

マルチハザード・リスクの実用的な 評価手法の提案

田村 敬一¹・永田 茂²・高原 秀夫³・若林 亮⁴

¹国土交通省国土技術政策総合研究所 (〒305-0804 茨城県つくば市旭 1 番地)

E-mail: tamura-k92ta@nilim.go.jp

²株式会社イー・アール・エス, リスクマネジメント部 (〒107-0052 東京都港区赤坂3丁目11-15 赤坂桔梗ビル)

E-mail: nagata@ers-co.jp

³鹿島建設株式会社 土木設計本部 (〒107-8502 東京都港区赤坂6丁目5-30 KIビル)

E-mail: takaharh@kajima.com

⁴株式会社イー・アール・エス, リスクマネジメント部 (〒107-0052 東京都港区赤坂3丁目11-15 赤坂桔梗ビル)

E-mail: wakabayashi@ers-co.jp

本論文は、これまでの個別の自然災害に対するリスク評価手法に関する成果を活用することにより、マルチハザードに関する実用的なリスク評価手法の提案を行うものであり、本研究では、現状利用可能なデータを用いて、特に、地震、洪水等の異なる自然災害によるリスクを、例えば、建物被害額といった共通の尺度で表し、複数の自然災害の影響を実務的に評価することに重点を置いた。また、提案手法に基づき、実存の地域を対象とした地震、洪水及び高潮のマルチハザードに関するリスク評価の試算結果を示した。

Key Words : multi-hazard, risk assessment, earthquake, flood, tidal wave

1. はじめに

地震や台風などの自然災害は、災害の発生頻度や規模、さらには災害発生に伴う被害規模に関する不確定性が存在することから、確率論的な考えを取り入れた災害リスク評価手法が導入されつつある。特に、自然災害外力(ハザード)に関する不確定性が大きいことから、外力の発生確率や再現期間を確率論的に扱ったリスク評価が行われるようになっていく。近年、国の機関や自治体から公表されている洪水ハザードマップ¹⁾や防災科学技術研究所から公表されている確率論的地震動予測地図²⁾は、それぞれ、洪水に伴う浸水深、地震動強さの発生確率や再現期間を明示しており、確率論的リスク評価の推進に貢献している。また、国土交通省が作成した治水経済調査マニュアル(案)³⁾は、洪水ハザードマップを用いた確率論的な被害評価手法を示したマニュアルであり、治水防災事業の事業評価手法として広く活用されるようになっていく。

このように、個別の自然災害に関するリスク評価手法に関しては、ハザード評価手法を含め多くの研究や実務への応用が進められている状況である。一方、日本の多

くの地域は、台風、豪雨、豪雪、地震、火山噴火など異なる災害に襲われることが多く、適切な事前・事後の防災対策を立案するためには、異種の自然災害(以下ではマルチハザードと呼ぶ)に対するリスク評価手法に関する検討を進める必要があるものと考ええる。

本論文は、これまでの個別の自然災害に対するリスク評価手法に関する成果を活用することにより、マルチハザードに関する実用的なリスク評価手法の提案を行うものである。すなわち、本研究では、現状利用可能なデータを用いて、地震、洪水等の異なる自然災害によるリスクを、例えば、建物被害額といった共通の尺度で表し、複数の自然災害の影響を実務的に評価することに重点を置いた。したがって、解析に用いるデータや個別のリスクの評価手法の高精度化、各災害によるリスク評価の精度の平準化等については、別途検討が必要である。また、本論文では、実存の地域を対象とした地震、洪水及び高潮のマルチハザードに関するリスク評価の試算例を示した。

2. マルチハザード・リスク評価に関する既往の

取組み

我が国における各種災害リスクの総合的評価指針としては、総務省消防庁の「地方公共団体の地域防災力・危機管理能力評価指針」がある⁴⁾。ただし、ここでは災害の種別ごとのリスク評価を目的としたものであり、マルチハザードを考慮したものではない。

一方、他国の事例を見ると、米国では⁵⁾ Disaster Mitigation Act(2000)が発効したことにより、FEMAが各州に「州防災基本計画」(Standard State Mitigation Plan)を作成・提出することを義務付けている。この州防災基本計画の最初のステップが、地域で起こるマルチハザードに対するリスクと地域の脆弱性の総合的な評価(RVA: Risk and vulnerability assessment)である。このような背景のもと、各州でRVAが盛んに行われるようになっていくが、その一例としてNOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration)が作成した複数の自然災害に対するRVAツールであるCVAT(Community Vulnerability Assessment Tool)と呼ばれる手法が用いられている。

このほか、米国のFEMAではMultihazard Information Platform⁶⁾を立ち上げ、洪水、火災、地震、ハリケーン、竜巻に関するリスク情報や過去の災害履歴データベースを公開している。

3. マルチハザード・リスク評価方法の提案

本論文で対象とするハザードは、地震災害(構造物の被害、火災、津波)、洪水、高潮災害(高潮に伴う水害)等とし、地域における自然災害の実状を考慮し適宜検討対象とするものとする。

一方、災害リスクに関しては多種多様な定義があるが⁷⁾、本論文では直接損失と間接損失を考えるものとする。直接損失とは、建物、公共施設(道路、鉄道など)、ライフライン等が損傷・損壊するような物的損失や人的損失であり、間接損失には、直接被害から派生する救護・消防・復旧活動の障害、生活支障、企業の営業停止に伴う経済損失、精神的苦痛など様々な要因が考えられる。

(1) 個別災害に関するリスク評価

個別災害のリスク評価では、リスクカーブ⁷⁾を用いるものとする。リスクカーブは、様々な規模の損失の可能性を年超過確率(1年間にその損失以上の損失が発生する確率)で示したものであり、年間損失期待値は対象地域で起こりうる損失の全ての可能性を考慮した、いわば損失の平均的情報である。

リスクカーブと年間損失期待値の関係は、リスクカーブと縦軸、横軸で囲まれた面積が、年間損失期待値となる(図-1)。具体的には表-1に示す方法で災害外力の年超過確率に、その外力により発生する損失を乗じた値が個別災害の年間損失期待値となる。

