

近年の地震災害態様に学ぶ複合連鎖化

北海道大学 広域複合災害研究センター 岡田 成幸

The Complex Chaining learned from Recent Earthquake Disasters
Shigeyuki Okada
Hokkaido University, Center for Natural Hazards Research

Abstract

In recent years, disasters have been remarkably widening the damage area, expanding the damage scale, and prolonging the time of damage recovery. One of the causes may be the frequent occurrence of complex disasters in which different types of hazards are combined and linked. The term of “complex disaster” itself is not bland-new, but its origin is the consequence of changes in the natural geo-environment, such as global warming, as well as social structural changes due to population decline and aging population. Despite, there are surprisingly few warnings from disaster science points of view. This paper focuses on complex disasters, clarifies their causal structure, analyzes future risks, and proposes the direction of countermeasures.

1. はじめに

大学に奉職し 39 年間の教育研究の最終講義(2019 年 2 月 15 日、北海道大学工学部)において「近未来の不可避的潮流」と題して工学と防災の行く末を論じた。近年、諸方面で指摘されている避け得ない社会構造変化は災害の態様すらも決定づけていること、そしてその処方箋として、一方で危惧される制御不可能とまで言われる科学技術の発展(シンギュラリティの発現[カーツワイル(2007)¹])並びに監視社会の到来(スーパー・パナプティコン[フーコー(1977)²])を逆手にとる減災戦略(マスに対する既往のリスク評価を個人に徹底した災害リスクのリアルタイム評価にシフトさせ、その情報を個人向けウェアラブルディスプレイや周辺ディスプレイへの表示で行動意思を誘導する手法)の可能性を論じた。呼応するかのごとく近年発生する自然災害(2018 年北海道胆振東部地震、2019 年台風 15・19 号)は、それに加えて地球温暖化等の地球環境変化を敏感に反映し、社会構造の否定的潮流(地域消滅)に拍車をかけているかのごとく思われる。筆者は 2019 年 4 月より、それまで勤め上げてきた工学部から広域複合災害研究センターに所属を変え、複合災害を題材に現象を眺めてきている。これまでは災害素因(Vulnerability)の複合連鎖を主に、研究のシナリオ化を進めてきたが、本稿では地球環境変化の激烈さ故、今や常態化しつつある災害誘因(Hazard)の複合化(地震インパクトに暴風雪等の気象災害が同時併発または後続する災害現象等々)も研究シナリオに組み込む視点の重要性を指摘する。

2. 災害の複合連鎖化

「複合災害」をキーワードにして、J-STAGE で日本の論文を検索してみると 1971 年に井沢竜暢(損害保険料率算定会)³ が日本建築学会の建築雑誌に投稿した「巨大都市の環境と都市防災(主集 環境問題”そのひろがりを追って”(第 1 集))」に登場する。しかし文意からは、都市防災は多種多様な要因をシステムとしてとらえる必要性ありと唱えた上で、“大都市については十分な研究成果が得られてはいない複合災害について虚心に知恵を持ち寄ることが大切”と言うのみで、多種多様な施設が絡む希有な災害とは言いつつも「複合災害」を常用語として使っており、特別に複合性を意識して議論する意図はみられない。その後、論文等で散見される用語であるが、近年、多種の災害規模が大型化しかつ常態化することで、複合災害はもはや発生確率

の低い LPHC(Low-Probability & High-Consequence)ではなく、発生頻度の高い HPHC(High-Probability & High-Consequence)なる厄介な災害現象に成長しつつあると言えよう。

複合災害への取り組みとして、たとえば陶野(1992)⁴ は次のように定義している。“(自然災害)の規模が大きくなるに従って、一つの災害から他の災害へ波及、あるいは一つの災害が他の災害の誘因となって拡大していくため、個別の取り扱いでは不十分になっていく。このような自然災害は総合的に考えていく視点が必要となり、「複合災害」という言葉を用いて考えてみた。” すなわち陶野は複合災害を、災害の高次被害への連鎖あるいは多種被害派生(異種被害への変容)という素因レベルの視点で捉えている。

筆者は、あえて災害の複合連鎖についての定義から出発し、他者との視点の違いを明らかにし、その問題点の深刻さに触れてみたい。

前著⁵でリスクの定義式を以下に示した。

$$\text{Risk} = \text{Probability} \times \text{Damage Impact} \quad (1)$$

$$\text{Damage Impact} = \text{Hazard} \times \sum_{\text{Population}} \text{Vulnerability} \quad (2)$$

式(2)が災害の程度の定義式であり、さらに単純化表示をすると以下となる。

$$\text{災害(Damage)} = \text{誘因(Hazard)} \times \text{素因(Vulnerability)} \quad (3)$$

問題は、近年の自然環境や社会環境の急激な変化が災害の様相をも変化させ、複合災害として顕在化し始めたと言うことであり、式(3)からそれをたどることができる。式(3)の素因とは災害を受ける側の特質を言うのであり、人間社会を構成するハード系からそれを維持機能させる仕組み(ソフト系)までのあらゆる要素から成り立っているため、災害はそもそも複雑多様な現象であると言える。上記の陶野の定義は複合災害をこの構造でとらえていると理解できよう。そこに以下の環境変化が加わることで「災害のシナリオ」がさらに爆発的に拡大・複雑化(インフレーション)を起こす。

- ① 異種ハザードの同時併発あるいは連続的発生による災害シナリオの複合化
- ② 社会構造の急激な経年変化による災害の規模拡大・広域化と新たな災害シナリオ発生

近年、式(3)における誘因(ハザード)が多種同時発生あるいは連続発生する現象が起り始めている(上記①による環境変化)。たとえば 2018 年北海道胆振東部地震においては気象災害(長雨)に地震発生が加わり、大規模な斜面崩壊が発生した。加えて同地震では、地球温暖化の影響により被災地北海道にかつて生息していなかったシロアリによる蟻害により木造建物が劣化し、地震動に耐えられず倒壊した例も見られた。また、2011 年東日本大震災では地震動に津波が加わり、これが源で原子力発電所が炉心熔融を起こし地域の復旧を遅らせている。想定されている南海トラフ巨大地震でも地震動と津波の複合発生が懸念されている。

