

気象庁震源データを用いた 地震発生上下限層の深さの評価

蛸沢勝三¹・坂上正治²

¹財団法人原子力発電技術機構 原子力安全解析所 耐震解析室室長
(〒105-0001 東京都港区虎ノ門3-17-1 藤田観光虎ノ門ビル6F)

E-mail: ebisawa@nupec.or.jp

²財団法人原子力発電技術機構 原子力安全解析所 調査役
(同上)

E-mail: sakagami@nupec.or.jp

本研究では、日本全域（島しょ地域及び海域を除く）を15地震域に区分した上で、気象庁一元化震源データ（1997年10月～2001年9月）を用いて、震源深さデータを統計処理して、震源深さに関する地震の累積頻度及び地震発生層に関するパラメータ（D10%、D90%等）を求めた。また、マグニチュード、観測点数、及び震源深さに対する震源深さの決定誤差についても検討を加えた。さらに、国内の内陸地震で地表に顕著な地震断層が出現しなかった六つの内陸地震を対象として、各震源領域の周辺部における地震発生上下限層の評価を行い、それぞれが属する地震域のものと比較した。本研究を通して、国内のほとんどの地域において地震発生層の上下限深さの範囲は6～20kmとなること、等の結論が得られた。

Key Words : *Seismogenic layer, Upper and lower cutoff depths of seismicity, Inland earthquake, JMA catalogue*

1. はじめに

将来起こり得る地震動を合理的に予測するために、不均質なすべり分布を有する断層モデルを用いて地震動評価を行うことの重要性が広く認識されている。断層モデル内の断層パラメータの設定に関して、入倉・三宅¹⁾により標準的な設定法が提案されている。伏在断層による地震動の評価では、アスペリティ、応力降下量、高周波遮断係数の設定等が重要である。これらのうちのアスペリティ深さの設定に着目する場合に、地域性を反映した地殻内の地震発生層の上下限深さを適切に評価する必要がある。そのためには、質の高い震源データを用いて、地域特性を考慮して評価する必要がある。

著者等は、気象庁一元化震源データ（1997年10月～2001年9月）を用いて、伊藤・中村²⁾の地震発生上下限層の深さパラメータの評価手法によって全国の深さパラメータを求めた。評価に当たっては、まず、日本全域（島しょ地域及び海域を除く）を15の地震域に区分した上で、各地震域内で発生した地震の震源データを用いて、地震発生上下限層の深さパラメータを評価し、地域別の上下限層深さを明らかにし

た。次いで、気象庁一元化震源データには、マグニチュード、震源深さ、震源深さの標準偏差が記述されているので、15の地震域毎に、マグニチュード、観測点数、及び震源深さと震源深さの標準誤差に関する相関関係について検討を行い、それらの関係を明らかにした。更に、各地震域内での地震発生上下限層の深さがその領域内で均一かどうかを見るために、国内の内陸地震で地表に顕著な地震断層が出現しなかった六つの内陸地震を対象として、各震源周辺領域に含まれる震源データを用いて、伊藤・中村²⁾の手法により、地震発生上下限層の深さパラメータを評価し、それぞれが属する地震域のものと比較した。

本報では、15地震域毎の深さパラメータの評価結果、15地震域毎のマグニチュード、観測点数、震源深さと震源深さの決定誤差に関する相関関係、及び国内の6内陸地震の震源周辺領域での深さパラメータとそれらが属する地震域のものとの比較結果について述べる。

