東北地方太平洋沖地震の地震動分布(Ver.3.0)の算出手順

平成２７年５月１日
国土交通省　国土技術政策総合研究所
防災・メンテナンス基盤研究センター　国土防災研究室

地震動分布の算出手順は以下のとおりである。

①観測点の観測点位置情報と地震動指標の整理
②観測点および計算点の増幅データの取得
③観測点の基盤地震動の算定（指標／増幅データ、地表震度－震度増分）
④地震動予測式による観測点での地震動の推定
⑤地震動予測式による計算点での地震動の推定
⑥計算点の基盤地震動の補間計算（Simple Kringing 法）
⑦計算点の地表地震動の算定（基盤計算値×増幅データ、基盤震度+震度増分）

以降に、各算出手順の詳細を説明する。

①観測点の観測点位置情報と地震動指標の整理

対象となる観測点位置情報（緯度経度）と地震動指標（最大加速度 PGA、最大速度 PGV、SI 値、計測震度）を整理する。ここで、面的分布算出および描画に使用した観測点数を**表-**に示す。描画範囲は東北・関東甲信越の 1 都 15 県とした。

表-1　算出に使用した強震観測点

地震名	描画範囲	使用した観測点	JMA	NIED		MLIT				JR	NEXCO
			-	K-NET	Kik-net	地震計NW	一般強震	港湾地域	WISE	-	-
2011.3.11 東北地方太平洋沖地震	描画範囲外含む	2193	417	697	526	272	9	35	111	12	114
	描画範囲	1162	205	369	231	203	9	19	0	12	114

②観測点および計算点の増幅データの取得

観測点および計算点の地盤増幅データを 250m メッシュごとに算出、整理する。地盤増幅データは、J-SHIS[1)]で公開されている深度 30m までの平均 S 波速度(AVS30)を用い、既往文献等で提案されている計算式から算定する。なお、地盤増幅データは予めメッシュごとに算出しデータベース化しており、手順③⑦ではそのデータベースを参照している。

表-2　地盤の平均 S 波速度に基づく地震動増幅率

地震動指標の増幅度		対象メッシュ	増幅率の計算式	文献
最大速度	ARA	250m メッシュ	$ARA = 10^{\{g(AVS30)-g(AVS30_{700})\}}$ $g(AVS30)=\sum_{k=0}^{4}\frac{1}{k+1}ak(\log(AVS30))^{k+1}$	山口・翠川 2) 3)
最大加速度	ARV		$ARV = 10^{\{g(AVS30)-g(AVS30_{700})\}}$ $g(AVS30)=\sum_{k=0}^{4}\frac{1}{k+1}ak(\log(AVS30))^{k+1}$	山口・翠川 2) 3)
SI 値	$ARSI$		$\log(SI)=0.046+1.000\log(PGV)$ より $ARSI = ARV$	**図-1**
計測震度	ΔI		$I=1.220+1.015\log(PGA\times PGV)$ より $\Delta I=1.015\log(ARA\times ARV)$	**図-2**

