

震度データを用いた震源深さの決定の可能性 — 三次元減衰構造を用いた検討 —

東電設計 (株) * 中村亮一
東京電力 (株) 八代和彦**・植竹富一***

Location of hypocentral depth using seismic intensity data with 3-D Q structure

Ryoichi NAKAMURA

Tokyo Electric Power Services Co., Ltd., 3-3-3, Higashi-Ueno, Taito-ku, Tokyo, 110-0015 Japan

Kazuhiko YASHIRO

Tokyo Electric Power Company, 1-1-3 Uchisaiwai-cho, Chiyoda-ku, Tokyo, 1 Japan

Tomiichi UETAKE

Tokyo Electric Power Company, 4-1, Egasaki-Cho, Tsurumi-ku, Yokoyama, 230-8510 Japan

Seismic intensities are strongly affected by heterogeneity of attenuation structure, and it is difficult to determine hypocentral depth of earthquakes using intensity data.

Here, we improve a method for the determination of focal depth using seismic intensity data by considering new developed 3-D attenuation structure and the genetic algorithm is applied. For inland earthquakes that occurred in East Japan, it can be judged a shallow earthquake when estimating the depth more shallowly than 30-40km, and an intermediate depth earthquake when estimating more deeply than 60-70km.

§ 1. はじめに

震度データを用いて震源決定の試みがいくつかなされてきている。距離減衰式による予測値からの残差から震源位置を議論するもの (Bakun and Wentworth, 1997, Bakun, 1999), 震源地域周辺で発生する地震の震度データを用い平均距離減衰からの各サイトでの残差を補正し, それを用いて震源位置を議論するもの (神田ほか, 2003), 三次元減衰構造を用いた震度予測値からの残差から震源位置を議論する研究 (橋田・島崎, 1984, 中村ほか, 1997) などがある。今回は, 新しく求め直した三次元減衰構造を用いることによって, 従来の研究 (中村ほか, 1997) において困難であった震源深さの決定精度に改善が見られたので, それについて報告する。

§ 2. 三次元減衰構造による震源決定

菅原ほか(1996)によれば, 三次元減衰構造を用いた震度予測値と震度分布の残差は, 近年の地震

のみならず歴史地震を用いた検討でも震源位置の変化に対して極小値が得られ, 震度による震源決定の可能性があることが示されている。このため, 適切な探索手法を導入することによって, 震央位置 (東経, 北緯)・震源深さ・マグニチュードなどを同時に求めることが考えられた。中村ほか (1997)は, 探索手法として遺伝的アルゴリズム (GA: Genetic Algorithm) を導入して気象により震源の求まっている地震に対し震源決定を行った。

しかしながら, 震源深さの決定は困難であった

本手法による震源決定は, 用いる減衰モデルに左右されることが考えられ, 今回は新しく求められた三次元減衰構造によって, 震源深さの求められるかどうかに着目することとした。

本手法による震源決定は震度から換算された観測加速度 α^{Obs} と計算加速度 α^{Cal} との残差の標準偏差を小さくするように行う。ここで計算加速度は, Hashida and Shimazaki(1984) にならい, 三次元減衰構造を考慮にいれた

* 〒110-0015 東京都台東区東上野 3-3-3

** 〒100-8560 東京都千代田区内幸町 1-1-3

*** 〒230-8510 横浜市鶴見区江ヶ崎町 4-1

電子メール: naka@tepsco.co.jp

電子メール: yasiro.k@tepco.co.jp

電子メール: uetake.tomiichi@tepco.co.jp

(1)式によって求める (図-1 参照).

$$\alpha_{ij}^{Cal} = Sa_j \cdot Ge \cdot g \cdot \exp\left\{-\pi \cdot f \cdot \sum (T_{ij}^k / Q_k)\right\} \quad (1)$$

ここで, Sa_j は仮想震源加速度, Ge は幾何減衰で伝播距離の逆数, g はサイト増幅率で自由表面として2.0, f は周波数で1Hzを仮定, Q_k はk番目のブロックの Q_s 値, T_{ij}^k は地震波がkブロックを通過するのに要する時間である.

三次元減衰構造 Q_k については, 震度データに基づき, Hashida and Shimazaki (1985)や中村ほか(1994)が求めているが, より信頼性の高い三次元減衰構造モデルを用いることが望ましい.

最近, 1926年以降の気象庁震度が整備(石垣・高木,2000)されデジタルデータとして公開されており(気象年報 CD-ROM), 中村・他(2006)は, 1926年から2002年の地震によるこれらのデジタルデータを用い, さらにLg波等の影響を避けるため震央距離 Δ を200km以内のデータに限り, さらにブロックサイズを $0.2^\circ \times 0.2^\circ \times 30\text{km}$ と細かくして減衰構造を求め直した. その結果, 火山に対応したLowQや, 関東地域や北海道では非火山地域にLowQの結果を求めた(図-2). 非火山性のLowQは蛇紋岩が存在する場所や存在すると推定されている場所に対応している.

