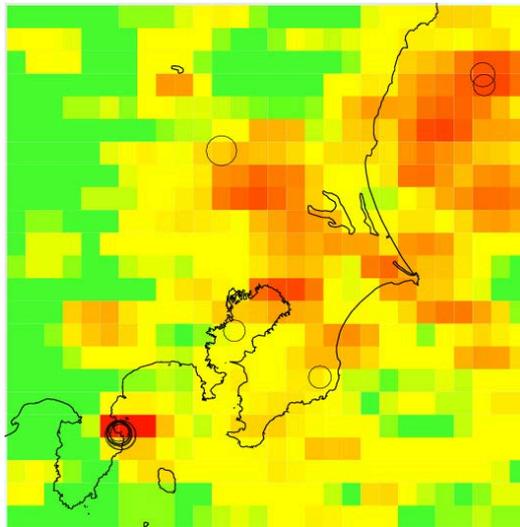


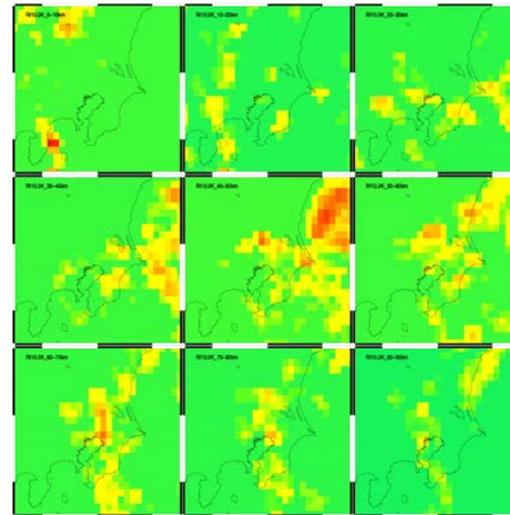
d. 首都圏の過去の地震活動に基づく 地震活動予測手法の確立

東京大学地震研究所

2D: 0-100km



3D: 0-90km



課題の目的と実施計画

d. 首都圏の過去の地震活動に基づく地震活動予測手法の確立

過去に発生した地震の活動から将来の地震活動を予測する統計地震学的手法を発展させた新たな地震活動予測手法を提案する。そのために首都圏の過去の地震活動に最適化した時空間的に高分解能かつ高精度な地震活動予測アルゴリズムを開発する。またそれらのアルゴリズムを評価・検証するための基盤構築を行い、地震活動予測の実験を行って、地震活動予測手法の妥当性を検証する。

→首都圏の地震発生予測モデルの3次元化

【事業計画】

- 2012年 地震活動予測手法を評価・検証するための基盤を国際プロジェクトであるCSEPにより開発されている最新のソフトウェアを導入し構築する。関東地域における過去の地震活動を踏まえた3次元テスト領域の検討を進める。
- 2013年 首都圏の過去の地震活動を含む複数の地震カタログに対するコンプリートネスマグニチュード等の性能評価実験を実施するとともに、階層的時空間ETASモデルを基にした3次元地震活動予測モデルのプロトタイプを開発する。関東地域における3次元テスト領域を完成させる。
- 2014年 2013年に構築した地震活動予測モデルと3次元テスト領域に対してレトロスペクティブな1日、3ヶ月、1年、3年テストクラスの検証実験を行うとともに、プロスペクティブな検証実験を開始する。
- 2015年 1cにより構築された南関東において過去に発生した大地震の新たな時系列モデルを取り込み、地震活動予測アルゴリズムの高精度化をはかる。2014年に引き続いて、地震発生予測実験を行う。
- 2016年 1cと連携するとともに、これまでに実施した地震発生予測検証実験をまとめ、首都圏の過去の地震活動に基づく地震活動予測手法を確立する。

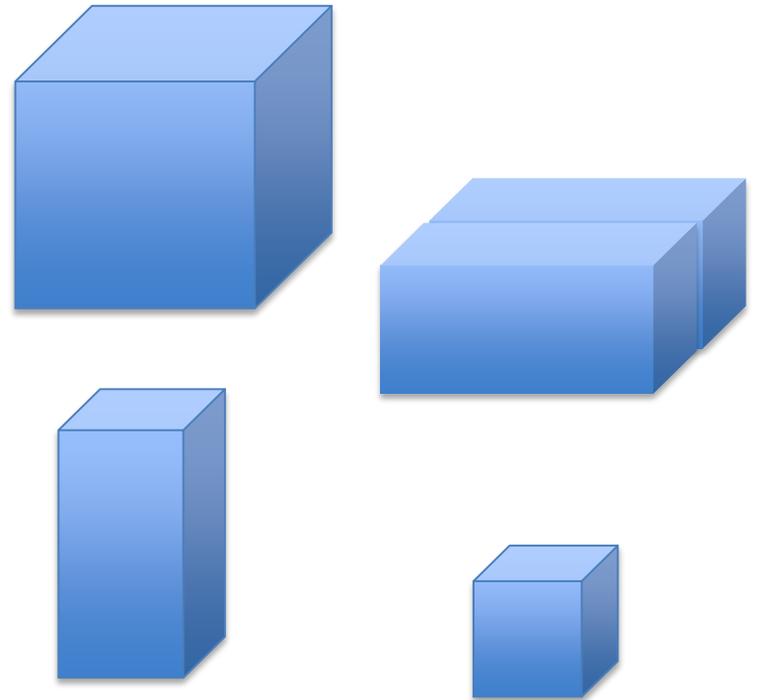
報告内容

- 3次元テスト領域のさらなる検討
- 3次元予測モデルの評価プログラムの開発
- 検証実験の準備

テスト領域の空間解像度

- 水平方向 0.1° , 0.05°
- 深さ方向 10km, 5km

1. $0.1^\circ \times 0.1^\circ \times 10\text{km}$
2. $0.1^\circ \times 0.1^\circ \times 5\text{km}$
3. $0.05^\circ \times 0.05^\circ \times 10\text{km}$
4. $0.05^\circ \times 0.05^\circ \times 5\text{km}$



関東地域における三次元テスト領域の決定(昨年度運営委員会以降)

【目的】 3ヶ月、1年の予測期間におけるグリッドサイズの決定

【方法】

- RI球モデルを使用し、表1の条件で学習を予測を行わせる
- 予測結果を情報利得により評価する
- 情報利得が良い空間グリッド（水平グリッドと深さグリッドの組合わせ）を三次元テスト領域の候補と考える

