

想定を超えてワーストケースに至るまでの 津波危険度の変化に関する研究

京都大学防災研究所 助教 安田 誠宏

概要：

本研究では、想定を超える津波が発生した場合の、小中学校や市町村役場等の災害対応拠点の津波浸水危険度を個別に予測するとともに、対象エリア全体をマクロに捉え、喪失する拠点数の変化傾向を津波規模の観点から明らかにした。東海・東南海・南海地震の影響地域のうち、和歌山県を対象地域として、従来想定を超える津波を段階的に設定し、規模の変化が浸水高や範囲にどのような変化をもたらすかを数値シミュレーションによって予測した。津波伝播および遡上シミュレーションを実施し、各 M_w における津波の伝播および浸水状況、最大浸水深や最大浸水面積の変化を整理した。浸水深を指標とした津波危険度レベルを定義し、 M_w の変化に対する災害対応拠点における危険度レベルの変化について整理した。

災害対応拠点の喪失拠点数については、和歌山県下の小中学校 262 校のうち、 $M_w 8.7$ で浸水するのは 18 校だけであるが、ワーストケースの $M_w 9.0$ になると 75 校に増加した。災害対応拠点の最大浸水深については、 $M_w 9.0$ で浸水する小中学校 75 校中の約 7 割で、13 役場中約 4 割で、 M_w が 8.9 を超えると浸水高が急増した。危険度レベルの変化については、 $M_w 8.8$ と 8.9 の間に、危険度レベルが高くなる拠点数が増える境界があることがわかった。

キーワード：想定津波、ワーストケース、浸水危険度、和歌山県、災害対応拠点

1. 緒 論

2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震では想定を遙かに超える津波が来襲し、甚大な被害を受けた。岩手県および宮城県において、自宅を失うなどして、小中学校を避難所とした被災者数は、表-1 および 2 に示すように、平均で総避難者数の 31% および 41% であり、総避難所数に対する小中学校数の割合に比べて高い。被災者のための一時的な生活の拠点として、収容能力や信頼性の面から、小中学校は重要な施設であることがわかる。しかし、陸前高田市で、1 次避難所に指定されている 65 カ所のうちの半数以上の 35 カ所が浸水した例にみられるように、多くの施設が浸水により避難所として使用できなくなった。その結果、行政は、計画にない避難所を活用できるように調整するなどの対応に追われた。さらに悪いことに、災害対応の指揮拠点となるべき庁舎が被災する自治体も多数発生した。

一方、東北地方太平洋沖地震津波を受けて、中央防災会議を中心に津波想定の見直しがなされており、南海トラフの巨大地震についても、科学的知見に基づいた最大クラスの地震想定が議論されている。「東北地方太平洋沖

地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会」の中間とりまとめ¹⁾によると、『今後地震・津波の想定を行うにあたっては、これまでの考え方を改め、津波堆積物調査などの科学的知見をベースに、あらゆる可能性を考慮した最大クラスの地震・津波を検討していくべきである』と述べられている。また、「南海トラフの巨大地震モデル検討会」の中間とりまとめ²⁾では最近の科学的知見をもとに、想定震源域・想定津波波源域をとりまとめるとともに、想定震源域に対応する地震の規模が推定された。

想定津波には大きな不確実性が含まれ、想定津波の変化に対する浸水脆弱性の洗い出しが課題となっている。現在の防災計画にある想定以上の津波を考えた場合に、わずかな規模の違いで小中学校や市町村役場が被災する可能性がある地域は、計画以上の津波が来襲した場合の深刻さは当然ながら大きい。今後の津波防災の考え方として、津波の規模によって被災状況がどのように変化するのかを整理しておく必要がある。

本研究では、南海トラフ沿いの地震を対象に、小中学校や市町村役場に代表される災害対応拠点の、想定津波規模を超えてワーストケースに至るまでの津波浸水危険

表-1 岩手県の小中学校への避難状況 (2011 年 3 月 19 日 15:00 時点)³⁾

市町村	小中学校への避難者数 ／総避難者数	小中学校数／全避難所 数
陸前高田市	1730/7776 (22%)	3/65 (5%)
大船渡市	1929/7243 (27%)	7/57 (12%)
釜石市	3096/8393 (37%)	12/83 (14%)
大槌町	1381/6316 (22%)	5/46 (11%)
山田町	2230/5675 (39%)	7/32 (22%)
宮古市	2869/7294 (39%)	14/64 (22%)
野田村	204/638 (32%)	2/11 (18%)

