

第10回災害対策セミナーin神戸
神戸の減災研究会 WG4 報告

神戸市の地震動特性と中高層建築物の耐震補強に関する研究

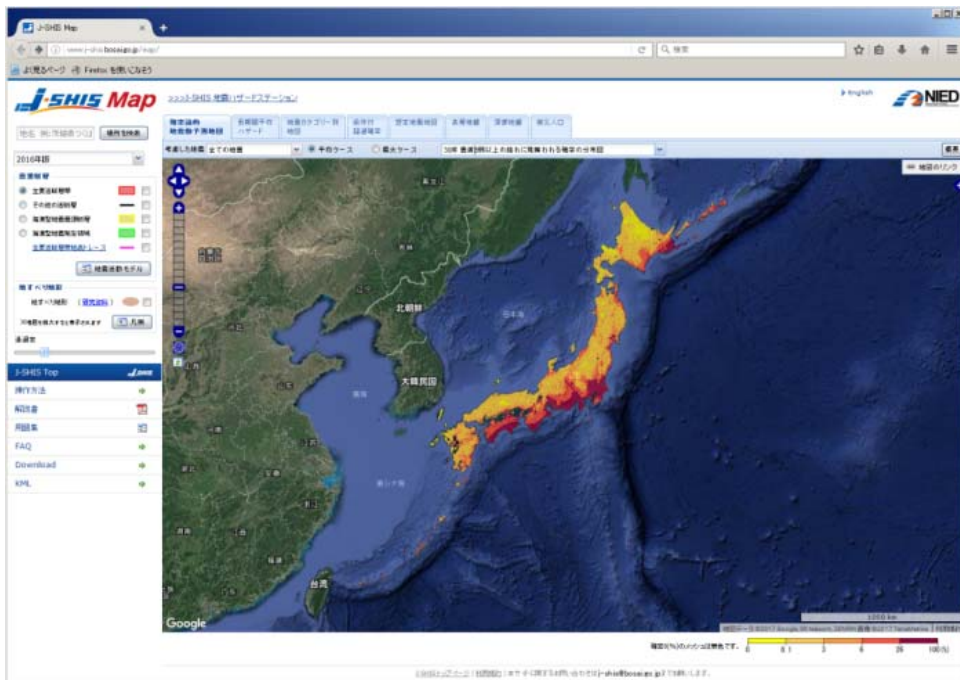
地震リスクの評価

2017年1月23日

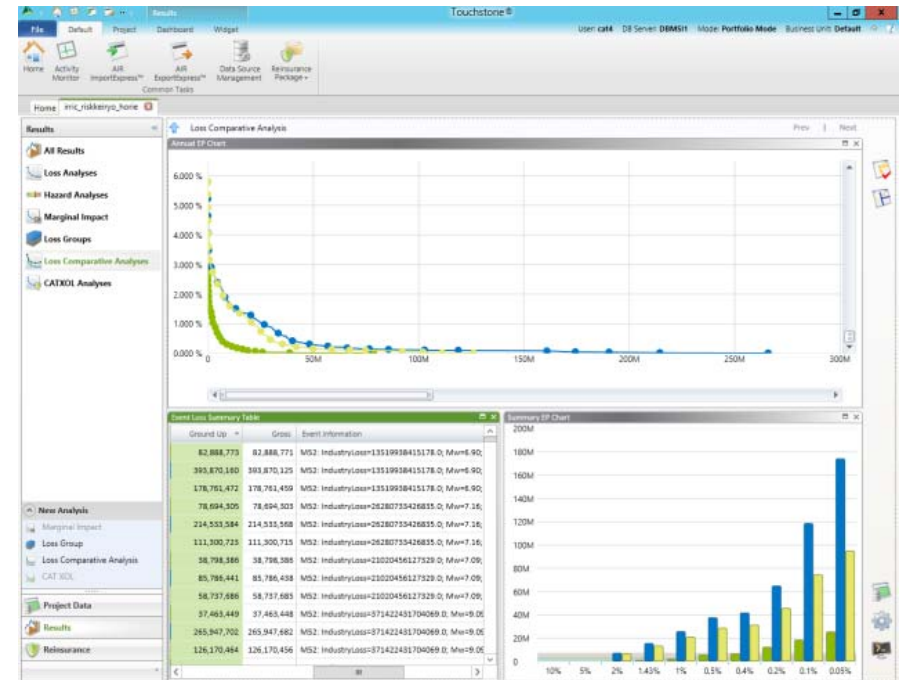
神戸の減災研究会 WG4

本日の内容

1. 研究の全体像
2. 確率論的手法に基づく神戸市の地震リスク
 - (1) 地震ハザードステーション「J-SHIS」による評価
 - (2) 自然災害リスク分析ソフトウェアによる評価



地震ハザードステーション「J-SHIS」



自然災害リスク分析ソフトウェア「AIR Touchstone」

研究体制

グループ	氏名	所属	分担
委員	難波 尚	神戸大学大学院工学研究科 建築学専攻 准教授	WG4代表リーダー、 建物地震応答解析
	久世 益充	岐阜大学流域圏科学研究センター 流域情報研究部門 准教授	地震動シミュレーション
	太田 敏一	明石工業高等専門学校 特命教授	地震リスクコミュニケーション (市民への情報発信)
	山田 正人	(株) エーアンドディー設計企画	耐震診断、 建物地震応答解析
	倉掛 猛	(株)構造計画研究所	地震動シミュレーション
	堀江 啓	(株)インターリスク総研	WG4副リーダー、 建物地震応答解析
オブザーバー	神戸市		

1. 研究の全体像



研究背景

■ 耐震補強実務における課題

» 中高層集合住宅は一般に建物重量が大きく、大規模な耐震補強が必要



費用負担も大きく、耐震化が進みにくい要因の一つに！

» 近年、既往のIs値による耐震診断方法にとらわれることなく、建物の振動解析結果をもとに建物の倒壊可能性を判定する方法が提案されている



必要最小限の補強でコストダウンが期待できる！

・・・ただし、大地震後の再使用を前提としないなどの条件付き

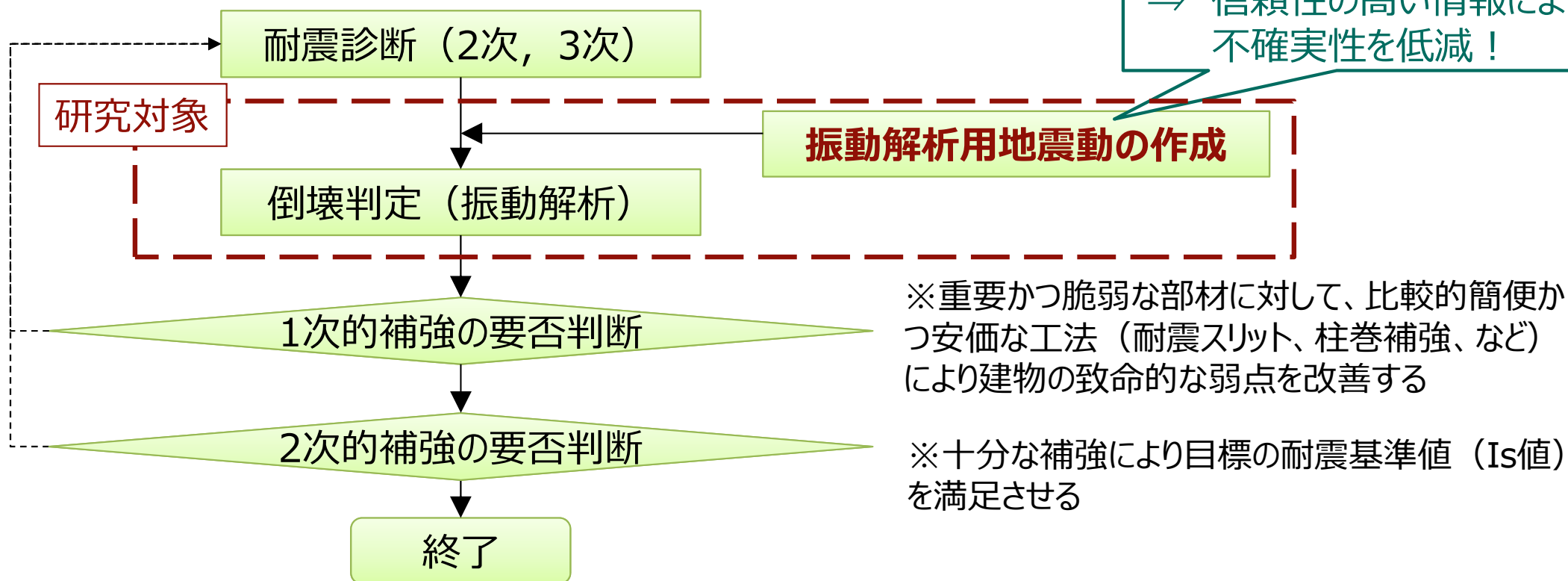


研究目的

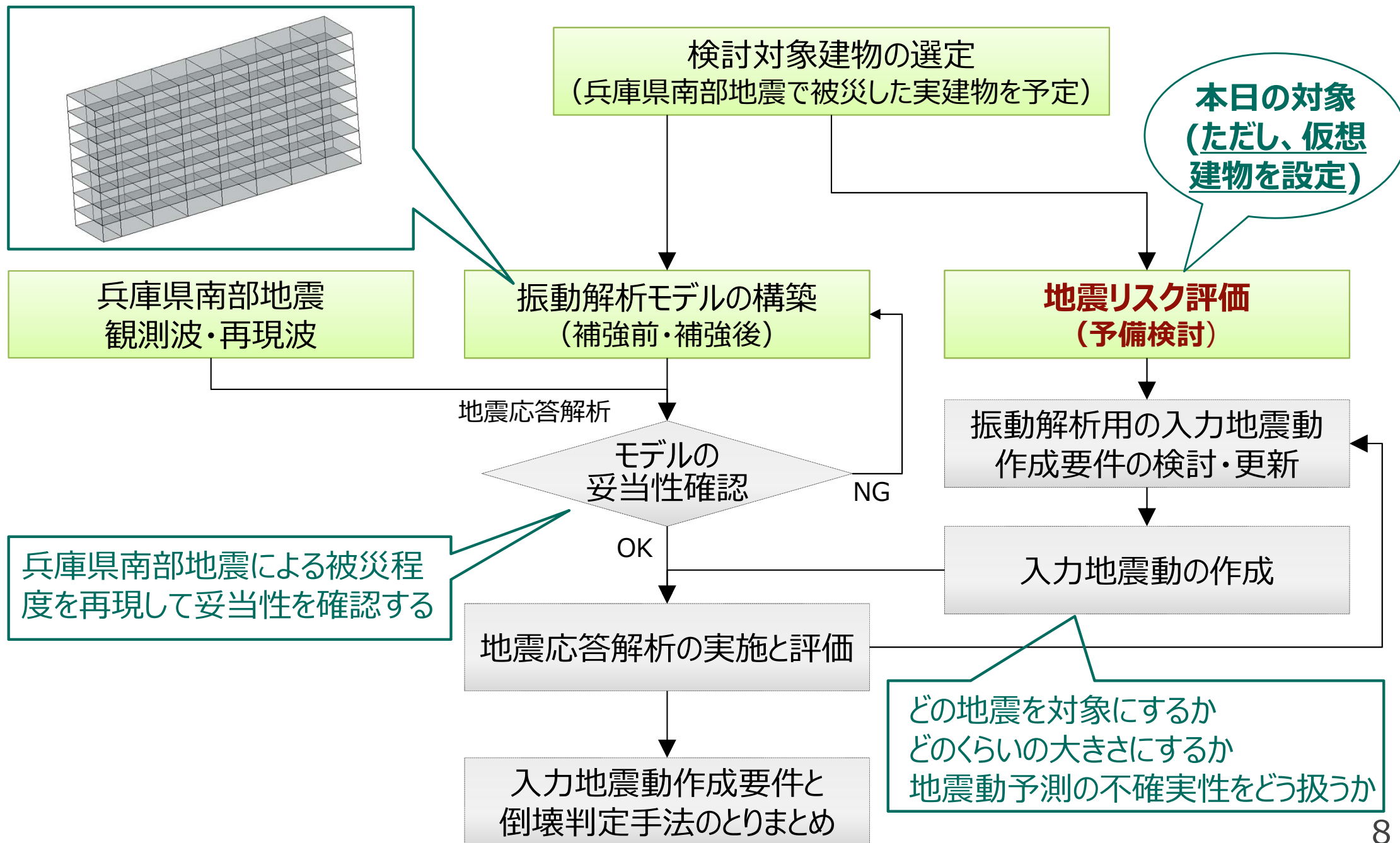
■ 研究目的

中高層住宅の耐震化促進を目的として、建物の振動解析に基づく倒壊判定手法により、低コストで効果的な耐震補強策を検討し、耐震補強実務における作業負担の軽減と必要費用の低減に貢献する

■ 振動解析に基づく倒壊判定手法のイメージと研究対象



検討の流れ



地震リスクの評価対象（仮想の中高層住宅を設定）

- 2つの場所に仮想住宅を設定 ⇒ 地盤の違いによる地震リスクへの影響
- 2つのタイプ（新耐震基準適用前・後）の仮想住宅を設定
⇒ 建物（耐震性）の違いによる地震リスクへの影響

評価ケース	Case- 1	Case-2	Case-3
住宅名	仮想住宅A (新耐震基準適用前)	仮想住宅A (新耐震基準適用前)	仮想住宅B (新耐震基準適用後)
所在地	地点KU (神戸大学工学部地点)	地点KC (神戸市役所地点)	地点KC (神戸市役所地点)
構造	鉄筋コンクリート造	鉄筋コンクリート造	鉄筋コンクリート造
用途	共同住宅	共同住宅	共同住宅
建築年	1979	1979	2016
階数	8	8	8

