

長周期地震動予測技術検討ワーキング グループからの報告について

検討状況の概要

前回の第6回長周期地震動に関する情報検討会(平成26年3月24日)以降では、7月18日に第4回長周期地震動予測技術検討WGを開催した。ここでは、H25WG報告書で対象とした3式(建築研式、防災科研式、内閣府式)に、第3回WGで青井委員から提案があったMjを用いた絶対速度応答スペクトルの距離減衰式(防災科研式②)を加え、長周期地震動予測に関する検討を行い、以下の結果を得た。

○M6以上の地震や、緊急地震速報の最終報の震源を利用した予測の適合度(観測と予測の階級差 ± 1 に入る割合)を調べた。その結果、長周期地震動階級における観測点ごと・地域ごと(地域内の最大値)の予測に関し、4式とも予測適合度が概ね6割程度以上となり、距離減衰式を用いた長周期地震動の予測技術は実用に耐えるレベルであった。

○なかでも、防災科研式②を用いた予測は、 ± 1 階級合致で8~9割程度の予測適合度を示し、今回行った比較において予測適合度が最も高い距離減衰式である場合が多かった。

○平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震に関し、防災科研式②は緊急地震速報の最終報の震源(Mj8.1)を利用した場合でも、9割以上の予測適合度(± 1 階級合致)を示した。ただし、巨大地震に対する長周期地震動の予測技術については、今後も検討を進める必要がある。

今後の検討方針

○気象庁が行う長周期地震動の予想に関しては、主に防災科研式②を距離減衰式として利用した手法を当面利用する予想手法と位置付け、今後の検討を実施する。

○長周期地震動の到達時刻の予想については、観測点と震源の位置関係や、予報発表のタイミングなどを踏まえて、予報開始までに検討する必要がある。

(WG委員からの意見)

到達時刻の予想の検討の際には、長周期地震動予報のあり方などを踏まえる必要があり、これについては「長周期地震動に関する情報検討会」での審議結果を報告いただきたい。

○距離減衰式の作成に利用していない深発地震などの予測や、緊急地震速報に震源が決定されない新手法を導入した際の予測についても、予報開始までに検討する必要がある。

○精度向上のための中長期的な課題として、巨大地震への対応など、以下のような予測手法高度化についても今後検討を進める必要がある。

- ・データベース方式(巨大地震対応)
- ・観測点補正值の高度化(方位依存性など)
- ・実時間観測データによる予測

第4回長周期地震動予測技術検討ワーキンググループ(平成26年7月18日)提出資料抜粋

「距離減衰式を用いた

長周期地震動予測に関する検討について」

①各距離減衰式を用いた予測の
手法とデータ

検討に用いた応答スペクトルの距離減衰式

建築研式

<海溝型地震>₁₎

$$\log_{10} Saa(T) = a_1(T)M_w + a_2(T)M_w^2 + b_{e \text{ or } w}(T)R - \log_{10}(R^{p(T)} + d(T)10^{0.5M_w}) + c_0(T) + c_{j(e \text{ or } w)}(T)$$

<内陸地震>₂₎

$$\log_{10} Saa(T) = a(T)M_w + b(T)R - \log_{10}(R^{p(T)} + d(T)10^{0.5M_w}) + c_0(T) + c_j(T)$$

防災科研式₃₎

$$\log_{10} Saa(T) = a_1(T)(M_{w1'} - M_{w1})^2 + b_{1k}(T)R + c_{1k}(T) - \log_{10}(R + d_1(T)10^{e_1 M_{w1'}}) + G_d(T) + G_s(T)$$

$$M_{w1'} = \min(M_w, M_{w01}) \quad G_d(T) = p_d(T)\log_{10}[\max(D_{lmin}(T), D)/D_0] \quad G_s(T) = p_s(T)\log_{10}[\min(V_{smax}(T), V_s)/V_0]$$

内閣府式₄₎

$$\log_{10} Svr(T) = a(T)M_w - bR - c\log_{10}R + d(T_{dg}, T) + e(T)$$

防災科研式②₅₎

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

Site Factor : 観測点補正值or深部地盤モデルによる補正 **d** : 最大値の系統的なずれ

Rは断層最短距離(防災科研式②の場合は震央距離)を表す。

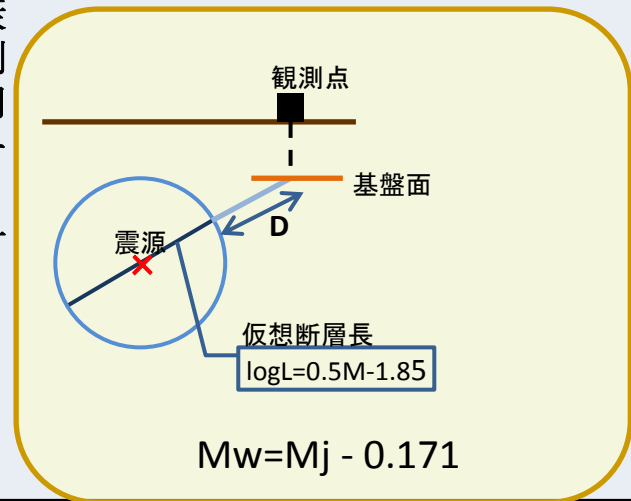
なお、各式の比較を行うため、以後の検討では建築研式および防災科研式では計算式で求めた絶対加速度応答スペクトルSaaから擬似速度応答スペクトルpSvaを算出している。

出典

- 1)佐藤智美、大川出、西川孝夫、佐藤俊明、長周期地震動の経験式の改良と2011年東北地方太平洋沖地震の長周期地震動シミュレーション 日本地震工学会論文集 第12巻、第4号(特集号)、2012
- 2)佐藤智美、大川出、西川孝夫、佐藤俊明、関松太郎、応答スペクトルと位相スペクトルの経験式に基づく想定地震に対する長周期時刻歴波形の作成 日本建築学会構造系論文集 2010年3月号
- 3)Nobuyuki Morikawa, and Hiroyuki Fujiwara, A New Ground Motion Prediction Equation for Japan Applicable up to M9 Mega-Earthquake, Journal of Disaster Research Vol.8, No.5, 2013
- 4)横田崇、池内幸司、矢萩智裕、甲斐田康弘、鈴木晴彦、長周期地震動の距離減衰および増幅特性、日本地震工学会論文集 第11巻、第1号、2011
- 5)長周期地震動予測技術検討ワーキンググループ第3回資料

本検討での各距離減衰式を用いた絶対速度応答スペクトルの計算方法

計算に用いるデータ	計算方法
モーメントマグニチュードの計算	防災科研式②を除いて、各距離減衰式ではモーメントマグニチュード (M_w) が用いられているため、緊急地震速報で推定したマグニチュードおよび気象庁一元化震源の変位マグニチュードを M_j として、緊急地震速報と同様、 $M_w = M_j - 0.171$ により計算。防災科研式②は M_j をそのまま利用。
断層最短距離の計算	防災科研式②を除いて、各距離減衰式では距離として断層最短距離を利用しているため、緊急地震速報と同様に、点震源の周りにマグニチュードの大きさに基づく球面を仮定し、球面から観測点までの最短距離を計算。震源距離が断層長の1/2より近い場合3km以内の観測点については、断層最短距離を3kmと設定する。防災科研式②は震源距離を利用。
長周期地震動階級や周期帯ごとの長周期地震動階級データの最大値の算出に用いた計算値	建築研式と防災科研式：擬似速度応答スペクトル pS_{va} を S_{va} とみなす (pS_{va} は絶対加速度応答スペクトル S_{aa} から算出) 内閣府式：相対速度応答スペクトル S_{vr} を S_{va} とみなす 防災科研式②：計算した S_{va} をそのまま 長周期地震動階級および周期1秒台～7秒台の値は、周期0.2秒ごとの長周期地震動階級データの最大値に基づき計算。
地域の長周期地震動階級の計算	全国を188に区分した地域を用い、地域内の観測点（気象庁および防災科研K-NET, KiK-net)での最大の長周期地震動階級の予測値または周期帯ごとの最大の予測値を地域の値として用いる。



※検討に用いた観測点について

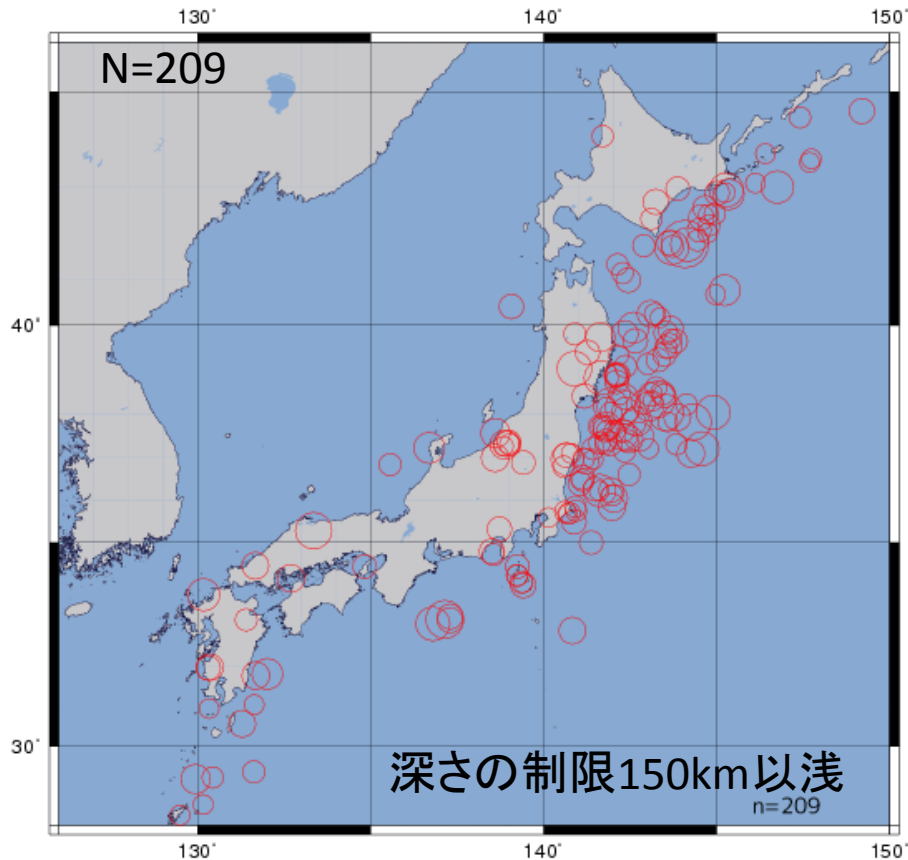
- ・内閣府式では、深部地盤一次固有周期モデルが、沖縄県内および鹿児島県奄美地方については作成されていないため、沖縄県内および鹿児島県奄美地方の観測点は予測対象から除外した。
- ・建築研式では、サイト補正係数が作成出来ない、回帰の対象とした地震を観測していない観測点は予測対象から除外した。

