

地震ハザード評価の体系化に向けて —確率論的評価とシナリオ型評価の融合—

石川 裕¹・能島暢呂²

¹ 清水建設(株) 技術研究所 計画技術グループ長 (〒135-8530 東京都江東区越中島 3-4-17)

E-mail : yutaka.ishikawa@shimz.co.jp

² 岐阜大学 工学部 社会基盤工学科 助教授 (〒501-1193 岐阜市柳戸1-1)

E-mail : nojima@cive.gifu-u.ac.jp

本研究では、従来、別個の概念として取り扱われてきた確率論的地震ハザード評価とシナリオ型地震動評価の特徴を整理するとともに、最大震度6弱以上を観測した最近の主な地震と対照させることにより、それぞれの手法の有用性と限界について考察した。さらに、両手法の利点を融合させた次世代の地震ハザード評価の枠組みを構築するための方向性と評価のフローについて提示した。

Key Words : seismic hazard assessment, probabilistic approach, scenario-based approach, framework of complementary applications, post-events examination

1. はじめに

この10年、兵庫県南部地震を契機として整備された地震観測網の助けを得て、地震および地震動に対する理解は飛躍的に向上した。地震のタイプや震源断層の破壊性状により地震動の特性が大きく変化することや、地震動は表層地盤のみならず深い地盤構造の影響を強く受けることが明らかになってきた。定性的には従来より認識されてきたことも多いが、定量的なデータとともに裏付けられつつある意義は大きい。こうした知見を踏まえて強震動を精度よく予測するための方法論も成果を生み出しつつある。

一方、規制緩和と自己責任の時代を迎え、種々のリスクを計量化して開示する社会的な要請が高まりつつある。地震リスクに関しても例外ではなく、耐震・防災投資の投資対効果の説明や、多様な地震シナリオに対するリスクを包括して検討するためには、事象の発生確率を考慮した定量的な地震リスク評価の礎が必要である。

このような趨勢を踏まえて、とりわけ強調すべき点として、i) 地震動はサイトごとに異なる「顔」を有するものであり、従来の耐震設計で用いられてきたような横並びの地震動では遅かれ早かれ説明責任が果たせなくなること、ii) 兵庫県南部地震や新潟県中越地震などの甚大な被害の大半は設計での想定を上回る地震動によって引き起こされており、幅広い地震シナリオを視野に入れた検討を行うためには確率論を含めたリスクマネジメントの概念を援用

することが不可避となっていること、が指摘できる。

将来の地震動を評価する方法としては「確率論的地震ハザード評価」と「シナリオ型地震動評価」が代表的であるが、両手法は基本的に別個の概念として用いられてきた。例えば、地震調査研究推進本部(推本)において進められてきた「全国を概観した地震動予測地図」¹⁾が2005年3月に公表された。そこでは「確率論的地震動予測地図」(確率論的地震ハザード評価)と「震源断層を特定した地震動予測地図」(シナリオ型地震動評価)が示されているが、目的に応じて両者をどのように組み合わせ、活用していくかは今後の課題とされている。

本研究では「確率論的地震ハザード評価」と「シナリオ型地震動評価」の双方を含む概念を「地震ハザード評価」と定義する。多様化するリスクマネジメントの入力情報として、今後は対象地点や対象地域の属性(地震環境、深層地盤構造、表層地質)や対象とする構造物や施設群の特性に応じた地震動を、その生起確率との組合せとして提示していくことが不可欠になるとの認識の下に、「確率論的地震ハザード評価」と「シナリオ型地震動評価」の融合の方向性について議論する。以下では、両手法の特徴を整理するとともに、最大震度6弱以上を観測した最近の主な地震と対照させることにより、それぞれの手法の有用性と限界について考察した。さらに、両手法の利点を融合させた次世代の地震ハザード評価の枠組みを構築するための方向性と評価のフローについて、より具体的な形で提示した。

2. 確率論的地震ハザード評価とシナリオ型地震動評価の特徴

確率論的地震ハザード評価とシナリオ型地震動評価の特徴を比較した表を表-1に示す。

確率論的地震ハザード評価は、地震の発生や地震動の予測に関わる種々の不確定性を確率モデルで表現することにより、全体の不確定性を総合評価するものである。その結果は通常ハザードカーブや一様ハザードスペクトルなど、発生確率に対応する地震動強さで表現される。確率論的地震ハザード評価の結果に基づいて、「超過確率のレベルを揃えた場合の地震動強さ」もしくは「地震動強さのレベルを揃えた場合の超過確率」の地域的な分布を地図として表現したものが「確率論的地震ハザードマップ」あるいは「確率論的地震動予測地図」である。確率論的地震ハザード評価は、予測される地震動の強さとその発生確率との関係（ハザードレベル）を明確にできることが最大の特徴である。

また、確率論的地震ハザード評価では影響するすべての地震が対象となる。震源断層を予め特定しにくい地震はシナリオ型評価では対象とされない場合が多いので、確率論的地震ハザード評価にはこうした地震を含めたハザードが議論できる利点もある。

これに対して、シナリオ型地震動評価は過去の地震歴や活断層の分布などの情報を参考にして、将来発生しそうな地震の物理的な諸元をあらかじめ特定の値に設定し、それに基づき地震動の予測を行うものである。構造物の設計用入力地震動を時刻歴波形や応答スペクトルなどにより定める場合、震源断層の諸元やサイトとの位置関係などが明らかなシナリオ地震を設定することにより、断層の破壊様式なども含めて地震動の定量評価を行えるという利点がある。特に兵庫県南部地震で経験したように、被害に結びつく地震動には強い局所性があり、このような地震動の性質を把握するにはシナリオ型地震動評価が有用である。

また、広域的な防災対策では、地震によって「一度に」発生する地震動強さの地域分布を知る必要があるため、外力条件としてシナリオ地震を設定することが有効である。確率論的地震ハザードマップはサイトごとに独立に解析した結果を地図の形で示したものであって、広域的に「一度に」発生する地震動の分布を表したものではないことに注意が必要である。なお、シナリオ型のハザードマップ（震源断層を特定した地震動予測地図）も「同一時刻（瞬間）」の地震動分布を示したもの（スナップショット）と、「一度（特定の地震に対する最大）」の地震動分布を示したものがあるが、一般的には後者が利用されている。また、「一度」の地震動分布の中にも単一の評価条件での地震動強さの分布を示したものと、同じ地震で破壊開始点やアスペリティ位置などの一部の条件を変えた複数の評価結果に基づいてその中の最大の地震動強さ（包絡値）を地点ごとに拾い出し、その分布を示したものがある。