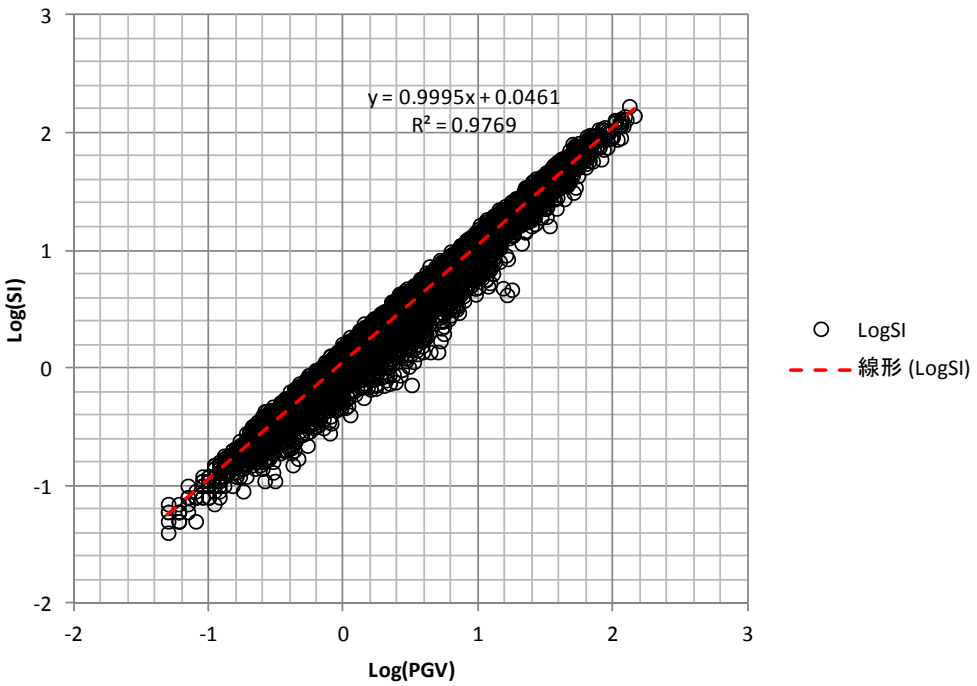

図-1　PGV と SI の関係（データ数:13301）

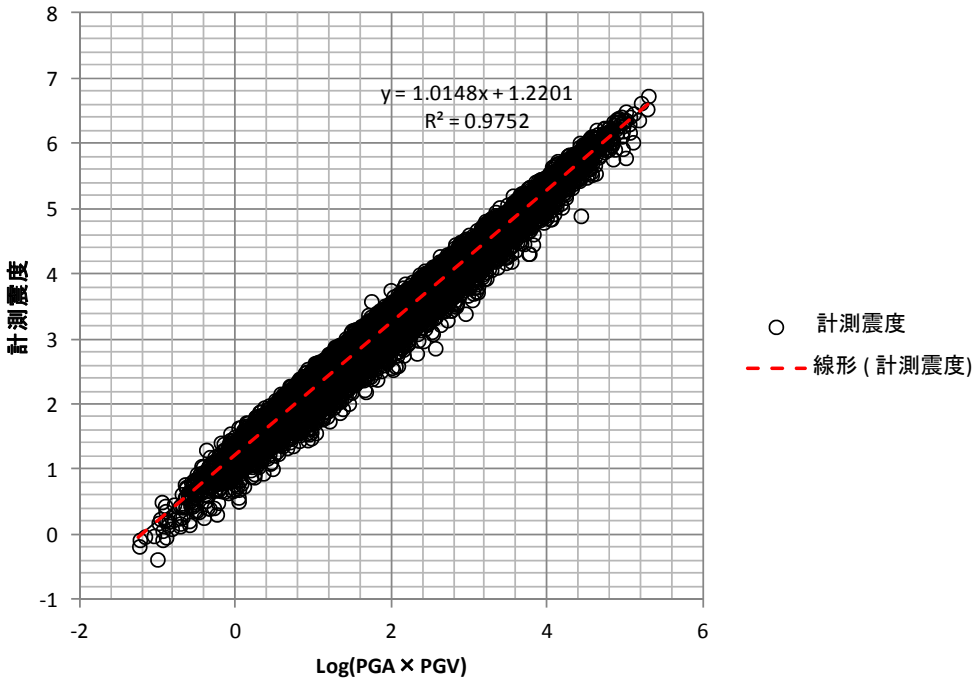

図-2　PGA×PGV と計測震度の関係（データ数:13301）

地盤の塑性化の影響を考慮するため、擬似有効ひずみ γ_{eff} を算出し、閾値 3×10^{-4} を超過していた場合、非線形時の PGA と PGV の地盤増幅度を求める [3)]。

$$\gamma_{eff} = 40PGV/AVS30$$

以上より塑性化を考慮する PGV (cm/s)の下限値は $PGV=7.5\times10^{-2}\cdot AVS30$ となる（**図-3**）。

さらに、非線形時の PGA と PGV の地盤増幅度から**表-2** のように非線形時の SI 値と計測震度の地盤増幅度を求める。上式による塑性化を考慮した非線形時の PGA と PGV の地盤増幅度は以下の通りである。地盤増幅度と AVS30 の対応関係（線形時と非線形時）を**図-4** に示す。