表1. 3ヶ月予測の条件

	学習条件	予測条件
	関東地域 (Lon138.5-141.5, Lat34.5-37.0, Dep0-100km)	
空間	<ul style="list-style-type: none"> • RI 球モデル • 平滑化半径 1-100km 	0.025° x0.025° x 2.5km 0.050° x0.050° x 5km 0.100° x0.100° x10km 0.250° x0.250° x25km 0.500° x0.500° x50km
期間	1998/1/1～予測開始日の前日	①2009/11/01～2010/02/01 ②2010/02/01～2010/05/01 ③2010/05/01～2010/08/01 ④2010/08/01～2010/11/01 ⑤2010/11/01～2011/02/01
規模	2.5 - 9.0 (b値 0.9)	4.0 - 9.0

関東地域における三次元テスト領域の決定(昨年度運営委員会以降)

【目的】 3ヶ月、1年の予測期間におけるグリッドサイズの決定

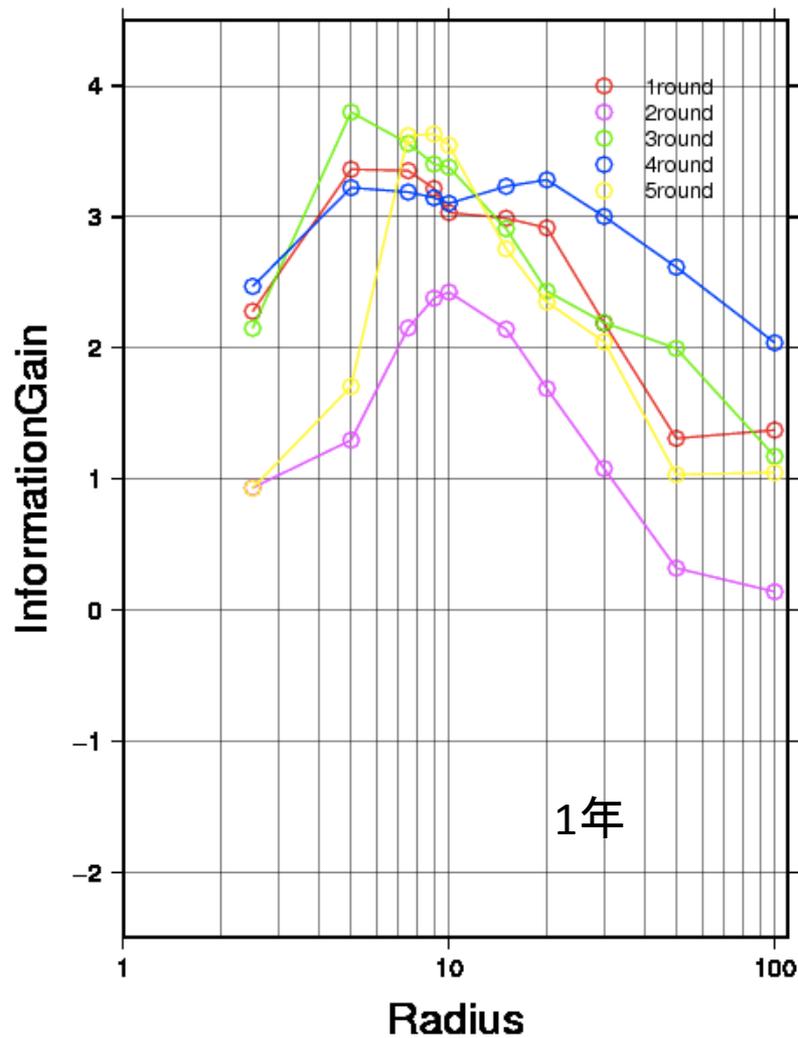
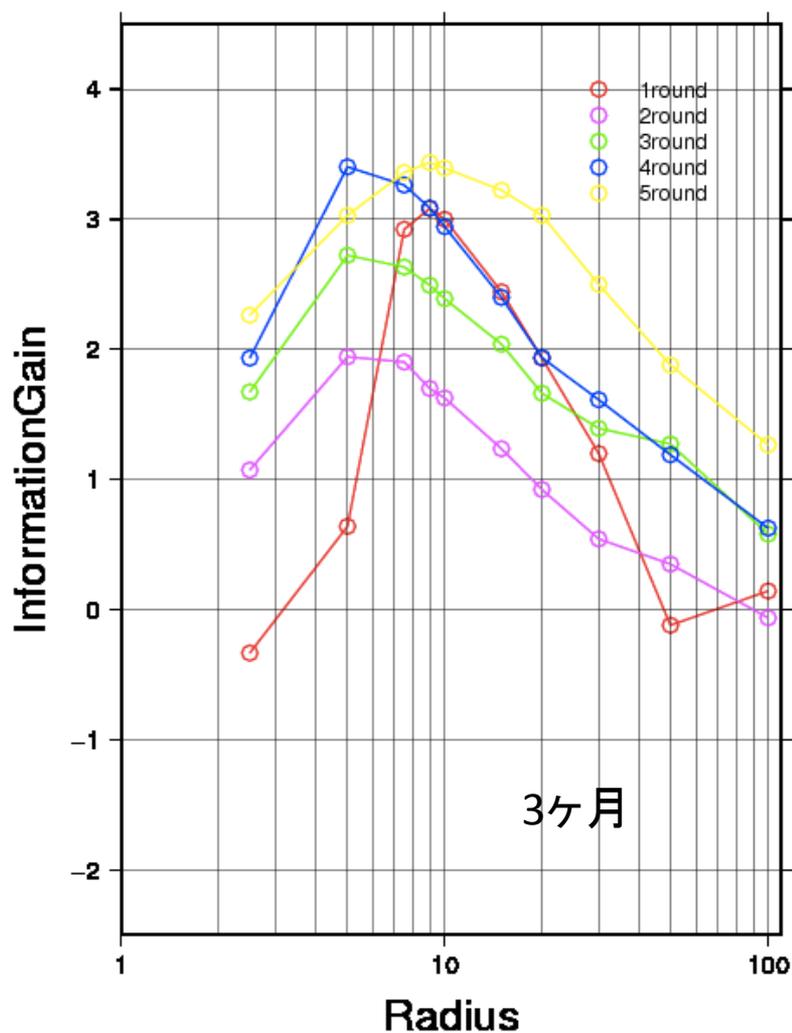
【方法】