表-1 確率論的地震ハザード評価とシナリオ型地震動評価の特徴

	確率論的地震ハザード評価	シナリオ型地震動評価
評価の手順	・影響するすべての地震の発生確率とその地震による地震動強さの超過確率を積和する	・想定した特定の地震（シナリオ）が発生した場合の地震動を評価する
対象とする地震	・影響するすべての地震 ・震源断層を予め特定しにくい地震も含まれる	・特定の一つまたは複数の地震 ・震源断層が予め特定できる地震が主たる対象
地震の発生確率	・すべての地震の発生確率が評価結果に反映される	・地震選定において考慮されるが評価結果には陽には含まれない
地震動の評価方法	・通常は簡便法（距離減衰式） ・一部に詳細法の適用も見られる	・断層の破壊様式を考慮した詳細法 ・簡便法（距離減衰式）の場合もある
地震動評価における不確定性の扱い	・対数正規分布などの確率分布で定量的に処理される	・パラメータ設定において考慮されるが個別判断に委ねられており統一されていない
個々の地点での評価結果	・ハザードカーブ 一様ハザードスペクトルなど ・一様ハザードスペクトルは周期ごとに各地震の貢献度が異なる	・地震動の時刻歴波形、応答スペクトルなど ・設定したシナリオに応じた結果が得られる
地震動強さマップの作成方法	・期間と超過確率を固定した場合の地震動強さを地図で表示する ・地震活動の非定常性のため時間経過とともに結果が変化する	・その地震が発生した場合の最大地震動強さの地域分布あるいは同一時刻における地震動強さの地域分布（スナップショット）を地図で表示する
地震動強さマップの意味と理解の容易性	・各地点での結果は独立で、発生する事象の同時性や特定の地震時の地震動強さを表わすものではない ・地域的な相対比較について容易に理解できる ・目的に応じてどの確率レベルの地図を用いればよいかが標準化されていない	・想定した地震が発生した際の最大または同時の地震動強さを表わす ・複数の地図を比較する際、事象の発生可能性が考慮できない ・同じ地震であつても複数の地図ができるが、その使い分けについて目的ごとに標準化されていない

個別地点を対象として将来の地震動を予測する場合、地震動の不確定性を考慮できるという点で確率論的地震ハザード評価は有用である。全国の地震ハザードを同じ尺度で比較するには確率論的な手法に拠らざるを得ない。また、リスクマネジメントへの展開や、地震以外のリスクとの定量比較を行う場合にも確率論的手法が有用である。特に欧米を中心とする諸外国では様々なリスクが確率論的に評価されており、国際化の視点からも確率論的手法を忌避することはもはや許されない趨勢となっている。

しかしながら、確率論的地震ハザード評価を具体的に利用するに際しては解決を要する課題も多い²⁾。まず、利用目的に応じて意思決定に用いる確率レベルを具体的にいくつに設定すべきかという問題に関して議論が進んでいない。特に兵庫県南部地震のような低頻度の問題に対して確率が利用できるのか、あるいはどのように利用していくのかについて、専門家の間でもコンセンサスが得られていない。関連して、確率論的地震ハザード評価の結果では相対的に発生確率が低い地震による地震動の特徴が反映されにくいという性質や、一様ハザードスペクトルでは周期ごとに貢献度が大きな地震が異なるという特徴がある。活断層での地震を含めて陸域の浅い所で発生する地震は、発生確率は低いものの、局所的に強烈な地震動をもたらすことを経験してきたが、このような地震による地震動を定量評価するためにはシナリオ型地震動評価の補完が必要と思われる。

一方、広域を対象とした場合には特定の地震が発生した場合の被害の特徴や被害量の総和を把握したいというニーズが強いが、こうした目的にはシナリオ型地震動評価が有効である。確率論的地震ハザード評価に基づくポートフォリオリスク評価³⁾では被害量と対象期間での発生確率の関係を把握することができるが、特定の地震に対する被害をイメージできないという問題点がある。しかしながら、シナリオ型地震動評価では想定地震や震源メカニズム等を選定する手続きに任意性があり、設定したシナリオがどの程度の確率で生起するかを含めて、シナリオ選定ルールの特長が未解決である。また、設定されたシナリオにおける地震動の不確定性の定量評価についても今後の課題であると言える。

以上述べてきたように、両手法にはそれぞれ長所がある反面相違点も多く、互いに相容れない概念のようにも思える。しかし、将来考えておくべき地震動を定量評価するという目的は同じであり、今後は互いの弱点を補いあう形での融合を目指していく必要がある。当面はシナリオ型地震動評価の知見を確率論的地震ハザード評価に取込んでいくこと、確率論的想定地震⁴⁾⁵⁾など確率論的地震ハザード評価の再分解の結果とシナリオ地震との関係の明確化を図ること、シナリオ型地震動評価の結果を確率論的地震ハザードの観点からレビューすることで互いの関係を定量評価していくことが重要である。このような事例を積み上げることによって、確率論的地震ハザード評価を活用していく場合に要請される目標確率

レベルの具体化に対する理解も深まっていくことが期待される。両手法の融合の方向性については4.と5.においてより詳しく述べる。

3. 最近の主な地震を対象とした事後評価による両手法の理解

(1) 評価の概要と条件

この数年、最大震度が震度6弱を上回る被害地震が続発している。確率論的地震ハザード評価とシナリオ型地震動評価の有用性と限界について理解を深めるために、最近の主な地震を対象として、両手法による地震動評価が経験した最大の震度を事前に予測できたかどうかについて事後評価した。

対象とした地震と地点は表-2のとおりである。

確率論的地震ハザード評価は、評価時点を当該地震の発生年の1月とし、それより50年間の超過確率が10%および5%の計測震度を比較の対象とした。50年超過確率10~5%は再現期間換算でおおよそ500~1000年であり、比較的低頻度の確率レベルとして代表的な値である。評価手法は推本の地震動予測地図¹⁾⁶⁾⁷⁾で用いられている手法に基づいている。ただし、主要98活断層帯の地震発生確率は最大ケースの場合を用いた。図-1に主な地震の評価時点より50年間での発生確率を示す。六甲・淡路島断層帯主部淡路島西岸区間や十勝沖地震は地震発生前の確率を用いている。

表-2 対象とした地震と評価地点

地震	M_j	評価地点	震度
1995年兵庫県南部地震	7.3	神戸市	7
2000年鳥取県西部地震	7.3	日野町	6強
2001年芸予地震	6.7	熊野町	6弱
2003年宮城県沖の地震	7.1	大船渡市	6弱
2003年宮城県北部の地震	6.4	鳴瀬町	6強
2003年十勝沖地震	8.0	浦河町	6弱
2004年新潟県中越地震	6.8	川口町	7