人口減少や少子高齢化という社会構造の変化(上記②による構造経年変化)は、式(3)の素因の耐災害特性を脆弱化させる。特に、災害時における要支援者(高齢者)に対する支援者(生産年齢人口)の割合が減少し支援負担を大きくする要因となりつつある。また、2018 年北海道胆振東部地震においては、地元製造業・生産業の後継者が育っておらず被災を機に廃業を決定するケースが増えている⁶。地方では復旧に「これまでより長時間」を要しており、地方消滅への危機感が募る。このようなことを考えるなら、社会構造の変化は、都会においては一極集中によるハード系やソフト系の両面の複雑多様化故、そして地方においては復旧の遅れにより地域活力のさらなる減退化をもたらし、両地域共に関わり方への違いはあるものの被害規模の拡大・広域化そして長期化に与する負の影響が今後益々大きくなっていくであろうことは想像に難くない。

これら①②の環境変化は単発災害では想定していなかった災害のシナリオ展開が予想され、また数世代を超えた超長期間のシナリオを検討する必要性がより重要となり、必要な対応のタイムラインも複雑化し既往の防災組織・体制では対策が困難になる。新しい災害シナリオをシミュレーションし、対策(自助・共助・公助)につ

いて減災への効果評価を行うことで適宜の対策を検討することが急務である(図 1)。

以上が筆者が唱える複合災害の影響力の深刻さであり、単発災害とは異なる新たな対策を検討する必要性の根拠とするものである。以下これについて、具体的に説明を加える。

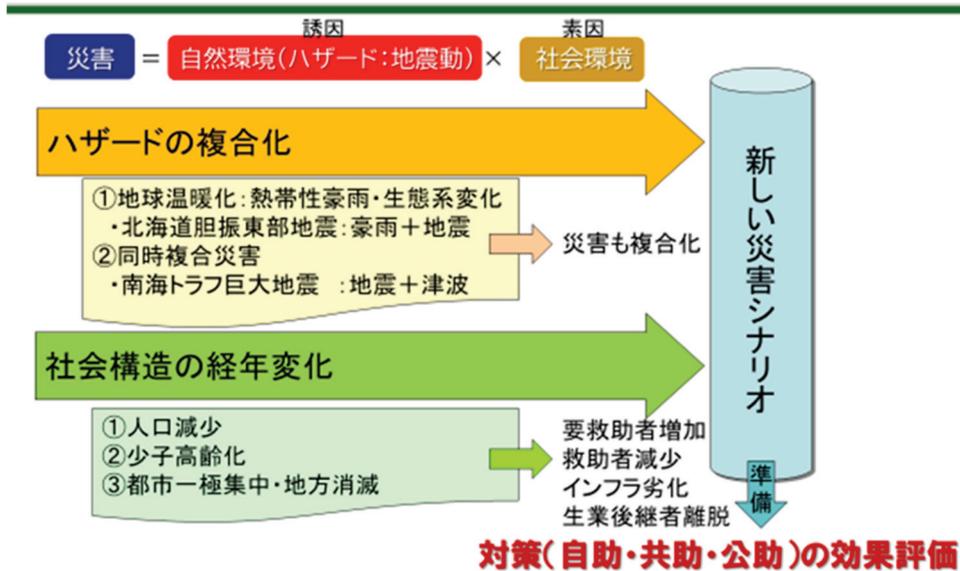


図 1 近年の環境変化に対する防災の観点からの問題提起

3. 複合災害の構造

式(3)に基づき、素因と誘因が複雑化し災害が複合化する例を示す。構造は以下の表に要約されよう。

表 1 複合災害の構造

<ol style="list-style-type: none"> 1. 素因の複合化 2. 誘因の複合化 <ol style="list-style-type: none"> (1)連鎖型ハザードによる複合化 (2)独立型ハザードによる複合化
--

(1) 素因の複合化

先に述べたとおり、人間社会を構成している要因全てが災害素因となる可能性があるため、災害は元々連鎖するものである。地震を例に太田(1982)⁷による災害連鎖モデルを図 2 に示す。図において、赤色の平行四辺形(フローチャートでは「データ」を意味する)が後続する災害を生み出す誘因、橙色の長方形(フローチャートでは「定義済み処理」を意味する)が地域性を特徴付ける素因、濃紺色の書類形(フローチャートでは「書類」を意味する)が災害をそれぞれ意味する。地震動がある地域の「自然(地学的形成物)」「居住系」「電気・水道・ガス等の供給系」「地域の生産工場」の各種素因に作用し、「地盤災害」「住宅災害」「ライフライン災害」「危険物流出」の直接的被害(1次被害)を引き起こす。その結果として、「延焼火災」や「人的死傷者」の間接被害(2次被害)を引き起こす。さらに被害が大規模化することにより、「住民不安」や「地域活動の低下」さらには物流が途絶えるなどの「地域を超えた災害の広域化」が発現する。社会経済・機能への影響は3次被害と言われている。

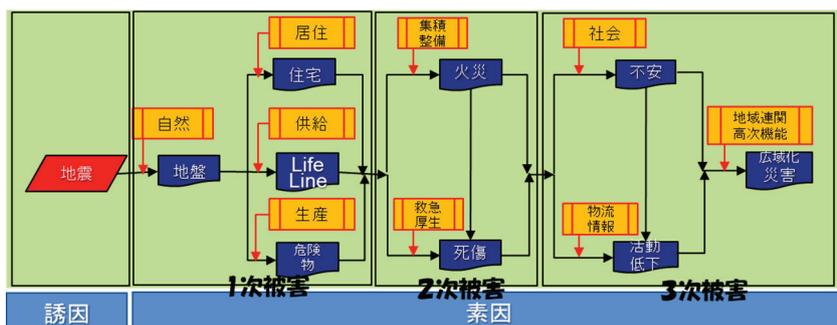


図2 素因の複合化の構造（地震による1次被害・2次被害・3次被害の連鎖）

(2) 誘因の複合化

(2.1) 連鎖型ハザードによる複合化

誘因（ハザード）が複合化するパターンは2種類ある。一つは連鎖型ハザードであり、被害連鎖の結果として、新たな誘因に派生しその誘因をきっかけとし新たな災害が派生する。例として、地震の後に津波が発生しそれが新たな誘因となり地域の河川氾濫につながることもある。東日本大震災の時にはその津波が原子力発電所を襲い、原発事故として地域への新たな誘因となった(図3)。