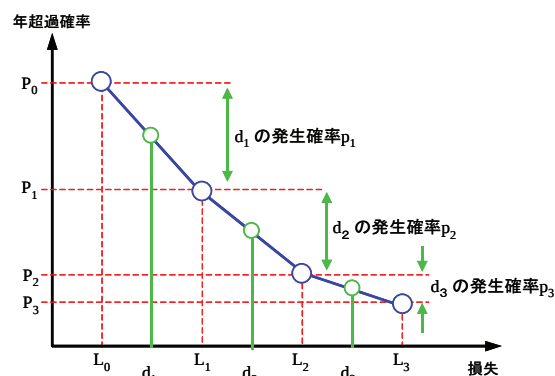


図-1 リスクカーブの例
(縦軸の超過確率の逆数が再現期間)

表-1 年間損失期待値の算定方法

年超過確率	損失	平均損失	生起確率	条件付年損失期待値
P_0	L_0	$d_1=(L_1+L_0)/2$	$p_1=P_0-P_1$	$d_1 \times p_1$
P_1	L_1	$d_2=(L_2+L_1)/2$	$p_2=P_1-P_2$	$d_2 \times p_2$
P_2	L_2	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
P_m	L_m	$d_m=(L_{m-1}+L_m)/2$	$p_m=P_{m-1}-P_m$	$d_m \times p_m$
年間損失期待値				$\sum (d_i \times p_i)$

(2) マルチハザードに関するリスク評価

マルチハザードのリスク評価では、個々の災害に対してリスクカーブを算出し、異種の災害を統合したマルチハザードのリスクカーブを求めることとする。

マルチハザードのリスクカーブは、個別災害の直接損失や間接損失の確率分布を評価し、これらを重ね合わせた損失の確率分布を求めて算定することができる。例えば、個別災害のリスクカーブが、再現期間ごとの離散値で与えられているような場合、以下に示す簡便な手順で近似解を求めることができる。

洪水による死亡者数

再現期間 (年)	年超過確率 $P_{洪水}$	年間発生確率 $p_{洪水}$	損失 (死亡者数)
30	0.033	0.022	10
50	0.020	0.012	50
100	0.010	0.008	150
500	0.002	0.002	250

地震による死亡者数

再現期間 (年)	年超過確率 $P_{地震}$	年間発生確率 $p_{地震}$	損失 (死亡者数)
30	0.033	0.022	0
50	0.020	0.012	2
100	0.010	0.008	70
500	0.002	0.002	500

統合化した死亡者数

損失 (死亡者数)	年間発生確率	年超過確率 $P_{統合}$
500	地震 ₅₀₀	0.002
250	洪水 ₅₀₀	0.002
150	洪水 ₁₀₀	0.008
70	地震 ₁₀₀	0.008
50	洪水 ₅₀	0.012
10	洪水 ₃₀	0.022
2	地震 ₅₀	0.012
0	地震 ₃₀	0.022

①再現期間ごとに算定された損失を、災害に係わらず大きい順に並べ替える。

②損失の大きい順に、再現期間に応じた年間発生確率を累積し、統合された年超過確率を求める。

③統合された年超過確率と損失をグラフ上にプロットする。

ここで、年間発生確率と年超過確率の関係は式 (1) で求めることができる。

$$P_1 = p_1 \quad (1)$$

$$P_2 = 1 - (1 - P_1)(1 - p_2)$$

$$P_3 = 1 - (1 - P_2)(1 - p_3)$$

.....

$$P_i = 1 - (1 - P_{i-1})(1 - p_i)$$

ここで、 P_i ：降順に並べられた i 番目の損失の年超過確率(= $1/\text{再現期間}$)、 p_i ：降順に並べられた i 番目の損失の年間発生確率である。

異なる災害を統合したリスクカーブの算定例を、図-2 に示す。

これにより、マルチハザードの年間損失期待値だけでなく、統合したリスクカーブの形状からリスクの特徴を把握することができる。例えば、図-3に示す年間損失期待値は同じであるA、B地区の場合、A地区では軽微な損失は起こりやすいが、大規模な損害は起こりにくく、B地区の場合、通常は損失が生じにくいがまれに大きな損失が生じる可能性があることが分かる。

