

長周期地震動階級の予測の検証について

長周期地震動階級の予測の検証について

第7回検討会で長周期地震動予測技術検討ワーキンググループから報告があったとおり、気象庁が行う長周期地震動階級の予測に関しては、防災科学技術研究所から提案された距離減衰式を用いた予測手法を利用することで、観測と予測の階級差が ± 1 以内になる割合が9割程度となることが示された。

その後、防災科学技術研究所により、この予測手法は、距離減衰式の回帰手法の見直し等からなる改訂が行われ、論文化された。

第9回検討会で青井委員より、改訂後の手法について、防災科学技術研究所の観測点を予測対象観測点とした場合は、予測適合度が改訂前と同様に高いことをご報告いただいた。

今回は、改訂後の手法について、気象庁観測点を予測対象観測点とした場合の予測適合度について検証を行う。

予測手法の改訂について

第9回資料4 - 2 (防災科学技術研究所資料)より抜粋

- 距離減衰式回帰手法

旧式: 最小二乗法により回帰(誤差は ε_{ij} 1種類)。

$$\log Y_{ij} = c + aM_i - \log R_{ij} - bR_{ij} + \varepsilon_{ij}$$

観測記録を用いた観測点補正係数は誤差 ε_{ij} の平均値として求める

新式: 2種類の誤差(地震間誤差 η_i と地震内誤差 ε_{ij})を仮定して最尤法により回帰

$$\log Y_{ij} = c + aM_i - \log R_{ij} - bR_{ij} + \eta_i + \varepsilon_{ij}$$

観測記録を用いた観測点補正係数は地震内誤差 ε_{ij} の平均値として求める

- 観測記録を用いない観測点補正係数

旧式: J-SHIS深部地盤構造モデル $V_s=1.4\text{km/s}$ 層の深さ

新式: J-SHIS深部地盤構造モデル $V_s=1.4\text{km/s}$ 層の深さとAVS30

- 利用した強震データ数

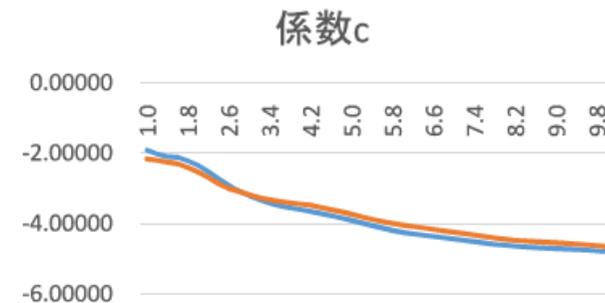
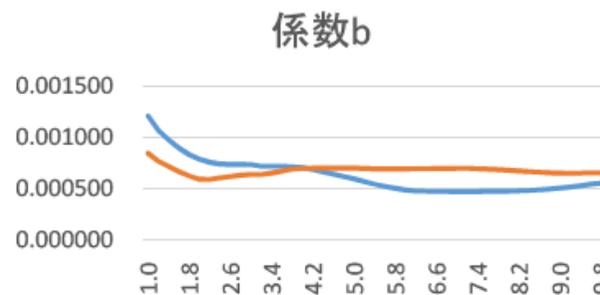
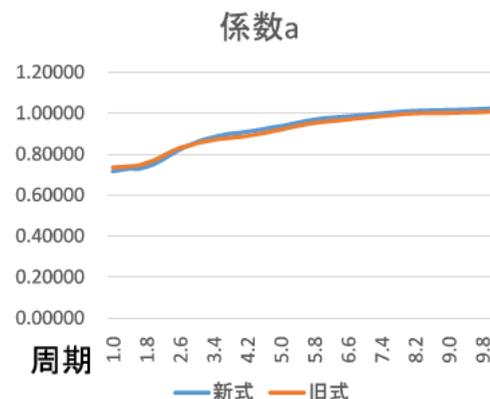
旧式: 12,512

新式: 12,401(移設が発生した観測点の取り扱いを修正)

距離減衰式は旧式、新式とも式(1)で表される。

$$\log Y(T) = c(T) + a(T)M - \log R - b(T)R \quad (1)$$

Y: 絶対速度応答値(cm/s)、M: 気象庁マグニチュード、R: 震源距離(km)、T: 周期(秒)