* 神戸市は市役所位置を対象とし、震度は7とした。
他は気象庁発表の震度階とその観測点を対象とした。

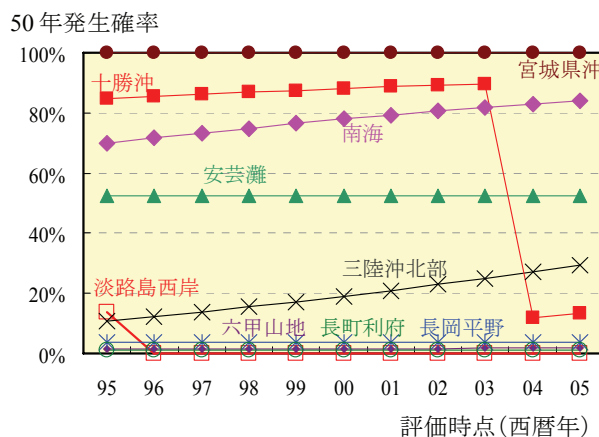


図-1 主な地震の発生確率の変化
(各西暦年の1月時点より50年間での発生確率)

一方、シナリオ型地震動評価としては、まずは発生した地震が推本で長期評価の対象とされているかどうかについて確認した。次いで、当該地点での代表的な想定地震による計測震度（平均値～平均値＋標準偏差）を比較の対象とした。各地点で検討対象とした想定地震を表-3 に示す。計測震度は推本で用いられている簡便法⁸⁹⁾（最大速度の距離減衰式と最大速度と計測震度の変換式）により評価した。

なお、ここでの検討は現時点での知見に基づくものであり、地震発生時点では明らかにされていなかった事項も含まれていることに注意が必要である。

(2) 評価結果と考察

図-2 に確率論的地震ハザード評価とシナリオ型地震動評価による各地点の計測震度の範囲を実際に経験した震度階と重ねて示す。両手法により予測された計測震度の大小関係が地点ごとに様々であることが理解できる。一方、表-2 の各地震が推本の長期評価で対象としている地震に整合するか否かであるが、ここでは兵庫県南部地震、芸予地震、十勝沖地震は「対象」、他の地震は「対象外」と判断した。

表-4 には図-2 の結果に上記の判断を加味して、確率論的地震ハザード評価とシナリオ型地震動評価の結果として得られた計測震度が実際に経験した震度階と対照して、事前予測可能であったか否かについて判定した。確率論的地震ハザード評価では、評価結果が経験した震度階相当もしくはそれ以上の場合に○、それを満たさなかった場合に×とした。シナリオ型地震動評価では、地震が長期評価の対象でかつ評価結果が経験震度階相当もしくはそれ以上の場合に○、地震は長期評価の対象であったが計測震度の評価結果が経験震度階未満であった場合に□、評価結果は経験震度階相当もしくはそれ以上であったが地震が長期評価の対象でなかった（＝別の想定地震によりカバーされた）場合に△、いずれの条件も満たさなかった場合に×とした。

表-4 より以下のことが指摘できる。

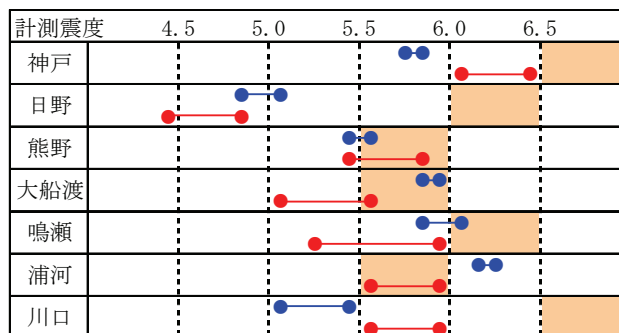
兵庫県南部地震は内陸活断層の活動によるものであり、シナリオ型地震動評価の対象として扱うべき地震と考えられる。確率論的地震ハザード評価では、地震前の六甲・淡路島断層帯主部淡路島西岸区間の地震発生確率を 50 年で 14%（図-1 参照）としているが、同断層帯の六甲山地－淡路島東岸区間の発生確率が低い（50 年 1.5%）ために、神戸での確率論的地震ハザードはそれほど高くならず、50 年 5%程度の確率レベルでは震度 6 強以上は予測し得ない結果となっている。内陸活断層の確率モデル化の難しさを示唆する事例である。ただし、シナリオ型地震動評価でも、平均値＋標準偏差まで見込んでも簡便法では震度 7 には至らないことに注意が必要で、実際に生じた地震動を正しく予測するためには詳細な強震動予測が必要となることが指摘される。

芸予地震、十勝沖地震は長期評価の対象とされており、経験した震度階もシナリオ型地震動評価での予測範囲に入っている。十勝沖地震については地震

表-3 シナリオ型地震動評価の対象とした想定地震

地点名	想定地震 (M)
神戸市	六甲・淡路島断層帯 (Mj7.9)
日野町	那岐山断層帯 (Mj7.3)
熊野町	安芸灘のプレート内地震 (Mw7.4)
大船渡市	宮城県沖地震 (Mw7.6) 三陸沖北部の固有地震 (Mw8.3)
鳴瀬町	宮城県沖地震 (Mw7.6) 長町・利府線断層帯 (Mj7.5)
浦河町	十勝沖の地震 (Mw8.1)
川口町	長岡平野西縁断層帯 (Mj8.0)

* 地震の諸元は推本の評価に基づく。



* 朱色の範囲が実際に経験した震度階
上段の●が確率論的评价：50年超過確率 10～5%の計測震度
下段の●がシナリオ型評価：想定地震に対する平均値～平均値＋標準偏差の計測震度

図-2 両手法による地震動評価の結果

表-4 地震動評価の事後評価結果

被害地震	最大震度	確率論的評価	シナリオ型評価
兵庫県南部地震	7	×	□
鳥取県西部地震	6 強	×	×
芸予地震	6 弱	○	○
宮城県沖の地震	6 弱	○	△
宮城県北部の地震	6 強	○	×
十勝沖地震	6 弱	○	○
新潟県中越地震	7	×	×

前の発生確率が 50 年で約 90%と高く、確率論的地震ハザード評価でも経験した震度階は予測範囲に入っている。芸予地震は、長期評価では設定領域内（安芸灘～伊予灘～豊後水道）のどこかで発生すると評価されており、震源断層を事前に確定的に定めるには難しさが含まれる。その意味では確率論的地震ハザード評価による補完を得て、両手法をセットとした予測として功を奏した事例といえる。

宮城県沖の地震と宮城県北部地震は想定外の地震であり、シナリオ型地震動評価で事前に予測することは難しいタイプの地震である。これに対して、確率論的地震ハザード評価では 50 年超過確率が 5%程度の確率レベルで経験した震度階を予測できている。これらの地域では発生確率が高い地震として宮城県沖地震が想定されており、実際に発生した地震

