

津波発生条件の不確定性が津波避難対策に与える影響の分析

～神奈川県相模湾沿岸におけるケーススタディ～

Analysis of influence by tsunami uncertainty for tsunami evacuation measures

阿 部 郁 男

ABE Ikuo

1. はじめに

東日本大震災発生以降、各地で防災対策の目標となる想定が見直され、その想定に従って新たな避難計画の作成や既存の計画の見直し等が実施されている。それらの見直しの一環として、避難シミュレーションによる検討が進められている自治体もある。例えば、鎌倉市では神奈川県が想定した明応地震による津波の避難シミュレーションの動画をホームページ上から閲覧できるようになっている。このような避難シミュレーションについては、東日本大震災の発生前から様々な研究が行われており、避難経路や場所という空間のモデル化に関する研究、あるいは避難者の意思決定のモデル化に関する研究が中心となって行われてきた。例えば、岡本ら（2007）では対象空間をポテンシャル場として捉えてポテンシャル分布による避難シミュレーションのモデルが提案されており、佐藤ら（2008）では避難者の意思決定に着目し、意思決定におけるコストの定式化手法による避難シミュレーションに関する研究が行われている。これらは避難者の行動に着目した研究であるが、津波からの避難に着目した場合には重要な要素である津波発生条件の変化による津波ハザードの不確定性に対する十分な検討が行われていない。来襲する津波の規模や到達時間が変われば、避難シミュレーションや避難計画の前提となる条件が大きく変わることが考えられるが、これまでに報告されている避難計画の策定や避難シミュレーションの事例では、行政機関などによって策定された限定されたモデルを対象に様々な検討が行われており、避難を検討するための重要な要因である津波ハザードの不確定性についての評価が十分に行われているとは言えない。東日本大震災では、限定された条件設定に基づく被害想定やハザードマップにより固定的な概念が植え付けられたことが被害拡大の一因として考えられており、現状で行われている対策では、東日本大震災の教訓が津波避難対策に適切に反映されているとは言い難い。

そこで、本研究では津波の発生条件を変化させた、所謂、津波ハザードの不確定性に関する考慮が津波避難対策の検討に与える影響について、その具体例をケーススタディとして示すことにより、固定された津波発生条件に基づく避難計画立案の危うさを指摘することを目的とした。

2. 対象地域と津波シミュレーションの条件

本研究の対象地域は神奈川県相模湾沿岸の逗子市、鎌倉市および藤沢市とした。神奈川県では2012年に津波被害想定が実施され、その想定に基づいて2013年に市ごとに津波ハザードマップが作成、公開されている。それらのハザードマップでは対象地域への最大クラスの津波として明応型地震と慶長型地震による津波の浸水範囲が記載されており、さらに相模トラフを震源とする想定南関東地震による津波について、到達時間が最も早いケースであるとして、これらのケースにおける各地域の海岸への津波到達時間が記載されている。

前述の通り、津波避難計画の策定等のために津波の被害想定や避難シミュレーションが行われているが、これらの検討では対象となる津波が限定されたモデルとなっており、避難計画策定の重要な要素である津波発生状況の不確定性による影響が十分に検討されないまま利用されている。本研究では、はじめに津波発生状況の不確定性によって大きく変化する津波ハザードを明らかにするため、研究対象地域において、浸水範囲、浸水深および到達時間について津波発生条件を変化させた津波浸水シミュレーションを実施した。津波シミュレーションにおける領域設定を図1に各領域の諸元を表1に示した。今回のケーススタディでは、表1に示すように最詳細50mメッシュの地形データを利用し、小谷ら（1998）で提案されている土地利用状況に合わせた粗度を設定して非線形・浅水理論に基づく計算を行った。