改訂後の予測手法の検証作業について

観測記録から統計的に得られる補正係数の算出

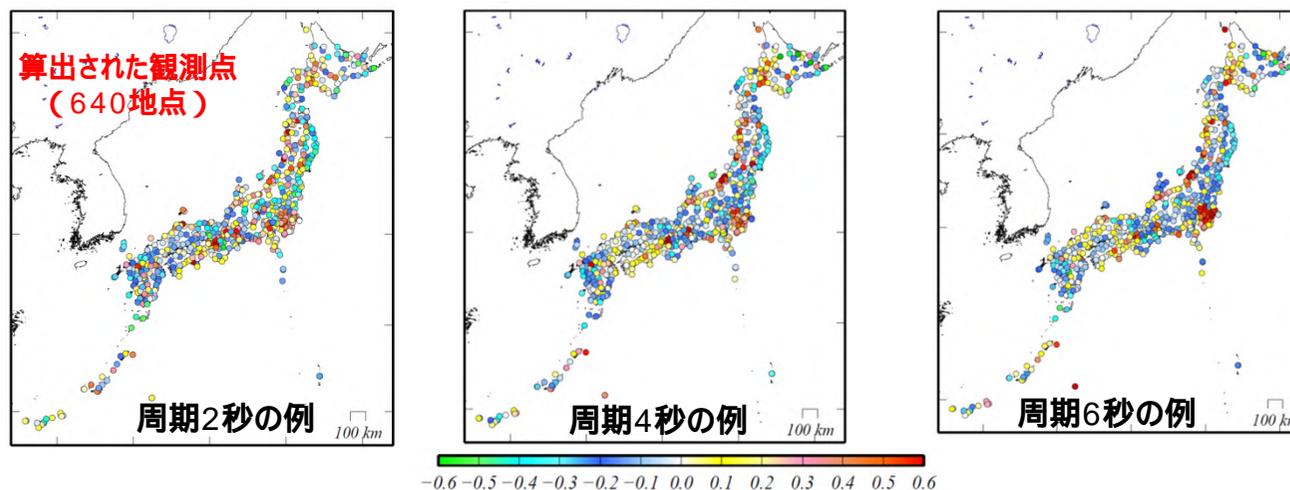
- ・本予測手法には、「観測記録から統計的に得られる補正係数を用いる手法」と「地盤情報から推定される補正係数を用いる手法」の2種類がある。
- ・今回の検証作業を行うにあたり、改訂後の式における気象庁観測点の「観測記録から統計的に得られる補正係数」の算出を行った。

【補正係数の算出に使用した地震イベント】

- ・1996年10月～2016年10月までのM 6.5、深さ 50 kmのイベント（74地震）
（ただし、東北地方太平洋沖地震の余震や連発地震等については、影響を考慮し、一部除外）

【使用する波形データの条件】

- ・データ中に、S波の到達が含まれていないデータは除外。
- ・観測点の移設があった場合は移設前の記録は除外。
- ・震源距離 800kmの観測点のデータに限定。



観測記録から統計的に得られる補正係数が算出された観測点の分布

改訂後の予測手法の検証作業について

予測適合度の検証作業に用いたデータ

【地震イベント】

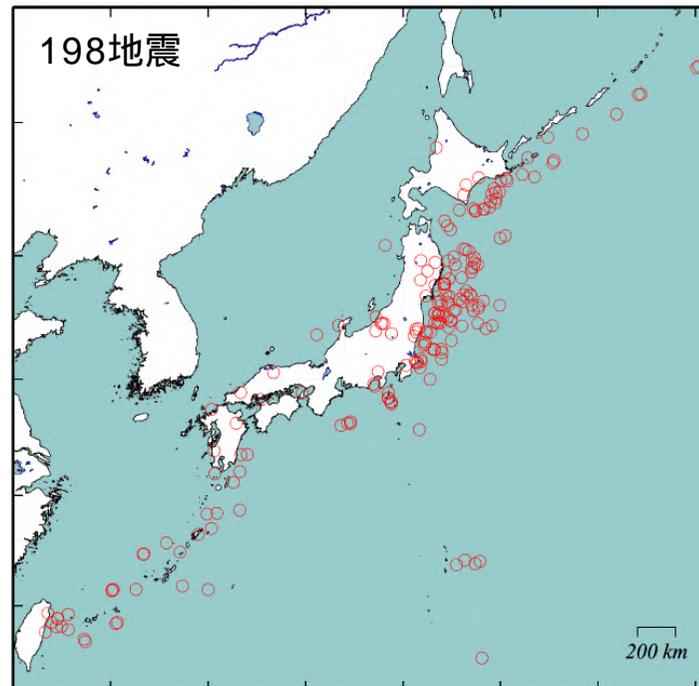
- ・1996年10月～2013年12月までのM 6.0、深さ 150 kmのイベント

【使用する波形データの条件】

- ・終了時刻がS波の到達前の記録は除外。
- ・観測点の移設が一定距離以上あった場合は移設前の記録は除外。

【その他】

- ・改訂後の予測手法の「地盤情報から推定される補正係数を用いる方法」では、各観測点におけるAVS30の実測値を用いた補正が行われているが、気象庁観測点においては、AVS30の実測値が必ずしも得られないことから、今回の検証では深部地盤構造による補正のみを実施している。



検証作業に用いた地震の震央分布

改訂前後での予測適合度

予測適合度（予測と観測の長周期地震動階級の比較）

【改訂後】 観測点単位（観測点数：11046）

予測 \ 観測	階級 0	階級 1	階級 2	階級 3	階級 4
階級 0	8064	643	8	0	0
階級 1	635	1069	129	2	0
階級 2	18	214	183	15	3
階級 3	0	4	22	14	1
階級 4	0	0	6	9	7
完全階級合致：		42.69%	± 1 階級合致：		93.54%

【改訂後】 予報区単位（予報区数：4585）

予測 \ 観測	階級 0	階級 1	階級 2	階級 3	階級 4
階級 0	3082	278	2	0	0
階級 1	306	536	60	1	0
階級 2	10	139	117	9	1
階級 3	0	3	16	10	0
階級 4	0	0	3	5	7
完全階級合致：		44.58%	± 1 階級合致：		94.78%

【改訂前】 観測点単位（観測点数：11046）

予測 \ 観測	階級 0	階級 1	階級 2	階級 3	階級 4
階級 0	8091	617	7	0	0
階級 1	611	1120	104	0	0
階級 2	20	216	184	12	1
階級 3	0	3	22	15	1
階級 4	0	0	4	11	7
完全階級合致：		44.87%	± 1 階級合致：		94.23%