はそれ（本命）とは異なるものであった。このような事態をカバーする役回りとしては、地震の事前想定が必要なシナリオ型地震動評価は不得手であり、影響するすべての地震を考慮した上で最大の地震動強さを設定できる確率論的地震ハザード評価が有用である。確率論的地震ハザード評価がシナリオ型地震動評価を補完する役割を果たし得ることを示した事例といえる。

鳥取県西部地震と新潟県中越地震は確率論的地震ハザード評価、シナリオ型地震動評価のいずれを用いても予測はうまくいかず、事前の予測範囲外の地震動を経験した事例と言わざるを得ない。これらの地震は、現時点での知見では「震源を予め特定しにくい地震」に分類せざるを得ないと考えられるが、地震そのものの想定が難しいために、シナリオ型地震動評価で事前予測することはきわめて難しい。したがって、このような地震に関しては、震源を予め特定しにくい地震を考慮している確率論的地震ハザード評価でカバーする必要があるが、この2つの地震の例では、対象とする確率レベルを50年超過確率で1%以下というように相当に低くしないと震度6強や震度7の地震動強さは予測し得ない。このような地震による地震動をいかにして事前に予測するかは今後の大きな課題である。

以上の事例検証より、将来の地震動を考える場合に、確率論的地震ハザード評価、シナリオ型地震動評価のいずれか一方ですべてが事足りるということはある得ないことが理解できる。今後はそれぞれの手法の長所と限界を正しく理解した上で、両手法を融合させた地震ハザード評価の体系を構築していく必要がある。

シナリオ型地震動評価では、設定された震源モデルに対する地震動の詳細な予測が重要であることは論を待たないが、加えて将来発生する地震をいかに想定できるかが重要な鍵である。地震動予測手法については精力的に研究されているが、その前段となる地震の想定のある方についても併せて考えていく必要があると思われる。特に、震源を予め特定しにくい地震をいかに想定地震としてモデル化するかについてはコンセンサスを得た方法論がないため、確率論的想定地震などとのリンクを含めて今後議論を積み上げていく必要がある。

一方、確率論的地震ハザード評価では活断層を含めた内陸の地震に対する確率モデルに未熟さが指摘される。上記の事例では最大震度が6強以上となった地震はいずれも内陸地震である。とりわけ震源を予め特定しにくい地震による地震動の予測は確率論的地震ハザード評価に期待すべきであり、その意味では事前予測という点で、少なくとも日野町や川口町に対する図-2の結果は満足し得るものではない。考慮すべき確率レベルの具体化を含めて、内陸地震の地震活動の確率モデルについて一層議論を深める必要がある。加えて、震源域での地震動評価を簡便法に拠っている点も至急改善を要する課題である。

4. 確率論的評価とシナリオ型評価の融合の方向性

(1) 両手法の融合により目指すもの

上記2. で述べたように、確率論的地震ハザード評価とシナリオ型地震動評価の手法は、それぞれの特徴を踏まえて目的に応じて使い分けられている。一方、地震ハザード評価に対するニーズは多様化・高度化する方向にあり、各評価手法をそれぞれの「典型的な手順」に従って適用するだけでは、利用者のニーズを十分に満たせない場合があることも事実である。また3. の事後評価結果が示すように、将来の地震動を評価する手法としての優劣は雌雄を決するものではなく、ケース・バイ・ケースであることも明らかである。

これまで、両手法の対立的構造が強調されるきらいがあり、議論を建設的に掘り下げる土壌が培われてこなかった。今後、「使用データ」「評価手法」および「評価結果」の共有化や相互乗り入れを行うことによって相互補完的な関係を構築すれば、それぞれの弱点を克服し、多様化・高度化したニーズに応えることができると考えられる。こうした方向性を本論文では、地震ハザード評価の高度利用推進のための総合的技術課題として位置づけ、「確率論的地震ハザード評価とシナリオ型地震動評価の融合」と呼ぶこととする。

なお「融合」という用語は推本の地震動予測地図でも用いられており、そこでは、i) 確率論的想定地震の概念を用いて二種類の地図の位置付けを解説すること、ii) シナリオ型地震動評価で用いられている詳細な地震動予測法を確率論的地震動予測地図に取込むこと、の2つの意味で用いられているが⁶⁾、本論文では、より組織的・体系的に両手法を活用していくことをイメージしている。

図-3 は、両手法における「地震発生時期・可能性」「地震規模・断層パラメータ」「距離」「距離減衰特性」に関する扱いの相違を示すとともに、中央部に「融合領域」を設けて、両手法の融合の方向性を図示したものである。

以下の(2)および(3)では、これら「確率論的地震ハザード評価とシナリオ型地震動評価の融合」に関する具体的な方向性と技術課題について、それぞれの評価手法の側から説明するが、全体を総括すると表-5 のように対象的な関係として整理される。

表-5 両手法の融合の枠組

シナリオ型 地震動評価	確率論的 地震ハザード評価
確率論的手法の導入 【S-1】 【S-2】 【S-3】	決定論的手法の導入 【P-2】
評価結果の総合化・統合化 【S-3】	評価結果の再分解・拡張 【P-1】 【P-3】
確率論的地震ハザード評価の補完 【S-4】	シナリオ型地震動評価の補完 【P-4】