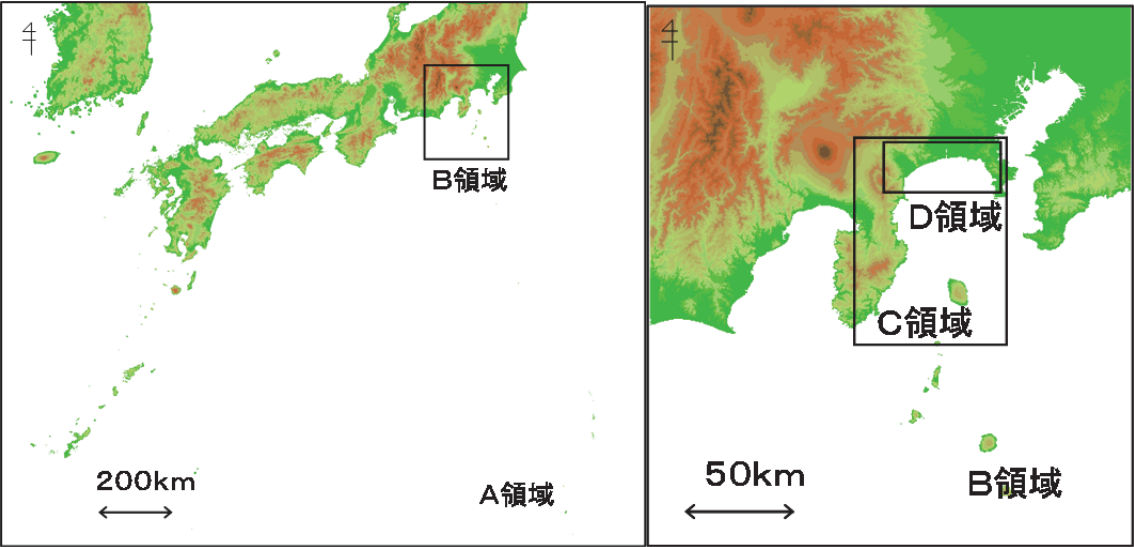


図1 津波シミュレーションでの領域設定

表1 津波シミュレーションにおける領域の諸元

領域名	メッシュサイズ	メッシュ数	計算条件
A	1350m	1300 × 1100	線形長波／陸側完全反射／領域外自由透過
B	450m	510 × 570	非線形・浅水理論／陸側遡上／土地利用に合わせた粗度を設定（小谷ら，1998）
C	150m	480 × 660	
D	50m	1050 × 450	

表 2 地震断層パラメータの設定条件

設定項目	設定内容
断層原点	北緯 34.7819, 東経 139.5862
地震断層の長さ	64km
地震断層の幅	25km, 35km
走向	332 度, 340 度
すべり量	8m, 16m, 24m, 32m
傾斜角	18 度, 25 度
すべり角	60 度, 90 度, 120 度
上端深さ	2km, 5km, 10km

対象地域である相模湾沿岸地域では、神奈川県被害想定で取り上げられているように相模トラフを波源とする津波が最も早く到達することは明らかである。そこで、今回の津波シミュレーションでは相模トラフで発生する津波を想定し、中央防災会議において新たに検討されている相模トラフのマグニチュード 8 クラスのモデルを参考として地震断層を設定した。中央防災会議（2013）の想定モデルでは最大すべり量を 32m と設定しているため、本研究でも最大すべり量を 32m とし、そのほかのパラメータについても中央防災会議（2013）のモデルを参考に表 2 に示すように設定し、条件の組み合わせは 288 ケースとなった。これらの地震断層パラメータの僅かな違いを地震発生直後に即座に推定することは難いため、今回の分析で津波来襲の状況が大きく変わる場所については、津波避難計画を策定する場合には対象となる地震・津波のモデルの選定について熟慮する必要があると考えられる。

3. 津波の発生条件による浸水範囲への影響評価

津波からの避難計画策定では避難対象範囲を決定することが重要である。そこで、津波発生条件の不確定性による浸水範囲の影響を評価するために 288 ケースの中から最大となる浸水範囲を抽出して、逗子駅、鎌倉駅および鵠沼海岸駅周辺の津波浸水予測図を図 2～図 4 に示した。また、これらの図には 2013 年に各市のホームページ上で公開されている津波ハザードマップで示された大よその浸水予測範囲と場所を判別するためのランドマークを加筆している。

津波ハザードマップで示されていた津波浸水予測範囲は、最大クラスとなる明応型地震および慶長型地震による津波浸水予測範囲を示しているが、図 2～図 4 に示すように相模湾内で発生する津波によっても条件を変更することで最大クラスの想定以上の津波浸水が予測されることが分かる。その中でも、津波発生条件の不確定性による浸水範囲への影響の相違は地域によって状況が異なり、相対的に平地が少ない鎌倉駅および逗子駅周辺では平地部分が完全に浸水し、山麓部まで津波が到達するという県による最大クラスの想定と同様の予測結果が得られた一方で、平坦な地形が広く続く藤沢市鵠沼では津波発生条件を変更することで津波浸水範囲が大きく拡大し、県の想定では浸水範囲外であった湘南学園、鵠洋小学校、柳小路駅にも津波が到達する可能性があることを示している。

このように、藤沢市鵠沼では、鎌倉駅・逗子駅周辺地域と比較して避難対象範囲の大小が津波の発生条件に大きく左右されることが分かり、避難対象地域を決定する際、対象とする地震・津波のモデルについて慎重に検討する必要があると考えられる。

