

短周期レベルの特性を考慮した 地震ハザード解析

片岡正次郎¹・松本俊輔²・日下部毅明³

¹国土交通省国土技術政策総合研究所地震防災研究室 主任研究官（〒305-0804 つくば市旭 1）

E-mail:kataoka-s92rc@nilim.go.jp

²国土交通省国土技術政策総合研究所地震防災研究室 研究官（〒305-0804 つくば市旭 1）

E-mail:matsumoto-s92ri@nilim.go.jp

³国土交通省国土技術政策総合研究所地震防災研究室 室長（〒305-0804 つくば市旭 1）

E-mail:kusakabe-t88d8@nilim.go.jp

想定地震の震源モデルを構築する際、経験式等から加速度震源スペクトルの短周期レベルを推定し、それをもとにアスペリティの面積や応力降下量を設定することが一般的になってきている。一方、地震ハザード解析においては、推定される地震動強さの確率分布を距離減衰式の平均値とそのばらつきにより表現するため、個々の地震の短周期レベルは考慮されていない。本研究では、著者らが作成した短周期レベルをパラメータとする距離減衰式を用いて、個々の地震の短周期レベルを考慮した地震ハザード解析を実施し、従来の地震ハザード解析結果と比較する。

Key Words : probabilistic seismic hazard analysis, short period level, seismic design ground motion

1. はじめに

将来発生する地震動強さを確率論的に評価する地震ハザード解析は、設計地震動¹⁾あるいは設計地震動の地域別補正係数²⁾の設定など、実務においても広く活用されている。

一方で、日本のように地震活動が活発な地域では、地震ハザード解析のみの結果をもとにレベル2地震動を設定することは妥当でないとの見方もある^{3), 4)}。レベル2地震動の設定では、発生確率の低い現象が問題となることが多く、現時点では地震の発生時期や地震動強さの確率分布を高い精度で推定できないことがその理由として挙げられる。このような場合には、確率論的な地震ハザード解析によりレベル1地震動を、想定地震に基づく確定論的な強震動予測によりレベル2地震動を設定するという組み合わせが合理的と考えられる¹⁾。

想定地震の震源モデルを構築する際、経験式等から加速度震源スペクトルの短周期レベル（以下、単に短周期レベルとよぶ）を推定し、それをもとにアスペリティの面積や応力降下量を設定することが一般的になってきている。例えば宮城県沖地震や三陸沖北部地震の短周期レベルは、平均的な関係式⁵⁾から算定される値の2.3倍と評価され、それをもとに震源モデルが設定されている^{6), 7)}。一方、地震ハザード解析においては、地震動強さの確率分布を、通常は距離減衰式の平均値とそのばらつきにより表現するため、個々の地震の短周期レベルは考慮されていない。そのため、レベル2地震動の設定において仮定する想定地震の震源特性が、レベル1地震動の設定に用いる地震ハザード解析で仮定したものと異なるという不整合が生じることになる。

地震動強さの確率分布を、距離減衰式ではなく、震源パラメータを様々に変化させた強震動予測結果から算定し、地震ハザード解析に利用することも可能である⁸⁾が、震源パラメータに与えるばらつき⁹⁾の妥当性が大きな問題点として残されている。

このような背景から、本研究では、著者らが作成した短周期レベルをパラメータとする距離減衰式⁹⁾を用いて、個々の地震の短周期レベルを考慮した地震ハザード解析を行う。また、通常¹⁰⁾の距離減衰式を用いた地震ハザード解析結果と比較し、その特徴についても考察する。これにより、レベル1地震動とレベル2地震動の設定において仮定する震源特性の整合性を保つことが可能となる。さらには、現在研究が進められている短周期レベル（応力降下量）の地域性や地震のタイプによる違い¹⁰⁾を簡便に地震ハザード解析に導入できるようになるため、地震ハザード解析そのものの精度向上にも資するものと考えられる。

