

相似地震の確率予測実験 と成績検証

岡田正実(気象研、客員)

内田直希(東北大学)

高山博之(気象研究所)

謝辞:本研究には、データ交換で東北大学へ送られてきた北海道大学および東京大学の地震観測データを使用しています。

予測実験の背景・必要性

1. ベイズ統計対数正規分布モデルへの疑問

予測の有意性？（否定例：Kagan & Jackson, 1995）

普通の方法より成績は優れているのか？

2. 予測実験と成績検証

固有的地震の繰返しの裏付け？

→弾性反発説(Reid, 1910)

多数の予測と観測との比較 →相似地震

多様な方式の予測 →40方式で実施

予測の採点方法の選定 →成績の比較

3. 地震・火山噴火予知研究計画

4. 天気予報の歴史（例：斉藤・牧原, 2007）

確率予測実験の流れ図

解析データ

1993-06.6
相似地震:
93系列
地震5個以上
(余震が1/3未満)
平均M: 2.75以上

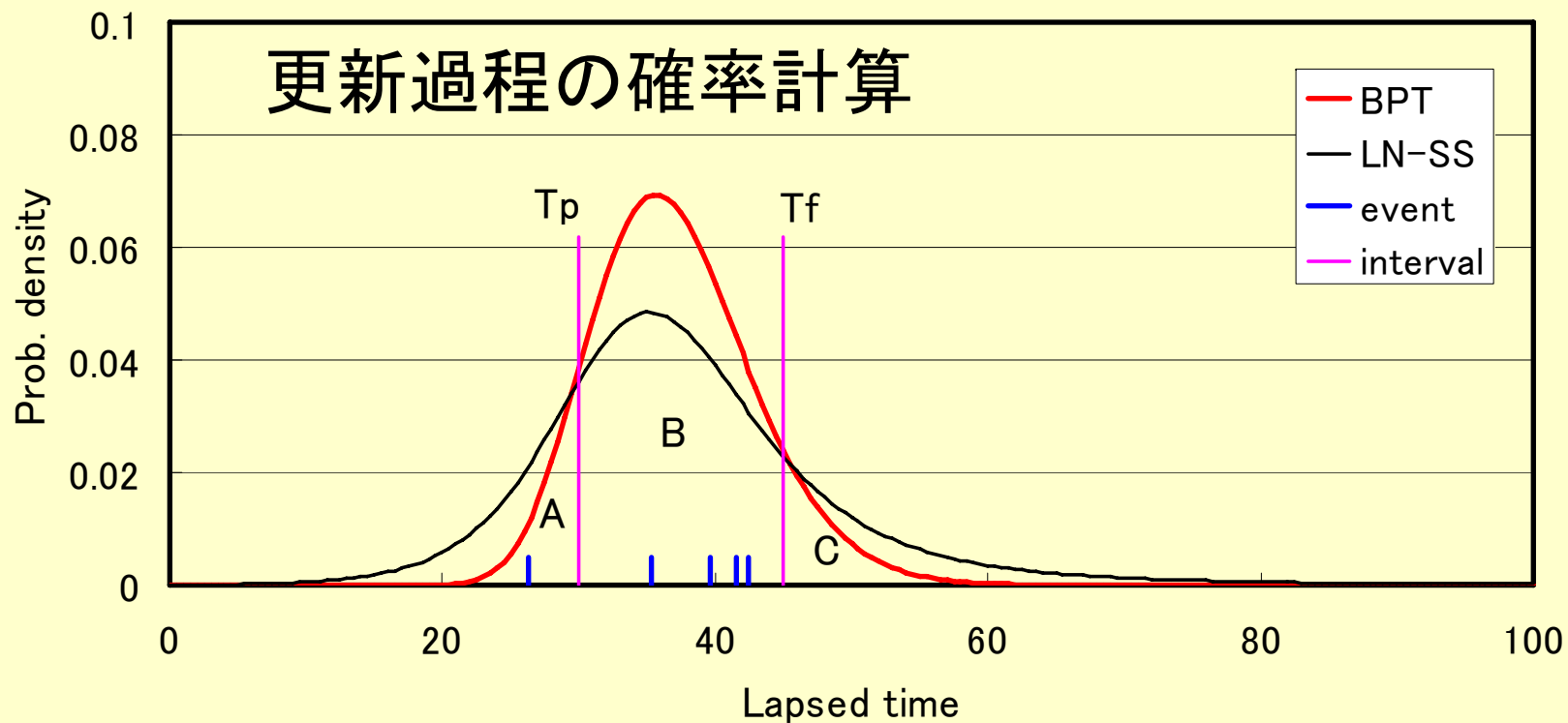
方式比較

40方式で予測
予測期間: (06.7~)
6, 12, 18月間
採点: 個数検定,
Brier score,
平均対数尤度など
成績: ベイズ統計LN
小標本論LN, 経過
時間考慮の最尤推
定(LN, BPT)
が良かった。

2008年予測

Poisson過程と、
成績が良かった
モデルで予測
する。
相似地震:
127系列
1993-07年の
データ使用

LN: 対数正規分布



$$\Pr = \frac{\Pr\{B\}}{\Pr\{B\} + \Pr\{C\}} = \frac{F(t_f; \mu, \sigma^2) - F(t_p; \mu, \sigma^2)}{1 - F(t_p; \mu, \sigma^2)}$$