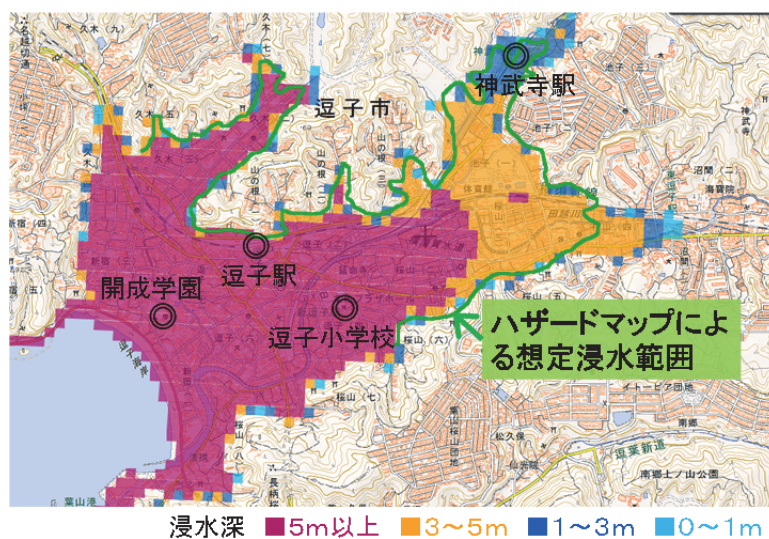


図2 逗子市における最大浸水範囲

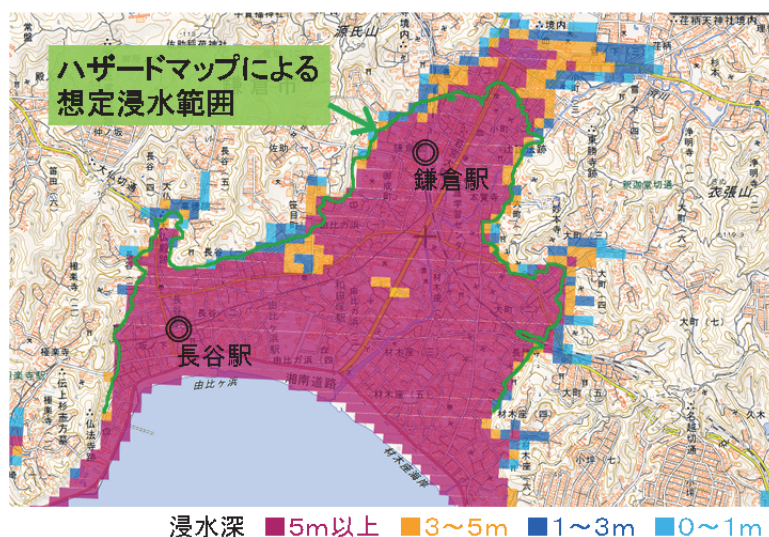


図3 鎌倉市における最大浸水範囲

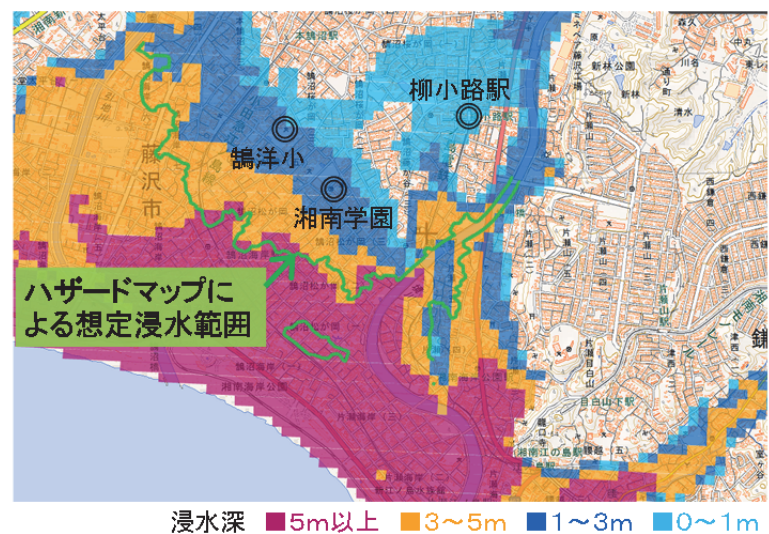


図4 藤沢市鵠沼における最大浸水範囲

4. 津波発生条件による浸水深への影響評価

津波からの避難計画策定においては何人が収容できるかという津波避難スペースの検討が必要であり、特に津波避難ビルにおいては何階から上が利用可能であるかによって避難スペースと収容可能人数が大きく変わる。この津波避難スペースを検討する際には想定される浸水深に相当する階に2を加えた階に設ければ安全側であるという考え方が国土交通省から示されており、避難施設の検討においては津波浸水深が重要な意味を持つため、避難スペースの検討においても津波発生条件の不確定性によって浸水深がどの程度変わってくるのかを理解しておくことは重要である。

例えば、逗子市のハザードマップでは津波避難ビルに指定されている逗子開成学園の建物の高さは12mと記されており、もし、津波の発生条件によっては12mを超える津波が来襲する可能性が考えられるのであれば、東日本大震災で建物の上階で犠牲となった事例を踏まえると想定を超える津波への対応も検討すべきである。なお、津波避難ビルへの収容人数と避難所要時間に着目した研究もすでに藤沢市を対象に行われており（関ら、2014）、このような津波避難ビルの収容人数を検討するためにも利用できる避難スペースが津波の発生条件によってどの程度の違いが生じるのかについても多様な津波発生条件を踏まえた分析が必要であると考えられる。

そこで、避難施設の高さについて想定を超える対策を検討すべき施設であるかを見分けることが可能なのかについて分析を行った。対象として、津波ハザードマップに施設高が記載されている逗子市の海岸付近の津波避難ビルを選択し、津波発生条件の不確定性による浸水深の違いを抽出し、結果を図5に示した。