2. 確率論的手法に基づく神戸市の地震リスク

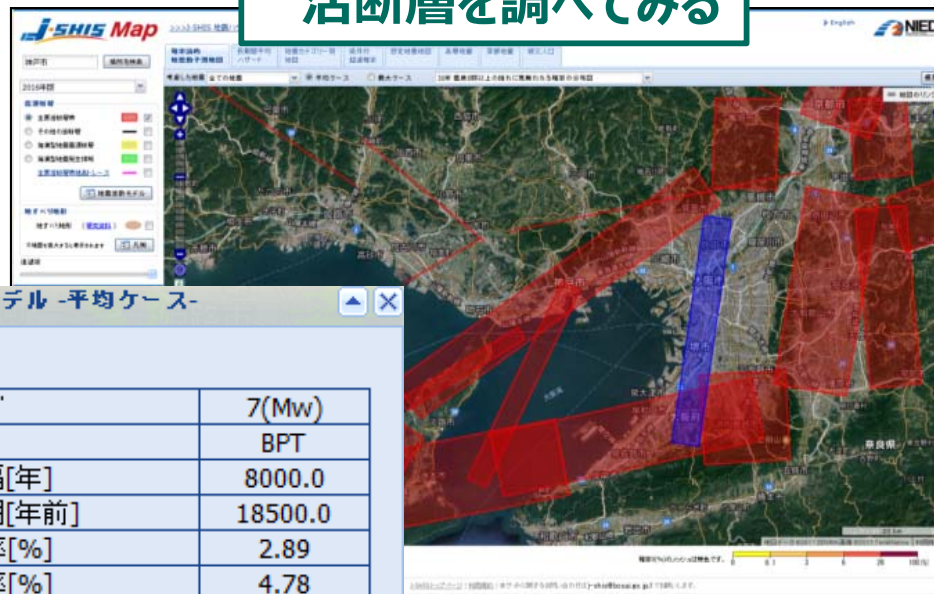
(1) 地震ハザードステーション「J-SHIS」による評価

地震ハザードステーション「J-SHIS」とは

■ J-SHIS (<http://www.j-shis.bosai.go.jp/>)

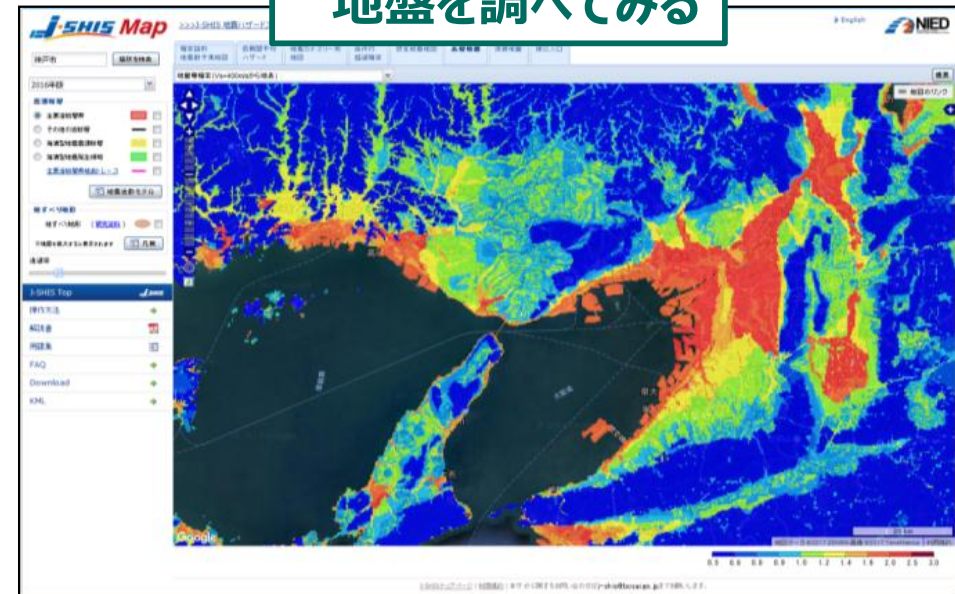
- » 地震防災に資することを目的に、**日本全国の「地震ハザードの共通情報基盤」**として活用されることを目指して作られたサービス
- » 「**全国地震動予測地図**」の公開システムとして、2005年5月より運用を開始
- » 地図そのものだけでなく、その作成の前提条件となった地震活動・震源モデル及び地下構造モデル等の評価プロセスに関わるデータも公開

活断層を調べてみる



断層パラメータ

地盤を調べてみる

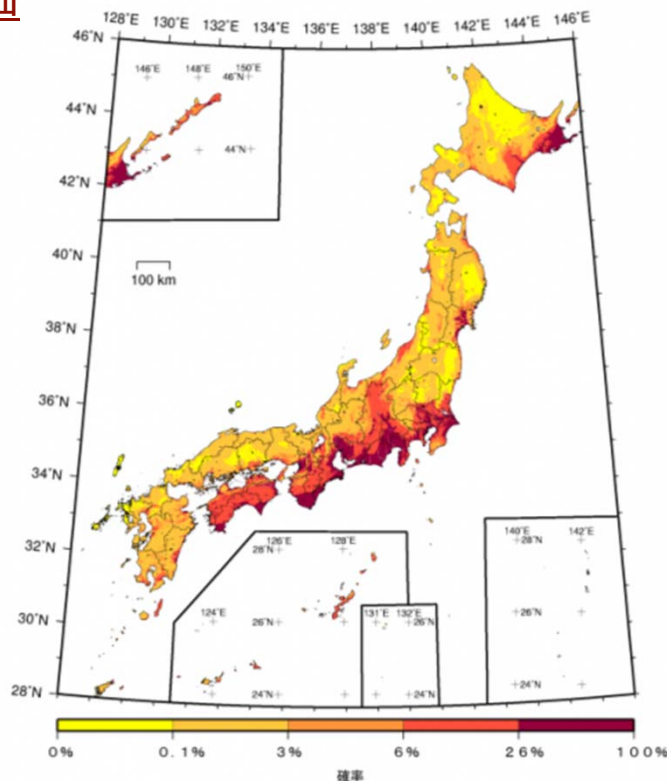


全国地震動予測地図とは

- 将来発生のおそれのある地震による揺れの強さを予測し、結果を地図表示
- 地図は大きく2種類

確率論的地震動予測地図

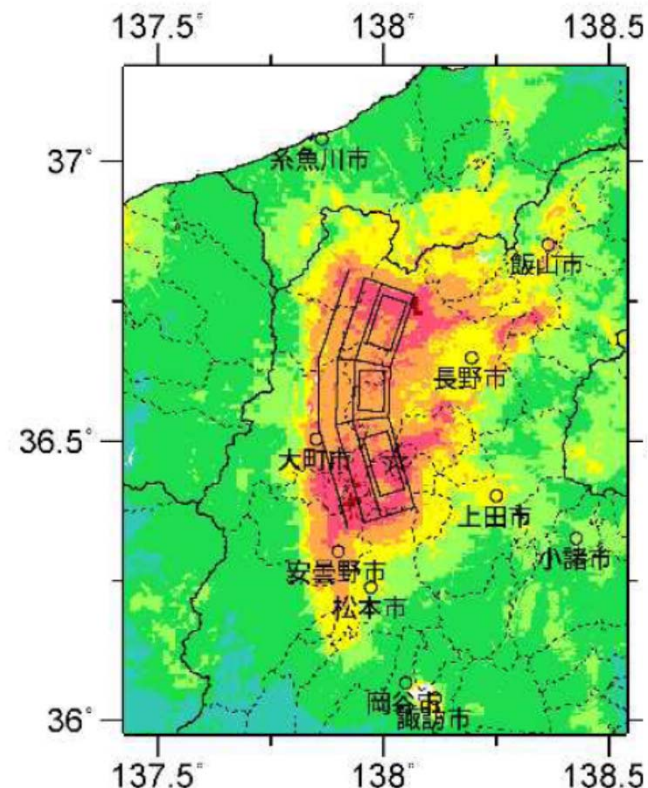
日本およびその周辺で起こりうる全ての地震に対して、その発生可能性、規模を確率論的に評価し、さらにそれらの地震が発生したときに生じる地震動の強さをばらつきも含めて評価

