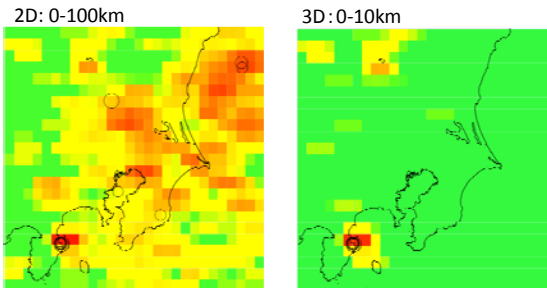


d. 首都圏の過去の地震活動に基づく 地震活動予測手法の確立

東京大学地震研究所



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。

■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 (事後予測)	プロスペクティブテスト (事前予測)
	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、本当の予測ではない	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

評価が難しい予測

関東地域で近いうちにマグニチュード6クラスの地震が発生する。

→

○関東地域といわれても...

○近いうちといわれても...

○マグニチュード6クラスといわれても...

地震予測結果をきちんと評価したい → 地震発生予測検証実験(CSEP)

4

CSEPのコンセプトとは

- 地震活動予測モデルを観測データ(カタログ)を元に比較・検証する.

そのために

- 同じ地震カタログ(気象庁一元化震源)を使う
- 予測結果を変更できないように事前予測を行う. → 基本的にプログラムコードを使う.
- 第三者が評価する. (地震研究所にテストセンター設立)
- 共通の評価手法によって評価する. 数値的な評価を行う.
- コミュニティ内でのルール作り

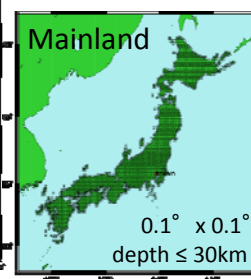
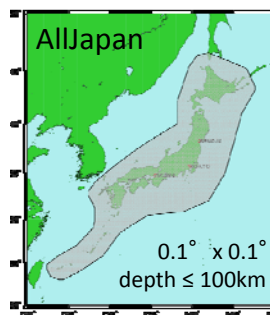
5

CSEP-Japan ルール

テスト領域

テストクラス

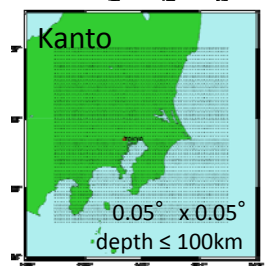
1-day	$4 \leq M \leq 9$
3-month	$4 \leq M \leq 9$
1-year	$5 \leq M \leq 9$
3-year	$5 \leq M \leq 9$



評価

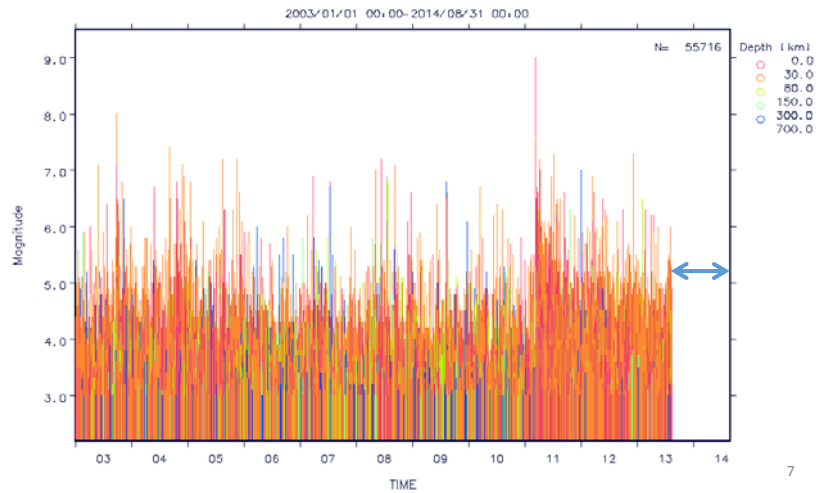
significance level 2.5%

test	
L	Likelihood of distributions of magnitude, number and place
CL	Conditional L-test
N	Event number
M	Magnitude distribution
S	Spatial distribution
W/T	Pair-wise comparison between forecasts