2. 地震発生上下限層の深さパラメータの評価手法と使用データ

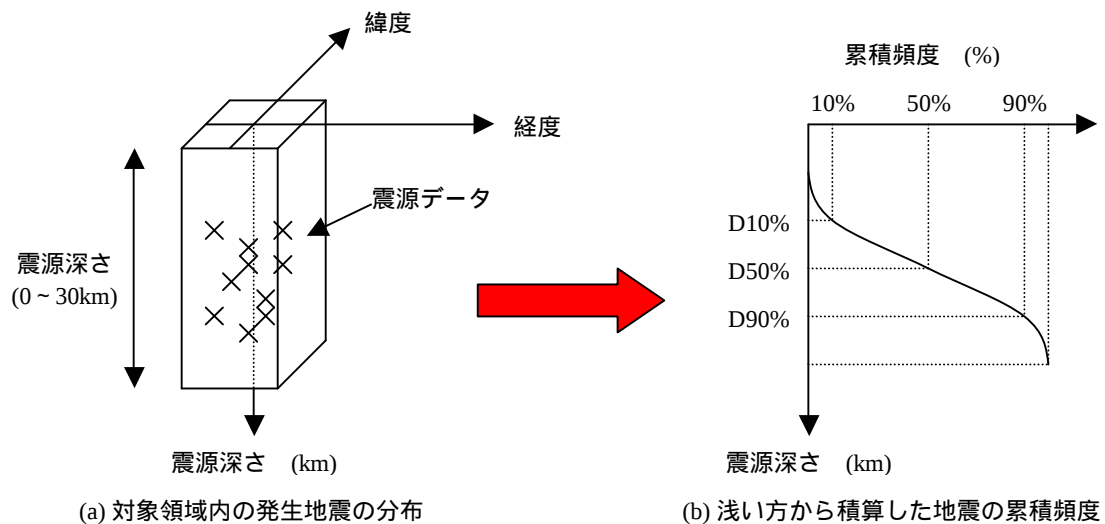


図-1 地震発生上下限層の深さパラメータの算定法²⁾の概略．D10%が地震発生層の上限深さ，D90%が下限深さ．

(1) 地震発生上下限層の深さパラメータの評価方法

伊藤・中村²⁾は，対象領域内で発生した地震の震源データを用いて，統計処理を行い，地震発生上下限層の深さに関する評価パラメータを提案している．提案手法では，図-1に示すように，検討領域ごとに対象となる地震の数を震源深さの浅いものから積算し，その数が，10%，50%，90%に達する時の深さを，D10%，D50%，D90%とし，D10%が地震発生層の上限深さを，D90%が下限深さをそれぞれ代表する値としている．

伊藤・中村²⁾は，京都大学の微小観測網によって震源決定が可能な中国，近畿及び中部地方の領域（およそ北緯34°～38°，東経132°～138°）を，緯度，経度それぞれ0.25°の小領域に分割し，約6万個の震源データを用いて，深さパラメータの評価を行い，地震発生層の地域的な変化を検討している．

本研究では，伊藤・中村の提案している地震発生上下限層の深さパラメータの評価手法を用いて，深さパラメータを評価することとした．

(2) 使用データ

気象庁では，1997年10月以降，大学や公的機関による地震観測データを集めて，気象庁の地震観測データと同一データベースとして，一元的に処理を行い，震源データを決定・整備している．この震源データは，「気象庁一元化震源データ」と呼ばれる．また，2001年10月以降では，震源決定の走時表や観測点に付与する重み係数等を変更して，震源データを決定・整備している．これらのデータの信頼性は，上述の気象庁一元化震源データより高いとされている³⁾．本報では，2001年10月以降のデータは信頼性が高いものの，最新データがまだ公開されていないので，統計処理に用いるだけのデータ数が少ないと考え，1997年10月～2001年9月のデータを使用した．

3．地震域別地震発生上下限層の深さの検討

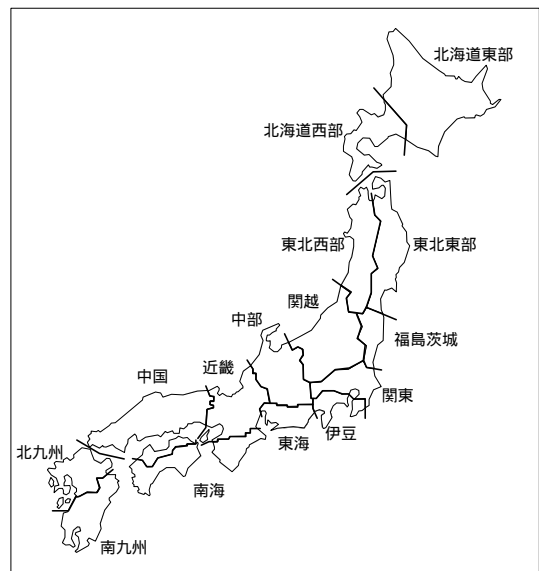


図-2 気象庁の震央地域区分をグループ化して作成した15地震域の分布．

(1) 地震域の設定と対象震源データの抽出

地震域の設定に先立ち，震源データの地域的な偏りをできるだけ除去すること，及び作業を効率化することを念頭に，次のような準備を行った．

- ・日本全域（島しょ地域及び海域を除く）を図-2に示す15の地震域に分割した．分割にあたっては，日本列島の地震地体構造⁴⁾を参照し，気象庁の震央地域区分に基づき地震域をグループ化した．
- ・気象庁一元化震源データに記載の震央地域番号を用いて，各震源データを地震域に振り分けた．
- ・震源データには，本報で対象とする地殻内地震の他に，火山性の地震，プレート境界地震，スラブ内地震などが含まれる．そこで，可能な限り地殻内地震を抽出するために，各地震域ごとに，震央分布や震源深さ分布などを図示し，目