表-2 宮城県の小中学校への避難状況 (2011 年 5 月 25 日 未明時点)⁴⁾

市町村	小中学校への避難者数 ／総避難者数	小中学校数／全避難所 数
仙台市	454/1703 (27%)	3/19 (16%)
石巻市	3809/7643 (50%)	31/101 (31%)
気仙沼市	1607/4028 (40%)	13/47 (28%)
名取市	649/869 (75%)	8/9 (89%)
登米市	195/610 (32%)	3/11 (27%)
東松島市	315/2203 (14%)	7/44 (16%)
塩竈市	81/104 (78%)	3/4 (75%)
亘理町	651/1039 (63%)	4/5 (80%)
山元町	365/868 (42%)	2/6 (33%)
女川町	296/1829 (16%)	3/16 (19%)
南三陸町	420/3608 (12%)	4/43 (9%)

度の変化を予測する。和歌山県を対象エリアとし、脆弱な拠点数、拠点における浸水深および危険度レベルの変化傾向を明らかにする。

2. 検討方法

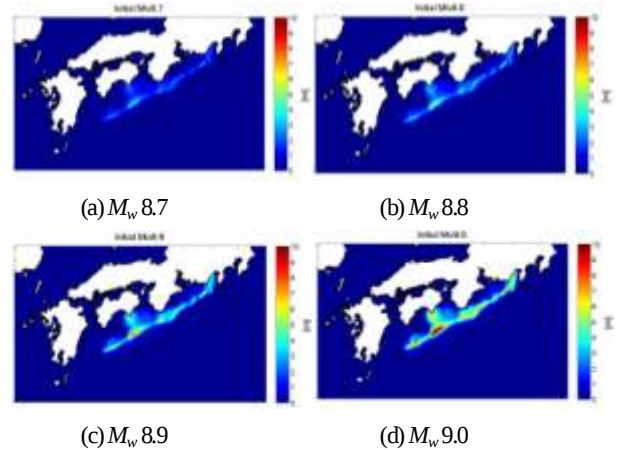
(1) 想定津波規模の変化

三連動地震の影響地域のうち、和歌山県を対象地域として、従来の想定を超える津波を段階的に設定する。南海トラフ巨大地震モデルは、中央防災会議²⁾等で提案されているが、本研究では想定シナリオの不確実性を考慮し、想定地震範囲を固定し、想定地震規模を変化させることにより、地震規模の変化に伴う津波浸水危険度の変化を提示する。想定地震として中央防災会議⁵⁾の三連動地震モデルを用い、その震源域を固定して、すべり量を均一に変化させる。

具体的には、地震モーメント M_0 とモーメントマグニチュード M_w の関係式、およびすべり量と断層面積の関係式を用いて、 M_w を 8.7 から 9.0 まで 0.1 ずつ変化させて、津波の初期波源を設定する。

$$M_0 = \mu DS \quad (1)$$

$$\log M_0 = 1.5M_w + 9.1 \quad (2)$$

図-1 各 M_w に対する津波の初期水位分布

ここで、 μ : 岩盤の剛性率、 D : すべり量、 S : 震源断層の総面積である。

上述した方法でマグニチュード (すべり量) を変化させた場合の、津波の初期水位分布を図-1 に示す。この図によると、各 M_w における最大水位は室戸の南方でみられ、それぞれ 4.1m, 5.8m, 8.2m, 11.56m となった。 M_w が 0.1 増加すると最大水位が 1.4 倍となり、 M_w が 0.2 増加すると最大水位は 2.0 倍となることから、 M_w と M_0 の関係と等しくなっていることを確認した。ただし、断層の広さは固定したため、初期水位分布の広がりは酷似しており、到達時間の違いはほとんど生じない。

(2) 計算条件

津波計算は、Staggered 格子を用い、leap-frog 法により、差分化した支配方程式の時間発展を解いた。支配方程式は、深海域においては線形長波理論、浅海域においては海底摩擦及び移流を考慮した非線形長波理論を用いた。