検討に利用した地震について

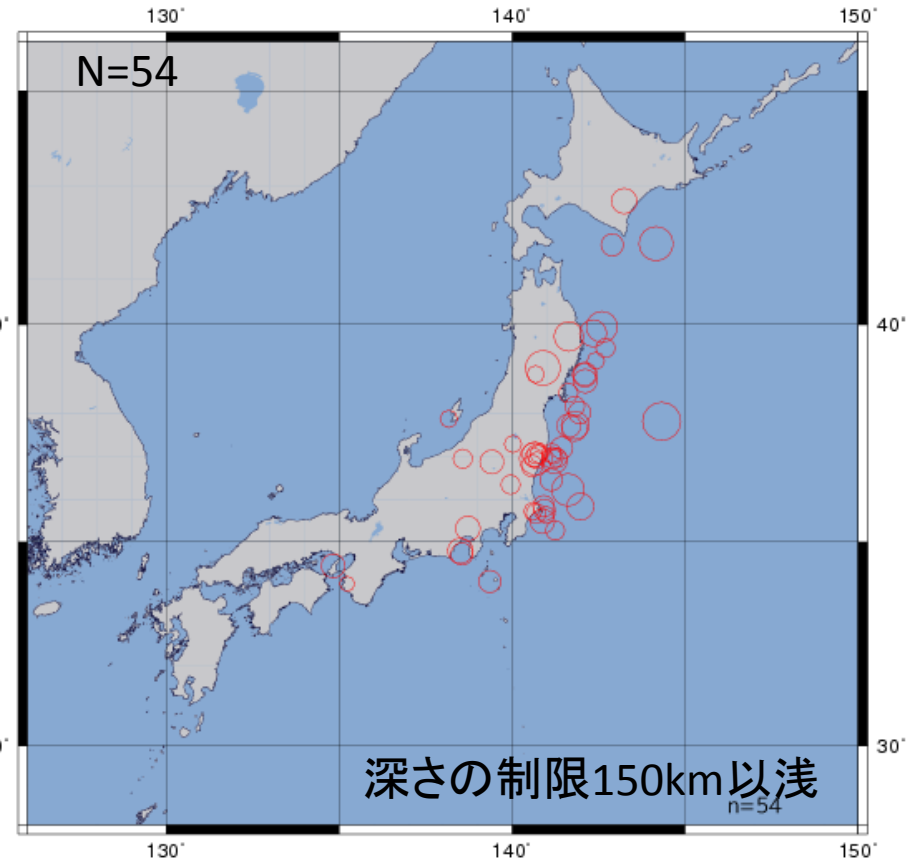
本調査では、下記の2種のデータセットを用いて検討

データセット1: 強震観測報告に掲載された
M6.0以上の地震(1996~2013年)

震源は気象庁が事後に決定している値を利用



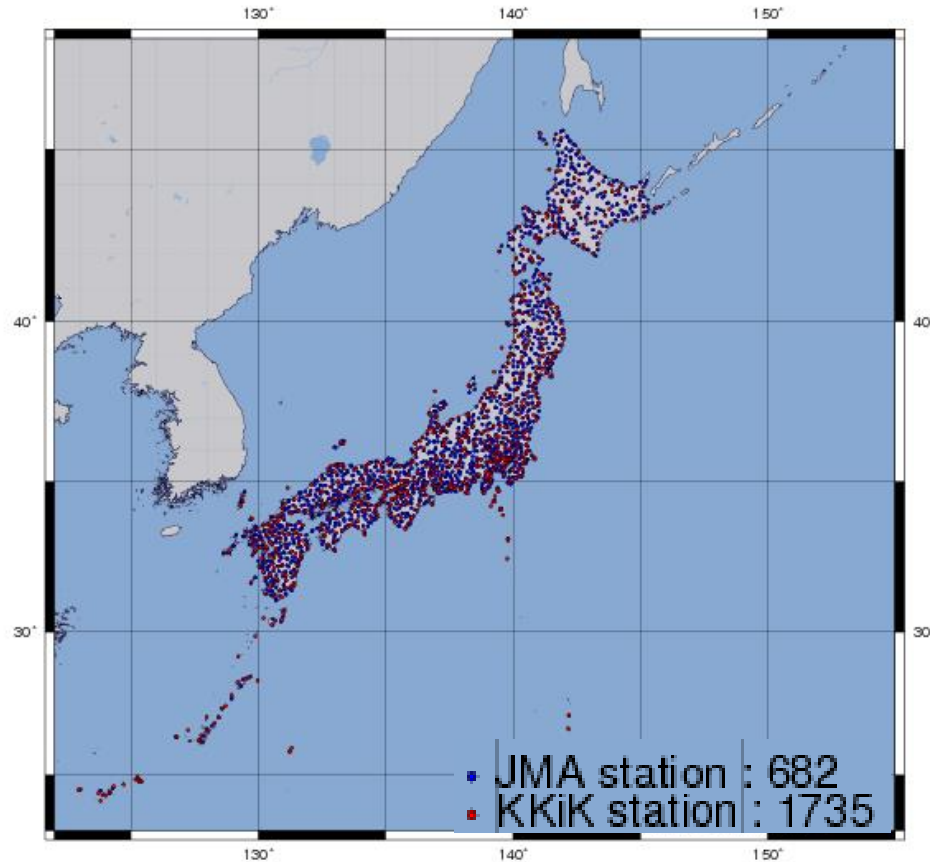
データセット2: 緊急地震速報(警報)を発表した地震(2008~2013年、M5.5以上)



平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震については対象外(データ数に占める割合が多くなるため)
2011/3/11の上記本震以降の地震は連続的に発生しており対象外

検討に利用した観測点について

- ・気象庁震度観測点
- ・防災科学技術研究所の強震観測網(K-NETとKiK-netの地表観測点)



予測適合度の考え方

階級値(固有周期1.6-7.8sのうちの最大S_vに基づく階級)および、各周期ごとの階級データの最大値ともに、①±1階級合致と②完全階級合致の二通りで予測適合度を算出する

①±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			過大評価	
観測階級1					
観測階級2			合致		
観測階級3	過小評価				
観測階級4					

②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			過大評価	
観測階級1					
観測階級2			合致		
観測階級3	過小評価				
観測階級4					

②各距離減衰式を用いた予測の検討

本項の震源データは、データセット1

強震観測報告に掲載されたM6.0以上の地震(1996～2013年)

平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震については対象外

データセット1での顕著な地震での各式ごとの比較

平成16年(2004年)新潟県中越地震 Mj6.8 長周期地震動階級(1.6-7.8sでの最大値)を各観測点でプロット

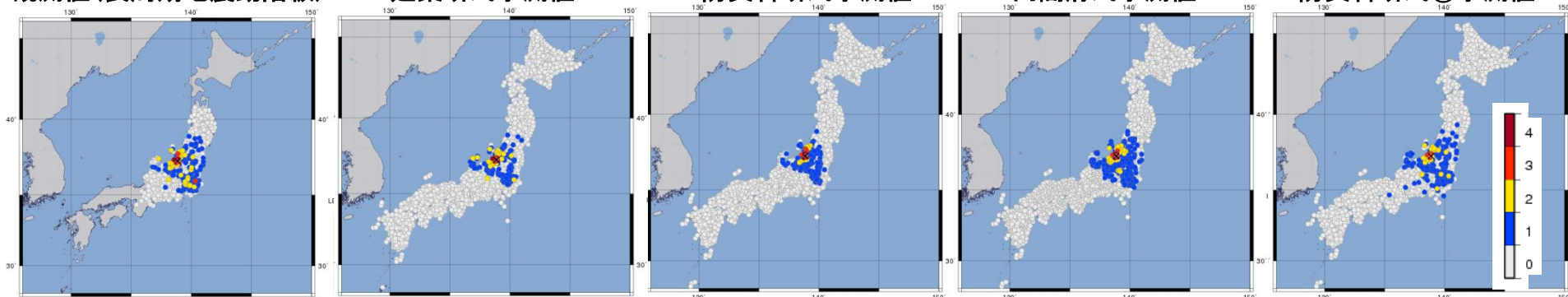
観測値(長周期地震動階級)