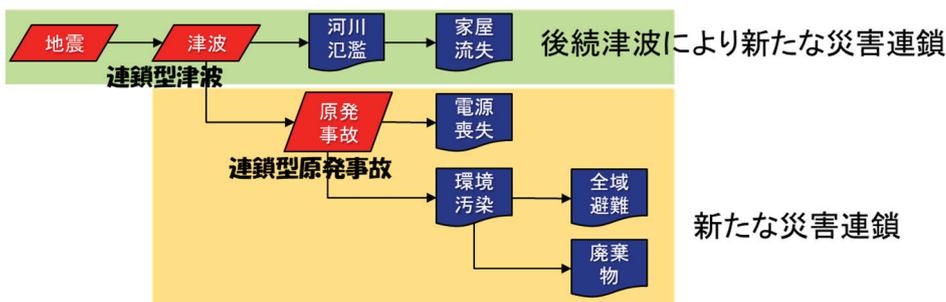


図3 連鎖型ハザードの災害構造（地震+津波+原発事故）

(2.2) 独立型ハザードによる複合化

誘因（ハザード）が複合化する2つめのパターンはそれぞれ独立な誘因が重なるケースである。気象災害は他の自然災害とは独立に発生する。しかし地球温暖化等により大型台風が日本列島を常襲してきており、地震との同時あるいは連続発生も常態化してきている。図4は地震発生後、その災害連鎖の途次において気象災害（暴風や大雪）が襲った場合を想定したものである。異種ハザードの発生順位や発生間隔により災害の規模拡大や広域化が懸念される。

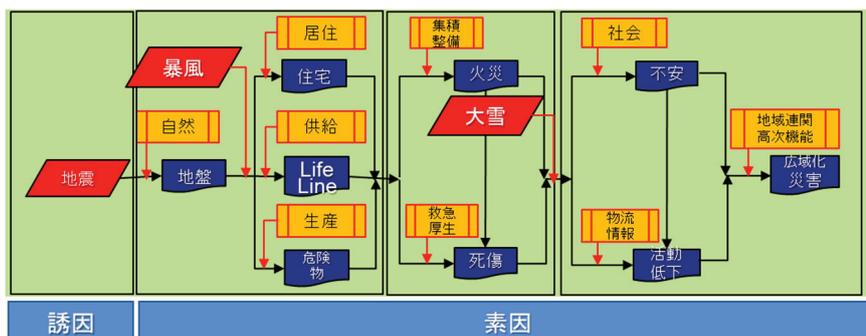


図4 気象災害の同時発生による災害規模の拡大

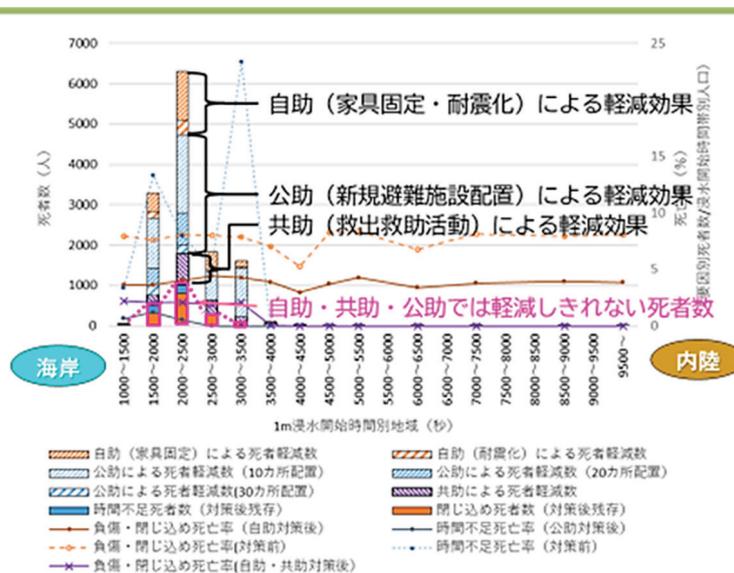
4. 複合災害のシミュレーション

上記した複合災害の構造をにらみ、災害シナリオがどのようにインフレーション化するのか、新たな問題を探るべくいくつかの複合災害の例を近年の災害事例やシミュレーションから検討する。

(1) {地震+津波} × 少子高齢化現象

表記法とし、誘因(ハザード)の複合化は加算(+)で、環境変化や社会構造変化がそれに加わる場合は積算(×)で表す。一つ目の例とし、地震発生で津波が連動するケースを取り上げる。被災地域が少子高齢化の社会構造変化を大きく受けている場合、その影響の大きさも無視できない。角田・他(2019)⁸は、北海道釧路市をフィールドに北海道の想定十勝沖地震(M8.1)による住家被害と人的被害を計算している。地震直後に津波の襲来を想定し表 1 で言うところの「連鎖型ハザードによる複合災害」を論じている。内閣府による被害計算は地震動と津波は独立に被害評価しており、それが他の自治体でも行われている通常の方法である。その方法とは、地震動により建物が倒壊しそれにより死傷者(住家の居住者に一定係数を乗算)が発生する。後続する津波に対しては、地震動による全壊建物の居住者は逃げ遅れるものとし、他の住人は一定の避難開始時間遅れを想定した上で、全員避難を開始し津波到達時に避難所に到達できなかった者は溺死者として算定する。角田らは津波に先行した地震動により住家倒壊や室内散乱により、一定数の居住者が建物内に閉じ込められ、救助が間に合わず避難できない者を溺死者としてカウントしている。それにより、従来法では見逃されている溺死者が約 2 倍に増えるとし、複合災害の影響として指摘している。さらに、少子高齢化が当該地域でも進んできていることから、発生年が遅れるほど高齢者の増加による避難遅れや「要救助者数：救助者数」の救助負担増加で救助できない非救助者数増加による溺死者増加を社会構造変化による影響として指摘している。

対策は自助(室内家具の固定化、住宅の耐震化)、共助(周辺住民による救出救助活動)、公助(避難ビルの新設)による効果をシミュレーションし(図 5)、上記 3 助でもウォーターフロントエリアは避難が間に合わない居住不適地域であることを指摘し、津波の影響の少ない高層ビル街に再開発するか、または居住制限地域に指定(地域地区指定)するなどの都市計画的対策を積極的に進める重要性を指摘している。自助や共助は重要ではあるが、複合災害はそれを超越した災害レベルに至ることが想定される。その場合、長期的視点に立った公的対策が唯一の手段となる。



