

2-3 統計的な津波減衰予測手法の 性能検証

気象庁 地震火山部 地震火山技術・調査課
気象庁 地震火山部 地震津波監視課
気象研究所 地震津波研究部

津波減衰予測の必要性

- ・ 津波の減衰予測は、津波警報・注意報の解除を見通すうえで重要な技術
- ・ 津波の収束までに長時間かかる遠地地震や巨大地震では特に必要
 - 2010年チリ中部沿岸の地震(Mw 8.8) : 警報発表 2/28 09:33 → 全解除 3/01 10:15 (約24時間)
 - 2011年東北地方太平洋沖地震(Mw 9.0) : 警報発表 3/11 14:49 → 全解除 3/13 17:58 (約51時間)

前回までの津波予測技術に関する勉強会

統計的な津波減衰予測手法を複数開発・紹介してきた。

今回

現在整備中のシステムへの実装に向けて、各減衰予測手法の性能比較を行った。

	対象地震	統計的な津波減衰予測手法
近地地震	<ul style="list-style-type: none">・ 2011年東北地方太平洋沖地震(Mw 9.0)・ 2003年十勝沖地震(Mw 8.0)	<ul style="list-style-type: none">・ 1べき関数+最大値 (林, 2010, 海工集)・ 2べき関数 (気象庁, 2019)・ 1べき関数+曲線近似 (気象庁, 2020)
遠地地震	<ul style="list-style-type: none">・ 2010年チリ中部沿岸の地震(Mw 8.8)・ 1960年チリ地震(Mw 9.5)	<ul style="list-style-type: none">・ 1指数関数+最大値 (林, 2010, 海工集)・ 3指数関数+Mw (気象庁, 2019)・ 3指数関数+最大値 (気象庁, 2020)・ 3指数関数+曲線近似 (今回追加提案)

(掲載したMw: 1960年チリ地震についてはKanamori and Anderson (1975), その他は気象庁による)

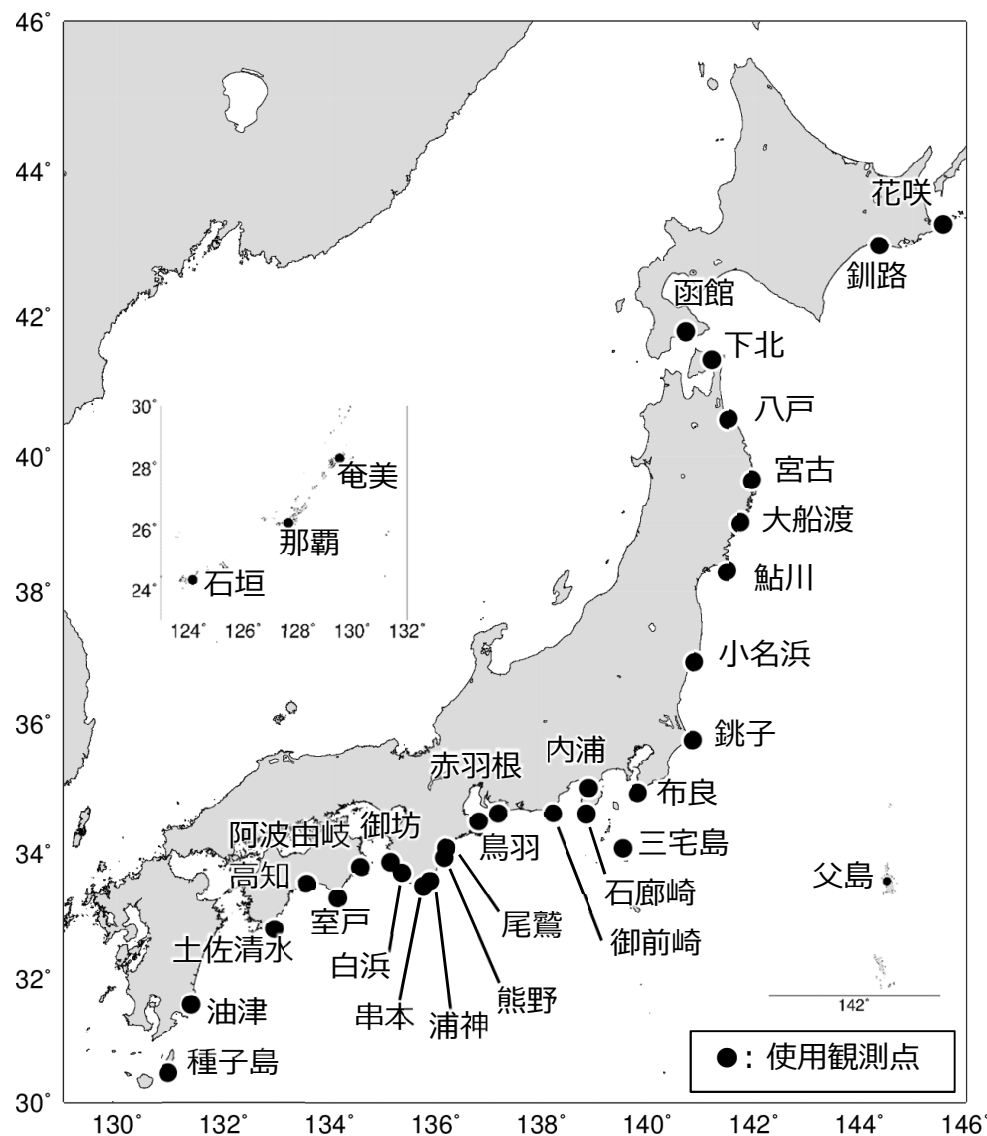
使用データ

気象庁検潮所のうち、太平洋沿岸に位置する33地点における15秒値の潮位観測デジタルデータを用いた(右図の●印)

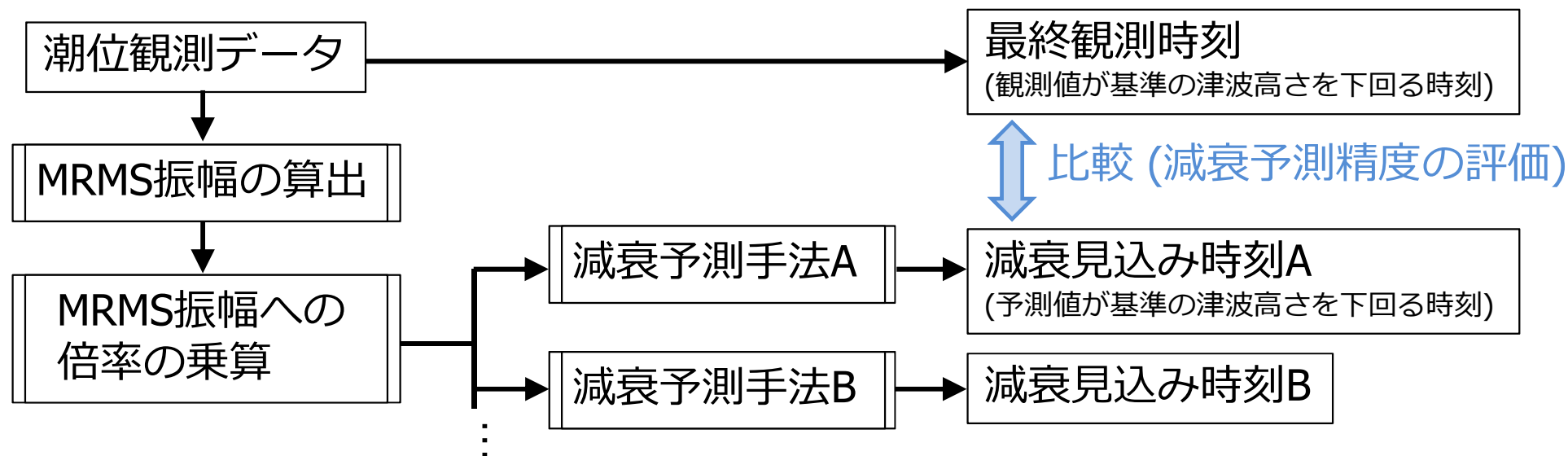
1960年チリ地震については、花咲、函館、宮古、小名浜、高知の5地点の潮位紙記録から1分読み取り値を作成して使用した。

なお、対象とする地震によっては、津波が認められない、又はデータが無い(検潮所の津波被災等による)観測点がある。今回、各地震の解析で使用した観測点数は下表の通り。

	使用観測点数
2011年東北地方太平洋沖地震	29
2003年十勝沖地震	9
2010年チリ中部沿岸の地震	33
1960年チリ地震	5



津波減衰予測実験の手順



MRMS振幅の算出

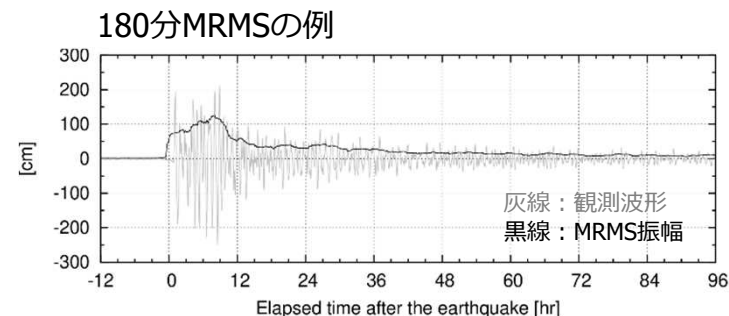
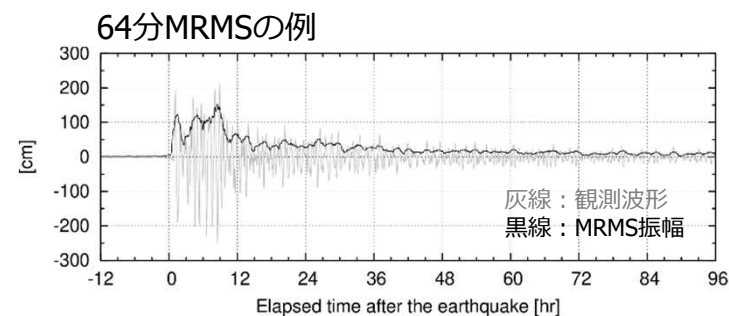
潮汐補正済みの潮位観測データから
二乗和平均の平方根の時間変化
MRMS (Moving Root Mean Squared) 振幅を算出

MRMS算出時の時間幅

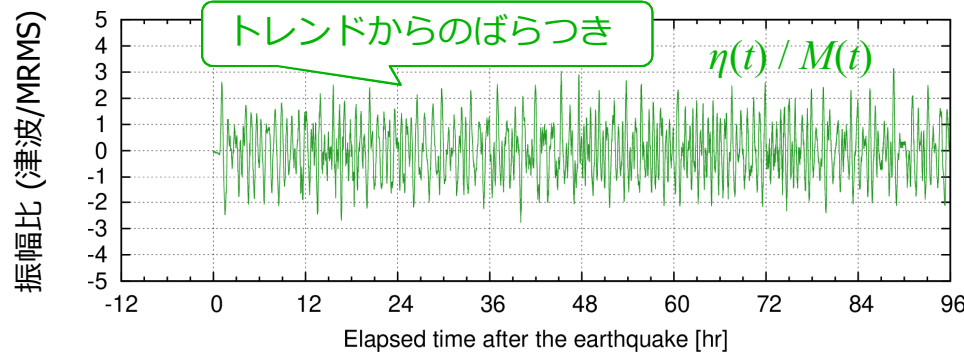
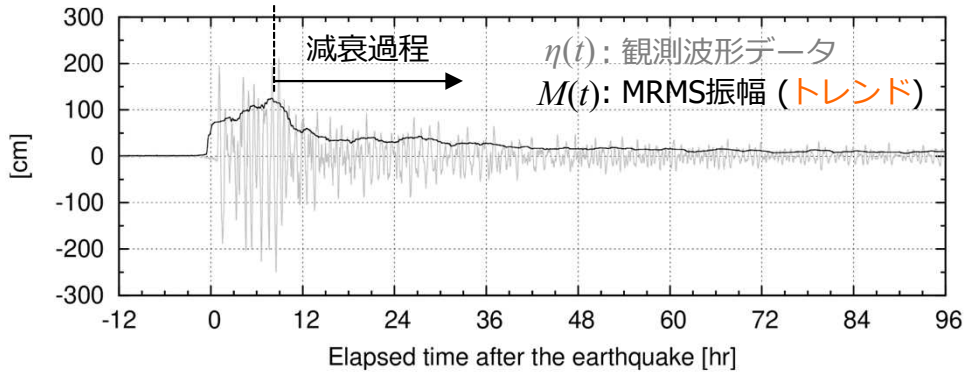
減衰予測手法ごとに異なる

- ・ 64分: 原著論文の減衰予測手法を再現
- ・ 180分: 滑らかな関数への近似を支援

本日の紹介内容のほとんどは180分を採用

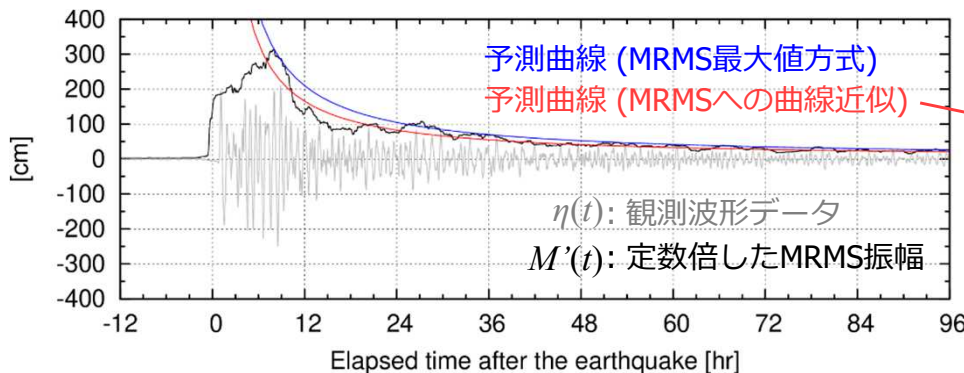


津波減衰過程の表現 と それに基づく統計的な減衰予測手法



倍率の決め方 (従来)

ばらつきの頻度分布に基づき倍率を算出
 (減衰過程の津波の振幅が、当該倍率を乗じたMRMS振幅を超えるのは稀)



津波減衰過程の表現 (林・他, 2009, 2010, 海工集)

	意味	観測データ
トレンド	津波の振幅の平均的な時間変化傾向	MRMS振幅の時系列
ばらつき	トレンドからのばらつき	振幅比(津波/MRMS)

以下の各関数で概ね近似可能 (林・他, 2011, 海工集)

近地津波: べき関数 $M(t) = k t^\alpha$

遠地津波: 指数関数 $M(t) = k e^{-t/\tau}$

α : 日本周辺の近地津波でほぼ共通した値 ($\alpha=-1$)

τ : 減衰時定数 (日本の太平洋沿岸検潮所でほぼ共通の値)

統計的な減衰予測手法 (次ページから紹介)

トレンドの近似関数と、ある倍率(定数)を乗じたMRMS振幅観測値を活用する
 (活用方法の違いで、複数種類の予測手法がある)

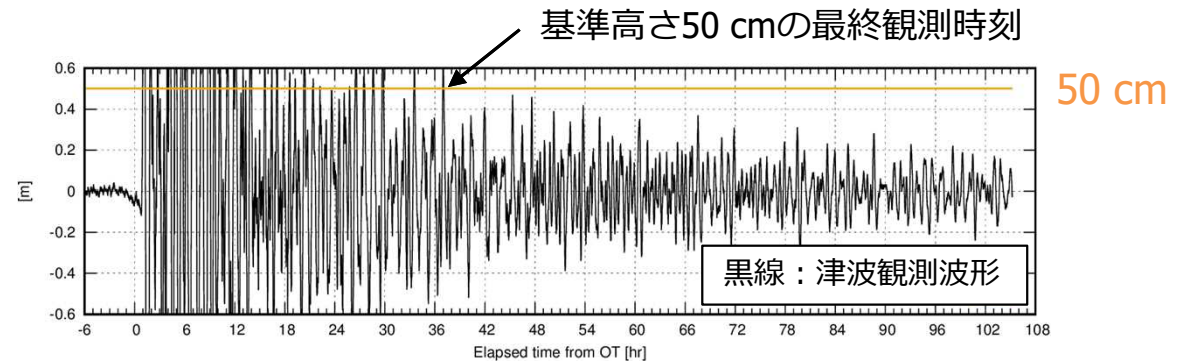
倍率の決め方 (今回)