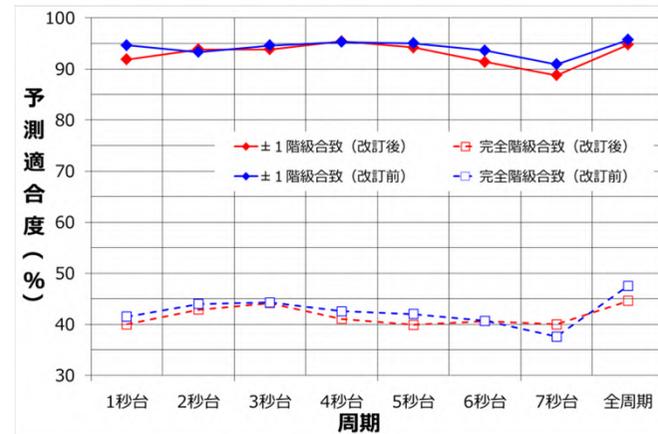
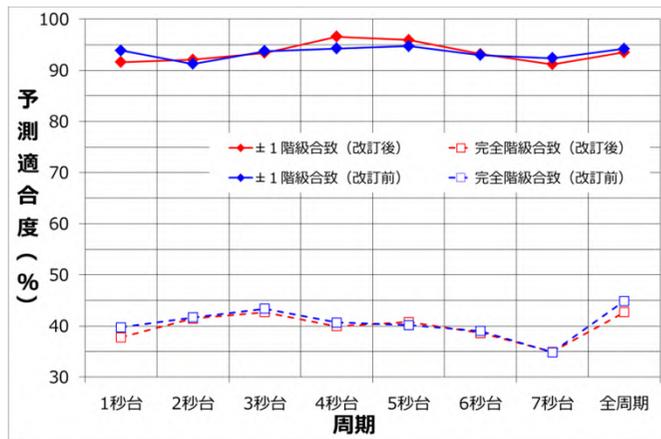
【改訂前】 予報区単位（予報区数：4585）

予測 \ 観測	階級 0	階級 1	階級 2	階級 3	階級 4
階級 0	3079	282	1	0	0
階級 1	273	576	54	0	0
階級 2	9	137	122	7	1
階級 3	0	2	16	11	0
階級 4	0	0	3	5	7
完全階級合致：		47.54%	± 1 階級合致：		95.73%

観測点単位

周期別の予測適合度

予報区単位



「全周期」は長周期地震動階級（周期1～7秒台の長周期地震動階級データの最大値）を表す。

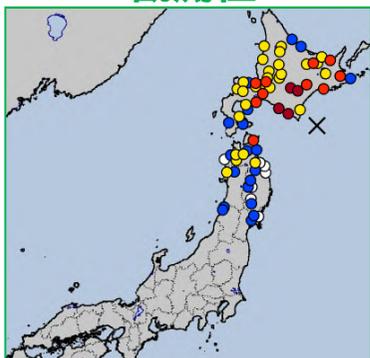
平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震についてはデータ数に占める割合が多くなるため本資料の集計から除外。その他、連発地震等についても除外。

顕著な地震での例

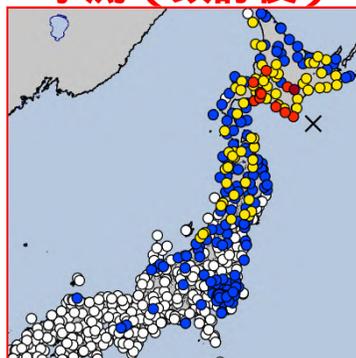
平成15年（2003年）十勝沖地震（ M_j 8.0）

観測点単位
の比較

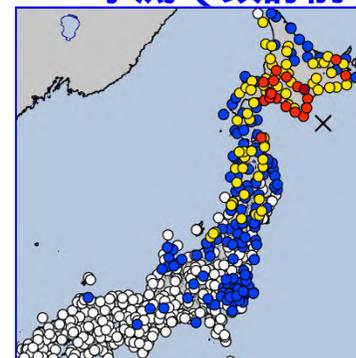
観測値



予測（改訂後）



予測（改訂前）



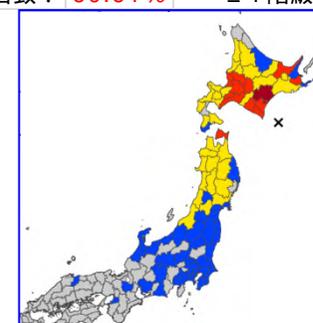
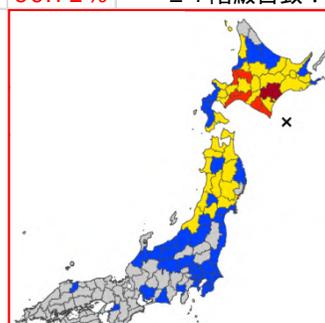
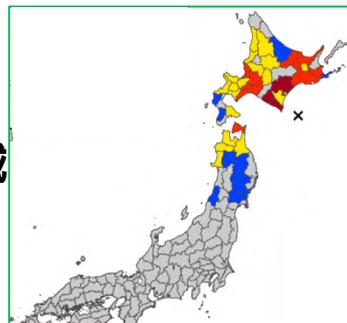
観測 \ 予測	階級 0	階級 1	階級 2	階級 3	階級 4
階級 0	1	6	0	0	0
階級 1	0	12	8	0	0
階級 2	0	4	22	1	0
階級 3	0	0	7	3	0
階級 4	0	0	0	3	1

