

3. 1. 4 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

(1) 業務の内容

(a) 業務の目的

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。

(b) 平成25年度業務目的

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マグニチュード等の性能評価を実施するとともに、階層的時空間 ETAS モデルをもとにした三次元地震活動予測モデルのプロトタイプを開発する。関東地域における地震活動評価の検討に用いる三次元テスト領域を決定する。

(c) 担当者

所属機関	役職	氏名	メールアドレス
東京大学地震研究所	准教授	鶴岡弘	
東京大学地震研究所	教授	平田直	
東京大学地震研究所	特任研究員	横井佐代子	

(2) 平成25年度の成果

(a) 業務の要約

- 1) 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マグニチュード等の性能評価を実施した。
- 2) 関東地域における地震活動評価の検討に用いる三次元テスト領域を決定した。
- 3) 階層的時空間 ETAS モデルをもとにした三次元地震活動予測モデルのプロトタイプを開発した。

(b) 業務の成果

- 1) 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マグニチュードの性能評価

a) 地震カタログ

日本には数種類の地震カタログが存在するが、深さ方向を考慮した関東地域の地震を予測すること、および平成27年度には課題1(c)による古地震を学習データとして取り込み大規模地震の予測を行うことなどを考慮し、以下の3種類の地震カタログについて地震の検知能力の性能評価を行った。

- 気象庁地震カタログ（宇津, 1999¹⁾）（石川, 1987²⁾）

気象庁が発行する「地震月報」を基に作成された地震カタログ。収録期間が1923年

から現在と 3 種類の中でもっとも長い。1997 年 10 月からは、大学および国の研究機関の地震波形データを気象庁が検測して震源を決定することとなり、気象庁一元化処理震源カタログと呼ばれるようになった。

- 防災科学技術研究所が作成した地震カタログ（例えば、野口・他, 2003³⁾）
地震予知計画「関東・東海地域における地殻活動に関する研究」の下で設置された防災科学技術研究所独自の地震観測網によりコンパイル・作成された地震カタログ。収録期間は、1979 年 7 月 1 日から 2002 年 10 月 31 日。収録期間が気象庁地震カタログより短い、期間は完全に重複する。観測期間全体にわたり震源決定手法が同一なため、均質な震源データである。
- 宇津カタログ（宇津, 1979⁴⁾および 1982⁵⁾）
マグニチュード 6 以上およびそれ以下でも日本で被害が出た地震について震源とマグニチュードを再決定したもの。収録期間は、1885 年 2 月から 1983 年 8 月である。気象庁地震カタログの収録期間が 1923 年から始まるので、1885 年 2 月 9 日から 1923 年 1 月 1 日までのテスト領域に含まれる震源データを使用した。収録の対象とするマグニチュードが大きいためデータ数は多くないが、気象庁地震カタログや防災科学技術研究所が作成した地震カタログとは重複しない古い年代のデータを含む。

b) コンプリートネスマグニチュードの比較

地震カタログを使用する際の注意点としてカタログの不均質性が指摘されており、研究においては地域、期間、マグニチュードを適切に選んで、均質な部分を使用することが大切である（宇津, 1999¹⁾）。地震カタログは領域を指定するとそのカタログの検知能力の完全性を保証する最低のマグニチュードが考えられ（これを本報告書ではコンプリートネスマグニチュードと呼ぶ）、カタログの品質の指標として用いられる（宇津, 1999¹⁾）。地震カタログからコンプリートネスマグニチュードを求める方法は多数報告されているが（Mignan and Woessner, 2012⁶⁾）、本課題では Maximum curvature 法（Wiemer and Wyss, 2000⁷⁾）を使用した。各地震カタログの中からテスト領域（東経 138.5°から 141.5°、北緯 34.5°から 37.0°、深さ 0 から 100km）で起きた地震を抽出し、1)a)で示した使用（および収録）期間の初めから最後までまでの期間の 1 年ごとのコンプリートネスマグニチュードの調査・評価を行った。

i) 深さ方向を考慮しない場合

深さ方向を考慮しない二次元テスト領域（深さ 0 から 100km を分割しない場合）におけるコンプリートネスマグニチュードの時系列変化を図 1（P.129）に示す。各地震カタログの特徴として以下のことが読み取れる。

気象庁地震カタログは、1923 年から 1980 年まで M_c は 3.7 ± 0.4 （平均 $\pm$ 標準偏差）でほぼ一定に推移する。また、1970 年半ばから 2000 年にかけては観測網の整備に伴いコンプリートネスマグニチュードの向上（つまり、小さい地震まで検知されている）が見られる。Hi-net 等の観測網の整備により、2000 年以降は 1 以下を保っていたが、2011 年東北地方太平洋沖地震によりコンプリートネスマグニチュードが一時的に上がった。防災科学技術研究所が作成した地震カタログは、観測期間が経過するに従い、コンプリートネスマグ

ニチュードが 2.0 から 1 以下に向上しており、気象庁カタログの推移とほぼ重なる。宇津カタログは、マグニチュード 6 以上およびそれ以下でも日本で被害が出た地震が収録の条件となっているため、コンプリートネスマグニチュードも約 6 を示している。

ii) 深さ方向を考慮した場合

深さ方向を考慮した三次元テスト領域（深さ 0 から 100km を 10km 毎に分割した場合）におけるコンプリートネスマグニチュードの時系列変化を図 2 (P.129~130) に示す。各地震カタログの特徴として以下のことが読み取れる。

気象庁地震カタログは、1923 年から 1980 年までは i) 深さを考慮しない場合と同様にコンプリートネスマグニチュード 3.7 で推移した。また、1980 年から 2000 年にかけてコンプリートネスマグニチュードは 1 以下まで向上した。2000 年から 2010 年における浅い予測領域（深さ 0 から 30km）のコンプリートネスマグニチュード (0.25 ± 0.14) は、深い領域（60 から 100km）のコンプリートネスマグニチュード (0.67 ± 0.10) より小さい値を示し、深さ依存性が見られた（図 2 (a)、P.129）。防災科学技術研究所が作成した地震カタログは、収録期間全般に渡り 0 から 10km、10 から 20km、20 から 30km のコンプリートネスマグニチュードが他の深さより向上し、約 1 を示した（図 2 (b)、P.130）。30 から 100km の各深さのコンプリートネスマグニチュードは、概ね 1.5 から 2.3 に収まる範囲で推移した。気象庁地震カタログに見られたようなコンプリートネスマグニチュードの時間変化が少なく、深い地震に対しても安定した質のカタログと考えられる。宇津カタログ（宇津, 1979⁴⁾および 1982⁵⁾）における深さの表記は、vs (Very Shallow)、s (Shallow)、d (Deep) の 3 種類であり、数値解析する際には便宜的に vs=20km、s=50km、d=100km とした。ただし、宇津カタログに含まれる地震のうち深さ 90 から 100km は、Maximum curvature 法でコンプリートネスマグニチュードを求めるには地震数が少なすぎたため、決定ができなかった。宇津カタログは、気象庁地震カタログの収録期間以前の規模の大きな地震の情報を与えてくれるのが利点であり、現在の地震活動を定量的に評価する際にも重要なカタログである。

2) 関東地域における地震活動評価の検討に用いる三次元テスト領域の決定

a) 三次元テスト領域のグリッドサイズ

昨年度は、グリッドサイズを水平方向 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 、深さ方向 10km に設定した三次元テスト領域について主に調査した。本課題では、さらに詳細な検討を行うため、グリッドの水平方向は 0.025° から 0.5° を、深さ方向は 2.5km から 50km を設定した。これら水平グリッドと深さグリッドの組み合わせからなる空間グリッドを関東地域（東経 138.5° から 141.5° 、北緯 34.5° から 37.0° 、深さ 0 から 100km）に適応した場合、各空間グリッドにおけるグリッドの総数は表 1 (P.128) のようになる。水平方向のグリッドは、緯度と経度が同じ度 ($^\circ$) になるようにした。よって、表 1 (P.128) において水平方向 0.1° は、緯度 $\times$ 経度が $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ であることを意味する。また、深さ方向 10km は、関東地域の深さ 0 から 100km を 10km 毎に 10 層に分割したという意味である。空間グリッドが水平方向 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 、深さ方向 10km の場合、経度方向に 30、緯度方向に 25、深さ方向に 10 のグリッドで関東地域を区切ることになり、そのグリッド総数は 7,500 ($=30 \times 25 \times 10$) となる（表 1 (P.128) の背景が青の値）。

b) 情報利得

昨年度の本課題において、深さ方向の分解能を持たない予測空間（二次元テスト領域）と持つ予測空間（三次元テスト領域）の下で予測モデルの性能比較を行った際、比較の指標として地震の空間分布・規模・発生数を総合的に評価した対数尤度を使用した（②式）。これは、地震の発生はポアソン過程であると考え、地震発生予測モデルの予測と実測の整合性を表す①式から導かれる「対数尤度」で評価するという考えに基づく（Schorlemmer and Gerstenberger, 2007⁸⁾）。対数尤度は予測空間のグリッド総数に依存する値であり、異なるグリッド総数からなる予測空間で得られた対数尤度を直接比較することができない。よって、本課題の場合は対数尤度から「情報利得」（③式）を算出し、比較の指標とした。

$$\text{Probability : } p(\omega|\lambda) = \frac{\lambda^\omega}{\omega!} e^{-\lambda} \quad (\lambda:\text{予測値}, \omega:\text{実測値}) \quad \dots \textcircled{1}$$

$$\text{対数尤度 : } L(\omega|\lambda) = \log p(\omega|\lambda) = -\lambda + \omega \log \lambda - \log \omega! \quad \dots \textcircled{2}$$

$$\text{情報利得 : } IG = \frac{L_A}{N_{obs}} - \frac{L_B}{N_{obs}} \quad \dots \textcircled{3}$$