- RI球モデルを使用し、表1の条件で学習を予測を行わせる
- 予測結果を情報利得により評価する
- 情報利得が良い空間グリッド（水平グリッドと深さグリッドの組合わせ）を三次元テスト領域の候補と考える

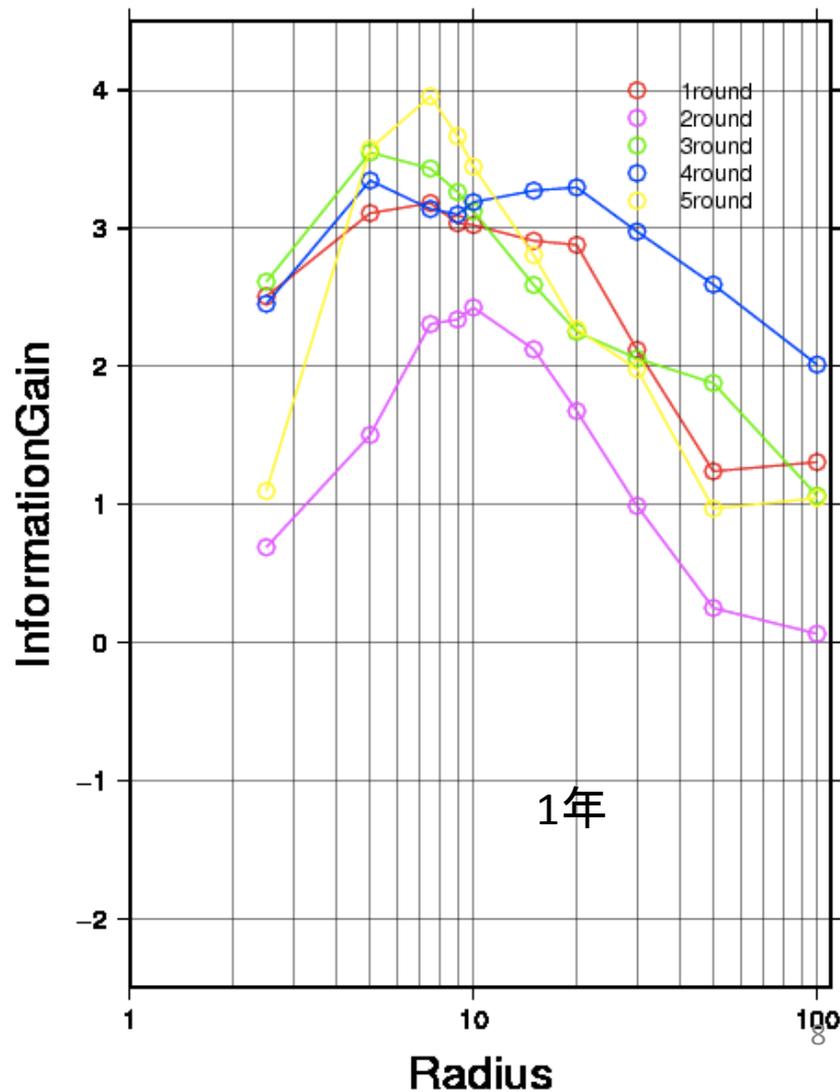
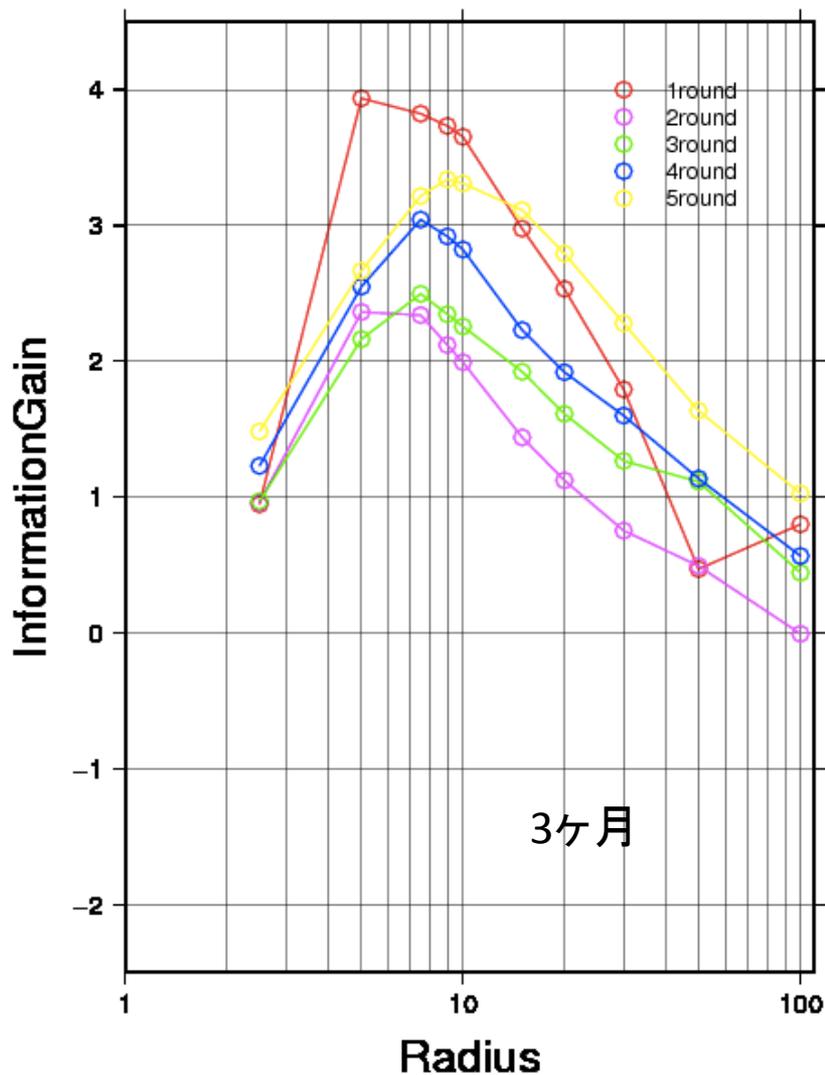
表1. 1年予測の条件

	学習条件	予測条件
	関東地域 (Lon138.5-141.5, Lat34.5-37.0, Dep0-100km)	
空間	<ul style="list-style-type: none"> • RI 球モデル • 平滑化半径 1-100km 	0.025° x0.025° x 2.5km 0.050° x0.050° x 5km 0.100° x0.100° x10km 0.250° x0.250° x25km 0.500° x0.500° x50km
期間	1998/1/1～予測開始日の前日	①2005/11/1～2006/11/1 ②2006/11/1～2007/11/1 ③2007/11/1～2008/11/1 ④2008/11/1～2009/11/1 ⑤2009/11/1～2010/11/1
規模	2.5 - 9.0 (b値 0.9)	5.0 - 9.0