完全階級合致：56.72% ±1階級合致：100.00%

観測 \ 予測	階級 0	階級 1	階級 2	階級 3	階級 4
階級 0	2	5	0	0	0
階級 1	0	8	12	0	0
階級 2	0	0	24	3	0
階級 3	0	0	3	7	0
階級 4	0	0	0	3	1

完全階級合致：60.61% ±1階級合致：100.00%

予報細分区域
単位の比較



観測 \ 予測	階級 0	階級 1	階級 2	階級 3	階級 4
階級 0	0	1	0	0	0
階級 1	0	4	4	0	0
階級 2	0	2	15	1	0
階級 3	0	0	6	3	0
階級 4	0	0	0	2	1

完全階級合致：58.97% ±1階級合致：100.00%

観測 \ 予測	階級 0	階級 1	階級 2	階級 3	階級 4
階級 0	0	1	0	0	0
階級 1	0	2	6	0	0
階級 2	0	0	15	3	0
階級 3	0	0	2	7	0
階級 4	0	0	0	2	1

完全階級合致：64.10% ±1階級合致：100.00%

顕著な地震での例

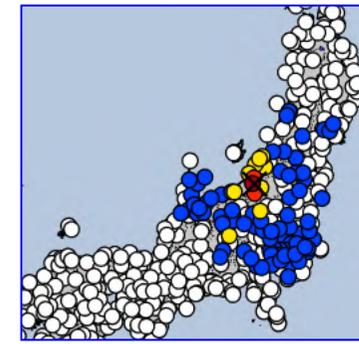
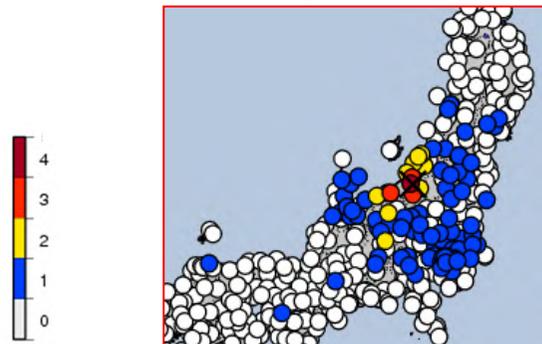
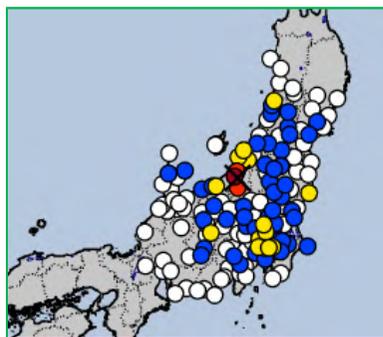
平成16年（2004年）新潟県中越地震（ M_j 6.8）

観測値

予測（改訂後）

予測（改訂前）

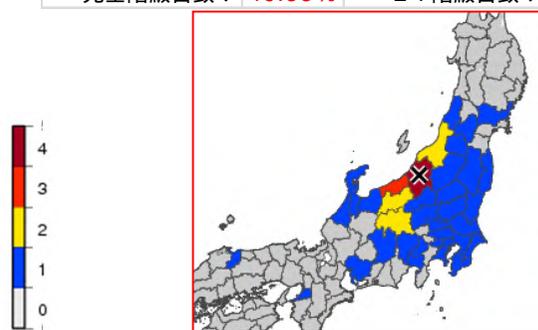
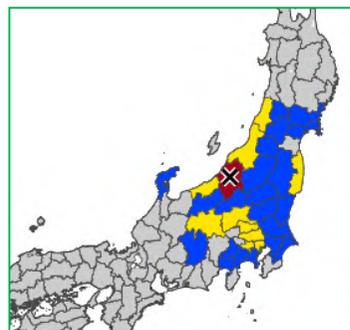
観測点単位
の比較



観測 \ 予測	階級 0	階級 1	階級 2	階級 3	階級 4
階級 0	66	18	0	0	0
階級 1	10	33	2	0	0
階級 2	0	10	4	1	0
階級 3	0	0	0	2	0
階級 4	0	0	0	0	1
完全階級合致： 49.38% ±1階級合致： 100.00%					

観測 \ 予測	階級 0	階級 1	階級 2	階級 3	階級 4
階級 0	68	16	0	0	0
階級 1	10	34	1	0	0
階級 2	1	9	5	0	0
階級 3	0	0	0	2	0
階級 4	0	0	0	0	1
完全階級合致： 53.16% ±1階級合致： 94.74%					

予報細分区域
単位の比較



観測 \ 予測	階級 0	階級 1	階級 2	階級 3	階級 4
階級 0	19	5	0	0	0
階級 1	4	16	1	0	0
階級 2	0	7	2	1	0
階級 3	0	0	0	0	0
階級 4	0	0	0	0	1
完全階級合致： 51.35% ±1階級合致： 100.00%					

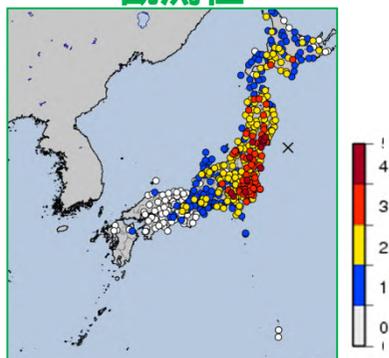
観測 \ 予測	階級 0	階級 1	階級 2	階級 3	階級 4
階級 0	20	4	0	0	0
階級 1	3	17	1	0	0
階級 2	0	7	3	0	0
階級 3	0	0	0	0	0
階級 4	0	0	0	0	1
完全階級合致： 58.33% ±1階級合致： 100.00%					