(L_A :モデル A の対数尤度、 L_B :モデル B の対数尤度、 N_{obs} :地震数)

本課題では、モデル A を RI モデルとし、モデル B を空間一様期待値分布モデルとした。空間一様期待値分布モデルは、三次元テスト領域のどのグリッドにおいても地震の発生確率（予測値）が同じ（一様）モデルである。具体的には、空間一様期待値分布モデルにおいて、ある 1 つのグリッドの予測値（ λ ）は、地震数を三次元テスト領域のグリッド総数で除した値となる。情報利得が正の数の時、モデル A はモデル B より性能が良いことを意味する。

c) 地震発生予測モデル

三次元テスト領域の決定を行うにあたり、昨年と同様に **Relative Intensity model**（以下、RI モデル（Nanjo, 2011⁹⁾））を地震発生予測モデルとして使用した。このモデルを規定するパラメータは学習する期間と平滑化半径、 b 値、学習のコンプリートネスマグニチュードがある。学習のコンプリートネスマグニチュードは、上記 1) のコンプリートネスマグニチュードの評価と密接に関係しているので、その決定においては気象庁カタログの性能評価を詳細に検討し、決定した。学習期間は一元化处理以降の 1998 年 1 月 1 日から予測期間の初日の前の日までを使用した。また、 b 値は 0.9、学習に用いるコンプリートネスマグニチュードは 2.5 とした。

d) 三次元テスト領域の各空間グリッドに対する RI モデルの情報利得

三次元テスト領域を決定するために、2) a) で準備した各空間グリッドに対して、RI モデルにおいて地震数をカウントする空間カーネルとして円筒および球としたモデルに対する情報利得を調査した。

i) 円筒モデル

円筒モデルは、RI モデルの学習領域を水平方向にのみ空間平滑化を行い、深さ方向は空間グリッドと同じにした地震発生予測モデルである。学習と予測の条件を表 2 (P.128) に示す。

三次元テスト領域における円筒モデルにおいて 2009 年 11 月 1 日から 2010 年 2 月 1 日 (3m1st) を予測した結果を図 3 (P.131) に示す。水平グリッドのグリッドサイズを評価するために図 3 (a) (P.131) を、深さグリッドのグリッドサイズを評価するために図 3 (b) (P.131) を示す。情報利得が 1 番高い値を示している空間グリッドは $0.05^\circ \times 0.05^\circ \times 10\text{km}$ (平滑化半径 7.5km、情報利得 3.87)、2 番目は $0.1^\circ \times 0.1^\circ \times 10\text{km}$ (平滑化半径 5km、情報利得 3.74) だった (図 3 (a)、P.131)。また、水平グリッド $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ と $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ について深さグリッドのサイズを 10km よりも細かくしても荒くしても情報利得は良くなり、10km が最大であった (図 3 (b)、P.131)。

各空間グリッドにおける情報利得の最大値を図 4 (P.132) に示す。3m1st を含め 3 ヶ月予測を 5 回行った。赤い領域は、情報利得が高い空間グリッドを示す。これらの図から、予測期間ごとに情報利得の高い空間グリッドの領域は異なるが、概ね水平グリッドは $0.025^\circ \times 0.025^\circ$ 、 $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ 、 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 、深さグリッドは 10km が共通していると読み取れる。また、情報利得が最大値を示す平滑化半径についても図 5 (P.133) に示した。

ii) 球モデルの場合

円筒モデルと同様の手順で RI モデルの予測・検証、情報利得による評価を行った。学習と予測の条件を表 3 (P.128) に示す。

三次元テスト領域における球モデルにおいて 2009 年 11 月 1 日から 2010 年 2 月 1 日 (3m1st) を予測した結果を図 6 (P.134) に示す。水平グリッドのグリッドサイズを評価するために図 6 (a) (P.134) を、深さグリッドのグリッドサイズを評価するために図 6 (b) (P.134) を示す。情報利得が 1 番高い値を示している空間グリッドは $0.05^\circ \times 0.05^\circ \times 10\text{km}$ (平滑化半径 7.5km、情報利得 3.82) と $0.1^\circ \times 0.1^\circ \times 10\text{km}$ (平滑化半径 7.5km、情報利得 3.82) であった (図 6 (a)、P.134)。また、水平グリッド $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ と $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ について深さグリッドのサイズを 10km よりも細かくしても荒くしても情報利得は良くなり、10km が最大であった (図 6 (b)、P.134)。

各空間グリッドにおける情報利得の最大値を図 7 (P.135) に示す。3m1st を含め 3 ヶ月予測を 5 回行った。赤い領域は、情報利得が高い空間グリッドを示す。これらの図から、予測期間ごとに情報利得の高い空間グリッドの領域は異なるが、3m2nd を除いて、水平方向グリッドが $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 以下深さグリッドが 10km 以下で情報利得が高いことが共通している。また、情報利得が最大値を示す平滑化半径についても図 8 (P.136) に示した。

iii) 三次元テスト領域の決定

i) の円筒モデルおよび ii) の球モデルの結果から、まずは、どちらのモデルからテスト領域を決定すべきかを以下で議論する。図 5 (P.133) と図 8 (P.136) の比較から、円筒モデルは深さ方向のグリッドサイズを変えたとしても情報利得が最大となる平滑化半

径はほぼ水平グリッドに依存している。一方、球モデルのほうは依存性が見られないので、テスト領域決定には球モデルの結果を使うのが適当と考えられる。これは、円筒モデルは水平方向と深さ方向二つの平滑化半径が関わっており、モデル化にあたって水平方向の平滑化半径と深さ方向の距離がパラメータになることを示している。このことは、情報利得の大小でみると球モデルよりも円筒モデルが総じて高いことからわかる。よって、球モデルの結果から三次元テスト領域の空間グリッドを決定することとした。

図 9 (P.137) に空間グリッドの形状が立方体に近い $0.025^\circ \times 0.025^\circ \times 2.5\text{km}$ 、 $0.05^\circ \times 0.05^\circ \times 5\text{km}$ 、 $0.10^\circ \times 0.10^\circ \times 10\text{km}$ の 3 種類における情報利得の最大値とラウンドの関係を示す。ラウンドごとに発生した地震の発生数や発生場所が異なるため情報利得が 1 番の空間グリッドはラウンドごとに異なっている。例えば、各ラウンド (3m1st、3m2nd、3m3rd、3m4th、3m5th) に起きた地震数はそれぞれ 14、10、6、13、10 である。そして、図 6 (b) (P.134) より 3m1st では、どの水平グリッドにおいても深さグリッドが 10km の方が 5km より情報利得が良いという結果が得られたが、ラウンドによっては深さグリッドが 5km の方が良い場合もある。3m1st から 3m5th までを通して考えると、そのうちの 3 ラウンドにおいて、 $0.025^\circ \times 0.025^\circ \times 2.5\text{km}$ の空間グリッドが一番よい情報利得を示し、また、その変化は $0.025^\circ \times 0.025^\circ \times 2.5\text{km}$ では 3.01 から 3.50 の範囲にあり、 $0.05^\circ \times 0.05^\circ \times 5\text{km}$ 、 $0.10^\circ \times 0.10^\circ \times 10\text{km}$ はそれぞれ 1.94 から 3.43、2.37 から 3.93 の範囲となり、 $0.025^\circ \times 0.025^\circ \times 2.5\text{km}$ の空間グリッドは、情報利得が安定しているという結果も得られた。さらに、図 7 (b) (P.135) から、RI 球モデルにおける最適な平滑化半径が 5km よりも小さい可能性も高い。これらから、三次元テスト領域については、 $0.025^\circ \times 0.025^\circ \times 2.5\text{km}$ の空間グリッドがよいと結論したいところであるが、以下のことも考慮する必要がある。一つは、これらの計算に要する時間である。予測ラウンドは 3m1st、平滑化半径は 10km の場合でその結果を図 10 (P.137) に示す。計算に用いた計算機の仕様は、以下の通りである。