→ 軽減対策で16,000人死者軽減。しかし実施後も4000人程度が死亡

図 5 2045 年を想定した減災戦略の効果評価

(2) 地震+山腹崩壊

2018年9月に発生した北海道胆振東部地震は胆振管内の山岳地域で広域において山腹崩壊を発生させ（写真1）、それによる土砂に崩壊崖付近に建つ住宅が巻き込まれ（写真2）、36名が亡くなっている。今までに例のない広域にわたる山腹崩壊を起こした直接的原因は地震動であり、この例も「連鎖型ハザードによる複合災害」に入るであろう。しかし単なる地震動でここまでの広域災害はこれまでの災害例からは考えにくく、近年の地球温暖化をはじめとする激しい地球環境変化が斜面崩壊の危険ポテンシャルを高めていたのかも知れない。2018年は北海道全域において大雨が続いていた。当該地域も地震前7月に入ってから平年の降水量を上回る長雨に見舞われていた。当該地震では傾斜度の小さな緩勾配の山腹斜面においてさえ過去に例を見ない広範囲な土砂崩壊が発生したが、長雨が崩壊土層の滑り面形成の原因の一つとする解釈もある⁹。



写真1 2018年9月厚真町高丘地区
斜面の土色部分が山腹崩壊箇所
Google Earth より



写真2 2018年9月8日厚真町吉野地区
北海道大学撮影

(3) 地震×地球温暖化×社会構造変化

2018年北海道胆振東部地震で地球温暖化の影響が見られたことは既述した。この災害ではさらに少子高齢化という社会構造変化の影響も強く見ることができる。この地震被害についてはすでに報告済み⁶であるが、関係部分を以下に抜粋する。

当該地域は1982年浦河沖地震で同じ被災中心地において当時の気象庁震度6の大きな揺れに見舞われている。当時の住家被害率（全半壊率）を今回の地震と比較すると震度に対する被害率はほぼ同程度であることが分かる。35年経過しても住家被害率に変化はない。どういうことであろうか。浦河沖地震が発生した1982年当時の北海道の住家は全国平均よりも強い¹⁰。しかし35年経過しても同程度の被害率ということは、この地域において住家の更新・耐震補強がほとんど進んでいないことを意味している。ちなみに、北海道で発生した過去の地震における住家被害率を比較してみると1952年十勝沖地震、1968年第20勝沖地震、1982年浦河沖地震と年を経過するに従い建物被害率が小さくなっていく、すなわち北海道の建物が耐震化してきている状況が見て取れる。しかし、それ以降、被害率の低下は観測できていない。

今回の地震で被害の大きな建物では、不適切な断熱構法による結露が進展し土台や構造柱が腐食している事例が発見されている。当該地域における建物のメンテナンスが十分になされていない証左

である。さらに、かつては北海道にはいないとされていたシロアリの被害も発見された。地球温暖化によりヤマトシロアリの野外生息が北海道名寄市（北緯 44.3°）において報告¹¹されていることから、建物の耐震性保持のためにもメンテナンスは重要である。

関連して、店舗に被害が大きかったことの原因がここから見て取れる。店舗は出入口を開放する必要性より 1 階部分は開口部が多く壁の少ない、いわゆる一階が **Soft Story** 構造となる。この非耐震性に加え、少子高齢化に伴う地方の商店の後継者が育っていないことによる店舗の更新・補修が軽視されていることが被害拡大の背景にあるのではないかと推察する。

地震 10 か月後にむかわ町鶴川地区と安平町早来地区の復旧状態を調査した¹²。全壊の店舗の大部分そして半壊程度のもも解体撤去されたままであり、商売は再開されていない（図 6）。これも後継者が育っていないことが大きな理由と考えられ、地震をきっかけに廃業を決意する地元住民も多い。この災害シナリオを図 7 に示す。かつての商店街が消滅する危機を迎えている。商店は集落形成の核となる施設であり、早急なる商店街復旧が地域にとって優先されねばならない。少子高齢化により地方の消滅が危惧されている時代である。地震襲来がその兆候に拍車をかける一因ともなりかねない。