MRMS振幅の概ね中心を通る曲線が推定される
 → 従来の決め方による倍率では過小の可能性 (左図)
 → 今回の解析結果で予測精度が高まる倍率を選択 (近地・遠地ともに**2.6倍**を採用. 補足資料参照)

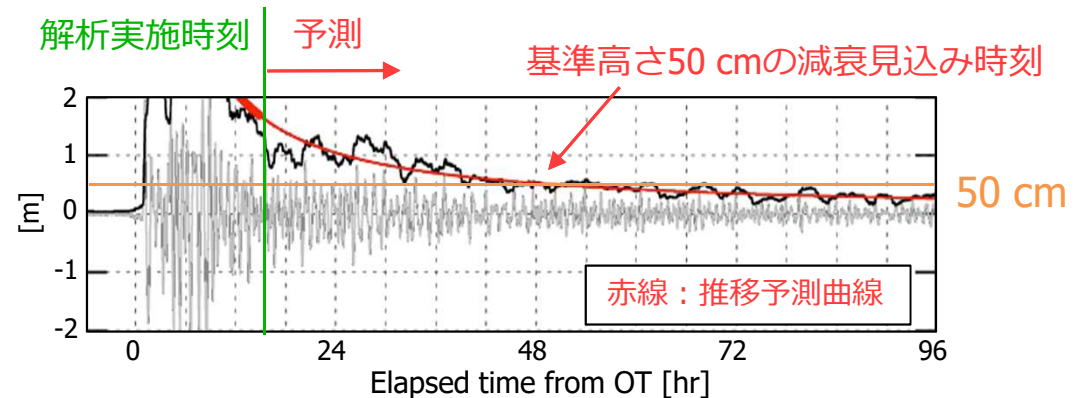
減衰予測の精度評価指標: 基準の津波高さを下回る時刻

- ・ 評価ポイント: 基準の津波高さを最後に下回る時刻を予測できたか
- ・ 基準の津波高さ: 100 cm, 50 cm, 20 cm

観測値*
最終観測時刻
津波発生後の潮位観測点の観測波形において、潮位変化が基準高さを最後に超えた時刻



予測値
減衰見込み時刻
予測曲線が基準高さを下回る時刻 (予測曲線を逐次推定する場合は、経過時間とともに予測値が更新される)



※観測波形データから読み取った最終観測時刻が、同データの終端付近の時刻である場合、それ以降に基準高さを再び上回る可能性があるため、そうした読み取り値は評価から外した。また、6時間以上にわたって20 cmを超えない場合には、津波は収束したとみなして、最後に20 cmを下回った時刻を最終観測時刻とした。

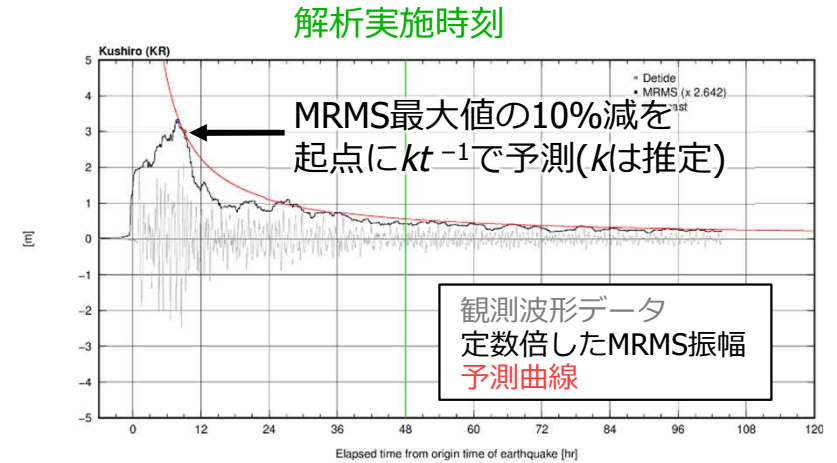
近地津波

	対象地震	統計的な津波減衰予測手法
近地地震	<ul style="list-style-type: none">・ 2011年東北地方太平洋沖地震(Mw 9.0)・ 2003年十勝沖地震(Mw 8.0)	<ul style="list-style-type: none">・ 1べき関数+最大値 (林, 2010, 海工集)・ 2べき関数 (気象庁, 2019)・ 1べき関数+曲線近似 (気象庁, 2020)
遠地地震	<ul style="list-style-type: none">・ 2010年チリ中部沿岸の地震(Mw 8.8)・ 1960年チリ地震(Mw 9.5)	<ul style="list-style-type: none">・ 1指数関数+最大値 (林, 2010, 海工集)・ 3指数関数+Mw (気象庁, 2019)・ 3指数関数+最大値 (気象庁, 2020)・ 3指数関数+曲線近似 (今回追加提案)

比較検証する統計的な減衰予測手法（近地津波）

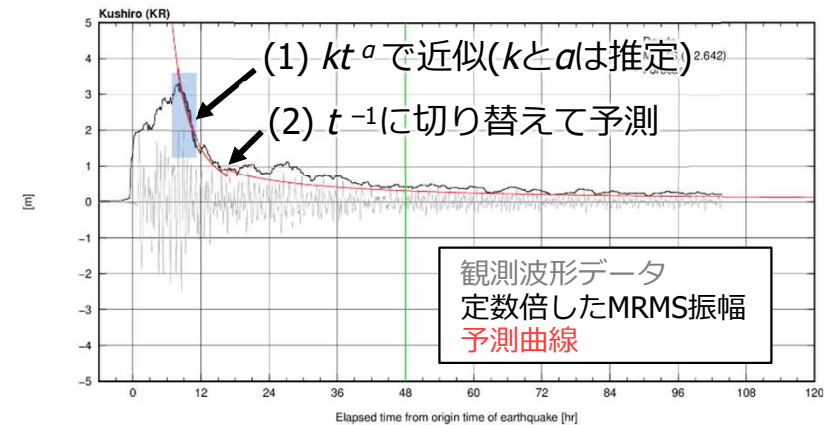
1べき関数+MRMS最大値 (林・他, 2010, 海工集)

- 減衰過程を1つのべき関数 t^{-1} で表現
- MRMS振幅最大値から10%減少した時点のMRMS振幅を起点に kt^{-1} で予測(k :定数)
- 予測結果の更新なし



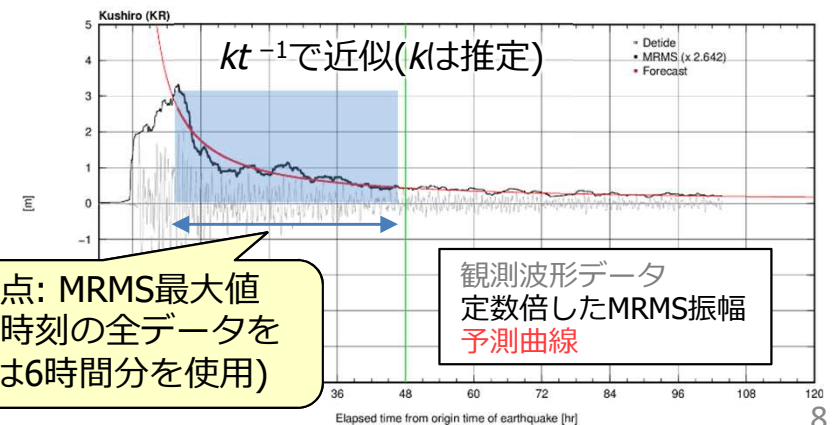
2べき関数 (気象庁, 2019を一部改良)

- 減衰過程を2段階のべき関数 t^a と t^{-1} で表現
- (1) MRMS最大以降の時間幅 T_f のMRMS振幅をべき関数 kt^a で近似して予測 ($T_f=3$ 時間)
- (2) (1)による予測値とMRMS振幅との比が0.8以下又は1.3以上になったのちは、同時点のMRMS振幅を起点に kt^{-1} で予測



1べき関数+曲線近似 (気象庁, 2020を一部改良)

- 減衰過程をべき関数 t^{-1} で表現
- MRMS最大値～解析実施時刻のMRMS振幅をべき関数 kt^{-1} で近似して予測(k :定数)
- 予測結果を逐次更新



今回の改良点: MRMS最大値
～解析実施時刻の全データを使用
(前回は6時間分を使用)

予測結果の比較 (手法比較) 180分MRMS+2.6倍, 24時間時点予測

どの手法の予測結果も時間的に概ね安定

1べき関数+曲線近似

2べき関数

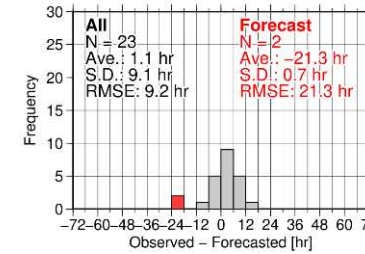
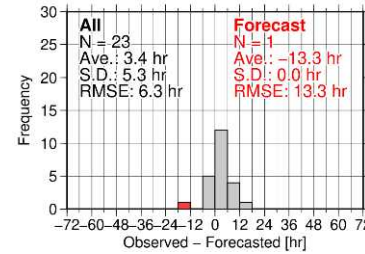
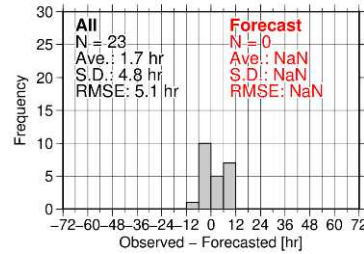
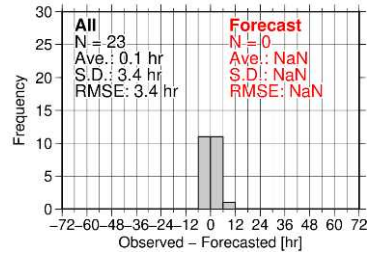
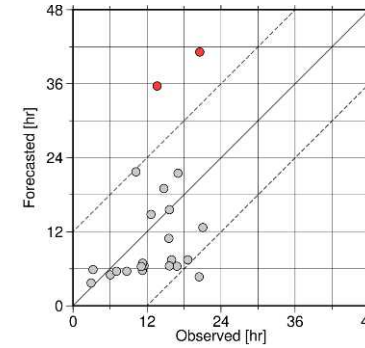
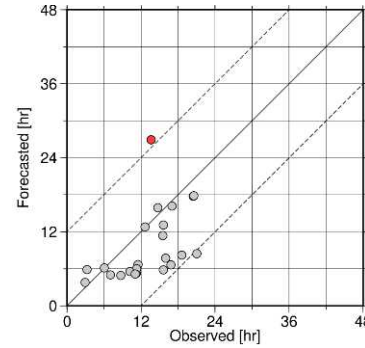
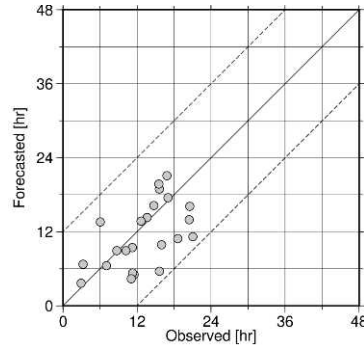
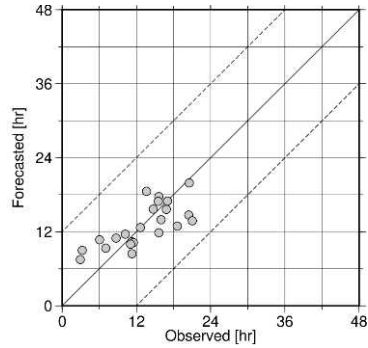
1べき関数+最大値

100 cmの津波高さを下回る時刻の予測結果

(180分MRMS+2.6倍)

(64分MRMS+3倍)

2011年東北地方太平洋沖地震

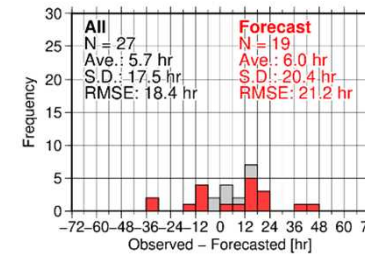
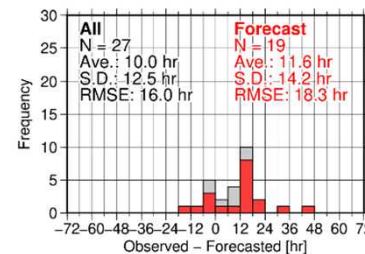
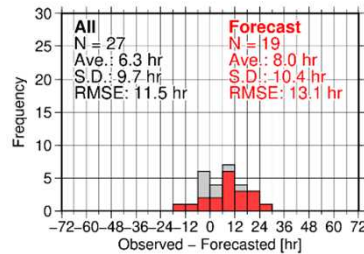
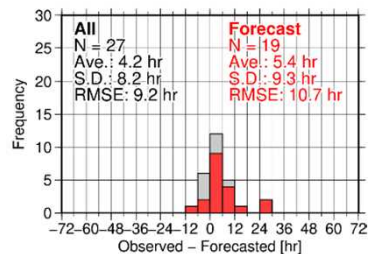
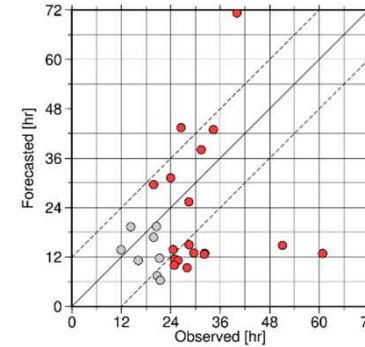
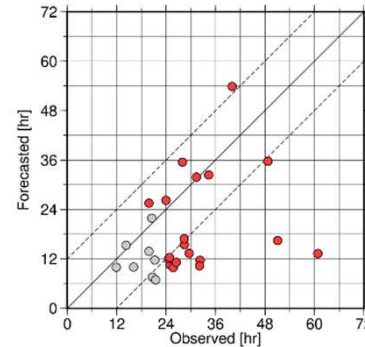
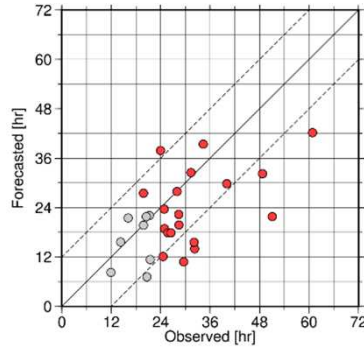
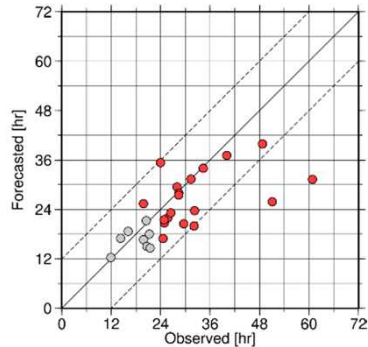