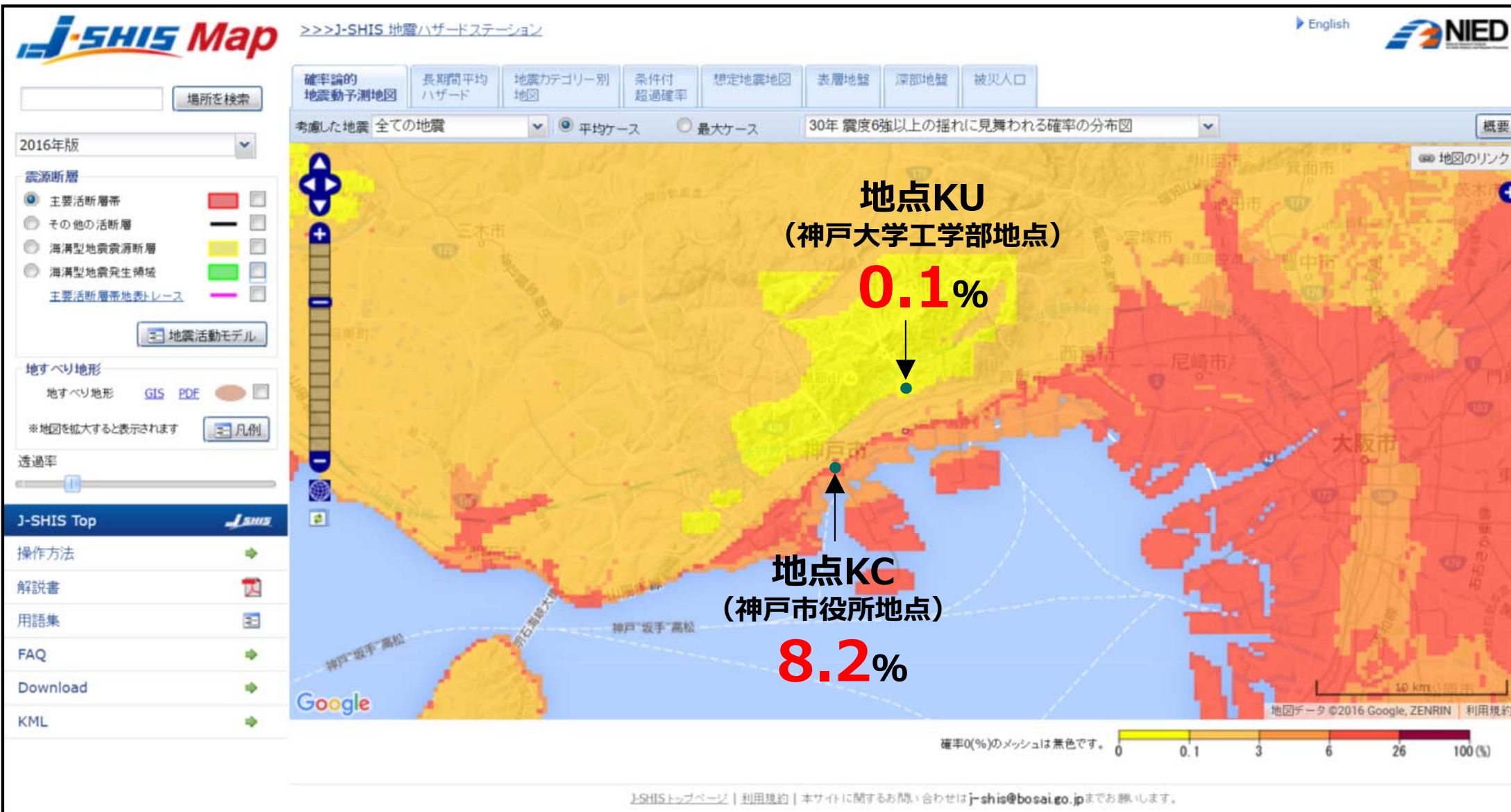


出典：地震調査研究推進本部

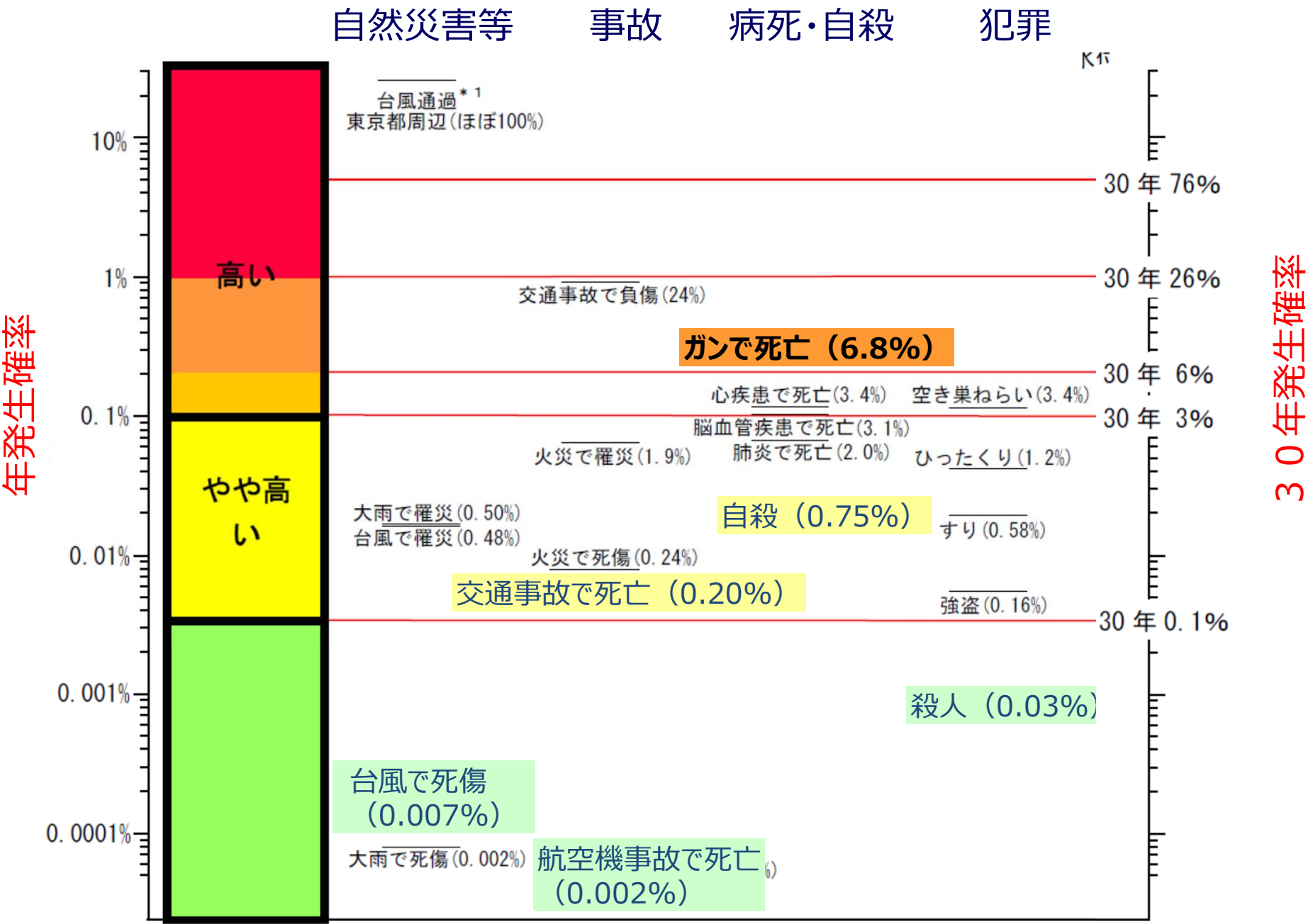
震源断層を特定した地震動予測地図

ある特定の地震が発生した場合に各地点がどのように揺れるのかを計算して、その分布を地図表示

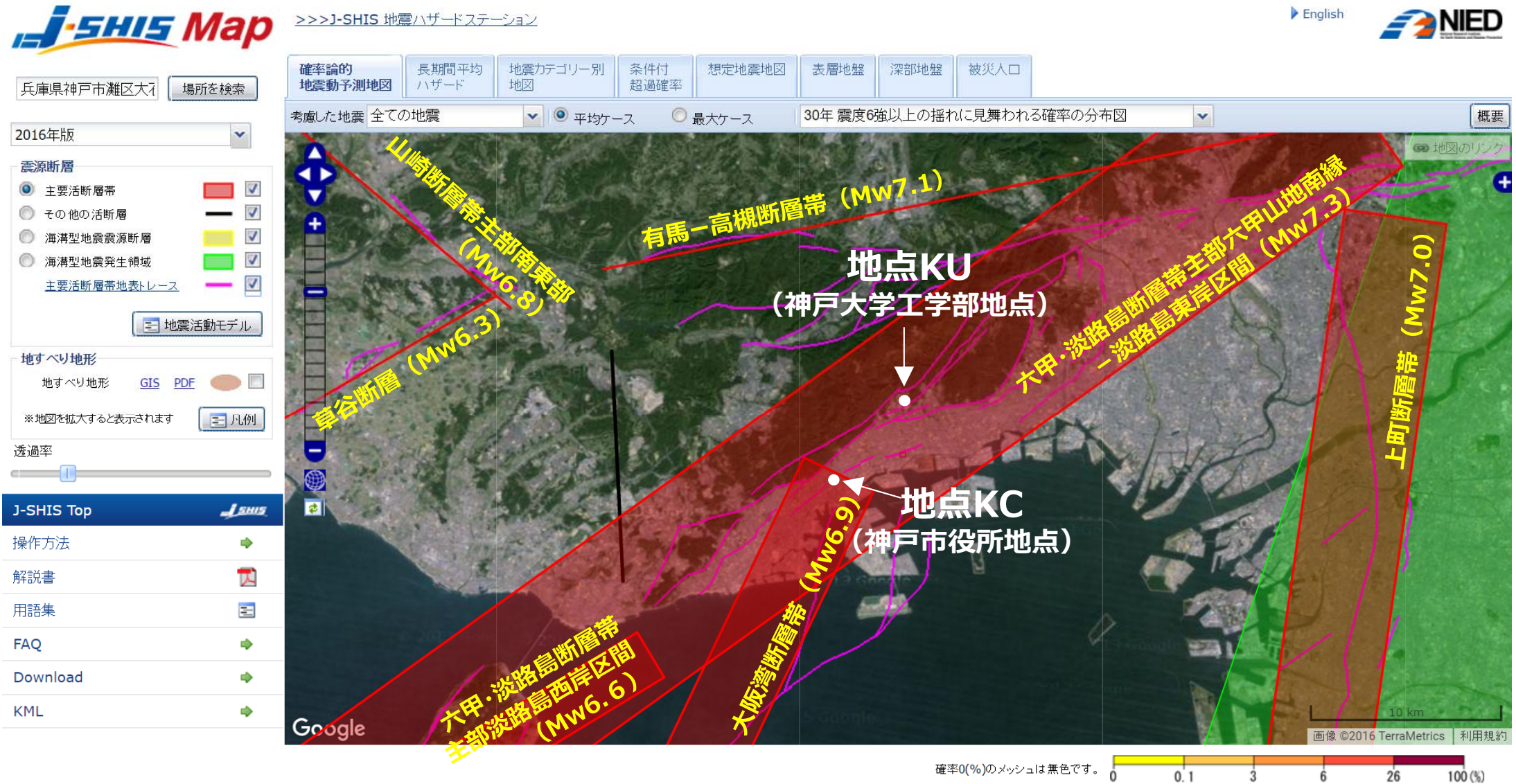




我が国における自然災害・事故等の30年発生確率との比較



近傍の震源断層や震源領域との地点関係



近傍の主要活断層帯の地震活動モデル

断層名	平均発生 間隔 (年)	最新活動 時期 (年前)	30年 発生確率※ (%)	50年 発生確率※ (%)	マグニチュー ド (Mw)
山崎断層帯主部南東部	3,900	1,566	0 (0.03~5%)	0 (0.06~8%)	6.8
草谷断層	6,500	1,266	0 (ほぼ0%)	0 (ほぼ0%)	6.3
有馬－高槻断層帯	1,500	420	0 (ほぼ0~0.02%)	0 (ほぼ0~0.04%)	7.1
六甲・淡路島断層帯主部 淡路島西岸区間	2,150	21	0 (ほぼ0%)	0 (ほぼ0%)	6.6
六甲・淡路島断層帯主部 六甲山地南縁－淡路島東岸区間	1,850	466	0 (ほぼ0~0.9%)	0 (ほぼ0~2%)	7.3
大阪湾断層帯	5,000	608	0 (0.004%以下)	0 (0.007%以下)	6.9
上町断層帯	8,000	18,500	2.89 (2~3%)	4.78 (3~5%)	7.0

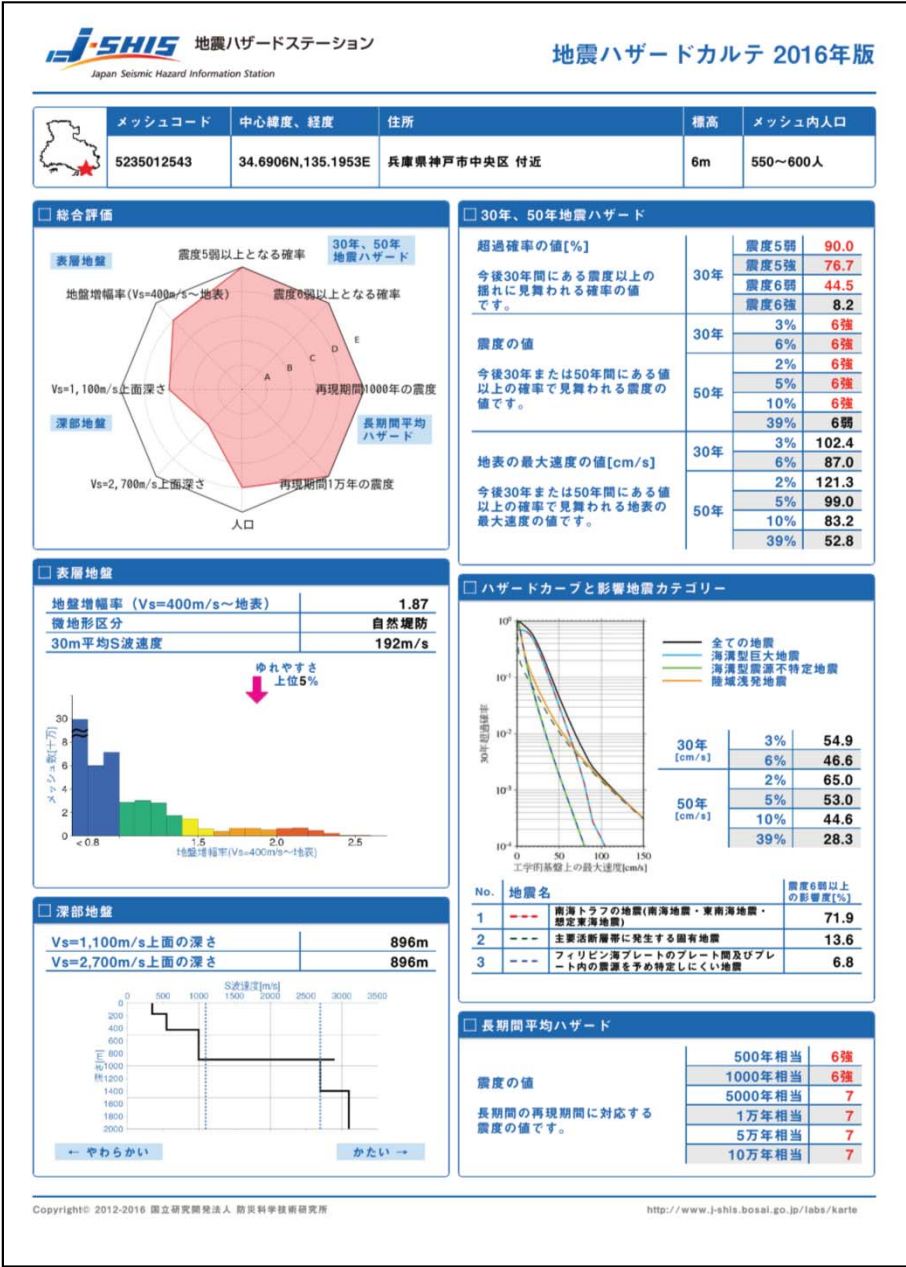
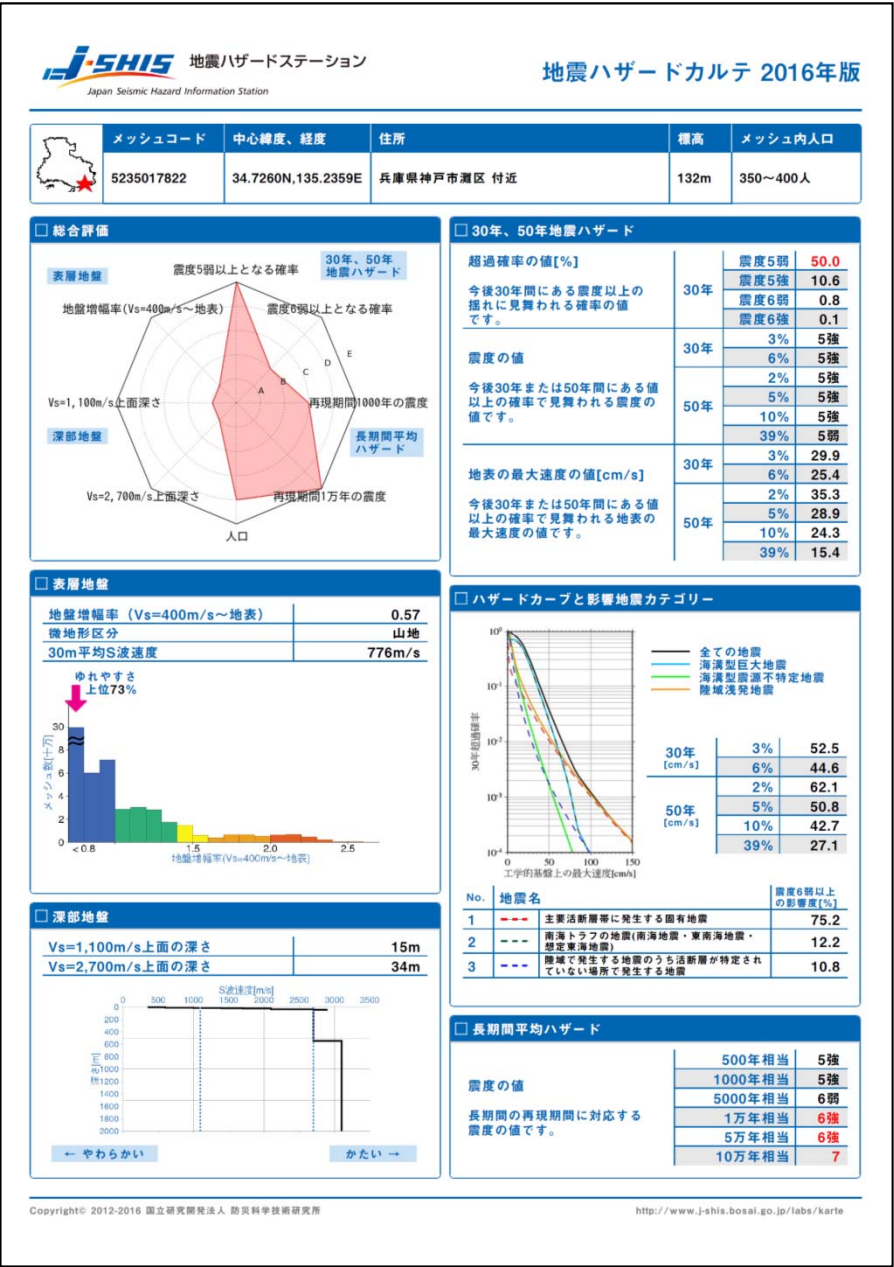
※30年、50年発生確率： 上段の確率はJ-SHISの表示に基づく。

下段のカッコ内の確率は地震調査研究推進本部による活断層の長期評価に基づく。

J-SHIS 地震ハザードカルテ2016年版

地点KU (神戸大学工学部地点)

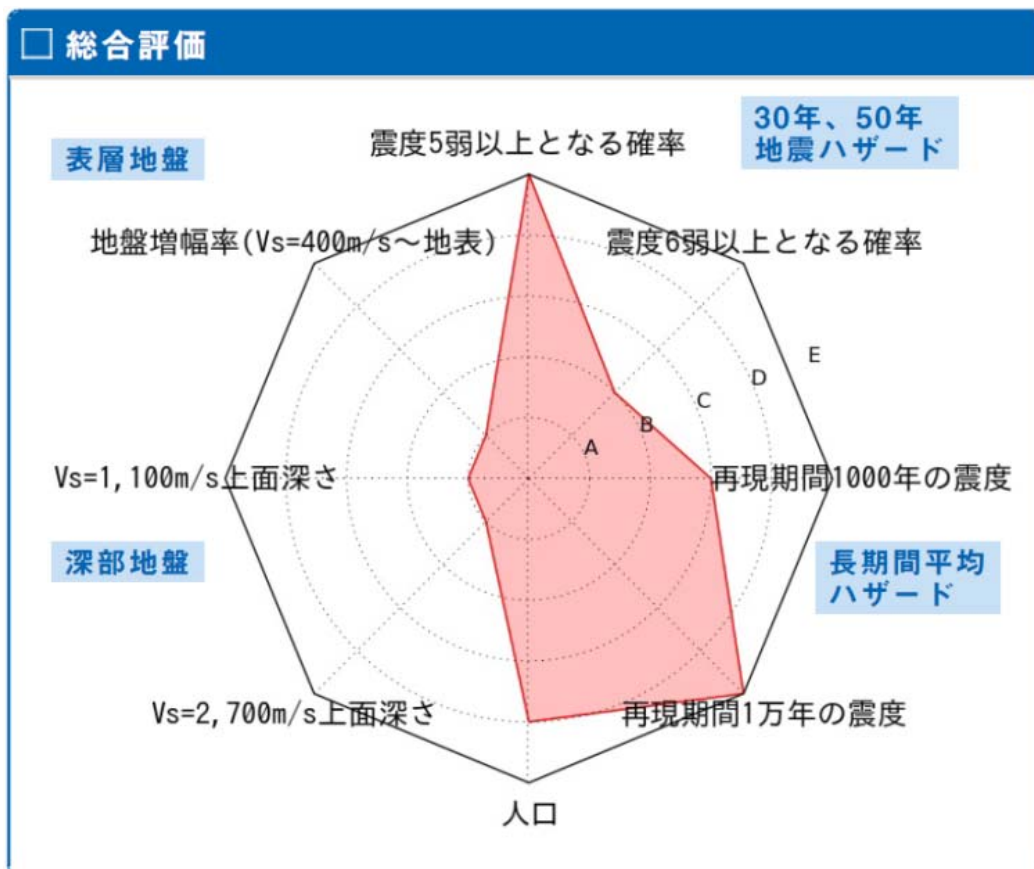
地点KC (神戸市役所地点)