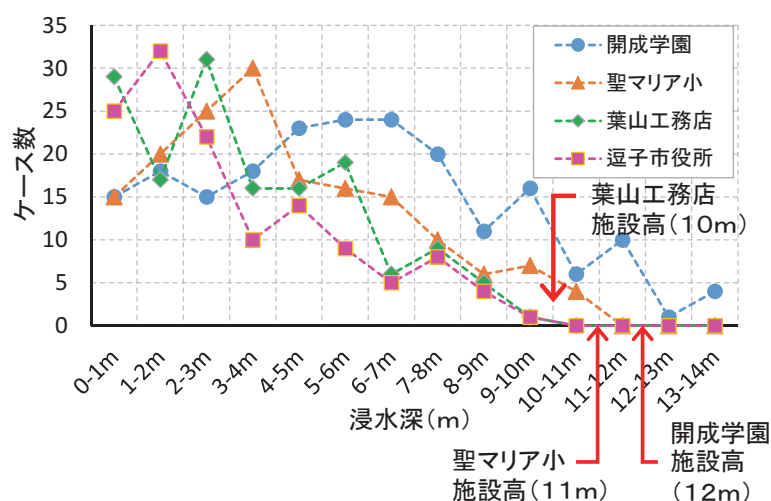


図5 逗子市の津波避難ビルと浸水深の関係

逗子市役所は施設高が18mと記載されているが、今回のデータでは浸水深が10mを超えるケースは存在しなかった。同様に津波避難ビルとして指定されている聖マリア小学校、葉山工務店でも施設高を超えて津波が浸水するケースは存在しないことが分かった。今回の分析の設定条件を超える津波が発生しないということは完全には言い切れないが、今回の条件設定の範囲内でも施設高が相対的に低い葉山工務店よりは開成学園の方が優先的に対策を検討すべきであることが分かる。また、ケース数で比較し

た場合でも、聖マリア小学校、葉山工務店、逗子市役所では浸水深 4m を超えた段階でケース数が減少するのに対して、開成学園では浸水深 4～8m にピークが存在することが分かる。よって、開成学園ではほかの3箇所と異なり、ピークとなる浸水深を生じるケースを詳細かつ個別に分析し、避難可能な高さをあらためて検討する必要があると考えられる。

このように多くのケースの津波シミュレーションを実施して、津波避難ビルや避難タワーの高さと比較を行うことにより、施設の高さについての目安や対策を検討する優先度を示すことが可能であると考えられる。

5. 津波の発生条件による到達時間への影響評価

津波避難計画の策定において、避難に利用できる時間を明確にすることが重要である。これまでの津波避難計画の策定や避難シミュレーションにおいては、避難に利用可能な時間を求めるために限定された条件に基づいた被害想定で津波到達時間が利用されており、今回の対象地域では、海岸線への津波到達時間や最大津波の到達時間が津波ハザードマップに記されている。津波到達時間は海岸線から内陸にかけて徐々に遅くなるため、海岸線への到達時間を一律で取り扱うと避難に利用できる時間を必要以上に短く取り扱うことになり、短時間で津波が来襲することを強調しすぎるあまりに避難することを諦めてしまったり、本来、地震の揺れが収まってから避難しても間に合う場所であるにも係らず揺れの最中に慌てて避難することによって負傷する等の事態が懸念される。或いは、想定される津波到達時間になっても津波が来ないという状況になったときに「津波が来ない」と誤解して避難を取りやめてしまう心配もあるため、定量的な分析に基づき正しく恐れることが重要であると考えている。そこで、定量的評価の一つとして対象地域内のいくつかの場所を選択して、津波発生条件の不確定性による津波到達時間の影響について分析した。津波の速度は水深に比例するということが一般的に知られており、浸水深と津波到達時間には一定の関係性があると思われるため、この分析では津波浸水深と到達時間の関係を示すこととした。

(1) 藤沢市鵠沼での津波到達時間評価

藤沢市鵠沼の中で、湘南学園と柳小路駅における津波の浸水深と到達時間の関係を図6および図7に示した。湘南学園も柳小路駅も藤沢市のハザードマップでは津波浸水区域外であるが、図4のように津波の発生条件によっては津波が到達することとなる。

今回、分析を行った湘南学園、柳小路駅ともに浸水深と津波到達時間の関係は累乗近似で表すことが可能であった。湘南学園での決定係数 R^2 は 0.7952 とあまり良好な数値ではなかったが、対象とするデータを浸水深 0.2m 以上に限定すると決定係数 R^2 は 0.9445 に改善される。柳小路駅での決定係数 R^2 も 0.9767 と高く、このような近似式によって大よその津波到達時間を設定することが可能であると考えられる。