顕著な地震での例

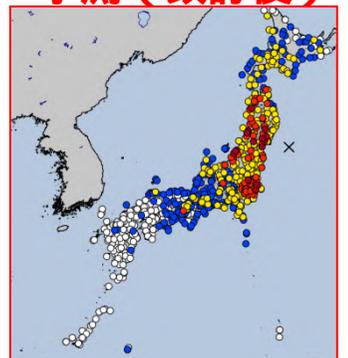
平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震（ M_j 8.4）

観測点単位
の比較

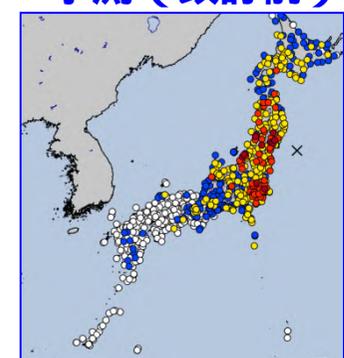
観測値



予測（改訂後）



予測（改訂前）



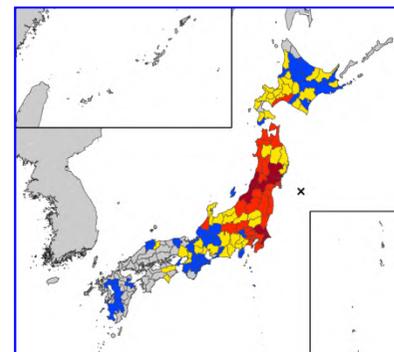
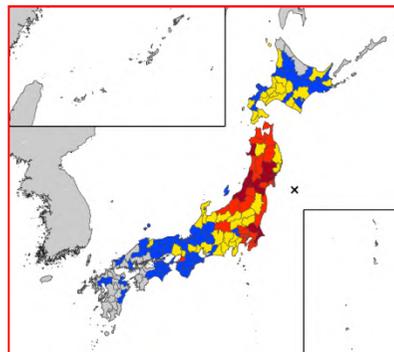
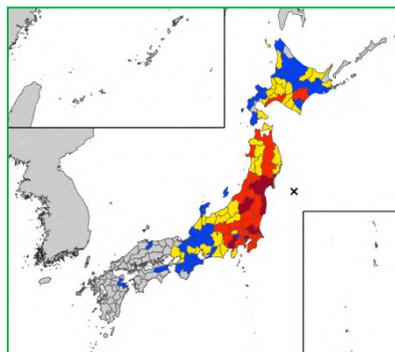
観測 \ 予測	階級 0	階級 1	階級 2	階級 3	階級 4
階級 0	48	45	0	0	0
階級 1	8	103	23	0	0
階級 2	0	14	112	16	0
階級 3	0	0	23	34	6
階級 4	0	0	2	4	6

完全階級合致： 64.39% ±1 階級合致： 99.17%

観測 \ 予測	階級 0	階級 1	階級 2	階級 3	階級 4
階級 0	68	24	1	0	0
階級 1	5	94	35	0	0
階級 2	0	10	119	13	0
階級 3	0	0	19	38	6
階級 4	0	0	2	5	5

完全階級合致： 68.09% ±1 階級合致： 98.81%

予報細分区域
単位の比較



観測 \ 予測	階級 0	階級 1	階級 2	階級 3	階級 4
階級 0	12	18	0	0	0
階級 1	1	29	6	0	0
階級 2	0	4	33	7	0
階級 3	0	0	9	14	3
階級 4	0	0	2	4	4

完全階級合致： 59.70% ±1 階級合致： 97.67%

観測 \ 予測	階級 0	階級 1	階級 2	階級 3	階級 4
階級 0	21	8	1	0	0
階級 1	0	27	9	0	0
階級 2	0	4	34	6	0
階級 3	0	0	6	17	3
階級 4	0	0	2	5	3

完全階級合致： 64.80% ±1 階級合致： 96.67%

この地震イベントは、P6の予測適合度の集計には含まれていないが、顕著な地震の例として掲載

顕著な地震での例

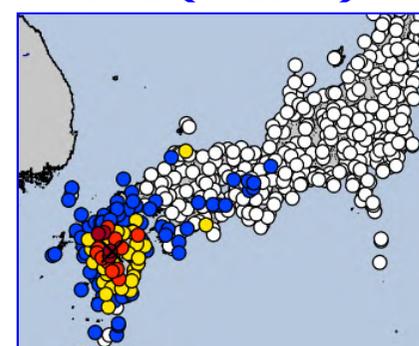
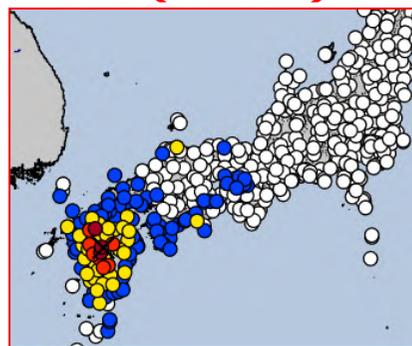
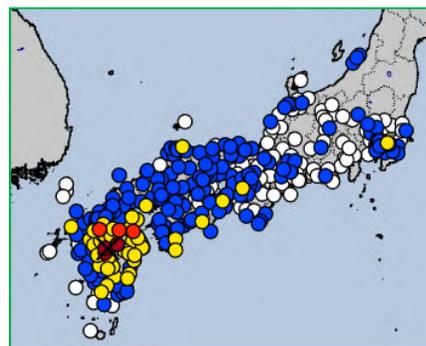
平成28年（2016年）熊本地震（4月16日01時25分 熊本県熊本地方（ M_j 7.3））