1べき関数+曲線近似が, 3手法の中では予測値のばらつきが最小



多数観測点の減衰時刻を平均的に高い精度で予測

50 cmの津波高さを下回る時刻の予測結果



●: 各観測点での予測結果

赤色: 解析実施時刻よりも最終観測時刻又は減衰見込み時刻が未来

灰色: 解析実施時刻よりも最終観測時刻又は減衰見込み時刻が過去

予測結果の比較 (手法比較) 180分MRMS+2.6倍, 24時間時点予測

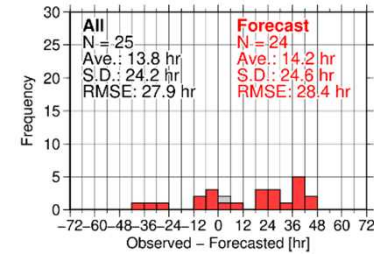
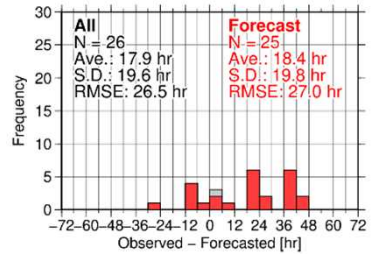
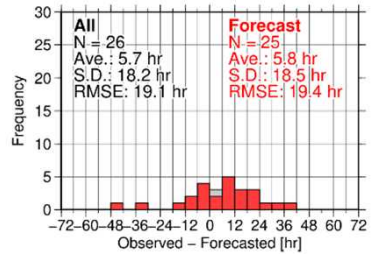
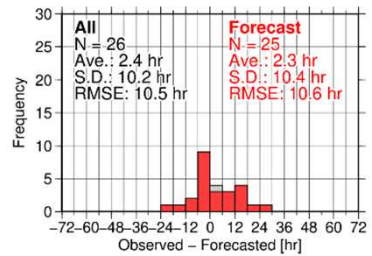
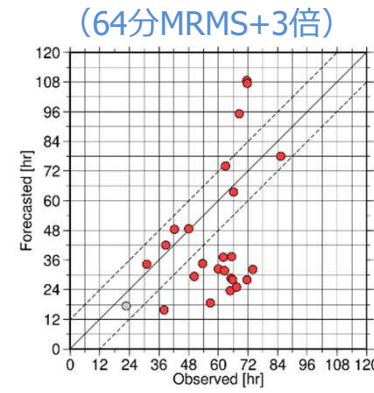
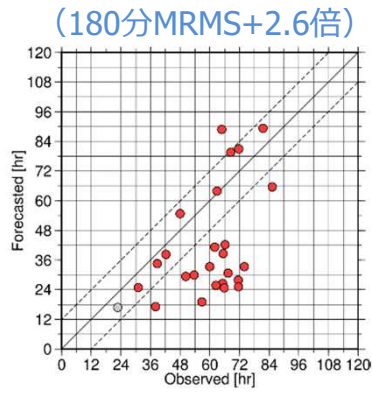
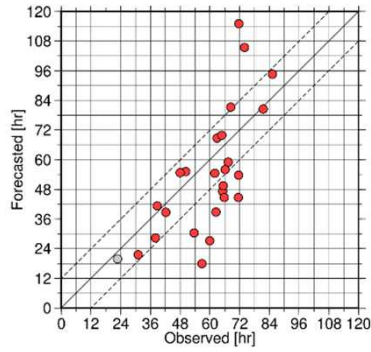
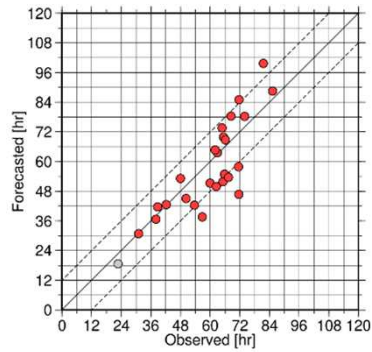
1べき関数+曲線近似

2べき関数

1べき関数+最大値

2011年東北地方太平洋沖地震

20 cmの津波高さを下回る時刻の予測結果



●: 各観測点での予測結果

赤色: 解析実施時刻よりも最終観測時刻又は減衰見込み時刻が未来

灰色: 解析実施時刻よりも最終観測時刻又は減衰見込み時刻が過去

比較した手法の中では、1べき関数+曲線近似の予測精度 (複数観測点の平均的な予測精度) が最も高く、100, 50, 20 cmいずれも最終観測時刻の±12時間程度の範囲で予測(又は再現)

1べき関数+最大値:

予測結果が予測起点の瞬時値(最大値)に依存

2べき関数:

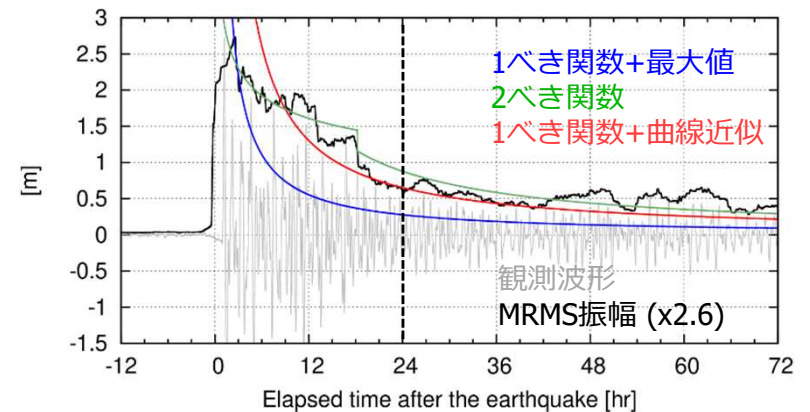
予測結果が瞬時値(2段階移行時の値)に依存

1べき関数+曲線近似:

時系列に当てはめるため瞬時値への依存度が低い

(例) 花咲

解析実施時刻



予測結果の比較 (手法比較) 180分MRMS+2.6倍, 12時間時点予測

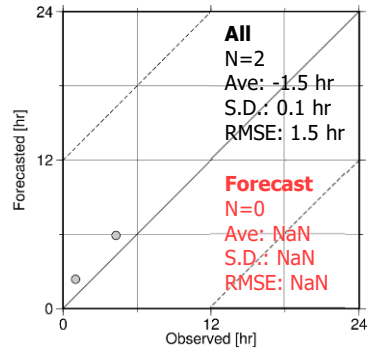
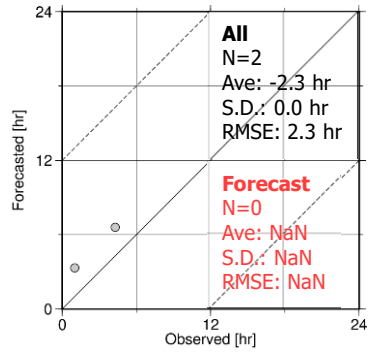
2003年
十勝沖地震

1べき関数+曲線近似

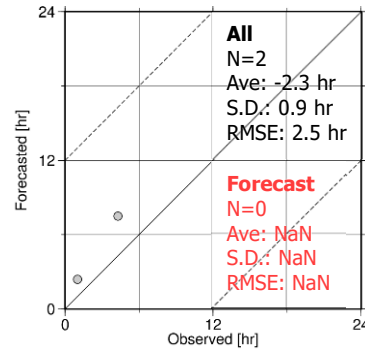
2べき関数

1べき関数+最大値

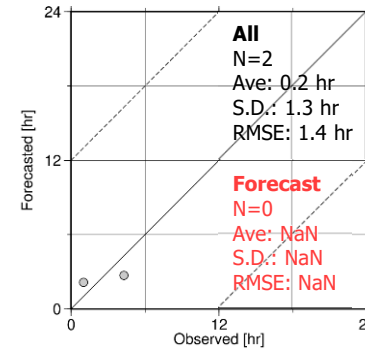
100 cmの津波高さを下回る時刻の予測結果



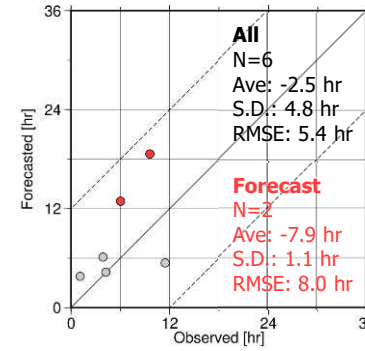
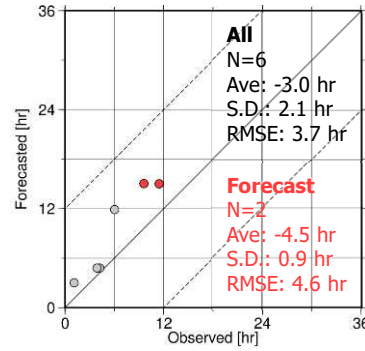
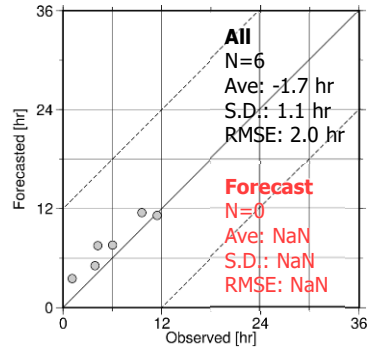
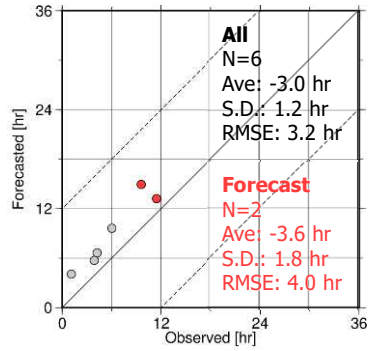
(180分MRMS+2.6倍)



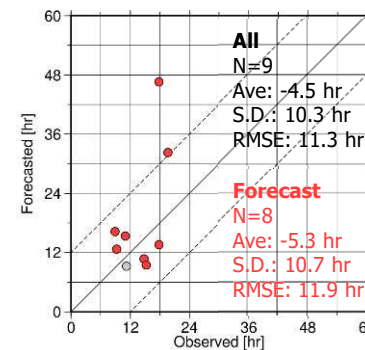
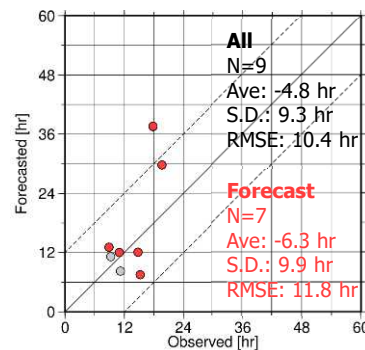
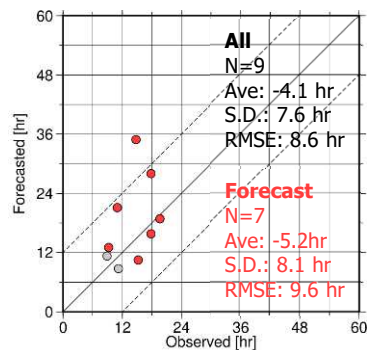
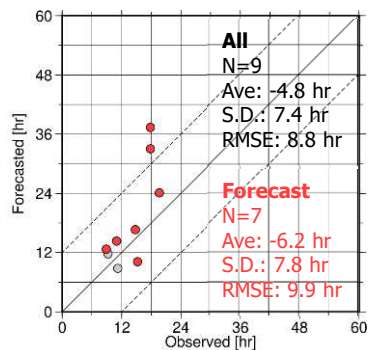
(64分MRMS+3倍)