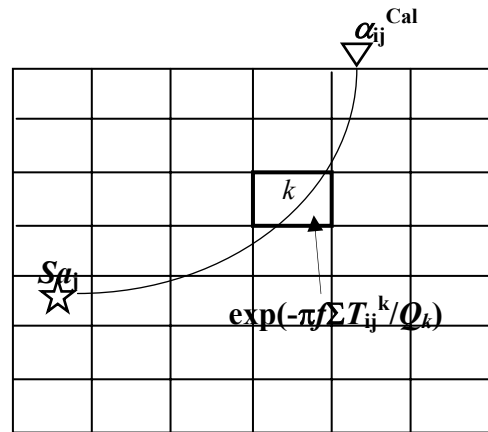


図-1 計算概念図

震源から観測点までの減衰の影響を積算.

今回は, このモデルを用いることとした.

なお, 観測震度 I^{Obs} から観測加速度 α^{Obs} への換算は, 上記減衰構造を求めた際に用いられているものと同様に河角による(2)式を用いる.

$$\log \alpha^{Obs} = I^{Obs} / 2 - 0.35 \quad (2)$$

§3 震度データによる震源決定

検討は, 実際に浅い地震(内陸地殻内地震)が浅く求まるかどうかと関東から東北地方にかけて発生する深い地震と浅い内陸地殻内の地震とが分

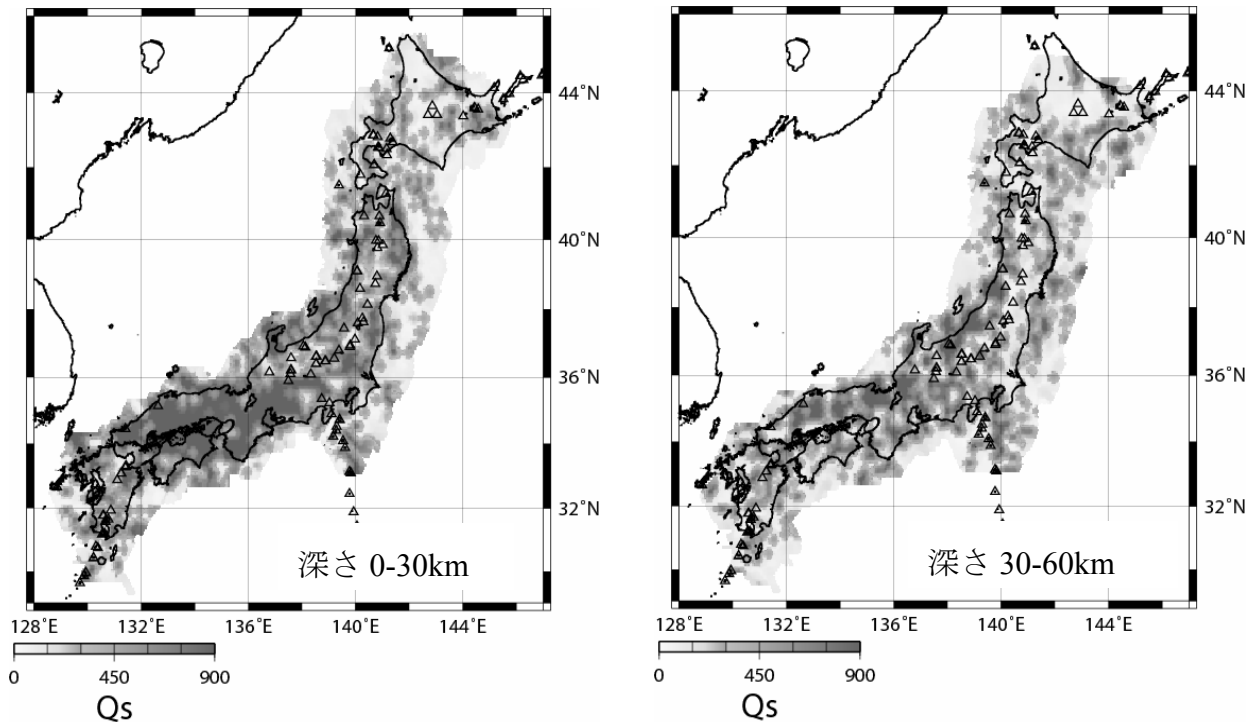


図-2 検討に用いた震度データによる三次元減衰構造

ブロックサイズ: $0.2^\circ \times 0.2^\circ \times 30\text{km}$

震度データ: 1926年~2002年, $\Delta \leq 200\text{km}$

(中村ほか,2006による)