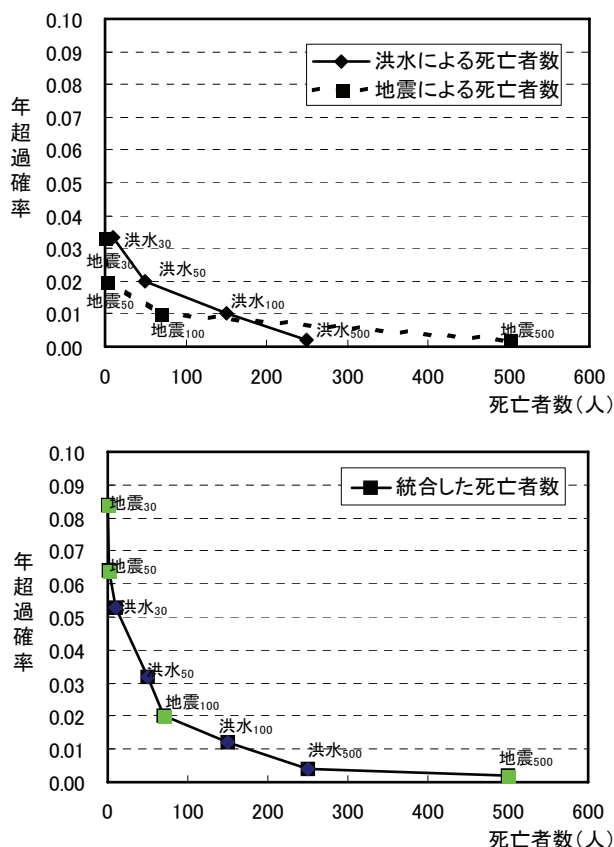


図-2 異なる災害を統合したリスクカーブの算定例（地震災害と洪水の死亡者数の統合）

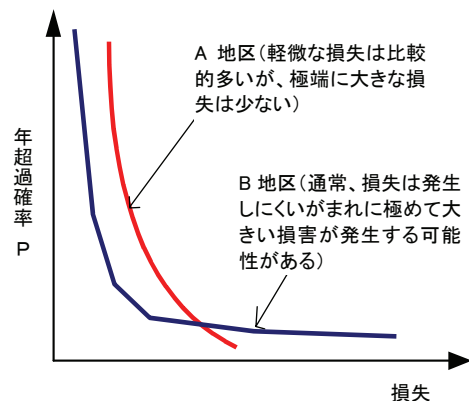


図-3 リスクカーブとリスクの特性

4. 試算

本章では、提案手法に基づいて、マルチハザード・リスクの試算を行うこととする。

試算対象地域は、太平洋側の沿岸に面した都市であり、

わが国の中では地震災害リスクが高いとともに、高潮災害の履歴もある。また、試算対象地域内には河川が流下しており、洪水災害に対するリスクも存在する。対象とする個別災害は地震、洪水及び高潮の3種類とし、洪水災害に関しては地域内を流れる1つの河川のみを評価対象とした。

また、リスク評価では、直接損失として人的損失（死者数）、建物被害額（建物が損傷・倒壊・焼失・水損などした場合の被害額）、間接損失として生活支障者数を評価対象とした。

各災害のハザード及び損失評価を行う際の評価単位は、50mメッシュ単位とし、再現期間は30年に1回、50年に1回、100年に1回の3種類とした。

(1) 基礎データの収集

基礎データのうち、基盤データとなる地図については、国土地理院の数値地図2500と総務省統計局の町丁・字等境界データを用いることとした⁸⁾。

人口データについては、平成12年度の国勢調査結果をメッシュ単位に集計した「地域メッシュ統計」と呼ばれる500mメッシュ単位に集計された統計データの公開データを使用した。

建物データについては、1kmメッシュの建物棟数データを用いることとし、自治体による住宅・土地統計調査結果を加味して、構造種別（木造建築物、非木造建築物）及び建築年代の分類を行った。

標高データは、国土地理院が作成した50mメッシュ標高データを用いた。

収集したデータのうち、基盤データに相当する地図データや人口、建物棟数、標高のデータについて図-4～図-8に示す。

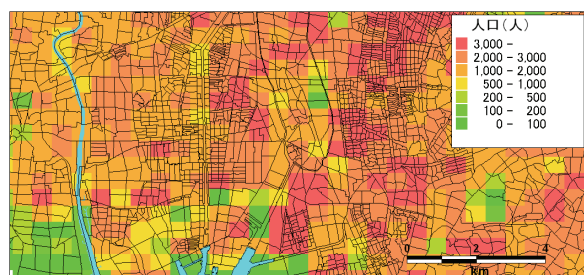


図-4 対象地域の人口分布（500mメッシュ単位）

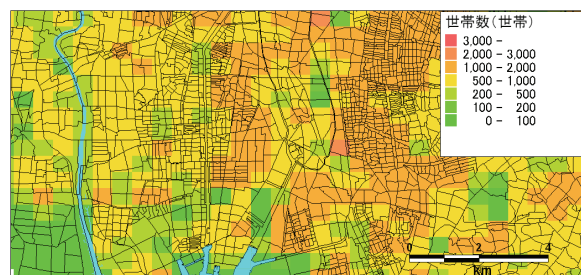


図-5 対象地域の世帯数分布（500mメッシュ単位）

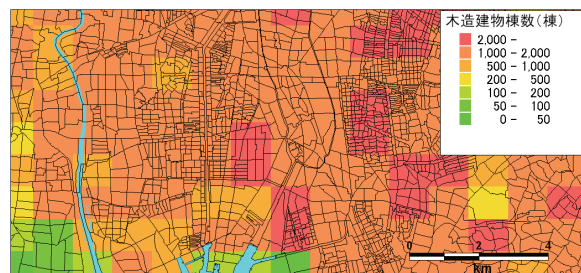


図-6 対象地域の木造建物棟数分布
（1kmメッシュ単位）

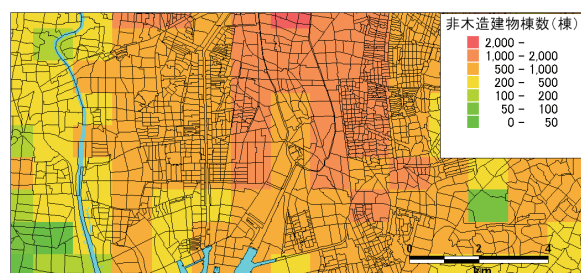


図-7 対象地域の非木造建物棟数分布
（1kmメッシュ単位）

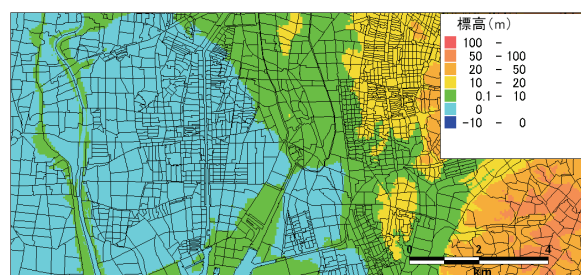


図-8 対象地域の標高
（50mメッシュ単位）

a) 地震リスク

地震ハザードマップの作成では、まず、地震発生の時間依存性（2001年1月から50年間）を考慮した工学的基盤での最大速度を算定した。地震ハザード解析では、活断層に起因する地震、プレート境界型地震、背景地震を区分し、等確率のハザードマップを作成した。次に、表層地盤条件及び表層地盤による最大速度の増幅率については参考文献⁹⁾を参照し、工学的基盤での最大速度に

増幅率を乗じることによって地表面最大速度のハザードマップを作成した。

図-9に最大速度の表層地盤増幅率分布図を示し、地表面における最大速度の計算結果を図-10に示す。なお、再現期間に関しては式(2)により、地震発生をポアソン過程と仮定した場合の概算値を示している。

$$T = -t / [\ln(1 - P)] \quad (2)$$

ここで、 T は地震発生をポアソン過程と仮定した場合の再現期間(年)、 t は地震発生の時間依存性を考慮した場合の対象年数、 P は地震発生の時間依存性を考慮した場合の発生確率である。