建築研式予測値

防災科研式予測値

内閣府式予測値

防災科研式②予測値



建築研式予測-観測

防災科研式予測-観測

内閣府式予測-観測

防災科研式②予測-観測

±1階級合致率: 90.8%
完全階級合致率: 50.0%

89.2%
38.9%

96.1%
45.2%

95.3%
58.1%

注) 図作成上、階級の大きいもの、階級差の絶対値が大きいものが上になるようにプロットしている

建築研式

		予測				
		階級0	階級1	階級2	階級3	階級4
観測	階級0	503	9	1	0	0
	階級1	81	101	1	0	0
	階級2	5	24	21	1	0
	階級3	0	0	2	3	2
	階級4	0	0	0	2	3

防災科研式

		予測				
		階級0	階級1	階級2	階級3	階級4
観測	階級0	487	28	0	0	0
	階級1	88	94	2	0	0
	階級2	4	34	8	3	2
	階級3	1	0	1	1	4
	階級4	0	0	0	1	4

内閣府式

		予測				
		階級0	階級1	階級2	階級3	階級4
観測	階級0	421	93	1	0	0
	階級1	40	132	12	0	0
	階級2	0	30	17	3	1
	階級3	1	0	1	1	4
	階級4	0	0	0	1	4

防災科研式②

		予測				
		階級0	階級1	階級2	階級3	階級4
観測	階級0	461	54	0	0	0
	階級1	34	149	1	0	0
	階級2	2	25	23	1	0
	階級3	0	0	4	3	0
	階級4	0	0	1	4	0

データセット1を顕著な地震での各式ごとの比較

平成15年(2003年)十勝沖地震 Mj8.0

長周期地震動階級(1.6-7.8sでの最大値)を各観測点でプロット

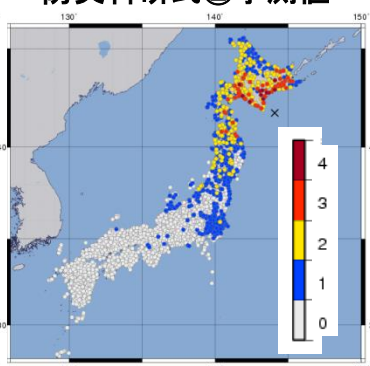
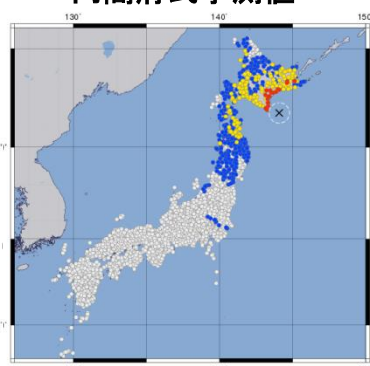
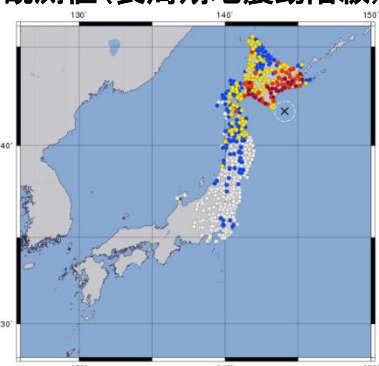
観測値(長周期地震動階級)

建築研式予測値

防災科研式予測値

内閣府式予測値

防災科研式②予測値

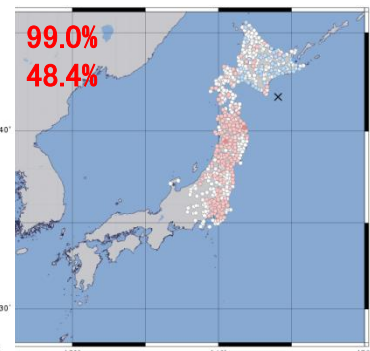
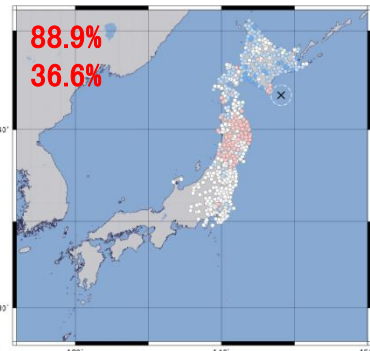
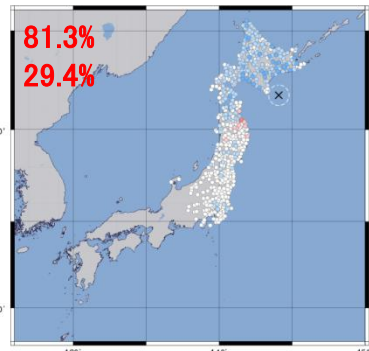
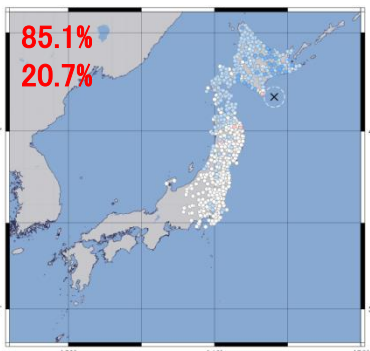
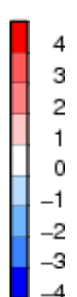


建築研式予測-観測

防災科研式予測-観測

内閣府式予測-観測

防災科研式②予測-観測



建築研式

		予測				
		階級0	階級1	階級2	階級3	階級4
観測	階級0	308	4	0	0	0
	階級1	110	48	0	0	0
	階級2	8	110	34	1	0
	階級3	0	9	52	2	0
	階級4	0	0	20	12	1

防災科研式

		予測				
		階級0	階級1	階級2	階級3	階級4
観測	階級0	301	10	2	0	0
	階級1	62	96	3	0	0
	階級2	7	120	29	0	0
	階級3	0	10	53	0	0
	階級4	0	0	29	4	0

内閣府式

		予測				
		階級0	階級1	階級2	階級3	階級4
観測	階級0	226	87	0	0	0
	階級1	32	120	9	0	0
	階級2	5	89	58	4	0
	階級3	0	2	56	5	0
	階級4	0	0	22	11	0

防災科研式②

		予測				
		階級0	階級1	階級2	階級3	階級4
観測	階級0	145	166	2	0	0
	階級1	0	110	51	0	0
	階級2	0	18	123	15	0
	階級3	0	0	28	35	0
	階級4	0	0	1	19	13