計算ではネスティングスキームを用い、沖から 1350m (西日本)、450m (瀬戸内海および東海)、150m (紀伊水道および紀伊半島)、50m (和歌山北部、中部および南部) の 4 段階とした。水深および標高データの座標系には UTM 座標系 (53 帯) を採用し、測地系は旧日本測地系である。堤防高は中央防災会議⁵⁾ のデータを参照し、破堤はしないものとした。計算のタイムステップは、CFL 条件により、和歌山北部が 0.5s、中部と南部が 0.25s であり、計算期間は地震発生後から 6 時間までとした。

(3) 災害対応拠点

海岸近くにあるそれらの小中学校および役場の座標および標高を調べ、データベースを作成する。小中学校の数は、和歌山県北部 164 校、和歌山県中部 53 校、和歌山県南部 45 校の計 262 校、災害時に窓口業務などが行われる地方支所・連絡所を含む市町村役場は、和歌山県全体で 26 か所である。以後、本研究では、小中学校および役場を災害対応拠点 (Disaster Response Base) と呼称する。

3. 津波浸水範囲および面積の変化

各広域エリアにおける M_w の変化に対する最大浸水範囲の変化を図2～4に示す。また、それぞれの浸水面積の変化を示したものが図5、和歌山北部を分割したものが図6である。2. (1) で述べたように M_w が0.1増加すると M_0 は1.4倍に増加し、 M_w が0.2増加すると M_0 は2倍に増加するという関係性があるが、最大浸水面積は地震規模には依存しておらず、場所に大きく依存し、和歌山中部と南部では、地震規模の増大にほぼ比例して増大したが、和歌山北部では M_w 8.8で1.8倍に、 M_w 8.9で3.3倍となり、 M_w 9.0では4.7倍にもなった。

M_w が1段階増大した場合について、地域毎に細かく考察していく。 M_w が8.7から8.8になると浸水面積の増加率が最も大きいのは、和歌山市周辺と海南市・有田市周辺で、それぞれ1.8倍、1.9倍である。増加率が小さいのは、すさみ町周辺と串本町周辺で、どちらも1.3倍である。

他の地域では平均的に1.4倍増加しており、地震規模の変化と比例増加した。 M_w が8.8から8.9になると、和歌山市周辺において浸水面積の増加率が最も大きく、2.1倍増加した。増加率が小さいのは、串本町周辺で1.3倍である。他の地域では1.6倍増加しており、地震規模の変化率より少し大きい。 M_w が8.9から9.0になると、すさみ町周辺において浸水面積の増加率が最も大きく、1.9倍増加した。増加率が小さいのは、同じ和歌山南部の串本町周辺で、1.2倍である。他の地域では1.4倍や1.7倍の増加率であり、地域差がある。

次に、 M_w が2段階増大した場合について考察する。 M_w が8.7から8.9になると浸水面積の増加率が最も大きいのは、和歌山市周辺であり、3.8倍増加した。増加率が小さいのは、串本町周辺で、1.7倍である。他の地域では、2.0倍から2.9倍増加している。 M_w 8.8から9.0になると、浸水面積の増加率が大きいのは和歌山市周辺とすさみ町周辺で2.9倍増加する。増加率が小さいのは串本町周辺で1.7倍増加する。

最後に、 M_w が3段階 (0.3) 増大した場合について述べる。 M_w 8.7から9.0になると、浸水面積の増加率が大きい和歌山市周辺で5.2倍増加する。増加率が小さい串本町周辺で2.1倍増加する。全体的に低平地面積が広い県北部の増加率が大きく、南部の増加率が小さい。中部では、地震の規模に対して線形的に増大する傾向が強かった。

4. 災害対応拠点の危険度の変化

(1) 喪失拠点数

和歌山県下の計算対象領域に含まれる小中学校は 262 校であった。そのうち M_w 9.0 で浸水する 75 校を対象に、 M_w の変化に対する小中学校数の変化を考察していく。また、市町村役場に対しても同様のことを行い、全 26 箇所