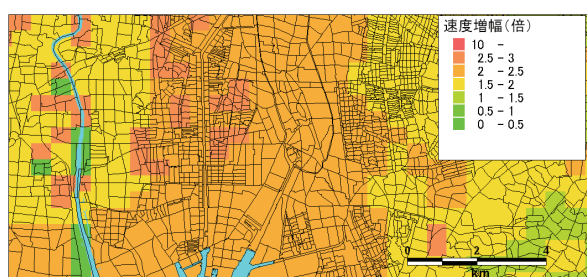


図-9 対象地域における最大速度の表層地盤増幅率⁷⁾

算出した地表面最大速度のハザードマップを基に、リスク評価を行った。これらのうち、火災に関する項目と、人的損失に関する項目は、地震が発生する季節や時間帯、風速を設定する必要があるため、これらの条件を「春・秋」、「昼12時」、「7m/s」と仮定した。

リスク評価は、基本的に中央防災会議「地震被害想定支援マニュアル」¹⁰⁾を参考にしている。建物被害額は、メッシュごとに木造・非木造建物の震動被害棟数、液状化による被害棟数、地震後火災による焼失棟数を求め、これに1棟当たりの損失額を乗じることによって算定した。人的損失は、メッシュごとの木造・非木造建物の全壊率、焼失棟数にそれぞれの滞留人口を乗じることにより算定した。