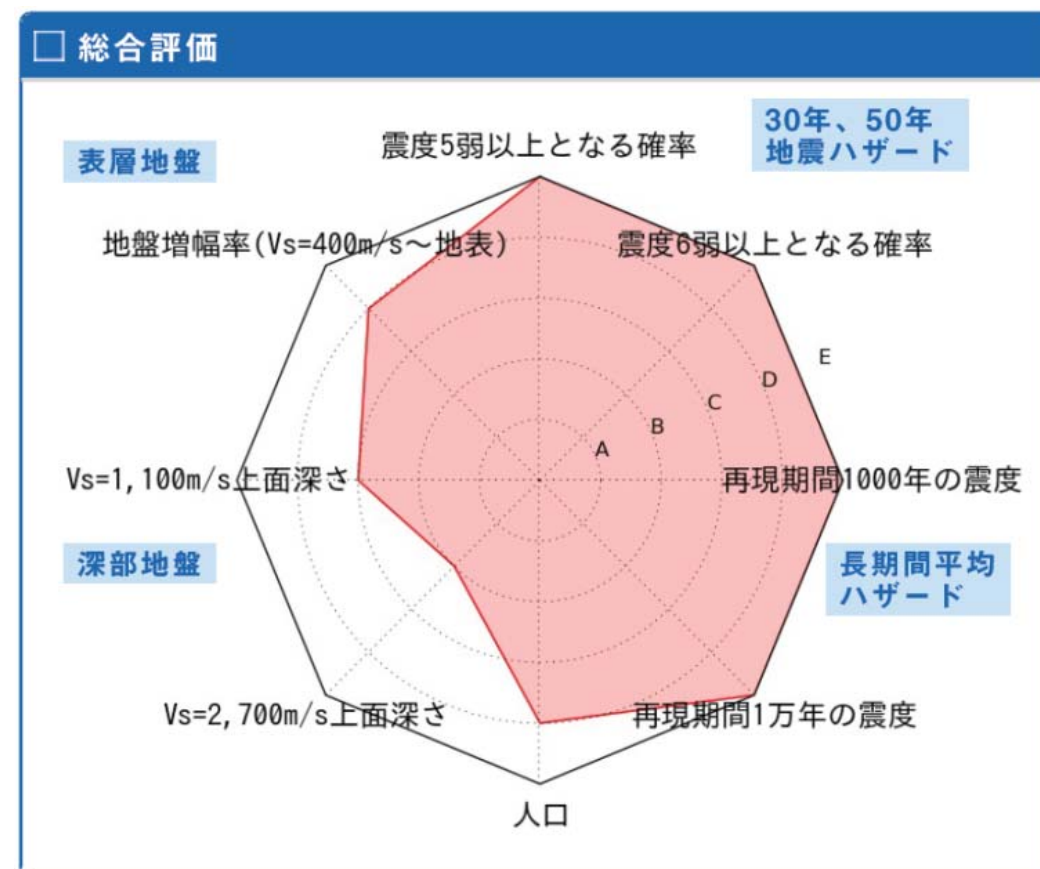
総合評価の比較

- 8項目をA～Eの5段階で評価
- レーダーチャートの面積が大きい⇒地震ハザードが高いと評価されている場所を示す
- 地点KCの方が地点KUよりも地震ハザードが高い

地点KU（神戸大学工学部地点）



地点KC（神戸市役所地点）



表層地盤・深部地盤評価の比較

■ 表層地盤

図は全国の地盤増幅率の分布における評価対象地盤の位置を矢印で示している

■ 深層地盤

図は深さごとのS波速度の変化を階段グラフで示している

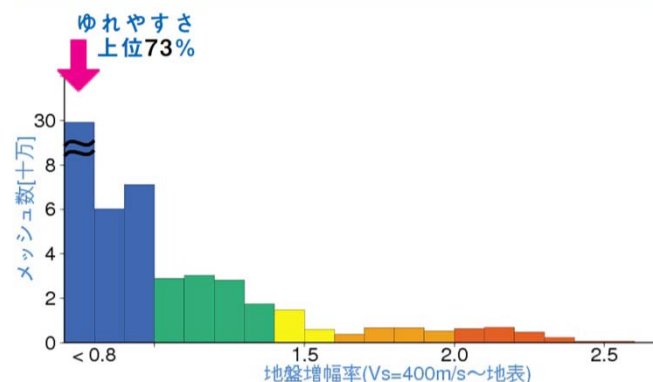
■ 評価比較

地点KCの方が地点KUよりも地盤が軟らかく、地震で揺れやすい

地点KU (神戸大学工学部地点)

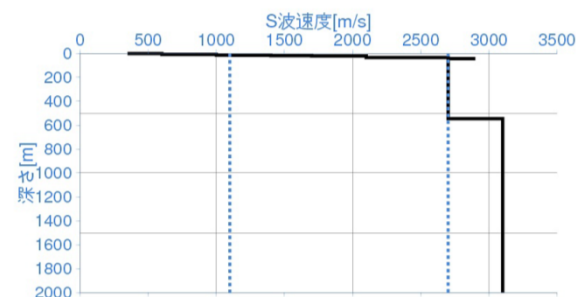
□ 表層地盤

地盤増幅率 ($V_s=400\text{m/s}\sim$ 地表)	0.57
微地形区分	山地
30m平均S波速度	776m/s



□ 深部地盤

$V_s=1,100\text{m/s}$ 上面の深さ	15m
$V_s=2,700\text{m/s}$ 上面の深さ	34m



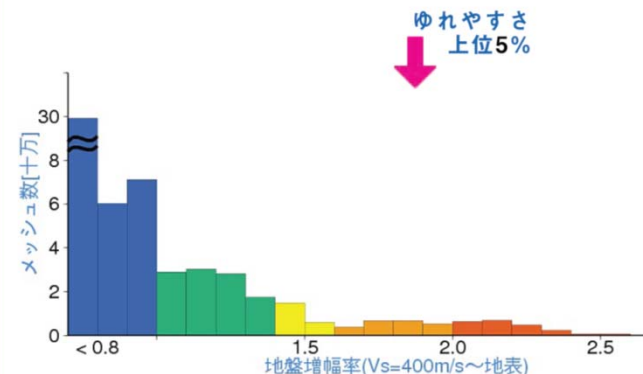
← やわらかい

かたい →

地点KC (神戸市役所地点)

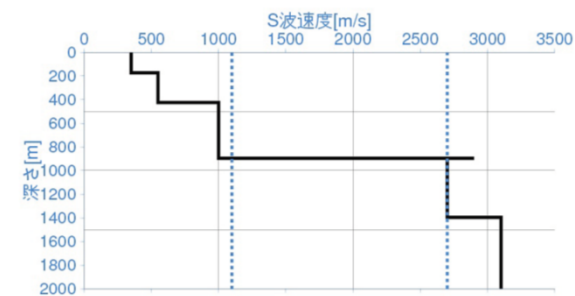
□ 表層地盤

地盤増幅率 ($V_s=400\text{m/s}\sim$ 地表)	1.87
微地形区分	自然堤防
30m平均S波速度	192m/s



□ 深部地盤

$V_s=1,100\text{m/s}$ 上面の深さ	896m
$V_s=2,700\text{m/s}$ 上面の深さ	896m



← やわらかい

かたい →

30年、50年地震ハザードの評価比較

■ 評価比較

- ・KCの方がKUよりも大きな揺れに見舞われる可能性が高い
- ・長期ハザードを比較すると10万年相当は震度7で両者同じ

■ 見解

- ・経済的合理性の観点から発生確率が極めて低い地震動を検討対象に含めることは現実的とはいえない

・KUは震度5強程度、KCは震度6強程度の揺れに最低限備えておくべき

地点KU（神戸大学工学部地点）

□ 30年、50年地震ハザード

超過確率の値[%] 今後30年間にある震度以上の揺れに見舞われる確率の値です。	30年	震度5弱	50.0
		震度5強	10.6
		震度6弱	0.8
		震度6強	0.1
震度の値 今後30年または50年間にある値以上の確率で見舞われる震度の値です。	30年	3%	5強
		6%	5強
	50年	2%	5強
		5%	5強
		10%	5強
		39%	5弱
	30年	3%	29.9
		6%	25.4
地表の最大速度の値[cm/s] 今後30年または50年間にある値以上の確率で見舞われる地表の最大速度の値です。	50年	2%	35.3
		5%	28.9
	50年	10%	24.3
		39%	15.4

□ 長期間平均ハザード

震度の値 長期間の再現期間に対応する震度の値です。	500年相当	5強
	1000年相当	5強
	5000年相当	6弱
	1万年相当	6強
	5万年相当	6強
	10万年相当	7

地点KC（神戸市役所地点）

□ 30年、50年地震ハザード

超過確率の値[%] 今後30年間にある震度以上の揺れに見舞われる確率の値です。	30年	震度5弱	90.0
		震度5強	76.7
		震度6弱	44.5
		震度6強	8.2
震度の値 今後30年または50年間にある値以上の確率で見舞われる震度の値です。	30年	3%	6強
		6%	6強
	50年	2%	6強
		5%	6強
		10%	6強
		39%	6弱
	30年	3%	102.4
		6%	87.0
地表の最大速度の値[cm/s] 今後30年または50年間にある値以上の確率で見舞われる地表の最大速度の値です。	50年	2%	121.3
		5%	99.0
	50年	10%	83.2
		39%	52.8

□ 長期間平均ハザード

震度の値 長期間の再現期間に対応する震度の値です。	500年相当	6強
	1000年相当	6強
	5000年相当	7
	1万年相当	7
	5万年相当	7
	10万年相当	7

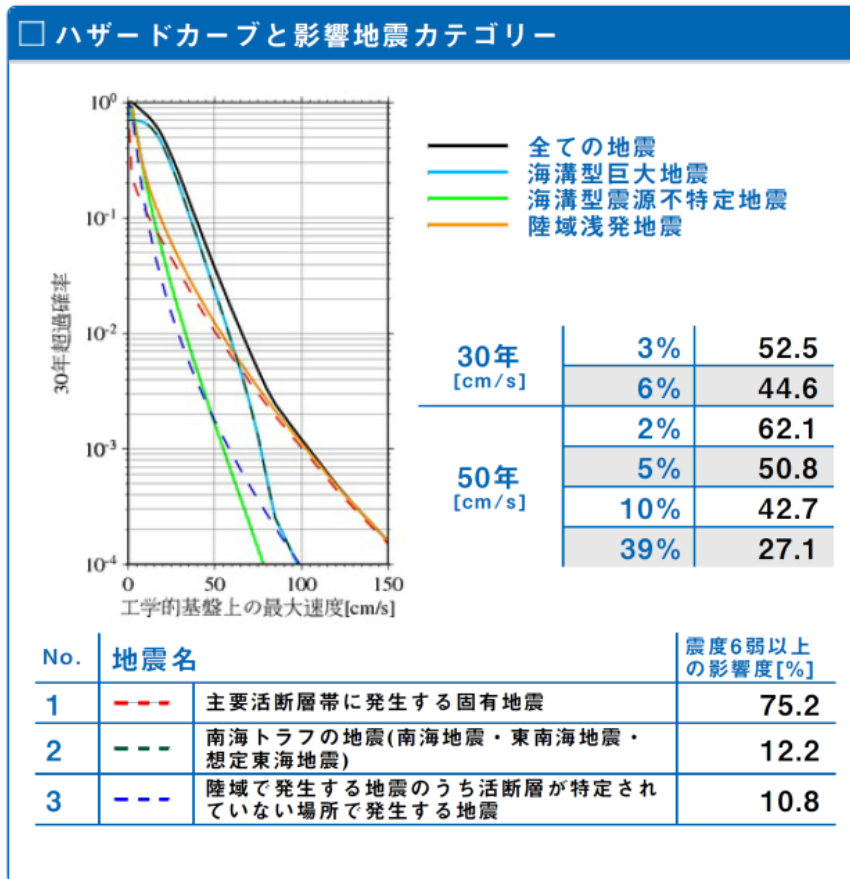
Point ⇒

同じ神戸市内であっても、建設地の地盤の影響等により想定しておくべきハザードの大きさは異なる

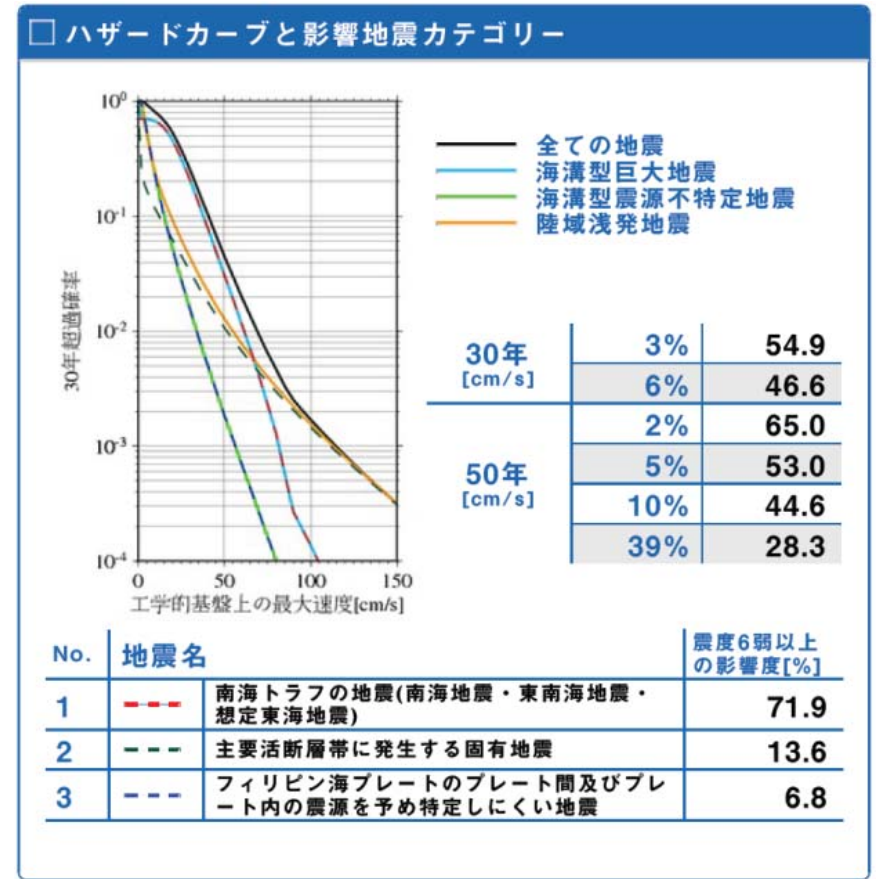
ハザードカーブと影響地震カテゴリーの評価比較

- グラフの下にある表をみると、影響度が大きい地震のTOP 3 がわかる
 - 地点KUは主要活断層帯で発生する地震の影響度が高い
 - 地点KCは南海トラフ領域で発生する地震の影響度が高い
- Point**
最も警戒しなければならない地震タイプが異なる