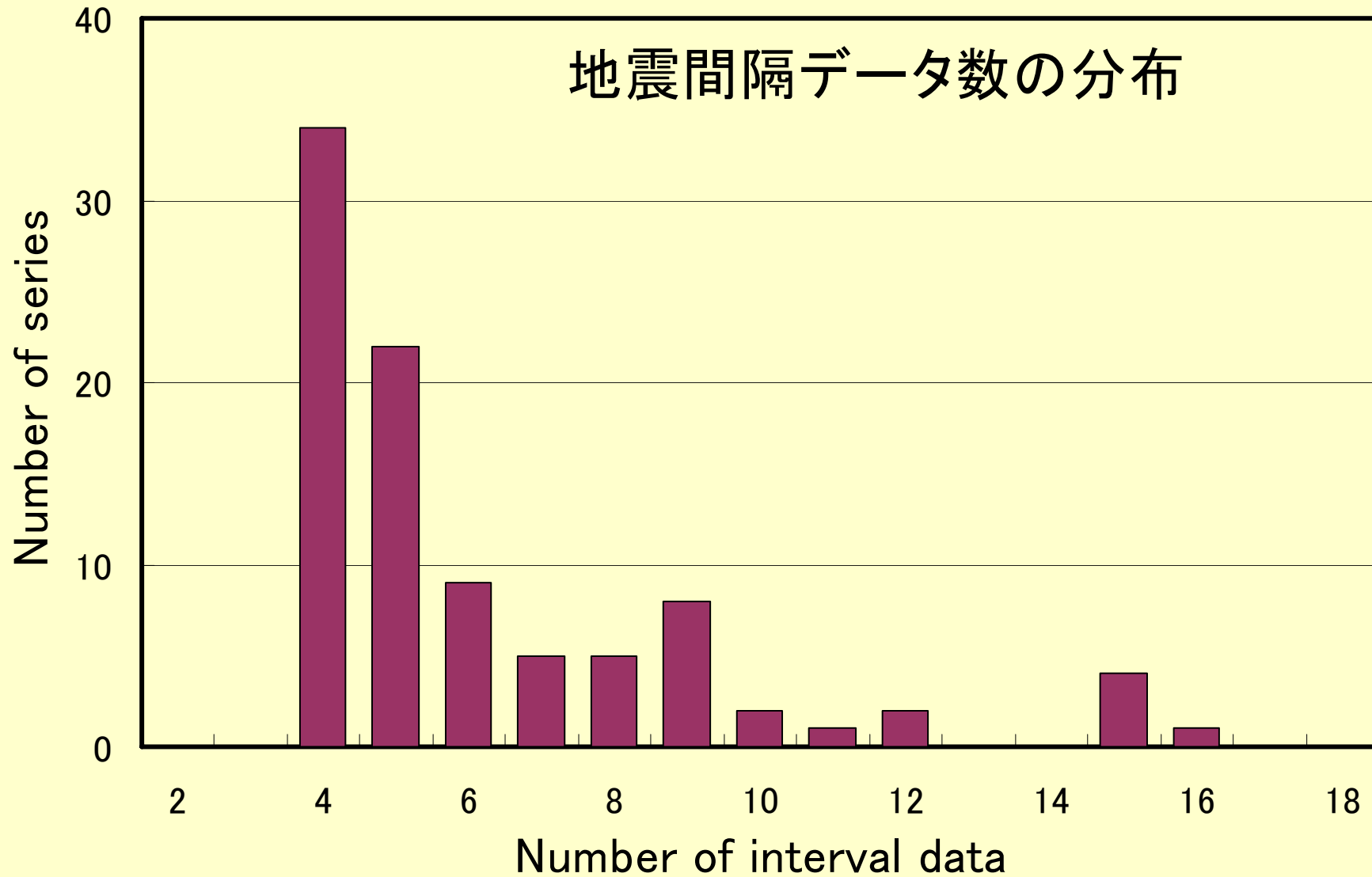
μ, σ^2 :
母集団の平均、
分散

代用式の例
(多数あり)

$$\Pr = \frac{F(t_f; \bar{t}, s^2) - F(t_p; \bar{t}, s^2)}{1 - F(t_p; \bar{t}, s^2)}$$

\bar{t}, s^2 :
標本の平均、
分散

データ数の分布



データの数が少ないので、予測確率が処理方式に強く依存する。

パラメータ推定法(大標本論)

- **最尤法** 3通りの尤度定義.

発生間隔 T_i , 最初の地震前と最後の地震後の空白期間 T_b , T_p .

[Davis *et al.* (1989), Ogata (1999)] .

$$\text{MLH-1: } L_1 = \prod_{i=1}^n f(t_i; \alpha, \beta)$$

$$\text{MLH-2: } L_2 = \{1 - F(T_p; \alpha, \beta)\} \prod_{i=1}^n f(t_i; \alpha, \beta)$$

$$\text{MLH-3: } L_3 = \{1 - F(T_b; \alpha, \beta)\} \{1 - F(T_p; \alpha, \beta)\} \prod_{i=1}^n f(t_i; \alpha, \beta)$$