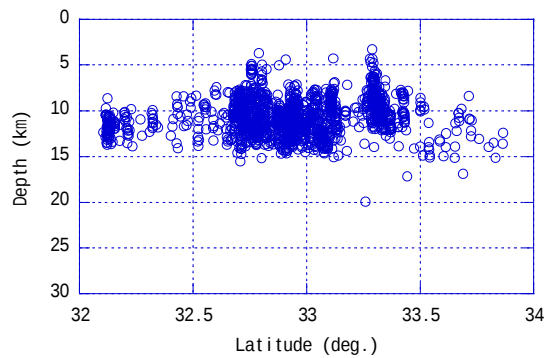


図-3 震源データの深さ分布の例（北九州）．

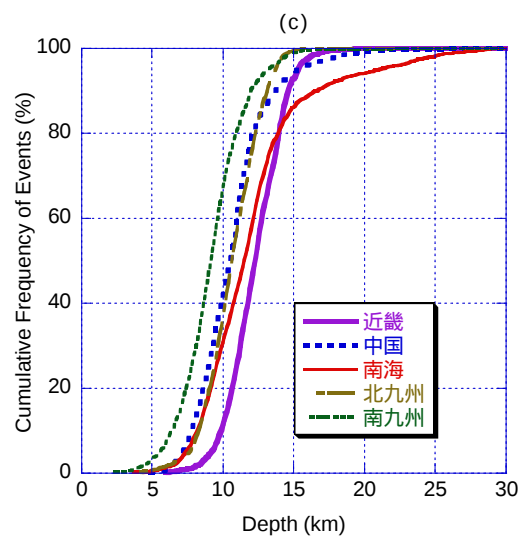
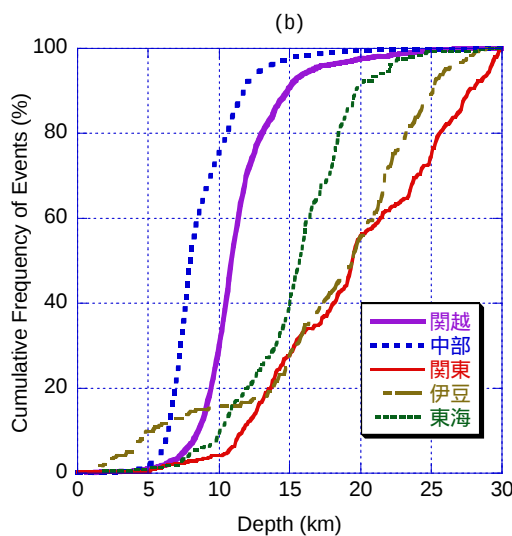
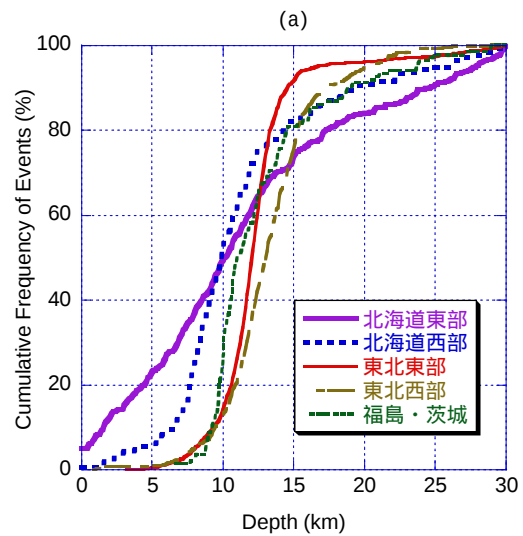


図-4 各地震域ごとの震源深さと地震の累積頻度の関係．

視による検討を行うと共に、火山活動やプレート境界深さなどを考慮して、次のような条件を設定してデータの抽出を行った．

- 1) 震源深さは30km以内とする．
- 2) 火山活動が明らかに活発で、これに伴う火山起因の地震と見なせるものについては、直方体領域を適宜設定し、この中に含まれる震源データを棄却する．（対象としたのは、北海道西部の有珠山周辺）
- 3) スラブ内地震やプレート境界地震が含まれる可能性の高い地震域では、プレート境界面を任意の3点を通る平面で定義し、それより下に位置する地震を棄却する．（対象としたのは、東北東部、関東、伊豆、東海、南海）

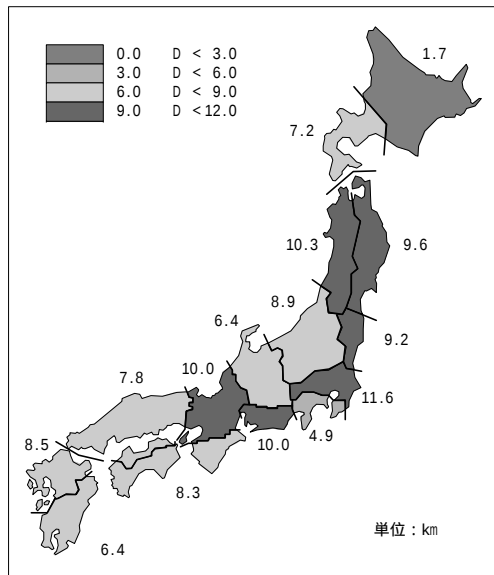
上記条件のもとに気象庁一元化震源データからマグニチュード（M）2以上の震源データを抽出した結果、地震の総数は、26,902個となった．このうち、M4以上の地震は131個で全体の0.49%であった．また、各地震域の地震数にばらつきがあった．最多は中国地震域の8,776個であり、これには鳥取県西部地