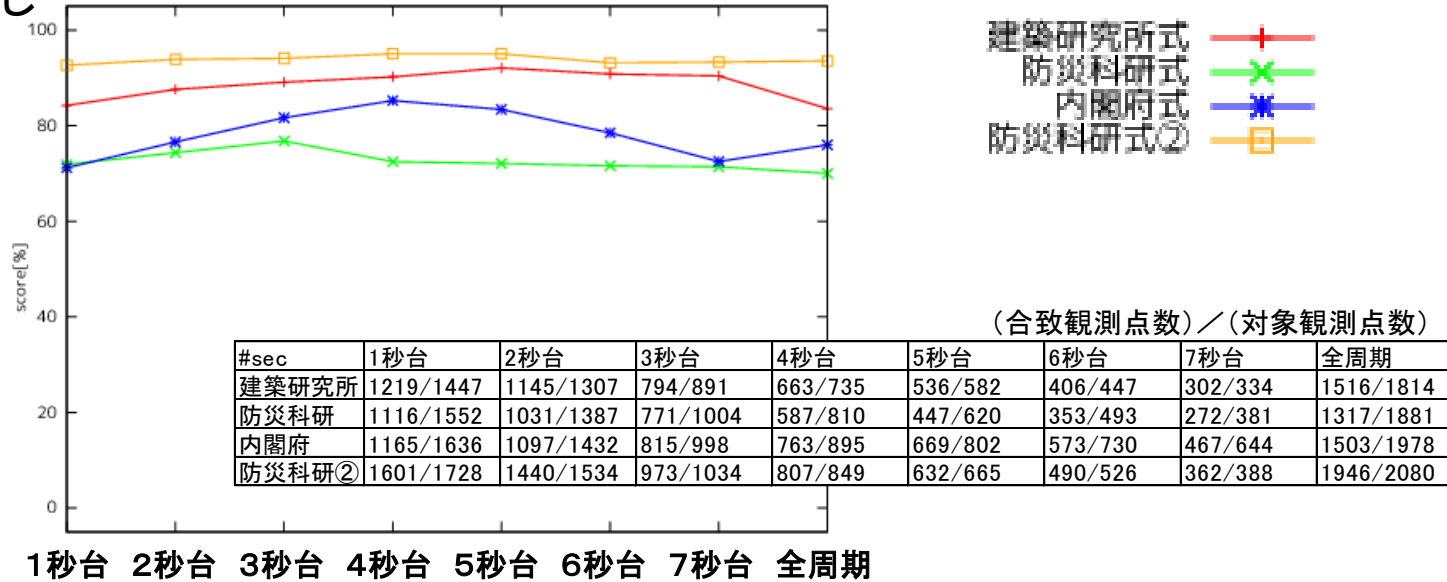
データセット1を利用した長周期地震動予測の検討

予測適合度: ±1階級合致
震源データ: データセット1
震度による制限: なし

図中の「全周期」とは、1.6-7.8秒の周期ごとの長周期地震動階級データの最大値である長周期地震動階級を示す

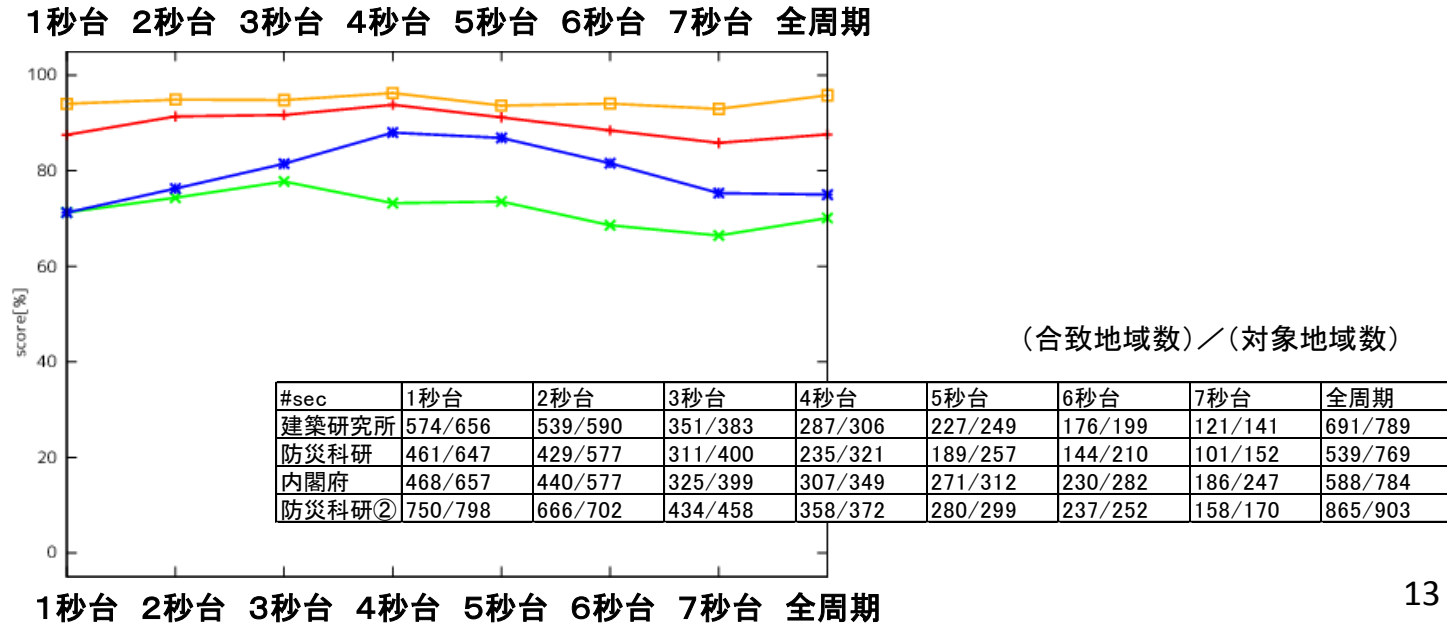
全て(観測点単位)

予測適合度(%)



全て(地域単位)

予測適合度(%)



データセット1を利用した長周期地震動予測の検討

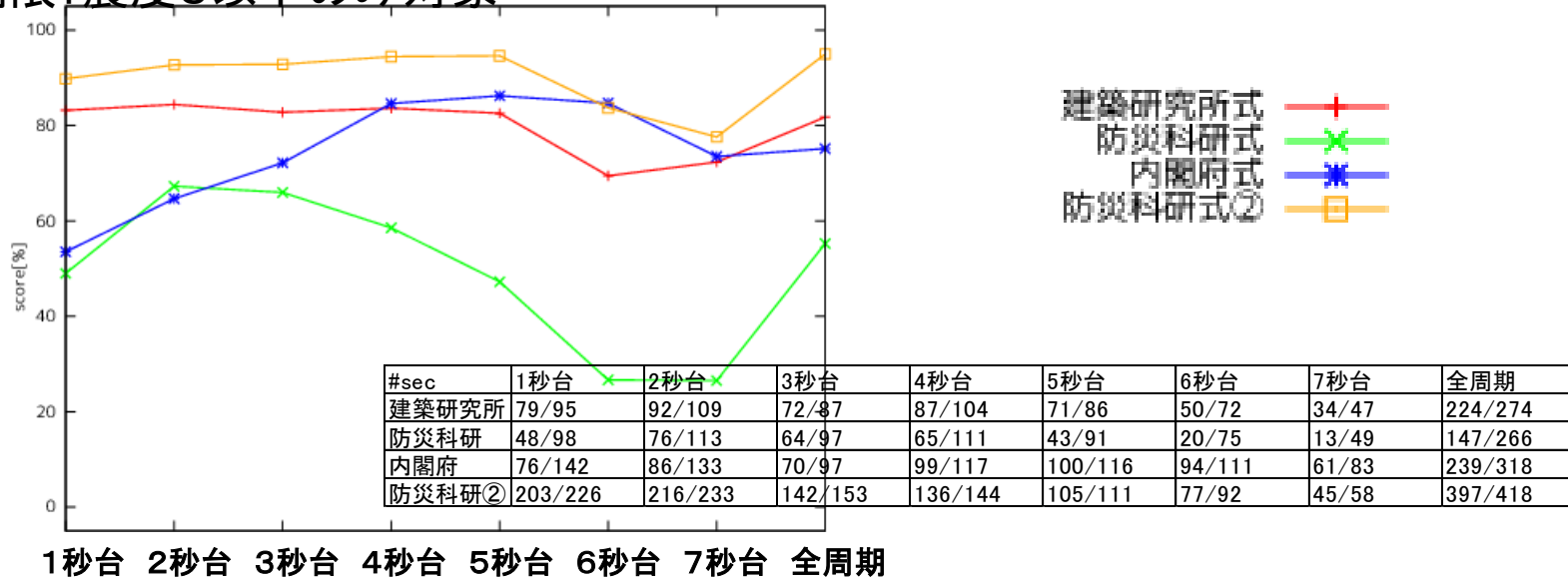
予測適合度: ±1階級合致

震源データ: データセット1

震度による制限: 震度3以下のみ対象

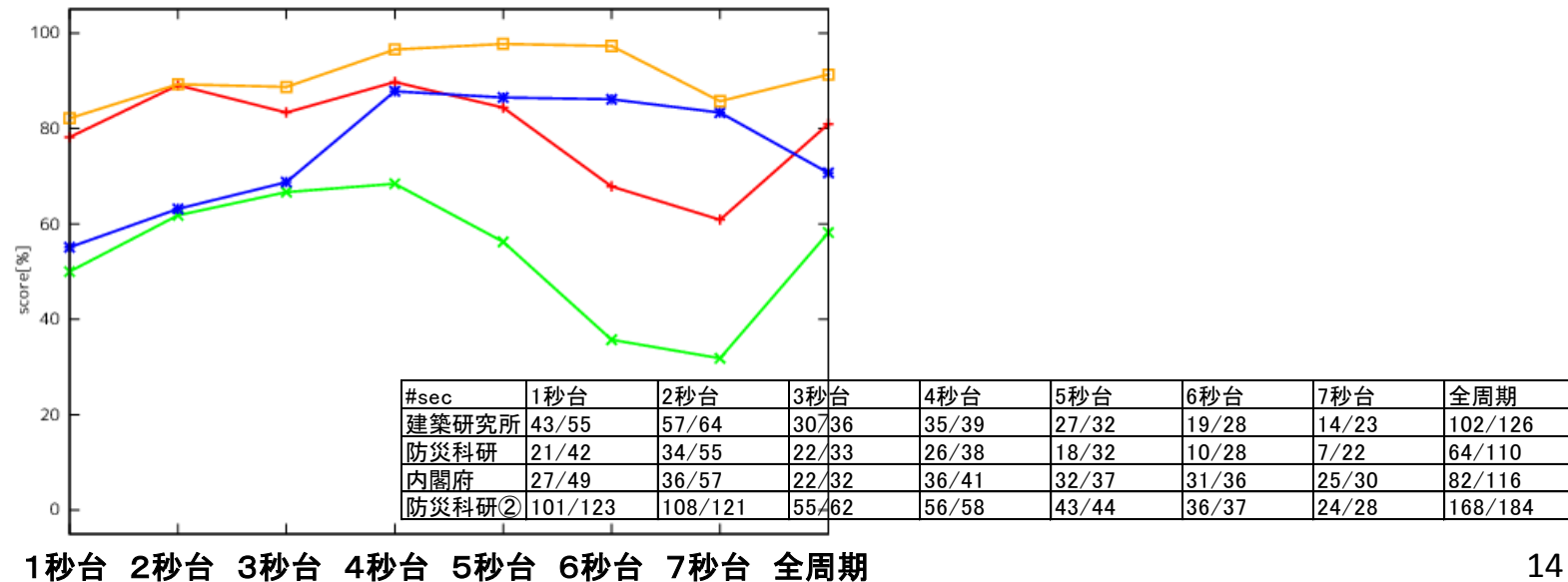
震度3以下
(観測点単位)

予測適合度(%)



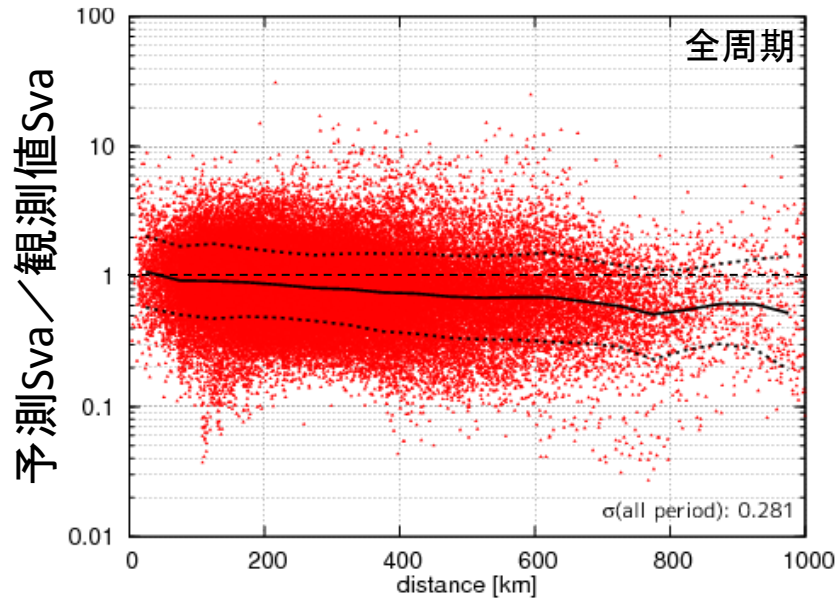
地域最大
震度3以下
(地域単位)