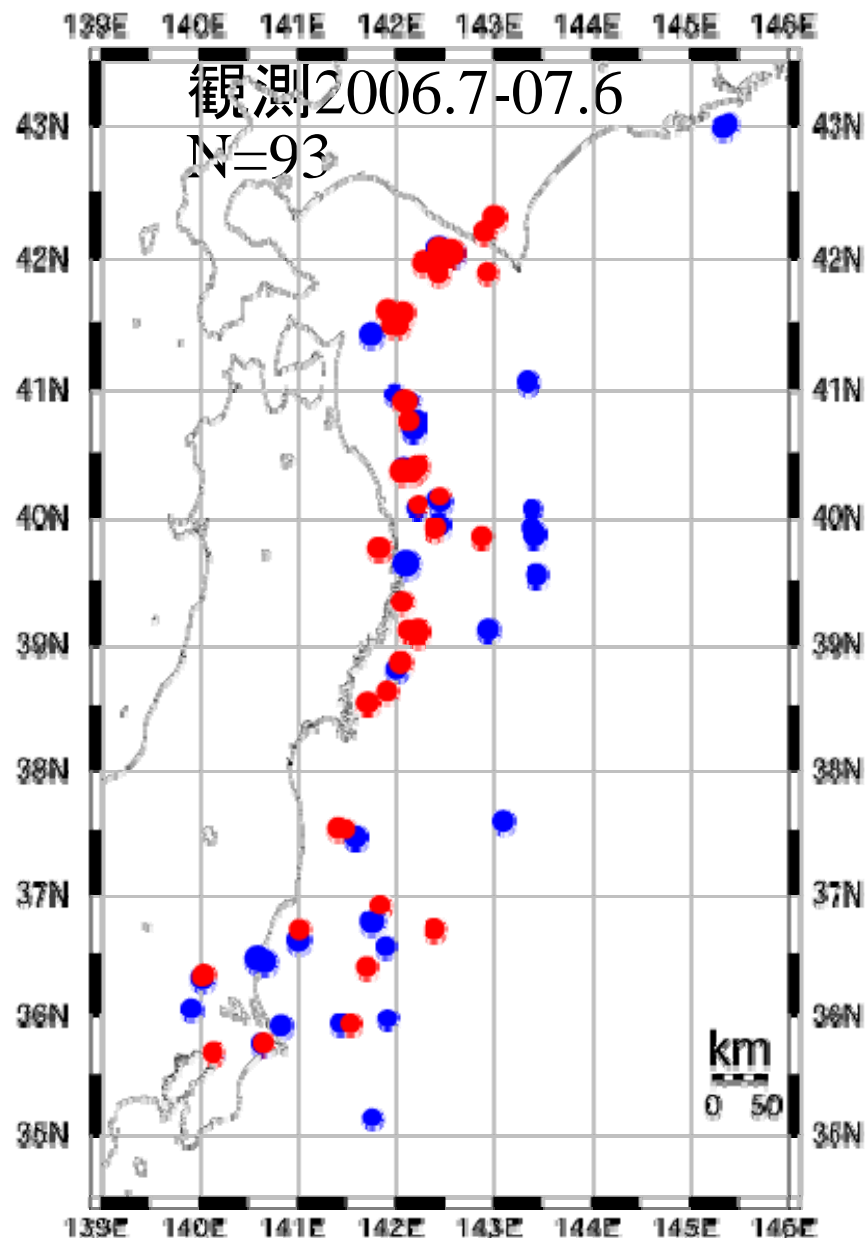
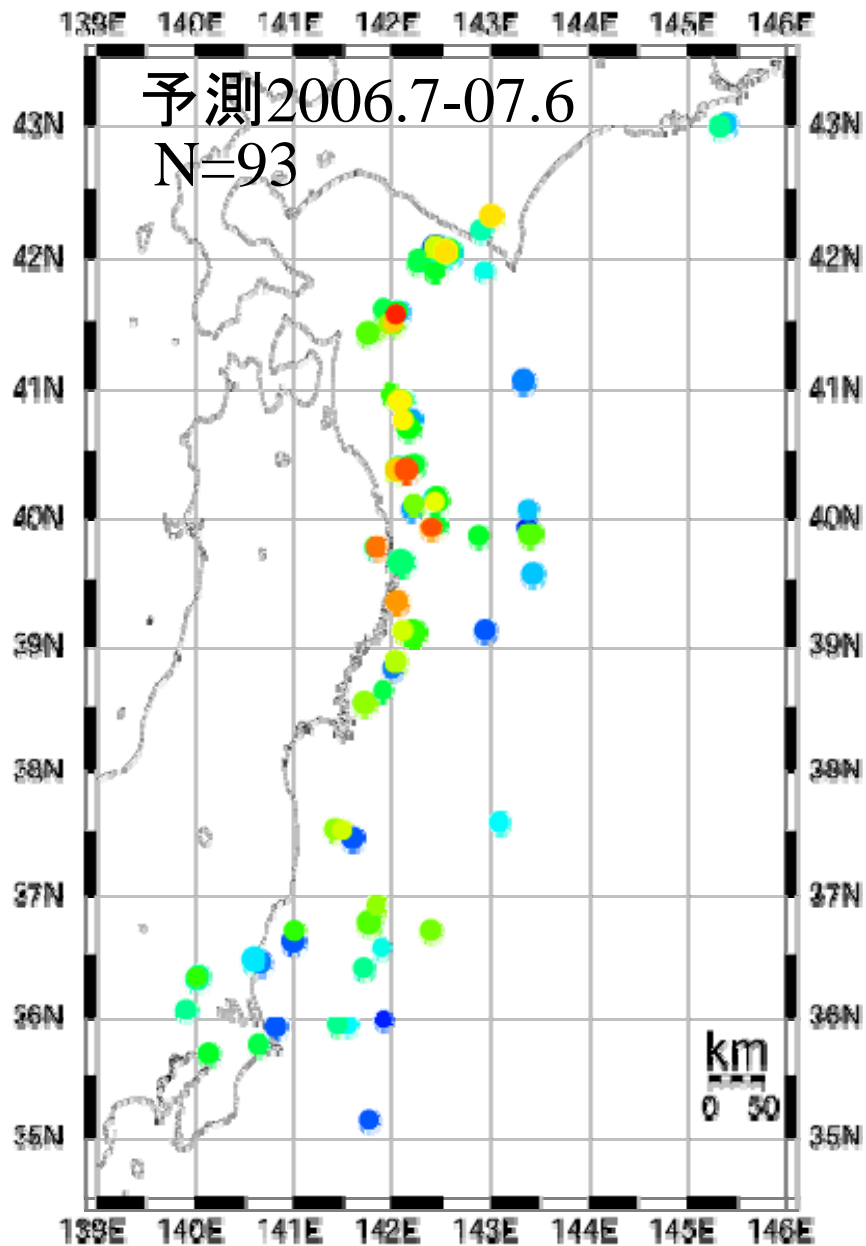
- **モーメント法**

標本の分散の3通り (標本分散 sd^2 , 不偏分散 u^2 、不偏標準偏差の2乗 us^2) が考えられる.

計算方式一覧(更新過程、40方式)

	母数		分布の名称							
	$\theta 1$	$\theta 2$	ポアソン	指数	正規	対数正規	BPT	ガンマ	ワイブル	二重指数
	個別	無	○	○						
	共通	無	○	○						
大標本										
MLH-1	個別	個別			○	○	●	++	○	○
MLH-2	個別	個別			++	●	●	++	++	
MLH-3	個別	個別			++	++	++	++	++	
Moment	個別	sd^2			(○)	(○)	○	○		
Moment	個別	u^2			○	○	○	++		
Moment	個別	us^2			○	○				
	個別	共通			○	○	○	○	○	○
	個別	共通(u^2)			○	○				
混合型	共通	不使用						○	○	○
小標本	不使用			○	○	○	×			
ベイズ	無情報(Jeffreys)		●		(○)	(○)	+			
ベイズ	一様	無情報2				○				
ベイズ	一様	無情報3				○				
ベイズ	一様	(逆ガンマ)				○	+			

40方式(括弧付きを含む). 赤丸:最近追加, ++:近日中に追加予定, +:計算には多重数値積分が必要であり, Excelでは処理困難、×:処理困難. MLH, sd^2 などの記号は前のスライド参照.