震（M7.3）の余震が相当数含まれている．最少は福島・茨城地震域の133個であった．図-3に震源データの深さ分布の一例として、北九州地震域の結果を示す．

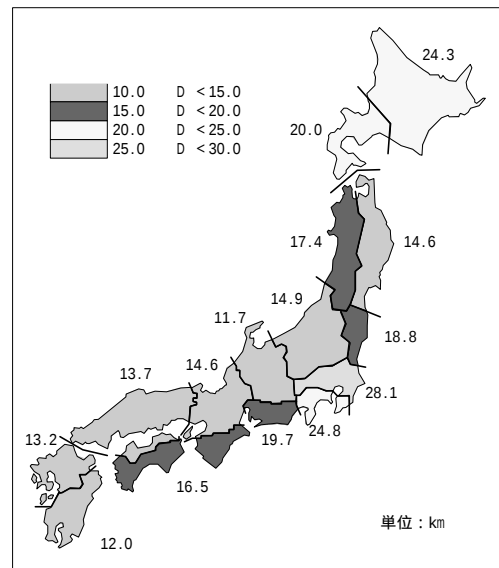
(2) 地震発生上下限層の深さパラメータの評価結果
各地震域ごとに、地震発生上下限層の深さに関するパラメータを評価した．図-4(a)～(c)に震源深さと地震の累積頻度の関係を示す．図-5に各地震域毎の地震発生上下限層の深さパラメータのD10%及びD90%の評価結果の分布を示す．

- 1) 北海道東部、北海道西部、東北東部、東北西部、及び福島・茨城の地震域

図-4(a)から、北海道東部の累積頻度の変化が他の4地震域（北海道西部、東北東部、東北西部、及び福島・茨城）と異なることが分かる．そこで、まず北海道東部を除く4地震域の結果に着目してみる．これらの4地震域では、震源深さがある深さ（地震域ごとに異なるが震源深さ7～10kmの範囲）に達すると、それまでは緩やかに増加していた累積頻度が急激に増加する傾向が見られる．また、図-5(a)より、



(a) D10% (地震発生層の上限深さ)



(b) D90% (地震発生層の下限深さ)

図-5 地震発生層の深さパラメータの分布。

これらの4地域でのD10%の値は、7.2～10.3kmの範囲であった。

一方、北海道東部では、図-4(a)に見られるように、累積頻度曲線は震源深さが1kmより浅い所から立ち上がり、震源深さとともに緩やかに増大し続けている。また、図-5(a)に見られるように、D10%の値が1.7kmと全国的に見ても最も浅い値となっている。震源分布を照査した結果、北海道東部では、大雪山等の火山周辺域で発生した震源深さの浅い地震が多数含まれており、評価に影響を与えたものと考えられる。

2) 関越、関東、伊豆、東海、及び中部の地震域

図-4(b)に示す関越、関東、伊豆、東海、及び中部についての震源深さと地震の累積頻度の関係をみる。関越、中部に関しては、震源深さが5～8kmに達すると、それまでは緩やかに増加していた累積頻度曲線が急激に増加する傾向が見られる。また、累積頻度は全体として滑らかに変化している様子も見られる。

一方、伊豆、関東、及び東海に関しては、累積頻度曲線に不規則な変化がみられる。特に伊豆では、震源深さ8～13km付近で一旦累積頻度の上昇が停滞した後に、再び累積頻度が上昇に転じている。この傾向を検討するために、伊豆、関東、及び東海それぞれの震源分布を地図上に表わし照査した。その結果、関東では東京都南部から千葉県中部にかけて、東海では静岡県西部において、それぞれ震源深さ20～30kmの範囲に地震が多数発生しており、対象データにプレート境界付近の地震が多数含まれていることが分かった。また、伊豆では、伊豆半島東方の浅い地震（震源深さ1～10km）のグループと、神奈川県北部の比較的深い地震（震源深さ20～30km）のグループが見られた。浅い地震のグループは火山性の地震、深い地震のグループはプレート境界の地震と考えられる。

図-5(b)から、プレート境界の地震を含んでいると見られる関東、伊豆、及び東海の3つの地震域では、D90%の値は順に28.1km、24.8km、19.7kmであり、全国的に見て深い値となっている。

3) 近畿、南海、中国、北九州及び南九州の地震域

図-4(c)から、近畿、南海、中国、北九州、及び南九州の各地震域の累積頻度曲線の立ち上がり傾向は類似しており、ある震源深さを越えると累積頻度が急激に増加している等の共通した傾向が見られる。このような累積頻度の傾向を有する地震域においては、地殻内地震を相当の割合で抽出できていると、地震発生上下限層を適切に評価できていると考えられる。ただし、南海については他の4地震域に比較して、震源深さ30kmまで頻度曲線の上昇が緩やかに続いている。これは、プレート境界地震が含まれていることによるものと考えられる。これらの地域におけるD10%及びD90%は、図-5からそれぞれ6.4～10.0km、12.0～16.5kmの範囲である。

(3) プレート境界地震の含まれ方が少ない地震域における地震発生上下限層の深さの傾向

(2)の火山性の地震及びプレート境界地震の除去が十分でない4地震域（北海道東部、関東、伊豆、東海）を除いた11地震域の震源データを用いて、地震発生上下限層の深さパラメータの統計量（平均値±標準偏差）を評価した。その結果、D10%の値は 8.4 ± 1.4 km、D90%の値は 15.2 ± 2.7 kmであった。また、D10%の最浅値は6.4km、D90%の最深値は20.0kmであった。