生活支障者数は、メッシュごとの災害発生時の避難率に人口を乗じることによって算定した。

100年に1回の地震に対する建物被害額、人的損失、生活支障者数の算出結果を図-11に示し、それぞれの項目の年間損失期待値分布を図-12に示した。

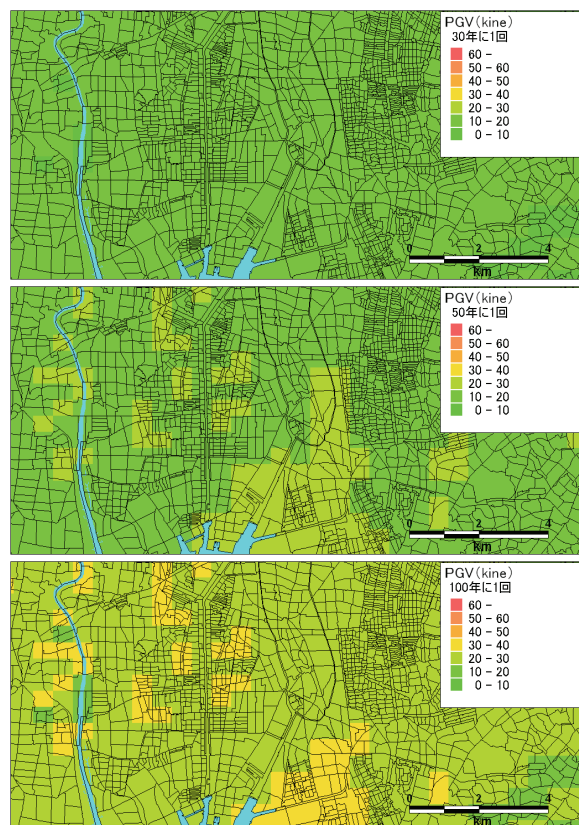


図-10 地震ハザードマップの算定結果（上段：30年に1回，中段：50年に1回，下段：100年に1回）

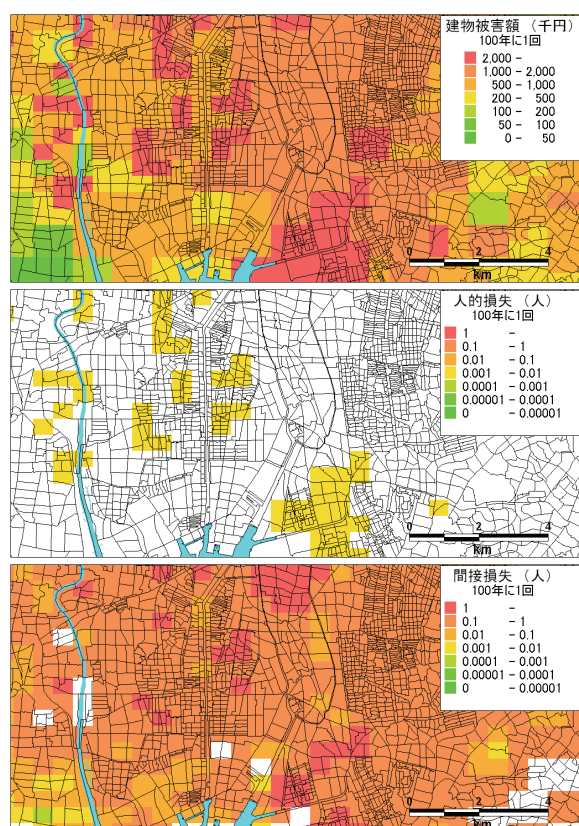


図-11 100年に1回の地震による損失評価結果（上段：建物被害額，中段：人的損失，下段：生活支障者数）

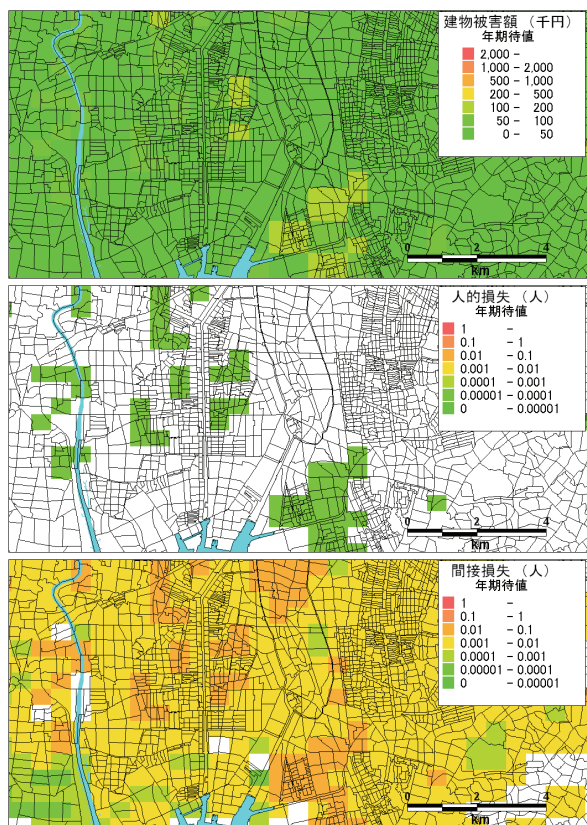


図-12 地震による年間損失期待値（上段：建物被害額，中段：人的損失，下段：生活支障者数）

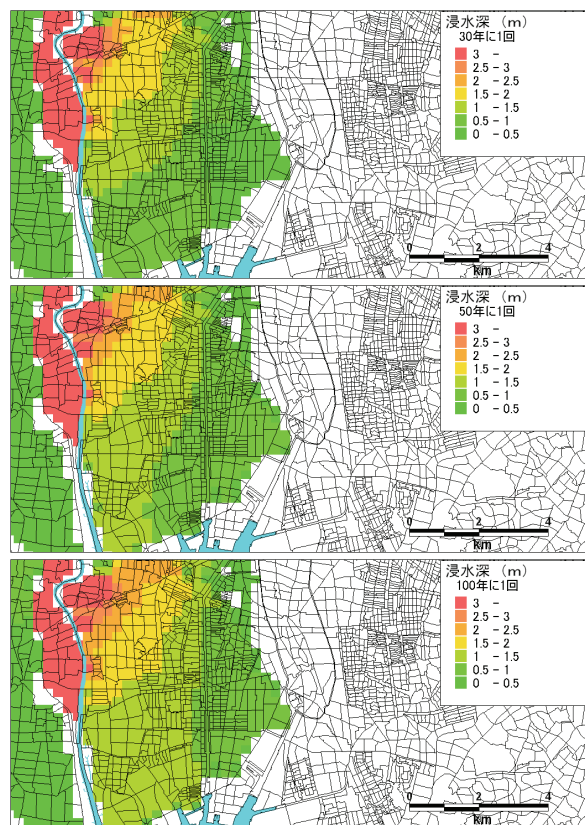


図-13 洪水ハザードマップの算定結果（上段から30, 50, 100年に1回）

b) 洪水リスク

洪水ハザードマップ（浸水深マップ）に関しては、上述した3つの生起確率毎に治水経済調査マニュアル（案）に示されている方法によって氾濫シミュレーションを実施した。その結果に基づき、GISを用いて各メッシュの浸水深として評価することとした。洪水ハザードマップを図-13に示す。なお、氾濫シミュレーションの手順は、参考資料1として文末に掲載した。

洪水ハザードマップを基にリスク評価を行っているが、建物被害額の評価では治水経済調査マニュアル（案）に示された浸水深別の建物被害率（参考資料2）を参考にした。まず、建物被害額は、メッシュ毎の浸水深から木造及び非木造建物の被害率を求め、これに建物棟数と評価額を乗じることによって算出した。人的損失に関しては、メッシュ毎の浸水深から木造及び非木造建物の被害率を求め、滞留人口を乗じることによって算出した。また、生活支障者数は、床上浸水深となる建物棟数に滞留人口を乗じることによって算出した。100年に1回の洪水に対する建物被害額、人的損失、生活支障者数の算出結果を図-14に示し、それぞれの項目の年間損失期待値分布を図-15に示す。