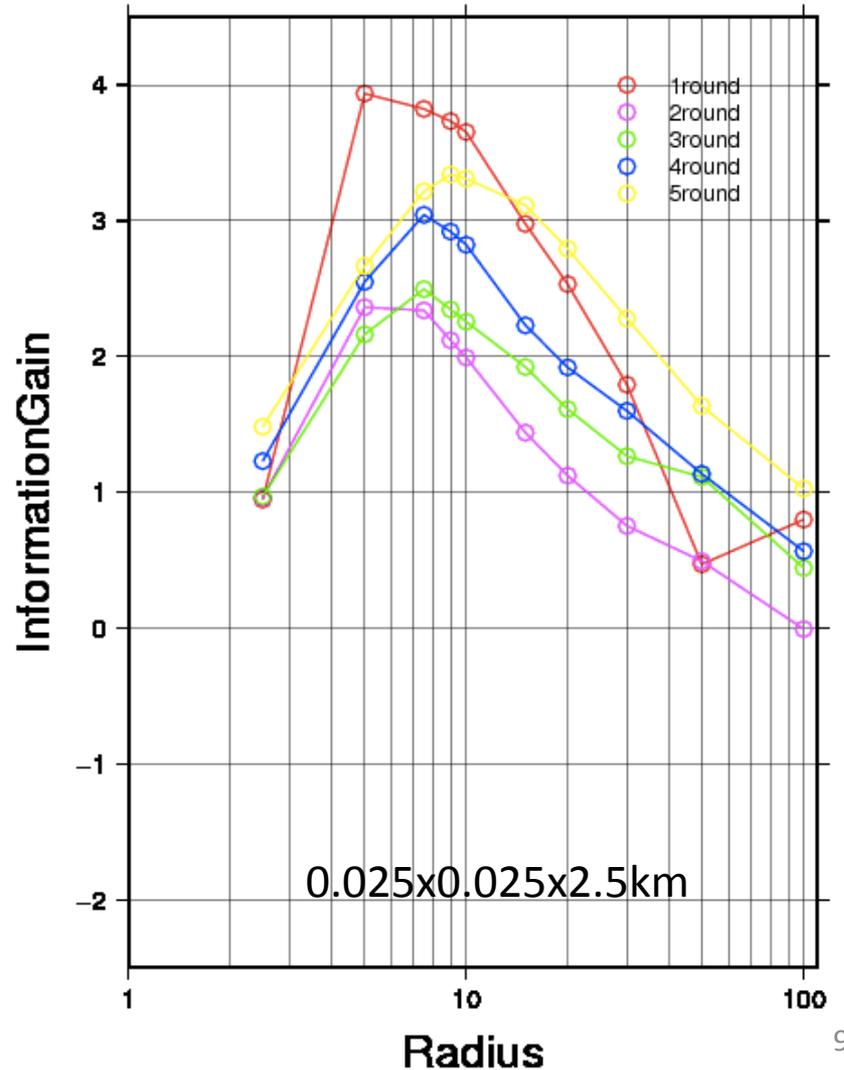
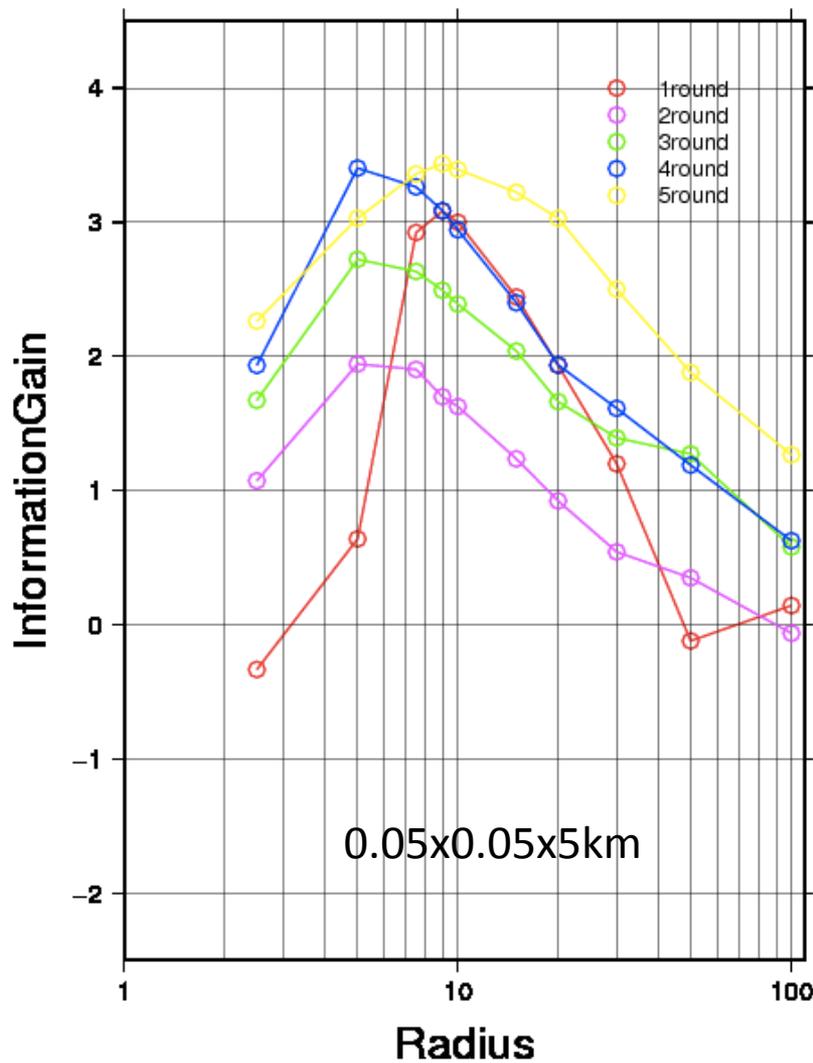
3ヶ月、1年予測の平滑化半径と情報利得 (0.05x0.05x5kmメッシュサイズ)