プロセッサ : Intel(R) Core(TM)i7-3930K CPU@3.2GHz

メモリ : 32GB

$0.025^\circ \times 0.025^\circ \times 2.5\text{km}$ の計算時間は、 $0.05^\circ \times 0.05^\circ \times 5\text{km}$ の 10 倍以上、 $0.10^\circ \times 0.10^\circ \times 10\text{km}$ の約 100 倍以上の時間を要することになる。次年度から行う検証実験では CSEP 標準のテストを三次元化し、予測が観測を満たしているのかのシミュレーションを実施することになる。そのシミュレーションに要する時間は、テスト領域の空間サイズを細かくすると全体の検証時間がかかることになる。その観点からみれば $0.025^\circ \times 0.025^\circ \times 2.5\text{km}$ よりも $0.05^\circ \times 0.05^\circ \times 5\text{km}$ あるいは $0.10^\circ \times 0.10^\circ \times 10\text{km}$ のほうが実用的といえる。一方、図 6 (b) (P.134) の $0.05^\circ \times 0.05^\circ \times 5\text{km}$ の結果から球モデルによる最適な平滑化半径は、5 から 10km の間である。このことは、 $0.10^\circ \times 0.10^\circ \times 10\text{km}$ の空間グリッドだとこのことを明確にすることが難しい。つまり、 $0.10^\circ \times 0.10^\circ \times 10\text{km}$ の空間グリッドでは、場合によっては予測に最適な平滑化半径がグリッドサイズより小さくなり、一部の地震を学習データとして取り込めない状況が生じる。地震活動予測モデルの RI モデルは、過去の地震発生様式と将来の地震発生様式に近いとするモデルであるので、学習する段階でデータに取りこぼしがある状況は好ましくないと考えられる。また、日本で行われている地震活動の評価に基づく地震発生予測実験 (Tsuruoka *et al.*, 2012¹⁰⁾) における関東地域の空間グリッドは、水平グリッドが $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ 深さグリッドが 100km であり、水平グリッドをこれと同じとすることにより二

次元テスト領域での検証結果と比較検討を行いやすいというメリットも考えられる。よって、検討結果としては、三次元テスト領域の空間グリッドは、 $0.05^\circ \times 0.05^\circ \times 5\text{km}$ と決定する。

3) 階層的時空間 ETAS モデルをもとにした三次元地震活動予測モデルのプロトタイプの開発

ETAS (the epidemic type aftershock sequence) モデルとは、地震活動予測モデルの 1 つであり、いかなる地震も多かれ少なかれ付随する余震活動をもつというモデルである (尾形, 1993¹¹⁾)。本課題 2) では、様々な検討に地震発生予測モデルとして RI モデルを使用してきたが、ETAS モデルは余震活動は改良大森公式に従うといった地震発生数の時間変化が考慮されていることが特徴である。本年度においては、ETAS モデルの三次元テスト領域への拡張を試みた。

Zhuang (2011)¹²⁾によれば、緯度・経度の関数を強度関数に含む二次元テスト領域での ETAS モデルの期待値 ($\lambda(t, x, m)$) は、④式のように記述できる。これを深さ方向 (z) にも分解能を持つ三次元テスト領域への適用を試みた。改良方法にはいくつか候補が考えられたが (例えば、平滑化距離を x^2+y^2 から $x^2+y^2+z^2$ に変更するなど)、最終的に z 方向に関してベータ関数で表現されるカーネル⑥式を④式に組み込み、⑤式の強度関数をプロトタイプとして開発した。なお、⑥式において H はテスト領域の最大深さである 100km とした。

$$\lambda(t, x, m) = s(m) \left[\mu(x, y) + \sum_{t_i < t} \kappa(m_i) g(t - t_i) f(x - x_i, y - y_i; m_i) \right] \quad \dots \textcircled{4}$$

ここで、 t : 時間 (day)、 x : 空間 (degree)、 m : マグニチュード。

- ・ $s(m) = \beta e^{-\beta(m-mc)}$ 、 $m \geq mc$ 。また、 $\beta = b \ln 10$ (b は、Gutenberg-Richter 則の b 値)。
- ・ $\mu(x, y)$: バックグラウンドの地震発生率 (events/ (day · deg²))。
- ・ $\kappa(m) = A e^{a(m-mc)}$ 、 $m \geq mc$: ある地震 (マグニチュード m) によって引き起こされる地震数 (events)。
- ・ $g(t) = \frac{p-1}{c} \left(1 + \frac{t}{c}\right)^{-p}$ 、 $t > 0$: ある地震 (マグニチュード m) によって引き起こされる地震の時間間隔に関する確率密度関数 (day⁻¹)。
- ・ $f(x, y; m) = \frac{q-1}{\pi D e^{\gamma(m-mc)}} \left[1 + \frac{x^2+y^2}{D e^{\gamma(m-mc)}}\right]^{-q}$: ある地震 (マグニチュード m) によって引き起こされる地震の場所に関する確率密度関数 (deg⁻²)。
- ・ なお、上記の式中に用いられているパラメータ (A 、 a 、 c 、 p 、 D 、 q 、 γ) は、地震カタログからモデルの最適化により算出される定数である。

$$\lambda(t, x, y, z, m) = s(m) \left[\mu(x, y, z) + \sum_{t_i < t} \kappa(m_i) g(t - t_i) f(x - x_i, y - y_i; m_i) h(z; z_i) \right] \quad \dots \textcircled{5}$$

ここで、

$$h(z; z_i) = \frac{\left(\frac{z}{H}\right)^{\frac{\eta z_i}{H}} \left(1 - \frac{z}{H}\right)^{\frac{\eta(H-z_i)}{H}}}{HB \left(\frac{\eta z_i}{H} + 1, \frac{\eta(H-z_i)}{H} + 1\right)} \quad \dots \textcircled{6}$$

である。

上記モデル化におけるパラメータの最適値として、 $\mu=0.05050$ 、 $A=0.65581$ 、 $c=0.014144$ 、 $\alpha=10.928$ 、 $p=1.1053$ 、 $D=0.000051183$ 、 $q=1.2912$ 、 $\gamma=1.5075$ 、 $\eta=97.830$ を得た。

(c) 結論ならびに今後の課題

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マグニチュード等の性能評価を実施するとともに、階層的時空間 ETAS モデルをもとにした三次元地震活動予測モデルのプロトタイプを開発した。関東地域における地震活動評価の検討に用いる三次元テスト領域を決定した。

(d) 引用文献

- 1) 宇津徳治: 地震活動総説, 東京大学出版, 876pp, 1999.
- 2) 石川有三: 気象庁震源データの変遷とその問題点, 験震時報, Vol.51, pp.47-56, 1987.
- 3) 野口伸一, 増子徳道, 関東東海地殻活動観測研究グループ: 関東・東海地域地震観測網による震源の時空間分布と規模分布について－特別研究「関東・東海地域における地震活動に関する研究」観測成果のまとめ(その5)－, 防災科学技術研究所研究資料, 第239号, pp.1-71, 2003.
- 4) 宇津徳治: 12. 1885年～1925年の日本の地震活動－M6以上の地震および被害地震の再調査－, 地震研究所彙報, Vol.54, pp.253-308, 1979.
- 5) 宇津徳治: 5. 1885年～1925年の日本の地震活動(訂正と補遺), 地震研究所彙報, Vol.57, pp.111-117, 1982.
- 6) Mignan, A. and Woessner, J.: Estimating the magnitude of completeness for earthquake catalogs, Theme IV－Understanding Seismicity Catalogs and their Problems, Community Online Resource for Statistical Seismicity Analysis, pp.1-45, doi:10.5078/corssa-00180805, 2012.
- 7) Wiemer, S. and Wyss, M.: Minimum Magnitude of Completeness in Earthquake Catalogs: Examples from Alaska, the Western United States, and Japan, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.90, No.4, pp.859-869, 2000.
- 8) Schorlemmer, D. and Gerstenberger, M. C.: RELM testing center, Seism. Res. Lett., Vol.78, No.1, pp.30-36, doi:10.1785/gssrl.78.1.30, 2007.
- 9) Nanjo, K. Z.: Earthquake forecasts for the CSEP Japan experiment based on the RI algorithm, Earth Planets Space, Vol.63, No.3, pp.261-274, 2011.
- 10) Tsuruoka, H., Hirata, N., Schorlemmer, D., Euchner, F., Nanjo, Z. K. and Jordan, T. H.: CSEP Testing Center and the first results of the earthquake forecast testing experiment in Japan, Earth Planets Space, Vol.64, No.8, pp.661-671, 2012.
- 11) 尾形良彦: 地震学とその周辺の地球科学分野に於ける統計モデルと統計手法, 日本統計学会誌第22巻, 第3号(増刊号), pp.413-463, 1993.