地点KU（神戸大学工学部地点）



地点KC（神戸市役所地点）



2. 確率論的手法に基づく神戸市の地震リスク

(2) 自然災害リスク分析ソフトウェアによる評価

リスクの定量評価手法

■ リスクと不確実性

- » 不確定なことについて、ある程度確率をもって捉えられるものを「リスク」と呼ぶ
- » 捉えられないものを「（真の）不確実性」と呼ぶ

※捉えられたものの中でも不確実性は内在するため、「真の不確実性」の方が馴染む

■ リスクとは？

- » 損失という不利益な結果をこうむる可能性と考えることができる
- » 可能性（確率）とともに、その結果の大きさ（強度）を持っている

※損害保険リスクを扱う場合の結果の大きさとは、損失の大きさ（Loss）のこと

リスクは確率と強度の2つの要素の積として表すことができる

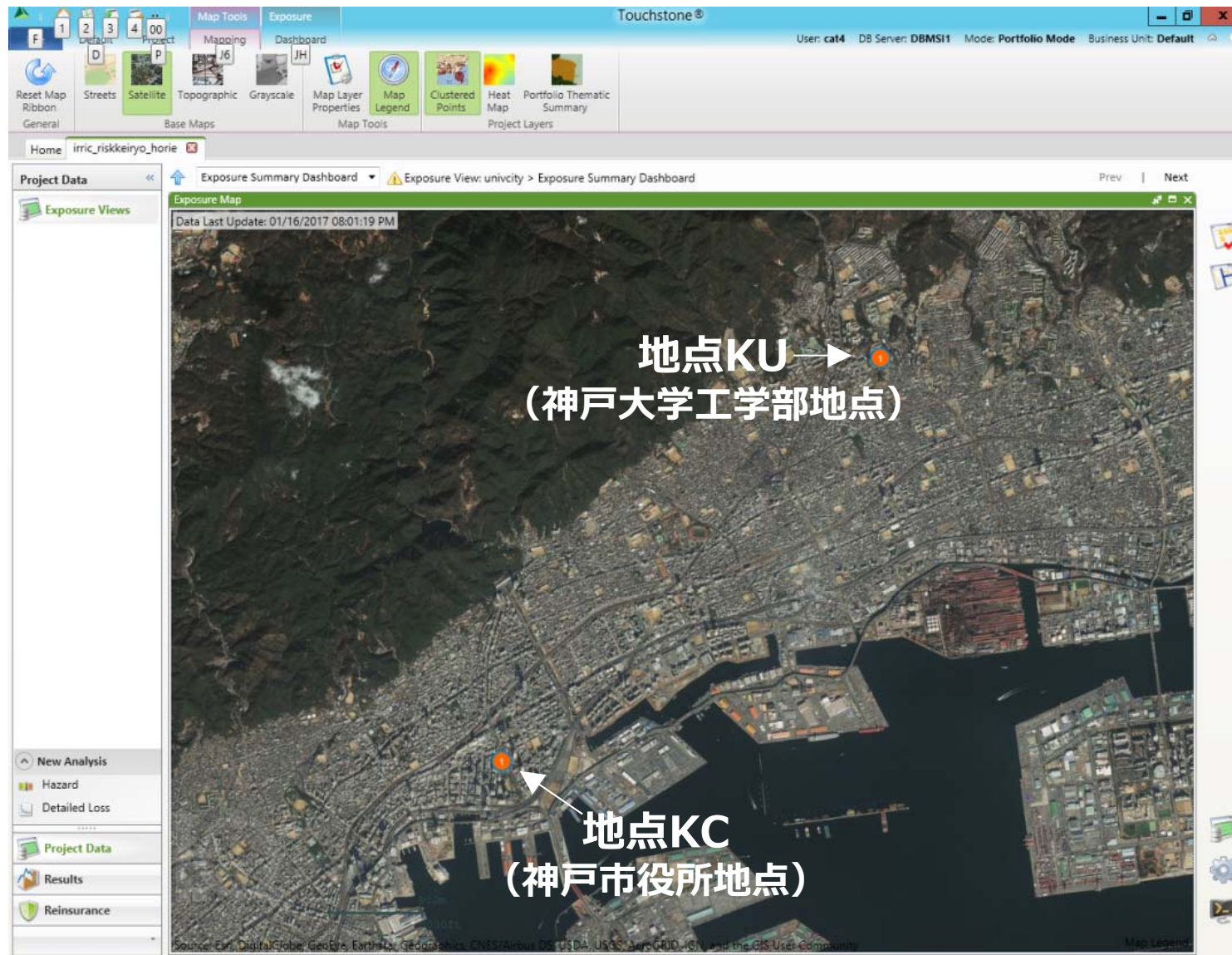
リスク = 確率 × 強度

Risk

Probability

Loss (損失の大きさ)

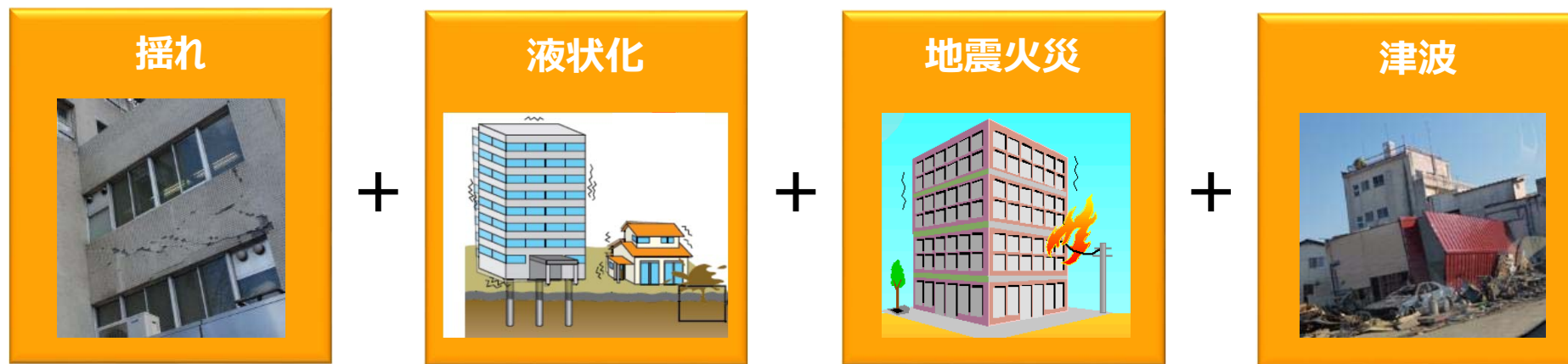
地震リスク分析用ソフトウェア画面



自然災害リスク分析ソフトウェア「AIR Touchstone」

地震リスク分析用ソフトウェアの概要

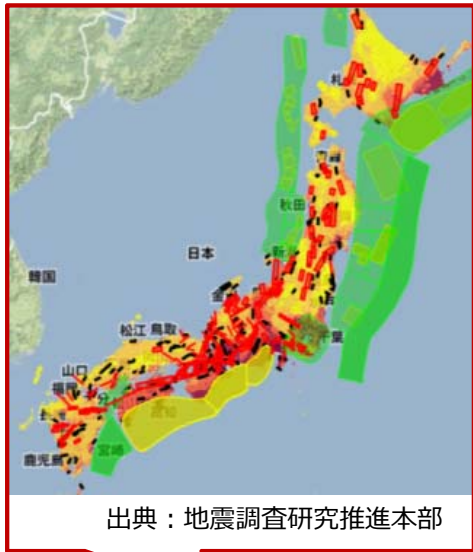
- 地震リスク分析では、地震や津波が発生した際に想定される損失額を算出。
- 地震は日本全域の震源域を対象として、今後起こりえる数十万シナリオの地震による確率的な損失予測が可能。
- 津波はM9クラスを含む約5,000通りの地震を基に損失予測を実施。
- 地震による「揺れ」、「液状化」、「地震火災」、「津波」の被害を同時に予測することが可能
- 「**どの地点のリスクが大きいのか**」、「**大きな影響を与える地震（震源）は何か**」、といった地震対策に着手するにあたっての基礎資料として活用。



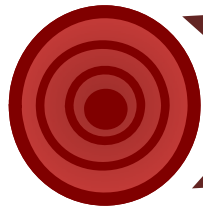
※今回は地震動（揺れ）による損害のみを考慮して分析を実施

地震リスク分析の構成（概念図）

➤ 各拠点の地震の揺れの大きさを算定し、建物や設備の脆弱性（こわれやすさ）との関係から被害を予測します。



J-SHIS等の情報から日本全国の震源を考慮した地震カタログ（イベントセット）を作成



①地震発生モデル
(地震カタログ生成)

震源位置、マグニ
チュード、発生確率

②地震波伝播モデル
(距離減衰式)

地震エネルギーの減衰

④被害予測モデル
(被害関数)

被害の受けやすさ

③地盤モデル
(表層地盤増幅率)

揺れの増幅

$$\text{観測される地震動} = \text{①震源特性} \times \text{②伝播経路特性} \times \text{③サイト増幅特性}$$

地震リスク分析の流れ



地震リスク分析のアウトプットイメージ

■ リスクの定量化手法には、シナリオ型評価と確率論的評価がある

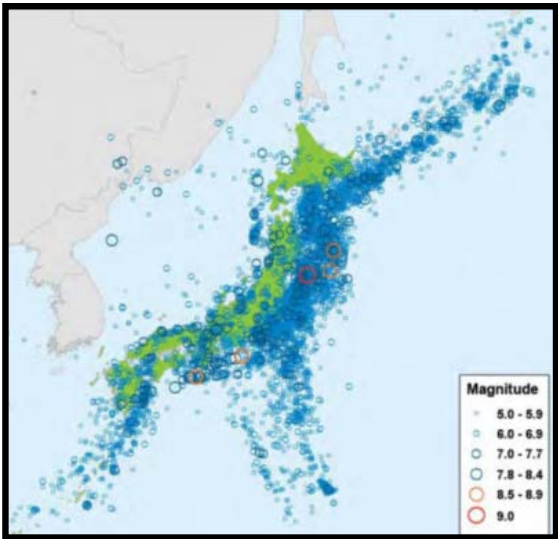
シナリオ型評価

最大級の地震動をもたらす地震が
明確 →特定のリスクに備える。



順位	地震名	予想損失額 (億円)
1	想定東海地震	1,087
2	1923年関東地震再来	787
3	1703年元禄地震再来	694
⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮

確率論的評価

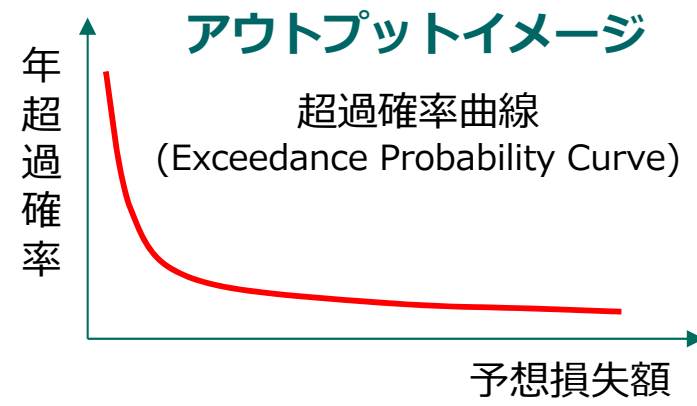


最大級の地震動をもたらす地震が
不明確

→最大のリスク量を確率的
に定める。

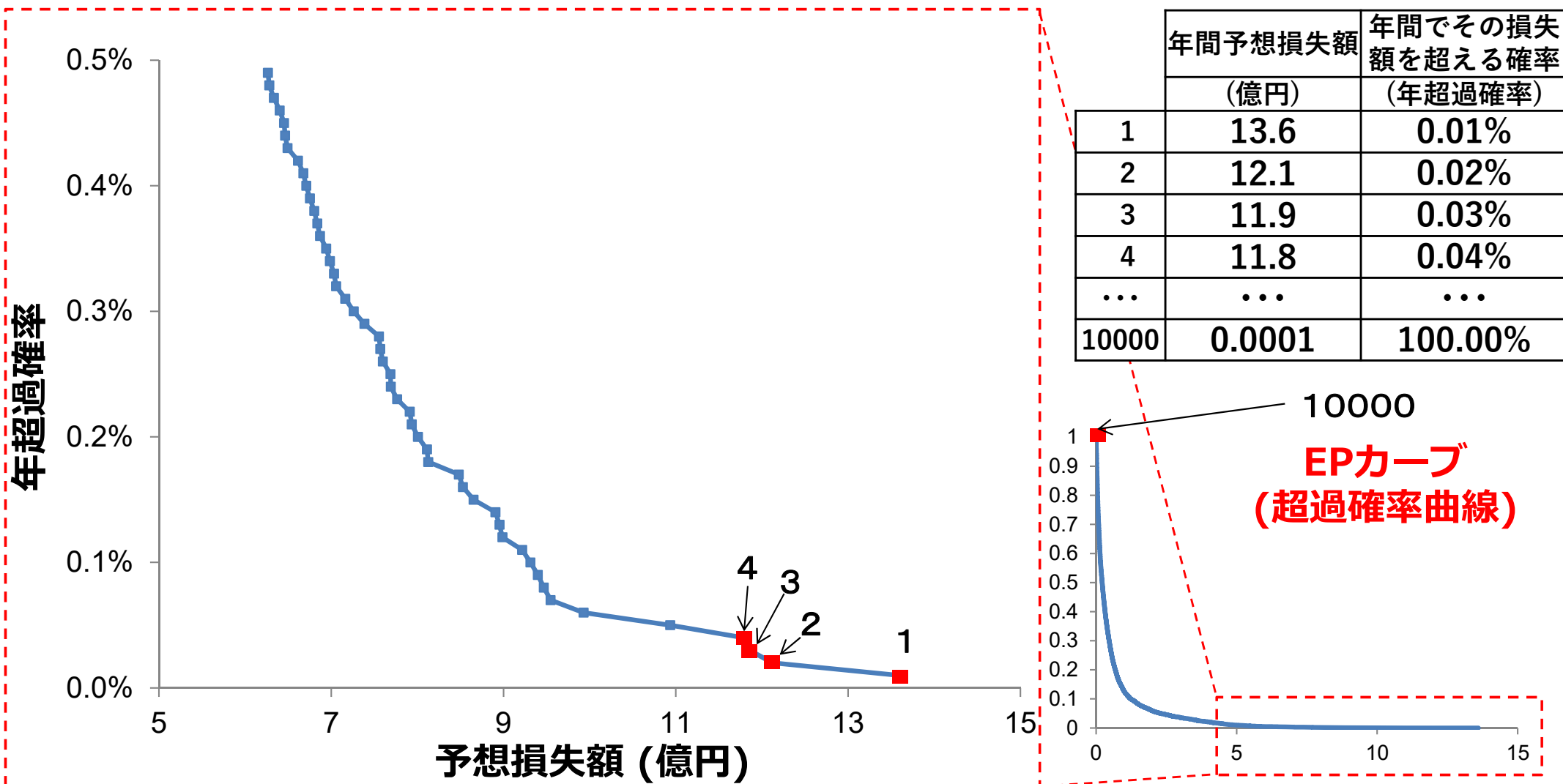
今後1年間に発生しうるハザード
に確率を持たせた確率論的イベン
トカタログを使用