予測適合度(%)

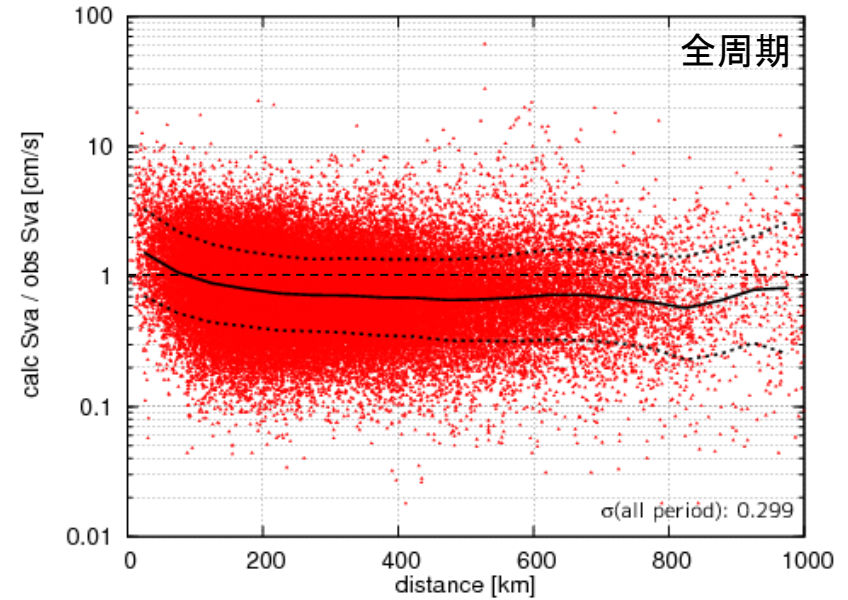


データセット1を利用した長周期地震動予測の震源距離依存性

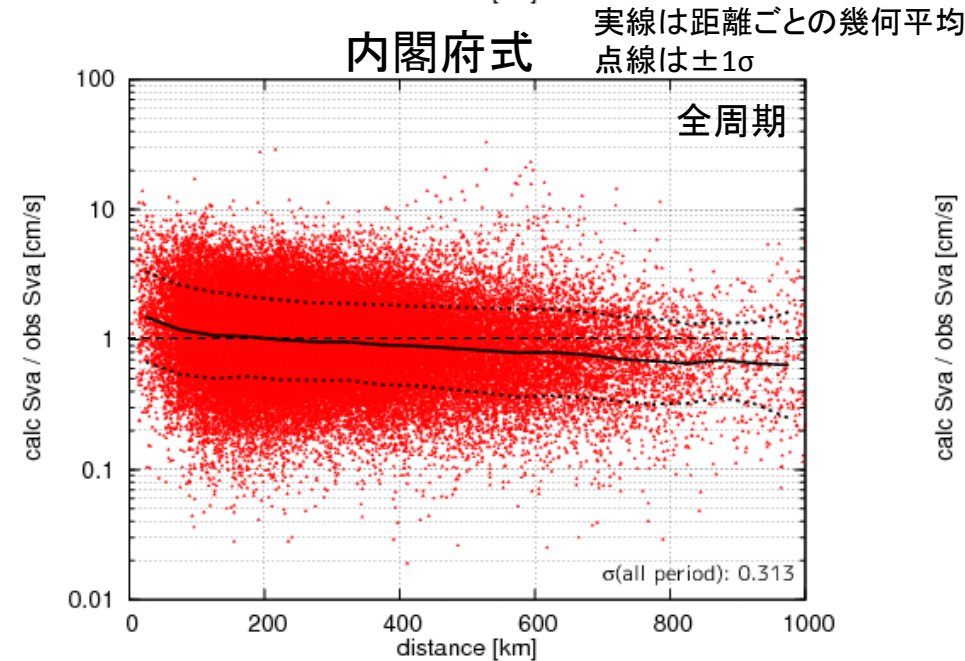
建築研式



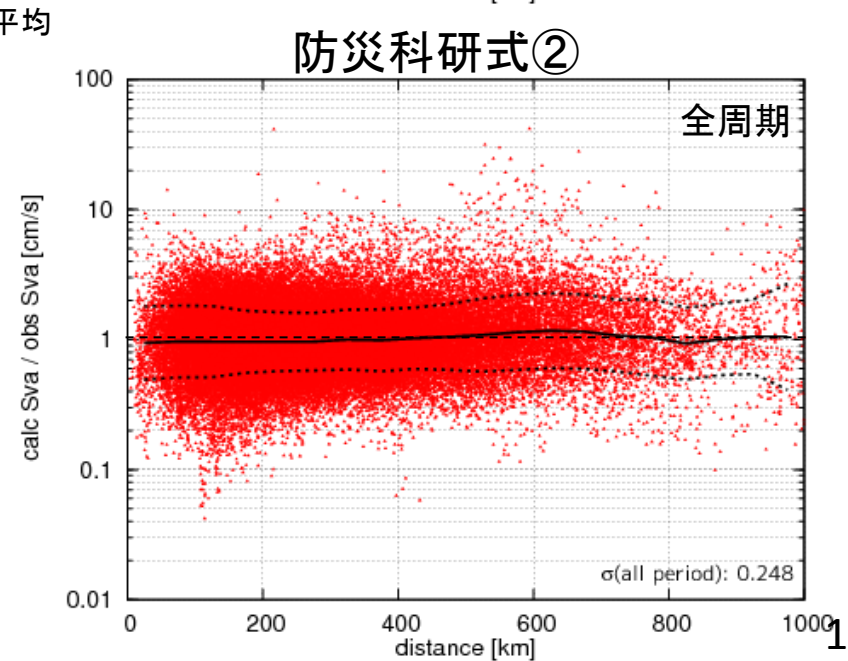
防災科研式



内閣府式



防災科研式②



各距離減衰式を用いた予測の検討のまとめ

- ・ 1996年以降に発生した強震観測報告に掲載されたM6以上の地震の震源を利用して、予測と観測の適合度を調べた。
- ・ 周期帯ごとの長周期地震動階級データの最大値や長周期地震動階級（全周期（1.6-7.8s）の最大値に対する階級）における観測点ごと・地域ごと（地域内の最大値）の予測に関し、4式とも予測適合度（±1階級合致）が概ね6割以上となった。
- ・ なかでも、防災科研式②を用いた予測は、±1階級合致で8～9割程度の予測適合度を示し、今回行った比較において予測適合度が最も高い距離減衰式である場合が多かった。

防災科研式②の予測適合度が高い理由

- ・**防災科研式②**は、長周期地震動階級を算出する際の観測量である絶対速度応答スペクトルを直接算出する唯一の距離減衰式であった点
- ・**防災科研式②以外の式**は、断層面からの断層最短距離や M_w を利用した距離減衰式であった。そのため、本調査は即時的予測のための検討であることから、 M_j から M_w を簡易的に推測し、矩形断層ではなく球震源から断層最短距離を計算している。一方、**防災科研式②**は、緊急地震速報処理において直接推定されている、点震源(からの震源距離)と M_j を直接利用した唯一の距離減衰式であった点

留意事項

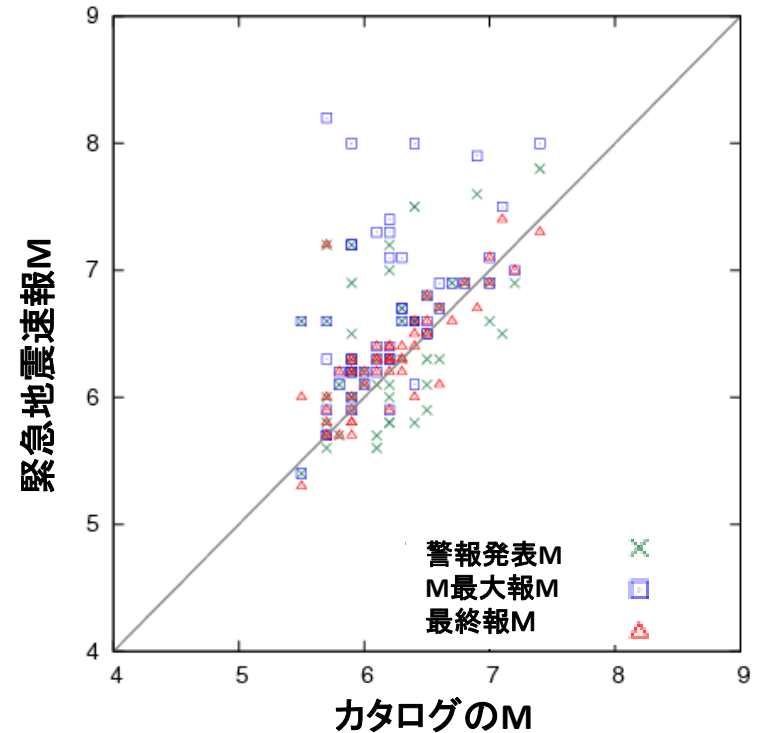
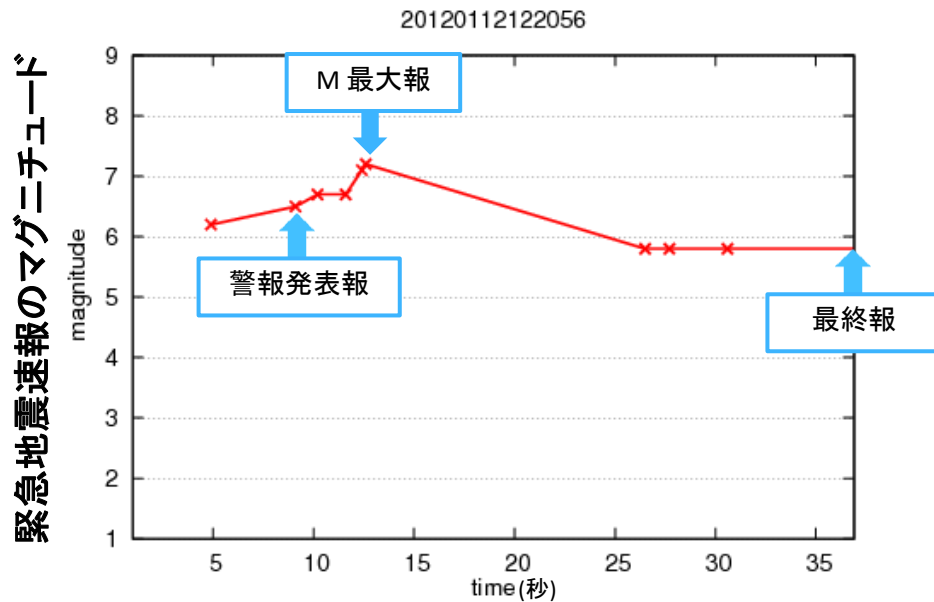
今回の調査は、気象庁による長周期地震動階級の予測のための、緊急地震速報の段階で得られる震源(破壊開始点)や M_j のみを利用した評価であり、防災科研式②を除いて、 M_w を M_j から簡易的に推定している点、矩形断層ではなく球震源を利用している点、対象とする震源距離を超えて利用している点、疑似絶対速度応答($pSva$)や相対速度応答(Svr)を絶対速度応答(Sva)と同一とみなしている点など、各式の作成者が想定する範囲外の利用をしており、その距離減衰式の一般的な評価をしているわけではないことに留意する必要がある