観測値

予測（改訂後）

予測（改訂前）

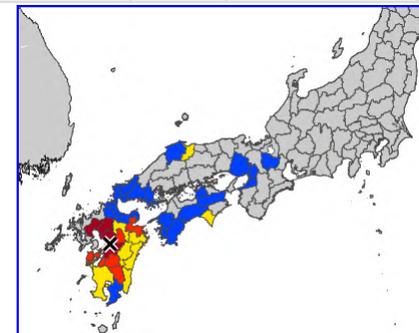
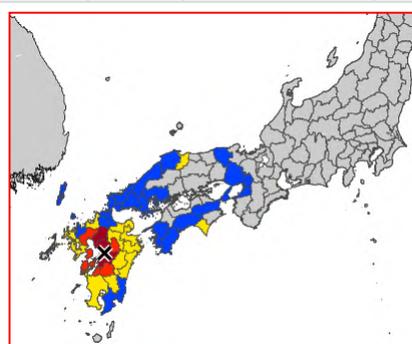
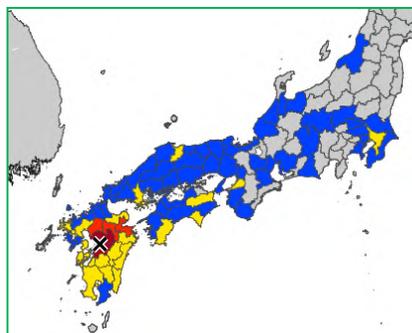
観測点単位
の比較



観測 \ 予測	階級 0	階級 1	階級 2	階級 3	階級 4
階級 0	97	5	0	0	0
階級 1	97	57	11	0	0
階級 2	1	14	21	6	0
階級 3	0	0	2	0	1
階級 4	0	0	0	1	2
完全階級合致： 36.70% ± 1 階級合致： 98.31%					

観測 \ 予測	階級 0	階級 1	階級 2	階級 3	階級 4
階級 0	91	11	0	0	0
階級 1	112	42	10	1	0
階級 2	2	10	21	8	1
階級 3	0	0	1	1	1
階級 4	0	0	0	1	2
完全階級合致： 29.46% ± 1 階級合致： 93.22%					

予報細分区域
単位の比較



観測 \ 予測	階級 0	階級 1	階級 2	階級 3	階級 4
階級 0	19	1	0	0	0
階級 1	35	17	2	0	0
階級 2	1	5	9	4	0
階級 3	0	0	2	0	1
階級 4	0	0	0	1	1
完全階級合致： 34.18% ± 1 階級合致： 96.15%					

観測 \ 予測	階級 0	階級 1	階級 2	階級 3	階級 4
階級 0	16	4	0	0	0
階級 1	37	16	1	0	0
階級 2	1	5	8	4	1
階級 3	0	0	0	2	1
階級 4	0	0	0	1	1
完全階級合致： 32.93% ± 1 階級合致： 92.00%					

この地震イベントは、P6の予測適合度の集計には含まれていないが、顕著な地震の例として掲載

顕著な地震での例

顕著な地震での予測適合度の一覧

「完全」：完全階級合致

「±1」：±1階級合致

地震名 (または震央地名)	Mj	観測点単位				予報区単位			
		改訂後		改訂前		改訂後		改訂前	
		完全	±1	完全	±1	完全	±1	完全	±1
平成12年(2000年)鳥取県西部地震	7.3	49.5%	89.1%	58.8%	97.3%	60.9%	91.3%	60.9%	95.7%
平成15年(2003年)十勝沖地震	8.0	56.7%	100.0%	60.6%	100.0%	59.0%	100.0%	64.1%	100.0%
平成16年9月5日 東海道沖の地震	7.4	41.1%	97.3%	56.8%	100.0%	45.7%	100.0%	60.5%	100.0%
平成16年(2004年)新潟県中越地震	6.8	49.4%	100.0%	53.2%	94.7%	51.4%	100.0%	58.3%	100.0%
平成17年3月20日 福岡県西方沖の地震	7.0	60.0%	100.0%	59.0%	94.1%	65.6%	100.0%	52.9%	100.0%
平成17年8月16日 宮城県沖の地震	7.2	55.8%	85.7%	56.6%	90.0%	57.4%	78.6%	53.1%	92.9%
平成20年(2008年)岩手・宮城内陸地震	7.2	59.8%	100.0%	61.3%	100.0%	68.3%	100.0%	63.6%	100.0%
平成20年9月11日 十勝沖の地震	7.1	47.5%	90.0%	53.5%	100.0%	50.0%	83.3%	63.0%	100.0%
平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震	8.4	64.4%	99.2%	68.1%	98.8%	59.7%	97.7%	64.8%	96.7%
平成28年(2016年)熊本地震 4/14 21:26	6.5	55.9%	100.0%	32.5%	85.7%	58.8%	100.0%	33.3%	100.0%
平成28年(2016年)熊本地震 4/15 00:03	6.4	38.7%	85.7%	22.9%	50.0%	31.3%	80.0%	25.0%	66.7%
平成28年(2016年)熊本地震 4/16 01:25	7.3	36.7%	98.3%	29.5%	93.2%	34.2%	96.2%	32.9%	92.0%