● : event ● : no event

採点法

(1)

▪ **Brier score** : $(Pq - Ev)^2$ の平均

Pq は予測した地震発生確率、 Ev は地震の有(1)または無($Ev=0$)を表す。ただし、条件付確率が計算できないほど集積確率が多い(99.999%以上)ときは、モデル不適當(false)とする。Falseが同数以下であれば、**Brier score**の小さい方が良い予測である。

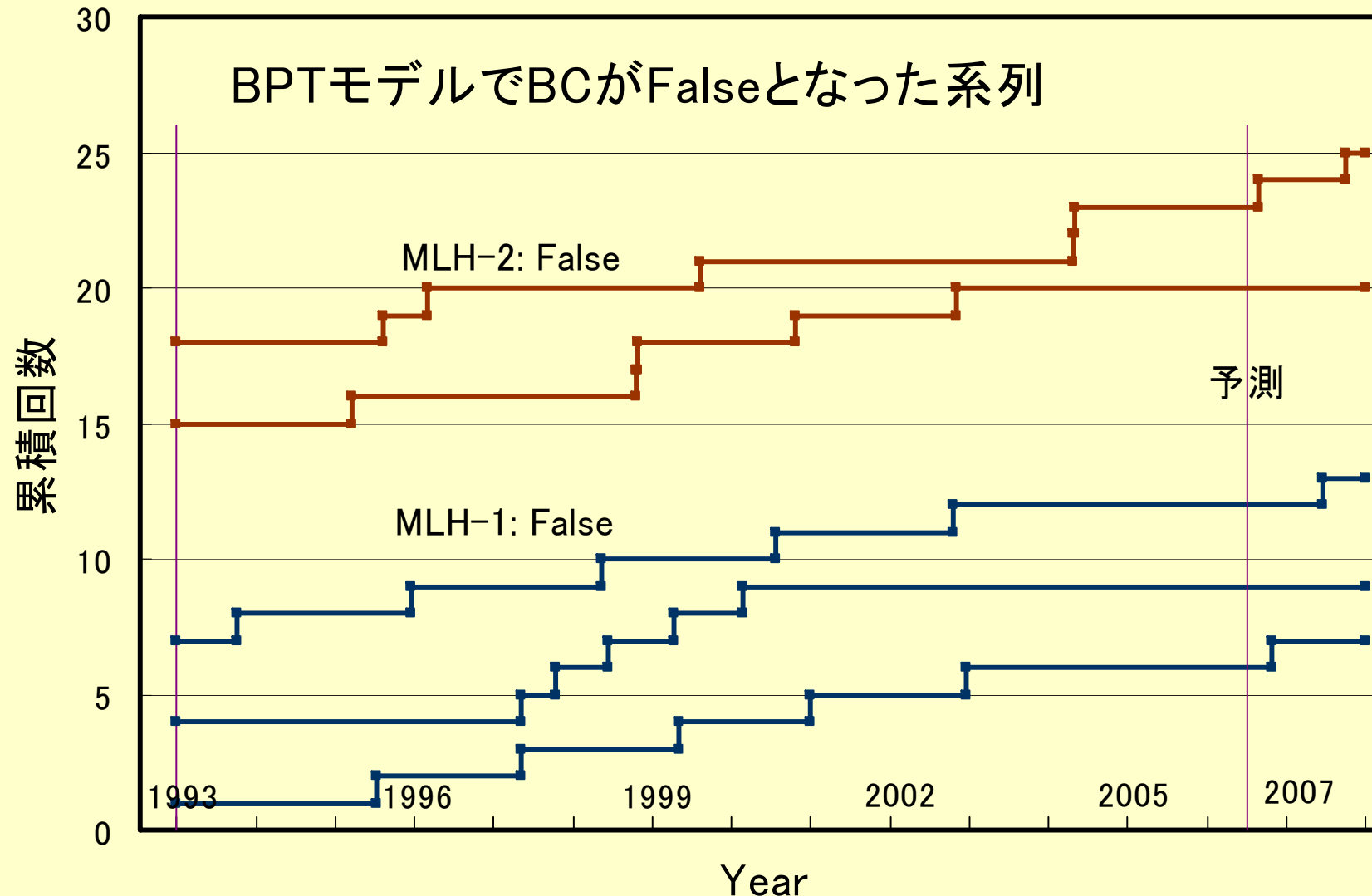
▪ **平均対数尤度** : $Ev * \ln(Pq) + (1 - Ev) * \ln(1 - Pq)$
の平均。

ただし、予測時の集積確率が99.999%以上、発生確率が99.999%以上または発生確率が0.001%以下のときは、モデル不適當(false)とする。Falseが同数以下であれば、平均対数尤度の大きい方が良い予測である。

採点法 (2)