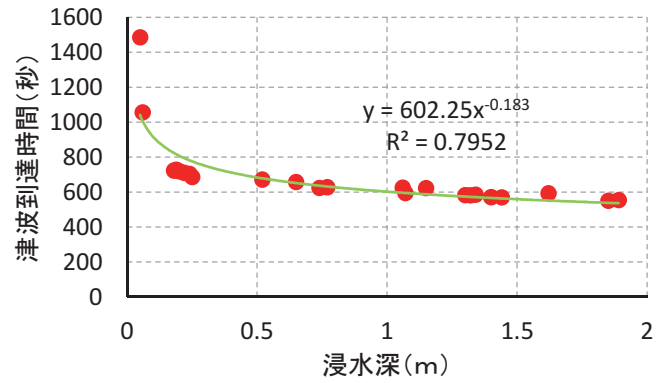


図6 湘南学園での浸水深と到達時間の関係

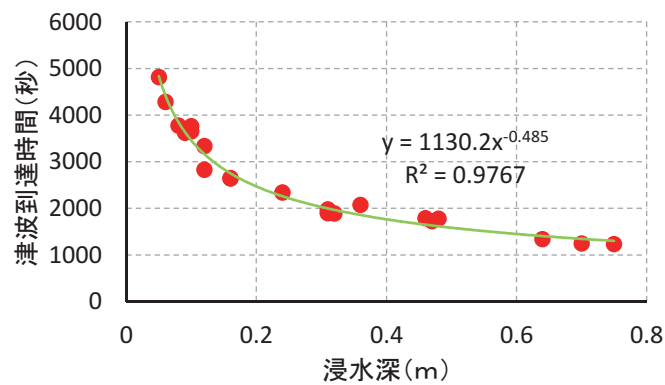


図7 柳小路駅での浸水深と到達時間の関係

(2) 鎌倉市での津波到達時間評価

鎌倉市では、鎌倉駅前と鶴岡八幡宮下の交差点付近における津波の浸水深と到達時間の関係を図8および図9に示した。鎌倉市においては累乗近似ではなく対数近似のほうが決定係数 R^2 の値が高くなる傾向があり、鎌倉駅前で $R^2=0.9292$ 、鶴岡八幡宮下で $R^2=0.9792$ となるので藤沢市と同様に近似式によって津波到達時間を設定することが可能であると考ええる。

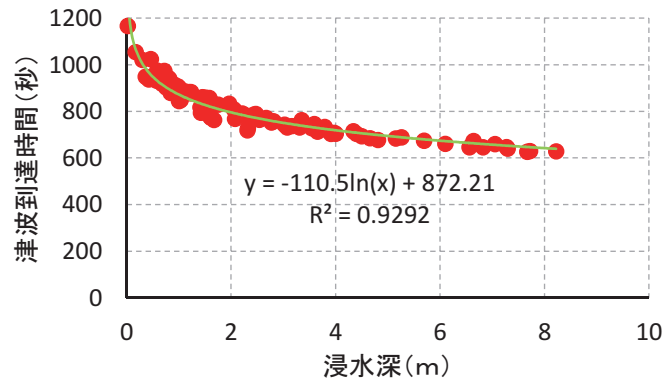


図8 鎌倉駅での浸水深と到達時間の関係

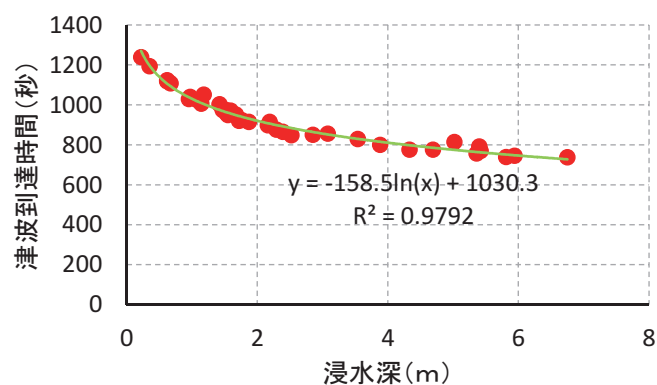


図9 鶴岡八幡宮下での浸水深と到達時間の関係

(3) 逗子市での津波到達時間評価

逗子市では、逗子小学校と神武寺駅における津波の浸水深と到達時間の関係を図10および図11に示した。逗子市においても藤沢市と同様に累乗近似のほうが決定係数 R^2 の値が高く、逗子小学校で $R^2=0.9299$ 、神武寺駅で $R^2=0.9278$ となるので近似式によって津波到達時間を設定することが可能であると考えられる。

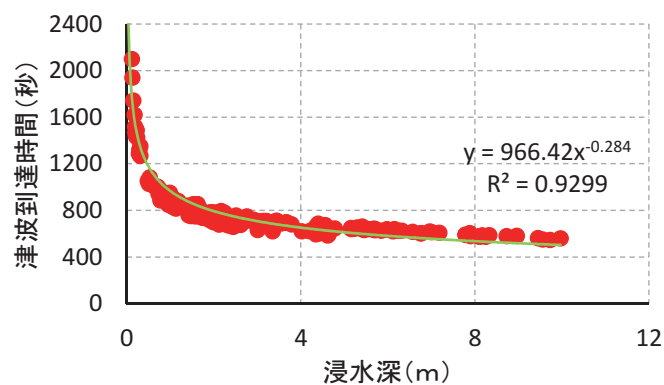


図10 逗子小学校での浸水深と到達時間の関係

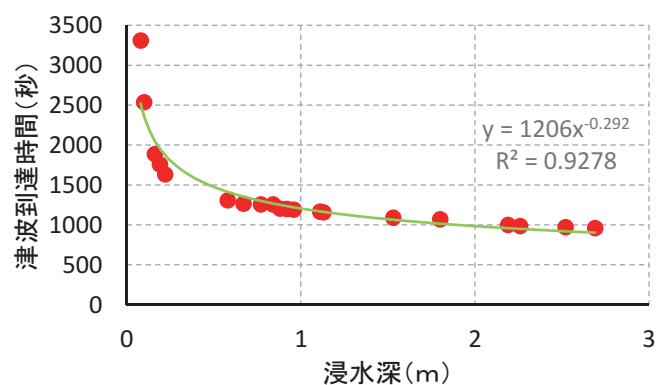


図11 神武寺駅での浸水深と到達時間の関係

6. 津波来襲特性の地域間での相対的比較

これまでに示した浸水深、到達時間という津波来襲特性が地域の中でどのように分布しているかについて比較を行うため、浸水するケースの中から津波到達時間および浸水深について最大値と最小値の差を抽出した。