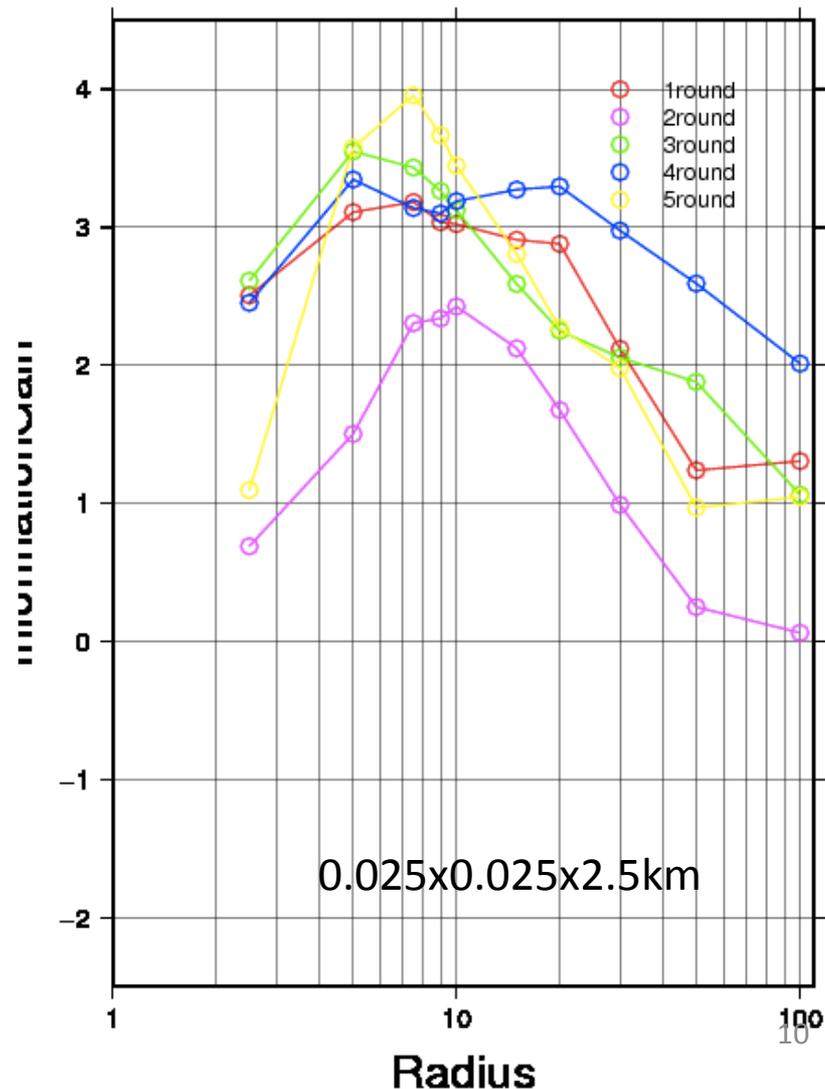
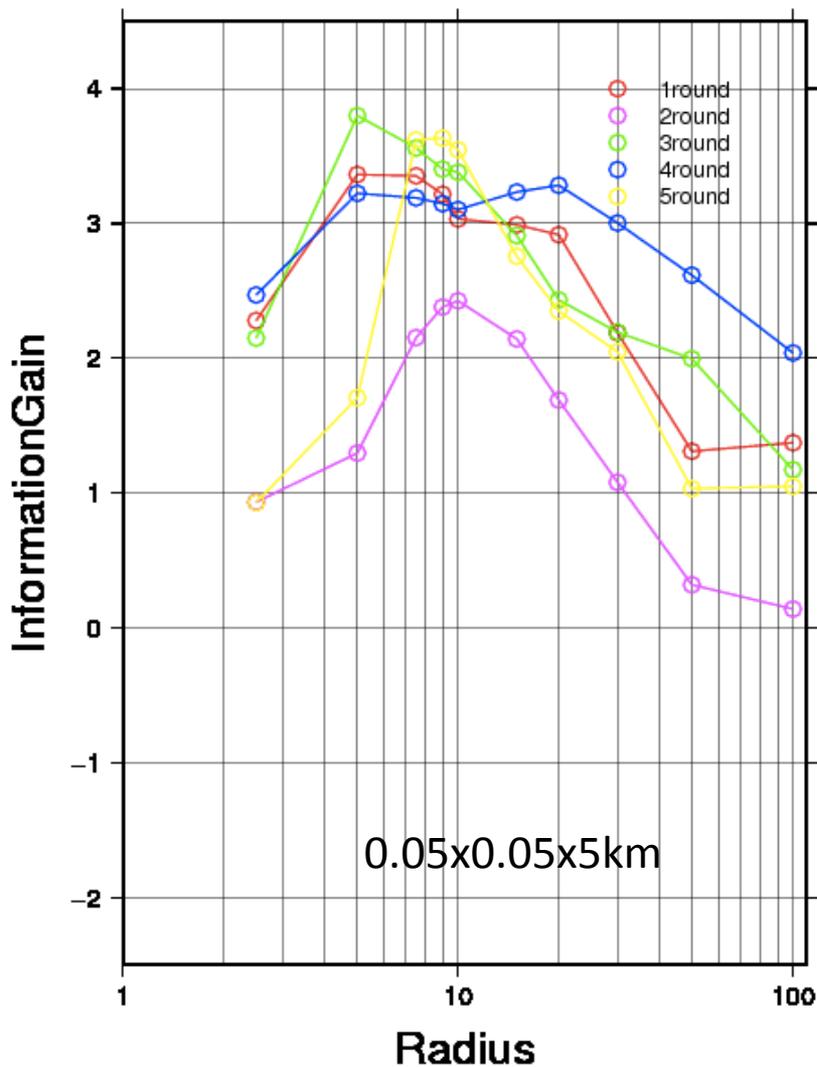
3ヶ月、1年予測の平滑化半径と情報利得 (0.025x0.025x2.5kmメッシュサイズ)



3ヶ月予測の平滑化半径と情報利得 (0.025x0.025x2.5km vs 0.05x0.05x5km)



1年予測の平滑化半径と情報利得 (0.025x0.025x2.5km vs 0.05x0.05x5km)