2. 地震ハザード解析

(1) 地震活動のモデル化

本研究では、同じ位置で繰り返し発生する活断層の地震及びプレート境界地震、並びにバックグラウンドゾーン内のランダムな位置で発生する地震を考慮した地震ハザード解析¹¹⁾を行う。

活断層としては、起震断層¹²⁾に加え、新編日本の活断層¹³⁾に記載されている長さ10[km]以上の活断層（起震断層に含まれないもの）を考慮した。またプレート境界地震としては、宮城県沖地震、三陸沖北部地震など、繰り返し発生している大規模な地震を考慮した。これらは地震調査研究推進本部による長期評価結果¹⁴⁾に基づき、最新活動時期が特定されている場合には活動間隔がBrownian Passage Time (BPT) 分布で表されるものとし、そうでない場合には地震の発生が定常Poisson過程に従うものと仮定した¹⁵⁾。

日本及びその周辺部を、地震活動がそのゾーン内で概ね均一と考えられる34のゾーンに分割し、さらにこれらを深さ30[km]以浅の上層と30~100[km]の下層に分割した計68のバックグラウンドゾーンを設定した。各ゾーンでの年平均地震発生回数をGutenberg-Richter式でモデル化し、地震の発生は定常Poisson過程に従うものとした。これら地震活動のモデル化の詳細については参考文献¹¹⁾を参照されたい。

(2) 最大速度の距離減衰式

本研究では、地震動強さを表す指標としてよく用いられる、最大速度を対象として地震ハザード解析を行う。また北海道と東北地方を対象とすることで、後述のように宮城県沖地震と三陸沖北部地震の短周期レベルの影響を検討する。ここで地震ハザード解析に用いる最大速度の距離減衰式⁹⁾は次の通りである。これらは、地表から地下30[m]までの平均S波速度AVS30が700[m/s]程度の地盤上での地震動を対象としたものである。また、式(1)は全国の内陸地震、式(2)は東日本の海溝型地震を対象としている。

$$\log PGV = 0.791M_w - 0.00310R - \log(R + 0.0094 \cdot 10^{0.5M_w}) - 2.56 \quad (\sigma = 0.28) \quad (1)$$

$$\log PGV = 0.661M_w + 0.00620D - 0.00458R - \log(R + 0.0094 \cdot 10^{0.5M_w}) - 1.68 \quad (\sigma = 0.30) \quad (2)$$

ここで、 PGV は水平2成分を合成した最大速度[m/s]、 M_w はモーメントマグニチュード、 R は断層面最短距離[km]、 D は震源深さ[km]、 σ は標準偏差である。検討の結果、内陸地震については震源深さ依存性が小さいことが分かったため、震源深さをパラメータとしない式を用いる。また、式(1)のlogの中での R は、 $R > 80$ [km]では $(80R)^{0.5}$ に置き換える¹⁶⁾。

また、短周期レベルの特性を考慮した地震ハザード解析のためには以下の2式⁹⁾を用いる。式(3)は全

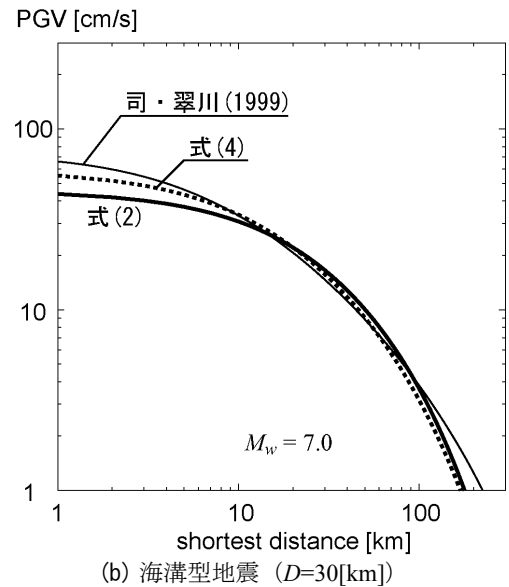
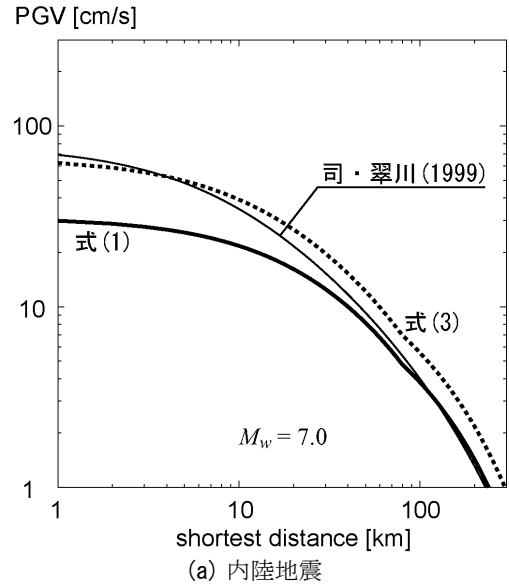