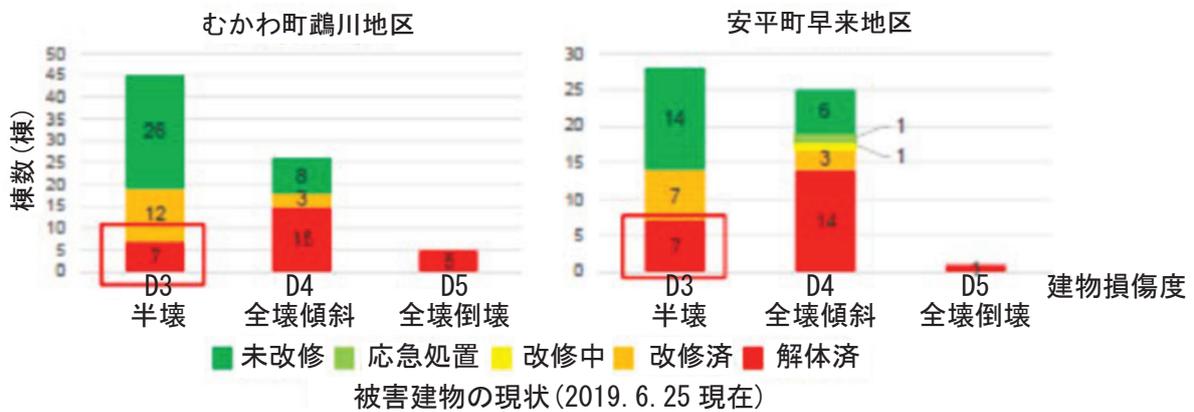


図 6 北海道胆振東部地震における被害建物の復旧率

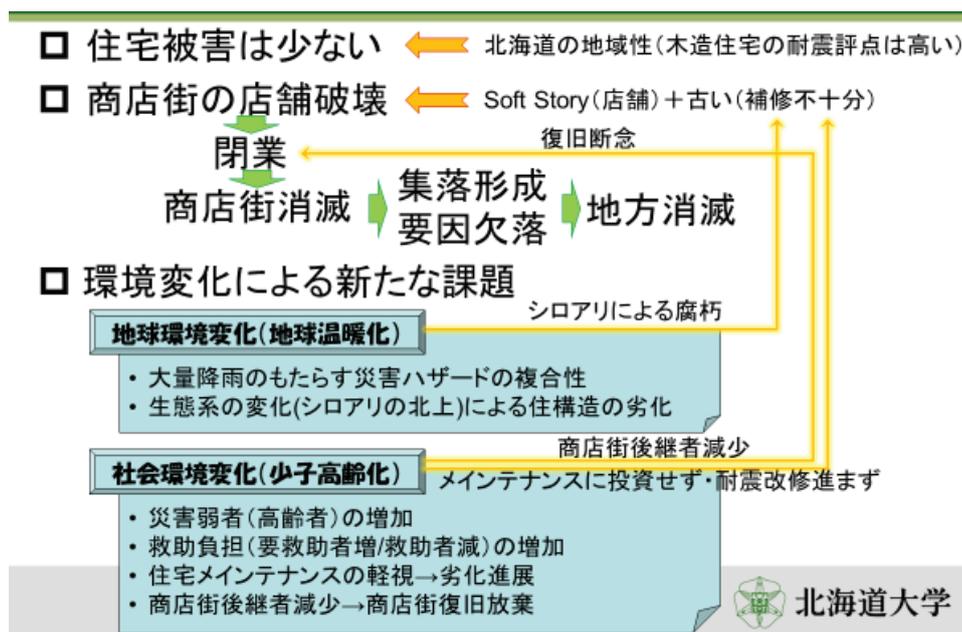


図 7 北海道胆振東部地震の被害の特徴とその要因

(4) 津波+土砂災害

{地震+山腹崩壊} についての事例は 2018 年北海道胆振東部地震で観測されたが、{津波+土砂} の同時複合災害が北海道日本海側沿岸の町村で懸念されている。現時点(2020年1月)で内閣府は全国の津波ハザードマップの見直しを検討中であるが、2014年9月公表の津波断層モデルと2016年北海道が想定した津波断層モデルを図8に示す。

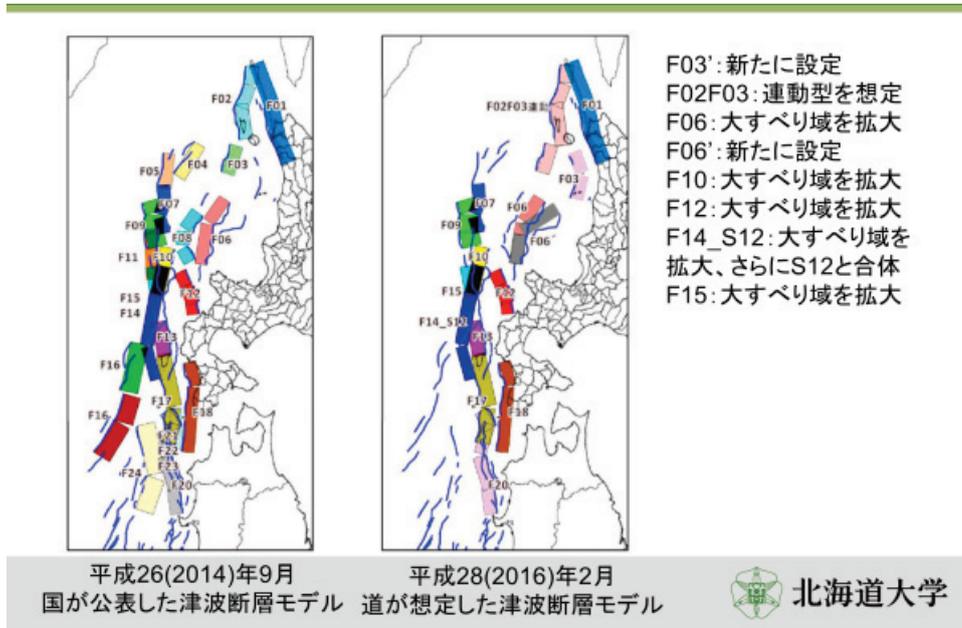


図8 日本海側の想定津波震源

いずれの断層モデルも陸側に近く、地震発生とほぼ同時に津波発生が予想される。本稿で取り上げるのは、北海道古宇郡神恵内村である。積丹半島の南突端部に位置し、珊内(さんない)・赤石・神恵内の3地区からなる(図9)。集落は海岸線を走る国道229号線沿いに形成されており、前面には海が広がり、背後には頻繁に崩壊を起こしている崖地が壁のごとくそびえ立っている。想定地震動の揺れは6強とかなり大きい、当該地域の地震対策は直後に襲ってくる想定浸水深20mを超える津波対策である。そのための避難階段が住宅背後の崖地に設けられている(写真3)。しかし、津波と同時に崖地崩壊の危険性も高く避難階段を登って津波から逃れられるかどうかは相当慎重に検討する必要があるだろう。



図9 神恵内村の位置



写真 3
神恵内村の避難階段

さらに考えなければならないのは、角田・他⁸の指摘にあるように地震動で住家内に閉じ込められる危険性である。角田・他の方法にならい計算した結果が表 2 である。地震動で住家が潰れることによる人的被害は少ないが、それに比較し閉じ込め者数の多さが目を引く。直後の津波あるいは崖崩れによる土砂で犠牲になる可能性が大きい。

閉じ込め者の津波と土砂の複合災害は自助・共助の対策レベルを超えた災害といえるであろう。複合するハザードの危険地域に居住制限を課す公的対策の重要性は既述した。当該地域についても同様である。国道が海岸線を走っている現状では集落の集団移転は現実的ではない。当該地域は背後の崖を登り切った中間地域に平地が開けているので、国道をそちらに付け替えるなどの国策レベルの対策が必要となろう。

表 2 神恵内村の地震動被害想定（震度 6 強）

大字	軽症者数	中等症者数	重症者数	死者数	閉じ込め者数
珊内地区 (さんない)	0.8	4.0	1.9	0.7	21.8
赤石地区	0.3	1.3	0.7	0.2	7.5
神恵内地区	3.5	16.2	8.2	2.8	114.6

(5) 気象災害（暴風雪）の併発

台風や暴風雪などの気象災害は、近年、その発生頻度に加え激烈さも増してきつつあり、記憶に新しいところでも 2013 年 3 月の北海道オホーツク沿岸を襲った爆弾低気圧（暴風雪）や 2019 年 10 月の台風 19 号による関東・甲信・東北地方の生活基盤破壊など単発災害としてみた場合でもきわめて危険かつ広域にわたり、そして激しさのピークが長時間続くやっかいなハザードである。しかし地震災害と異なり、周知から襲来時間まである程度の準備時間が期待できるので、住家の耐暴風雪補強は当然として、対策は事前避難あるいは自宅待機など、ピーク時の外出を制限することによりやり過ごすことが可能である。にもかかわらず、他の災害と同時あるいは連続発生すると事情は大きく変わってくる。