50 cmの津波高さを下回る時刻の予測結果



20 cmの津波高さを下回る時刻の予測結果



限られた観測点の結果からは、手法間で大きな性能差はみられない

予測結果の比較 (解析時点比較) 1べき関数+180分MRMS曲線近似+2.6倍

2011年
東北地方
太平洋沖
地震

12時間後

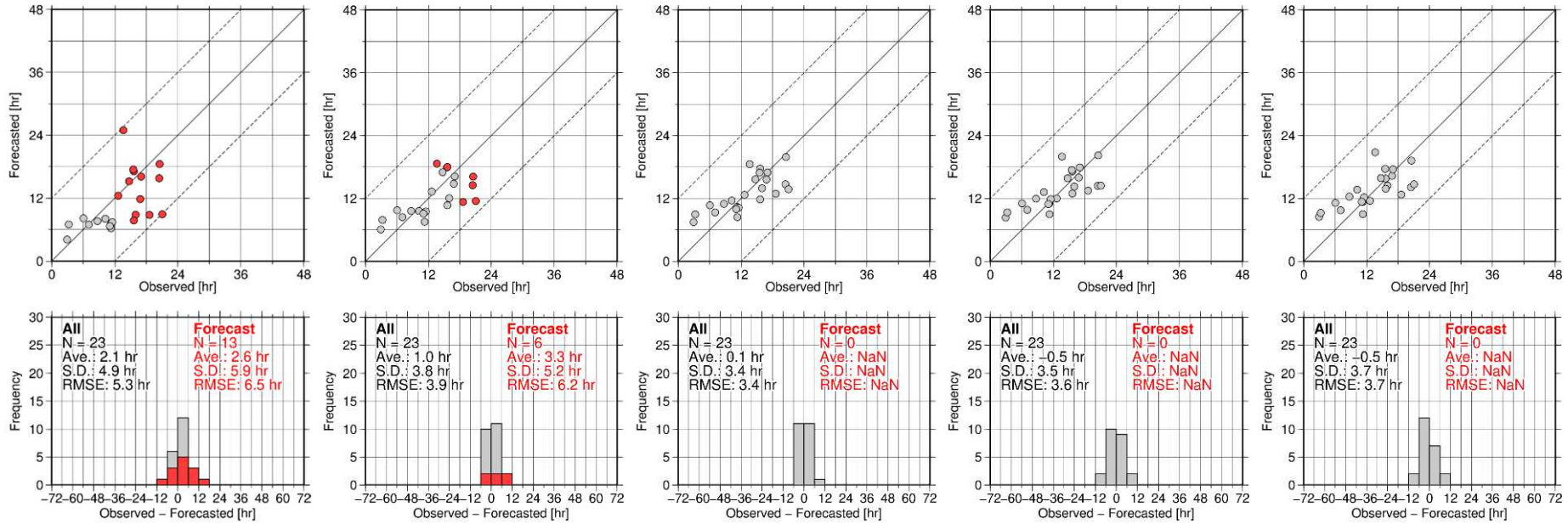
18時間後

24時間後

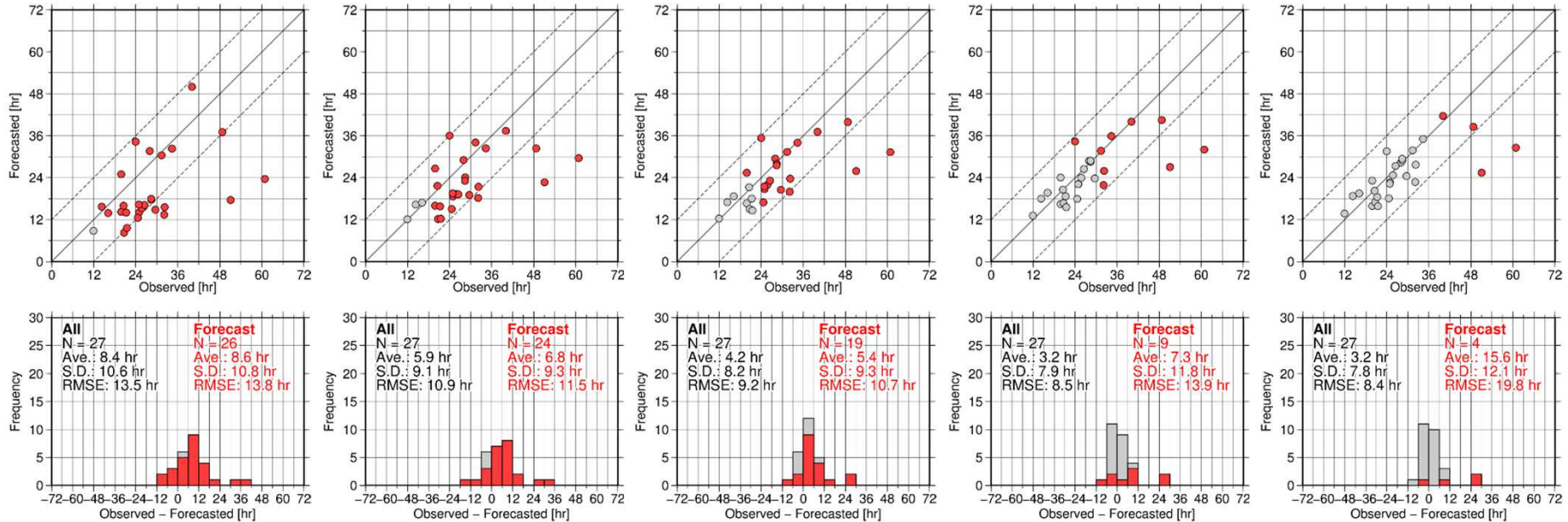
30時間後

36時間後

100 cmの津波高さを下回る時刻の予測結果



50 cmの津波高さを下回る時刻の予測結果



予測結果の比較 (解析時点比較) 1べき関数+180分MRMS曲線近似+2.6倍

12時間後

18時間後

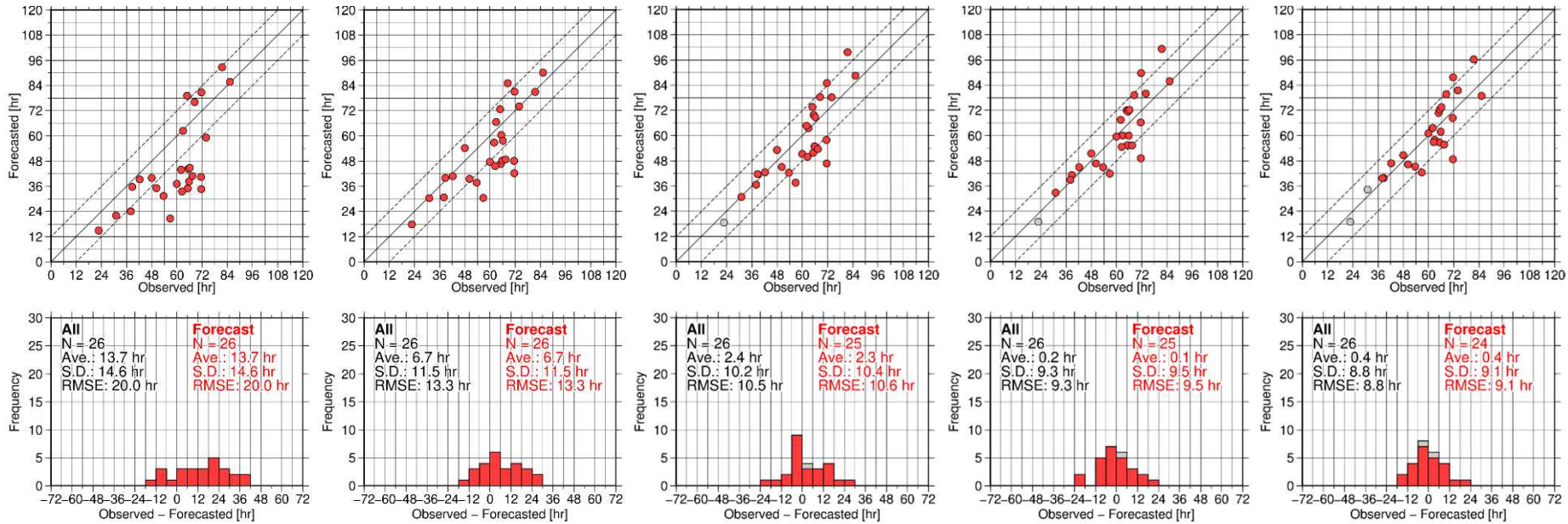
24時間後

30時間後

36時間後

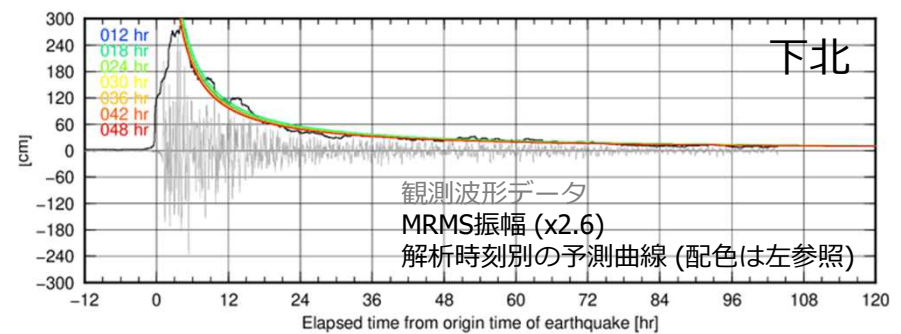
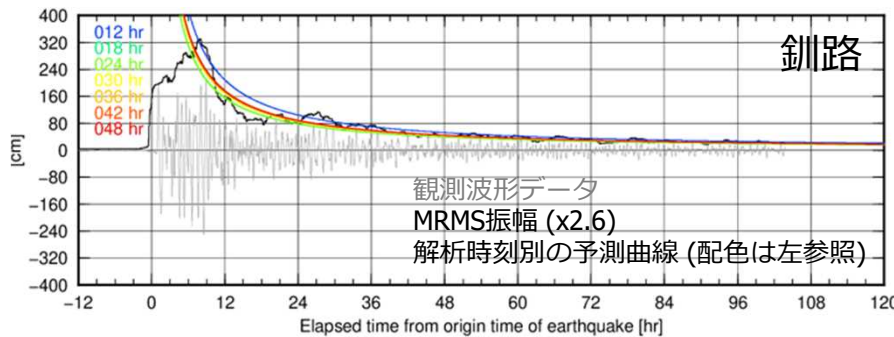
2011年
東北地方
太平洋沖
地震

20 cmの津波高さを下回る時刻の予測結果



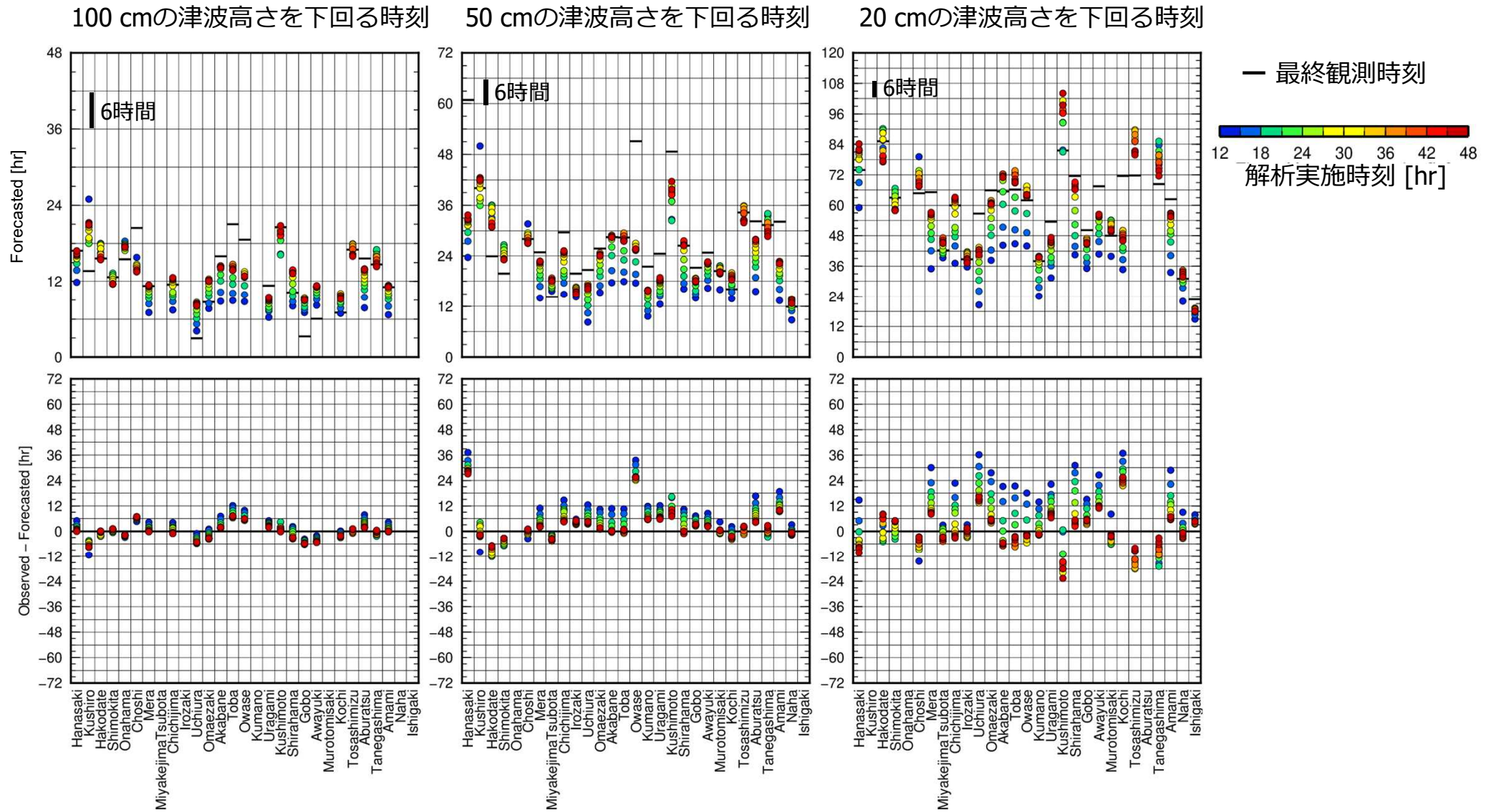
時間経過とともに、予測結果の変化が小さくなっていく傾向がみられる

- 多くの観測点では、概ね12時間後までに、MRMS振幅最大後の急な減衰が終了し、関数 $1/t$ による近似度がより上がるためと考えられる (例: 釧路)
- 急な減衰がみられない観測点は、早い時間帯から予測結果の変化が小さい (例: 下北)



2011年東北地方太平洋沖地震

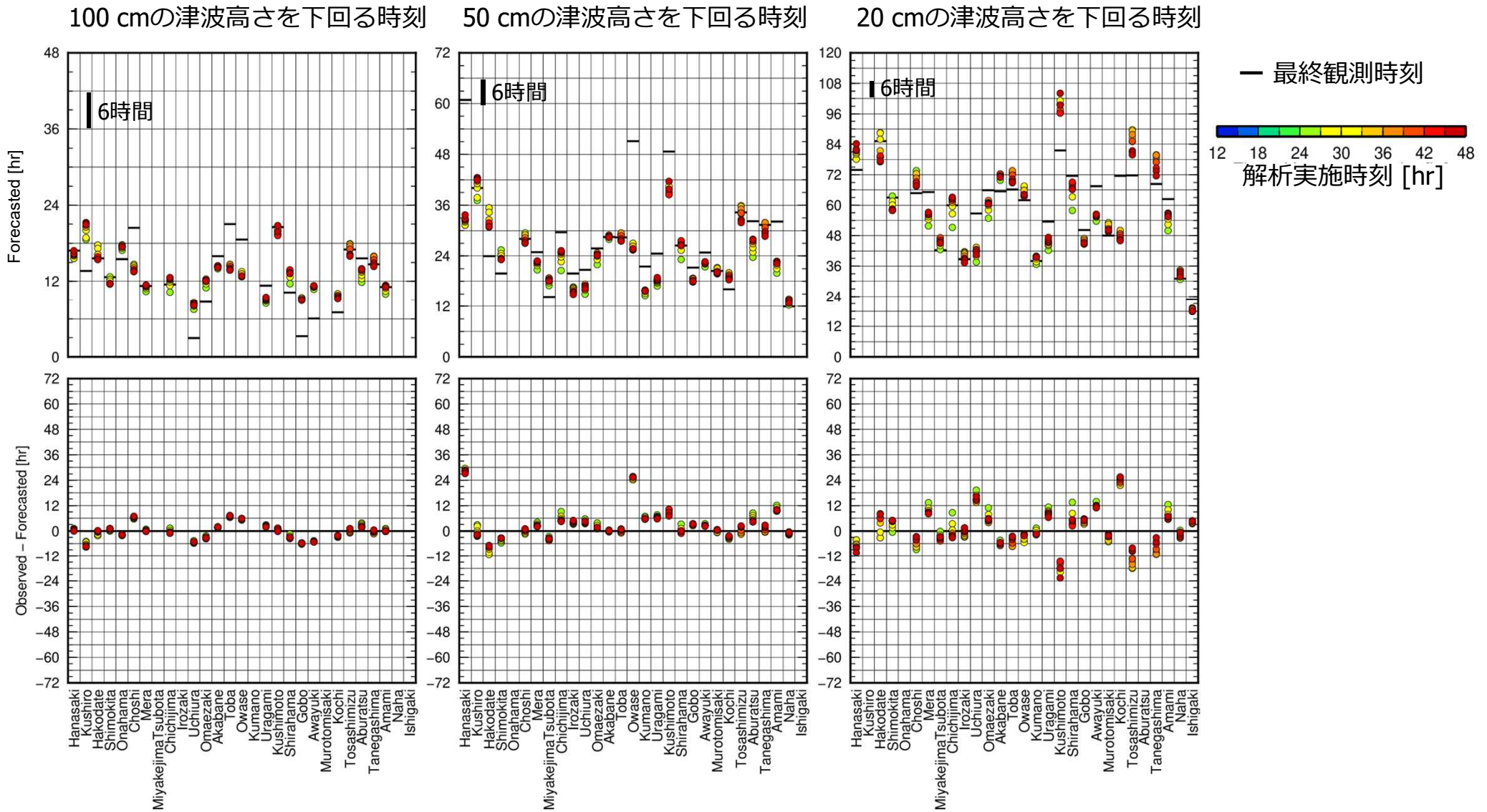
解析実施時刻によって予測結果が大きく変化しないか？



地震後12~24時間の減衰見込み時刻は、解析実施時刻による変化が大きく(100 cmで6時間, 50 cmで12時間, 20 cmで18時間程度), それ以降は変化が小さくなる(次ページ参照)