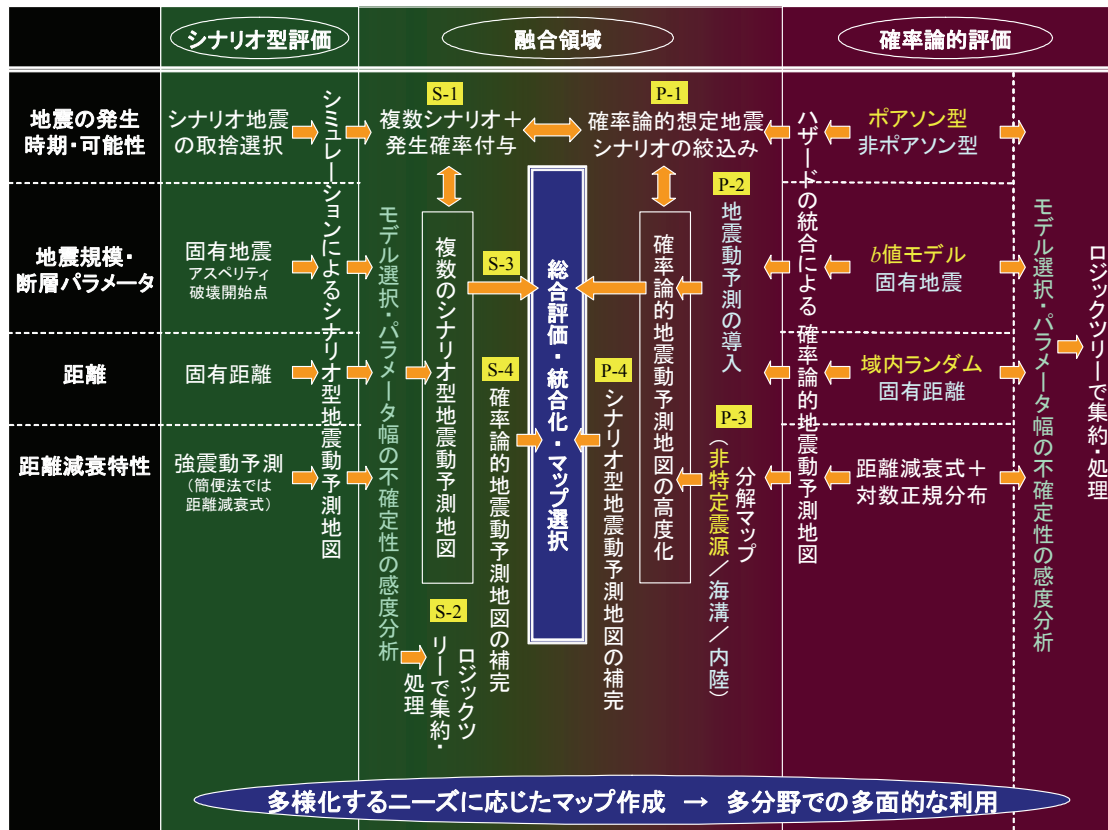


図-3 地震ハザード評価へのニーズの多様化とシナリオ型地震動評価手法と確率論的地震ハザード評価手法の融合
(図中の記号は本文中の記号に対応している)

(2) シナリオ型地震動評価からみた方向性

表-5 の左列はシナリオ型地震動評価からのアプローチである。シナリオ型評価を実施するうえで、想定地震の選定や評価モデルの選択、あるいはパラメータ設定は、評価結果の多様性を生み出す要因であり、その不確定性の処理に確率論的手法を導入する余地がある。また異なった条件下で複数の評価結果が得られた場合、意思決定の根拠とするには何らかの総合化・統合化が要求される。さらに、シナリオ型評価の長所を活かして確率論的評価の弱点を補完することが可能である。具体的内容については次の【S-1】～【S-4】に示す。

【S-1】シナリオ地震の選定に関する不確定性の処理

震源となりうる無数の候補の中から1つまたは複数のシナリオ地震を選定することは、地震発生の可能性を「ゼロ/イチ」で評価して取捨選択することに相当する。従って、その選定基準および選定結果の妥当性を十分に検証しておく必要がある。その際、地震の発生確率は最も重要な要因の一つとなろう。性能設計や地震リスクマネジメントのためには地震発生確率の情報が不可欠であるし、地震防災の実務サイドからの要請として、シナリオ地震に発生確率を付与することが求められる場面も多いからである。

なお、発生確率が付与された場合においては、シナリオ地震として採択するための確率の閾値設定の問題や、低い発生確率が安心情報と曲解されかねないという問題など、確率論的評価で広く議論されて

いる課題が付随してくることに注意が必要である。

【S-2】シナリオ地震のパラメータ設定に関する不確定性の処理

シナリオ型地震動評価においては、詳細なデータに基づいて細部の条件を設定し、地震動シミュレーションを行うことによって、高い精度で物理現象を記述することが可能である。一方、地震動の将来予測という面では、未知要因や偶発的要因に対する処理を回避することはできない¹⁰⁾。つまり「決定論的」と称される手法とはいっても「パラメータが確定している」わけではなく「パラメータをあえて決めた」結果が示されると解釈すべきである。

地震動予測のためのパラメータには、アスペリティの配置パターンや断層破壊開始点の設定など、確率分布として扱えない不確定性を含んでいる。これを処理するためには、ロジックツリーの活用が考えられる。その際には、確率分布として扱えるような連続量のパラメータも離散化されて処理される。最終的には種々の条件を変化させたパラメータスタディの結果を確率統計的に処理することによって、地震動強さの幅を表現することができる。

また、性能設計や地震リスクマネジメントを背景として地震防災対策を進める潮流の中では、実際に生じた地震動強さに照らし合わせて、設計用入力地震動レベルが適切に設定されていたか、確認を求められる場面が増えると考えられる。そのため3.で示したように、ばらつきを含めた推定幅で予測値を提示しておくのが適切である。

【S-3】複数の評価結果がもたらす不確定性の 総合化・統合化

上記【S-1】によって複数のシナリオ地震について得られた評価結果、あるいは【S-2】によって複数の条件でのパラメータ設定について得られた評価結果は、それぞれ目的に応じて個別に利用可能である。どれを選択するかは利用者側に委ねることが可能な場合もあるかも知れない。

しかしながら、複数の地震動予測の評価結果をマップ1枚で表現するなど、何らかの集約が求められる場合も多い¹¹⁾。物理現象として精緻な予測結果であったとしても、単一条件による評価を被害想定や地震防災対策の唯一の根拠とするには、あまりに任意性が強く受け入れられないからである。このためマップ集約を目的として、例えば各地点において複数ケースの最大値を選択したマップを作成するなどの方法がとられる。これは、シミュレーションにより推定された実現値を地点別に順序統計量として扱うことに相当する¹²⁾。

確率統計的方法による総合化・統合化は、シナリオ型地震動評価の大きな課題である。場合によっては、対象地域における人口分布や施設分布まで考慮して、地震リスクを陰に陽に視野に入れたうえでの意思決定が求められることとなろう⁵⁾¹²⁾。

【S-4】シナリオ型地震動予測地図による確率論的 地震ハザードマップの補完

地震動は、深部地盤構造や表層地盤の非線形増幅の影響で、非常に強い局所性を示す場合がある。兵庫県南部地震の際のいわゆる「震災の帯」はその典型例といえる。詳細法によりシナリオ地震動評価を行うことの利点の一つは、こうした局所性を物理現象として忠実に再現可能なところにある。一方、確率論的地震ハザード評価では、距離減衰式に不確定性を付与したうえで、確率レベルによって評価結果をパラメトリックに解釈するという扱いをしているため、局所的な地震動特性をマップ表現することができない。従って、確率論的地震ハザードマップの公表の際に、代表的なシナリオ型地震動予測地図を添付資料としておけば、両者の併用によりこの欠点を補うことが可能となる。