関東地域における三次元テスト領域の決定

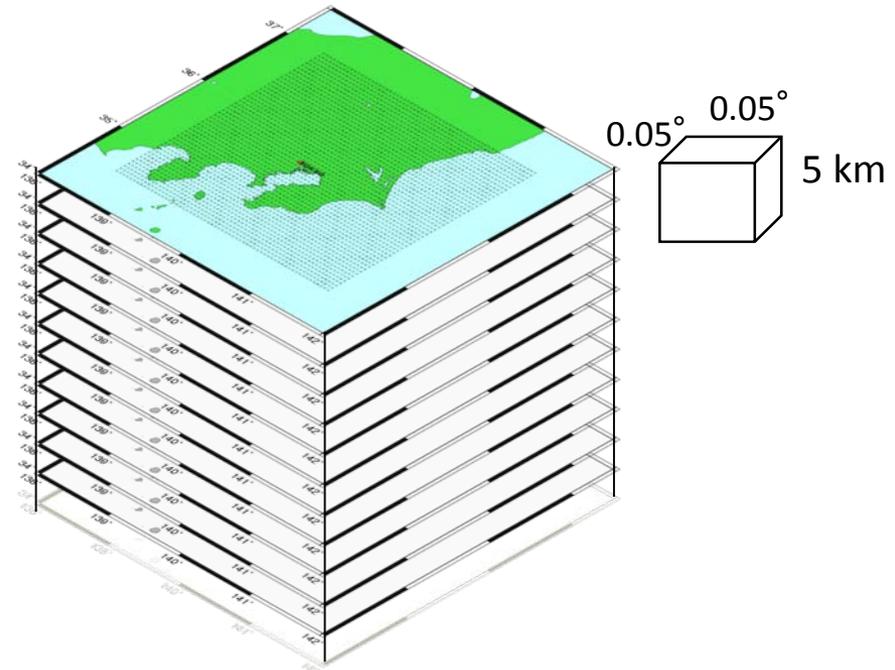
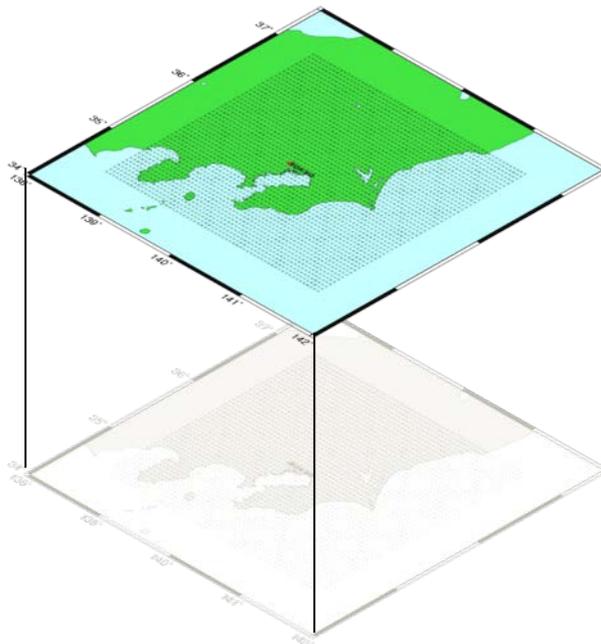
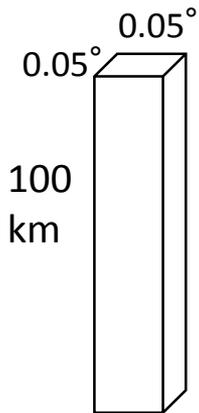
前回の運営委員会では、3ヶ月予測（マグニチュード4以上）に対して三次元テスト領域の調査を行い、 $0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ} \times 5\text{km}$ のグリッドサイズが良いと示した。その後の詳細な調査の結果、 $0.025^{\circ} \times 0.025^{\circ} \times 2.5\text{km}$ で、情報利得がよくなるラウンドが多いことがわかった。

また、他の予測期間（1年）についても三次元テスト領域の調査を行い、 $0.025^{\circ} \times 0.025^{\circ} \times 2.5\text{km}$ のグリッドサイズが良い結果を示した。

ただし、評価計算の効率性等を考慮し、三次元テスト領域のグリッドサイズは $0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ} \times 5\text{km}$ とした。

首都圏の地震発生予測モデル構築のためのテスト領域

	2D (CSEP)	3D(都市災害プロジェクト)
予測空間	CSEPのKanto region Lon138.5-141.5 Lat34.5-37.0 Dep0-100km	
分解能	0.05° x0.05° x 100km	0.05° x0.05° x5km



■平成26年度の計画

平成25年度に構築した地震活動予測モデルと3次元テスト領域に対してレトロスペクティブな1日，3ヶ月，1年，3年テストクラスの検証実験を行うとともに，プロスペクティブな検証実験を開始する。

	レトロスペクティブテスト(事後)	プロスペクティブテスト(事前)
	過去の地震に対して予測を行う	予測期間が始まる前に予測を行う
目的	モデルの最適パラメータ探索	モデルの予測能力の測定
長所	すでに起きた地震の情報が分かっているために、検証結果をすぐに得ることができる	モデラーは予測するときには予測期間中の地震の情報を知らないなので、本当の事前予測を行うことができる
短所	予測を行う前からモデラーが地震の情報を知っており、真の予測ではない	予測期間が終わるまで検証をすることができないので、結果を得るのに時間がかかる

3次元予測モデルの 評価プログラムの開発

- 地震発生予測検証実験のグローバルスタンダードのCSEPにおいては、地震予測モデルによる予測が観測を満たしたかどうかを統計的に厳密に評価することを重視
- CSEPにおける地震予測モデルは2次元予測なので評価プログラムを3次元予測用に作成する必要がある。

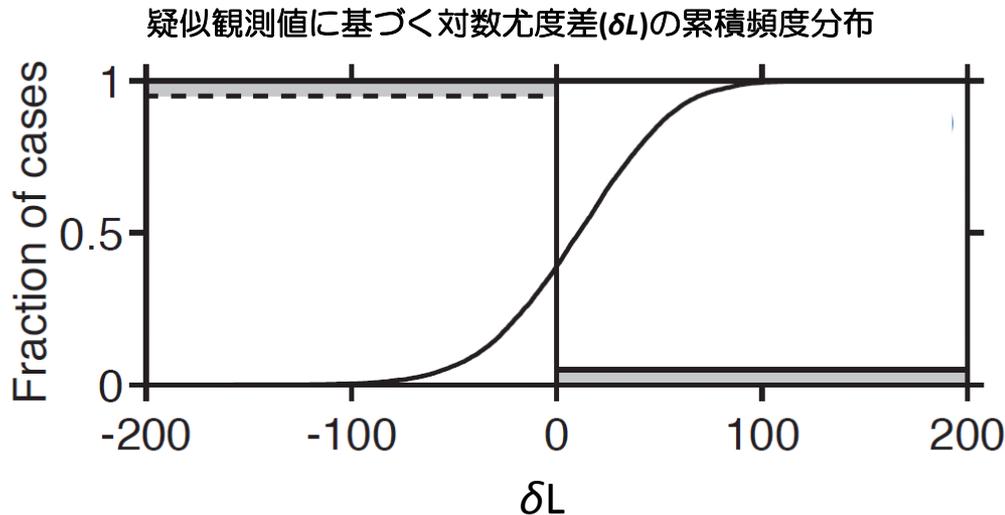
評価手法の基礎アルゴリズム

地震はポアソン過程である $p(\omega|\lambda) = \frac{\lambda^\omega}{\omega!} e^{-\lambda}$ λ : 予測値
 ω : 観測値