③緊急地震速報の各報を用いた検討

本項の震源データはデータセット2
(緊急地震速報(警報)を公表した地震(M5.5以上))

データセット2を利用した長周期地震動予測の検討

緊急地震速報の震源を利用しての検討は、一連の緊急地震速報で、警報が発表された報、M最大となった報、最終報を選び合致率の比較を行った。



検討に用いた一連の緊急地震速報の報の取り方

緊急地震速報の各報のMと
カタログ※のMの比較

※カタログとは気象庁が事後に決定している震源データを示す

平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震については検討の対象外とする。
(データ数に占める割合が多いため)

データセット2を利用した長周期地震動予測の検討

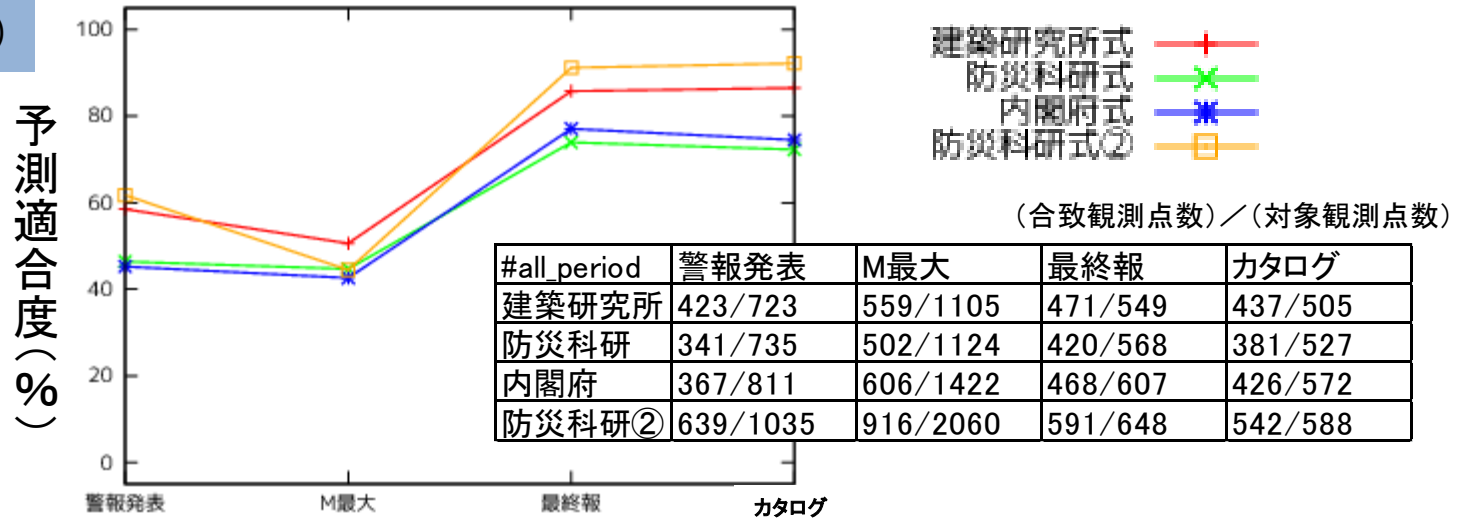
予測適合度: ±1階級合致

震源データ: データセット2 (緊急地震速報)

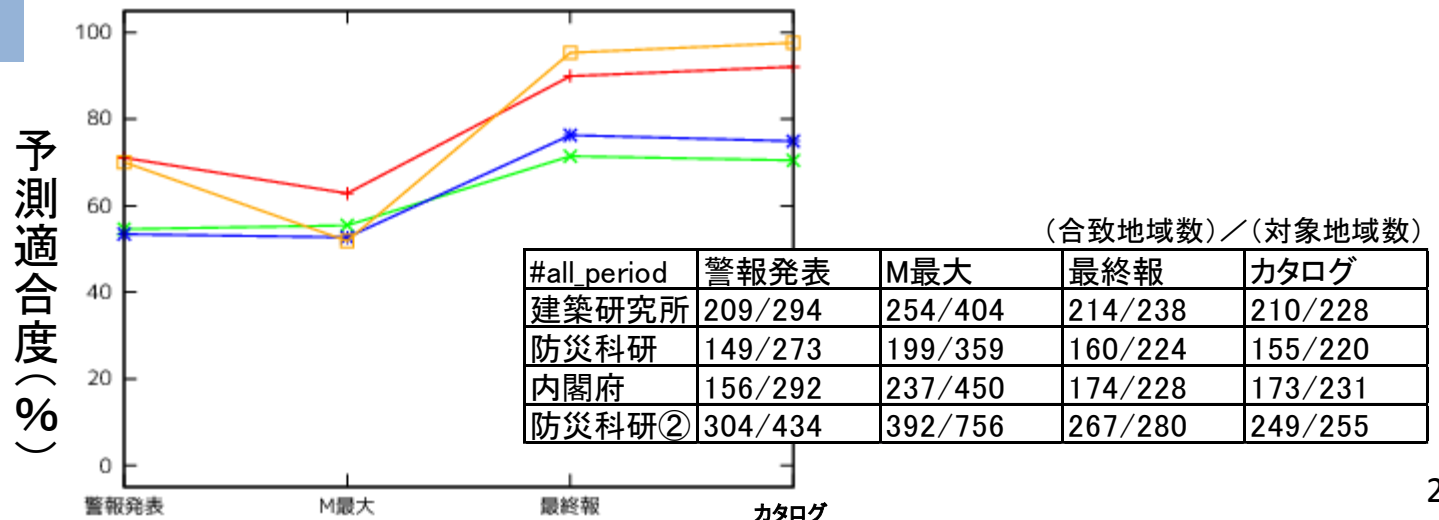
震度による制限: なし

対象周期帯: 長周期地震動階級 (全周期 (1.6-7.8s) の最大値に対する階級)

全て (観測点単位)



全て (地域単位)



データセット2を利用した長周期地震動予測の検討

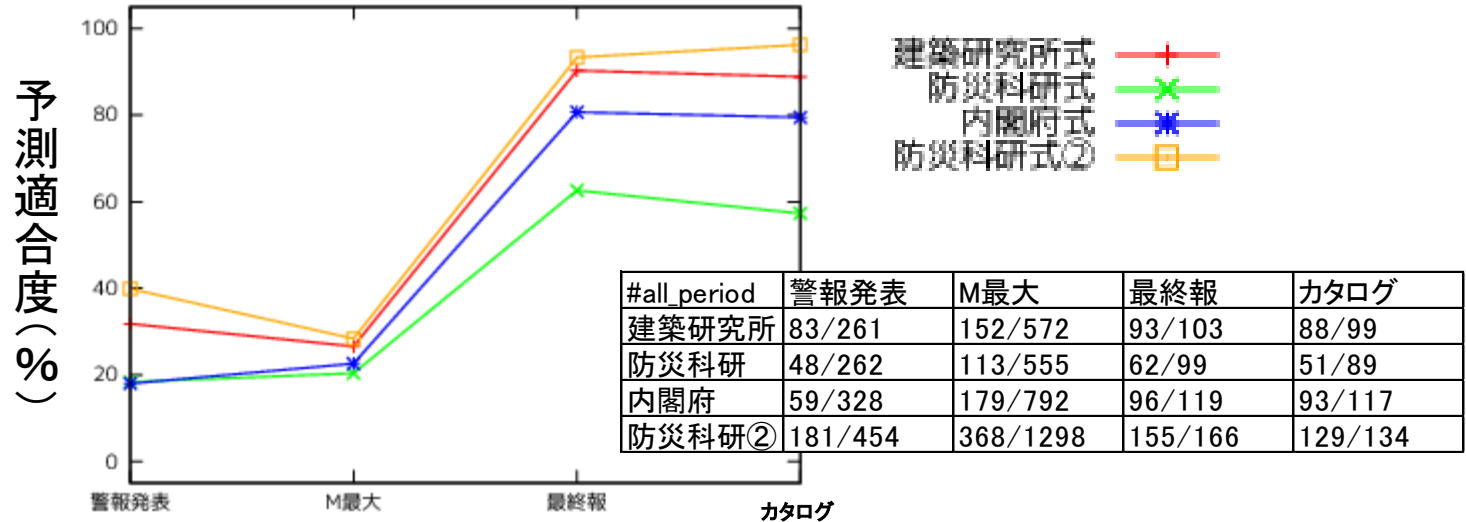
予測適合度: ±1階級合致

震源データ: データセット2 (緊急地震速報)