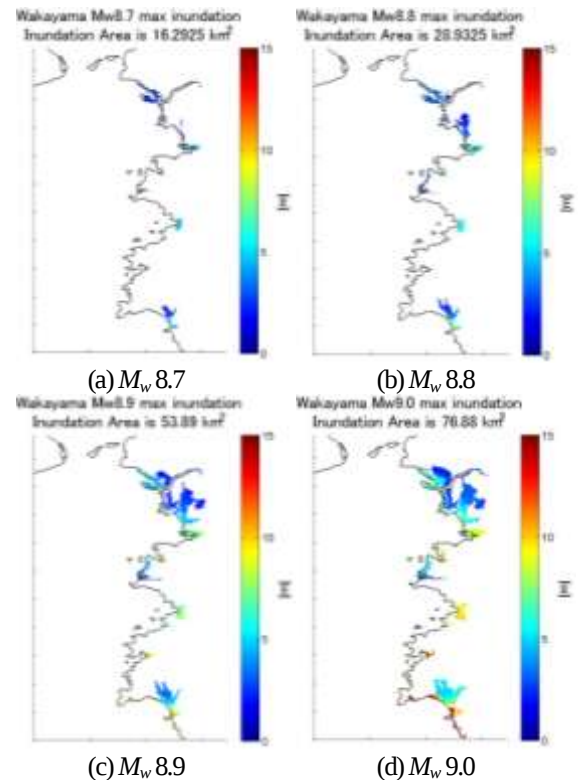


図-2 各 M_w に対する和歌山北部エリアの浸水範囲

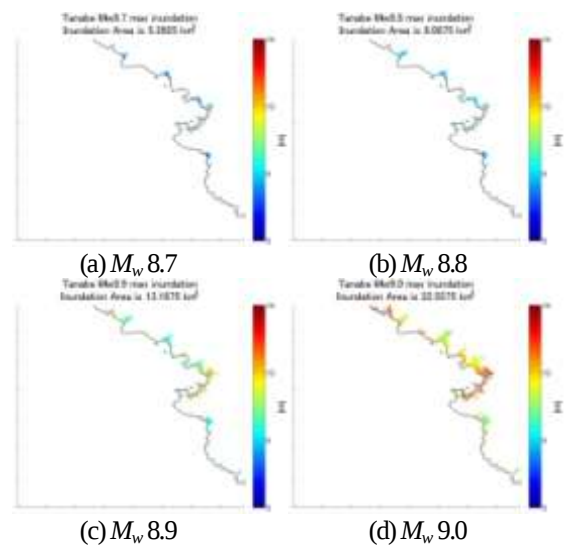


図-3 各 M_w に対する和歌山中部エリアの浸水範囲

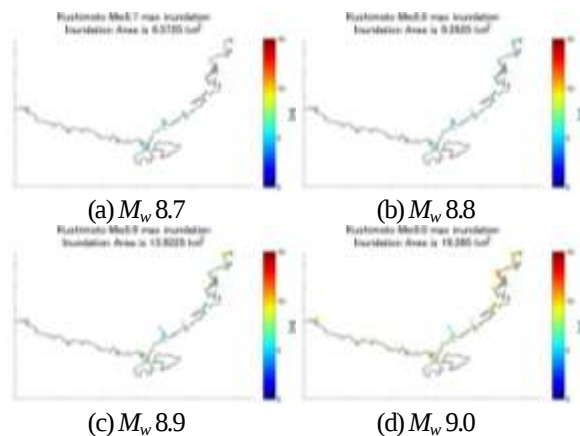


図-4 各 M_w に対する和歌山南部エリアの浸水範囲

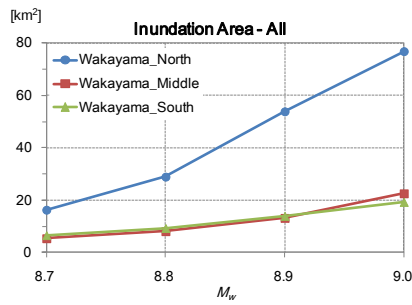


図-5 和歌山県における M_w に対する浸水面積の変化

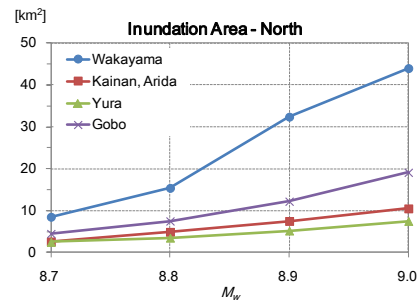


図-6 和歌山北部における M_w に対する浸水面積の変化