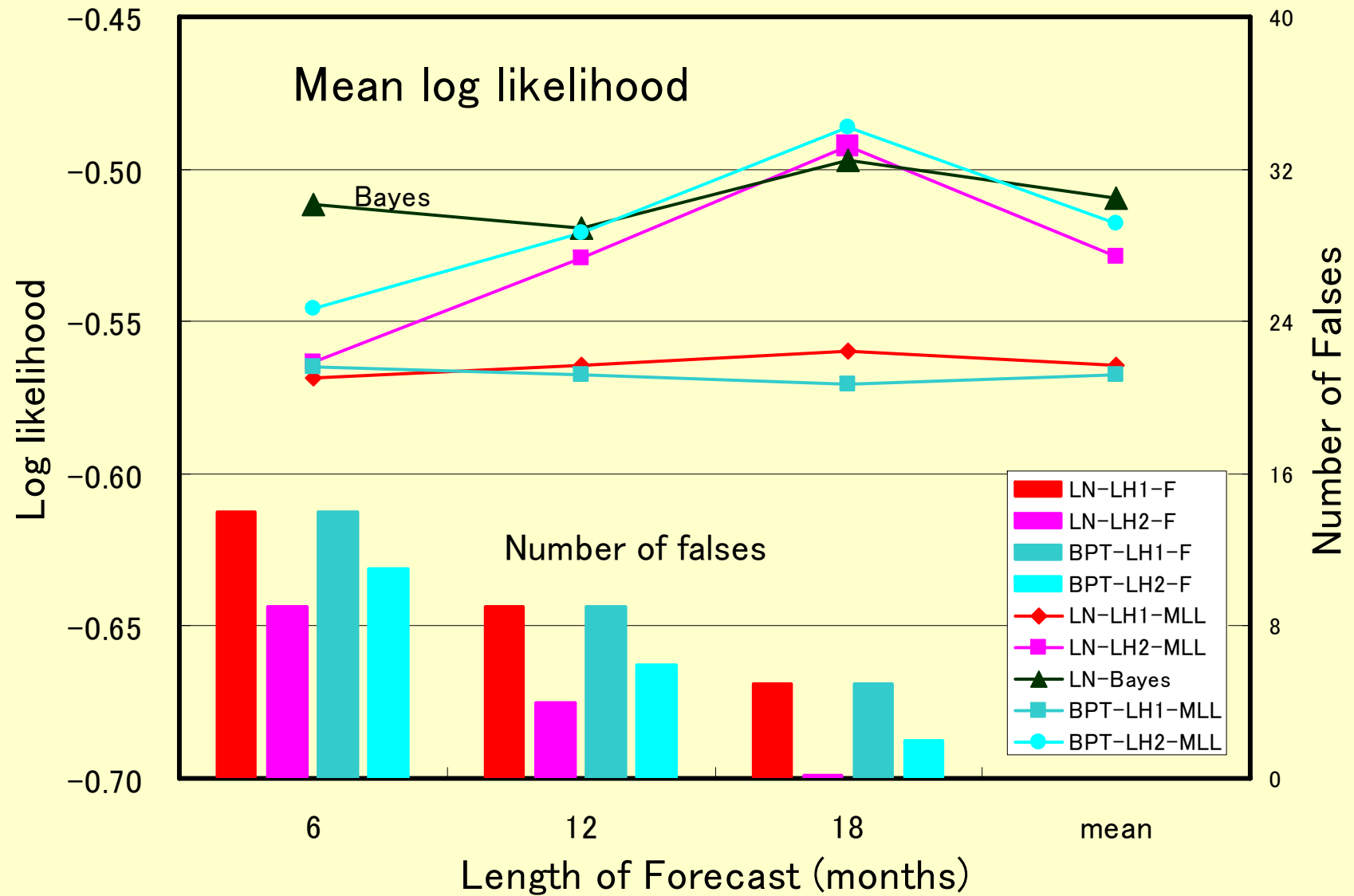
- **適用性** : モデル不適當 (False) は少ない方がよい。
- **個数検定 (N-test)** : 観測データと比較し、予測確率の全体的な過大・過小を調べる。
- **尤度比検定 (R-test)** : 帰無仮説 (ポアソン過程) の尤度と比較して、確率予測の有効性を確かめる。ポアソン過程の尤度は最良の方式の値を使用する。
- **適合度検定** : χ^2 乗検定などで、予測確率の分布の適合度を調べる。

BPT False例

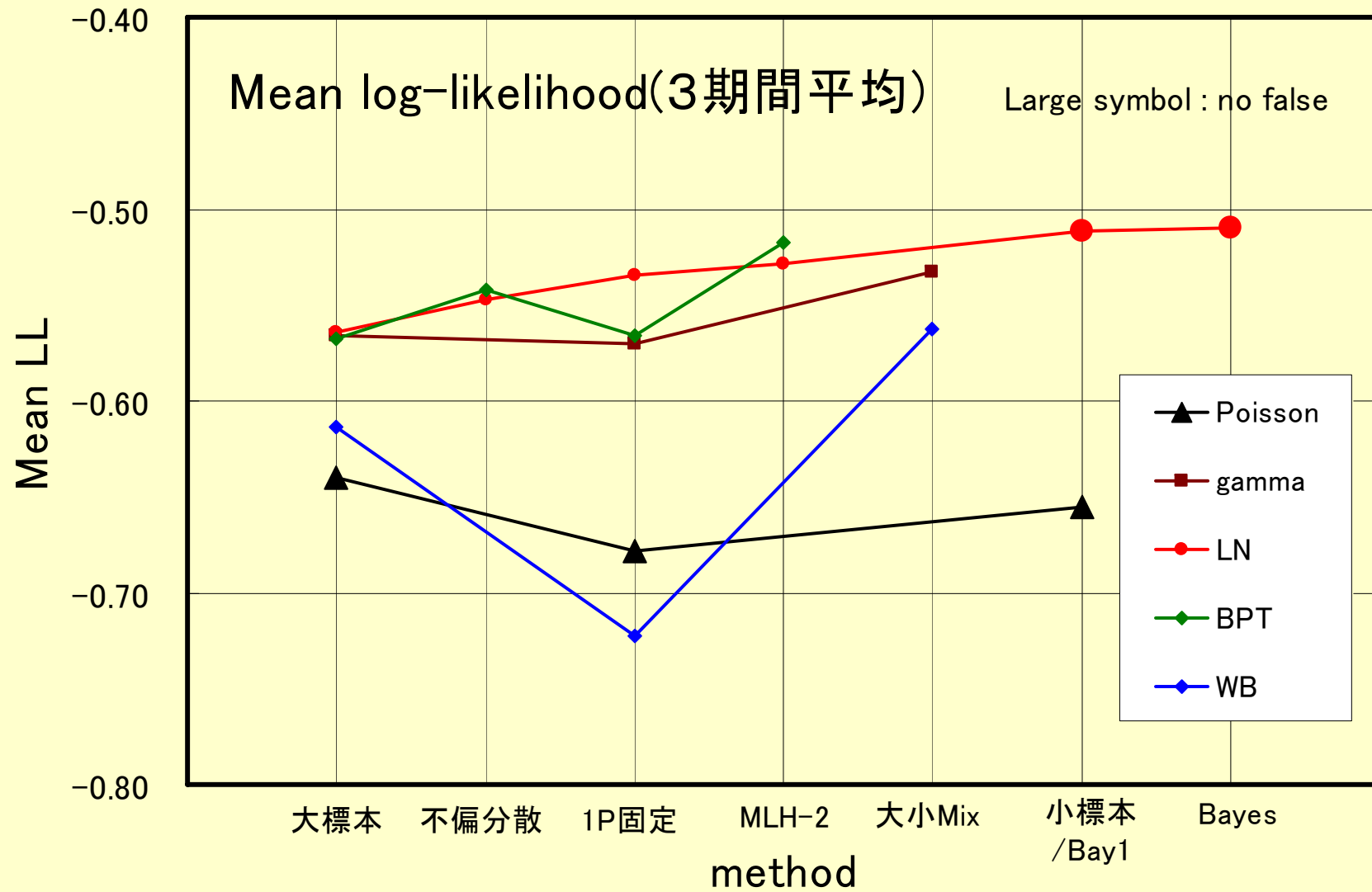


上2例は、続発したものがあり、MLH-2では母数が求まらないが、MLH-1なら確率計算できる。下3例は、最後の空白時間が長すぎて、MLH-1では確率計算できないが、MLH-2では計算できる。