4. 震源深さの決定精度の検討

気象庁一元化震源データには、マグニチュード、震源深さ、震源深さの標準誤差（決定誤差と呼ぶ）及び震源決定に用いられた観測点数が記載されている。

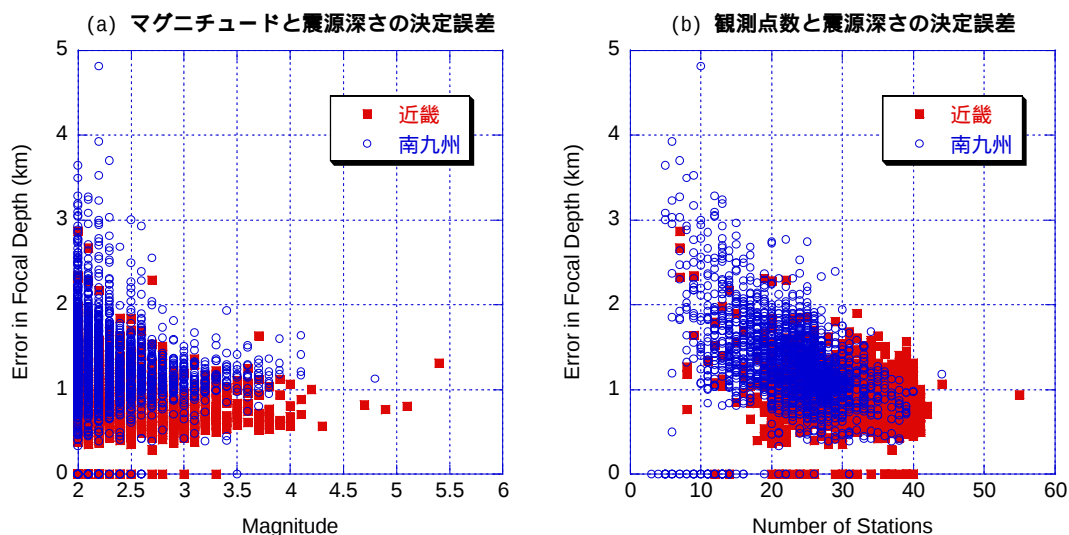


図-6 マグニチュード及び観測点数と震源深さの決定精度との関係の例。

る．そこで、震源深さの決定精度の把握のために、15 地震域ごとに、以下の 1)～3)に示すケースで作図を行い、震源深さの決定誤差が、マグニチュード、観測点数、震源深さとどのような関係を持っているかを検討した．

- 1) マグニチュードと決定誤差の関係
- 2) 観測点数と決定誤差の関係
- 3) 震源深さと決定誤差の関係

図-6(a)に近畿及び南九州の地震域におけるマグニチュードと決定誤差との関係を、図-6(b)に両地震域における観測点数と決定誤差との関係を示す．両図から決定誤差の範囲は0.4～4.0km程度である．図-6(a)から、マグニチュード(M)が大きくなるにつれて震源深さの決定誤差が収れんする傾向にあり、M4以上では0.5～1.5km程度に収れんしている．図-6(b)から、観測点数が増加するにつれ、決定誤差が収れんする傾向にあり、観測点数30以上では0.5～1.5km程度に収れんしている．これらの傾向は、多くの地震域でも同様であった．一方、震源深さとその決定誤差との関係は明確でなかった．

5．地震発生上下限層深さの検討

(1) 地震域内地震発生上下限層深さの均一性の検討

1) 対象とした内陸地震

各地震域内での地震発生上下限の深さが均一かどうかを見るために、内陸地震で地表に顕著な地震断層が出現しなかった地震の震源周辺領域と、これらの地震が属する前述の 15 地震域での上下限層の深さパラメータを比較した．対象地震は、国内の 1885 年以降の内陸地震で地表に顕著な地震断層が出現しなかったと考えられる以下の 6 地震とした．鳥取県西部地震については、地表に断層が出現したかどうかで議論が分かれている．

- 2000 年 10 月 6 日鳥取県西部地震 (M7.3)
- 1914 年 3 月 15 日秋田仙北地震 (M7.1)
- 1900 年 5 月 12 日宮城県北部地震 (M7.0)
- 1984 年 9 月 14 日長野県西部地震 (M6.8)

1997 年 6 月 25 日山口県北部地震 (M6.1)

1998 年 9 月 3 日岩手県内陸北部地震 (M6.1)

これらの地震に係わる対象領域は、図-7 に示す震源周辺の矩形領域とし、領域内に入る気象庁一元化データを抽出した．使用する震源データとしては、～ について 1997 年 10 月～2001 年 9 月までとし、については 1997 年 10 月～2000 年 10 月 6 日の地震発生時 (13 時 30 分) 前までとした．対象地震の数は、総計 1,067 個となった．最多は長野県西部地震周辺域に対する 430 個、最少は秋田仙北地震周辺域に対する 27 個、他の 4 地震については 104～238 個であった．抽出した気象庁一元化震源データを用いて、前述の 15 地震域と同様の方法で、地震発生上下限層の深さパラメータを算定した．