たとえば北海道のような積雪寒冷地域において、冬季の暴風雪時における外出は以下のような危険が伴う。

- ① 車移動の場合、周囲の視界がゼロとなるホワイトアウト状態では車の運転は不可能となり、排出ガスによる一酸化炭素中毒を回避するためエンジンを停止させ、車内で天候回復を待つことになる。根元・他¹³は実験より、外気温が -16°C の時、1 時間後の車内温度は 0°C 、3 時間後は -5°C となり、6 時間後には -10°C にまで低下することを確認している。毛布などの防寒用具があれば耐えられるものの、周辺温度が

5°C以下になると低体温症(凍死)の危険性は高まる。

- ② 体育館等の避難所の防寒対策は積雪寒冷地でも十分ではない¹⁴。灯油によるジェットヒーターで大空間を暖めても、床からの冷氣遮断は不可能であり、ダンボールベッド等の準備がなければ寝袋を用いても十分な睡眠はとれない。また CO_x の濃度も急激に高くなるため、ジェットヒーターの連続運転にも限界がある。
- ③ 居住地から避難所までの避難路においても、冬季の場合、路面凍結と積雪による道路幅員減少により避難困難さが増す¹⁵。ホワイトアウトの場合は避難途上で遭難する危険性もある。

積雪寒冷地域においては、暴風雪時の外出はきわめて危険であることを認識しておく必要がある。また事前避難が可能であったとしても、防寒対策が十分に整った避難所を選択する必要がある。このような気象条件下で他の自然災害が襲来(複合災害発生)した場合、たとえば、地震で住家が倒壊した場合、津波襲来が予想された場合などは屋外避難を余儀なくされる。積雪寒冷地でなくても、台風襲来時に地震発生をみたなら、ハード系の防災設備が破壊した無防備状態の中で、長時間継続する気象災害(台風等)に耐えねばならない深刻な状況が想定される。

このような気象災害が伴う複合災害(外出してはいけない環境下で屋外脱出しなければならない状況)に対する対応としては、以下のようなものが考えられよう。

1) 公助：集落移転誘導(リスクが重複しない場所への移動)

既述のとおり、誘因が複合化する地域への居住は避けるのが基本である。

2) 自助：避難しなくてもよい住宅性能(耐震・断熱)を確保

3) 自助：シェルターで自宅内に避難所設営

住宅の一部が破壊されても、居住地内で生活が継続できる設備を整えておく。米国の竜巻対策(シェルター)が参考になる。しかし、津波や土砂災害危険地域では垂直避難が可能であることが条件となる。また、延焼火災に対しては居住地内のシェルターは効果がないことは理解しておく必要がある。

4) 共助：近隣避難(避難所までの遠距離移動不要)

避難所まで距離がある場合は、近隣の安全住居に逃げ込むことが可能であるなら、そちらを優先すべきであろう。それを可能にするのは普段からのコミュニティ作りが重要となる。

(6) 地震+地震

2016年熊本地震では、前震(日奈久断層、M6.5)の2日後に本震(布田川断層、M7.3)が発生し被害を拡大させた。近年発生が危ぶまれている南海トラフ巨大地震も連動型地震として複数断層の連続破壊が想定されている。連動型地震でなくても、大きな地震の後には必ずほぼ同規模の余震が発生している。地震動が後続するのはきわめて自然であるにもかかわらず、地震対策としては単発地震のみを想定しており、後続する地震について意識して被害評価する研究は多くはない。ここでは篠田・他¹⁶の研究から問題点を整理する。

篠田・他¹⁶は、地震に襲われた時の住家一棟の被害程度を関数化した以下の損傷度関数¹⁷(地震動の大きさ(震度I)、住家の耐震性能(耐震評点I_w)、住家の被害程度(損傷度x)の3者の関係をワイブル分布で関数化したもの)から

$$x = 1 - e^{-\left(\frac{I}{\eta}\right)^m} \quad (4)$$

ここに、 η と m は耐震評点で与えられるパラメータであり、この式を基本に x とIを既知とする以下の中嶋・岡田式¹⁸を用いて、2004年新潟県中越地震のデータに援用し、後続被害による耐震性能の劣化を算定するための耐震評点劣化発生率と耐震評点劣化進行率を逆問題として求めた(図10、図11参照)。

$$Iw = (I - a(x)/b(x))^{1/c(x)} \quad (5)$$

ここに、 Iw は耐震評点、 a, b, c は損傷度 x により異なる値を持つパラメータである。

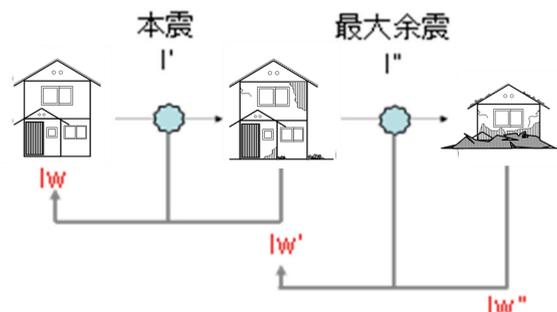


図 10 中越地震における耐震評点遷移の時系列構造と逆問題としての解法手順

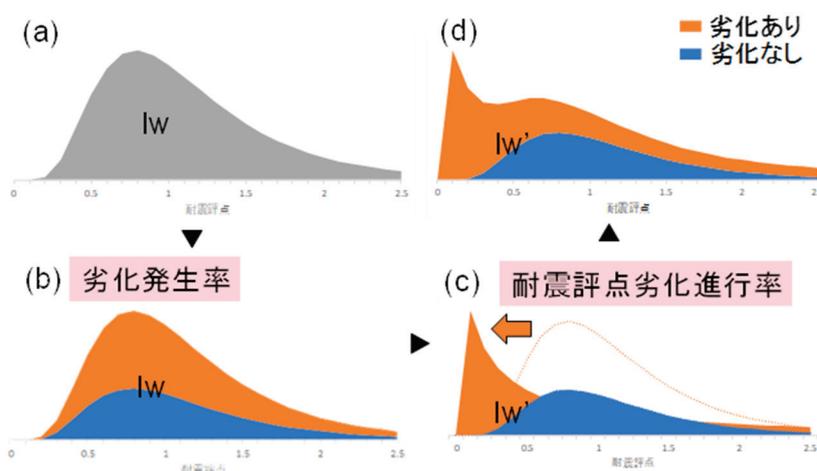


図 11 地域内における住家の耐震評点分布の劣化進行モデル

この関係を札幌市に適用し、想定内陸地震（月寒断層、M6.8）の最大余震として M6.5 を想定し、その被害を比較することで余震に対する諸々の対策の効果評価を行っている。結果を図 12 に示す。