年超過 確率	再現期間 (年)	予想損失額(億円)
10.00%	10	184
5.00%	20	404
2.00%	50	662
1.00%	100	822
0.50%	200	969
0.20%	500	1,149
0.10%	1,000	1,271
年間期待損失額		73



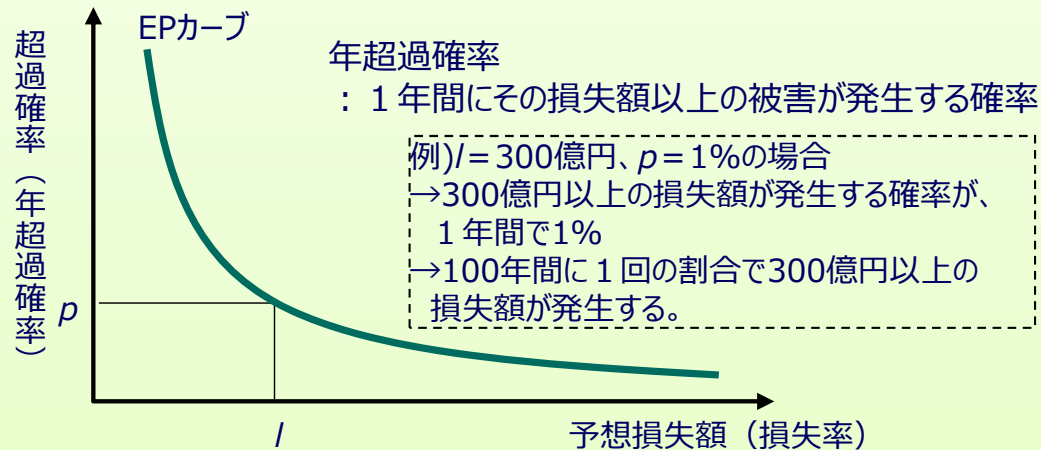
リスクの確率論的評価の事例

- 年間予想損失額と年超過確率を、年間予想損失額の大きい順に並べたものを**EPカーブ**（Exceedance Probability Curve：超過確率曲線）と呼ぶ。

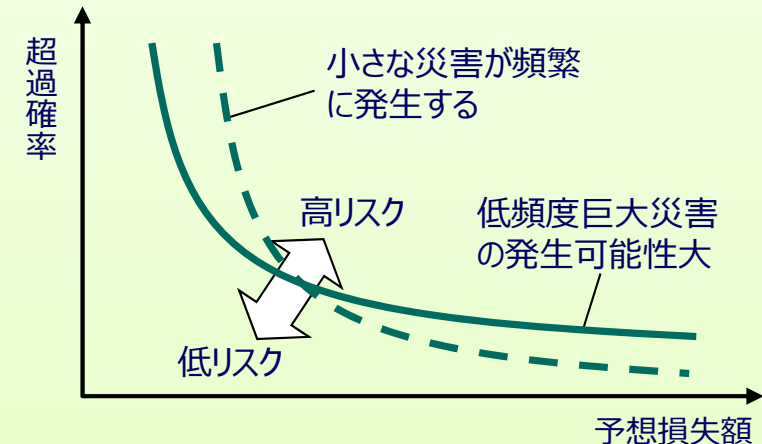


EPカーブ(超過確率曲線)からわかること

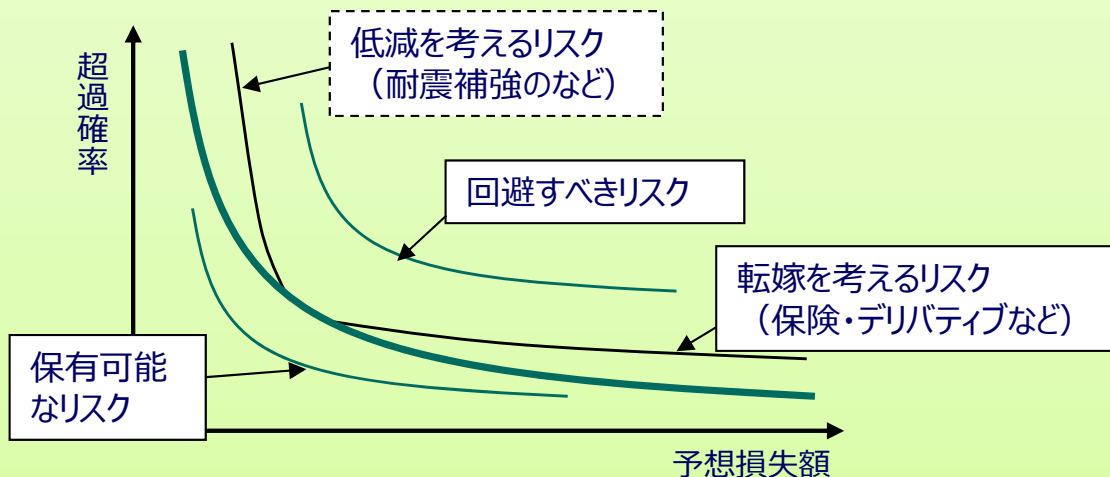
① EPカーブが表す意味



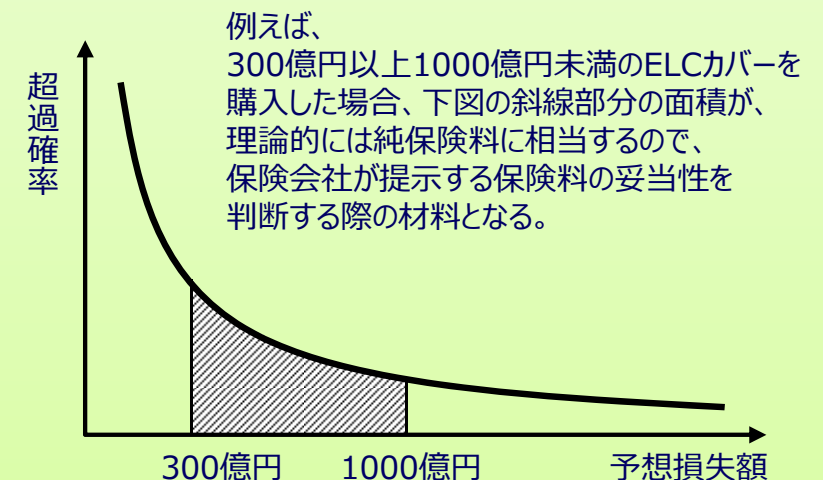
② カーブの形状からわかること



③ リスクマネジメントにおける基本方針がわかる



④ 保険に関する判断材料となる



個人のリスク処理手法

■ 耐震補強と地震保険が支柱

- » リスク回避：転居は困難
- » リスク保有：貯蓄で十分にカバーすることは非現実的



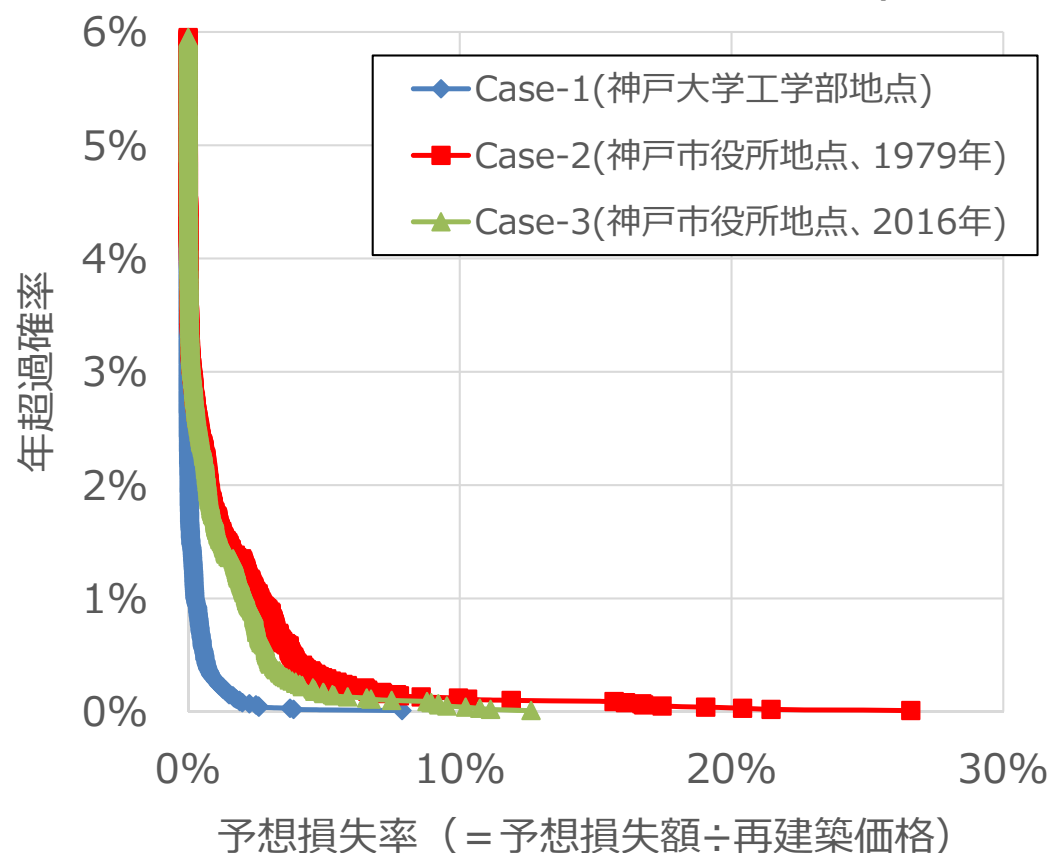
リスクマネジメントにおける 4 つのリスク処理手法

リスク処理手法		リスクコントロール		リスクファイナンス	
		リスク回避	リスク軽減	リスク移転	リスク保有
保険契約者	企業	地震リスクが高い地域で事業を行わない	①立地の分散、 ②耐震改修・補強	①地震保険加入 ②災害債発行	①引当金の設定、 ②キャプティブの設定
	個人	地震リスクが高い地域からの転居	耐震改修・補強	地震保険加入	貯蓄
保険企業		引受けるリスクの選別	保険契約者によるリスク軽減のインセンティブの設定	①再保険、 ②災害債発行	補償限度、免責の設定による範囲を限定したリスク保有

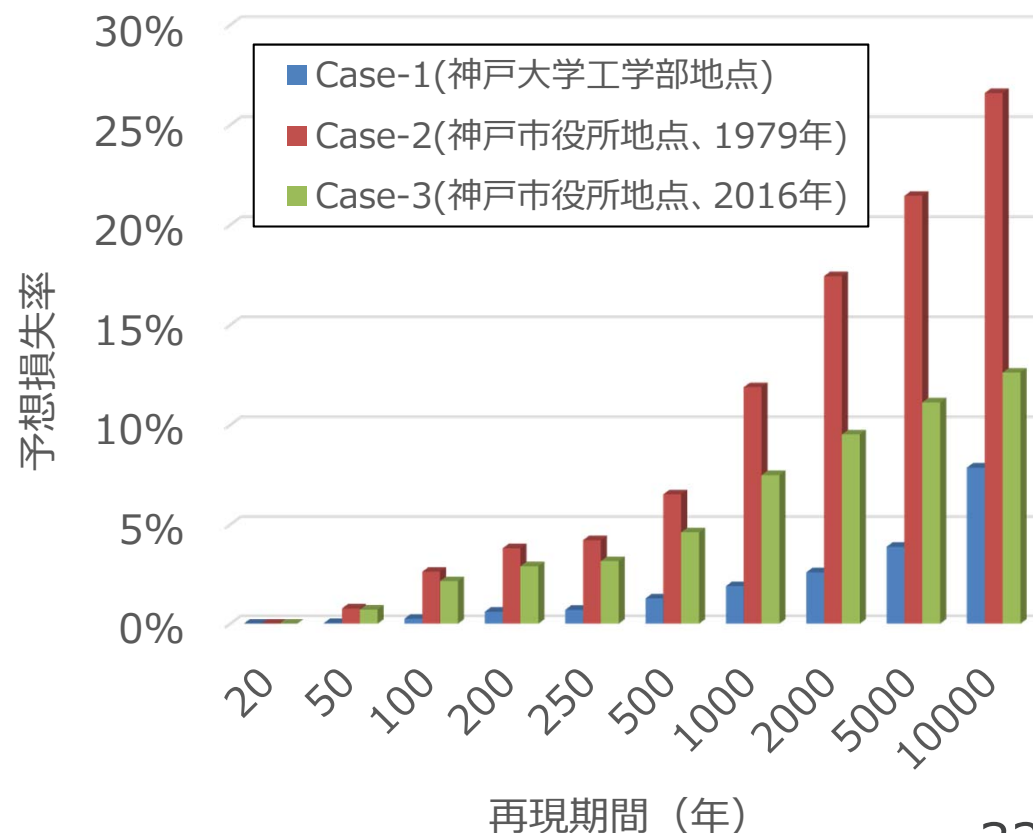
確率分析結果（１）年超過確率曲線、再現期間別損害率

- 想定される損失の大きさを比較すると、Case-2 > Case-3 > Case-1
- 再現期間が長い領域（確率が小さい領域）になると、Case-2 と Case-3 の差が大きくなる傾向がみられる ⇒ 耐震性の違いの影響が大きい