藤沢市鵠沼における津波到達時間の差を図12に浸水深の差を図13に示した。湘南学園と柳小路駅を比較した場合、湘南学園では到達時間および浸水深の差は大きくはないが、柳小路駅は到達時間の差が大きいことが分かる。このことから、柳小路駅周辺の避難対策を考える上では浸水深よりも到達時間の設定に留意する必要があると考えられる。

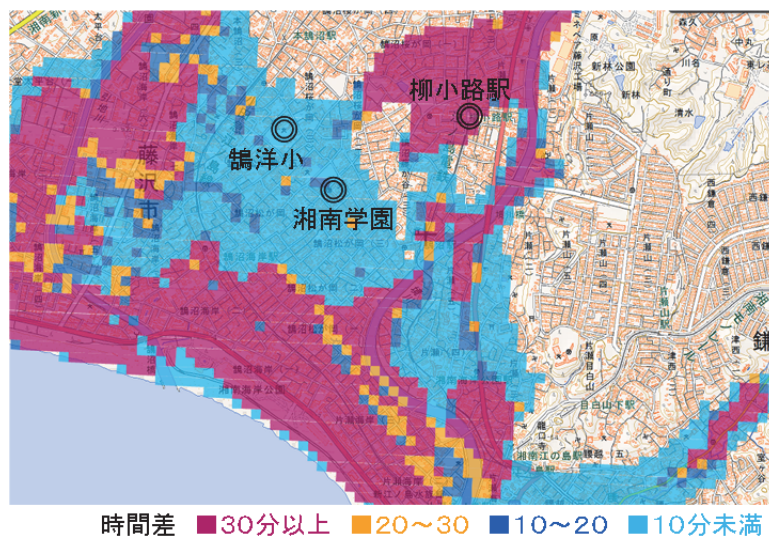


図12 藤沢市鵠沼での津波到達時間の差

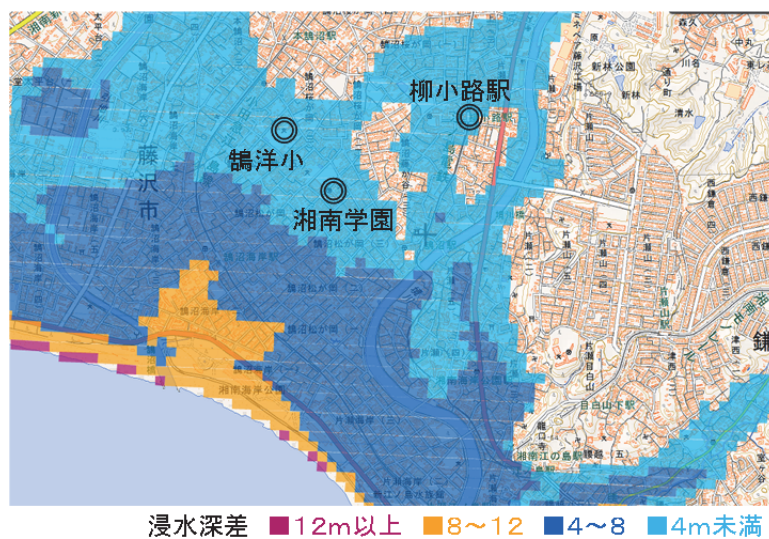


図13 藤沢市鵠沼での浸水深の差

鎌倉市における津波到達時間の差を図14に浸水深の差を図15に示した。浸水深は大よそ海岸からの距離に応じて小さくなっている様子が見られるが、津波到達時間に着目した場合は、長谷駅周辺や材木座一丁目から三丁目にかけて到達時間の差が大きい地域が分布することが分かる。鎌倉市においては、津波の到達時間に津波の不確定性や地域的な特性の違いが見られた。また、浸水深の差に着目した場合は、最大浸水となるケースと最小となるケースの差が12m以上と大きい地域が海岸付近に分布している様子が伺える。詳細な分析は行っていないが、地形と津波発生条件の関係によっては浸水深の差が大きくなっているものと考えられる。