何らの事前及び事後対策をしない場合（図 12 (A)）、住家の全壊棟数は余震による新たな被害棟数は本震と同数程度、また死者数にいたっては本震以上の被害になっている。復旧費用は主として自治体が拠出する住家及び人的被害に係る総額を示している。住家復旧は解体費用とそれぞれの被害程度に応じて支払われる生活再建支援助成額の範囲内での補修費用の合算であり、人的被害にかかる額は自治体からの弔慰金を計算している。何も対策をしなければ、本震の約 1.5 倍の支払いが余震において発生する。

対策として想定したのは、(B)本震で全壊(D4 以上)家屋を解体撤去し居住者を札幌市域内避難施設に移動させる、(C)本震で D4 被害家屋を補修し居住を続ける、(C')本震で D3 及び D4 被害家屋を補修し居住を続ける、(D)本震前耐震評点 $Iw \leq 0.7$ の住家の居住者を被害の有無に関係なく避難させる、(D')本震前耐震評点 $Iw \leq 0.6$ の住家の居住者を被害の有無に関係なく避難させる、(E)本震前耐震評点 $Iw \leq 0.7$ の住家を本震発生前に耐震改修 ($Iw = 0.7$) する、の 7 パターンである。これらを対策内容でグルーピングすると、(B)・(C)・(C')が事後建物対応、(D)・(D')が事後人的対応、(E)が事前建物対策ということになる。興味深いのは対策シナリオ(D)・(D')の避難による人的対応策である。死者数を大きく軽減できており、既往の応急危険度判定を受けてからの避難方法に代わり、元々の自宅の耐震評点

から避難を促すという新しい避難方法についての提案となっている。対策シナリオ(E)による事前耐震改修に関しては、費用の面において本震のみの被害ならば何もしない(A)と比べて復旧費用も含めるなら約 400 億円軽減できるものが、余震被害を加えると 900~3,800 億円軽減効果が生まれている。今までの行政の被害推定は本震のみの被害をみていたが、今回余震による被害を加えることで、事前耐震改修の有効性をより強く主張している。

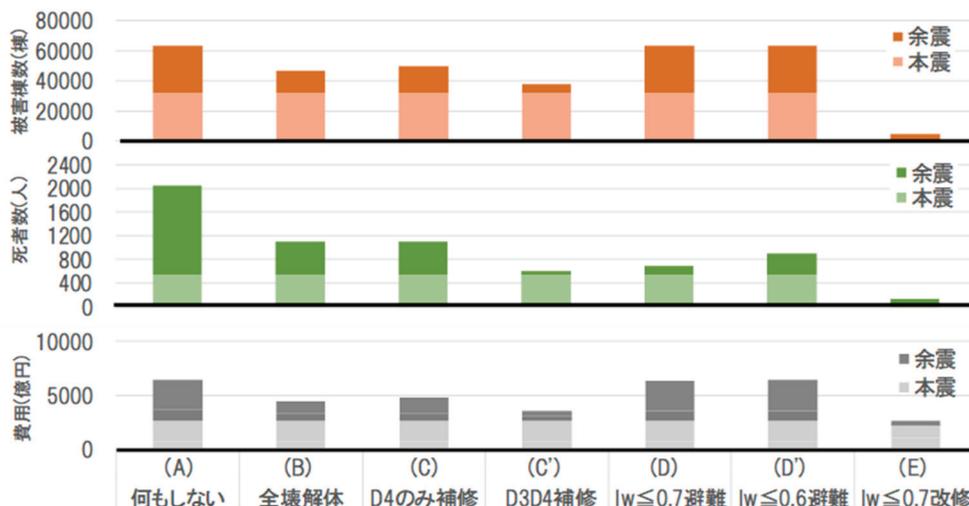


図 12 本震+余震の全壊被害棟数，死者数，復旧費用

5. まとめ

異種ハザードの複合化そして同種ハザード（地震）の後続発生にみられる被害の複合化について、近年における事例と想定シミュレーションによりシナリオを検討し、課題と対策について議論してきた。いずれのケースにおいても、単発災害に比較し被害の広域化と被害程度・規模の拡大はきわめて大きく、対策は自助・共助のレベルを超えている。もちろん個人的対策・コミュニティにおける協働対策は今まで以上に重要となってくるが、公的な長期的対策が根本にあることがより鮮明化したと言わざるを得ない。防災という視点で我が国の現状をとらえるのみならず、自然環境変化に社会環境変化が急速に纏わり付いてくる環境下であり、復旧に係る国家予算の負担という経済的視点からみても公助を抜きにした対策はあり得ないであろう。

これまで議論してきたことのまとめとし、複合災害の課題整理とその解決のための公助によるサポートの方向性を図 13 に示す。赤色長方形で囲った文言が複合災害の影響であり、それをもたらす誘因と素因が緑色矢印で示してある。それらに対する対策（主として公助）の方向性が黄色矢印で示した赤色文字である。本論中では詳しく取り上げなかったが、社会構造変化として、地方の過疎化に対して都市の一極集中がある。都市システムが複雑化することによる被害の質的変化・量的拡大が複合災害ではより助長され、それに伴い地方からの避難者受け入れが不可能になるなど、その脆弱性についてはすでに多くの指摘がある。本稿はそれを軽視するのではなく、それに加えて地方にとっては復旧の活力を削ぐ負のダイナミズムを複合災害は抱えている。そのことを見逃してはいけないであろう。対策は単発災害以上に、長期的時間スケールでそれらの被害の影響評価が重要となる。誘因の複合化は単に入力が単純加算で重畳するのみではなく、受ける側（素因）のリスク耐性が徐々に劣化してきている影響は無視できず、誘因の破壊力を増強させてしまうからである。それらに対し個人的対策はあまりに無力である。長期的な公助がより根本的な対策であることが理解できるであろう。本稿を閉じるにあたり公助の方向性をまとめたのはその理由による。