(3) 確率論的地震ハザード評価からみた方向性

表-5の右列は確率論的地震ハザード評価からのアプローチである。上記(2)で論じた内容とちよほど対をなした構造となっており、決定論的手法の導入、評価結果の再分解・拡張、シナリオ型地震動評価の補完、という3つの要素より構成される。具体的内容については次の【P-1】～【P-4】に示す。

【P-1】確率論的地震ハザードに基づくシナリオ 地震の絞り込み

シナリオ地震の選定には任意性が含まれるため、より客観的な裏づけを付与することが望まれる。こうした目的に資するために、確率論的地震ハザード評価の手法を応用して、貢献度の高い地震を抽出する「確率論的想定地震」の方法⁴⁾⁵⁾が開発されている。

この方法は震源を予め特定しにくい地震への適用も可能であり、シナリオ地震の設定方法に関して有用な情報を与えるものである。

「確率論的想定地震」のように対象地震を固定化しないまでも、詳細なシナリオ型地震動予測を実施する際に、対象地域の絞り込みを行う目的で確率論的地震ハザードマップを有効利用することも可能である。例えば、高ハザード地域を参照して優先的にシナリオ型地震動予測を行えば、重要な地域を重視しつつ効率的に分析を進めることができる。

【P-2】強震動予測手法などの決定論的手法の導入

震源を予め特定しにくい地震については、「ポアソン型地震発生モデル・ b 値モデル・距離減衰式」の組み合わせによるハザード評価が一般的である。一方、対象が明確な震源を特定できる地震に関しては、「非ポアソン型地震発生モデル・固有規模・固有距離」の組み合わせで、一部に決定論的手法を導入し、高精度な強震動予測および地盤増幅特性の評価結果を適用できる。震源を特定できる地震に対して、シナリオ型地震動評価として用いられている詳細な地震動予測法を確率論的地震ハザード評価に組み込もうとする試みも一部始められている¹³⁾。これにより、距離減衰式や簡便な地盤増幅率を用いた評価よりも、不確定性を低減できることが期待できる。

【P-3】確率論的地震ハザード評価の拡張 (再分解・地震動設定)

確率論的地震ハザード評価の手法は、種々の不確定要因を組織的に定量評価することが特徴であり、評価結果は考慮した地震の影響を統合化したものである。この特徴が逆に、結果の解釈を困難にしたり信頼性を低下させたりする原因ともなっており、「背景にある地震像が見えない」とか「低頻度地震の長期確率評価には統計的意味が希薄」といった批判的見方もある。また高発生頻度の海溝型地震の影響が支配的な地域では、低発生頻度の内陸活断層地震の影響が埋没してしまい、表面的には見えにくくなることも確かである。

このため、統合化されたハザード評価結果を再分解した結果（ないしは評価過程における中間的結果）を示すことによって、解釈を容易にする試みがなされている⁴⁾⁵⁾¹⁴⁾¹⁵⁾。震源タイプ別（海溝型地震、内陸活断層、震源を予め特定しにくい地震）あるいは震源別に分解した確率論的地震ハザードマップや貢献度マップ¹³⁾などは、その例である。

一方、確率論的地震ハザード評価に基づく設計地震動設定としては、目標確率レベルに対応する地震動強さに既往の地震動波形を振幅調整する方法や、一様ハザードスペクトルに適合した地震動を作成する方法などがある。地域係数によって地震ハザードの地域格差を考慮することもその一形態である。これらは両手法のいわば伝統的な融合方法であり、既に広く実践されている。しかしながら、2.でも述べたように、目標確率レベルの規定方法についてはコンセンサスが得られているとは言い難い。この問題は、地震動強さの上限設定とも関連しており、今

後の重要な検討課題である。

また、地震リスク評価への展開を意図した確率論的地震ハザード評価の再分解の表現として、ハザードレベルごとの貢献度の大きさに応じてシナリオ地震を割り当てた地震動波形群（詳細法に基づいて評価される）をその生起確率とセットで示すという試みも行われている¹⁶⁾。これは上述した確率論的地震ハザード評価の再分解と地震動設定を統合した方法と位置づけることができる。

【P-4】確率論的地震ハザードマップによる シナリオ型地震動予測地図の補完

シナリオ型地震動予測地図において考慮されるイベントには限界がある。特に、中部日本や近畿地方のような活断層密集地域では、シナリオ地震の選定過程で多くのハザード源が除外されてしまうのが実状である。全国的に見ても、3. で述べたように、鳥取県西部地震、宮城県沖の地震、宮城県北部の地震、新潟県中越地震といった震源が予め特定しにくい地震が実際に幾度も発生している。

シナリオ型地震動評価では、想定外（震源を予め特定できるもの・特定しにくいものを含めて）の地震の影響を考慮できないため、場合によっては、最低限の地震動強度を想定外力として担保するための工夫が別途必要となる。この点で、シナリオに選定されない地震の影響を考慮できることは、確率論的地震ハザード評価の大きな利点である。

シナリオ型地震動予測地図の公表の際に確率論的地震ハザードマップを添付資料とすれば、両者の併用によって盲点となる地震を可能な限り減らせると期待される。ただし、両手法の補完的利用をもってしてもなおカバーできない地震（3. で述べた鳥取県西部地震や新潟県中越地震など）の扱いについては、今後の課題である。

なお、モデル選択やパラメータ設定に起因して評価結果にばらつきが生じるのは、確率論的地震ハザード評価においても同様である。図-3 の最右欄は、その不確定性の処理について示したものであり、融合とは逆方向のアプローチとなっている。幅を持って与えられるパラメータの代表的なものは、活断層の長期的な地震発生確率であり、評価結果に大きな影響を及ぼす。また距離減衰式などのモデル選択や、地震動強さの上限設定の有無など、評価の過程で下される専門的判断に関連して、意見を合理的に集約する必要性が生じることもある。確率論的地震ハザード評価においては、ロジックツリーを用いてこうした不確定性を処理すると、ツリーの分岐パターンに相当する数のハザード曲線が得られるが、その後処理には確率統計の方法がとられ、地震ハザード評価の幅がフラクタイル値で表現される¹⁷⁾。

ここまで述べてきた技術課題については、実務および調査研究の両面において従来から認識されていたものの、個々の事情や目的に応じて個別的に解決されてきたため、その対処法や問題理解は断片的なものにとどまっていた。本章では「確率論的地震ハ

ザード評価とシナリオ型地震動評価の融合」という観点からこれらの技術課題を再整理して体系的に論じた。

図-3に示したように、両手法は一体化すべき性質のものではなく相互補完的な関係にある。地震ハザードに関する理解を多面的に深めるためには、両手法による評価の総合化・統合化あるいはマップ選択が不可欠である。その意味で両手法の融合は、地震ハザード評価の体系化に向けての必然的な方向性であるといえる。