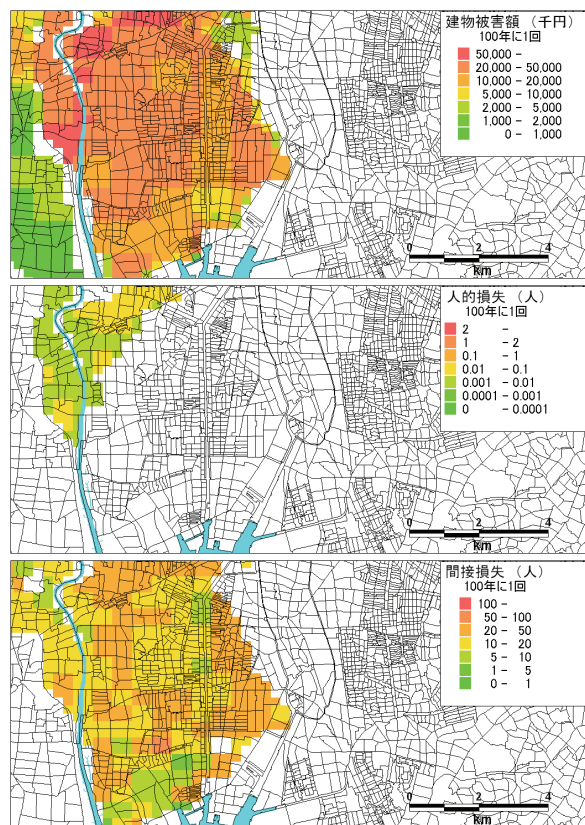


図-14 100年に1回の洪水による損失評価結果（上段：建物被害額，中段：人的損失，下段：生活支障者数）

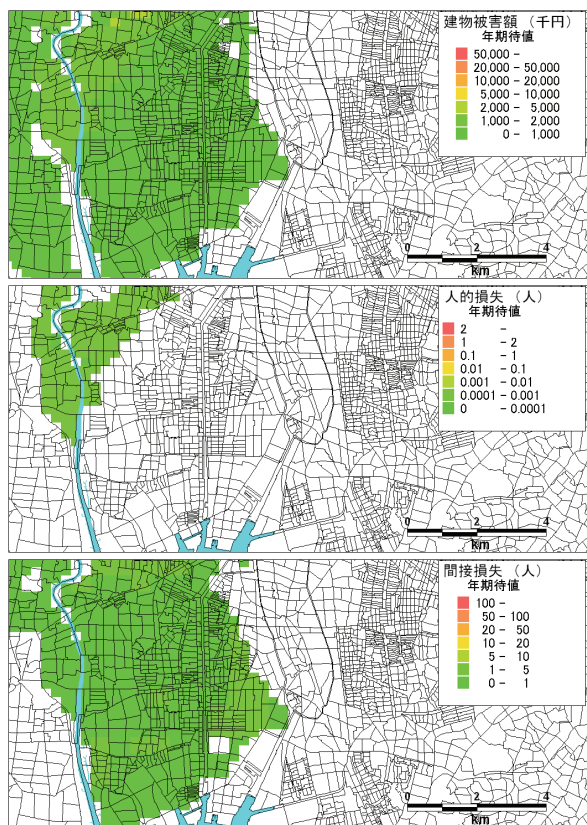


図-15 洪水による年間損失期待値（上段：建物被害額，中段：人的損失，下段：生活支障者数）

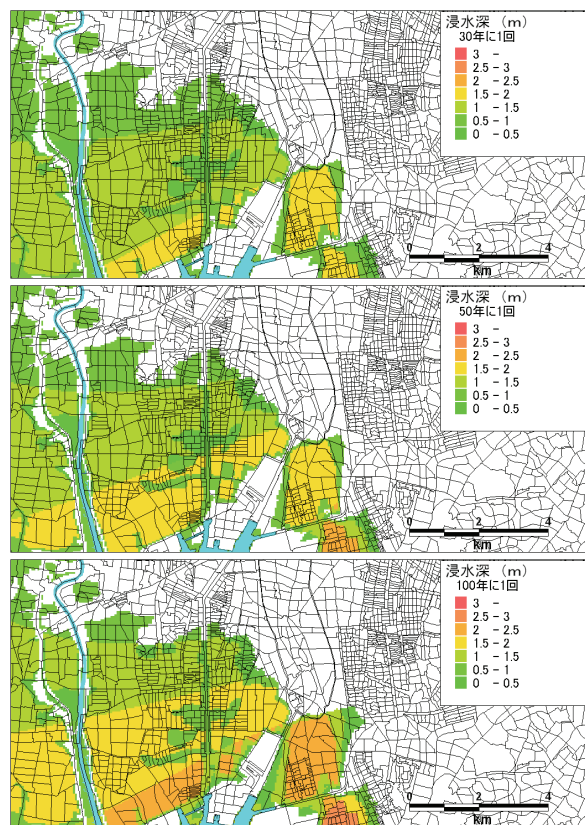


図-16 高潮ハザード算定結果（上段から 30, 50, 100 年に 1 回）

c) 高潮リスク

高潮ハザードマップは、確率台風モデル¹¹⁾により対象地域代表地点の風向、風速、気圧を求めた後、これらの評価結果を用いて潮位偏差を算定した。この潮位偏差にモデル化した天文潮位を足し合わせて最高潮位を計算し、陸域の代表地点における最高潮位を 50m メッシュごとに算定した。

なお、陸域への浸水を判断する場合には、陸域の地盤標高、護岸や河川堤防の高さを考慮しており、前述の最高潮位がこれらの高さを超えた場合に浸水するものとした。したがって、50m メッシュごとの標高と最高潮位の差分を求めて、高潮による浸水深を算定した。高潮ハザードマップを、GIS を用いて図化し、図-16 に示した。