2011年東北地方太平洋沖地震

地震発生後24時間以降のみを表示



100 cmで3時間, 50 cmで6時間, 20 cmで12時間程度の時間変化

予測結果の比較 (解析時点比較) 1べき関数+180分MRMS曲線近似+2.6倍

2003年
十勝沖地震

6時間後

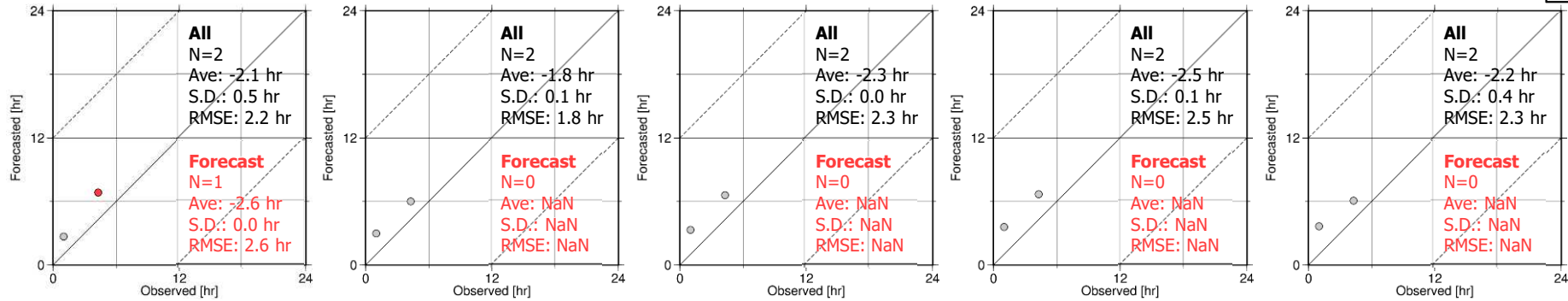
9時間後

12時間後

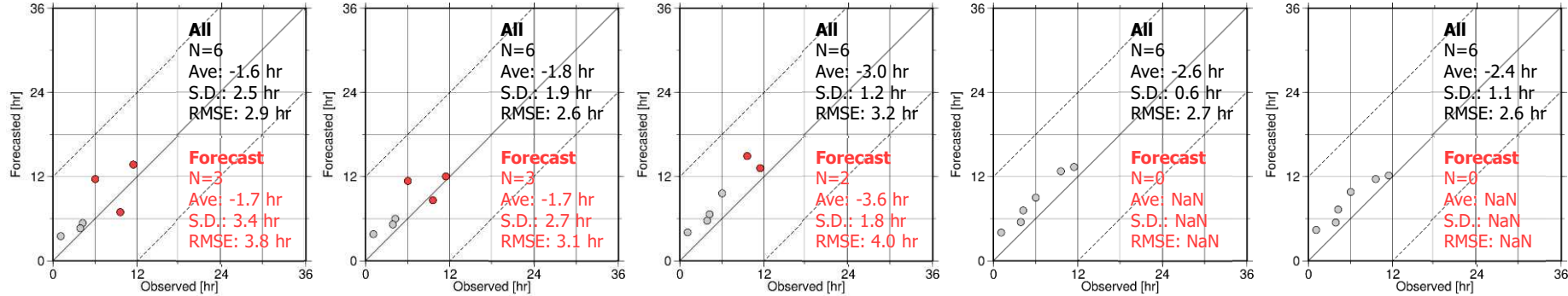
15時間後

18時間後

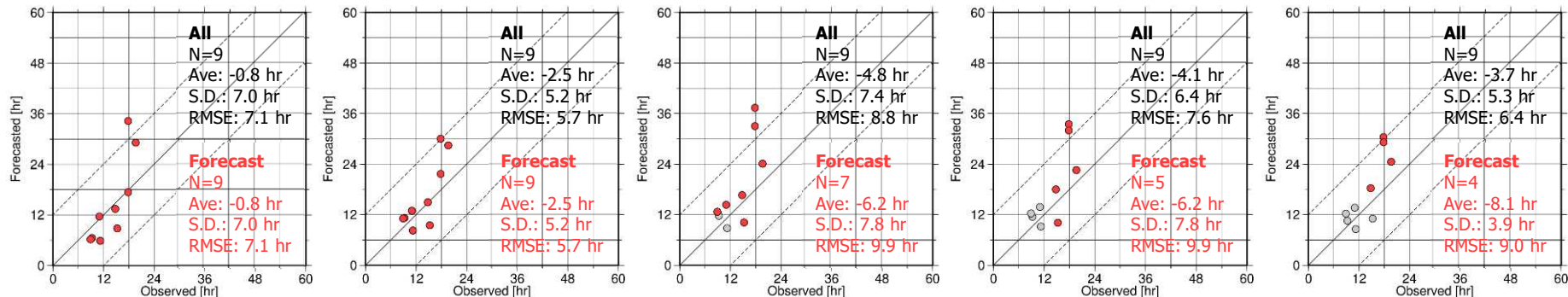
100 cmの津波高さを下回る時刻の予測結果



50 cmの津波高さを下回る時刻の予測結果



20 cmの津波高さを下回る時刻の予測結果



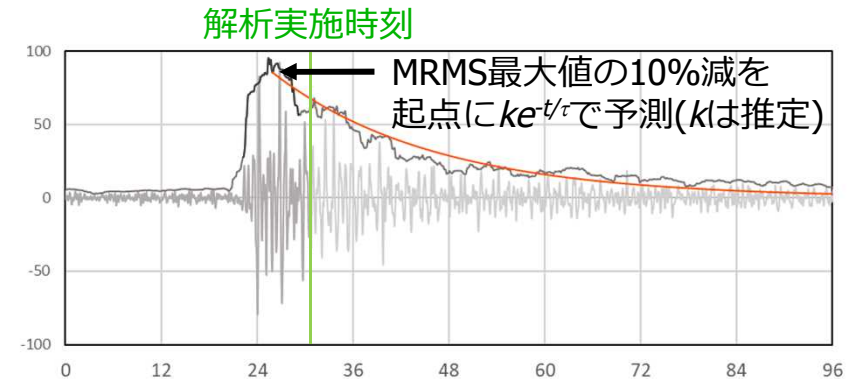
遠地津波

	対象地震	統計的な津波減衰予測手法
近地地震	<ul style="list-style-type: none"> ・ 2011年東北地方太平洋沖地震(Mw 9.0) ・ 2003年十勝沖地震(Mw 8.0) 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 1べき関数+最大値 (林, 2010, 海工集) ・ 2べき関数 (気象庁, 2019) ・ 1べき関数+曲線近似 (気象庁, 2020)
遠地地震	<ul style="list-style-type: none"> ・ 2010年チリ中部沿岸の地震(Mw 8.8) ・ 1960年チリ地震(Mw 9.5) 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 1指数関数+最大値 (林, 2010, 海工集) ・ 3指数関数+Mw (気象庁, 2019) ・ 3指数関数+最大値 (気象庁, 2020) ・ 3指数関数+曲線近似 (今回追加提案)

比較検証する統計的な減衰予測手法（遠地津波）

1 指数関数+MRMS最大値 (林・他, 2010, 海工集)

- ・ 減衰過程を1つの指数関数 $e^{-t/\tau}$ で表現
- ・ MRMS振幅最大値から10%減少した時点のMRMS振幅を起点に $ke^{-t/\tau}$ で予測 (k : 定数)
- ・ 時定数は $\tau = 20.3$ 時間 (林・他, 2011, 海工集)
- ・ 予測結果の更新なし

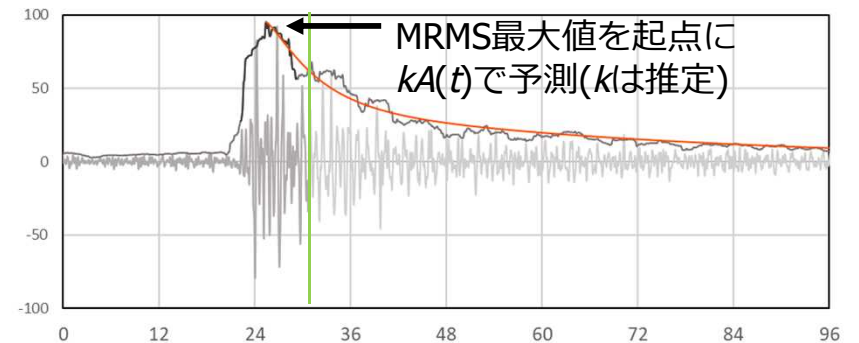


3 指数関数+地震規模(Mw) (気象庁, 2019)

- ・ 振幅係数 A_1, A_2 の Mw 依存性を利用して予測

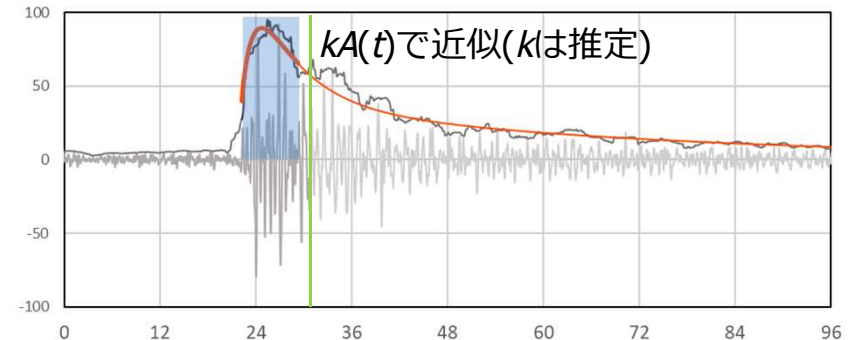
3 指数関数+MRMS最大値 (気象庁, 2020)

- ・ MRMS振幅最大値を起点に $kA(t)$ で予測
- ・ 予測結果の更新なし



3 指数関数+MRMS曲線近似

- ・ 津波到達時～解析実施時刻のMRMS振幅を3指数関数で近似して $kA(t)$ で予測
- ・ 予測結果を逐次更新



3 指数関数

- ・ 増加・減衰過程を3つの指数関数(右式)で表現
- ・ 時定数は $T_1 = 5.8$ 時間, $T_2 = 48.6$ 時間

$$A(t) = \left(1 - e^{-\frac{t}{T_0}}\right) \left(A_1 e^{-\frac{t}{T_1}} + A_2 e^{-\frac{t}{T_2}}\right)$$

予測結果の比較 (手法比較)

180分MRMS+2.6倍, 9時間時点予測

日本への津波
到達が起点

2010年チリ中部
沿岸の地震

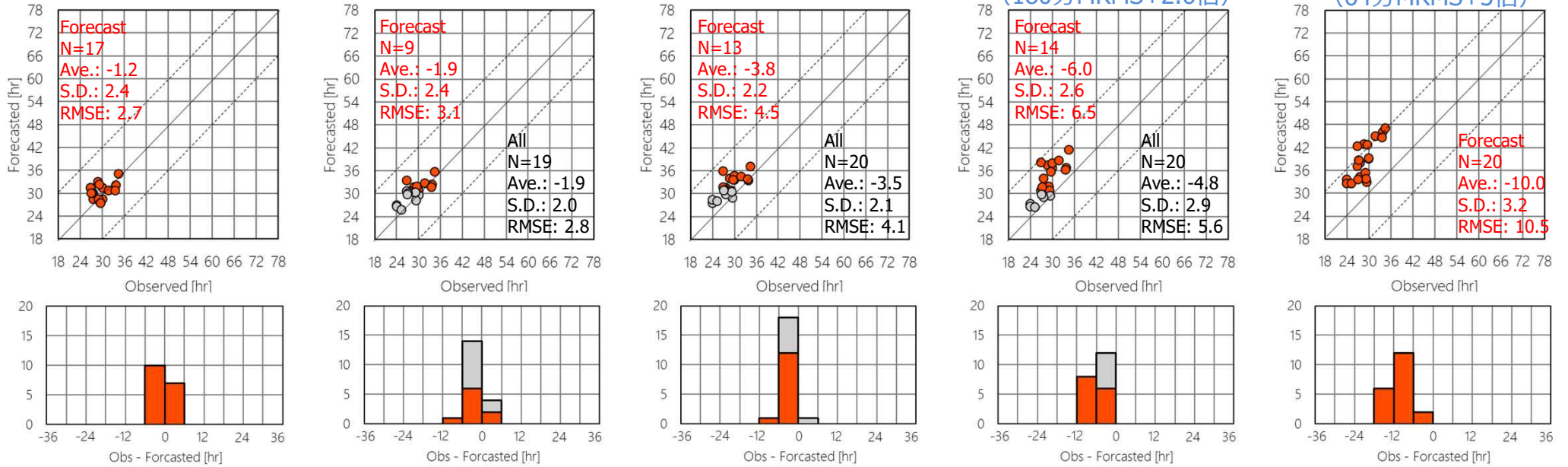
3指数関数 + Mw

3指数関数 + 曲線近似

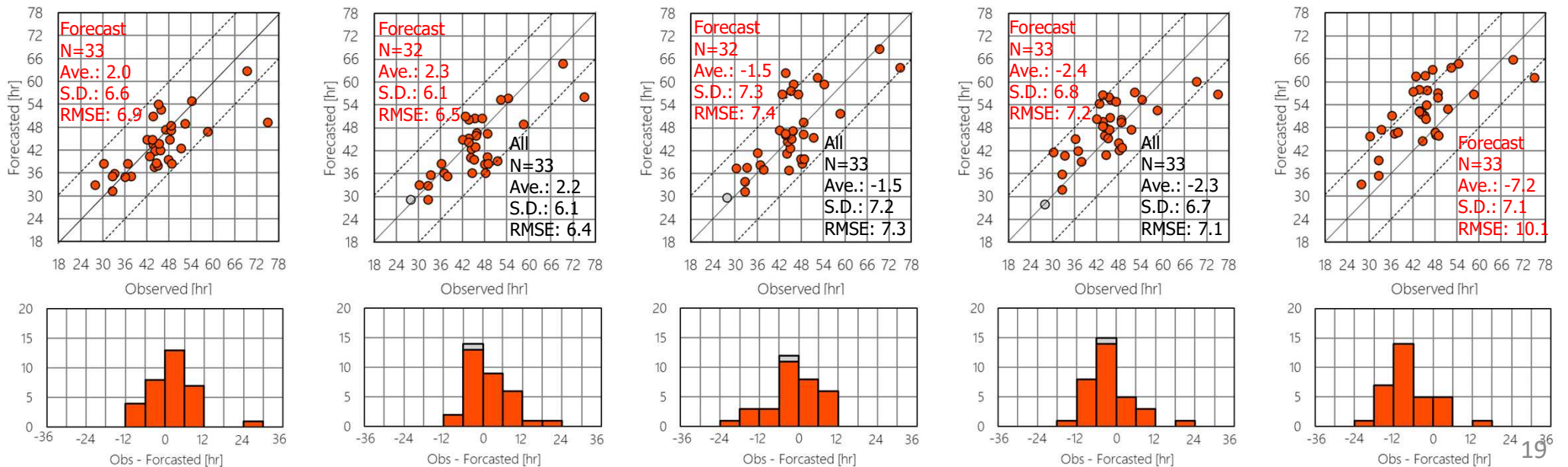
3指数関数 + 最大値

1指数関数

50 cmの津波高さを下回る時刻の予測結果



20 cmの津波高さを下回る時刻の予測結果



3指数関数 + Mw

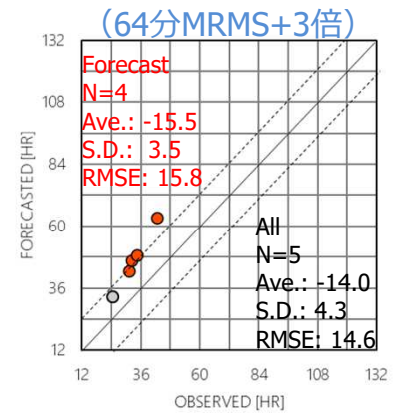
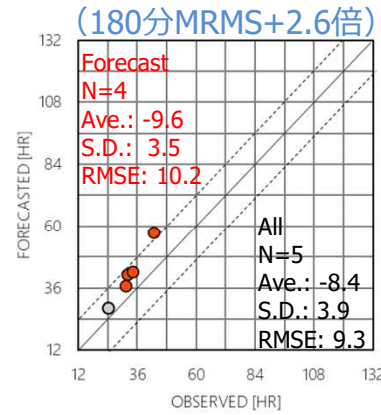
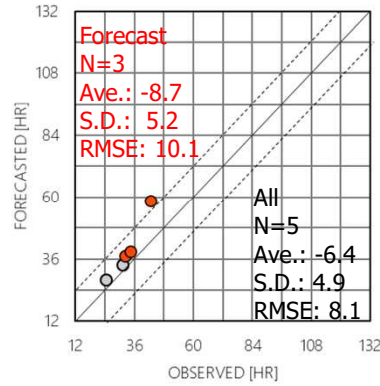
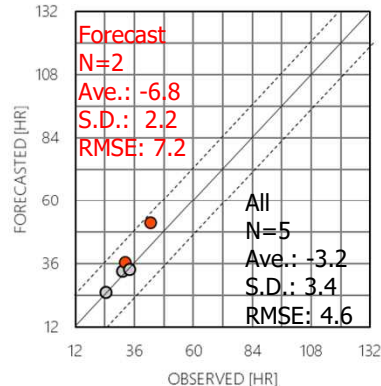
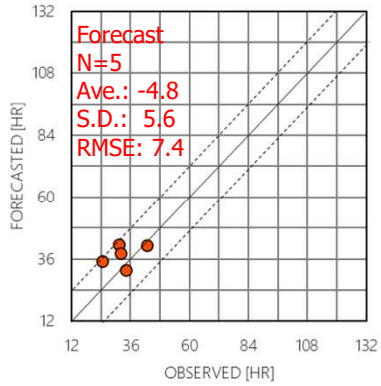
3指数関数 + 曲線近似