- 12) Zhuang, J.: Next-day earthquake forecasts for the Japan region generated by the ETAS model, Earth Planets Space, Vol.63, No.3, pp.207-216, 2011.

(e) 学会等発表実績

学会等における口頭・ポスター発表

発表成果（発表題目、口頭・ポスター発表の別）	発表者氏名	発表場所（学会等名）	発表時期	国際・国内の別
A prospective earthquake forecast experiment for Japan（ポスター）	Yokoi Sayoko, Kazuyoshi Nanjo, Hiroshi Tsuruoka, Naoshi Hirata	European Geoscience Union General Assembly 2013（ウィーン、オーストリア）	2013年4月7日-12日	国際
An earthquake forecast experiment in the northwest Pacific using RI model（口頭）	Hiroshi Tsuruoka, Naoshi Hirata	Japan Geoscience Union Meeting 2013（千葉市）	2013年5月19日-24日	国際
Three-dimensional earthquake forecasting model for the Kanto district（ポスター）	Yokoi Sayoko, Hiroshi Tsuruoka, Naoshi Hirata	Japan Geoscience Union Meeting 2013（千葉市）	2013年5月19日-24日	国際
Three-dimensional earthquake forecasting model for the Kanto district（ポスター）	Yokoi Sayoko, Hiroshi Tsuruoka, Naoshi Hirata	8 th International Workshop on Statistical Seismology（北京、中国）	2013年8月11日-15日	国際
首都圏の地震発生予測モデルの構築に向けて－震源の深さに注目した地震カタログの評価－（ポスター）	横井佐代子・鶴岡弘・平田直	日本地震学会2013年秋季大会（横浜市）	2013年10月7日-9日	国内
Earthquake forecasting test for Kanto district : Analysis of an earthquake catalog considering focal depth（ポスター）	Yokoi Sayoko, Hiroshi Tsuruoka, Naoshi Hirata	The 2013 American Geophysical Union Fall Meeting（サンフランシスコ）	2013年12月9日-13日	国際
Space resolution dependency on CSEP consistency tests（ポスター）	Hiroshi Tsuruoka, Yokoi Sayoko, Naoshi Hirata	The 2013 American Geophysical Union Fall Meeting（サンフランシスコ）	2013年12月9日-13日	国際

学会誌・雑誌等における論文掲載
なし

マスコミ等における報道・掲載
なし

(f) 特許出願，ソフトウェア開発，仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウェア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

(3) 平成 26 年度業務計画案

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。

表 1 各空間グリッドにおけるグリッド総数

		水平方向[緯度(°)x 経度 (°)]				
		0.025	0.05	0.1	0.25	0.5
深さ方向 (km)	2.5	480,000	120,000	30,000	4,800	1,200
	5	240,000	60,000	15,000	2,400	600
	10	120,000	30,000	7,500	1,200	300
	25	48,000	12,000	3,000	480	120
	50	24,000	6,000	1,500	240	60

表 2 円筒モデルの学習条件と予測条件

予 測	領域	東経 138.5°から 141.5°、北緯 34.5°から 37.0°、深さ 0 から 100km	
		水平方向[緯度(°)x 経度 (°)]	0.025、0.05、0.1、0.25、0.5
		深さ方向(km)	2.5、5、10、25、50
	規模		4.0 以上 9.0 以下を 0.1 ごと
	期間 (3m1st は、3 ヶ月予測第 1 ラウンドの意)		・ 3m1st:2009 年 11 月 1 日-2010 年 2 月 1 日 ・ 3m2nd:2010 年 2 月 1 日-2010 年 5 月 1 日 ・ 3m3rd:2010 年 5 月 1 日-2010 年 8 月 1 日 ・ 3m4th:2010 年 8 月 1 日-2010 年 11 月 1 日 ・ 3m5th:2010 年 11 月 1 日-2011 年 2 月 1 日
学 習	領域	水平方向:平滑化半径(km)	2.5、5、7.5、9、10、15、20、30、50、100
		深さ方向(km)	「予測領域」の深さ方向と同じ
	規模		2.5 以上 9.0 以下、 <i>b</i> 値=0.9
	期間		1998 年 1 月 1 日から予測期間初日の前日

表 3 球モデルの学習条件と予測条件

予 測	領域	東経 138.5° から 141.5° 、北緯 34.5° から 37.0° 、深さ 0 から 100km	
		水平方向[緯度(°)x 経度 (°)]	0.025、0.05、0.1、0.25、0.5
		深さ方向(km)	2.5、5、10、25、50
	規模		4.0 以上 9.0 以下を 0.1 ごと
	期間 (3m1st は、3 ヶ月予測第 1 ラウンドの意)		・ 3m1st:2009 年 11 月 1 日-2010 年 2 月 1 日 ・ 3m2nd:2010 年 2 月 1 日-2010 年 5 月 1 日 ・ 3m3rd:2010 年 5 月 1 日-2010 年 8 月 1 日 ・ 3m4th:2010 年 8 月 1 日-2010 年 11 月 1 日 ・ 3m5th:2010 年 11 月 1 日-2011 年 2 月 1 日
学 習	領域	平滑化半径(km)	2.5、5、7.5、9、10、15、20、30、50、100
	規模		2.5 以上 9.0 以下、 <i>b</i> 値=0.9
	期間		1998 年 1 月 1 日から予測期間初日の前日

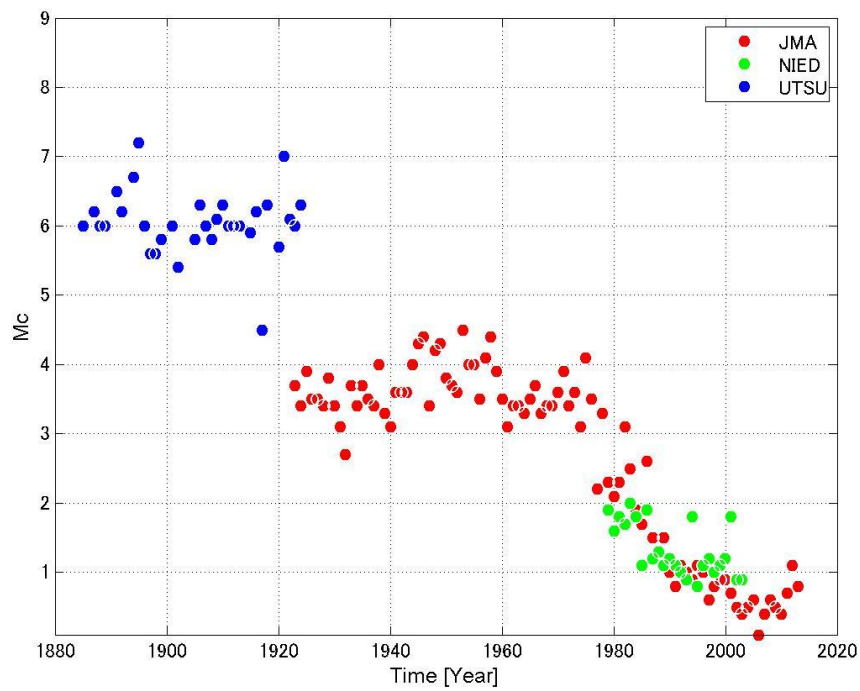
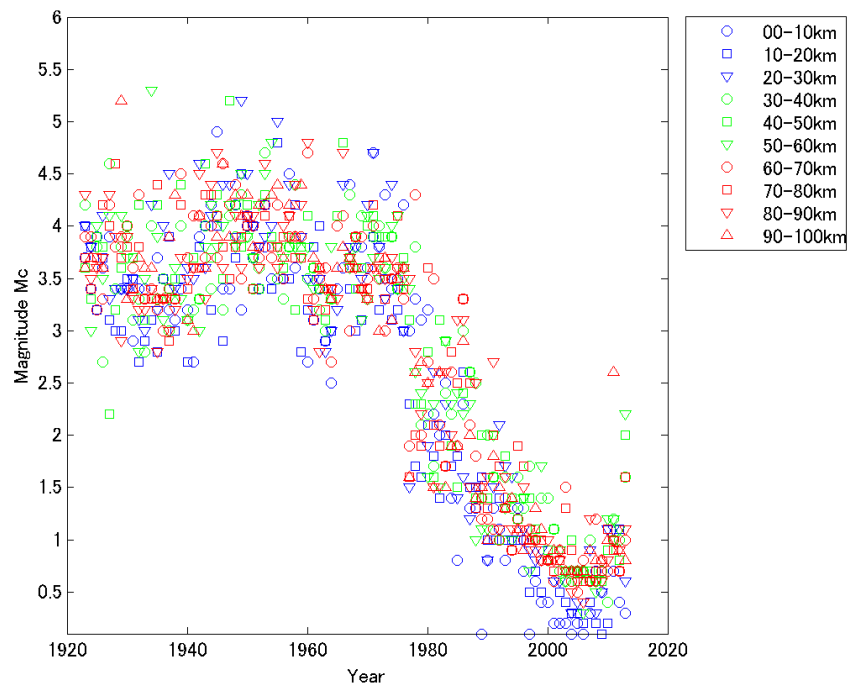
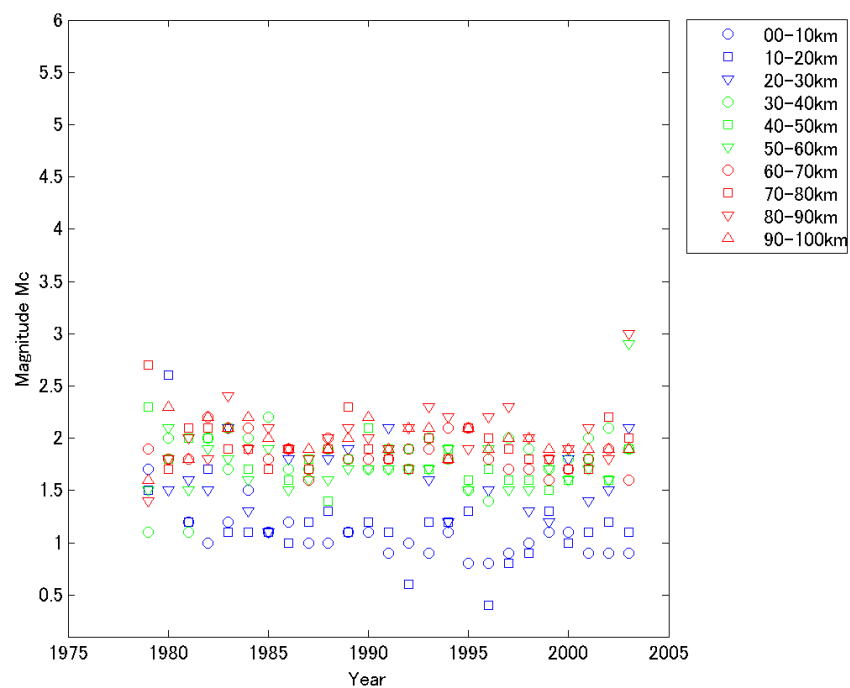