図-1 地震ハザード解析に用いた距離減衰式の例

国の内陸地震、式(4)は東日本の海溝型地震を対象としたものである。

$$\log PGV = 0.366M_w + 0.619 \log A - 0.00278R - \log(R + 0.0053 \cdot 10^{0.5M_w}) - 11.63 \quad (\sigma = 0.31) \quad (3)$$

$$\log PGV = 0.0414M_w + 0.864 \log A - 0.00431R - \log(R + 0.0053 \cdot 10^{0.5M_w}) - 14.04 \quad (\sigma = 0.25) \quad (4)$$

ここで、 A は短周期レベル[N・m/s²]である。式(1)と同様、式(3)のlogの中での R は、 $R > 80$ [km]では $(80R)^{0.5}$ に置き換える。内陸地震を対象とした距離減衰式のばらつきは、短周期レベルをパラメータとした方が大きい、これは地盤補正係数のばらつきが大きいためである⁹⁾。

$M_w = 7.0$ の場合についてこれらの式を図示したものが図-1 である．比較のため，司・翠川(1999)による最大速度（水平2成分のうち大きい方）の距離減衰式¹⁷⁾を AVS30 が 700[m/s]の地盤上に換算¹⁸⁾したものを示してある．短周期レベルを考慮した式(3), (4)は司・翠川(1999)の距離減衰式とよく一致しているが，これは図-1 では短周期レベル A として，後述の式(5), (6)で推定される平均的な値を用いたためである．1. でも述べたように，式(3), (4)を用いることにより，個別の地震について評価された短周期レベルやその地域性を考慮することができるため，既存の距離減衰式よりも精度の高い地震ハザード解析が可能となる．

図-1 によると，特に内陸地震を対象とした距離減衰式については，司・翠川(1999)や短周期レベルを考慮した式と比較して，短周期レベルを考慮しない式による最大速度の推定値がかなり小さくなっている．ここで用いた距離減衰式は，内陸地震は基本的に M_w 5.0 以上，海溝性地震は M_w 5.5 以上の地震で得られた強震記録をもとに作成されたものであり，特に内陸地震はマグニチュードが小さく，短周期レベルが小さい地震の強震記録が多数用いられているため，その影響が出たものと考えられる⁹⁾．なお，司・翠川(1999)の距離減衰式は M_w 5.8 以上の地震で得られた強震記録に基づいている¹⁷⁾．

実際には内陸地震と海溝型地震の両方が発生しているバックグラウンドゾーンも存在するが，ここでは簡単のため，深さ 30[km]以浅の上層で発生する地震には内陸地震の距離減衰式，30～100[km]の下層で発生する地震には海溝型地震の距離減衰式を適用した．