2) 検討結果と考察

上記内陸地震の震源周辺領域における震源深さと累積頻度との関係を図-8 に示す．対象とした 6 地震と、15 地震域との対応を表-1 に示す．図-8 中に各地震が属する地震域の結果を重ね書きしている．図-8 から、対象地震の震源周辺領域における結果とそれが属する地震域の両累積頻度の曲線形状は概ね一致している．しかしながら図-8(a),(b)から、の地震の頻度曲線はそれらが属する地震域でのものよりやや浅めに評価されている．これに対して、図-8(c),(d)から、の地震ではやや深め評価されている．

6 内陸地震に対する地震発生層の深さパラメータと属する地震域での評価結果を表-1 に示す．これより、全体として、D10%は 7.2～11.5km の範囲に、D90%は 11.9～15.8km の範囲にある．

6 内陸地震の個別の地震発生上下限層の深さパラメータは、その地震が属する地震域のものと顕著な差異が見られなかった．これより、地震域内での地震発生上下限層の深さは均一である可能性が高いと考えられる．

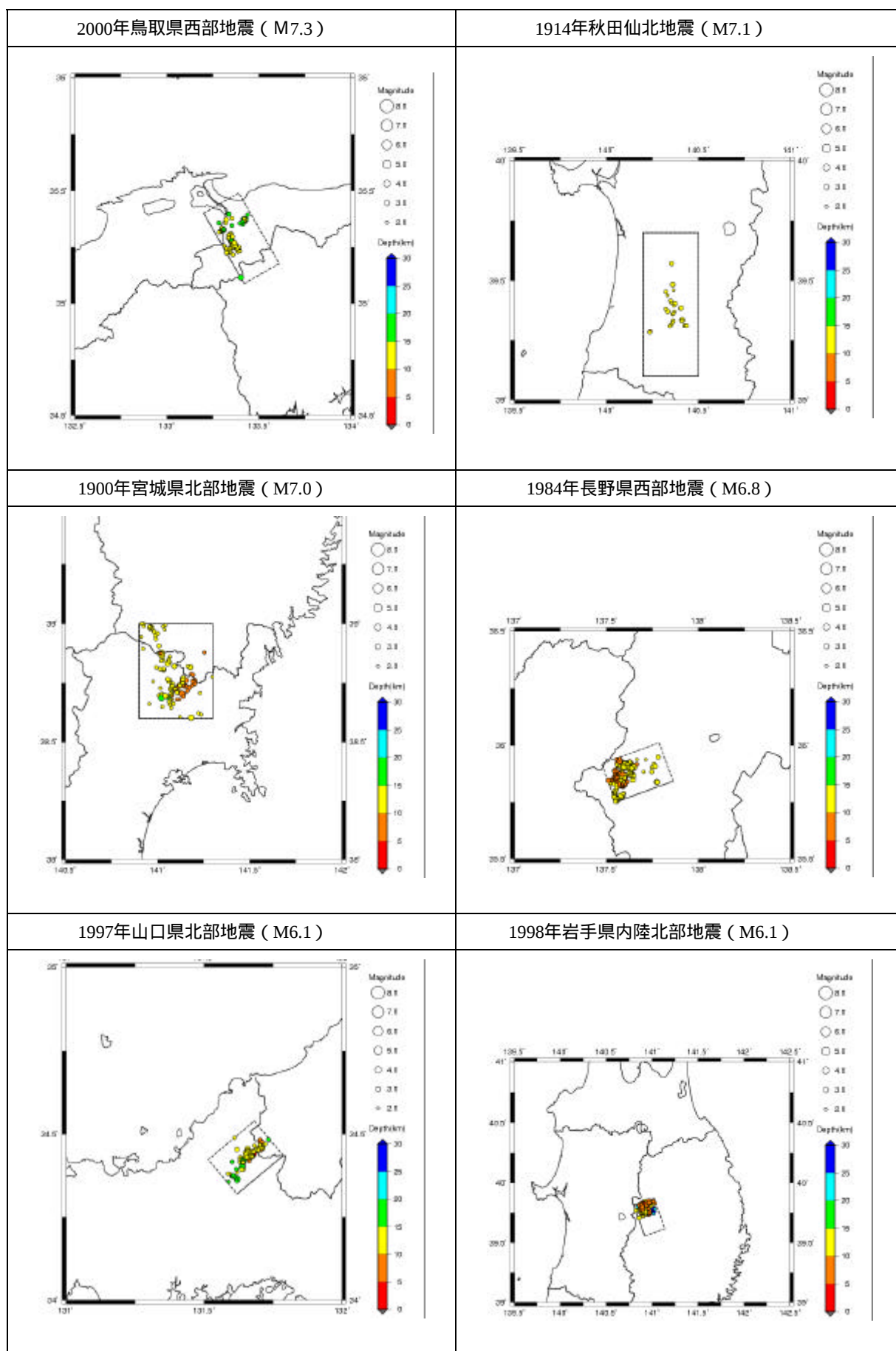


図-7 内陸 6 地震の震源周辺領域に設定した地震発生層の深さパラメータを評価するための矩形領域。