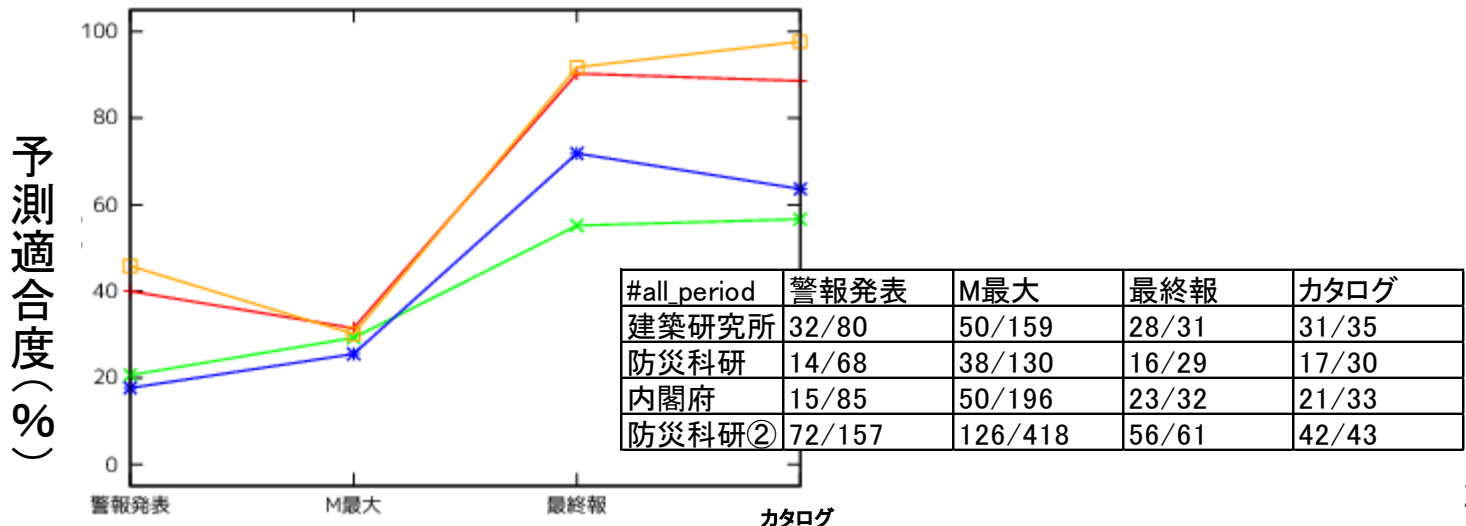
震度による制限: 震度3以下のみ対象

対象周期帯: 長周期地震動階級(全周期(1.6-7.8s)の最大値に対する階級)

震度3以下
(観測点単位)



地域最大
震度3以下
(地域単位)



緊急地震速報の各報を用いた検討のまとめ

- ・緊急地震速報(警報)を発表したM5.5以上の地震について、警報が発表された報、M最大となった報、最終報のそれぞれの震源を利用して、予測と観測の適合度を調べた。
- ・最終報の震源を利用した場合の長周期地震動階級(全周期(1.6-7.8s)の最大値に対する階級)における観測点ごと・地域ごと(地域内の最大値)の予測に関し、4式とも予測適合度(±1階級合致)が6割程度以上となった。
- ・なかでも、防災科研式②を用いた予測は、±1階級合致で9割以上の予測適合度を示し、今回行った比較において予測適合度が最も高い距離減衰式である場合が多かった。
- ・警報が発表された報やM最大となった報の震源を利用した場合、4式とも予測適合度は最終報を利用した場合と比較し、低下することがわかった。

④平成23年(2011年)東北地方 太平洋沖地震の検討

平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震の階級の予測

Mj8.4※とした場合

長周期地震動階級(1.6-7.8sでの最大値)を各観測点でプロット

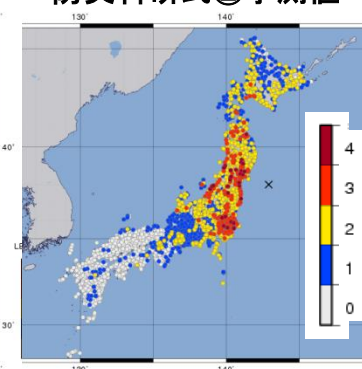
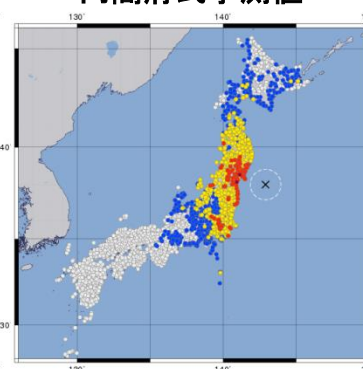
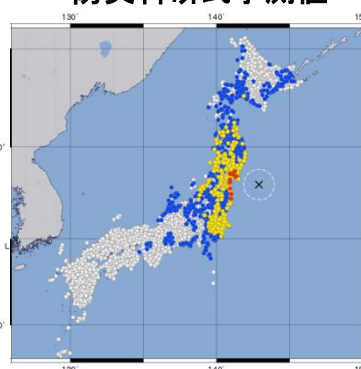
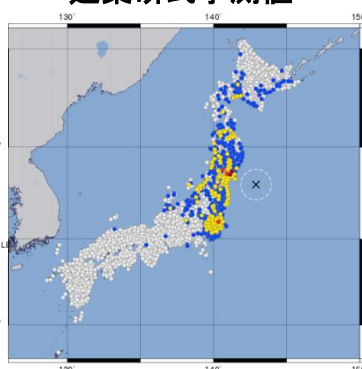
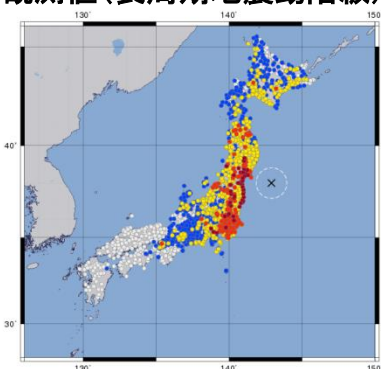
観測値(長周期地震動階級)

建築研式予測値

防災科研式予測値

内閣府式予測値

防災科研式②予測値

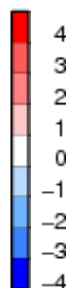


建築研式予測-観測

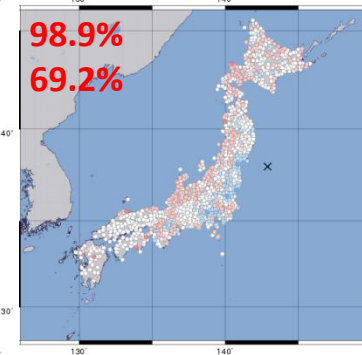
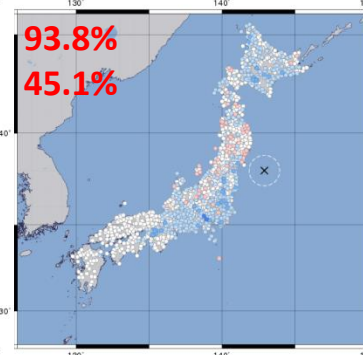
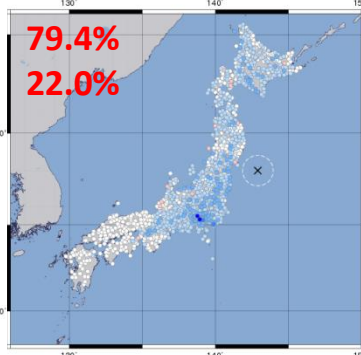
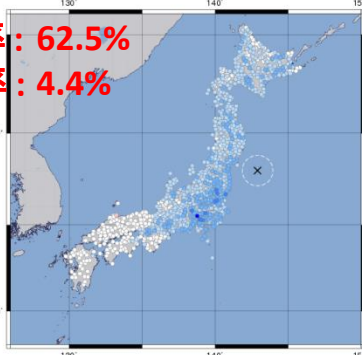
防災科研式予測-観測

内閣府式予測-観測

防災科研式②予測-観測



±1階級合致率: 62.5%
完全階級合致率: 4.4%



建築研式

		予測				
		階級0	階級1	階級2	階級3	階級4
観測	階級0	316	1	0	0	0
	階級1	504	21	0	0	0
	階級2	186	317	34	0	0
	階級3	3	57	125	0	0
	階級4	1	7	35	4	2

防災科研式

		予測				
		階級0	階級1	階級2	階級3	階級4
観測	階級0	336	9	0	0	0
	階級1	367	178	3	0	0
	階級2	90	335	114	1	0
	階級3	1	31	152	1	0
	階級4	3	1	34	11	0

内閣府式

		予測				
		階級0	階級1	階級2	階級3	階級4
観測	階級0	332	13	0	0	0
	階級1	236	273	39	0	0
	階級2	23	215	276	26	0
	階級3	0	8	126	51	0
	階級4	0	3	16	28	2