(3) 短周期レベルの設定

短周期レベルの特性を考慮した地震ハザード解析においては，距離減衰式(3), (4)のパラメータである短周期レベルを設定する必要がある．距離減衰式(3), (4)の作成にあたり，解析対象とした地震の地震モーメントと短周期レベルが得られており，それらの関係は内陸地震については式(5)，東日本のプレート境界地震については式(6)のようになる⁹⁾．

$$\log A = 0.514 \log M_0 + 9.50 \quad (\sigma_A = 0.38) \quad (5)$$

$$\log A = 0.419 \log M_0 + 11.17 \quad (\sigma_A = 0.18) \quad (6)$$

ここで， M_0 は地震モーメント[N・m]である．式(5), (6)をそれぞれの回帰データとともに図-2 (a), (b)に示す．これらの式の傾きは，地震の相似性が成り立つ場合には 1/3 になることが期待されるが，ここではそれよりも大きな値が得られており，規模の大きな地震ほど，単位モーメント当りに放出する短周期波動エネルギーが大きいことを示している．これは既往の研究¹⁹⁾とも一致する傾向である．

これらの式には標準偏差 σ_A のばらつきがあり，地震動強さの確率分布に影響するため，これを考慮

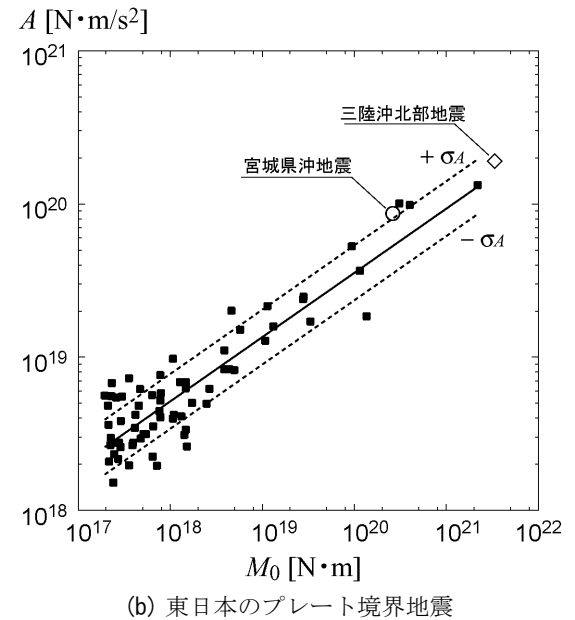
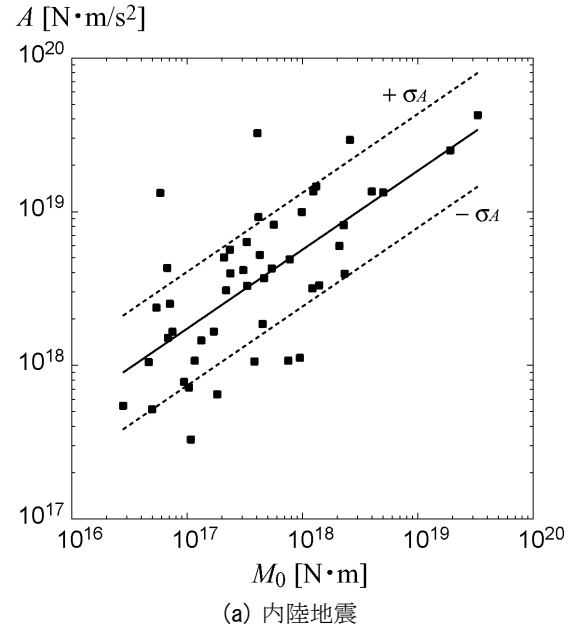


図-2 A と M_0 の関係

した上で地震ハザード解析を行う必要がある．式(3)と式(5)から，短周期レベルの推定誤差を考慮した内陸地震の距離減衰式の標準偏差は，

$$\sigma_T = \sqrt{\sigma^2 + (0.619\sigma_A)^2} = 0.39 \quad (7)$$

となる．また，同様に東日本のプレート境界地震の距離減衰式の標準偏差は，

$$\sigma_T = \sqrt{\sigma^2 + (0.864\sigma_A)^2} = 0.30 \quad (8)$$

となる．短周期レベルの特性を考慮した地震ハザード解析では，距離減衰式のばらつきとして式(7), (8)