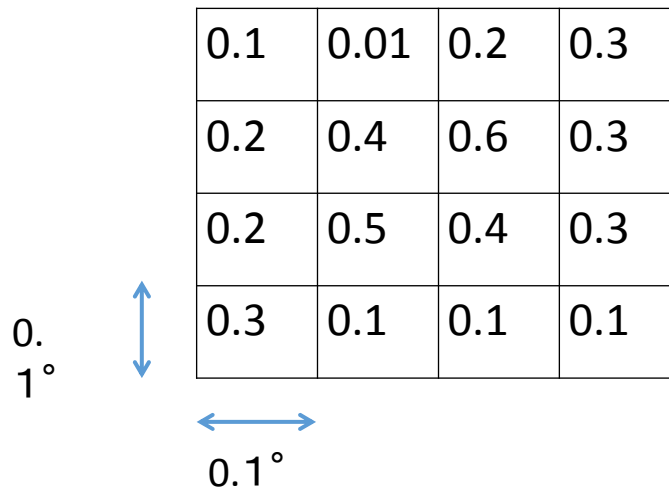


6

何を予測するのか？
 → 将来の地震の数を予測する



空間の予測



マグニチュードは,

地震の数を予測する. たとえば,

M 4.0-4.1 -> 0.0005

M 4.1-4.2 -> 0.0004

M 4.2-4.3 -> 0.0003

....

M 8.9-9.0 -> 0.000001

要するにマグニチュードを0.1毎に地震数を予測する.

9

評価の基本式

$$p(\omega|\lambda) = \frac{\lambda^\omega}{\omega!} e^{-\lambda} \quad \text{確率}$$

対数尤度

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

(λ :予測数, ω :観測数)

地震は偶然におこるという仮定
確率や対数尤度が大きいモデルが良いモデル

10

対数尤度と確率

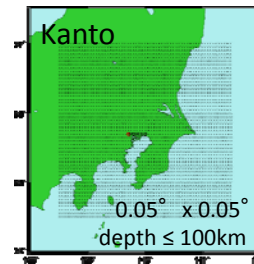
$$\lambda=1.0, \omega=1$$

$$LL=-1.0 \quad p=0.367879$$

$$\lambda=1.0, \omega=0$$

$$LL=-1.0 \quad p=0.367879$$

(λ :予測数, ω :観測数)



11

対数尤度と確率

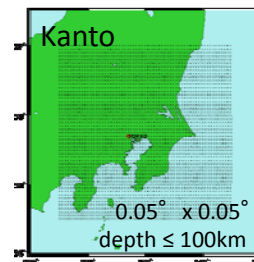
$$\lambda=0.1, \omega=1$$

$$LL=-2.402585 \quad p=0.090484$$

$$\lambda=0.1, \omega=0$$

$$LL=-0.100000 \quad p=0.904837$$

(λ :予測数, ω :観測数)



12

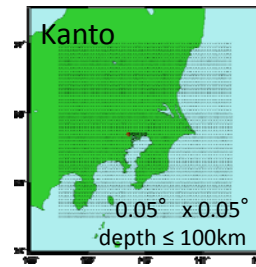
対数尤度と確率

$$\lambda=0.01, \omega=1$$

$$LL=-4.615170 \quad p=0.0099$$

$$\lambda=0.01, \omega=0$$

$$LL=-0.0100 \quad p=0.990050$$



(λ :予測数, ω :観測数)

13

評価指数の特徴

- 地震がおきるときは, なるべく予測数を大きく
- 地震がおきないときには, なるべく予測数を小さくすればよい
- 地震が起きることだけでなく起きないということも評価している.
- 複数地震が発生すると確率が非常に小さくなる.