$$ARV' = \left(\frac{\gamma_{eff}}{3\times10^{-4}}\right)^{-0.13} \cdot ARV$$

$$ARA' = \left(\frac{\gamma_{eff}}{3\times10^{-4}}\right)^{-0.30} \cdot ARA$$

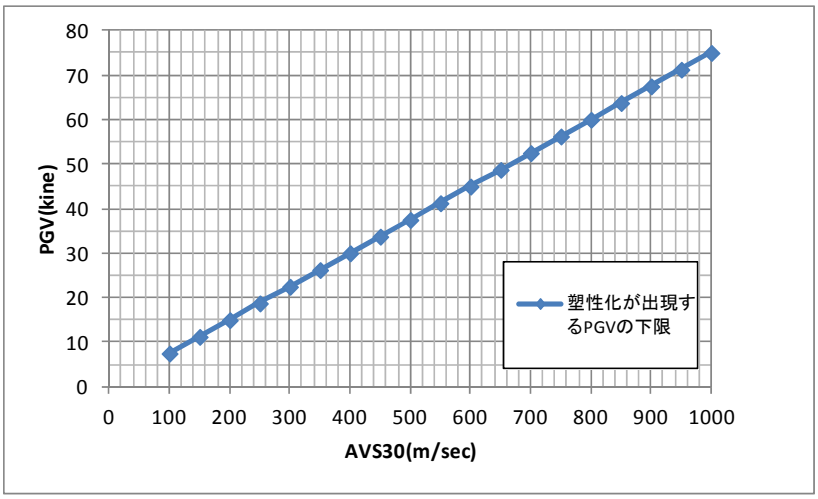

図-3　塑性化が出現する PGV の下限

（塑性化が出現するひずみの閾値を 3×10^{-4} とした場合）

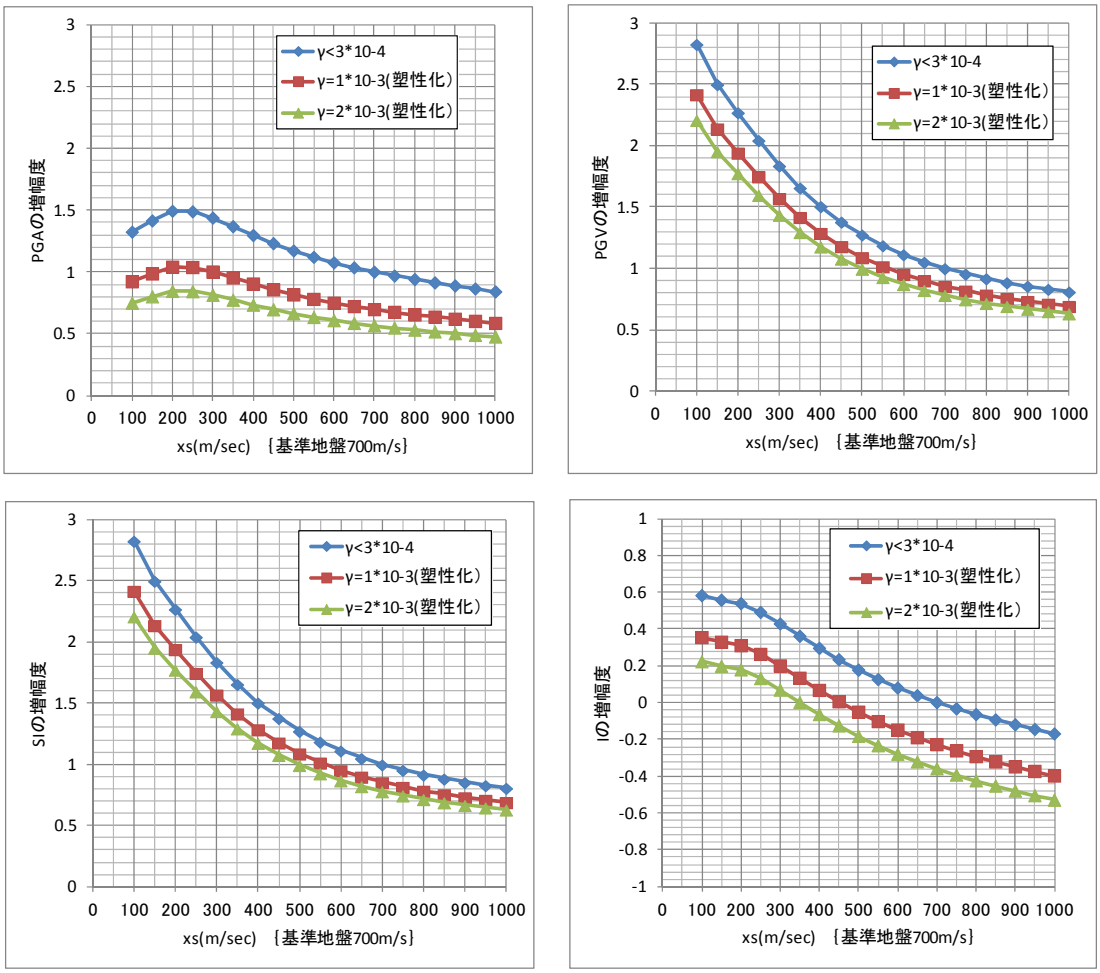

図-4　擬似有効ひずみに応じた地震動指標の増幅度と AVS30 の関係

（AVS30 =700m/s を基準、線形時および非線形時）

③観測点の基盤地震動の算定（指標／増幅データ、地表震度－震度増分）

以下の式に基づき、基盤への地震動指標へ引き戻す。基盤への引き戻しイメージを**図-5** に示す。このとき、塑性化していると判定される観測点のメッシュにおいては、塑性化を考慮した地盤増幅度で引き戻す。