高潮ハザードマップを基にリスク評価を行っているが、評価手法は上記の洪水リスクと同じ方法を用いた。

建物被害額、人的損失、生活支障者数の算出結果を図-17 に示し、それぞれの項目の年間損失期待値分布を図-18 に示す。

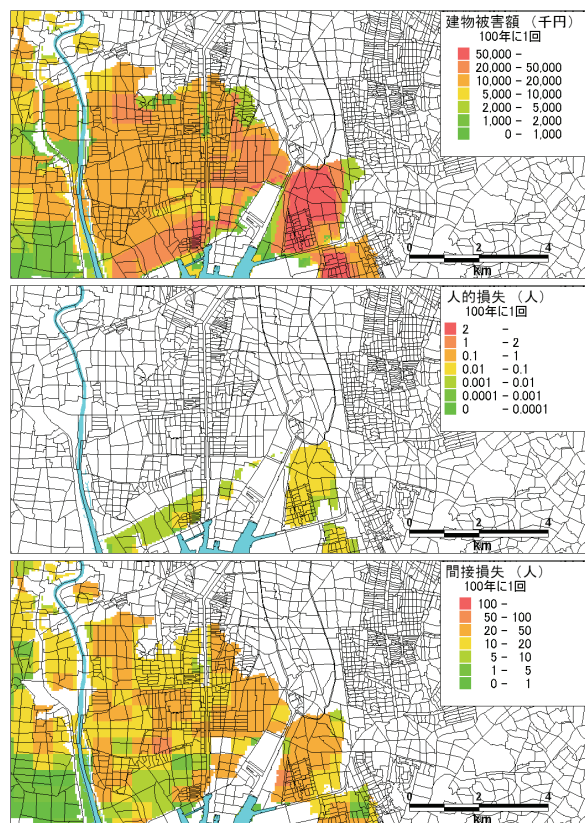


図-17 100年に1回の高潮による損失評価結果（上段：建物被害額，中段：人的損失，下段：生活支障者数）

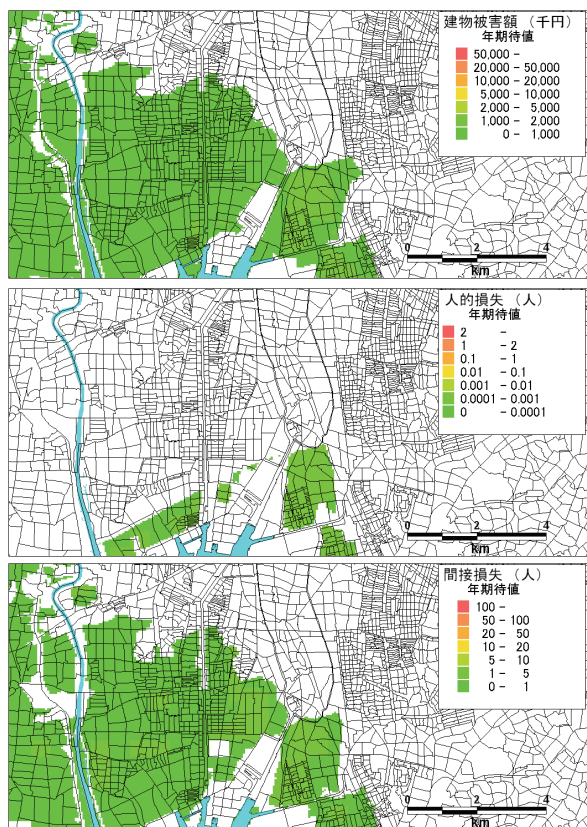


図-18 高潮による年間損失期待値（上段：建物被害額，中段：人的損失，下段：生活支障者数）

(3) マルチハザードに関するリスク評価結果

前節の a)～c)に示すように，100年に1回の規模の地震は対象地域全域に影響を与えるが，損失の期待値は相対的に小さくなる結果となった．一方，地震と同程度の再現期間の洪水と高潮については，影響する範囲が限定されるが，損失の期待値は大きくなる傾向が見られる．

地震，洪水及び高潮の個別災害に関する，各再現期間の建物被害，人的損失，生活支障者数に関する損失と年間損失期待値，並びに3つの災害を統合して求めたマルチハザードに関する年間損失期待値を表-2に示した．

また，表-2のデータから建物被害額，人的損失，生活支障者数のリスクカーブを作成し，図-19～図-21に示した．さらに，マルチハザードに関する建物被害額，人的損失，生活支障者数のリスクカーブから年間損失期待値を算出し，その結果を図-22～図-24に示した．

上記の結果によれば，建物被害額，人的損失，生活支障者数のどの項目についても，洪水による損失が最も大きく，地震が最も小さいことが分かる．また，地震，洪水，高潮災害の建物被害額と人的損失に関しては，50年に1回程度の災害を境に損失が増加する傾向にある．

リスク要因別の比較では，生活支障者数は災害規模の再現期間の違いによる影響が比較的少なく，地震に比べて洪水や高潮で多くの影響が出ることが明らかとなっ

た．また，人的損失に関しては，100年に1回程度の規模の災害では，地震・高潮に関して洪水のリスクが大きいことが明らかになった．

表-2 リスク評価結果一覧

災害	再現期間	建物被害額 (億円)	人的損失 (人)	生活支障者数 (千人)
地震 リスク	30年	369.9	0.0	0.0
	50年	539.3	0.0	3.9
	100年	1588.0	18.9	34.4
	年間損失期待 (6.7%)	32.5	0.28	0.56
洪水 リスク	30年	9,025.4	96.4	667.8
	50年	9,845.8	113.7	686.3
	100年	11,292.6	143.3	750.6
	年間損失期待 (70.9%)	344.4	4.1	23.7
高潮 リスク	30年	2,446.2	0.0	331.5
	50年	2,874.7	7.9	335.7
	100年	3,911.4	33.9	355.2
	年間損失期待 (22.4%)	108.5	0.6	11.5
マルチハザード・リスク	年間損失期待	485.5	5.0	35.7

括弧内は，マルチハザード・リスクに占める個別災害の割合を示す．

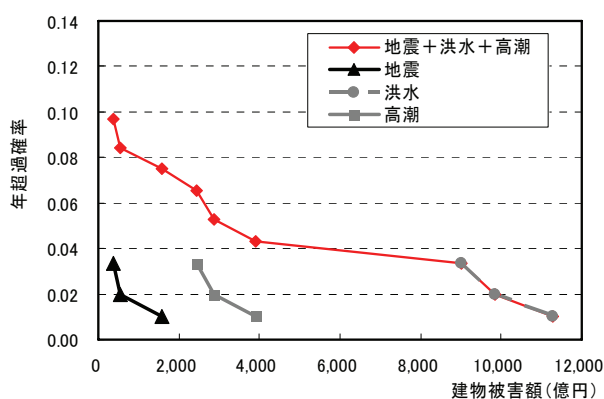


図-19 建物被害額のリスクカーブ

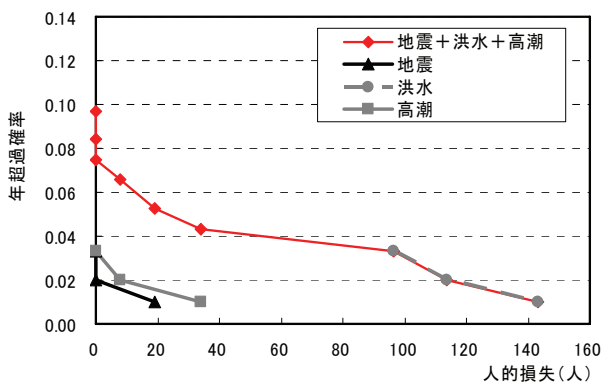


図-20 人的損失のリスクカーブ

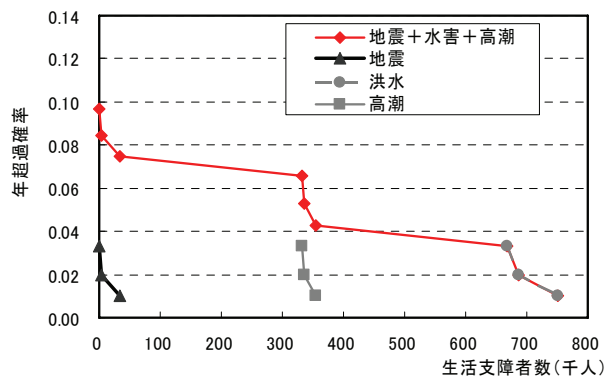


図-21 生活支障者数のリスクカーブ

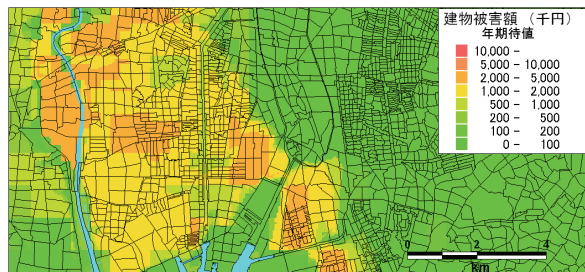


図-22 マルチハザードに対する建物被害額の年間損失期待値



図-23 マルチハザードに対する人的損失の年間損失期待値

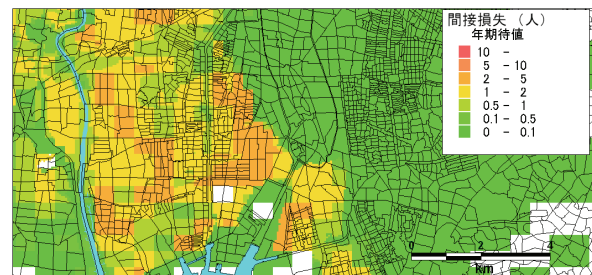


図-24 マルチハザードに対する生活支障者数の年間損失期待値)