3指数関数 + 最大値

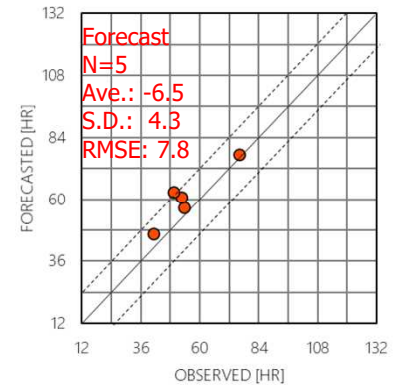
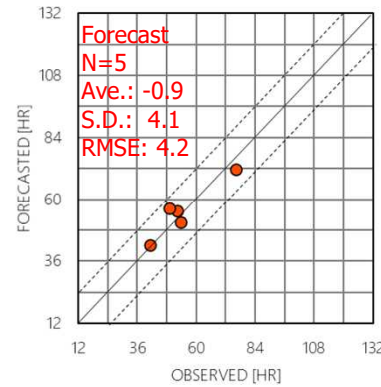
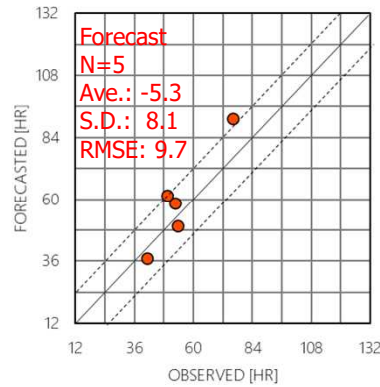
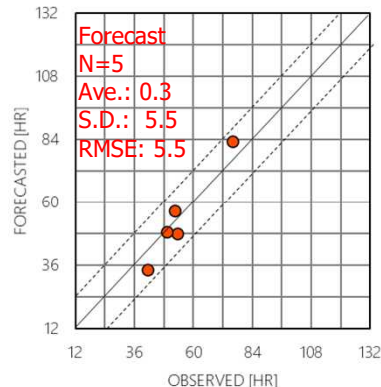
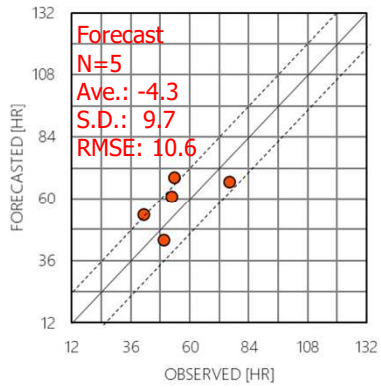
1指数関数

1960年チリ地震

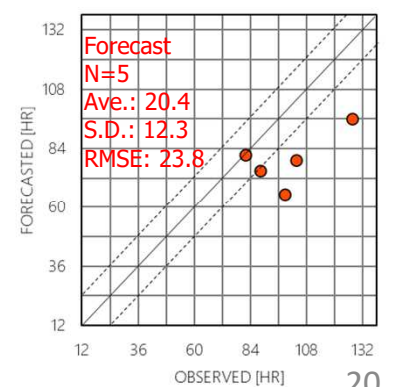
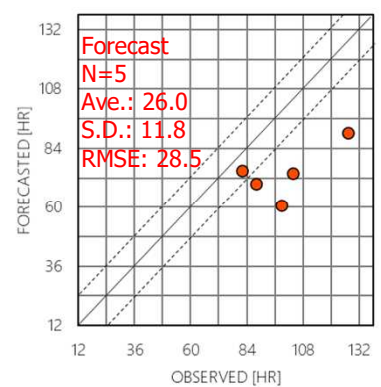
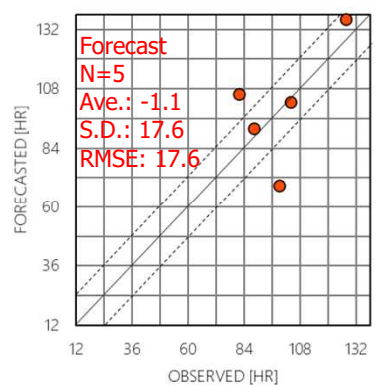
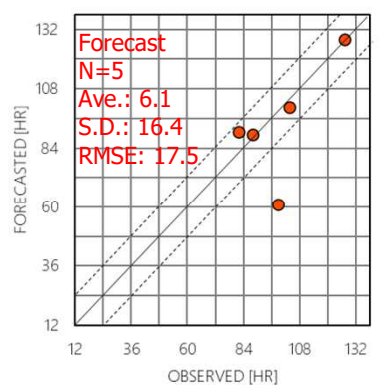
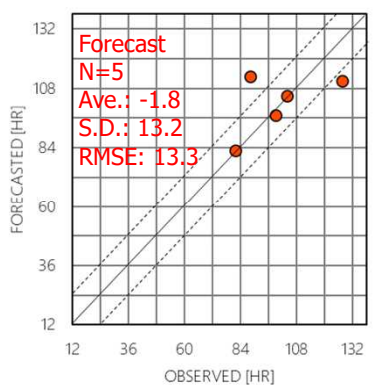
100 cmの津波高さを下回る時刻の予測結果



50 cmの津波高さを下回る時刻の予測結果



20 cmの津波高さを下回る時刻の予測結果



ポイント: 予測結果の比較 (手法比較)

1指数関数

- ・用いた減衰時定数は、地震後66時間までの減衰過程のデータから推定したもの
 - その時間内では、基準高さを下回る時刻の予測精度は良い
 - それ以降の時間帯は、予測曲線が観測値を下回ってしまい、減衰見込時刻が最終観測時刻よりも早くなる(1960年チリ地震の20 cmなど)

3指数関数 (Mw方式 / 最大値方式 / 曲線近似方式)

(共通)

- ・地震後66時間以降も含むデータを用いて推定した減衰時定数を予測に利用
→ 1指数関数に比べて、地震後66時間以降の予測精度が改善

(Mw方式) ※参考値として掲載

- ・地震発生後に震源位置と地震規模を用いて予測 (津波観測データは用いない)

(最大値方式と曲線近似方式の比較)

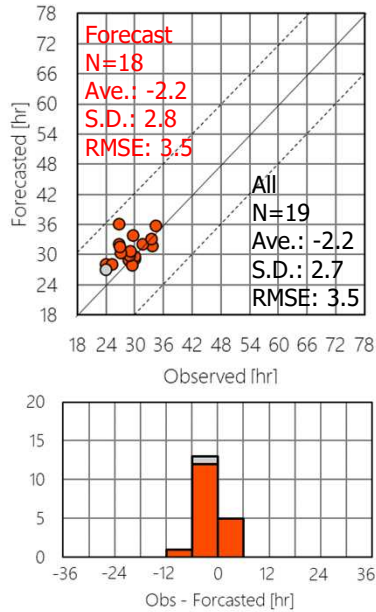
- ・最大値方式が曲線近似方式よりもやや過大評価
- ・最大値方式と曲線近似方式の標準偏差は同程度
(2010年チリ中部沿岸の地震の50cm以外は、後者の方が小)

最大値方式は、近地と同様、予測起点の瞬時値(最大値)に予測精度が強く依存するおそれがある。このため、同依存度が低くて予測値が安定しやすく、今回の検証で最大値方式と同程度の予測性能がみられた曲線近似方式を、ここでは採用する

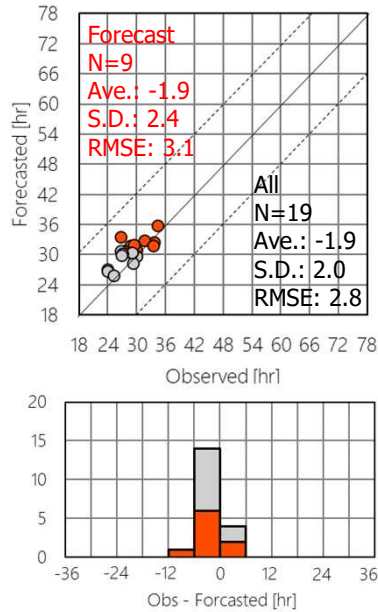
2010年チリ中部沿岸の地震

6時間後

50 cmの津波高さを下回る時刻の予測結果

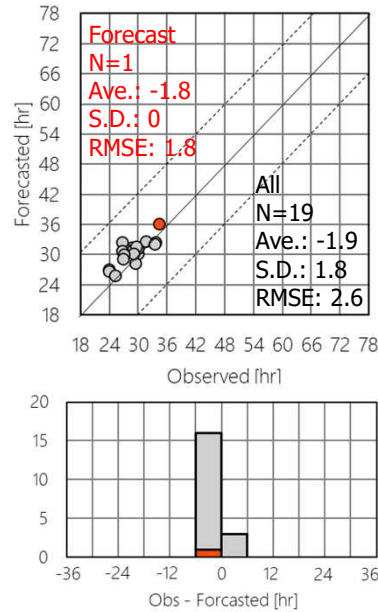


9時間後



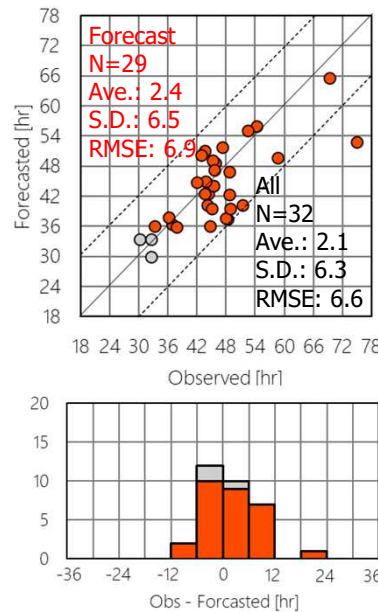
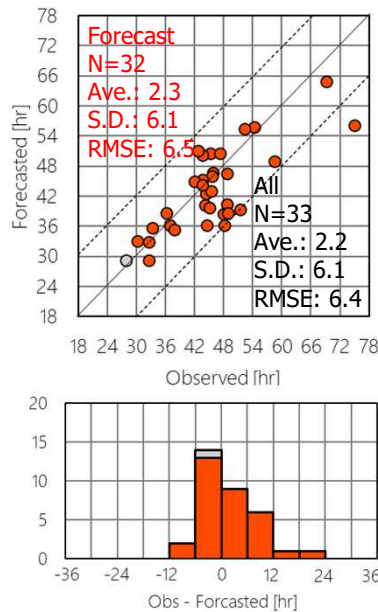
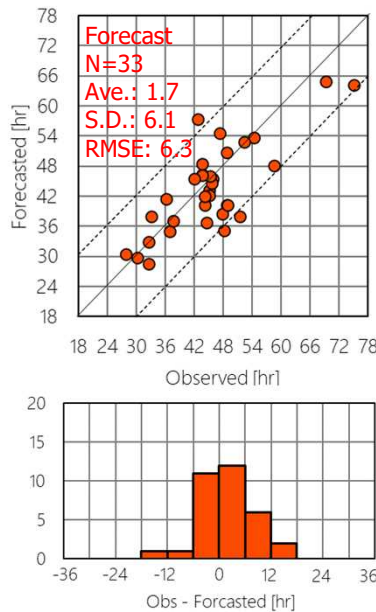
12時間後

日本への津波到達が起点



2010年チリ中部沿岸の地震, 1960年チリ地震(次ページ), とともに, 6時間後と9時間後との間の予測結果の変化に比べ, それ以降の変化は小さい.

20 cmの津波高さを下回る時刻の予測結果



チリ沖が波源の場合, 多くの観測点では6時間後まで, 大半の観測点では9時間後までに最大波を観測してMRMSのピークを越えるからと考えられる.

予測結果の比較 (解析時点比較)

3指数関数+180分MRMS曲線近似, 2.6倍

日本への津波到達が起点

1960年チリ地震

6時間後

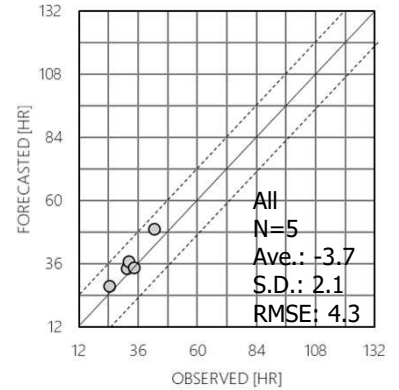
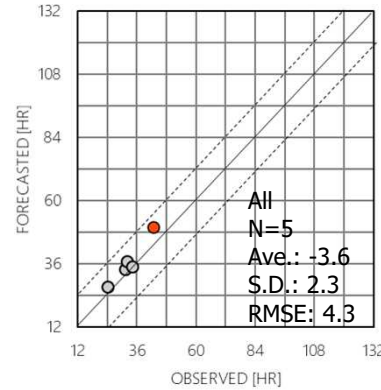
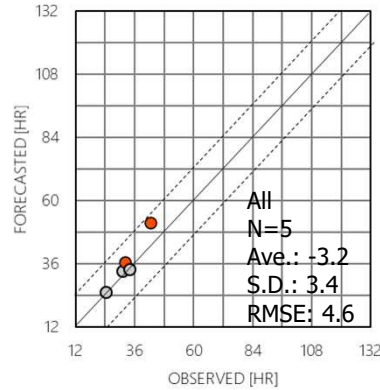
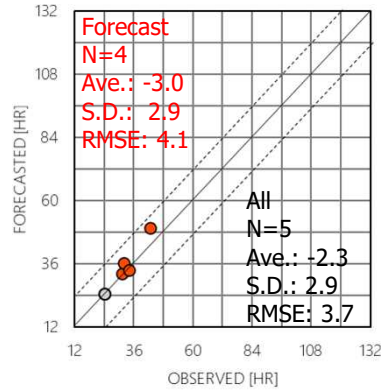
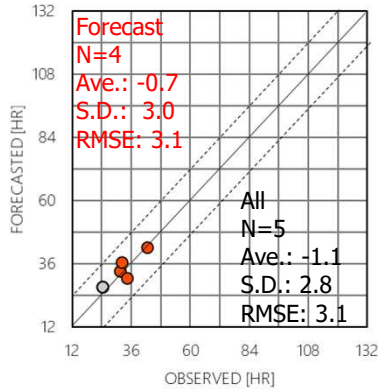
9時間後

12時間後

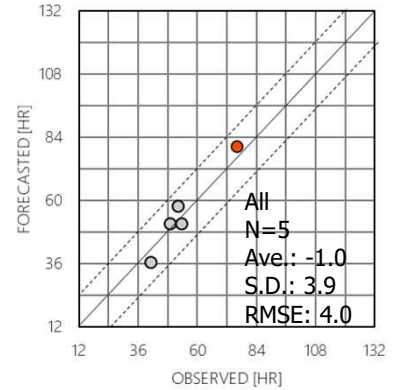
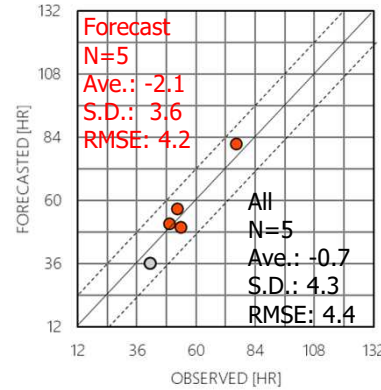
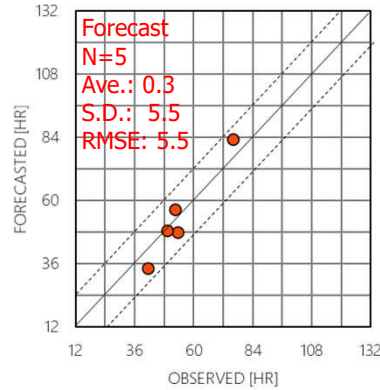
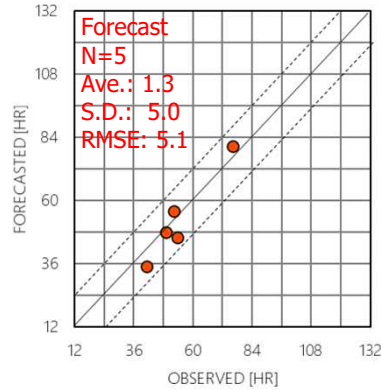
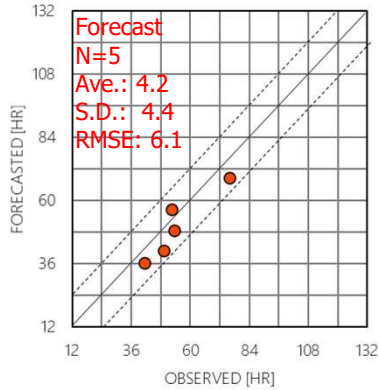
24時間後

