、堤防・水門や強固な耐震構造物により少々の自然のゆらぎについては、大きな災害にならずにすむことも増えた。しかし、自然の猛威が一定の水準を超えると、防災ハードは損壊して人々は巨大災害のただ中へ放り出される。地学とは、地震・火山・地形・水理・水文・気象・海象・天文等についての知識の体系である。したがって、巨大災害を想定した避難計画の策定・発災時の避難行動・被災直後の避難生活等において、地学のリテラシーは人命の確保やより安全な生活の維持に貢献すると考えられる。その後の復興におけるグランドデザイン創りにおいても、住民が地学のリテラシーを発揮すれば、より合理的な計画の策定が期待される。さらには、原子力発電所のような重要施設においても、その管理者や意思決定に関与する層が地学のリテラシーを活用できれば、重大事故の発生を抑止する方向に貢献することが期待できる。要すれば、社会の様々な分野の人々が地学のリテラシーを活用することにより、巨大災害における損失を低減させることが可能となり、そのことは地学のリテラシーが価値を創出したと捉えてもよいのではなかろうか。

Damage reduction from mega-scale disaster through geoscience literacy: Equivalence to value production for after stage.

Yoji SEKI

Abstract: Japan has developed thicker disaster prevention facilities throughout country. Due to strong banks, floodgates, earthquake-resistant buildings and so on, many people seldom face severe disaster if natural oscillation is small. But once artificial facilities may be broken by large-scale natural oscillation, people have to be subjected to severe natural disaster. Natural disasters with a large number of loss of lives are called Mega-scale disasters. Before and after mega-scale natural disasters more people can survive and take safer situation if they utilize geoscience literacy, because it covers earthquakes, volcanic eruptions, tectonic movements, hydrology, meteorology or all aspects of our environment. When people can take damage reduction from mega-scale disaster through geoscience literacy, it means being equivalent to value production for after stage.