の標準偏差を用いた。特に内陸地震については、短周期レベルの推定式のばらつきが大きいため、全体としての標準偏差はやや大きな値となっている。

宮城県沖地震と三陸沖北部地震については、地震調査研究推進本部地震調査委員会の強震動評価^{6), 7)}において、短周期レベルがそれぞれ 8.4×10^{19} [$\text{N} \cdot \text{m/s}^2$], 1.88×10^{20} [$\text{N} \cdot \text{m/s}^2$]と算定されている(図-2(b)参照)。このため、これら2つの地震の短周期レベルは、式(6)で算出した場合と上記の値を直接用いた場合の2ケースについて地震ハザード解析を行った。ただし、後者についても短周期レベルの推定誤差は存在するものと考え、距離減衰式のばらつきとしては式(8)の標準偏差を用いた。

3. 地震ハザード解析結果

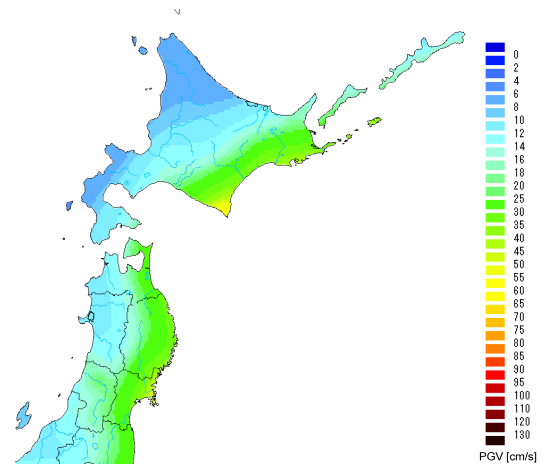
2.の方法で地震ハザード解析を行った結果を以下に示す。評価期間は2004年1月1日からの100年間である。

図-3はレベル1地震動を想定し、100年超過確率63%（定常Poisson過程に換算すれば100年に1回発生する）の最大速度を示したものである。図-3(a)は距離減衰式(1), (2)を用いた短周期レベルをパラメータとしないケース、(b)は距離減衰式(3), (4)及び短周期レベルの回帰式(5), (6)を用いたケース、(c)は(b)と同じであるが、宮城県沖地震と三陸沖北部地震については前述の地震調査研究推進本部地震調査委員会による算定値を短周期レベルとして用いたケースである。

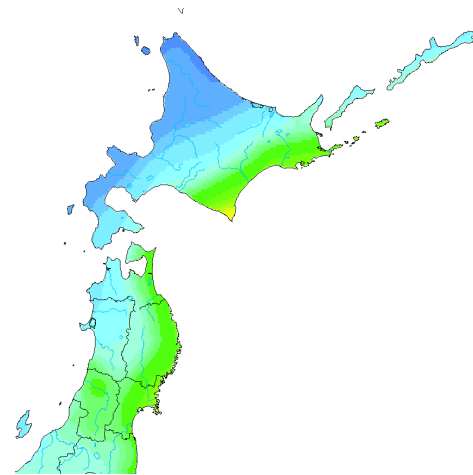
この図によると、図-1から予想されるように、短周期レベルをパラメータとしない(a)よりも、パラメータとした(b), (c)の方が全体的に地震ハザードが大きいことが分かる。さらに、(b)よりも(c)の方が一部地域で大きく、図-2(b)のように宮城県沖地震と三陸沖北部地震の短周期レベルとして、回帰式から得られるよりも大きい値を規定した影響が見られる。

このような影響を見やすくするため、固有地震としてモデル化したプレート境界地震のみを考慮した地震ハザード解析の結果を海域を含めて図-4に示す。図の(b)と(c)を比較すると、宮城県沖地震と三陸沖北部地震の影響が大きくなっている様子がよく分かる。このように、個別の地震の短周期レベルが別途評価されている場合、あるいは地域ごとの短周期レベルの推定式が得られたような場合には、本研究の手法を用いることより、その特性を考慮した解析結果が得られることが確認できた。