48時間後

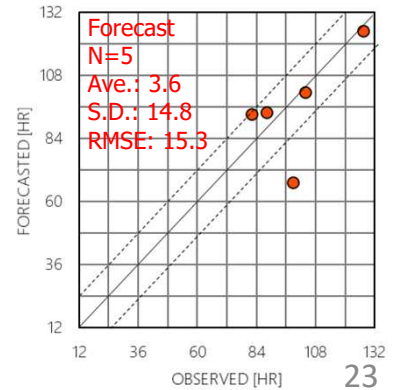
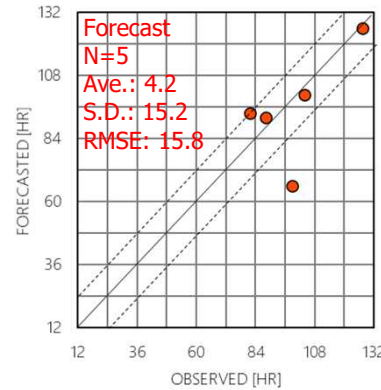
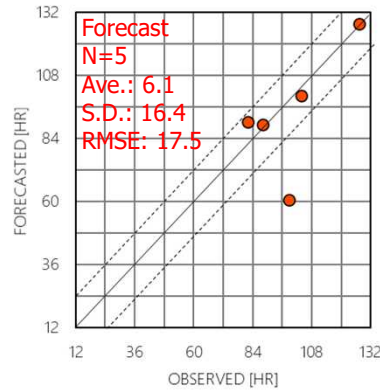
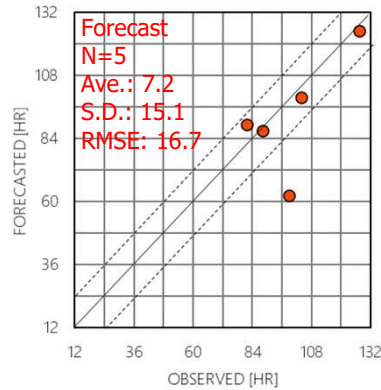
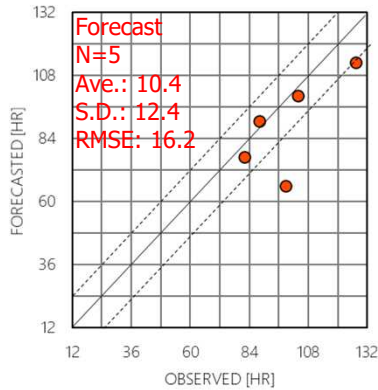
100 cmの津波高さを下回る時刻の予測結果



50 cmの津波高さを下回る時刻の予測結果



20 cmの津波高さを下回る時刻の予測結果



- 近地津波と遠地津波それぞれについて開発した統計的な津波減衰予測手法を過去の大地震～巨大地震に適用し，その予測性能を検証した。
- あらかじめ定めた関数で観測MRMS振幅の時系列を近似する予測手法が，近地津波・遠地津波ともに予測精度が優れることを示す結果が得られた。これらの手法は，頑健性にも優れることが期待できる。
- 一定の予測誤差を許容すれば，近地津波では地震後12～24時間程度の時点，チリ沖で発生する遠地津波では日本への津波到達後9時間程度の時点から，津波の見通しを得られる可能性があることがわかった。

謝辞

本調査では、気象庁大気海洋部の沿岸潮位観測データを使用しました。

引用文献

林 豊・越村俊一・今村文彦 (2009), 土木学会論文集B2 (海岸工学), B2-65 (1), 276-288.

林 豊・今村文彦・越村俊一 (2010), 土木学会論文集B2 (海岸工学), B2-66 (1), 211-215.

林 豊・越村俊一・今村文彦 (2011), 土木学会論文集B2 (海岸工学), B2-67 (2), I_216-I_220.

Kanamori, H. and D. L. Anderson (1975), BSSA, 65(5), 1073-1095.

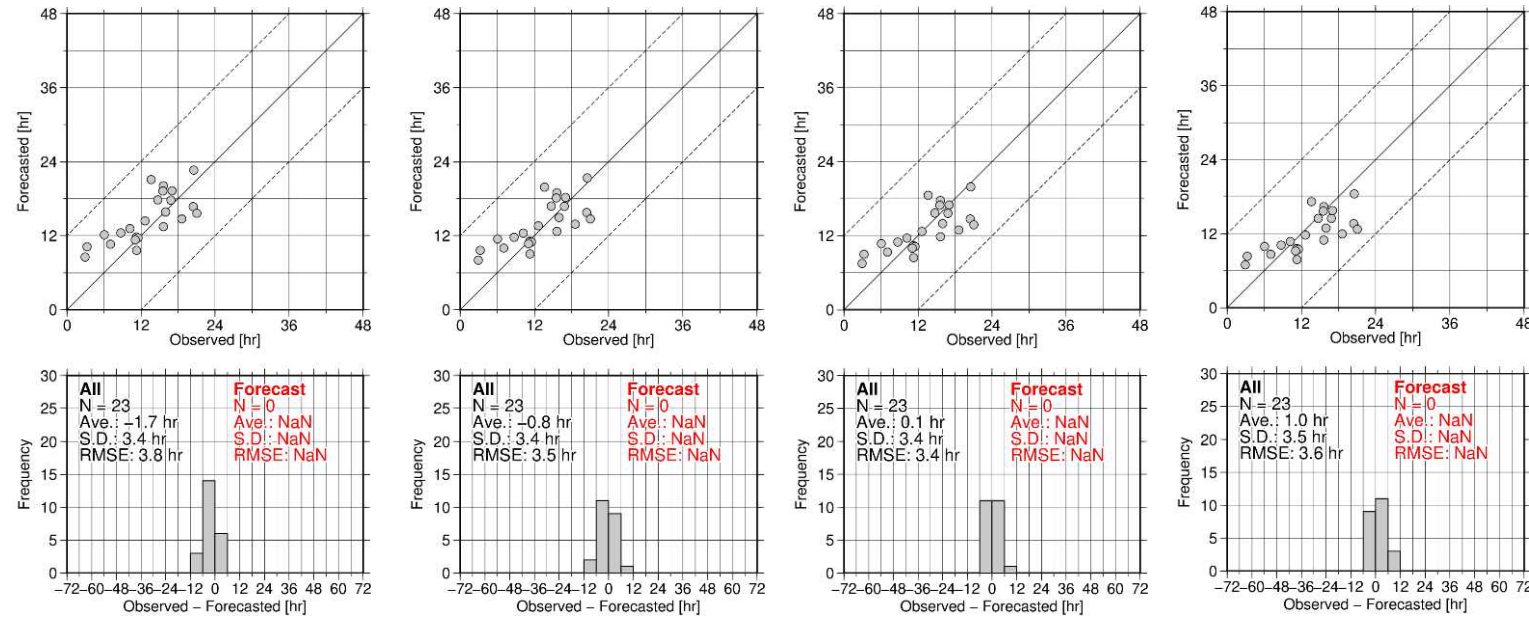
気象庁 (2019), 第16回津波予測技術に関する勉強会.

気象庁 (2020), 第17回津波予測技術に関する勉強会.

2011年東北地方
太平洋沖地震

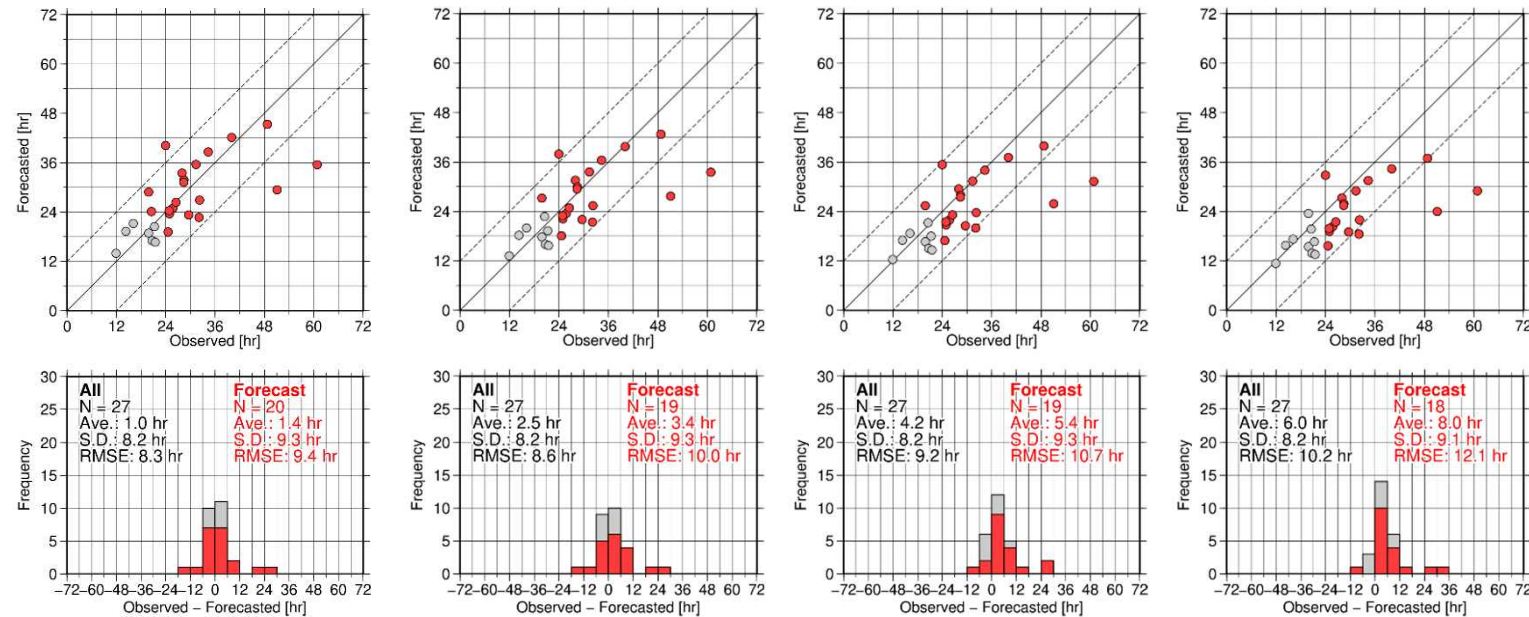
3.0倍
2.8倍
2.6倍
2.4倍

100 cmの津波高さを下回る時刻の予測結果



方針:
各地震・各基準高さ
について残差の平均
(図中のAllのAve.)が
0に近くなる共通の
倍率を経験的に設定

50 cmの津波高さを下回る時刻の予測結果



100 cm
2.6倍と2.8倍の間

50 cm
3.0倍以上
(極端な値2つを除く
と2.8倍と3.0倍の間)

3.0倍

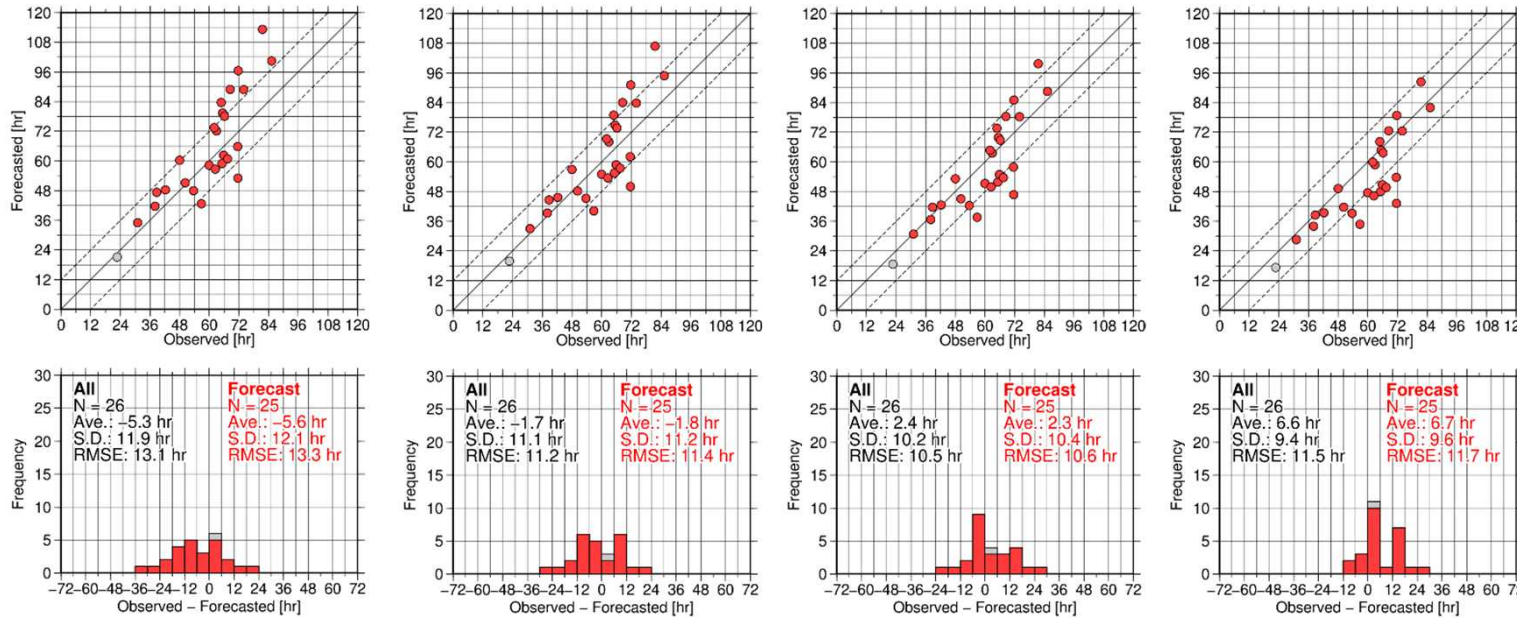
2.8倍

2.6倍

2.4倍

2011年東北地方
太平洋沖地震

20 cmの津波高さを下回る時刻の予測結果



20 cm
2.6倍と2.8倍の間

(100, 50 cmに比べて
倍率の違いが予測結
果に与える影響大.
1/tの関数形に依存)

2011年東北地方太平洋沖地震

- 100, 20 cmは, 2.6~2.8倍で残差の平均が0に近い
- 20 cmでは, 倍率の違いが予測結果に与える影響が大きめ
- 50 cmでは, (大きな跳び値を除くと) 2.8~3.0倍

2003年十勝沖地震 (次ページ参照)

- 2011年地震に比べて地震の規模が小さく, 津波収束までの時間が短いため, 100, 50, 20 cmのいずれについても, 倍率が予測結果に与える影響が小さい