図1 気象庁地震カタログ(JMA)、防災科学技術研究所が作成した地震カタログ(NIED)、宇津カタログ(UTSU)のコンプリートネスマグニチュード。震源の深さは、0 から 100km。縦軸はコンプリートネスマグニチュード、横軸は時間を示す。

(a)



(b)



(c)

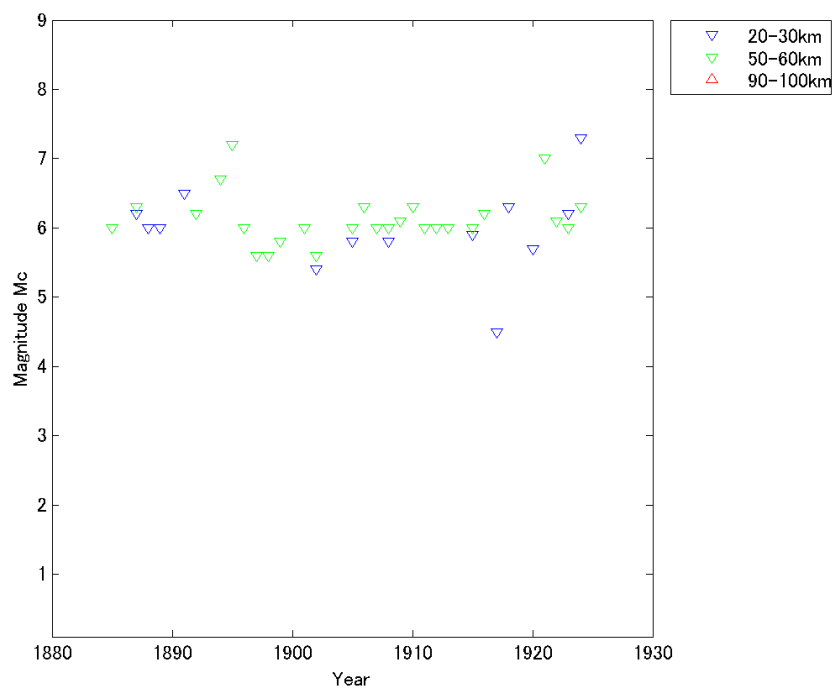
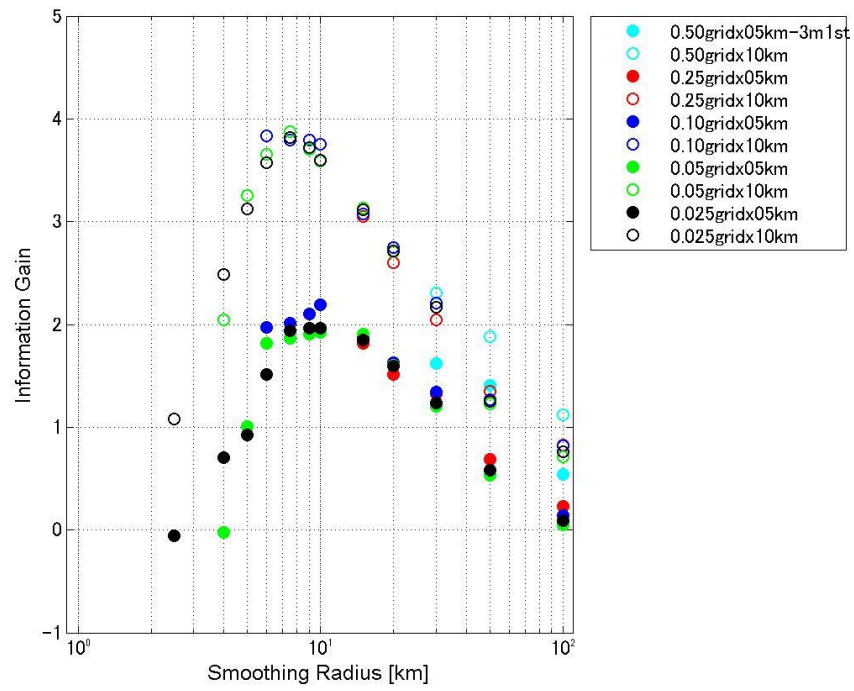


図2 震源の深さ精度 10km のコンプリートネスマグニチュード。(a) 気象庁地震カタログ (b) 防災科学技術研究所が作成した地震カタログ、(c) 宇津カタログ。縦軸はコンプリートネスマグニチュード、横軸は時間を示す。

(a)



(b)