まとめ

改訂後の予測手法について、気象庁観測点における予測適合度の検証を行ったところ、 ± 1 階級以内で一致する割合は9割程度となることが確認された。

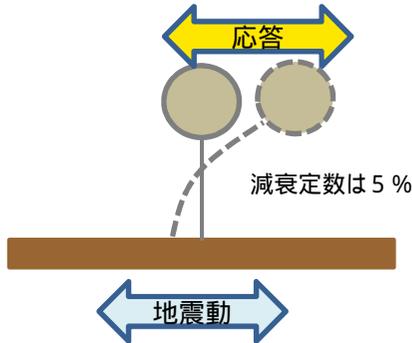
よって、気象庁が長周期地震動階級を予測する際に改訂後の予測手法を用いることは、予測適合度の観点からも、妥当であると考えられる。

【参考資料】長周期地震動階級の算出方法

地震時の高層階の床の揺れ

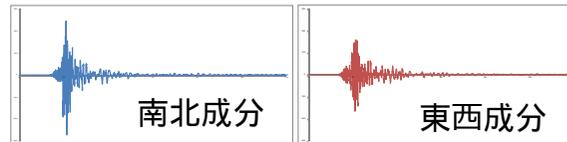
地震動を外力とした振り子の揺れで代用

高層ビルをモデル化（1質点減衰系）



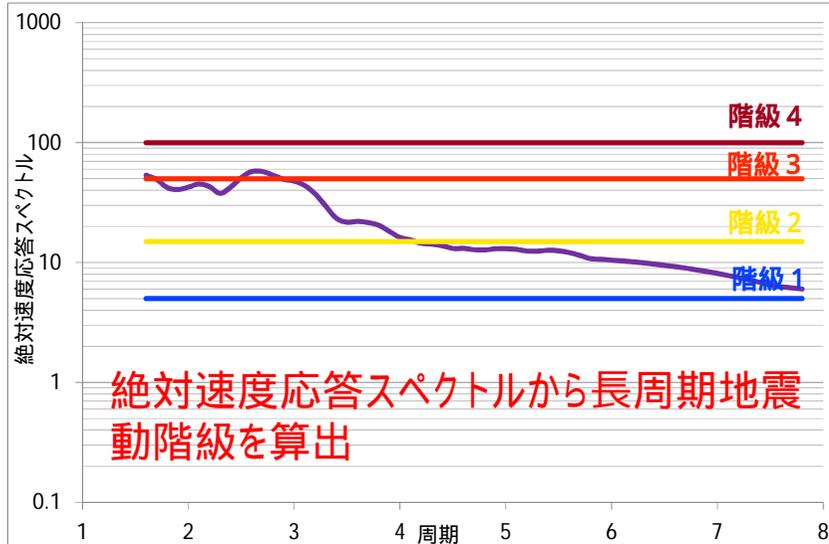
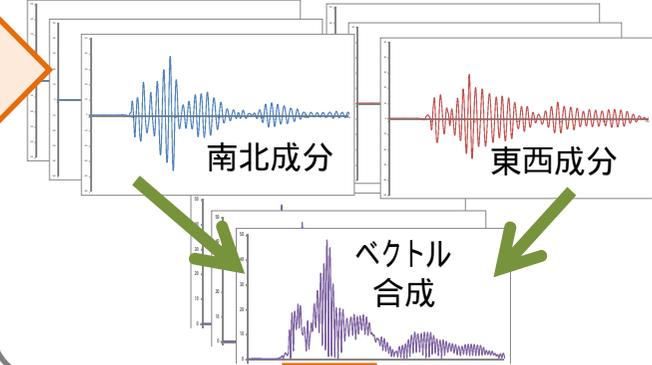
【ステップ1】地震計で観測した加速度波形を、振り子モデル（周期1.6～7.8秒 0.2秒刻み）の地面の揺れとして入力する。

加速度波形（地震計で観測）



振り子の揺れを計算

【ステップ2】各周期ごとに振り子の揺れ（絶対速度応答波形）が得られるので、得られた波形をベクトル合成する。
絶対速度応答波形（実際には各周期ごと）



絶対速度応答スペクトルから長周期地震動階級を算出

【ステップ3】各周期での振り子の揺れ（絶対速度応答波形）の最大値を周期ごとにプロットし、絶対速度応答スペクトル（Sva）を得る。

【ステップ4】絶対速度応答スペクトル（Sva）の値を、以下の表を用いて長周期地震動階級にする。

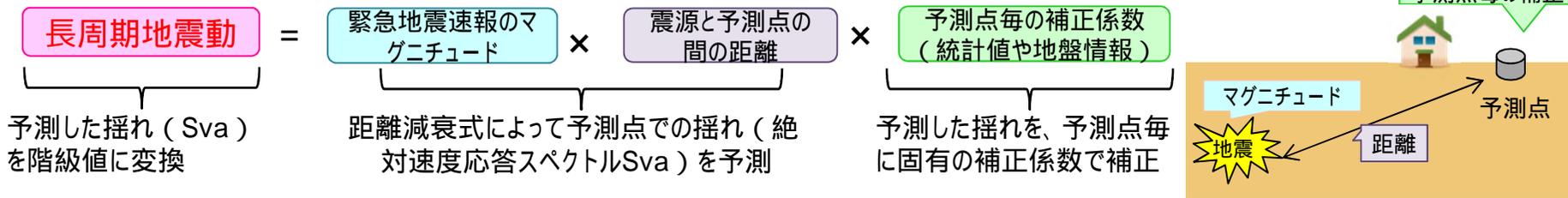
階級1	5cm/s Sva < 15cm/s
階級2	15cm/s Sva < 50cm/s
階級3	50cm/s Sva < 100cm/s
階級4	100cm/s Sva