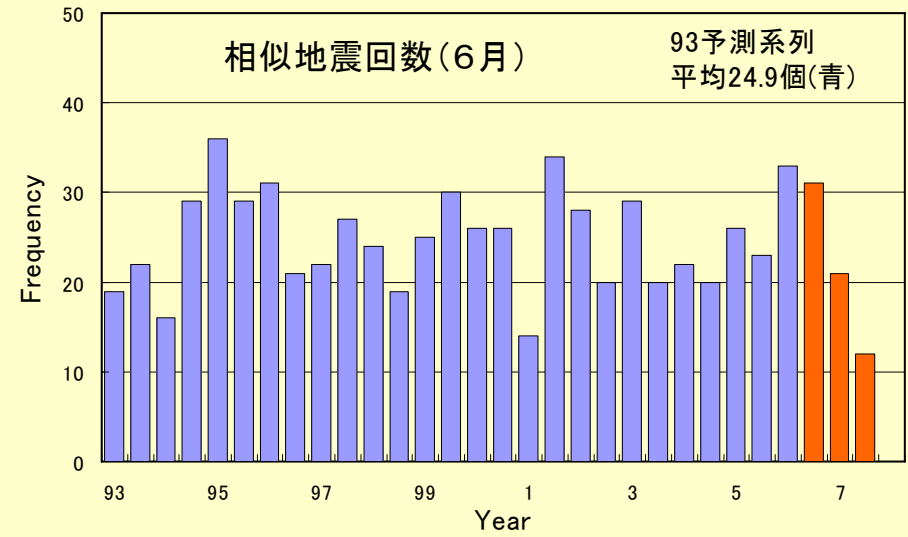
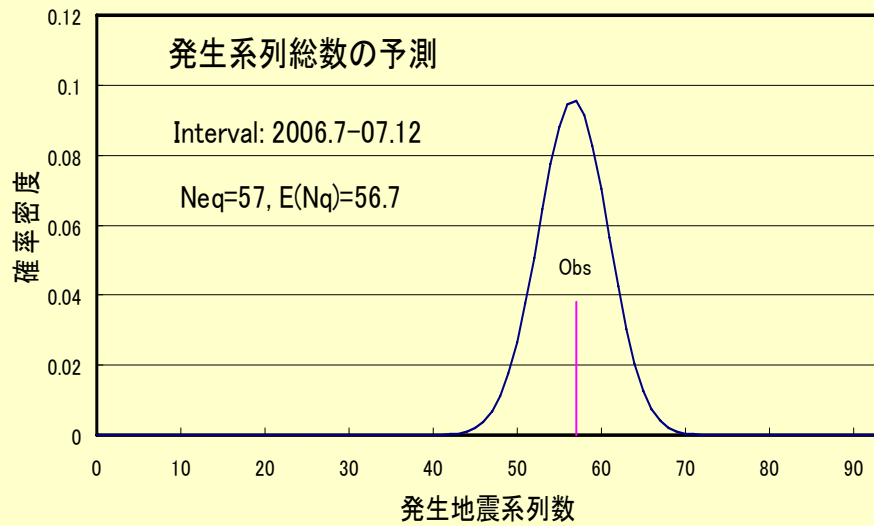
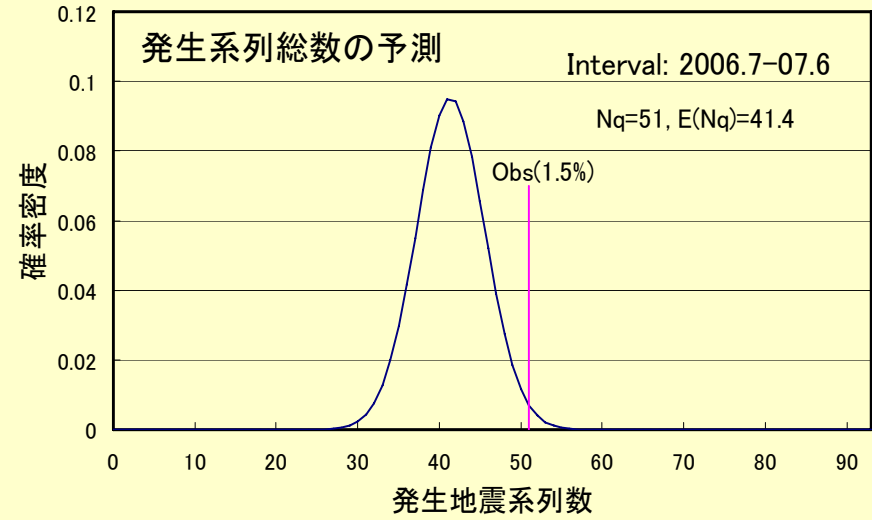
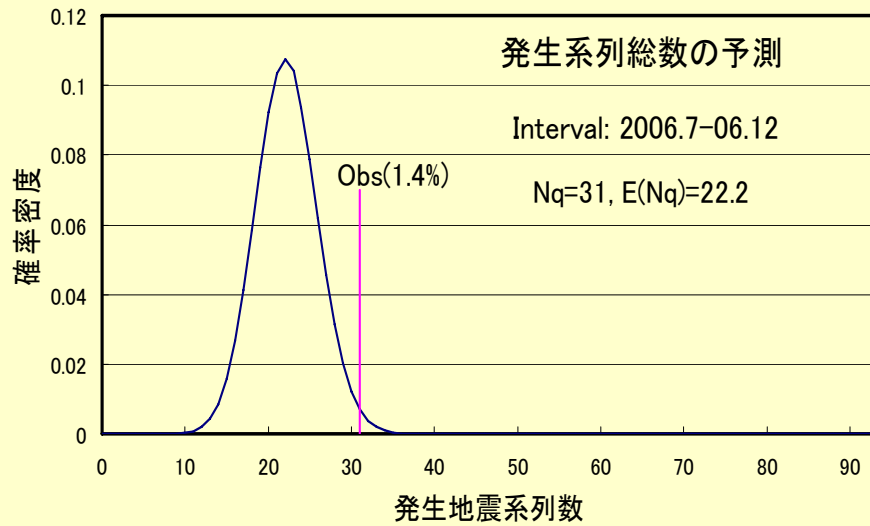
MLH-1とMLH-2のMLL・False数の比較