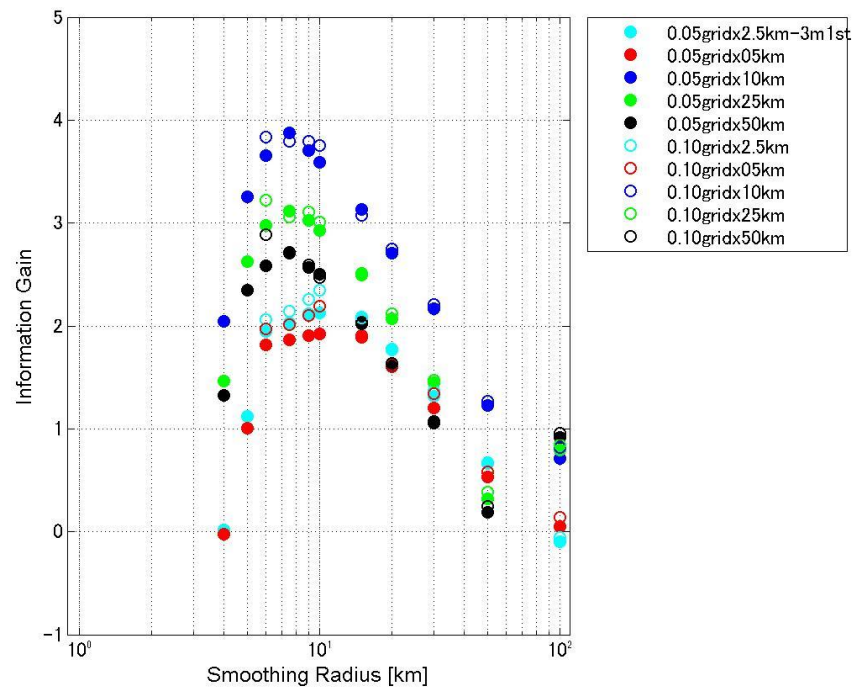
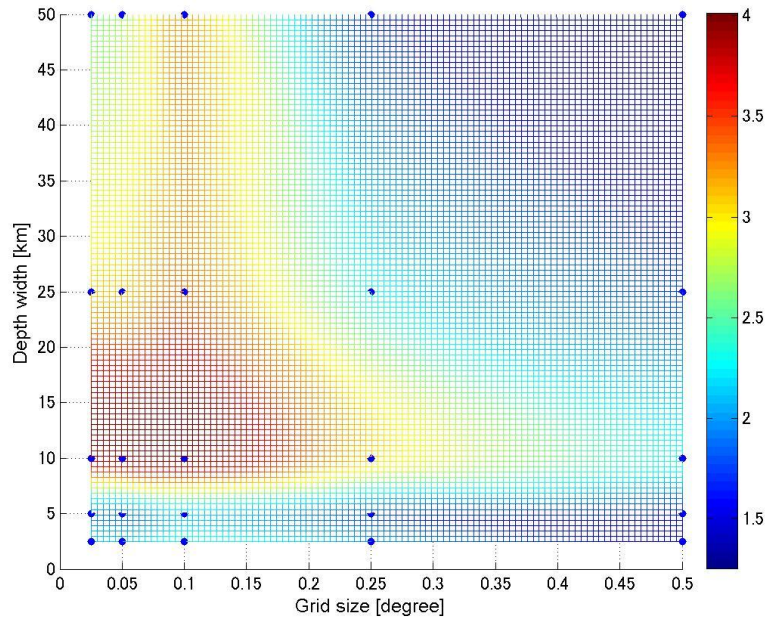
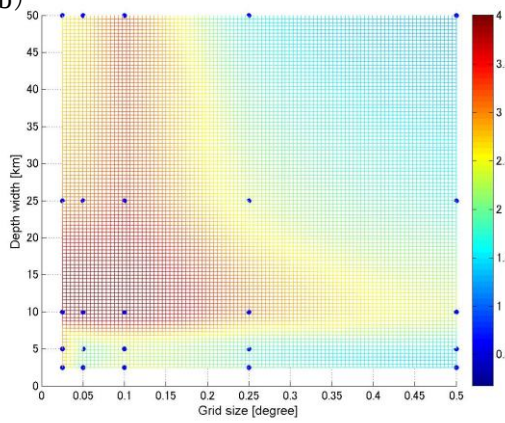


図3 円筒モデルにおける2009年11月1日から2010年2月1日(3m1st)を予測した結果。(a) 水平グリッドのグリッドサイズの評価。(b) 深さグリッドのグリッドサイズの評価。縦軸は情報利得、横軸はRIモデルの平滑化半径を示す。

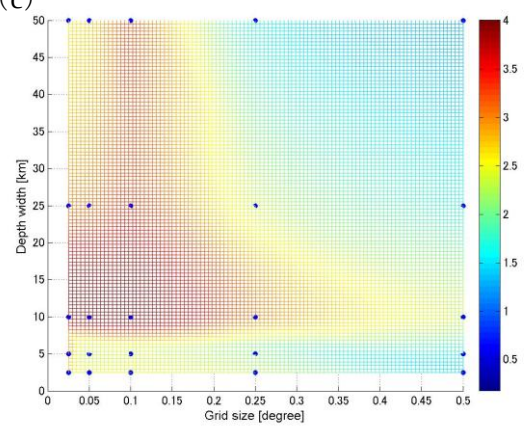
(a)



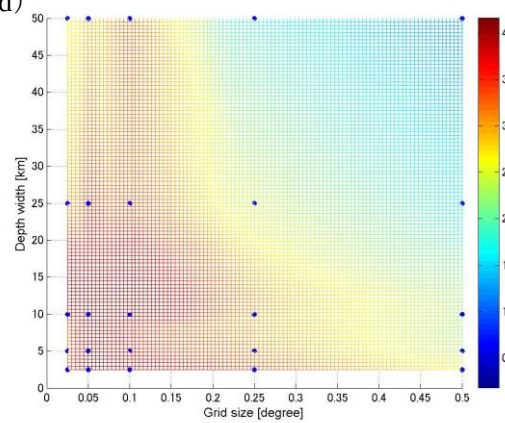
(b)



(c)



(d)



(e)

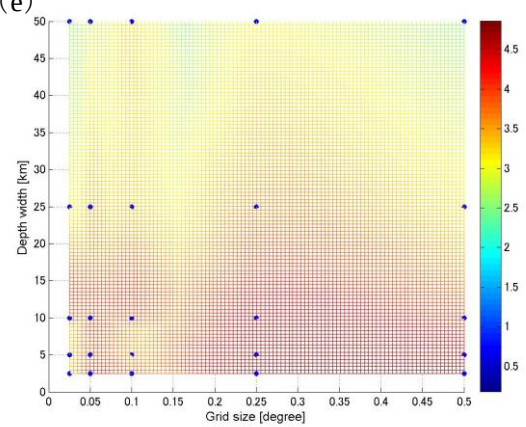


図4 各空間グリッドにおける円筒モデルの情報利得の最大値。(a) 3m1st、(b) 3m2nd、(c) 3m3rd、(d) 3m4th、(e) 3m5th。縦軸は深さグリッド、横軸は水平グリッドを示す。また、カラーバーは、情報利得を示す。

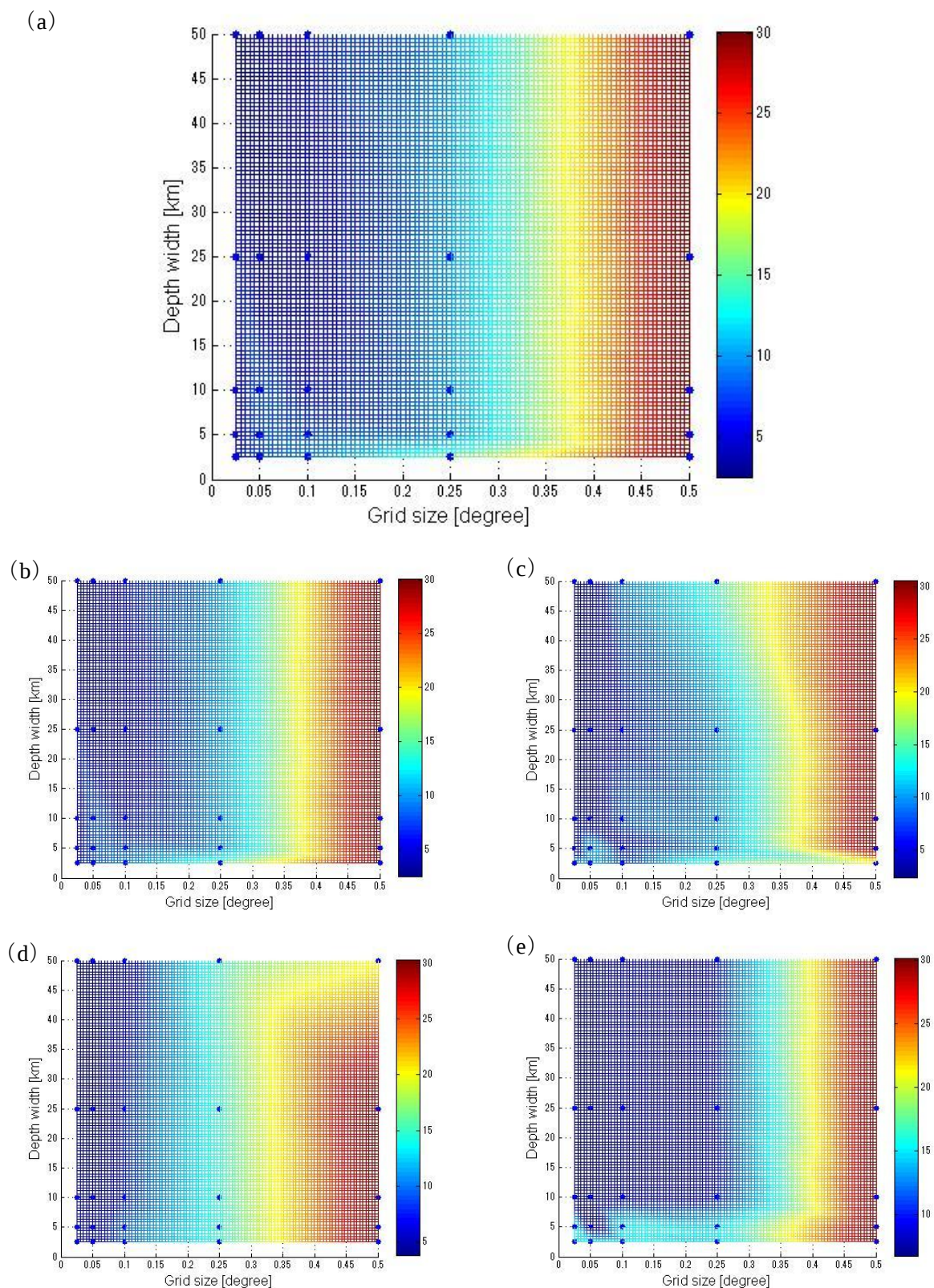
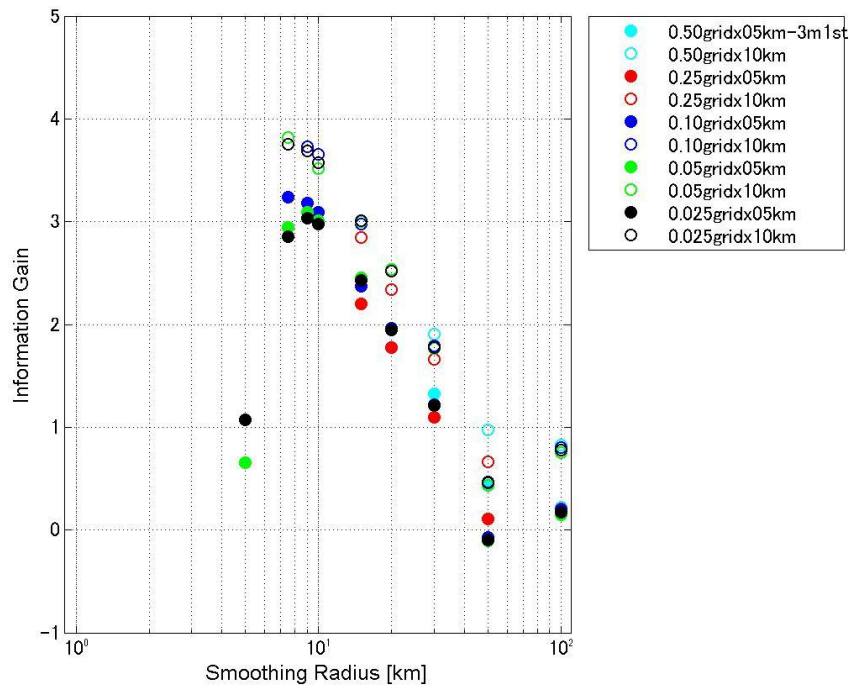