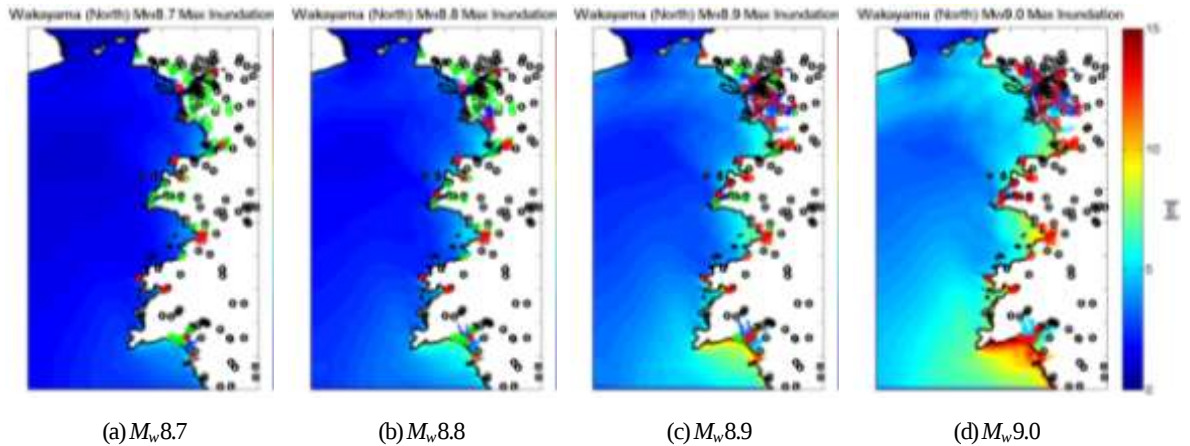


図-7 M_w の変化に対する来襲津波と災害対応拠点での浸水有無の変化 (和歌山北部)

(赤: 浸水, 緑: 未浸水, 黒: $M_w 9.0$ でも浸水無)

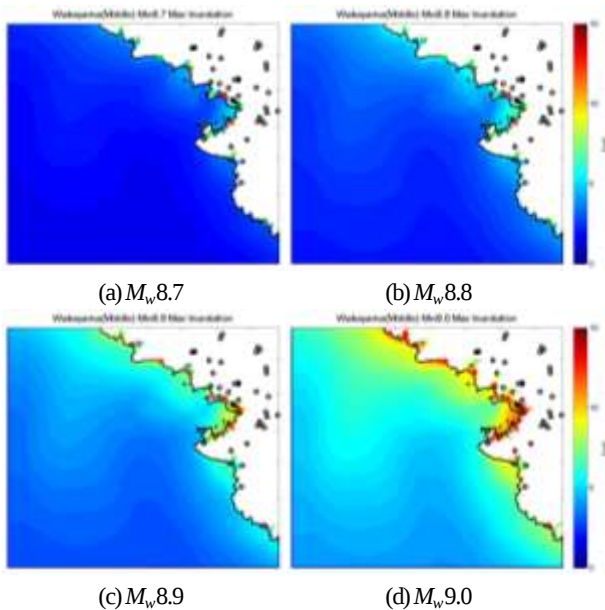


図-8 M_w の変化に対する来襲津波と災害対応拠点での浸水有無の変化 (和歌山中部) (マーカーの分類は図-7 と同様)

のうち 13 箇所を検討対象にした。

図-7～図-9 は、各地域での M_w の変化に対する最大津波高および浸水深と、災害対応拠点での浸水有無の変化を表しており、黒丸印はどの M_w においても浸水しなかった拠点、赤は浸水した拠点、緑は $M_w 9.0$ で浸水する拠点を示している。また、図-10 に小中学校と市町村役場