基盤最大速度 ＝ 地表最大速度/ARV

基盤最大加速度 ＝ 地表最大速度/ARA

基盤 SI＝ 地表 SI/ARSI

基盤計測震度 ＝ 地表計測震度－ΔI

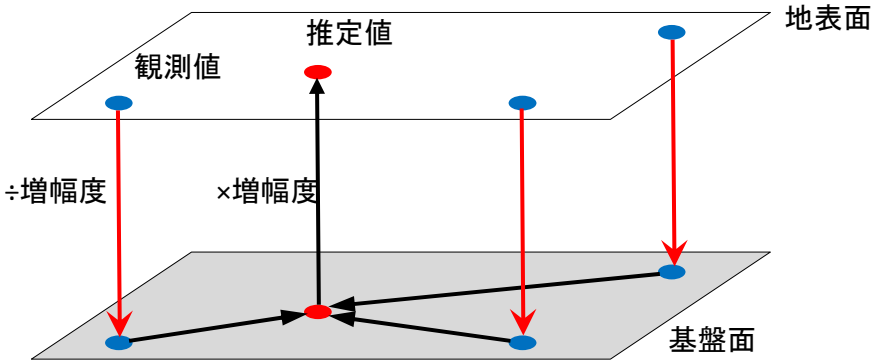

図-5　基盤面への引き戻しイメージ

④地震動予測式による観測点の地震動の推定

観測点の緯度経度および震源位置（断層面位置）情報より、震源距離（断層最短距離）を計算する。当該地震の断層モデルは、次の気象庁[4)]によるモデルとし、以下のパラメータである。

・断層の北東端　北緯 39.66 度、東経 144.43 度

・走向 201 度、傾斜角 9 度

・断層長さ 475km、断層幅 175km

次に、以下の地震動予測式[5)]により観測点直下の基盤地震動を推定する。Mw=9.0　D=23.7km とする。

$$\log_{10} PGA = 0.358\,Mw + 0.00837\,D + 0.013\,Mw^2 - 0.00412\,X + 1.02 - \log_{10}\left(X + 0.0073 \cdot 10^{0.5Mw}\right)$$

$$\log_{10} PGV = 0.670\,Mw + 0.00638\,D - 0.00593\,Mw^2 - 0.00335\,X - 1.45 - \log_{10}\left(X + 0.0056 * 10^{0.5Mw}\right)$$

$$\log_{10} SI = 0.725Mw + 0.00633D - 0.01137Mw^2 - 0.00349X - 1.49 - \log_{10}\left(X + 0.0053 * 10^{0.5mw}\right)$$

$$I = 1.597Mw + 0.01391D - 0.04566Mw^2 - 0.00907X - 2.52 - \log_{10}\left(X + 0.0023 * 10^{0.5Mw}\right)$$

⑤計算地震動予測式による計算点の地震動の推定

計算点の緯度経度の緯度経度および震源位置（断層面位置）情報より、震源距離（断層面最短距離）を計算する。

次に、④と同じ地震動予測式により計算点直下の基盤地震動を推定する。

⑥計算点の基盤地震動の補間計算（Simple Kriging 法）

適用した手法は、山崎ほか(1998)[6]と同様の Simple Kriging 法であり、トレンド成分を地震動予測式で期待値として評価し、残差成分を観測値にて補間する手法である。山崎ほか(1998)の補間法は、野田・星谷(1997)[7]が提案した Simple Kriging 法に基づいており、観測値とそれに基づく最適推定値は下式にて表現される。

$$\hat{W}_K(x_r) = m(x_r) + \sum_{i=1}^{N} \lambda_i \left(\underline{W}(x_i) - m(x_i) \right)$$