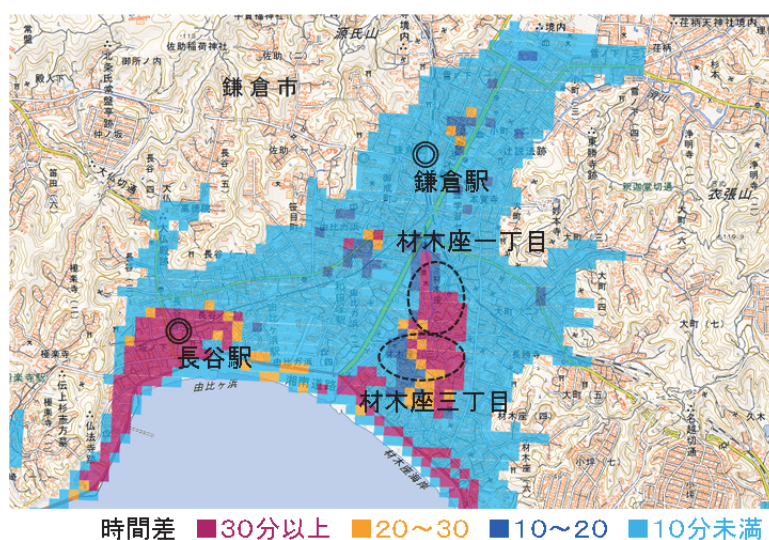


図14 鎌倉市での津波到達時間の差

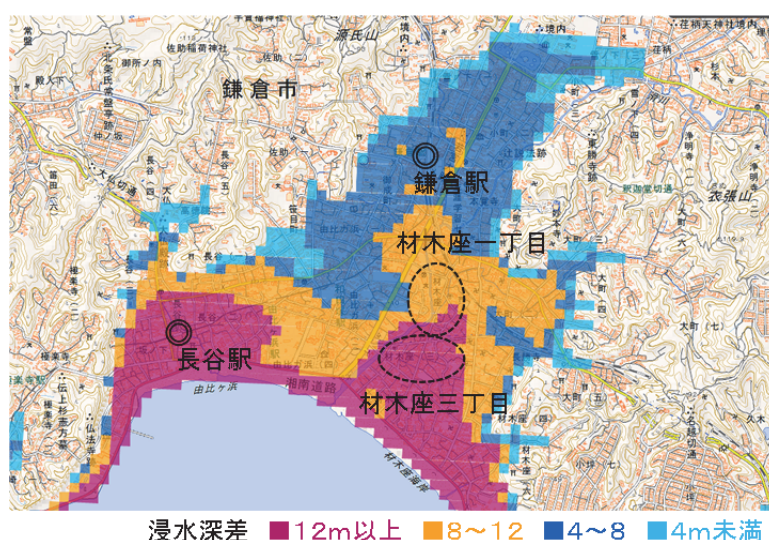


図15 鎌倉市での浸水深の差

逗子市における津波到達時間の差を図 16 に浸水深の差を図 17 に示した。逗子市においても鎌倉市と同様に浸水深は大よそ海岸からの距離に応じて小さくなっている様子が見られるが、津波到達時間に着目した場合は、逗子小学校や神武寺駅周辺に到達時間の差が大きい地域が分布することが分かる。

これらの津波到達時間の差が大きい地域では、津波避難対策を検討する上で地震・津波のモデルの設定によって到達時間が大きく変わってくる可能性があるので、避難対策を検討する場合には避難に利用できる時間の設定に留意する必要があると思われる。

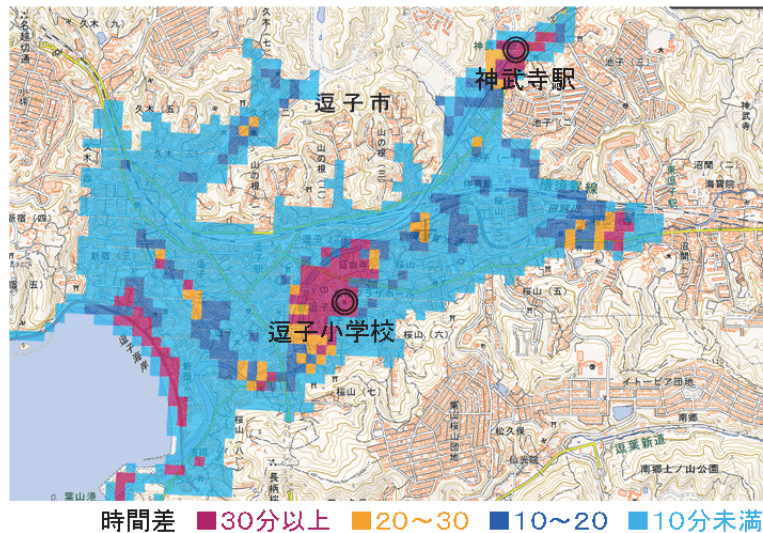


図 16 逗子市での津波到達時間の差

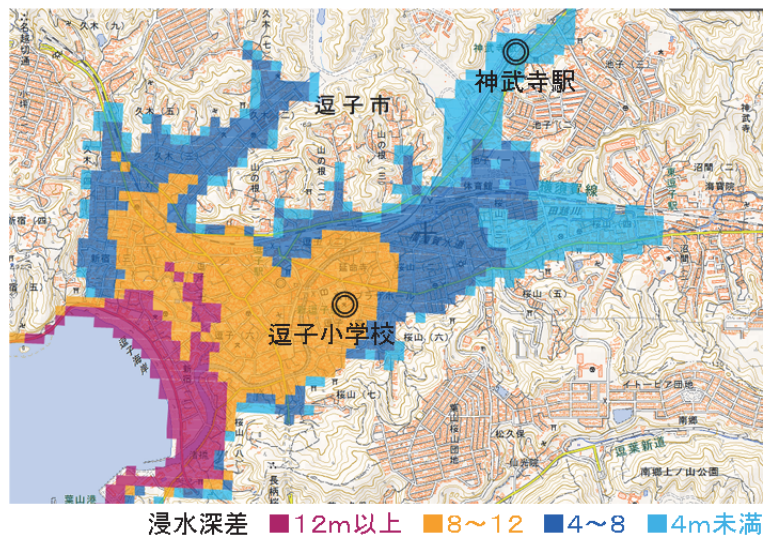


図 17 逗子市での浸水深の差

7. 定量的分析に要する計算時間

今回の検討では 288 ケースの津波浸水シミュレーションを行うことにより、特定の限定された条件設定による津波避難計画ではなく、より多くの津波発生状況を想定した津波避難計画を作成できる可能性があることを示すことができた。現在は、計算機の性能向上により PC に搭載される CPU でも短時間で津波シミュレーションを行うことが可能となっている。そこで、津波シミュレーションに要する計算時間を測定し、今回の検討で例示したような定量的分析が PC 利用によっても可能であることを示すため、表 1 に示す計算条件において津波シミュレーションに要する計算時間を計測した。計算時間の計測は再現時間を 90 分と設定して行った。また、計測に利用した計算環境を表 3 に示した。