14

対数尤度と確率 2bin

モデルA

$P1=0.359463$ $LL1=-1.023144$

$P2=0.818731$ $LL2=-0.2$

$P=P1*P2=0.29430$

$LL=LL1+LL2=-1.223144$

モデルB

$P1=0.347610$ $LL1=-1.056675$

$P2=0.740818$ $LL2=-0.3$

$P=P1*P2=0.257515$

$LL=LL1+LL2=-1.356675$

	bin 1	bin2
モデルA	0.8	0.2
モデルB	0.7	0.3
観測値	1	0

モデルA > モデルB

15

対数尤度と確率 2bin

モデルA

$P=0.36879$

$LL=-1.0$

モデルB

$P=0.36879$

$LL=-1.0$

	bin 1	bin2
モデルA	0.8	0.2
モデルB	0.7	0.3
観測値	0	0

モデルA = モデルB

16

対数尤度と確率 2bin

モデルA
P=0.36879
LL=-1.0

	bin 1	bin2
モデルA	0.8	0.2
モデルB	0.8	0.3
観測値	0	0

モデルB
P=0.332871
LL=-1.1

モデルA > モデルB

17

対数尤度と確率 2bin

モデルA
P=0.073576
LL=-2.609438

	bin 1	bin2
モデルA	0.8	0.2
モデルB	0.7	0.3
観測値	0	1

モデルB
P=0.110364
LL=-2.203973

モデルA < モデルB

18

対数尤度と確率 2bin

モデルA

P=0.073576

LL=-2.609438

モデルB(一様モデル)

P=0.183940

LL=-1.693147

	bin 1	bin2
モデルA	0.8	0.2
モデルB	0.5	0.5
観測値	0	1

モデルA < モデルB

19

曖昧予測 vs CSEP

	bin1	bin2	bin3	bin4	総数
曖昧予測	1.0	0.0	1.0	1.0	3.0
CSEP1	0.25	0.1	0.05	0.1	0.5
CSEP2	0.5	0.2	0.1	0.2	1.0
一様期待値	0.25	0.25	0.25	0.25	1.0
観測	1	0	0	0	

対数尤度値

曖昧予測 → -3.0

CSEP1 → -1.886

CSEP2 → -1.693

一様期待値 → -2.386

関東地域で近いうちに
マグニチュード6クラスの
地震が発生する。

20

情報利得(Information Gain)

モデルAの対数尤度値: L_a 観測地震数: N

モデルBの対数尤度値: L_b

情報利得 $IG=(L_a-L_b)/N$

曖昧予測 $IG=(-3.0-(-2.386))/1=-0.614$

CSEP1 $IG=(-1.886-(-2.386))/1=0.5$

CSEP2 $IG=(-1.693-(-2.386))/1=0.693$

一様期待値 $IG=0.0$

21

情報利得値の解釈

$\exp(IG)$ の値は、地震が発生した場所における一様期待値分布に於ける予測数倍になっている。

(但し、トータルの予測数が観測数と同じ場合)

$\exp(0.693)=1.9997$

	bin1	bin2	bin3	bin4
CSEP2	0.5	0.2	0.1	0.2
一様期待値	0.25	0.25	0.25	0.25

22

モデルの評価における テスト領域の影響

- テスト領域の解像度が粗い場合にはモデルの優劣が付きにくくなる.
- 解像度は細かいほうがよいが, 地震カタログの震源決定精度等との兼ね合いもある.
 - 水平方向の解像度
 - 深さ方向の解像度