ここで、地震動指標推計問題でのパラメータは以下のとおり。

$\hat{W}_K(x_r)$ ：計算地点の地震動指標の推定値

$m(x_r)$ ：計算地点の地震動指標の期待値（距離減衰式による値）

$\underline{W}(x_i)$ ：観測地点の観測地震動指標

$m(x_i)$ ：観測地点の地震動指標の期待値（距離減衰式による値）

λ_i ：重み係数

N ：観測地点数

また、重み係数 λ_i(i=1～N)は、以下の連立方程式を解くことによって求められる。

$$\sum_{j=1}^{N} \lambda_j C\left(W(x_i), W(x_j)\right) = C\left(W(x_i), W(x_r)\right) \qquad (i=1 \sim N)$$

ここで、$C\left(W(x_i), W(x_j)\right)$は、$x_i$ 地点と x_j 地点の共分散となる。共分散とは、2 組の対応するデータ間での、平均からの偏差の積の平均値である。

共分散関数については、山崎ほか(1998)を参考に指数モデルとし、モデルは、h を観測点からの距離、a を相関距離, b を分散として、次式で与えられる。

$$C(h) = b \exp\left(-\frac{h}{a} \right)$$

このとき、観測点の影響範囲を決める指標である相関距離は、末富ほか（2005）[8]を参考に 20km とした。

⑦計算点の地表地震動の算定（基盤計算値×増幅データ、基盤震度+震度増分）

以下の式に基づき、地表への地震動指標へ、線形時の地盤増幅度を用いて引き上げる（**図-6**）。

地表最大速度= 基盤最大速度×ARV

地表最大速度= 基盤最大加速度×ARA

地表 SI = 基盤 SI×ARSI

地表計測震度= 基盤計測震度+ΔI

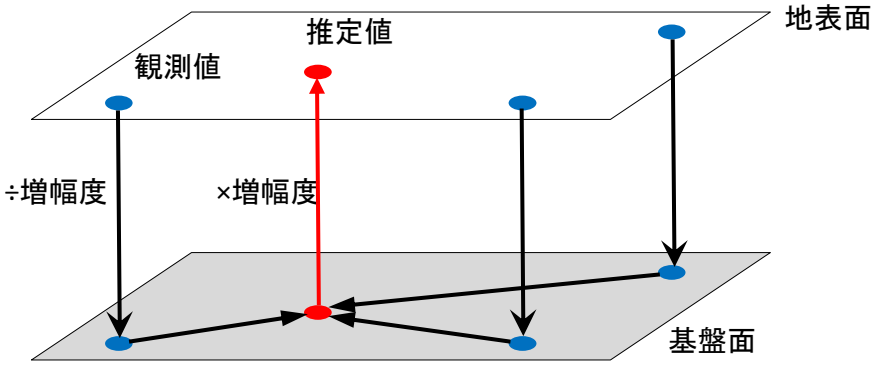

図-6　地表面への引き上げイメージ　（赤線矢印部）

はじめに、線形時の地盤増幅度にて指標を地表面へ引き上げた後、擬似有効ひずみ γ_{eff} を算出し、閾値である 3×10^{-4} を超過していれば、当該メッシュは塑性化していると判断する。塑性化しているメッシュで、**表-2** に基づき、塑性化後の地盤増幅度を用いて、再度、基盤より地表面への引き上げを行う。

謝辞：本検討では、気象庁、防災科学技術研究所、JR 東日本、NEXCO 東日本および国土交通省の強震記録を使用した。

参考文献

1) 防災科学技術研究所：地震ハザードステーション http://www.j-shis.bosai.go.jp/
2) 山口亮，翠川三郎(2011)：地盤の平均 S 波速度を用いた地盤増幅率の推定手法の改良，日本地震工学会論文集，第 11 巻，第 3 号，pp.85-101.
3) 山口亮，翠川三郎(2014)：観測記録に基づく地盤増幅率の非線形特性のモデル化，日本地震工学会論文集，　第 14 巻，第 1 号，pp.56-70.
4) 気象庁(2011)：「平成 23 年(2011 年)東北地方太平洋沖地震」について（第 28 報）
5) 片岡正次郎，金子正洋，松本幸司(2014)：地震動予測式と南海トラフ巨大地震の強震動との比較，第 14 回日本地震工学シンポジウム論文集，pp. 1993-2000.
6) 山崎文雄，大西淳一，田山聡，高野辰雄(1998)：高速道路構造物に対する地震被害推定式の提案，第 10 回日本地震工学シンポジウム論文集，pp.3491-3496.
7) 野田茂，星谷勝(1997)：条件付き確率場の補間法に関する一提案，鳥取大学工学部研究報告，Vol. 28，pp. 175-197.
8) 末冨岩雄，石田栄介，磯山龍二(2005)：空間補間による地震動分布推定の高精度化のための一検討，第 28 回地震工学研究発表会報告集，CD-ROM.