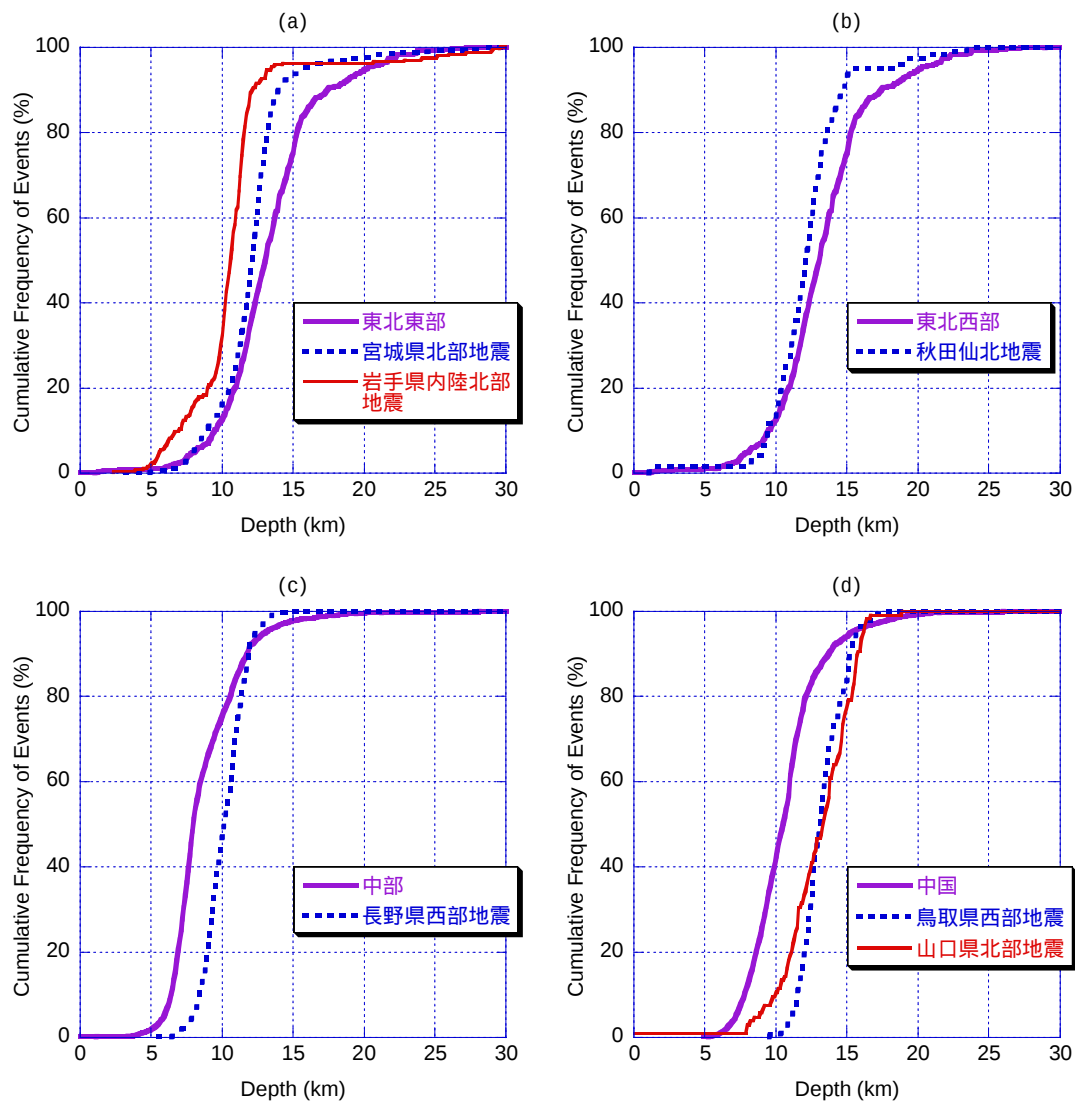


図-8 内陸6地震の震源周辺域における震源深さと地震の累積頻度。

(2) 気象庁 2001 年 10 月以降データによる震源深さとの比較

上野・畠山等³⁾は、気象庁一元化震源データによる震源と大学等関係機関によるものとの精度の違いについて検討を行っている。検討の結果、一元化震源データによる震源深さは、特に、内陸の地震に関する大学等関係機関が臨時観測点を置くなどして精度良く決めた震源深さに比べ、深くなっていることや、同じ地域に発生した地震において、規模の大きな地震の震源深さの方が小さい地震のものより深くなる傾向があることを挙げている。

気象庁では、2001 年 10 月 1 日から震源計算に用いる走時表や観測点に付与する重み係数等を変更して震源を決めている。上野・畠山等³⁾は、長野・岐阜・富山県境付近における 1999 年の地震の震源を対象とした一元化震源データの震源深さは、5～10km であるのに対し、2001 年 10 月以降の手法による深さは 3～8km となり、前者が後者より 2km 程度深めに求まること、後者の値は精度が良いとされる大学等関係機関のものと調和的であることを挙げて