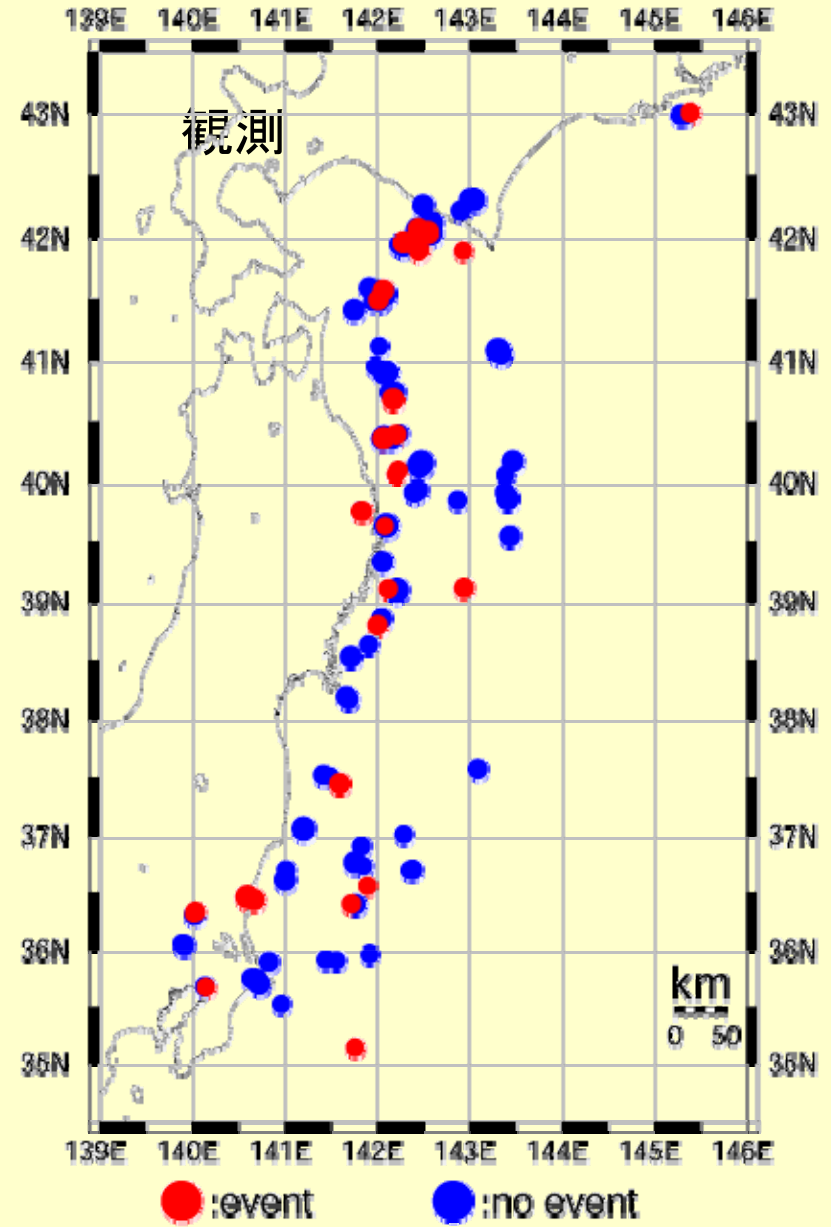
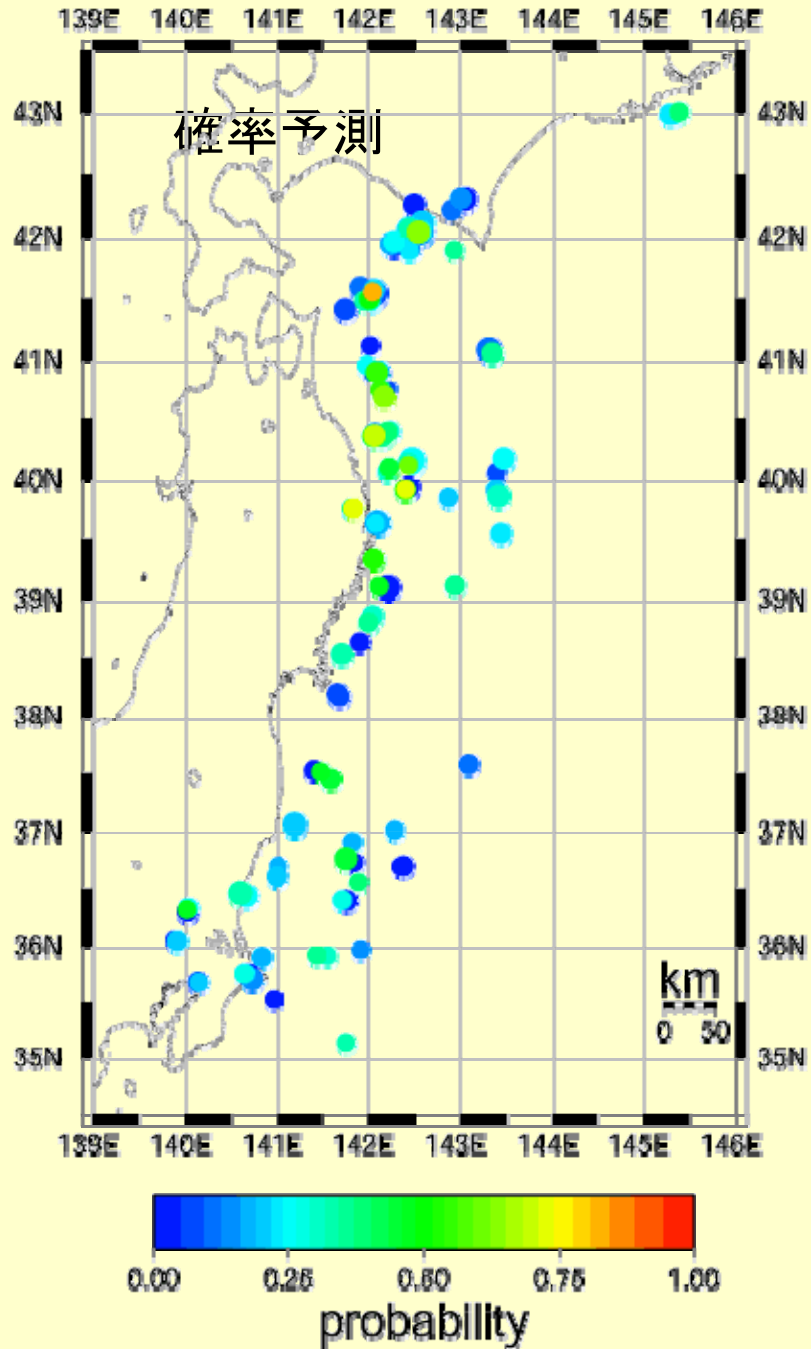
MLLの方式比較