図5 円筒モデルの情報利得が最大値をとる時の平滑化半径。(a) 3m1st、(b) 3m2nd、(c) 3m3rd、(d) 3m4th、(e) 3m5th。縦軸は深さグリッド、横軸は水平グリッドを示す。また、カラーバーは、RIモデルの平滑化半径を示す。

(a)



(b)

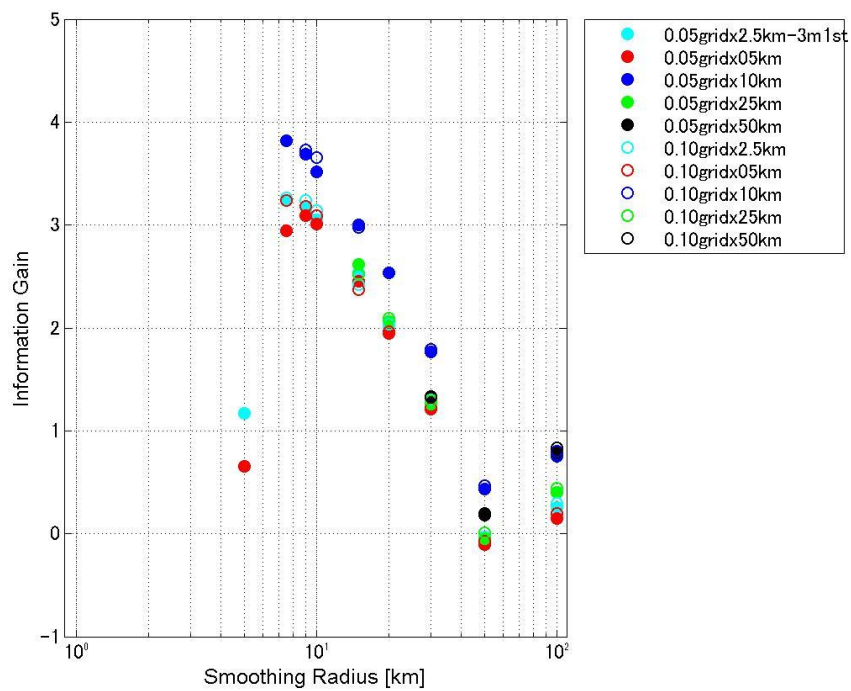


図 6 球モデルにおける 2009 年 11 月 1 日から 2010 年 2 月 1 日 (3m1st) を予測した結果。
(a) 水平グリッドのグリッドサイズの評価。(b) 深さグリッドのグリッドサイズの評価。
縦軸は情報利得、横軸は RI モデルの平滑化半径を示す。

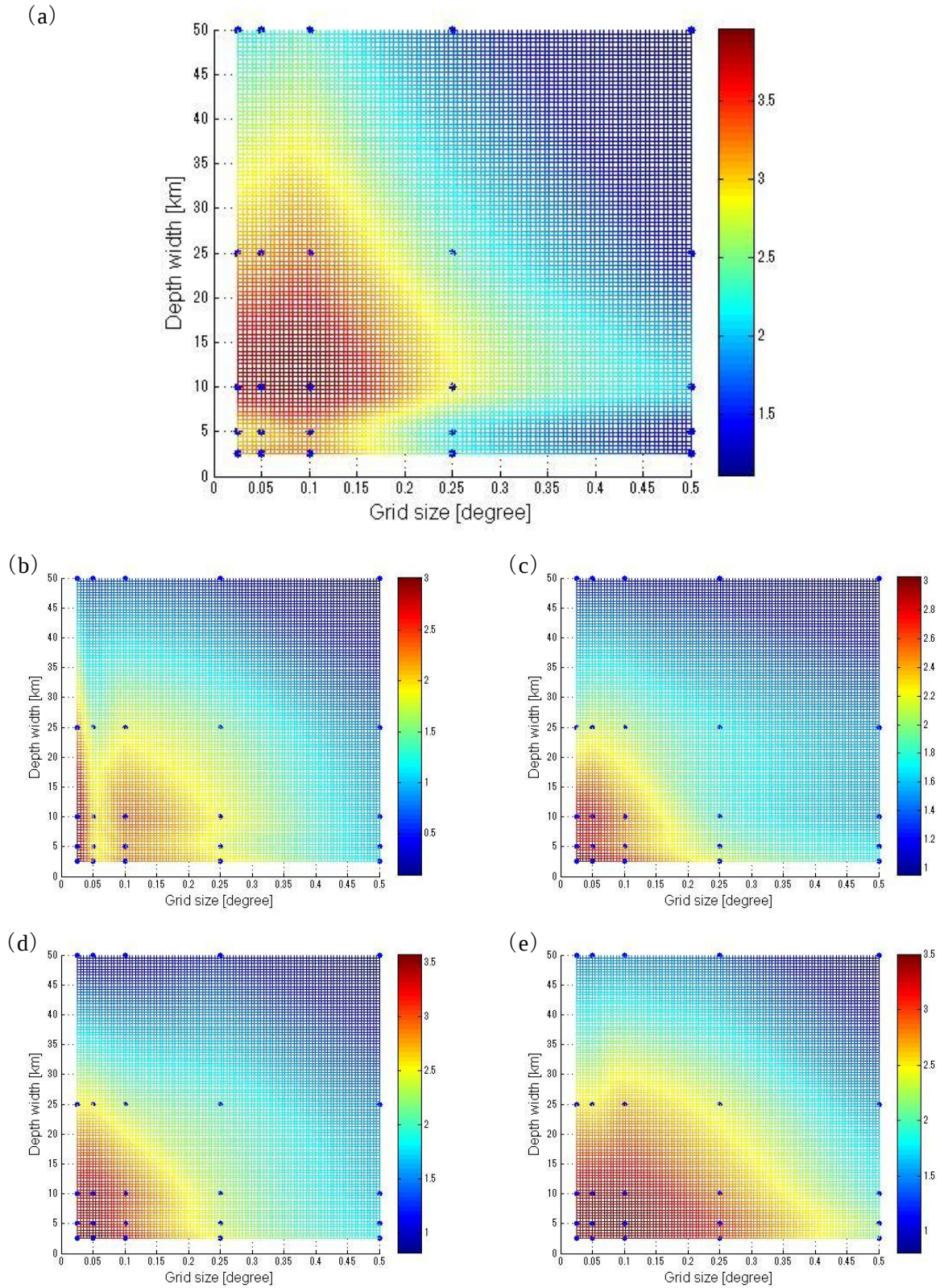


図7 各空間グリッドにおける球モデルの情報利得の最大値。(a) 3m1st、(b) 3m2nd、(c) 3m3rd、(d) 3m4th、(e) 3m5th。縦軸は深さグリッド、横軸は水平グリッドを示す。また、カラーバーは、情報利得を示す。