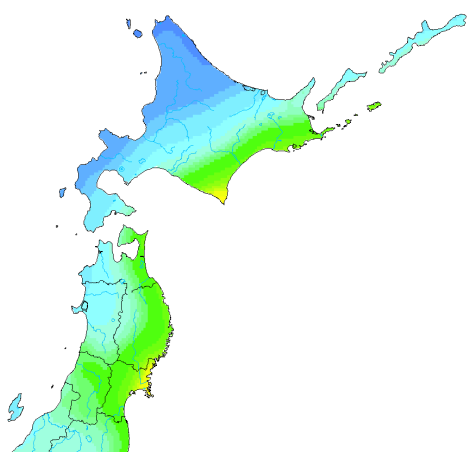
図-5はレベル2地震動を想定し、100年超過確率5%（定常Poisson過程に換算すれば2000年に1回発生する）の最大速度を示したものである。図の(a)と(b), (c)を比較すると、プレート境界地震による地震ハザードも大きくなっているものの、活断層で発生する固有地震による地震ハザードが大幅に大きくなっていることが分かる。これは、短周期レベルを



(a) 短周期レベルをパラメータとしない



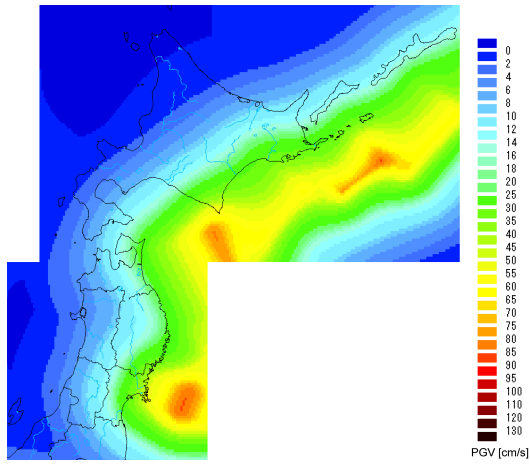
(b) 短周期レベルを回帰式(5), (6)から推定



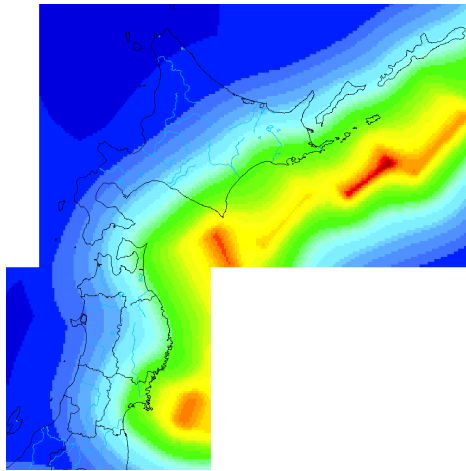
(c) 別途評価された宮城県沖・三陸沖北部地震の短周期レベルを使用

図-3 100年超過確率63%の最大速度の分布
(全ての地震を考慮)

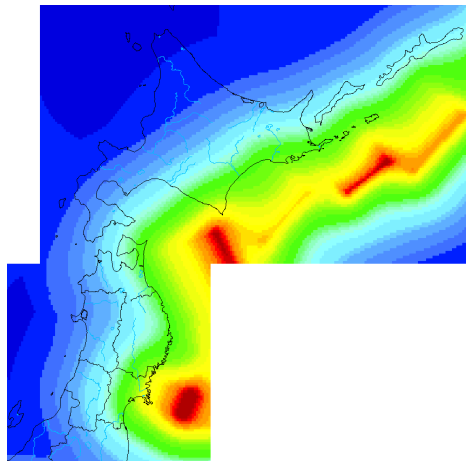
パラメータとする場合に、内陸地震の距離減衰式のばらつきとして用いる標準偏差(式(7))が大きいために、回帰式(5)の傾きが大きいために、大規模な地震の短周期レベルが大きく推定されることが原因である。