年超過確率曲線（EPカーブ）



再現期間別損害率



確率分析結果（２） 損失が大きい地震イベントTOP20

- 発生確率が高い南海トラフ地震が多く含まれている
- 活断層型地震や背景地震も上位に含まれている

解析用入力地震作成
対象に含めるか要検討
課題

例) Case-2 （神戸市役所地点、1979年）

Top1~10

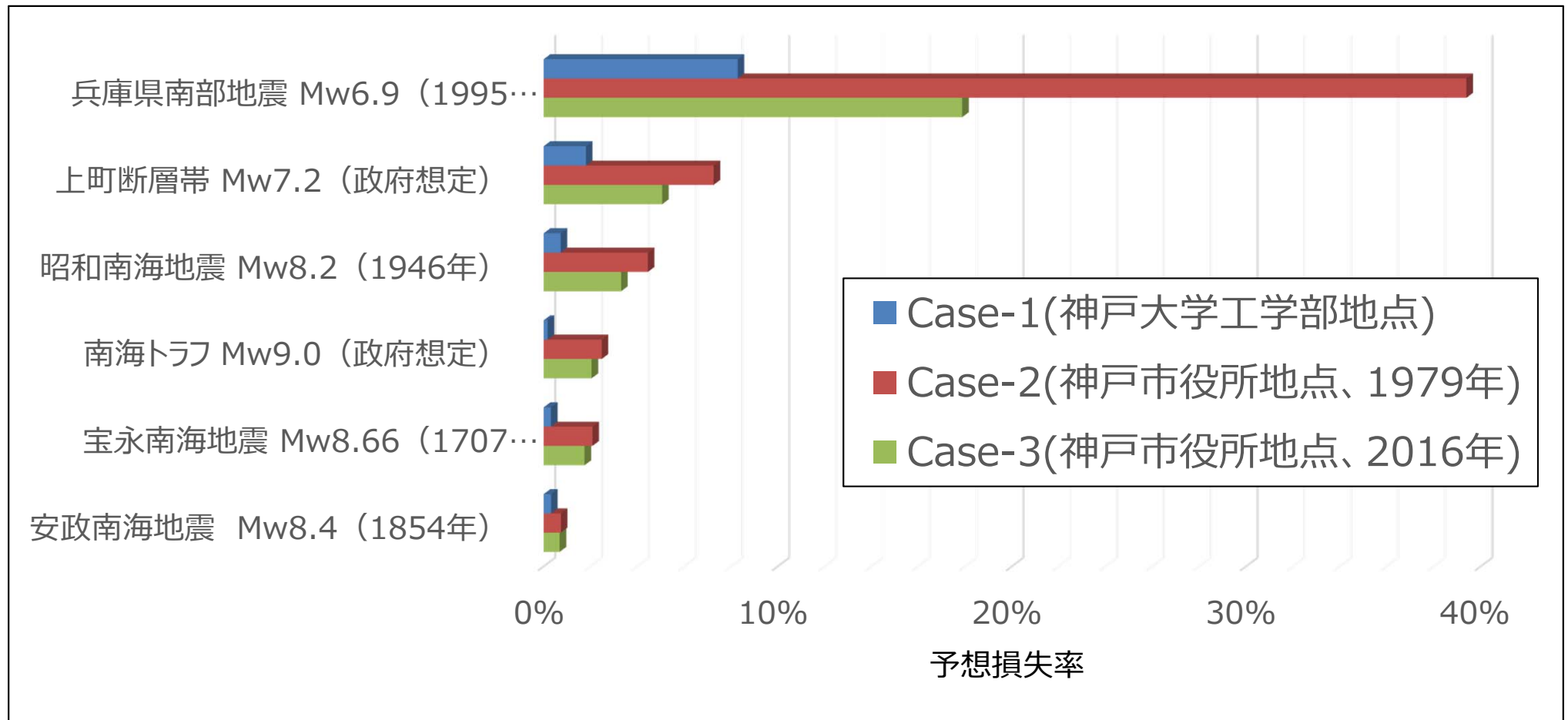
順位	震源断層	規模 (Mw)	予想 損失率
1	南海トラフ	9.09	26.6%
2	背景地震	7.16	21.5%
3	南海トラフ	8.93	20.4%
4	南海トラフ	8.89	19.0%
5	南海トラフ	8.85	17.4%
6	南海トラフ	8.84	16.8%
7	南海トラフ	8.83	16.7%
8	大阪湾断層帯	6.9	16.1%
9	南海トラフ	8.81	15.7%
10	南海トラフ	8.8	11.9%

Top11~20

順位	震源断層	規模 (Mw)	予想 損失率
11	南海トラフ	8.79	10.3%
12	南海トラフ	8.79	9.9%
13	有馬－高槻断層帯	7.09	8.6%
14	南海トラフ	8.76	7.8%
15	南海トラフ	8.78	7.7%
16	南海トラフ	8.73	7.2%
17	上町断層帯	7.36	7.1%
18	南海トラフ	8.75	6.6%
19	南海トラフ	8.73	6.6%
20	南海トラフ	8.71	6.5%

シナリオ分析結果

- 兵庫県南部地震シナリオでは大きな損失の発生が予想される
- 上町断層帯による地震において比較的大きな損失が発生する可能性がある
- 予想される損失の大きさを比較すると、Case-2 > Case-3 > Case-1



検討結果と今後の課題

■ 検討結果

- » 「地震ハザードステーションJ-SHIS」の情報から、神戸市の建物に被害を与える可能性がある主要活断層のうち、上町断層の地震発生確率が比較的高いことを確認した
- » 同じ神戸市内であっても、建設地の地盤の影響等により想定しておくべきハザードの大きさは異なることを確認した
- » 「自然災害リスク分析ソフトウェア」を用いて地震リスクを定量的に分析した結果から、地盤や耐震性の違いによるリスク量への影響を確認した
- » 南海トラフや主要活断層による地震以外に、震源断層が特定しにくい背景地震の発生も考慮に入れる必要がある

■ 今後の課題

- » 倒壊判定のための地震応答解析に必要な入力地震動の条件設定が大きな課題
 - どの地震発生源を対象とするか（南海トラフ、上町断層帯、・・・）
 - 震源位置、地震規模等にばらつきをもたせるのかどうか、ばらつきを持たせるとすればその幅をどのように設定するか
 - 発生確率が極めて低い断層（例えば、六甲・淡路島断層帯など）を対象に含めるかどうか

照会先

株式会社 インターリスク総研

101-0063

東京都千代田区神田淡路町2-105

ワテラスアネックス

総合企画部

リスク計量評価チーム

TEL: 03-5296-8962 FAX: 03-5296-8940

必要なデータとアウトプットイメージ

分析に必要なデータ

- 企業名・物件名・所在地
- 各建物の建築年・構造・階数・用途
- 各建物の評価額（建物・動産の新価もしくは時価） ※火災保険目的明細書で代用できるものは省略可



アウトプット① シナリオ分析

シナリオ分析とは具体的な活断層やトラフ等で発生した地震・津波を想定し、その地震・津波が発生した場合に物件が受ける被害想定額を計算します。「どのような地震・津波が起こったらどの程度の被害になるか」を具体的にイメージいただくことができます。

【シナリオ分析結果のイメージ】

地震シナリオ		被害想定額	被害想定率
大正型関東地震	M7.9程度	960百万円	32.0%
東京湾北部地震	M7.3	480百万円	16.0%
南海トラフ巨大地震	M9程度	285百万円	9.5%

※被害想定率は保険価額に対する被害想定額の割合を示します

アウトプット② 確率分析

確率分析では考え得る全ての地震・津波を対象に、その発生確率に応じた物件の被害想定率（損害の程度）を計算します。これらの結果を集約して確率統計的に処理することによってEPカーブ（Exceedance Probability Curve：超過損害額曲線）を算出し、年超過確率（再現期間）ごとの推定損害額をご提示します。

【確率分析結果のイメージ】

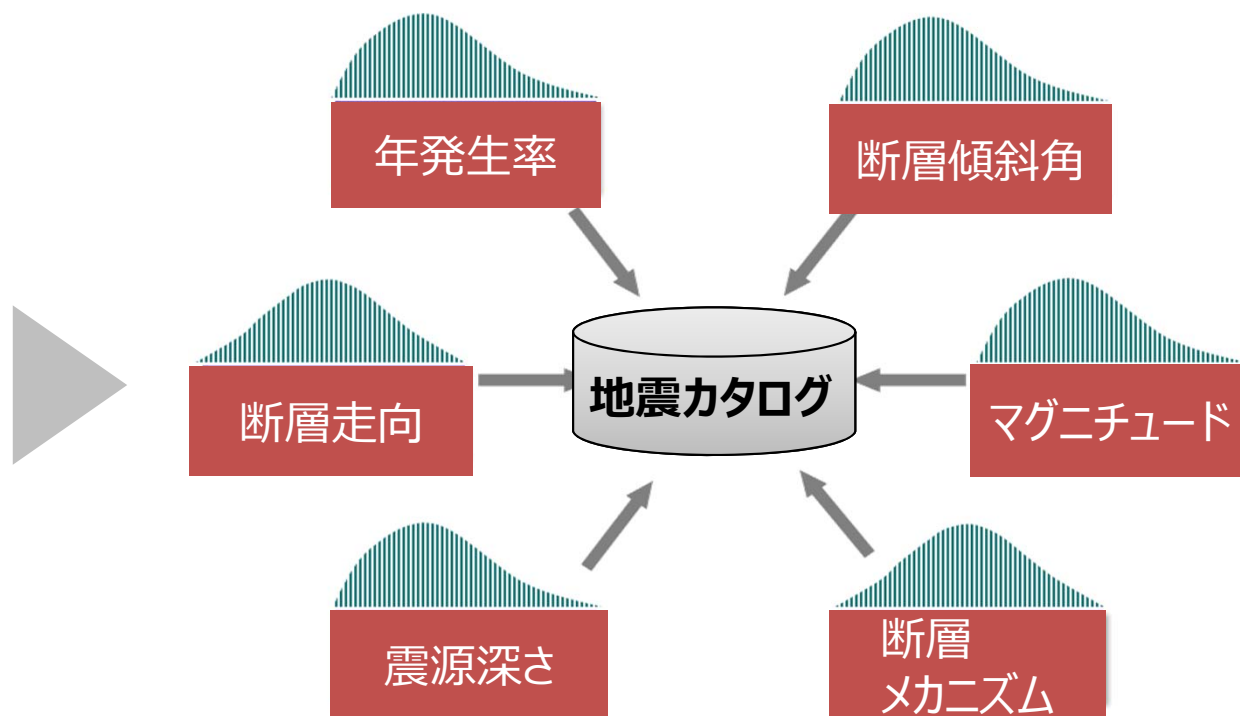
年超過確率	被害想定額	被害想定率
年超過確率1.0%（再現期間100年）	36百万円	1.2%
年超過確率0.4%（再現期間250年）	72百万円	2.4%
年超過確率0.21%（再現期間475年）	315百万円	10.5%

【年超過確率】 被害想定額を超える被害が発生する確率を、1年あたりで算出したものです。上表の再現期間475年であれば、「今後1年間に0.21%の確率で、315百万円を超える被害が発生する」となります。

【再現期間】 被害想定額を超える被害が平均1回生じる期間を示し、年超過確率の逆数で求められます。上表の再現期間475年であれば、「（被害の発生確率が変わらなければ）今後475年間に平均1回、315百万円を超える被害が発生する」となります。

① 地震発生モデル（地震カタログ生成）

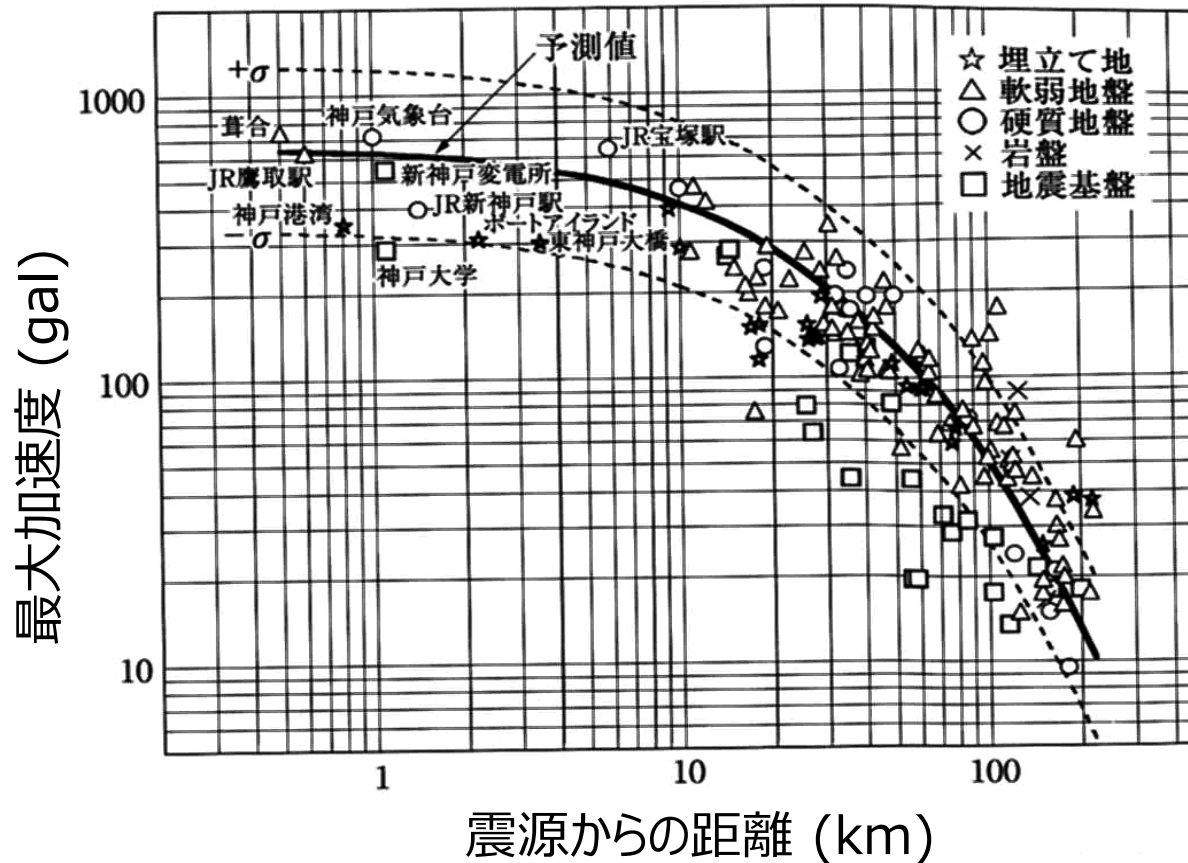
- 地震発生モデルでは、政府の研究機関である地震調査研究推進本部（地震本部）による研究成果をもとに、歴史上の地震や今後起こりえる地震などの数十万シナリオを網羅的に収録した「地震カタログ」を生成します。
- 地震本部は日本全域の震源域を対象に震源の位置や規模、発生確率などの評価を行い、成果を公表しています。