予測結果への感度が高い20 cmの結果に基づき, 今回は2.6倍とした

2003年
十勝沖地震

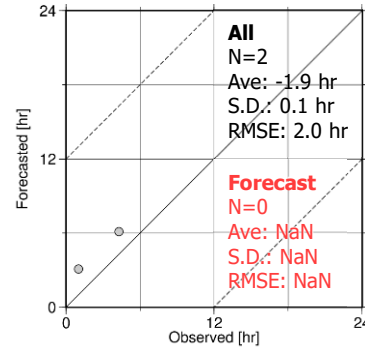
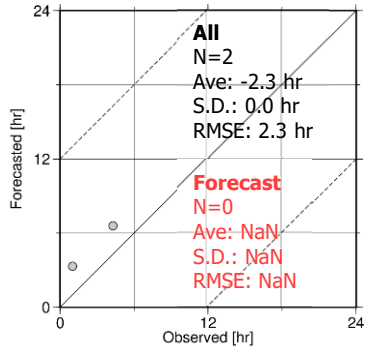
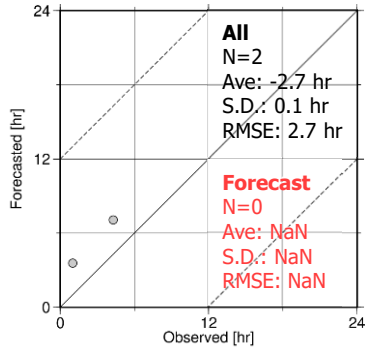
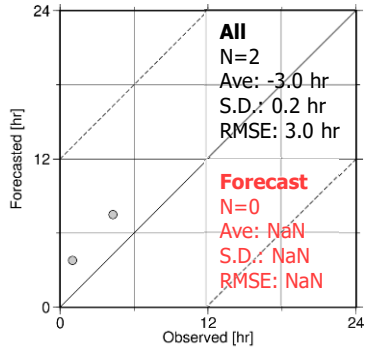
3.0倍

2.8倍

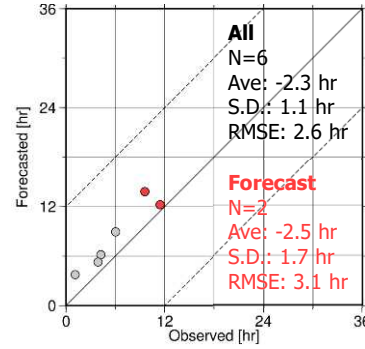
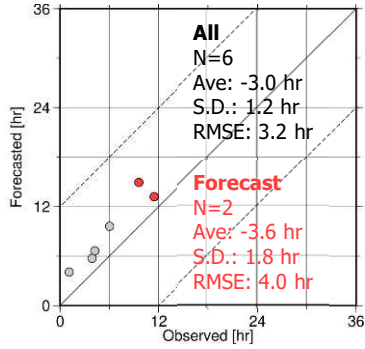
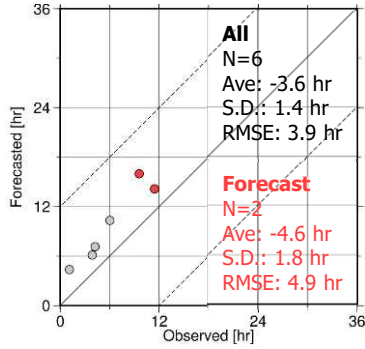
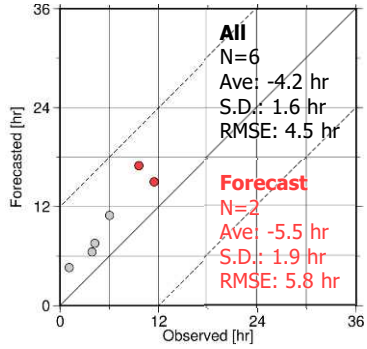
2.6倍

2.4倍

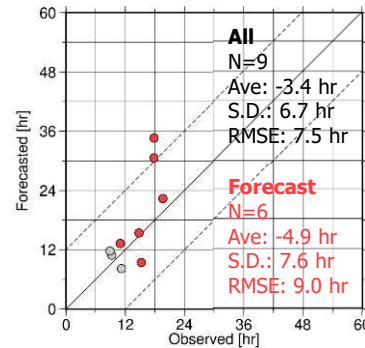
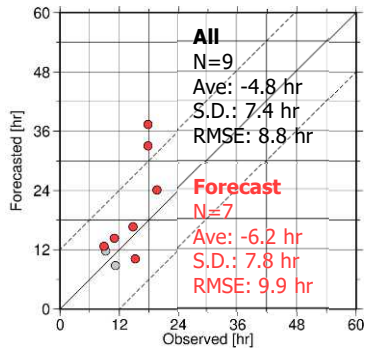
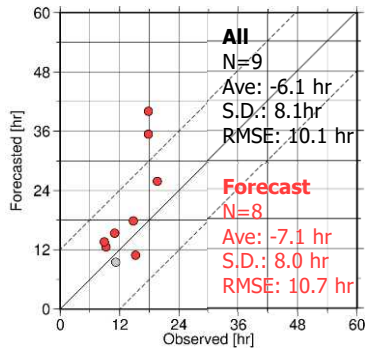
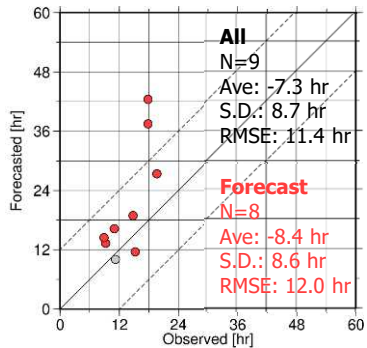
100 cmの津波高さを下回る時刻の予測結果



50 cmの津波高さを下回る時刻の予測結果



20 cmの津波高さを下回る時刻の予測結果



2010年チリ中部沿岸の地震

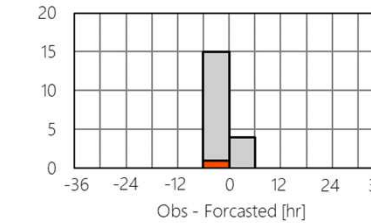
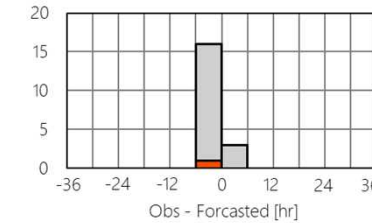
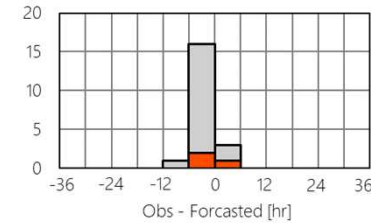
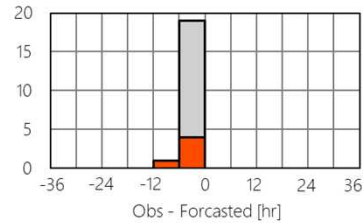
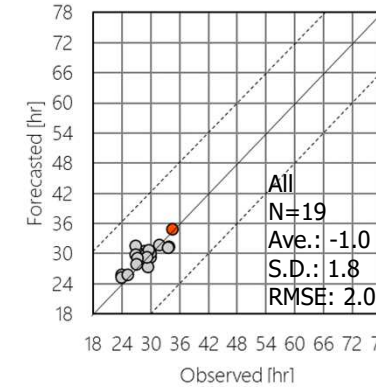
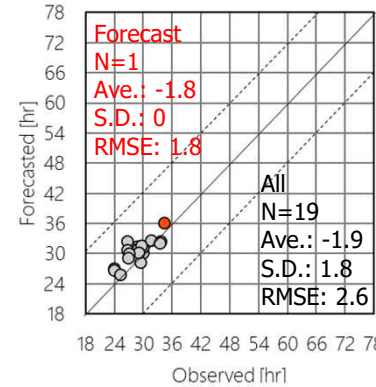
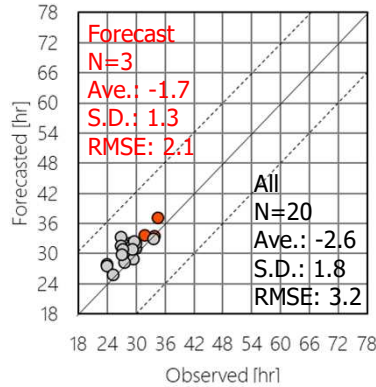
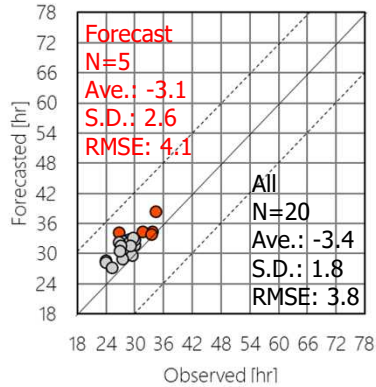
3.0倍

2.8倍

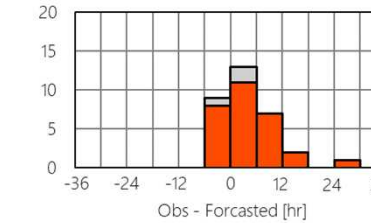
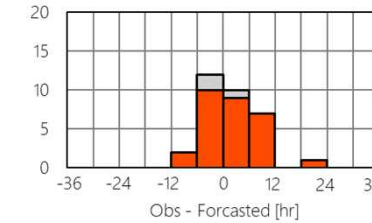
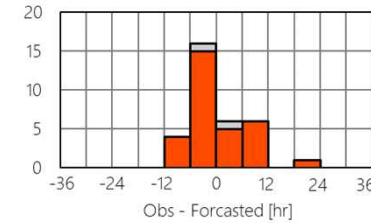
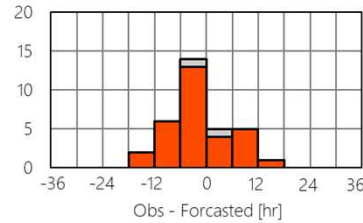
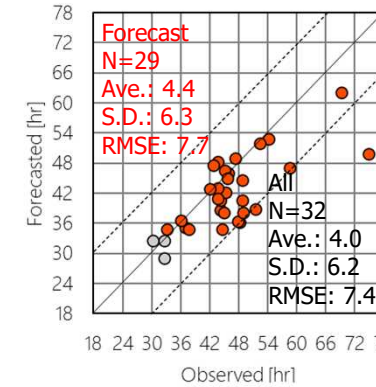
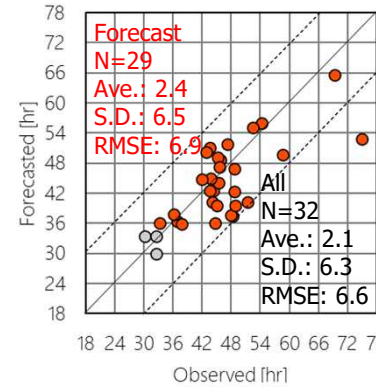
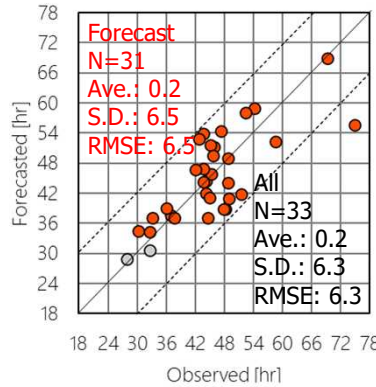
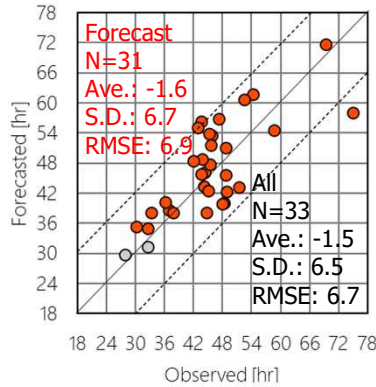
2.6倍

2.4倍

50 cmの津波高さを下回る時刻の予測結果



20 cmの津波高さを下回る時刻の予測結果



1960年チリ地震

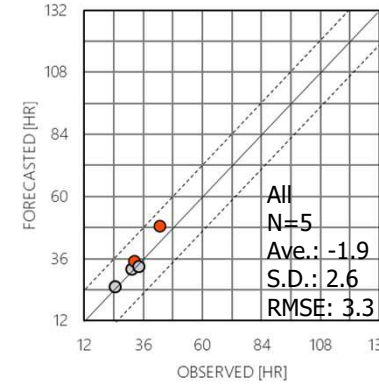
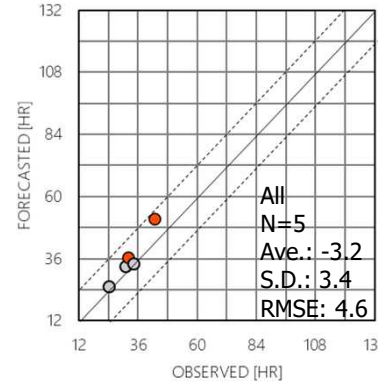
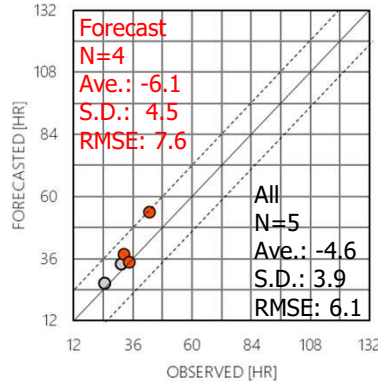
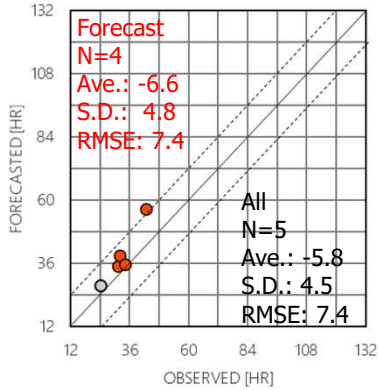
3.0倍

2.8倍

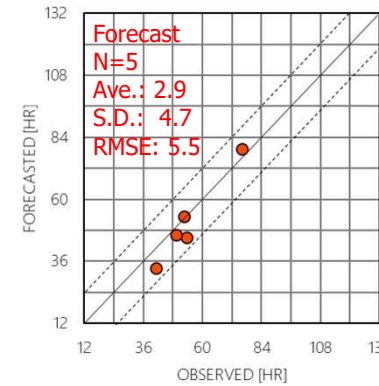
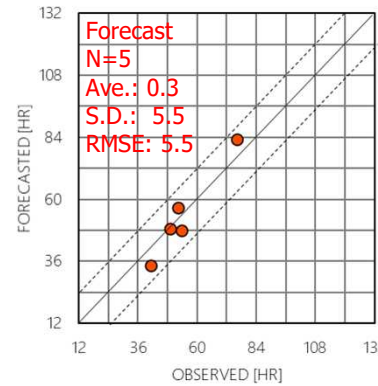
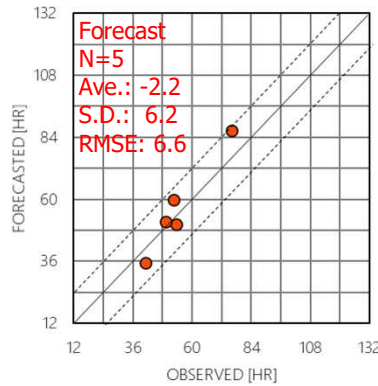
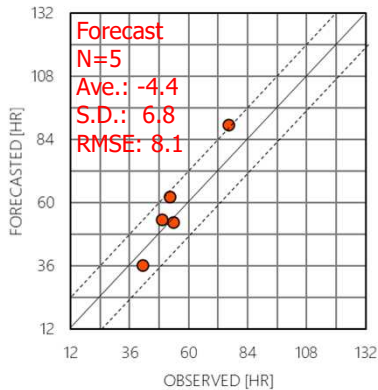
2.6倍

2.4倍

100 cmの津波高さを下回る時刻の予測結果



50 cmの津波高さを下回る時刻の予測結果



20 cmの津波高さを下回る時刻の予測結果