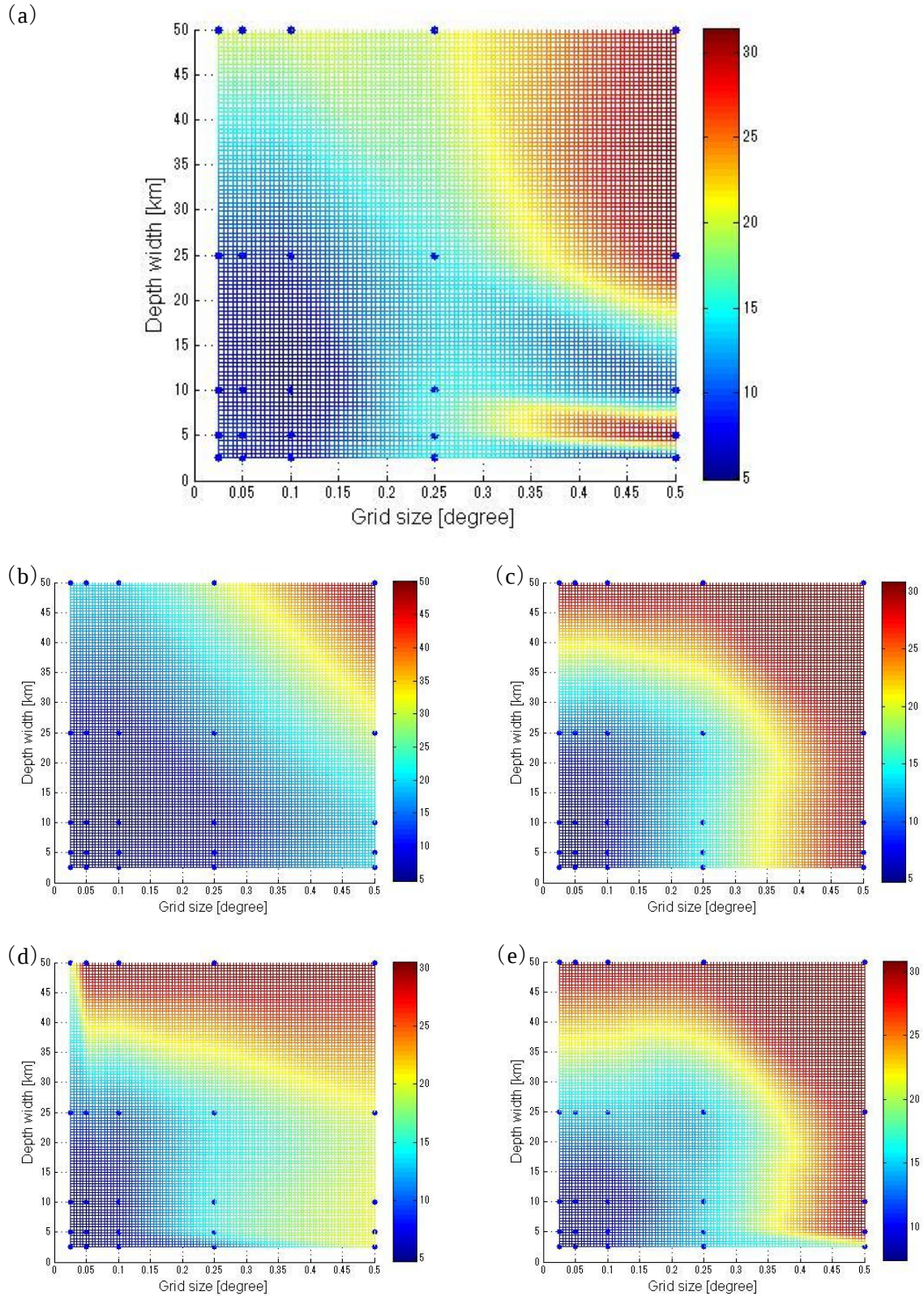


図 8 球モデルの情報利得が最大値をとる時の平滑化半径。(a) 3m1st、(b) 3m2nd、(c) 3m3rd、(d) 3m4th、(e) 3m5th。縦軸は深さグリッド、横軸は水平グリッドを示す。また、カラーバーは、RI モデルの平滑化半径を示す。

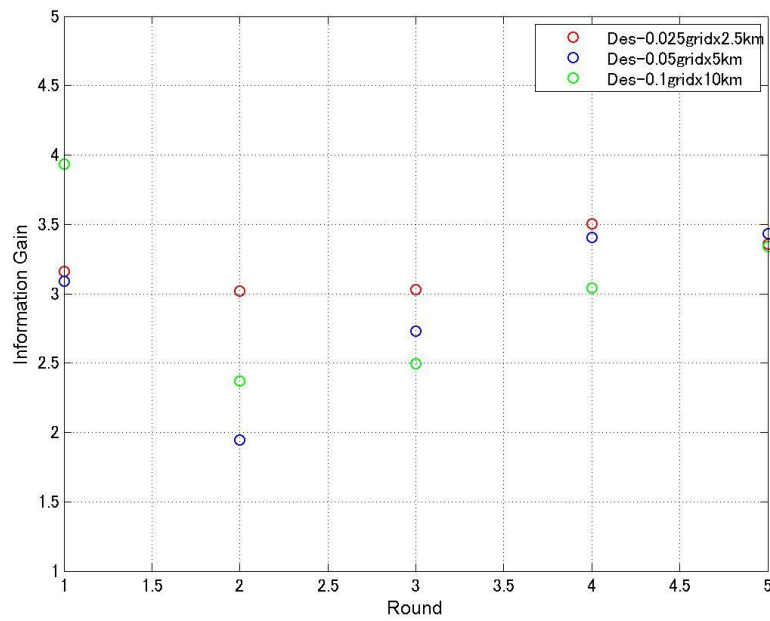


図 9 球モデルの各空間グリッドにおける情報利得（ $0.025^{\circ} \times 0.025^{\circ} \times 2.5\text{km}$ 、 $0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ} \times 5\text{km}$ 、 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ} \times 10\text{km}$ ）。縦軸を情報利得、横軸を予測期間（ラウンド）とする。

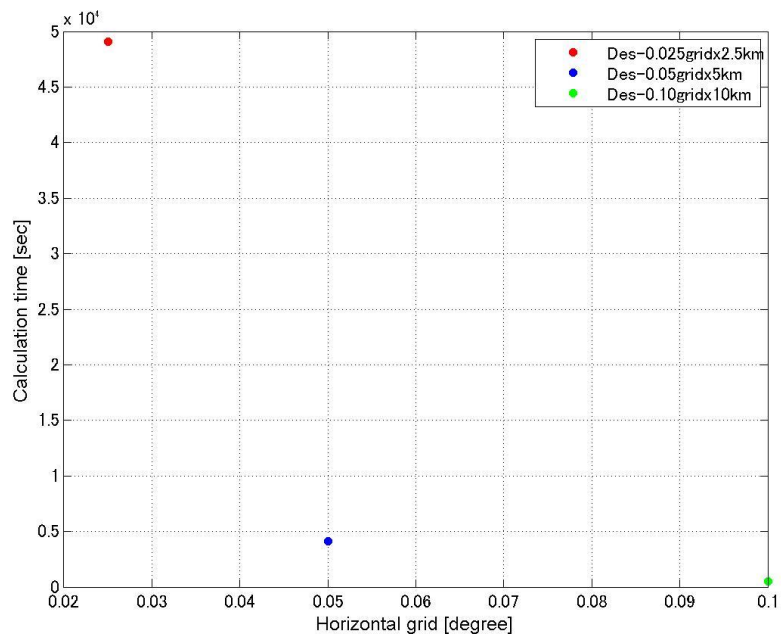


図 10 球モデルの計算時間（水平グリッドは $0.025^{\circ} \times 0.025^{\circ} \times 2.5\text{km}$ 、 $0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ} \times 5\text{km}$ 、 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ} \times 10\text{km}$ ）。縦軸を計算時間（秒）、横軸を水平グリッドのサイズとする。