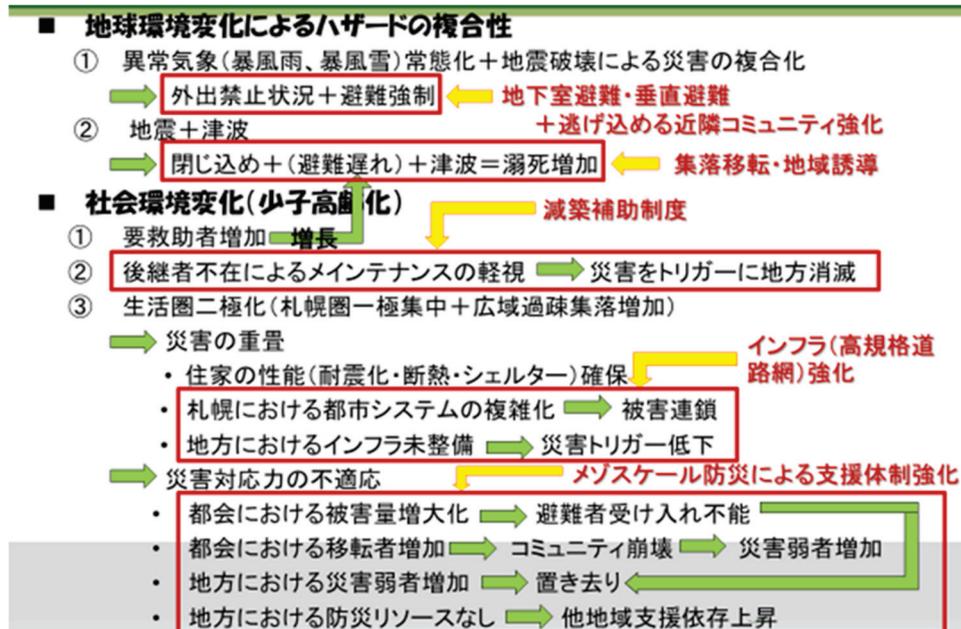


図 13 複合災害の課題整理と解決のための公助によるサポートの方向性

本稿をまとめるに当たり、多くの方々との共同研究の成果が下敷きにある。特に、筆者が 2019 年 3 月まで所属していた北海道大学工学研究院・都市防災学研究室の中嶋唯貴准教授をはじめ、学生諸氏には調査・分析・議論の全ての段階において有益かつ楽しい時間を共有させて頂いた。また、新たな所属先として同大学広域複合災害研究センターにお誘い頂き快適な研究環境を与えて頂いた丸谷知己北海道立総合研究機構理事、南哲行一般財団法人砂防・地すべり技術センター理事長をはじめ、山田孝教授(同センター長)、笠井美青准教授(同副センター長)、厚井高志准教授、桂真也助教、田中健貴助教の諸先生からは、筆者のこれまでの研究分野とは異なる視点で連綿たるアクティブな知的刺激を与えて頂き、本稿の視野を大きく広げて頂いた。恩師である太田裕先生をはじめ、東濃地震科学研究所の研究員諸先生には月 1 回の会合時に諸々研究の議論を深めて頂いた。ここに記し、礼意とする。

参考文献

1. レイ・カーツワイル:ポスト・ヒューマン誕生 コンピュータが人類の知性を超えるとき、NHK 出版、pp.661、2007.
2. ミシェル・フーコー:監獄の誕生—監視と処罰、新潮社、pp.372、1977.
3. 井沢竜暢:巨大都市の環境と都市防災、建築雑誌(昭和 46 年 11 月号)、pp.949-951、1971.
4. 陶野郁雄・他:複合災害の誘因と予測に関する研究、日本地質学会、p.533、1992.
5. 岡田成幸:災害リスクの構造と工学的制御の方法、東濃地震科学研究所報告、No.41、pp.25-48、2017.
6. 岡田成幸:北海道胆振東部地震にみる積雪寒冷地住宅の強靱さと新たな問題、消防防災の科学(特集:北海道胆振東部地震(平成 30 年))、No.138、pp.22-29、2019 年(秋号).
7. 太田裕:地域統計資料に基づく行政区別耐震性評価の試み—都道府県の場合—、自然災害資料解析、Vol.9、pp.1-14、1982.
8. 角田叡亮・岡田成幸・中嶋唯貴:少子高齢化現象が地震津波複合災害の人的被害に与える影響評価～自助・共助・公助による減災対策効果の限界～、日本地震工学会論文集、Vol.19、No.5、pp.423-439、2019.

9. 砂防学会北海道支部:平成 30 年北海道胆振東部地震土砂災害緊急調査に基づく提言、2018 年 10 月 25 日.
10. 竹内慎一・岡田成幸・中嶋唯貴:地域性及び時代性を考慮した木造建築物の地域地震被害率関数構築法の提案 -北海道を例とした耐震評 点分布を利用する方法-,日本建築学会構造系論文集, Vol.83, No.753, pp.1549-1559, 2018.
11. 大村和香子・神原広平・加藤英雄:ヤマトシロアリの野外生息マップ、森林総合研究所、研究成果選集、2016 年岩崎祥太郎・中嶋唯貴・岡田成幸・植松武是・松島信一・佐伯琢磨:2018 年北海道胆振東部地震の被害調査 その2 被災中心地域の住家被害悉皆調査、日本建築学会大会(金沢)、2019.
12. 根本昌宏・尾山とし子・山本美紀:暴風雪被害から身を守る車両内装備品の実践的な評価、北海道の雪氷、No.34, pp.55-58、2015.
13. 四戸孝司・中野雅充・根本昌宏:厳冬期避難所演習 2014 報告、国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所報告、2014.
14. 奥野祐介・橋本雄一:積雪寒冷地における疑似的津波避難に関する移動軌跡データ分析 GIS—理論と応用、Theory and Applications of GIS、Vol. 23、No.1、pp.11-20、2015.
15. 篠田茜・岡田成幸・中嶋唯貴:繰り返し荷重を受ける木造建物の損傷度重畳問題の取り組み:耐震法典劣化の確率評価を用いた後続地震による 2 次被害シミュレーション、日本地震工学会論文集、pp.19、2020(掲載決定).
16. 岡田成幸・高井伸雄:木造建築物の損傷度関数の提案と地震防災への適用 -地震動入力を確定的に扱う場合-,日本建築学会構造系論文集、No.582、pp.31-38、2004.
17. 中嶋唯貴・岡田成幸:時間軸上の死者低減率最大化を主目標とした木造住宅耐震化戦略の策定 -東海・東南海連動型地震を対象とした東海4県への適用事例-,日本建築学会構造系論文集、N0.623、pp.79-86、2008.