表 3 津波シミュレーションに利用した計算環境

	Server	PC
CPU	Xeon E5-2670	Core -i7 4785T
クロック数	2.60GHz	2.20GHz
CPU 数	2	1
メモリ	64GB	16GB
同時実行プログラム数	32	8
288 ケースの計算完了時間	18.2 時間	80.4 時間

表 3 に示す Server では 288 ケースの計算を 18.2 時間で完了することができ、PC でも 80.4 時間で完了することができた。PC に登載した Core-i7 4785T はノート PC にも登載できる省電力の CPU である。ノート PC 程度の性能であっても多くのケースを対象とした津波シミュレーションが実行可能であることを示す結果が得られた。なお、コンパイラにはインテル Fortran コンパイラを利用し、-O3 -i-static オプションを設定した。

8. まとめ

今回の検討で示したような津波の発生条件を変化させた定量的な解析を実施することで、自治体による想定を超える条件設定をした場合であっても、避難対象地域の設定に重要な情報となる浸水範囲の拡大に留意すべき地域、津波避難ビルなど避難スペースの設定に重要な情報となる浸水深の違いに留意すべき地域、さらには避難に利用できる時間の設定に重要な情報となる到達時間の違いに留意すべき地域など、津波からの避難計画を検討するべき際に留意するべき点を地域ごとに明らかにすることができると考えられ、今回の検討では相模湾東岸の逗子市、鎌倉市および藤沢市を対象にその結果を例示することができた。

また、それぞれの場所ごとに浸水深と到達時間の関係を関数近似することが可能であり、この近似式を利用して津波の到達時間の目安を設定できる可能性があることも示した。さらに、これらの解析は、近年の計算機の向上により短時間かつ低コストで実現できることも実測値として示すことができた。

東日本大震災を教訓として各地で地震・津波の想定が見直され、津波ハザードマップや津波避難計画

作り、防災教育などが進められているが、それらは相変わらず限定された数ケースの条件に基づいて実施されている。これまで例示してきたように津波の発生条件が変わることにより地域ごとに津波の被害も変わってくる。近年の計算機の性能向上により数多くの津波シミュレーションが短時間、低コストで実現可能となっており、津波の発生条件の変化による津波ハザードの変化を具体的に示すことが可能となっていると考えられる。このような定量的な分析に基づく情報を避難計画策定や防災教育の現場で積極的に開示して、リスクコミュニケーションを図り、現在、想定されている規模を超える津波が発生した場合でも「想定外」とならないような対策を検討する必要があると考えている。

参考文献

- 鎌倉市「津波避難シミュレーション動画」2013年（https://www.city.kamakura.kanagawa.jp/sougoubousai/tsunami_simulation.html、2015年5月20日閲覧）。
- 岡本陸、目黒公郎（2007）「避難行動シミュレーションに基づく津波避難困難度マッピングシステムの開発」（https://www.jstage.jst.go.jp/article/seisankenkyu/59/3/59_3_295/_pdf、2015年5月14日閲覧）。
- 佐藤太一、河野達仁、越村俊一、山浦一保、今村文彦（2008）「認知的不協和を考慮した津波避難行動モデルの開発：避難シミュレーションへの心理的要素の導入」『地域安全学会論文集』No.10、pp.393-400
- 神奈川県「地震被害想定調査」2015年（<http://www.pref.kanagawa.jp/cnt/f5151/p15579.html>、2015年4月8日閲覧）。
- 逗子市「津波ハザードマップ」2013年（<http://www.city.zushi.kanagawa.jp/syokan/bousai/tsunami.html>、2015年4月9日閲覧）。
- 鎌倉市「津波ハザードマップ」2013年（<https://www.city.kamakura.kanagawa.jp/sougoubousai/2503tshunamihazardmap.html>、2015年4月9日閲覧）。
- 藤沢市「津波ハザードマップ」2013年（<https://www.city.fujisawa.kanagawa.jp/bousai/bosai/bosai/hazardmap/tsunami/h25hazardmap.html>、2015年4月9日閲覧）。
- 中央防災会議首都直下地震モデル検討会（2013）「首都直下のM7クラスの地震及び相模トラフ沿いのM8クラスの地震等の震源断層モデルと震度分布・津波高等に関する報告書」、45p.
- 小谷美佐、今村文彦、首藤伸夫（1998）「GISを利用した津波遡上計算と被害推定法」『海岸工学論文集』第45巻、pp.356-360
- 国土交通省「津波避難施設に関する既存設計指針等の考え方」（<http://www.mlit.go.jp/common/000990974.pdf>、2015年5月18日閲覧）。
- 関脩大、村尾修、杉安和也（2014）「藤沢市片瀬西浜・鵠沼地区における津波避難ビル収容能力を考慮した津波避難計画」『地域安全学会論文集』No.24、pp.123-132