(a) 短周期レベルをパラメータとしない



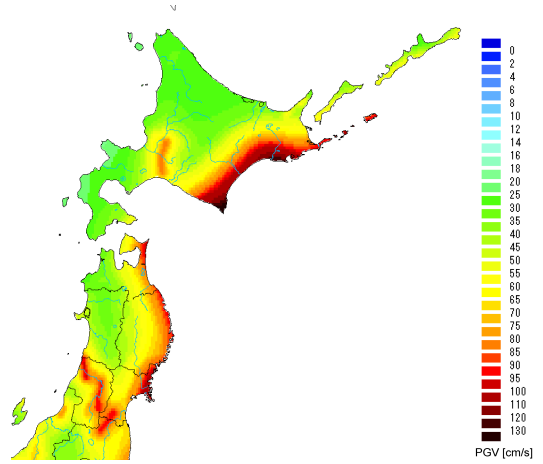
(b) 短周期レベルを回帰式(6)から推定



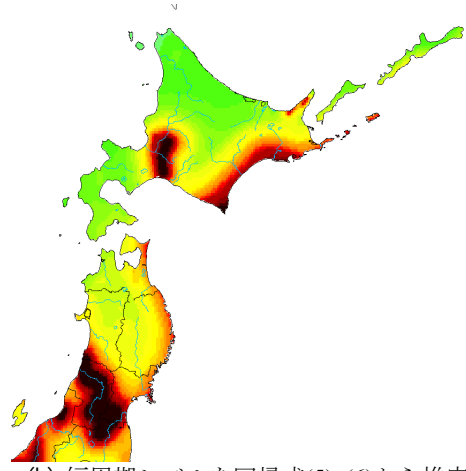
(c) 別途評価された宮城県沖・三陸沖北部地震の短周期レベルを使用

図-4 100年超過確率63%の最大速度の分布
(プレート境界の固有地震のみ)

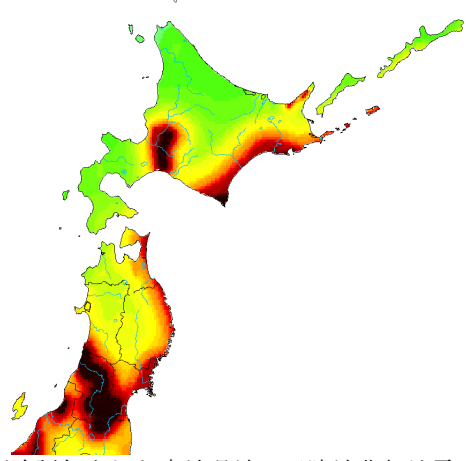
このような地震ハザード解析をレベル2地震動の設定、すなわち超過確率が低い現象の評価に用いるためには、 A と M_0 の関係式を地域ごとに作成するなど、ばらつきを小さくするための検討を行う必要がある。また、式(5)の回帰に用いたデータのうち、



(a) 短周期レベルをパラメータとしない



(b) 短周期レベルを回帰式(5), (6)から推定



(c) 別途評価された宮城県沖・三陸沖北部地震の短周期レベルを使用

図-5 100年超過確率5%の最大速度の分布
(全ての地震を考慮)

規模が最大の地震は1995年兵庫県南部地震 ($M_w=6.9$) であり、より規模が大きい地震についても式(5)の関係が成り立つかどうかの検証、あるいは式の修正等も検討の余地があると考えられる。

4. 結論

本研究では、短周期レベルをパラメータとする距離減衰式を用いて、地震ごとの短周期レベルの特性及びそのばらつきを考慮した地震ハザード解析を行った。

短周期レベルは経験式で算出するほか、宮城県沖地震や三陸沖北部地震については別途評価されている値を用いたケースも検討した。その結果、これらの地震の震源特性を反映した地震ハザードマップが得られた。本手法をレベル1地震動の設定に活用することにより、レベル2地震動の設定において仮定する震源特性との整合性を保つことができる。本手法はこのような震源特性を簡便に地震ハザード解析に導入できることから、地震ハザード解析の精度向上に資するものと考えられる。