【参考資料】長周期地震動階級の予測手法

どのように長周期地震動を予測するか？

緊急地震速報で推定したマグニチュードと、震源位置と予測対象地点間の距離から、距離減衰式 や予測対象地点毎の補正係数を用いて、長周期地震動階級を予測する。

距離減衰式 地震の揺れの強さと震源からの距離との関係を統計値から式に表したもの

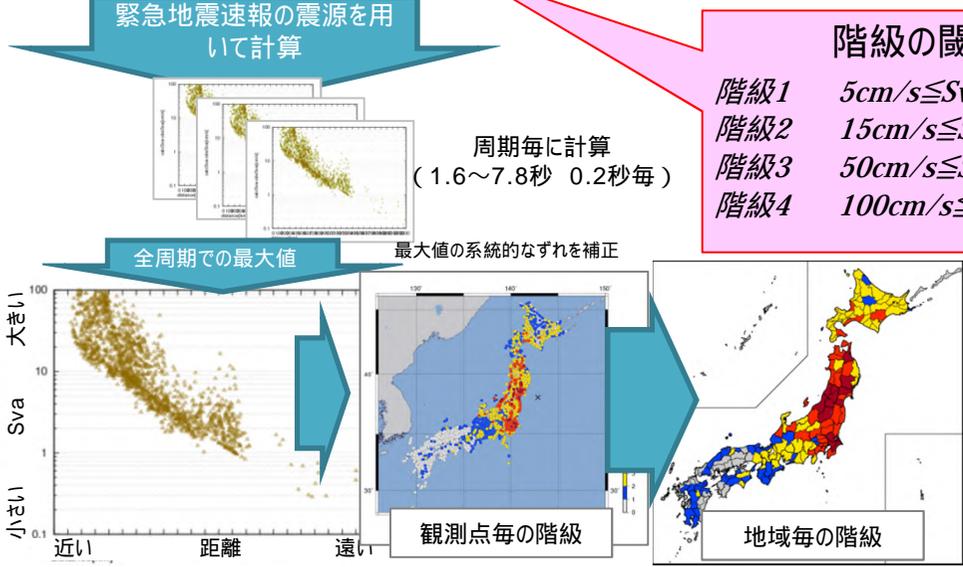


気象庁が用いる予測手法について

Dhakai et al. (2015)による絶対速度応答スペクトルの距離減衰式を使用

$$\log_{10} Sva(T) = c(T) + a(T)M_j - \log_{10} R - b(T)R + \text{siteFactor}(T)$$

(T) は周期毎であることを示す
 絶対速度応答値 定数c 系数a マグニチュード 震源距離 予測値点毎の補正係数



階級の閾値

階級1	5cm/s ≤ Sva < 15cm/s
階級2	15cm/s ≤ Sva < 50cm/s
階級3	50cm/s ≤ Sva < 100cm/s
階級4	100cm/s ≤ Sva

補正係数は以下のどちらかを使用

- 観測記録による補正係数
 - 各観測点の実際の観測値から統計的に得られた補正係数。
- 地盤情報による補正係数
 - J-SHIS深部地盤構造モデルのS波速度1.4km/s上面深さとAVS30から算出する補正係数。
 - (観測値がない場合はJ-SHISのページより http://www.j-shis.bosai.go.jp/ を使用する)

深部地盤構造モデル S波速度1.4km/s上面深さ

【参考資料】予測適合度の考え方

長周期地震動階級および周期ごとの長周期地震動階級データの予測値と観測値を比較して、 ± 1 階級合致と完全階級合致の二通りで予測適合度を算出する

± 1 階級合致

階級2以上を観測もしくは予測した場合に、観測と予測の階級差が ± 1 以内になる割合を予測適合度とする。

	予測階級0	予測階級1	予測階級2	予測階級3	予測階級4
観測階級0	検証対象外				
観測階級1					
観測階級2					
観測階級3					
観測階級4					

注: 観測階級0と予測階級0は「検証対象外」(グレー)と表示されています。観測階級0と予測階級3は「過大評価」(赤)と表示されています。観測階級2と予測階級2は「合致」(黄)と表示されています。観測階級3と予測階級0は「過小評価」(青)と表示されています。

完全階級合致

階級1以上を観測もしくは予測した場合に、観測と予測の階級差が完全に合致する割合を予測適合度とする。

	予測階級0	予測階級1	予測階級2	予測階級3	予測階級4
観測階級0	対象外				
観測階級1					
観測階級2					
観測階級3					
観測階級4					

注: 観測階級0と予測階級0は「対象外」(グレー)と表示されています。観測階級1と予測階級3は「過大評価」(赤)と表示されています。観測階級2と予測階級2は「合致」(黄)と表示されています。観測階級3と予測階級0は「過小評価」(青)と表示されています。