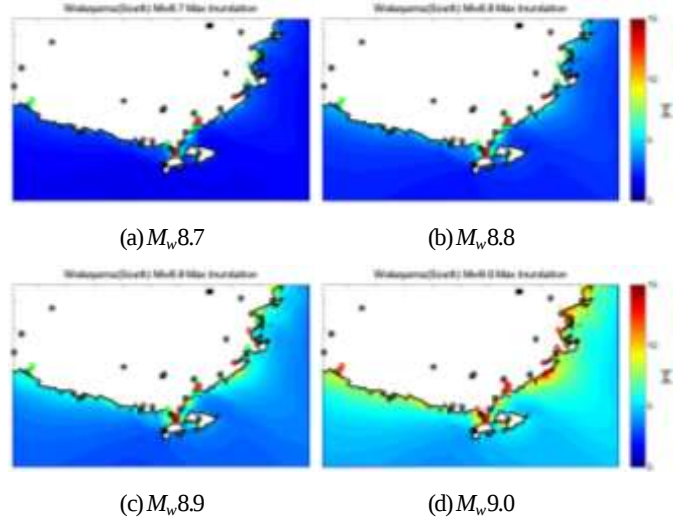
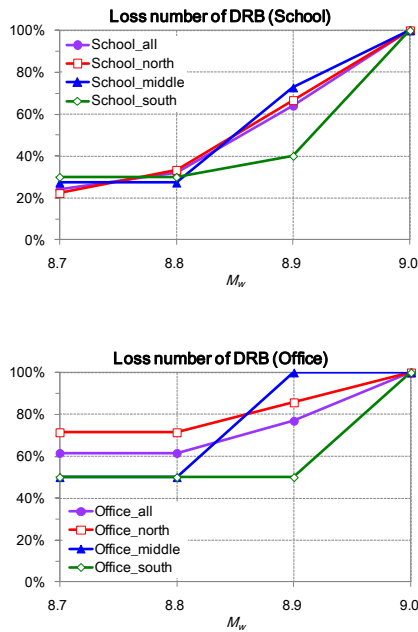


図-9 M_w の変化に対する来襲津波と災害対応拠点での浸水有無の変化 (和歌山南部) (マーカーの分類は図-7 と同様)

の M_w の変化に対する浸水拠点数の変化割合を示した。このとき、 $M_w 9.0$ で浸水する拠点数を 100% とした。

対象となる小中学校の数は、各地域で 54 校、11 校、10 校であり、和歌山県北部は学校数が多い分、浸水する小中学校が多い結果となった。 $M_w 8.7$ の場合、それぞれの地域で浸水した小中学校の数は 12 校、3 校、3 校で、割合は各地域の 22%、27%、30% を占める。 $M_w 8.8$ では、それぞれ 18 校、3 校、3 校となっており、県北部だけ増

図10 M_w の変化に対する小中学校及び役場施設割合の変化

加して割合は32%となる。 $M_w 8.9$ では、それぞれ36校、8校、4校となり、割合は67%、73%、40%となった。北部では2倍、中部では2.7倍と急増した。 $M_w 9.0$ になると、南部では浸水する小中学校の浸水する数が急増し、2.5倍に増加した。北部と中部では、 $M_w 8.8$ から $M_w 9.0$ に至るまで、浸水する小中学校数はほぼ線形的に増加する傾向がみられた。

一方、市町村役場については、対象箇所は各地域で7箇所、2箇所、4箇所であった。 $M_w 8.7$ の場合、それぞれの地域で浸水した数は5箇所、1箇所、2箇所、割合は各地域の71%、50%、50%を占める。 $M_w 8.8$ では浸水する数は全地域で増加しない。 $M_w 8.9$ ではそれぞれ6箇所、2箇所、4箇所となり、割合は86%、100%、50%となった。南部では $M_w 8.7$ から増加することはないが、中部では $M_w 8.9$ の時点で、2箇所とも浸水する。 $M_w 9.0$ になると南部の浸水箇所が倍増する。北部では $M_w 8.8$ から $M_w 9.0$ に至るまでほぼ線形的に増加し、中部では $M_w 8.8$ から $M_w 8.9$ になると急増し、南部では $M_w 8.9$ から $M_w 9.0$ になると急増する。このように、それぞれの地域で異なる増加傾向がみられた。

これらの結果から、全地域に共通して $M_w 8.7$ から $M_w 8.8$ の間では、喪失拠点数はほとんど増加しなかった。和歌山県下全体でみると、 $M_w 8.8$ から $M_w 9.0$ に至るまで、喪失拠点数はほぼ線形的に増加した。

(2) 災害対応拠点における最大浸水深

抽出した $M_w 9.0$ 以下で浸水する小中学校75校と、役場13箇所を対象として、 M_w の変化に対する最大浸水深の変化を図-11に示す。 M_w の線形的な変化に対する最大浸水深の変化傾向を、線形増大(図中、約3割ずつ横ばいで推移)するものと、急増するものに分類した。