ただし、特に内陸地震の $A \sim M_0$ 関係のばらつきが大きいため、超過確率が低い場合への適用性には問題があることが分かった。

この問題については、短周期レベルの地域性や地震のタイプによる違いを今後詳細に調査することにより、ばらつきが小さくなることが期待できる。

謝辞：本研究の一部は、原子力委員会の評価に基づき、文部科学省原子力試験研究費により実施されたものである。

参考文献

- 1) 田村敬一，片岡正次郎：性能照査型耐震設計における設計地震動の設定例，日本地震工学会大会－2003梗概集，p.特32-33，2003.
- 2) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説V耐震設計編，2002.
- 3) McGuire, R.: Deterministic vs. probabilistic earthquake hazards and risks, *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, Vol. 21, pp. 377-384, 2001.
- 4) (社)土木学会：耐震基準等に関する提言集，1996.
- 5) 壇一男，渡辺基史，佐藤俊明，石井透：断層の非一様すべり破壊モデルから算定される短周期レベルと半経験的波形合成法による強震動予測のための震源断層のモデル化，日本建築学会構造系論文集，Vol. 545, pp. 51-62, 2001.
- 6) 地震調査研究推進本部地震調査委員会：宮城県沖地震を想定した強震動評価について，2003.
- 7) 地震調査研究推進本部地震調査委員会：三陸沖北部の地震を想定した強震動評価について，2004.
- 8) 長尾毅，山田雅行：地震ハザードにおける統計的グリーン関数法適用の試み，第11回日本地震工学シンポジウム論文集，pp. 59-64, 2002.
- 9) 片岡正次郎，佐藤智美，松本俊輔，日下部毅明：短周期レベルをパラメータとした地震動強さの距離減衰式，土木学会論文集，2005（投稿中）.
- 10) 佐藤智美：中小地震の応力降下量の断層タイプ・震源深さ依存性及び地域性に関する研究，土木学会地震工学論文集，Vol. 27, 論文番号48, 8p., 2003.
- 11) 中尾吉宏，日下部毅明，村越潤，田村敬一：確率論的な地震ハザードマップの作成手法，国土技術政策総合研究所研究報告，Vol. 16, 37p., 2003.
- 12) 松田時彦，吉川真季：陸域の $M \geq 5$ 地震と活断層の分布関係－断層と地震の分布関係－その2，活断層研究，Vol. 20, 2000.
- 13) 活断層研究会：新編日本の活断層，東京大学出版会，1991.
- 14) 地震調査研究推進本部：<http://www.jishin.go.jp/main/index.html>
- 15) 地震調査研究推進本部地震調査委員会：長期的な地震発生確率の評価手法について，2001.
- 16) 片岡正次郎，日下部毅明：応力降下量をパラメータとした加速度応答スペクトルの距離減衰式，土木学会地震工学論文集，Vol. 27, 論文番号51, 8p., 2003.
- 17) 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集，Vol. 523, pp.63-70, 1999.
- 18) Midorikawa, S., Matsuoka, M. and Sakugawa, K.: Site effects on strong motion records observed during the 1987 Chiba-ken-toho-oki, Japan earthquake, *Proc. 9th Japan Earthq. Eng. Symp.*, Vol. 3, pp. 85-90, 1994.
- 19) 泉谷恭男：日本内陸で発生する浅い地震に関する震源スペクトルの相似性についての考察，土木学会論文集，No. 780/I-70, pp. 241-246, 2005.

(2005. 3. 15 受付)

PROBABILISTIC SEISMIC HAZARD ANALYSIS TAKING ACCOUNT OF CHARACTERISTICS OF SHORT PERIOD LEVEL

KATAOKA Shojiro, MATSUMOTO Shunsuke and KUSAKABE Takaaki

It has become a standard procedure recently that some of source parameters, such as area and stress drop of asperities, of a scenario earthquake are evaluated based on short period level of acceleration source spectrum. The short period level, however, is usually not taken into account in probabilistic seismic hazard analyses. The present study introduces short period level of each earthquake into probabilistic seismic hazard analyses utilizing attenuation relationships that include the short period level as one of variables.