対数尤度 $L(\omega|\lambda) = \log p(\omega|\lambda) = -\lambda + \omega \log \lambda - \log \omega!$

スコア計算の仕方

- ① 予測値と観測値の対数尤度を計算 $= L_{\text{obs}}$
- ② 疑似観測値を作成
- ③ 予測値と疑似観測値の対数尤度を計算（これを1000回繰り返す） $= L_{\text{sim}}$
- ④ 観測値に基づく対数尤度が、疑似観測値に基づく対数尤度の分布の下位何%か



有意水準2.5%

$\delta L = L_{\text{sim}} - L_{\text{obs}}$
 L_{sim} : 疑似観測値に基づく対数尤度
 L_{obs} : 観測値に基づく対数尤度

Consistencyテストの種類

- N-Test 地震数が観測を満たしているか？
 - M-Test 地震の規模別頻度がGR則を満たしているか？
 - S-Test 地震の空間分布を満たしているか？
 - L-Test $N \times M \times S$ の総合テスト
 - **統計的な評価を重視**している。(厳密！)
- * 他にcomparisonテストがある.

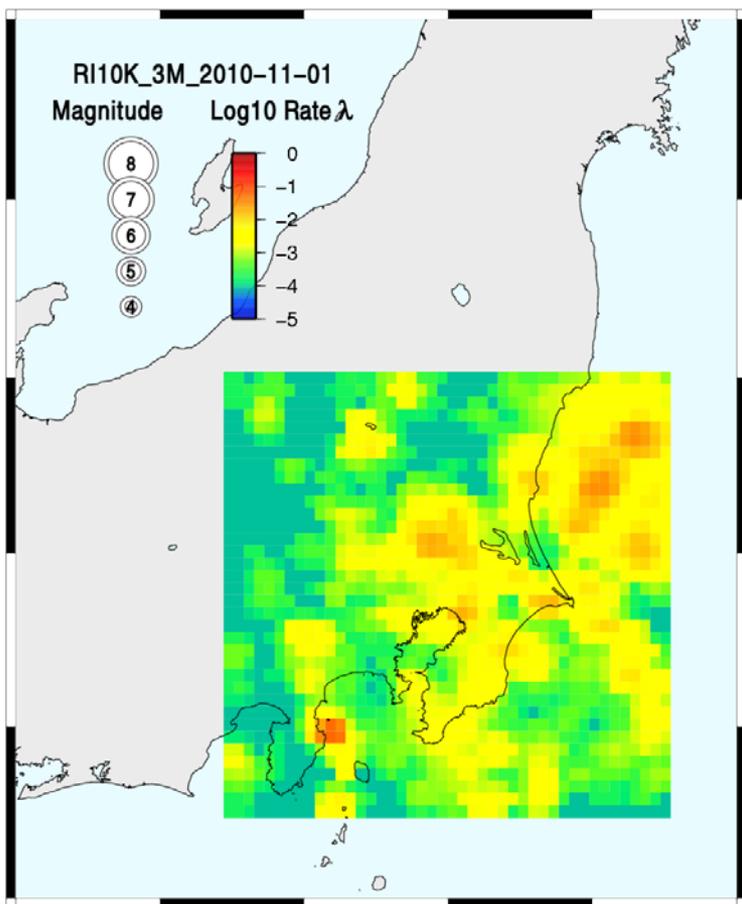
CSEPテストの特徴

- 観測結果は、一つ
- シミュレーションによって、観測分布を導出して、その分布と観測を比較して、観測結果が分布をみたしているかどうかを評価する。

評価手順

- ① 期待値マップを元に数値シミュレーションにより地震を発生させる.
- ② ①の疑似地震により対数尤度を計算する.
- ③ ①, ②を繰り返して(通常は1000回)対数尤度の分布を得る.
- ④ 実際に観測された地震による対数尤度が③の分布のどこにくるかを見る.

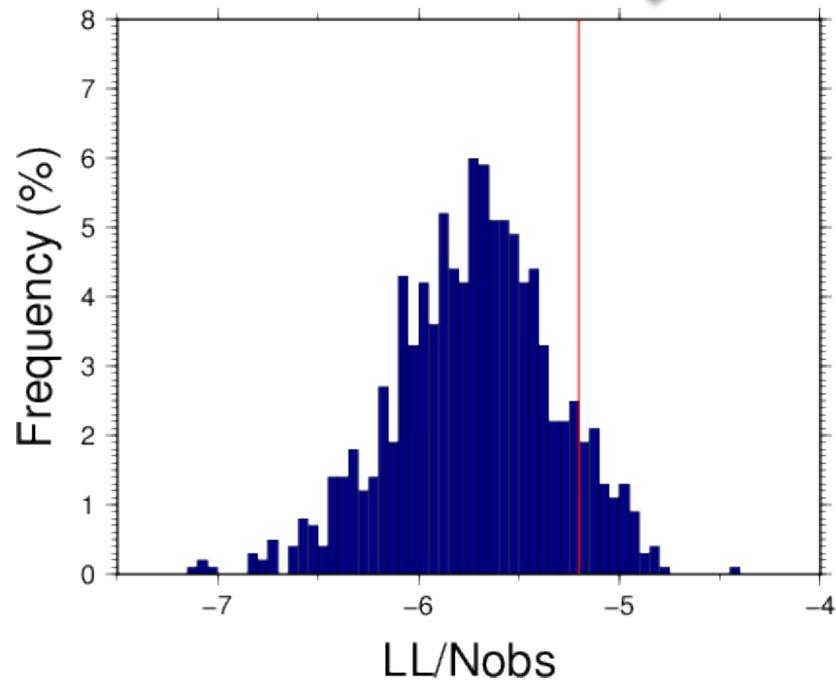
地震発生予測モデルによる 期待値マップ(RI10K)