表-1 内陸6地震の震源周辺領域における地震発生層の深さパラメータの評価結果

内陸地震 (属する地震域)	パラメータ		
	D10%	D50%	D90%
鳥取県西部地震 (中国)	11.5 (7.8)	13.1 (10.5)	15.2 (13.7)
秋田仙北地震 (東北西部)	11.1 (10.3)	12.9 (13.2)	13.7 (17.4)
宮城県北部地震 (東北東部)	8.5 (9.6)	11.5 (12.2)	13.2 (14.6)
長野県西部地震 (中部)	8.6 (6.4)	10.2 (8.0)	11.9 (11.7)
山口県北部地震 (中国)	10.0 (7.8)	13.4 (10.5)	15.8 (13.7)
岩手県内陸北部地震 (東北東部)	7.2 (9.6)	10.6 (12.2)	12.2 (14.6)

[備考] 表中の数値の単位は全て km。

() は属する地震域における値。

いる。

6. まとめ及び今後の課題

(1) まとめ

1) 地震発生上下限層の深さパラメータ評価

気象庁震源記録のうち、1997年10月～2001年9月までの記録を15の地震域に振り分け、各地震域における地震発生上下限層の深さパラメータ(D10%, D50%, D90%)を評価し、15地震域のD10%及びD90%の分布図を作成した。火山性の地震及びプレート境界性の地震が含まれている4地震域(北海道東部、関東、伊豆、東海)を除く11地震域において、地震発生上下限層の範囲は6～20kmという結果が得られた。

2) 震源深さの決定精度の検討

15地震域に振り分けられた震源データを用いて、マグニチュード、観測点数、震源深さ、と震源深さの決定誤差の関係について検討を行った。その結果、マグニチュードが大きくなるにつれて決定誤差が収れんする傾向にあり、M4以上では0.5～1.5km程度に収れんしていた。また、観測点数が増加するにつれ、決定誤差が収れんする傾向にあった。震源深さとその決定誤差との関係は明確ではなかったが、震源深さの決定誤差は、0.4～4kmの範囲に分布していた。

3) 地震発生層の深さの検討

各地震域内での地震発生上下限層の深さがその領域内で均一かどうかを見るために、国内で発生した地表にこん跡が顕著に現れなかった六つの内陸地震の震源周辺領域における震源データを抽出して、地震発生上下限層の深さパラメータを評価し、それらが属する地震域でのものと比較した。両者に顕著な地域差は見られなかったことから、地震域内での上下限層の深さの分布が均一である可能性が高いと考えられた。本報で用いた気象庁一元化震源データの深さは、2001年10月以降の手法による深さよりも2km程度深めに求まると指摘されている。

(2) 今後の課題

気象庁では、2001年10月1日から震源計算に用いる走時表や観測点に付与する重み係数等を変更している。そのため、一元化処理が開始された1997年10月以降のすべての地震についても変更された走時表や観測点に付与する重み係数を用いて震源決定の再計算を行っている。再計算結果は、水平方向及び震源深さの標準誤差が小さくなる等の改善が行われているようであり、地震発生上下限層の深さパラメータの変動が予測される。そのため、再計算結果の公開を待って本作業と同等の検討を行う必要があると考える。

謝辞：本研究は、経済産業省資源エネルギー庁原子力安全・保安院からの委託により(財)原子力発電技術機構・原子力安全解析所が実施した事業成果の一部である。本研究の遂行において、有益なご助言を頂いた防災科学技術研究所・地震防災フロンティア研究センター・川崎ラボラトリーの末富岩雄氏に深謝する。

参考文献

- 1) 入倉孝次郎・三宅弘恵：シナリオ地震の強震動予測，地学雑誌，Vol.110，No.6，pp.849-875，2001年。
- 2) 伊藤潔・中村修一：西南日本内帯における地震発生層の厚さ変化と内陸大地震，京都大学防災研究所年報，No.41，B-1，pp.27-35，1998年。
- 3) 上野寛・畠山信一・明田川保・舟崎淳・浜田信生：気象庁の震源決定方法の改善 - 浅部速度構造と重み関数の改良 - ，駿震時報，2001年。
- 4) 萩原尊禮編：日本列島の地震，地震工学と地震地帯構造，鹿島出版会，1991年。

(2003. 7. 10 受付)

EVALUATION OF THE SEISMOGENIC LAYER DEPTH IN JAPAN USING THE JMA CATALOGUE

Katsumi EBISAWA and Masaharu SAKAGAMI

Among various fault parameters, the depth range of a fault plane is one of the most important ones in modeling a blind fault earthquake. To determine such parameter properly, we need to investigate the regional characteristics of seismogenic layer. In this paper, based on the JMA catalogue, we estimated the upper and lower cutoff depths of seismicity of 15 regions covering Japan. The statistical data processing technique was used. Also, we examined the effect of magnitude, numbers of observatories, and focal depth on standard errors in focal depth determination. Finally, we carried out the evaluation of the upper and lower cutoff depths of seismicity in and around the estimated rupture areas of six blind fault earthquakes in Japan. As a highlighted conclusion, we found that the upper and lower cutoff depths of seismicity in most of Japan exist in a range of about 6 to 20km.