5. まとめ

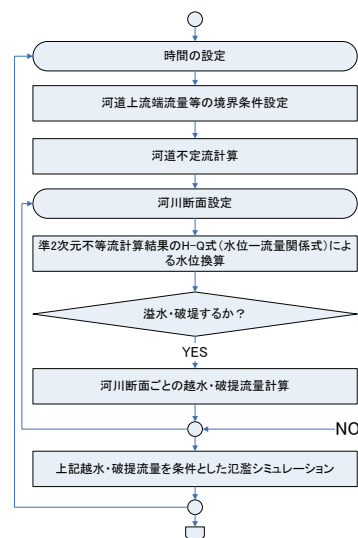
本論文では、個々の自然災害に対するリスク評価結果を用いて、複数の自然災害に対するリスク評価を行うための実用的な手法を提案した。また、太平洋側の沿岸に面し、わが国の中では地震災害リスクが高いとともに、高潮災害や洪水災害の履歴がある地域を対象として、提案手法を用いた試算結果を示した。

このように個別災害に対するリスクを定量的に比較検討することにより、地域で優先すべき災害種別に関する情報を提供することが可能となる。また、マルチハザードに対するリスク評価により、地域の抱えるリスクの定量的な対策目標の設定支援が可能になるものと考えられる。

謝辞： 試算に当たり、データを提供いただいた機関の関係各位に深甚なる謝意を表わす次第である。

参考資料 1

治水経済調査マニュアル(案)(建設省河川局，平成12年5月)による氾濫シミュレーションのフロー³⁾を引用して示す。



参考資料2

治水経済調査マニュアル(案)(建設省河川局, 平成12年5月)による浸水深別の家屋被害率³⁾を引用して示す。

浸水深 地盤勾配	床下	床上					土砂堆積(床上)	
		50cm未満	50～99	100～199	200～299	300cm以上	50cm未満	50cm以上
Aグループ	0.032	0.092	0.119	0.266	0.580	0.834	0.43	0.785
Bグループ	0.044	0.126	0.176	0.343	0.647	0.870		
Cグループ	0.050	0.144	0.205	0.382	0.681	0.888		

A: 1/1000未満, B: 1/1000～1/500, C: 1/500以上

注: 平成5年～平成8年の「水害被害実態調査」により求められた被害率。

(ただし、土砂堆積は従来の被害率)

参考文献

- 例えば, 国土交通省 関東地方整備局 京浜河川事務所: 洪水ハザードマップ, <http://wwwsj.keihin.ktr.mlit.go.jp/hazardmap/index.html>.
- 独立行政法人 防災科学技術研究所: 地震ハザードステーション, <http://www.j-map.bosai.go.jp/>.
- 建設省河川局: 治水経済調査マニュアル(案), 平成12年5月.
- 総務省消防局: 地方公共団体の地域防災力・危機管理能力評価指針の策定調査報告書, P.91, 平成15年3月.
- Lisa K. Flax, Russell W. Jackson, and David N. Stein: Community Vulnerability Assessment Tool Methodology, Natural Hazards Review, pp.163-176, 2002.
- FEMA: FEMA: Multihazard Information Platform, <http://hazards.fema.gov/mapviewer/>.
- 草野・小林・兼森・川合・日吉: リスクマネジメント入門ーリスクマネジメントの発想, 土木学会誌, 2000年7月.
- 総務省統計局: 統計GISプラザ, <http://gisplaza.stat.go.jp/GISPlaza/>.
- 独立行政法人 防災科学技術研究所: 500mメッシュ地形分類データ, http://www.j-map.bosai.go.jp/j-map/500m_dl/index.html.
- 中央防災会議: 地震被害想定支援マニュアル, <http://www.bousai.go.jp/manual/index.htm>.
- Risk Management Solutions, Inc.; The RMS® Japan Typhoon Model, <http://www.rms.com/catastrophe/models/japan.asp#WS>.
- 国土交通省国土技術政策総合研究所: 地域の防災性能評価マニュアル(案), 2004年3月.
- 運輸省港湾局海岸・防災課・(財)運輸政策研究機構: 平成10年度 海岸事業における事業評価手法作成調査 報告書, 平成11年3月.
- 津波・高潮ハザードマップ研究会事務局: 津波・高潮ハザードマップマニュアル(案), 平成15年12月.

(2007. 4. 6 受付)

PROPOSAL OF PRACTICAL RISK ASSESSMENT METHOD OF MULTIPLE NATURAL HAZARDS

Keiichi TAMURA, Shigeru NAGATA, Hideo TAKAHARA and Ryo WAKABAYASHI

There are many uncertainties, such as the frequency of occurrence, magnitude, and extent of anticipated damage, in assessing risk related to natural hazards, such as earthquakes and floods. Therefore, a natural hazard risk assessment method that incorporates the theory of probability is being introduced. As just described above, many studies are made on natural hazard risk assessment methods and the methods are applied to practical business. Many regions of this country are often hit by two or more natural hazards, such as earthquakes, typhoons, heavy rain, and snow, and volcanic eruptions. To draw up appropriate proactive and follow-up programs for disaster damage prevention, it is necessary to study a multiple natural hazard risk assessment method. This paper describes a proposal of practical method to assess multiple natural hazards and the case studies of the multiple natural hazard risk assessment based on the results of researches achieved up to now into the methods of assessing risk associated with individual natural hazards.