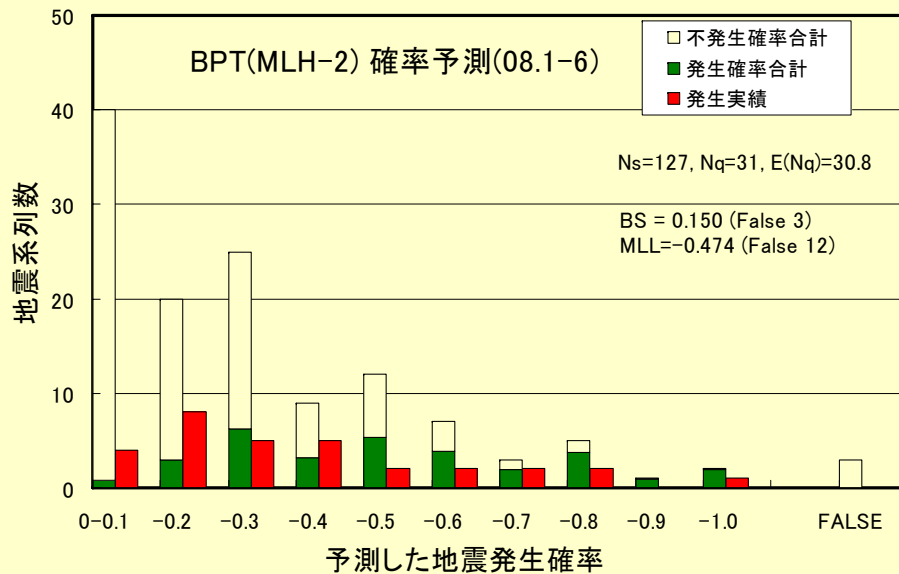
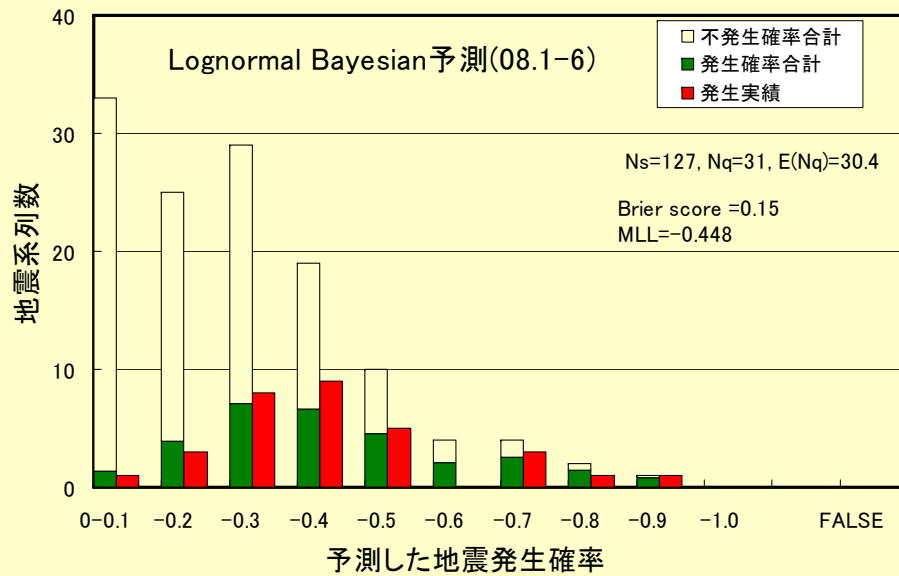
個数検定(ベイズ統計対数正規分布)



2008年1-6月の予測と結果



2008年1-6月相似地震確率予測



確率分布	方法	平均対数尤度		Brier スコア	
		MLL	F	BS	F
LN	MLH-2	-0.462	10	0.145	0
LN	小標本論	-0.424	0	0.142	0
LN	ベイズ	-0.448	0	0.150	0
BPT	MLH-2	-0.474	12	0.150	3

LN: 対数正規分布、BPT: BPT分布

まとめ

- 相似地震93系列について、40方式で6月、12月、および18月間の発生確率予測を行い、成績比較を行った。
- ベイズ統計対数正規分布モデルは、対数尤度の平均で成績が最も良く、統計的に有意であった。しかし、個数検定の成績は余り良くない。**事前分布は再検討を要する。**
- 尤度に空白期間を考慮すると、成績が向上する。
- 2008年の確率予測を127系列で行っている。6月までの成績は小標本論対数正規分布が最良であった。
- 今後も予測実験を継続し、計算方式の追加、モデル改良、精度向上などの方法を検討したい。
- 【参考】BPT分布は、対数正規分布と比べて、成績が劣る訳ではないが、扱いづらい。
- 【参考】予測のHP公開は準備中。