23

テスト領域(解像度)の重要性

正解

モデルA

モデルB

モデルC



モデルのパフォーマンス $A=B=C$

24

テスト領域(解像度)の重要性

正解

モデルA

モデルB

モデルC

1	0
1	0

1	0
0	1

1	0
1	0

0	1
0	1

モデルのパフォーマンス $B > A > C$

25

テスト領域(解像度)の重要性

正解

モデルA

モデルB

モデルC

1	0
1	0

1	0
0	1

1	0
1	0

0	1
0	1

2

2

2

2

モデルのパフォーマンス $B > A > C$

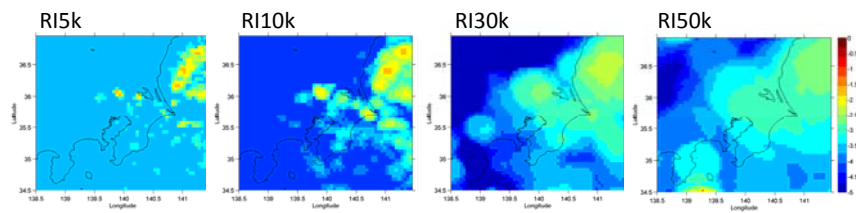
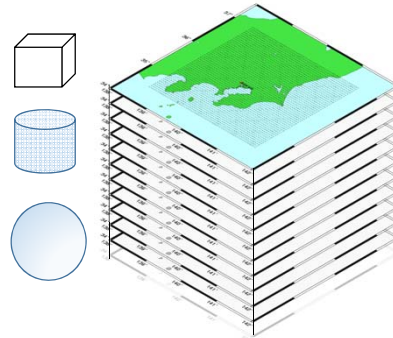
26

○モデルのプロトタイプ

RI model Relative Intensity of Seismicity (Nanjo, 2010)

地震は過去にたくさん起きたところで将来も起きる
(予測は学習データに影響を受ける)

・空間	平滑化半径
・期間	1998/1/1～予測開始日の前日
・規模	2.5 - 9.0 (b値 0.9)



27

レトロスペクティブテスト

過去の地震に対して予測、検証を行うこと

目的：モデルのパラメータ探索，テスト領域の解像度の検討・決定

例：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 2.5-100km 	0.025° x 0.025° x 2.5km 0.050° x 0.050° x 5km 0.100° x 0.100° x 10km 0.250° x 0.250° x 25km 0.500° x 0.500° x 50km
期間	1998/1/1～予測開始日の前日	①2009/11/1～2010/2/1 ②2010/2/1～2010/5/1 ③2010/5/1～2010/8/1 ④2010/8/1～2010/11/1 ⑤2010/11/1～2011/2/1
規模	2.5 - 9.0 (b値 0.9)	4.0 - 9.0

28

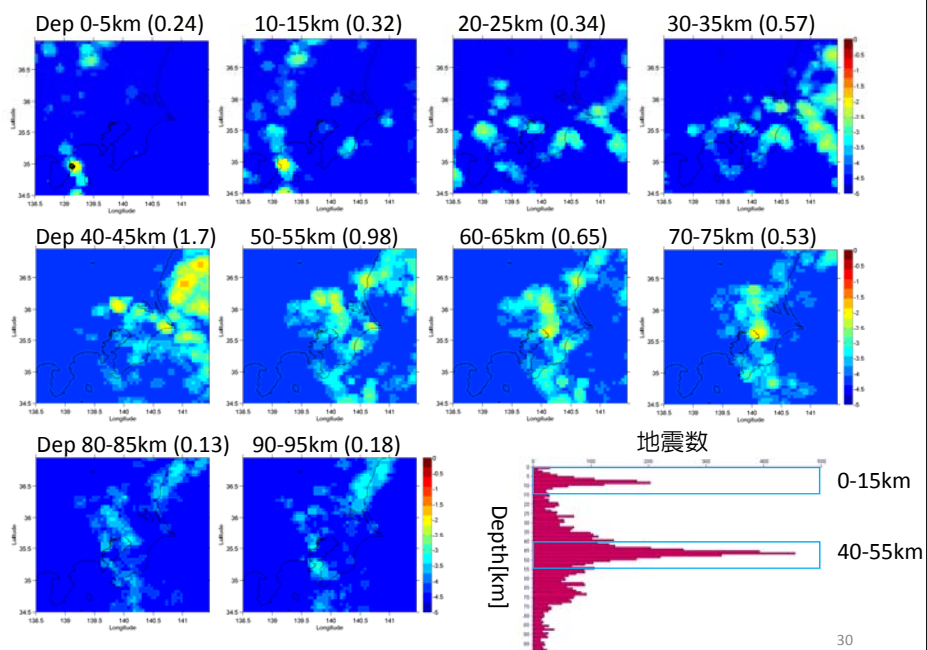
○3次元予測空間の空間分解能 $0.05^\circ \times 0.05^\circ \times 5\text{km}$