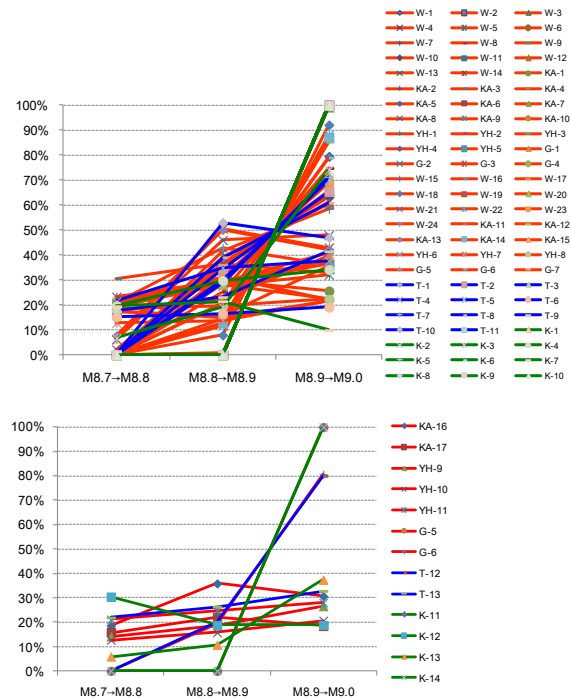
図11 災害対応拠点における $M_w 9.0$ に対する最大浸水深の変化割合(上: 小中学校, 下: 役場)(北部: 赤, 中部: 青, 南部: 緑)

図-11から、和歌山県下の対象とした小中学校75校中の16%である12校が M_w の線形的な変化に対して最大浸水深が線形的に増大し、69%の52校が $M_w 8.9$ を超えると急増しており、 $M_w 9.0$ に至るまでに既に増加率が1番高かったのは15%の11校であることがわかった。役場に関しては、13箇所中、線形的な増大と急増する数はいずれも38%の5箇所であり、 $M_w 9.0$ に至るまでに既に増加率が1番高かったのは23%の3箇所であった。

和歌山県南部に関しては、小中学校と役場における最大浸水深は M_w の変化に対して急増する割合が高く、それぞれ10校中8校で80%と4箇所中2箇所50%である。北部では、線形的に増大する数と割合がそれぞれ13%の7校と23%の3箇所、急増するのがそれぞれ69%の37校と15%の2箇所であった。また、 M_w が小さい段階での増加率が大きかったのは、19%の10校と62%の8箇所であり、この地域の役場は、 M_w が小さい段階で危険度が増大する傾向にあった。中部では、線形的に増大する数と割合がそれぞれ18%の2校と50%の1箇所、急増するのがそれぞれ64%の7校と50%の1箇所であった。 M_w が小さい段階での増加率が大きかったのは、小中学校のみで18%の2校であり、中部でも急増する拠点の割合が最も多くなった。

学校数の多い和歌山県北部について、地域別に細かく考察すると、由良町では、線形的に増大する数が最も多く、それぞれ8校中5校で63%、3箇所中3箇所の100%である。小中学校の残り3校は全て急増する。和歌山市の小中学校では急増する割合が最も多く、24校中19校の79%が急増し、残り5校中2校が線形的に増大して、

3校は M_w が小さい段階で増加する結果となった。また、御坊市も急増する数が多く、小中学校では7校中5校の71%、役場では100%の2箇所とも急増であった。

(3) 危険度レベルの変化

本研究では、浸水深を指標とした津波危険度として、松富ら⁶⁾および行谷ら⁷⁾を参考に、材木や車が流される0.5m、木造家屋の部分破壊1m、木造家屋の被害率が増大する3m、鉄骨建築物が被災する可能性がある5mを閾値とする。それぞれの閾値を超える危険度をレベル1, 2, 3, 4と定義する。図-12は、和歌山県下における浸水危険性のある小中学校と役場について、 M_w の変化に対する危険度レベルの変化を示しており、それらの数の割合を棒グラフにしたものである。

和歌山県下では、 M_w 8.7において各危険度レベルに該当する小中学校の割合は、レベル1が4%、2が9%、3が4%、であり、現想定下でも75校中約2割の学校で浸水することがわかった。 M_w 8.8では、危険度レベル1以上の割合が10%増え、レベル3以上が8%になる。 M_w 8.9では、危険度レベル1以上の割合が約45%に急増し、レベル3以上も18%に増える。さらに、 M_w 9.0ではレベル1以上が8割以上になり、レベル3以上が36%と非常に多くなった。この結果をみると、 M_w 8.8と M_w 8.9が境となって、危険度レベルの割合が変化していることがわかり、特に、 M_w 8.9と M_w 9.0では、浸水危険度が高い学校が多くなる。