5. 確率論的评价とシナリオ型評価の 融合のフロー

確率論的地震ハザード評価とシナリオ型地震動評価の「融合」の概念を具体化するために、評価手順のフローを図-4に示した。評価は図の下から上に向かって進んでいく。ここでは、最終的なアウトプットを「確率表現」と「震度表現」に分類し、「地震・地震動の基礎情報」から「確率論的地震ハザード評価」（左列）あるいは「シナリオ型地震動評価」（右列）を駆使し、最終のアウトプットに辿り着くことになる。

ここで、「確率表現」とは、地震動とその超過確率もしくは生起確率がセットとなったアウトプットを意味しており、確率表示の確率論的地震ハザードマップのみならず、ハザードカーブ、一様ハザードスペクトル、生起確率付地震動波形群¹⁶⁾などについても包含したものである。一方、「震度表現」とは、超過確率もしくは生起確率がすでに消去された形で地震動情報を意味している。震度分布図（シナリオ型マップや震度表示の確率論的地震ハザードマップ）に加えて、個別地点での最大地動、応答スペクトル、時刻歴波形などが含まれる。

これまで行われてきた評価では、「確率表現」へは「確率論的地震ハザード評価」からの矢印、また「震度表現」へは「確率論的地震ハザード評価」と「シナリオ型地震動評価」からそれぞれ別の矢印で結ばれているに過ぎなかった。本論文で定義する「融合」は、両手法の特徴・長所を組み合わせたり、互いの弱点を補完することにより、総合的な地震ハザード評価の体系を目指すものである。

図-4には4. で示した【S-1】～【S-4】および【P-1】～【P-4】の記号がどの評価手順に位置づけられるかについても示している。評価手法や条件の選定において、「確率論的地震ハザード評価」あるいは「シナリオ型地震動評価」の流れの中に他方が相互乗り入れする手順が「評価手法の融合」である。また、「結果の融合」として、それぞれの結果の総合化・統合化に加えて、両手法に基づく結果の組合せあるいは補完により「確率表現」あるいは「震度表現」の最終結果を導き出すことも重要な評価手順として位置づけられる。

図中、記号が付された評価項目・評価手順が「融合」の主たる論点となるが、これらに関する議論

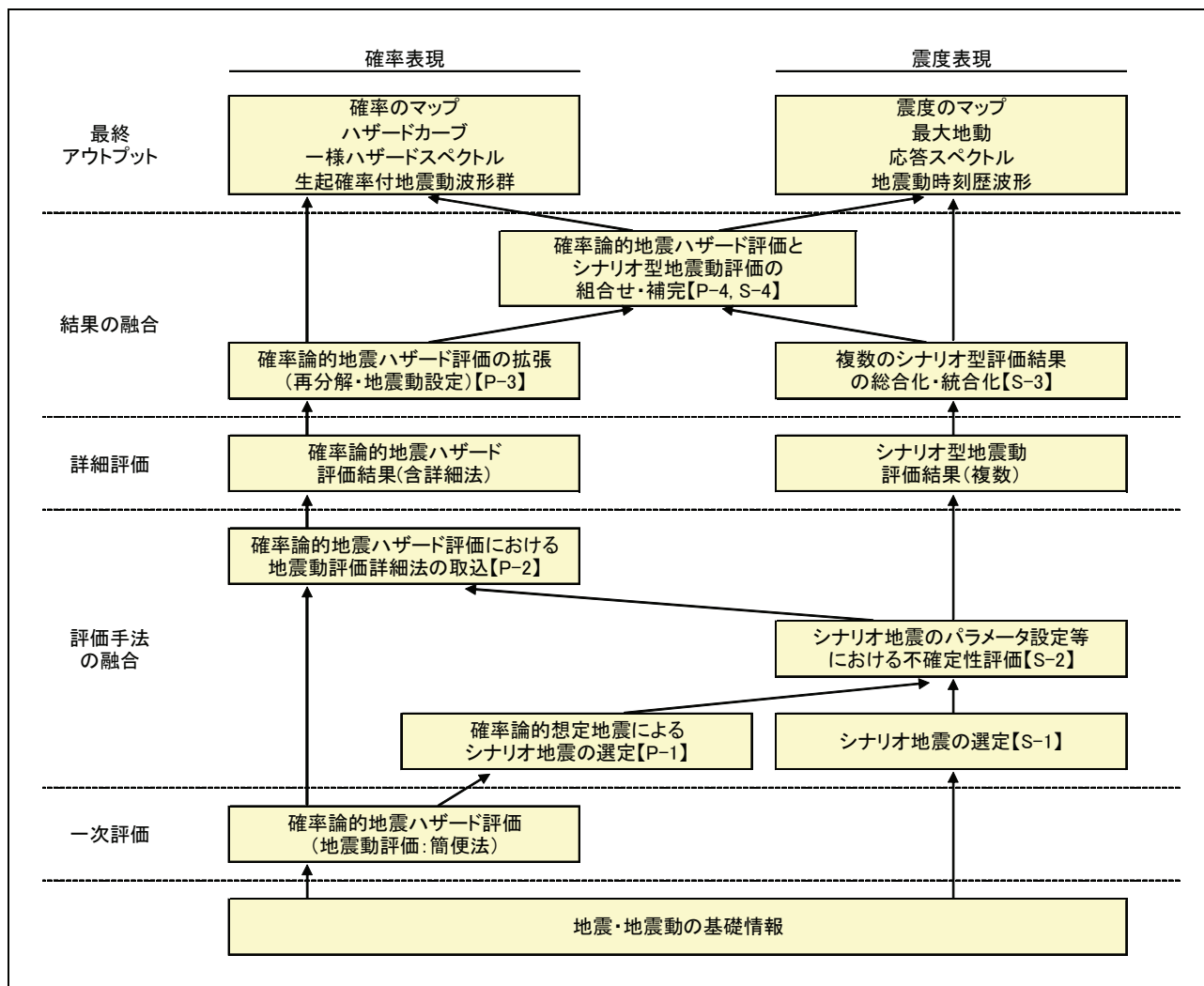


図-4 確率論的評価とシナリオ型評価の融合のフロー

は緒についたばかりである。今後、具体的な事例検討を積み上げることにより、専門家間での合意形成を図るとともに、各手順や条件設定の標準化を目指していく必要がある。また、ここではアウトプットの形を「確率表現」と「震度表現」という2つに分類しているが、将来的にはアウトプットそのものも連続的な形で融合されていくものと思われる。