各予測期間における空間分解能と平滑化半径まとめ

Forecasting period and magnitude	Grids x depth	Smoothing radius
1day (31rounds) M>=4	$0.025^\circ \times 0.025^\circ \times 2.5\text{km}$ ~ $0.05^\circ \times 0.05^\circ \times 5\text{km}$	5-7.5km
3month(5rounds) M>=4	$0.025^\circ \times 0.025^\circ \times 2.5\text{km}$ ~ $0.05^\circ \times 0.05^\circ \times 5\text{km}$	5-7.5km
1year(5rounds) M>=5	$0.05^\circ \times 0.05^\circ \times 5\text{km}$ ~ $0.1^\circ \times 0.1^\circ \times 10\text{km}$	5-7.5km 7.5-10km
3years(1round) M>=5	$0.05^\circ \times 0.05^\circ \times 5\text{km}$	7.5-10km

29

3ヶ月予測 M>=4.0 3D-RI10Kモデル ($0.05^\circ \times 0.05^\circ \times 5\text{km}$)



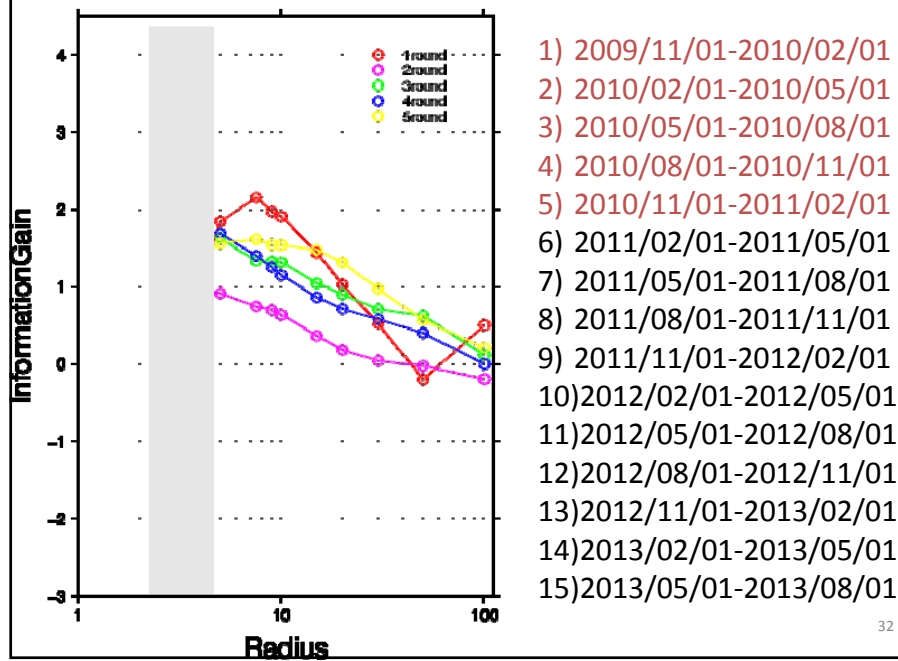
30

Kanto

三陸沖の地震前後の地震活動予測について
2Dモデル

31

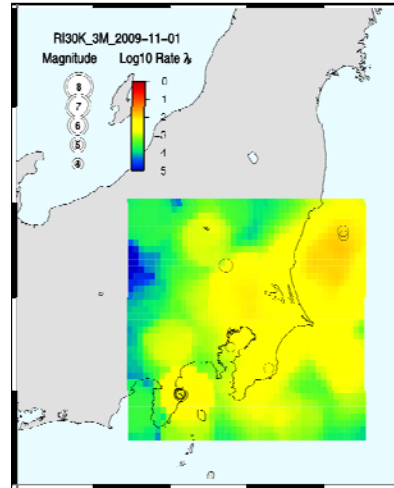
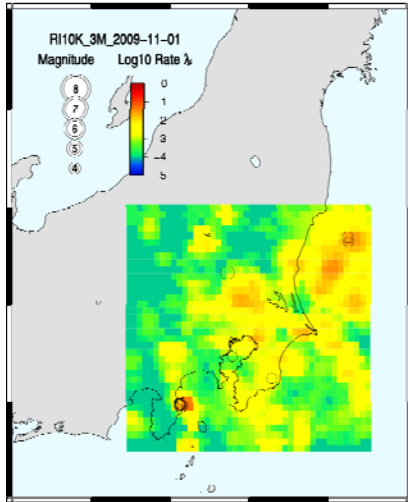
Radius vs InformationGain