役場について同様にみると、 M_w 8.7のときの危険度レベル1以上の割合は62%で、13箇所中6割強もの役場が現想定下で浸水することがわかった。しかも、23%が危険度レベル3ということで、庁舎の2階まで浸水する可能性が高い。 M_w 8.8ではレベル1以上が約6割となる。役場でも、 M_w 8.8と M_w 8.9が境となって危険度レベルが高くなり、 M_w 8.9ではレベル3以上が5割以上、しかも、約4割がレベル4になる。 M_w 9.0になると、すべての市町村役場が危険度レベル2以上になり、レベル3と4が約4割ずつと、危険度が非常に高くなることがわかった。

5. 結 論

和歌山県を対象に、想定津波規模の変化に対する災害対応拠点（小中学校、役場）の津波浸水危険度の変化を調べた。得られた主要な結論を以下に示す。

- (1) 現想定でも浸水深は小さいが浸水するところがあり、県全体で約28km²浸水する。 M_w が8.8では8.7とさほど変わらないが、8.9を超えると様相が異なってくる。
- (2) 最大浸水面積は地震規模には依存せず、場所に大きく依存し、中部と南部では、地震規模の増大にほぼ比例して増大したが、北部では急増した。
- (3) 北中部では M_w 8.9になると、南部では M_w 9.0になる

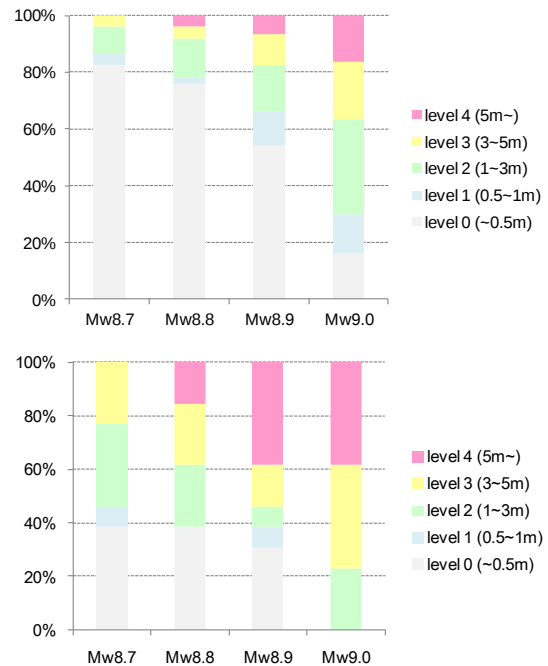


図-12 M_w の変化に対する災害対応拠点での危険度レベルの変化
(上: 小中学校, 下: 役場)

と、喪失する災害対応拠点数が急増する。

(4) M_w の線形的な変化に対して、拠点における浸水深の変化を見ると、グラフが横ばいの浸水深が漸増する拠点は16%であったが、69%は M_w が8.9を超えると浸水深が急増した。役場では、漸増と急増する数は、いずれも38%であった。

(5) 危険度レベルについては、 M_w 8.8と8.9の間に危険度が変わる境界があることがわかった。特に、役場については、対象とした13箇所のうち6割強が現在の想定下で浸水し、 M_w 9.0になると、すべての役場が危険度レベル2以上になることがわかった。

参考文献

- 1) 中央防災会議：東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会 中間とりまとめ、～今後の津波防災対策の基本的考え方について～，pp.1-14，2011。
- 2) 中央防災会議：南海トラフの巨大地震モデル検討会 中間とりまとめ，pp.1-71，2011。
- 3) 岩手県：<http://www.pref.iwate.jp/~bousai/taidoujoukyou/201103191500hinanbasyo.pdf>，(2011年3月19日)。
- 4) 宮城県：<http://www.pref.miyagi.jp/kikitaishaku/higasinihondaisinsai/pdf/hinanzyo0525.pdf>，(2011年5月25日)。
- 5) 中央防災会議：東南海・南海地震等に関する専門調査会 (第16回)，資料2，pp.1-31，2003。
- 6) 松富英夫・首藤伸夫：津波の浸水深、流速と家屋被害，海岸工学論文集，第41巻，pp.246-250，1994。
- 7) 行谷佑一・都司嘉宣：衛星画像から判明したIndonesia国Banda Aceh 市街地の2004年インド洋津波による流失家屋の分布，海岸工学論文集，第53巻，pp.286-290，2006。