6. おわりに

従来の耐震設計や防災対策では、一部に「地震動は与えられるもの」とする風潮があったが、地震動に関する知見の増大とともにその個別性が認識されつつある趨勢を踏まえると、これからの地震ハザード評価では、地震シナリオの選定から地震動の予測を含めて、リスクマネジメントの主体が責任をもって行っていくべきと思われる。しかも地震ハザード評価は、客観的かつ公平なものであって、かつ説明責任を果たせるものでなければならない。

推本の長期評価や地震動予測地図をはじめとする調査研究プロジェクトは、こうした時代の要請に適

合した成果を生み出しており、地震ハザード評価に関連する基礎データの情報は次第に膨大なものとなりつつある。これらを一元的に管理することと、継続的に更新・公表する体制を維持することが求められる。

同時に、これらの基礎情報を地震ハザード評価に活用するための環境作りも重要である。本論文で体系的に示した技術課題に実践的に取り組むには、確率論的地震ハザード評価とシナリオ型地震動評価の利点を生かしながら、対象サイトにおける将来の地震動をインタラクティブに評価・設定できるような支援システムの開発を目指していく必要がある。

その実現に向けて、最後に「地震ハザードステーション」構想を挙げておきたい¹⁸⁾。これは、対象サイト周辺における地震環境の理解を助けるとともに、最新の知見に基づいて、両手法の利点を活かした地震ハザード評価の実践を支援するシステムであり、下記のようなデータやプログラムを格納したものである。

- 1) 確率論的地震ハザード評価と代表的な地震シナリオに対するシナリオ型地震動評価の結果

- 2) 両手法による計算処理プログラム
- 3) 各地震の長期評価結果，活断層などの地形・地質情報，深部・浅部の地下構造情報
- 4) 過去の地震履歴，地震観測記録，地震被害記録などの各種データベース

「地震ハザードステーション」は，地震動予測地図のデータ公開システムとして一部の運用が始められているが¹⁹⁾，確率論的地震ハザード評価とシナリオ型地震動評価の利点を融合させた次世代の地震ハザード評価の枠組みを構築するには，より高度化された「地震ハザードステーション」のシステム開発を計画的・継続的に推進することが望まれる。

謝辞：本研究は防災科学技術研究所に設置された地震動予測地図工学利用検討委員会（委員長：亀田弘行京都大学名誉教授）の活動¹⁸⁾を基に，新たな検討結果を加えてまとめ直したものである．有用な意見をいただいた委員会関係各位にここに記して謝意を表する．

参考文献

- 1) 地震調査研究推進本部地震調査委員会：「全国を概観した地震動予測地図」報告書，平成17年3月23日，2005．（ホームページ：<http://www.jishin.go.jp/main>）
- 2) 石川 裕：確率論手法に基づく設計地震動の設定手順の分類と課題，日本地震工学学会大会－2004梗概集，pp.98-99，2005．
- 3) 石川 裕，奥村俊彦：複数建物の集積地震リスク評価，JCROSSAR2000論文集，34-B，pp.205-208，2000．
- 4) 亀田弘行，石川 裕，奥村俊彦，中島正人：確率論的想定地震の概念と応用，土木学会論文集，第577号 / I-41，pp.75-87，1997．
- 5) 石川 裕，奥村俊彦：地域の集積リスクを考慮した想定地震の選定方法，地域安全学会論文集，No.3，pp.199-206，2001．
- 6) 防災科学技術研究所：北日本地域を対象とした確率論的地震動予測地図作成手法の検討と試作例，防災科学技術研究所研究資料第246号，2003．
- 7) 防災科学技術研究所：西日本地域を対象とした確率論的地震動予測地図作成手法の検討と試作例，防災科学技術研究所研究資料第257号，2004．
- 8) 司 宏俊，翠川三郎：断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式，日本建築学会構造系論文報告集，第523号，pp. 63-70，1999．
- 9) 翠川三郎，藤本一雄，村松郁栄：計測震度と旧気象庁震度および地震動強さの指標との関係，地域安全学会論文集，Vol.1，pp. 51-56，1999．
- 10) 山田雅行，藤原広行，先名重樹：シナリオ地震動予測におけるバラツキの検討，地球惑星科学関連学会2004年合同大会予稿集，S046-009，2004．
- 11) 中央防災会議：東海地震に関する専門調査会報告（平成13年12月11日資料2-2），2001．
- 12) 能島暢呂，杉戸真太，久世益充，石川 裕，奥村俊彦，宮腰淳一：地震動予測マップの活用－その2：震度曝露人口の試算－，土木学会地震工学論文集，Vol. 27，No.58，2003．
- 13) 石川 裕，奥村俊彦，宮腰淳一，能島暢呂，杉戸真太，久世益充：地震動予測マップの活用－その1：ハザード情報の利用－，土木学会地震工学論文集，Vol. 27，No.36，2003．
- 14) McGuire, R. K. : Probabilistic Seismic Hazard Analysis and Design Earthquakes: Closing the Loop, Bulletin of Seismological Society of America, Vol.85, pp.1275-1284, 1995.
- 15) 奥村俊彦，石川 裕：地震ハザードの再分解による想定地震の位置づけの明確化，第26回地震工学研究発表会講演論文集，土木学会地震工学委員会，pp.125-128，2001．
- 16) 安中 正，香川敬生，石川 裕，江尻譲嗣，西岡勉：期待損失評価のための確率論的ハザードに適合した地震動波形群の設定方法，土木学会地震工学論文集，Vol. 28，2005．
- 17) （財）原子力発電技術機構原子力安全解析所：平成15年度地震に係わる確率論的安全評価手法の整備に関する報告書＝地震ハザードの試解析＝，INS/M03-11，2003.9．
- 18) 防災科学技術研究所：地震動予測地図の工学利用－地震ハザードの共通情報基盤を目指して－＜地震動予測地図工学利用検討委員会報告書＞，防災科学技術研究所研究資料第258号，2004．
- 19) 防災科学技術研究所 地震ハザードステーションホームページ：<http://www.j-shis.bosai.go.jp/>

(2005. 3. 15 受付)

COMPLEMENTARY APPLICATIONS OF PROBABILISTIC AND SCENARIO-BASED METHODS FOR SEISMIC HAZARD ASSESSMENT

Yutaka ISHIKAWA and Nobuoto NOJIMA

Recognizing the complementary nature of probabilistic and scenario-based methods for seismic hazard assessment, this paper addresses the framework to integrate the two methods to exploit their advantages for better practice of seismic design and risk management. Advantages, disadvantages, and technical challenges to overcome in each method have been enumerated based on the current state-of-the-art. Post-events examination of the two methods has been made to compare their performance on evaluation of peak seismic intensities in recent major earthquakes in Japan. Toward the advanced seismic hazard assessment, technical exchanges between probabilistic and scenario-based approaches in terms of data and methodologies, as well as their results, are strongly suggested.