RI10K

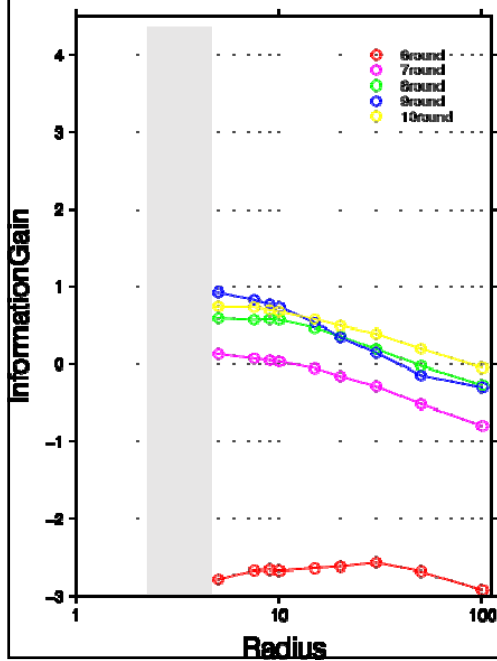
>

RI30K



33

Radius vs InformationGain

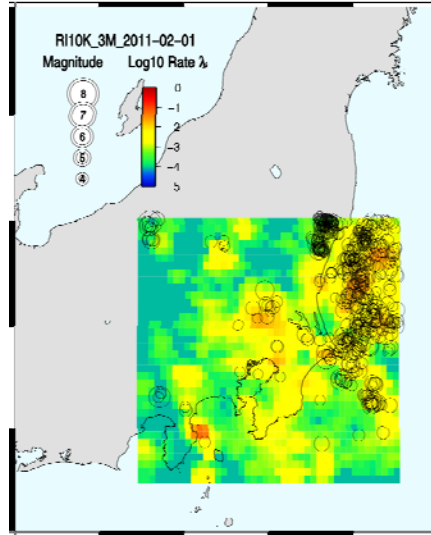
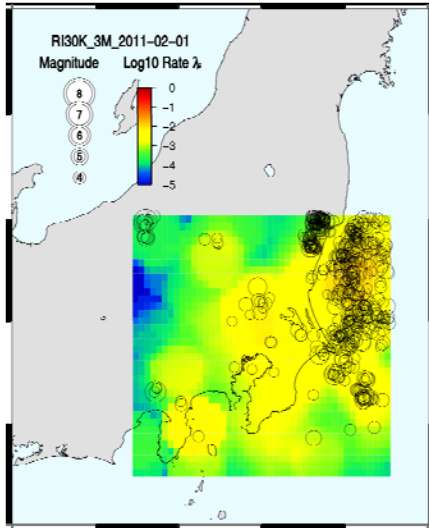