防災科研式②

		予測				
		階級0	階級1	階級2	階級3	階級4
観測	階級0	243	96	5	0	0
	階級1	19	398	129	1	0
	階級2	0	51	441	48	0
	階級3	0	1	43	127	14
	階級4	0	0	3	28	18

※カタログに掲載されている、最大変位振幅から算出したマグニチュード

平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震の階級の予測

Mw9.0とした場合

長周期地震動階級(1.6-7.8sでの最大値)を各観測点でプロット

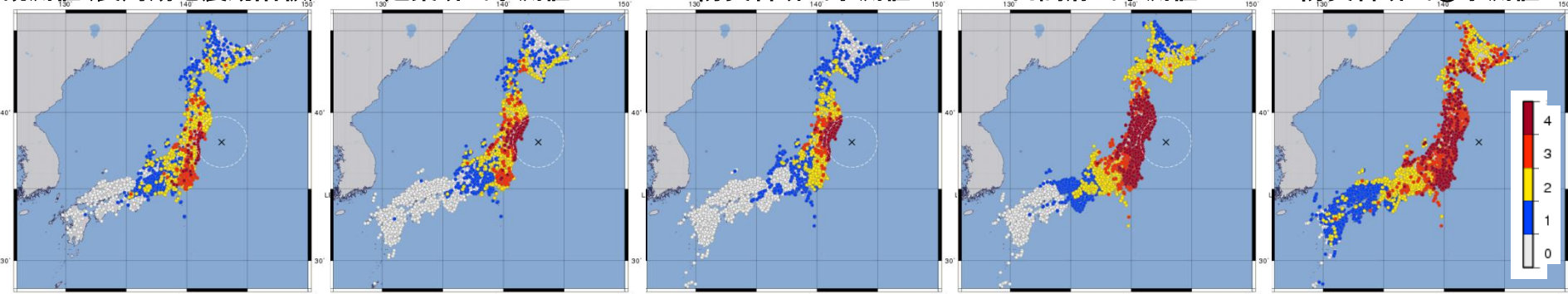
観測値(長周期地震動階級)

建築研式予測値

防災科研式予測値

内閣府式予測値

防災科研式②予測値

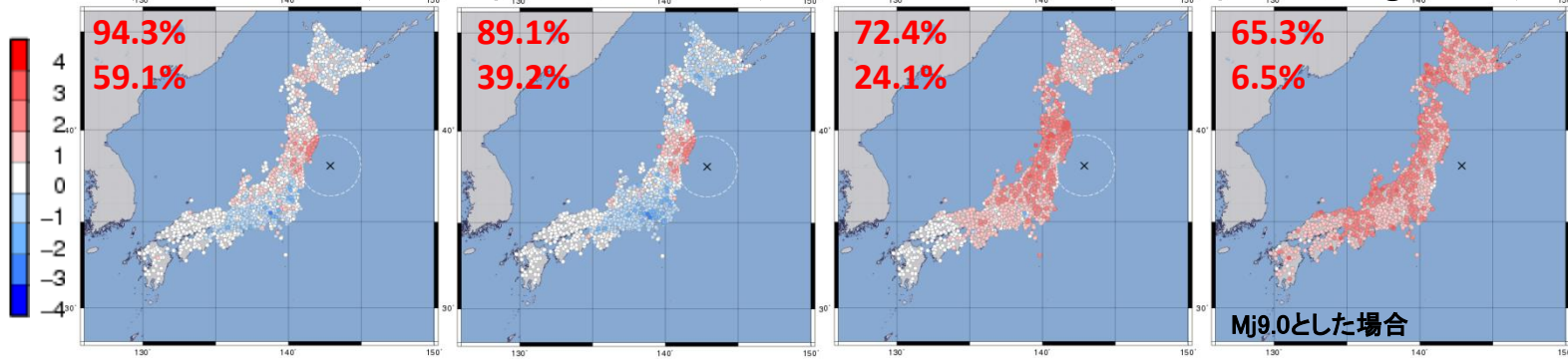


建築研式予測-観測

防災科研式予測-観測

内閣府式予測-観測

防災科研式②予測-観測



建築研式

		予測				
		階級0	階級1	階級2	階級3	階級4
観測	階級0	291	26	0	0	0
	階級1	135	324	66	0	0
	階級2	2	112	323	66	34
	階級3	0	3	43	102	37
	階級4	0	1	8	8	32

防災科研式

		予測				
		階級0	階級1	階級2	階級3	階級4
観測	階級0	322	23	0	0	0
	階級1	260	265	21	2	0
	階級2	21	231	205	47	36
	階級3	0	15	118	29	23
	階級4	0	3	10	8	28

内閣府式

		予測				
		階級0	階級1	階級2	階級3	階級4
観測	階級0	128	188	29	0	0
	階級1	0	126	342	62	18
	階級2	0	3	181	128	228
	階級3	0	0	2	19	164
	階級4	0	0	1	3	45

防災科研式②

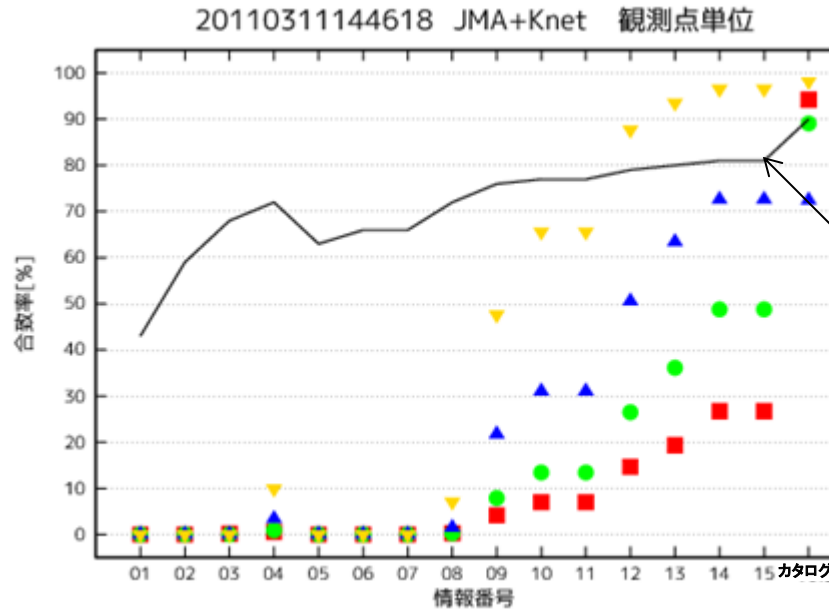
		予測				
		階級0	階級1	階級2	階級3	階級4
観測	階級0	10	181	146	7	0
	階級1	0	9	384	144	10
	階級2	0	0	40	298	202
	階級3	0	0	1	9	175
	階級4	0	0	0	0	49

平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震の検討

緊急地震速報の情報ごとの予測適合度

観測点単位

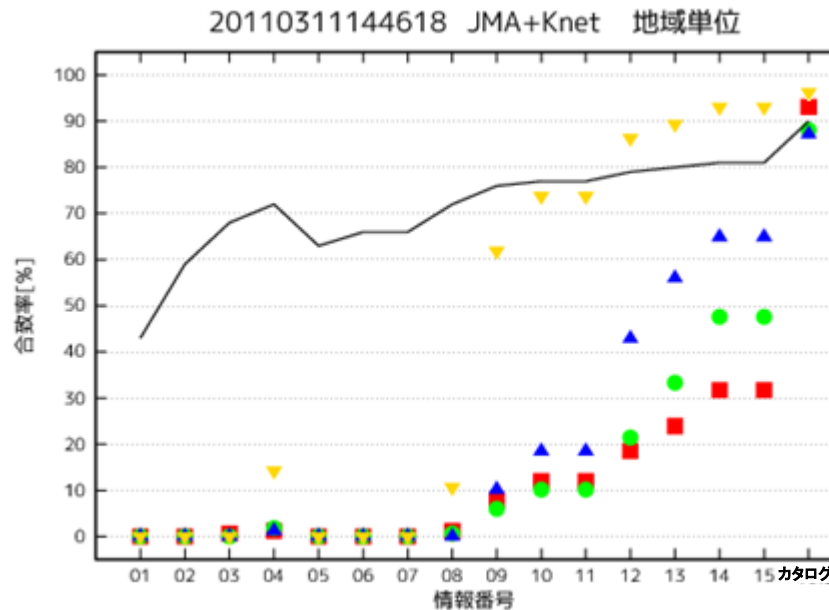
予測適合度(%)



第15報(最終報)のMjは8.1

地域単位

予測適合度(%)



予測適合度: ±1階級合致

対象周期帯: 長周期地震動階級
(全周期(1.6-7.8s)の最大値に対する階級)

横軸の「カタログ」のMは建築研式、
防災研式、内閣府式はMw9.0。
防災研式②はMj8.4

平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震の検討のまとめ

- ・平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震に関しても、最大変位振幅から求めたMj8.4の場合について、予測適合度(±1階級合致)を調べたところ、防災科研式②が4式の中で99%程度と最も高い予測適合度を示した。
- ・緊急地震速報の最終報の震源(Mj8.1)を利用した場合でも、防災科研式②が9割以上の予測適合度(±1階級合致)を示した。
- ・震源位置を気象庁カタログの震源に固定し、利用するMjだけを変化させた場合の予測適合度の比較から、Mjの推定の正確さが予測結果に影響を与えることがわかった
- ・震源位置(破壊開始点)を、震源域内の強震動生成式的位置と仮定した場合、完全階級合致の予測適合度は真の震源(初期震源)からの距離に従って低下する傾向にあった。