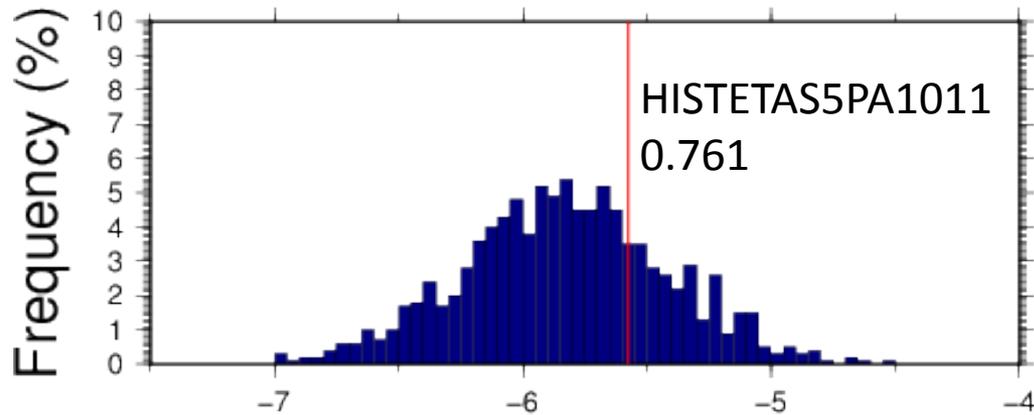
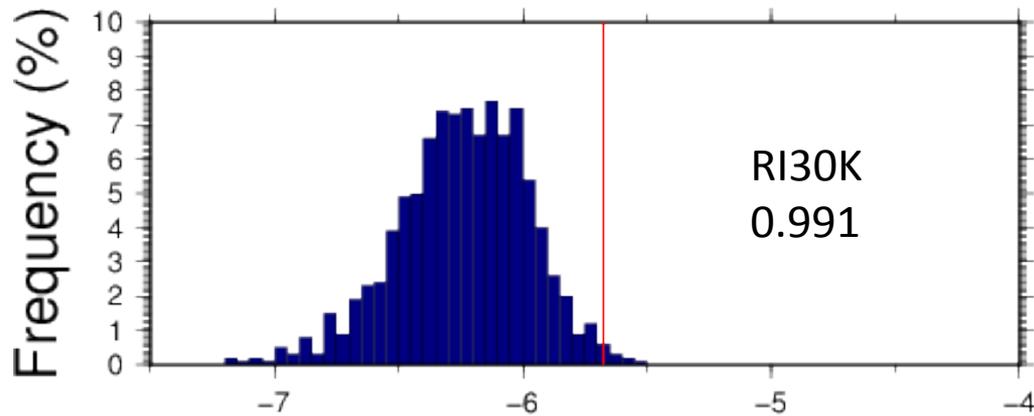
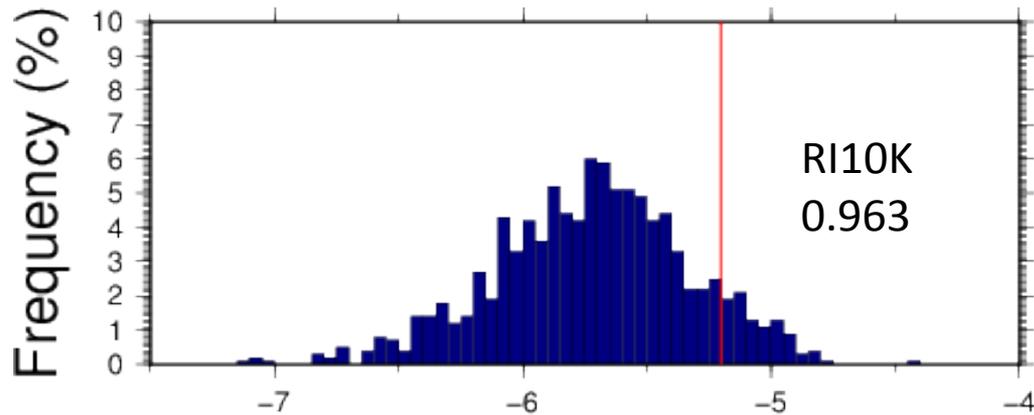


疑似カタログ (x 1000個)



対数尤度値の分布





LL/Nobs

- モデル毎に分布が異なる(正規分布というわけではない).
- スコアは相対的な値であり, モデルの絶対的な比較はできない.
- スコアは観測を満たしているとはいえないを棄却する有意水準である.

検証結果

3ヶ月予測実験 RI10K球モデル

黄色は、パス（検定値0.025以上）を示す

	L-test	N-test		M-test	S-test	Forecast number	Fore/Obs in number
ラウンド(地震数)	γ	$\delta 1$	$\delta 2$	κ	ζ		
1st (14)	0.063	0.0224	0.9893	0.408	0.835	7.5	0.54
2nd (10)	0.165	0.2123	0.8707	0.802	0.533	7.4	0.74
3rd (6)	0.776	0.7715	0.3618	0.746	0.741	7.6	1.3
4th (12)	0.184	0.0846	0.9539	0.568	0.979	7.6	0.63
5th (10)	0.335	0.2312	0.8565	0.133	0.994	7.6	0.76

棄却.予測数が少なすぎた.

検証システムを使って今後行うこと

レトロスペクティブテスト	プロスペクティブテスト
過去の地震に対して予測を行う	予測期間が始まる前に予測を行う
(過去の地震発生様式に合う) モデルのパラメータ探索	モデルの本当の予測能力の測定
各予測条件に対し、 予測領域 (0.05° x0.05° x5km) 予測期間 (1日, 3ヶ月, 1年, 3年) 最適なパラメータ (学習条件) を探索する。 予測規模に応じた空間平滑化距離、 学習期間、規模の下限値	レトロスペクティブテストから得られたパラメータを基に事前予測を行い、過去の地震発生様式から得られたモデルがどの程度有用であるかを測定し、改良を重ねていく

まとめ

- 関東地域における3次元テスト領域を決定した。
- 3次元地震予測モデルの予測をCSEP流に評価するプログラムを開発した。
- 3次元テスト領域での予測に対してレトロスペクティブテスト（事後テスト）ができるようプログラム群を整備し、検証実験の試行を始めた。