主要活断層の評価結果（出典 地震本部資料）
※2015年1月14日現在、確率算出基準日は同年1月1日

② 地震波伝播モデル（距離減衰式）

- 地震による揺れは、震源から遠くなるほどエネルギーを消費して減衰します。
- 震源からの距離と揺れの大きさの関係を関数化した「距離減衰式」を用いて、基盤上の揺れの大きさを算定します。

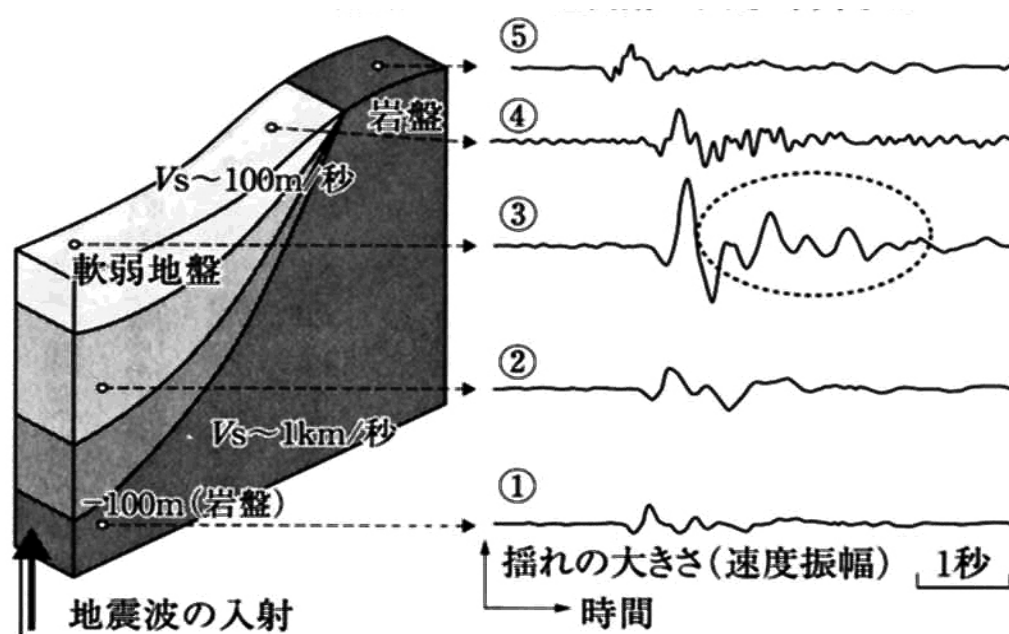


兵庫県南部地震における距離減衰式
(出典 Fukushima et al. 2000)

③ 地盤モデル（表層地盤増幅率）

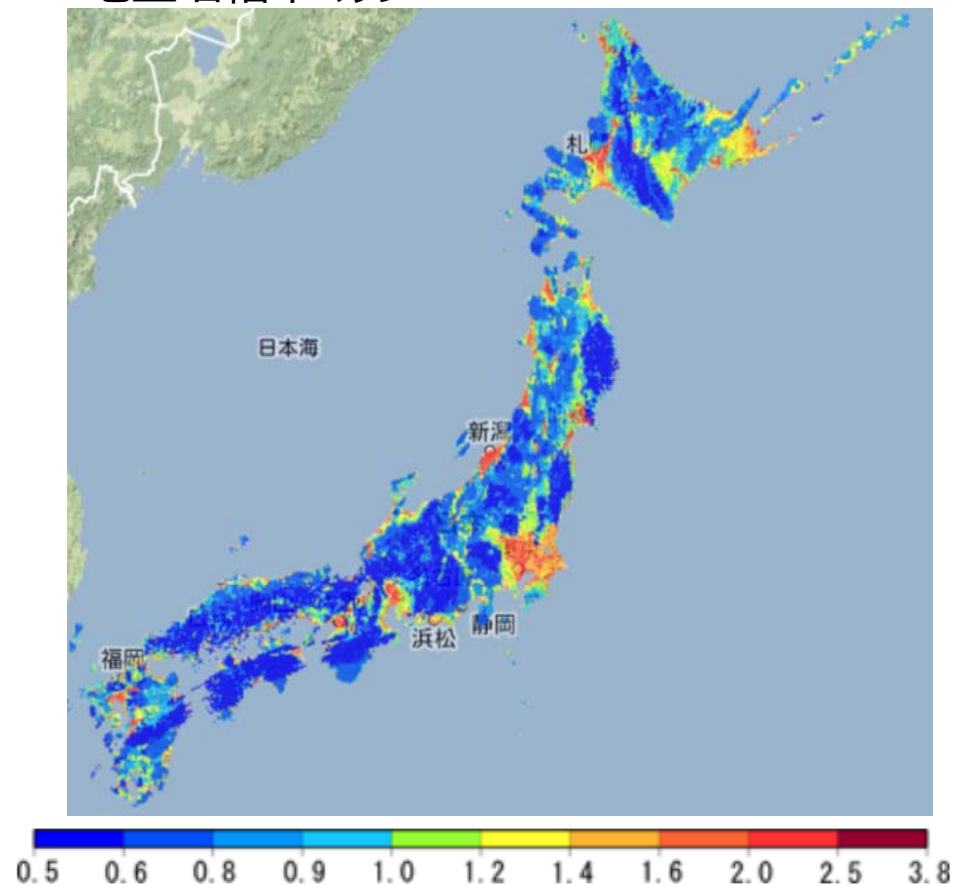
- 地表での地震の揺れは、地下に堆積する地盤の特性に応じて一般的に基盤上の揺れから増幅します。
- 地震本部の地盤増幅率マップ等から設定した「表層地盤増幅率」を基に地表面の揺れの大きさを算定します。

地震波の増幅現象の事例



小田原での地震観測の例
(出典 工藤,2000)

地盤増幅率マップ



工学的基盤からの増幅率
(出典 地震本部資料,2013)

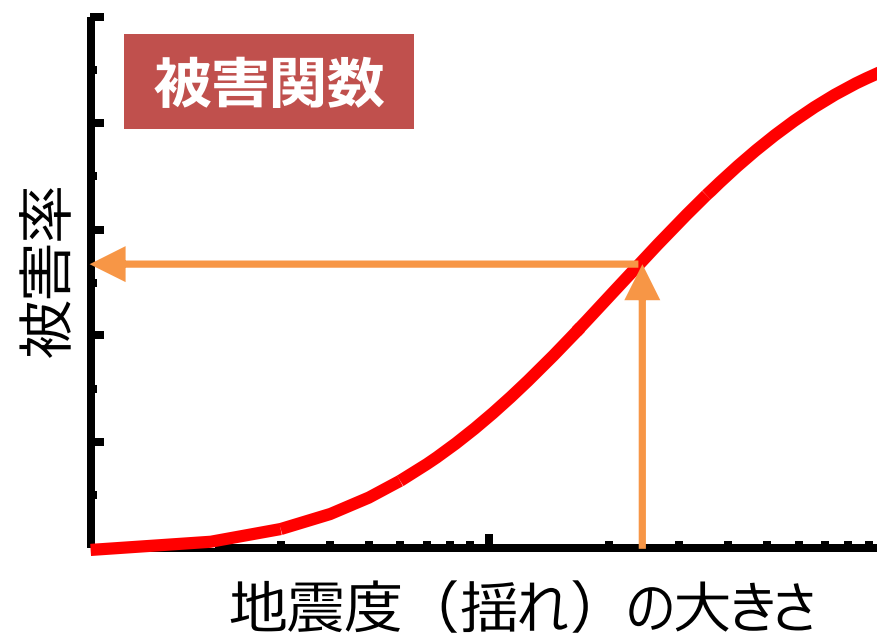
④ 被害予測モデル（被害関数）

- 各拠点の地震の揺れの大きさと、建物や設備の脆弱性（こわれやすさ）との関係に関数化した「被害関数」を用いて被害を予測します。



地震動（揺れ）の大きさ

建物・設備の脆弱性
（こわれやすさ）



液状化・地震火災・津波のモデル

- 液状化モデル : 土層断面などのデータから地盤の沈下量を算定して被害を予測します。
- 地震火災モデル : 出火⇒延焼⇒消火の現象を数値シミュレーションで再現した結果を用いて被害を予測します。
- 津波モデル : 津波発生メカニズムを数値シミュレーションで再現した結果を用いて被害を予測します。

【津波の生起】

①水位上昇量

断層のすべり量から、初期水位としての上昇量を算定

【津波の伝播】

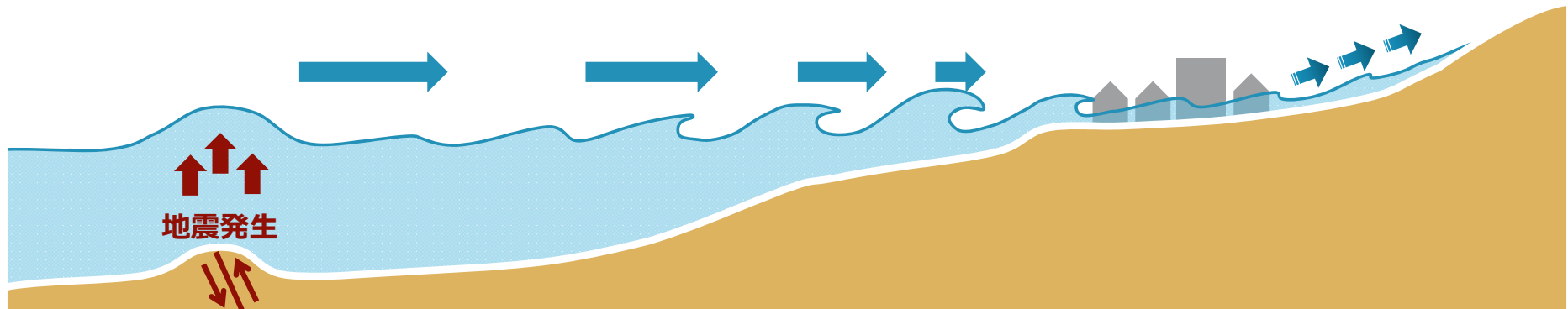
②津波高、到達時間など

初期水位や海底の地形情報から、海岸線での津波高、津波到達時間などを算定

【津波の遡上】

③浸水深、流速など

海岸線での津波高と地形情報、地上の摩擦係数から、津波の遡上高、浸水深、流速等を算定



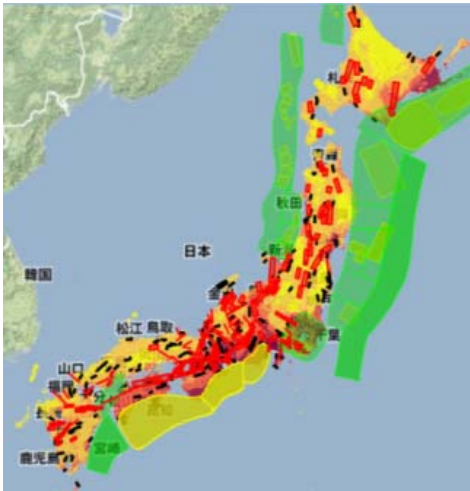
津波の数値シミュレーションのイメージ

地震リスク分析の手法

評価対象物件に関する情報
所在地（住所）／建築年／建物構造／
階数／用途／評価額（建物・動産の新価または時価）

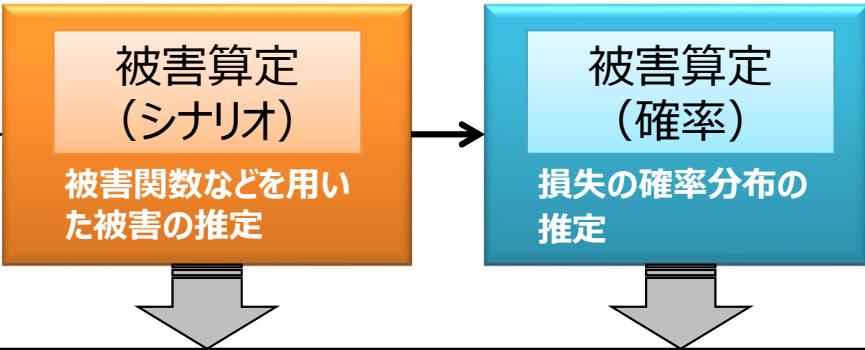
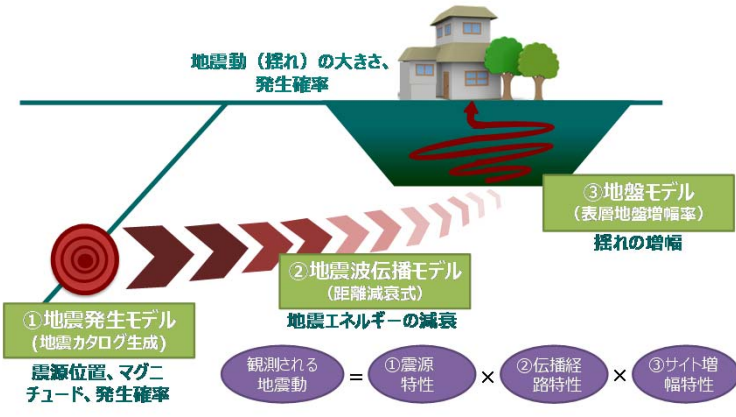


日本全国の震源を考慮した
地震シナリオを作成



※出典：地震調査研究推進本部

対象物件所在地での揺れの強さ、
津波浸水深などのハザードを算定



対象物件の被害想定額を算出

【シナリオ分析】

地震シナリオ		被害想定額	被害想定率
大正型関東地震	M7.9程度	960百万円	32.0%
東京湾北部地震	M7.3	480百万円	16.0%
南海トラフ巨大地震	M9程度	285百万円	9.5%

【確率分析】

地震シナリオ		被害想定額	被害想定率
年超過確率1.0%（再現期間100年）		36百万円	1.2%
年超過確率0.4%（再現期間250年）		72百万円	2.4%
年超過確率0.21%（再現期間475年）		315百万円	10.5%