34

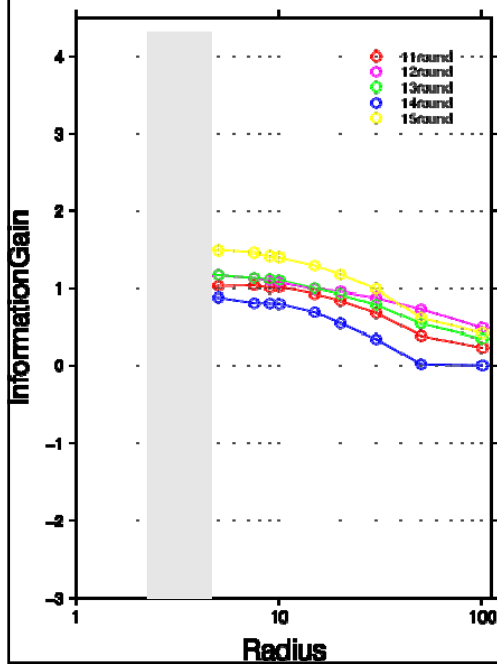
RI30K

>

RI10K



Radius vs InformationGain



- 1) 2009/11/01-2010/02/01
- 2) 2010/02/01-2010/05/01
- 3) 2010/05/01-2010/08/01
- 4) 2010/08/01-2010/11/01
- 5) 2010/11/01-2011/02/01
- 6) 2011/02/01-2011/05/01
- 7) 2011/05/01-2011/08/01
- 8) 2011/08/01-2011/11/01
- 9) 2011/11/01-2012/02/01
- 10) 2012/02/01-2012/05/01
- 11) 2012/05/01-2012/08/01
- 12) 2012/08/01-2012/11/01
- 13) 2012/11/01-2013/02/01
- 14) 2013/02/01-2013/05/01
- 15) 2013/05/01-2013/08/01

プロスペクティブテスト

予測期間が始まる前に予測を行うこと
 目的：モデルの本当の予測能力の測定

	学習条件	予測条件
空間	関東地域 (Lon138.5-141.5, Lat34.5-37.0, Dep0-100km)	
	<ul style="list-style-type: none"> RI 球モデル 平滑化半径 7.5, 10, 20, 50 km 	0.050° x 0.050° x 5km
期間	① 1998/1/1—2011/1/1 ② 1998/1/1—2014/8/1 ③ 1998/1/1—2015/1/1	第1回実験 1日：2015/2/1-2015/2/2 3ヶ月：2015/2/1-2015/5/1 1年：2015/2/1-2016/2/1 3年：2015/2/1-2018/2/1
規模	2.5 - 9.0 (<i>b</i> 値 0.9)	1日、3ヶ月：4.0 - 9.0 1年、3年：5.0 - 9.0

37

3ヶ月 (2015/2/1-2015/5/1) 予測

○平滑化半径による期待値の分布の違い
 ○学習期間の長さによる地震数の違い

学習期間	平滑化半径 [km]				地震数
	7.5	10	20	50	
1998/1/1 — 2011/1/1					7.3
1998/1/1 — 2014/8/1					18.1
1998/1/1 — 2015/1/1					18.0

38

平成27年度の予定

- 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。

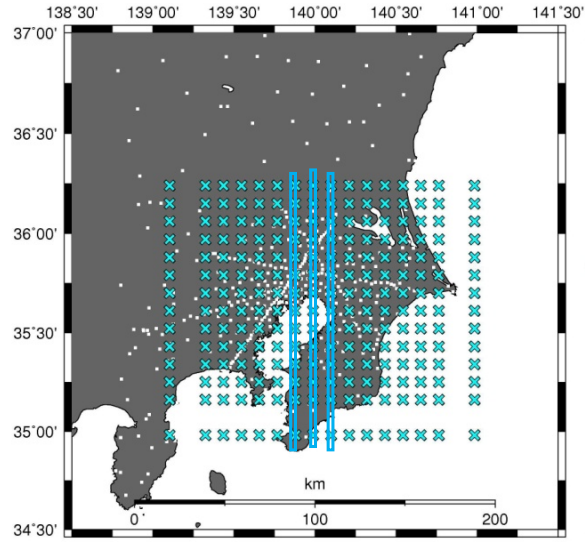
39

他の課題とのかかわり

- ・1c
平成27年度に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の提供を受ける
- ・1a
地震波の減衰からみた首都圏の地下構造と地震発生割合の関係

40

地震活動予測 vs Q構造 vs 速度構造



41

地震活動予測モデルから

0.2	0.1	0.3
0.3	0.1	0.3
0.3	0.2	0.2



-		
-		

0.15	0.111	0.311
0.225	0.111	0.311
0.311	0.211	0.211

Q構造, 速度構造から

42

まとめ

- 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った。
- 2015年2月1日からプロスペクティブな検証実験を開始した。