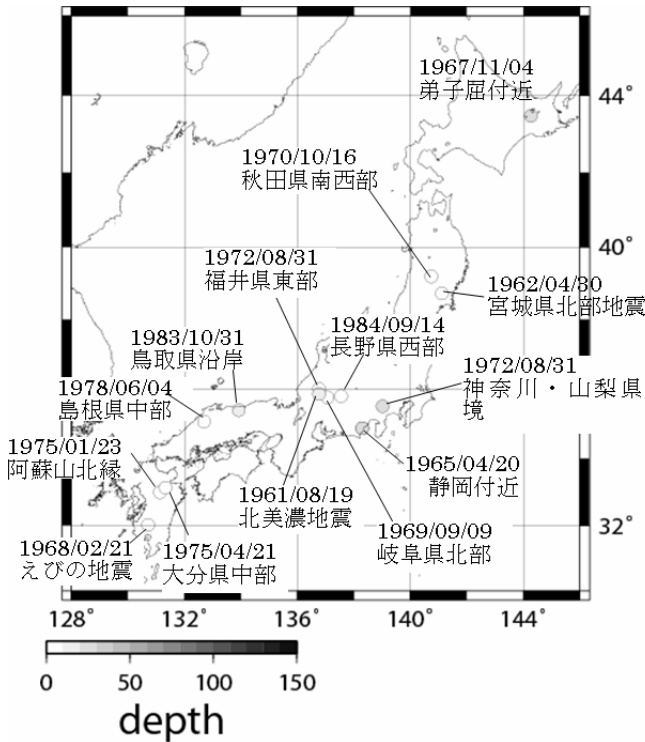


図-3 内陸地殻内地震の震源決定の検討に用いた地震

離できるかどうかの2点について検討を行うこととした。なお、震源決定では、遺伝的アルゴリズムによる方法（中村ほか, 1997）を用いた。

(a) 内陸地殻内地震による検討

1960年から1984年に発生したM6以上の内陸地殻内地震（図-3）を対象に本手法によって浅く求まるかどうかを調べた。内陸地殻内地震の選定には、宇佐美ほか(1985)の震源地名に「～付近, ～郡, ～部, ～県, ～岸, ～半島」と記されてい

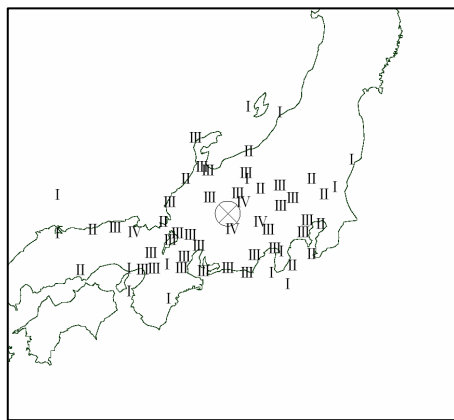


図-4 検討に用いた震度データの例 (1984年長野県西部地震)

るものとしている。震源決定としては、未知数は震源深さと仮想震源加速度 S_a であり、震央位置を既知として検討する。用いた震度データは基本的に気象官署のみである。この期間においては、一部区内観測点による詳細な震度データが存在するが、それらは用いなかった。検討対象地震を図-3に示す。震度分布例を図-4に示す。

遺伝的アルゴリズムの条件は、個体数 100, ビット長 8, 交差率 1, 突然変異率 1%, 世代交代を 100 とした。震源深さの拘束条件などは与えていない。乱数初期値を 2 ケースのそれぞれの 100 個体平均を図-5に示す。震源深さは内陸地殻内地震で浅く求まっていることがわかる。したがって、震度分布は深さの情報を有しているといえる。なお、1968年えびの地震以前では、震源が深く求まる傾向が見られるが、その理由は不明である。なお、内陸地殻内地震として、ごく最近兵庫県南部地震をはじめとして多くの地殻内地震が発生しているが、今回は対象としておらず、今後の課題としたい。

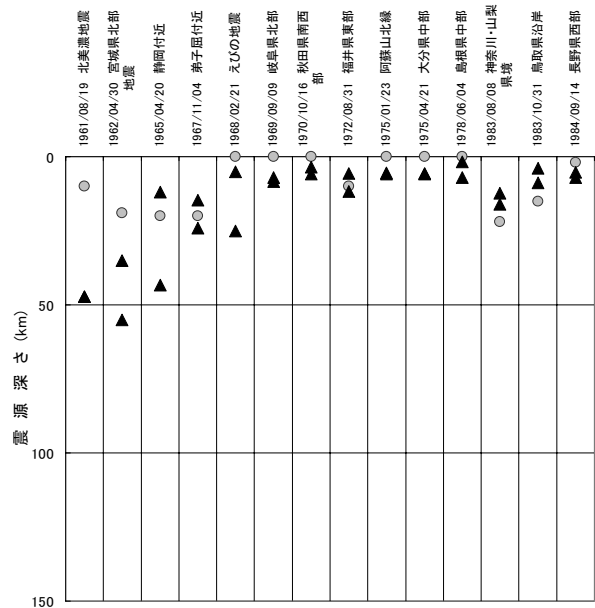


図-5 内陸地殻内地震の震源深さの検討結果 震央位置は気象庁の値に固定。

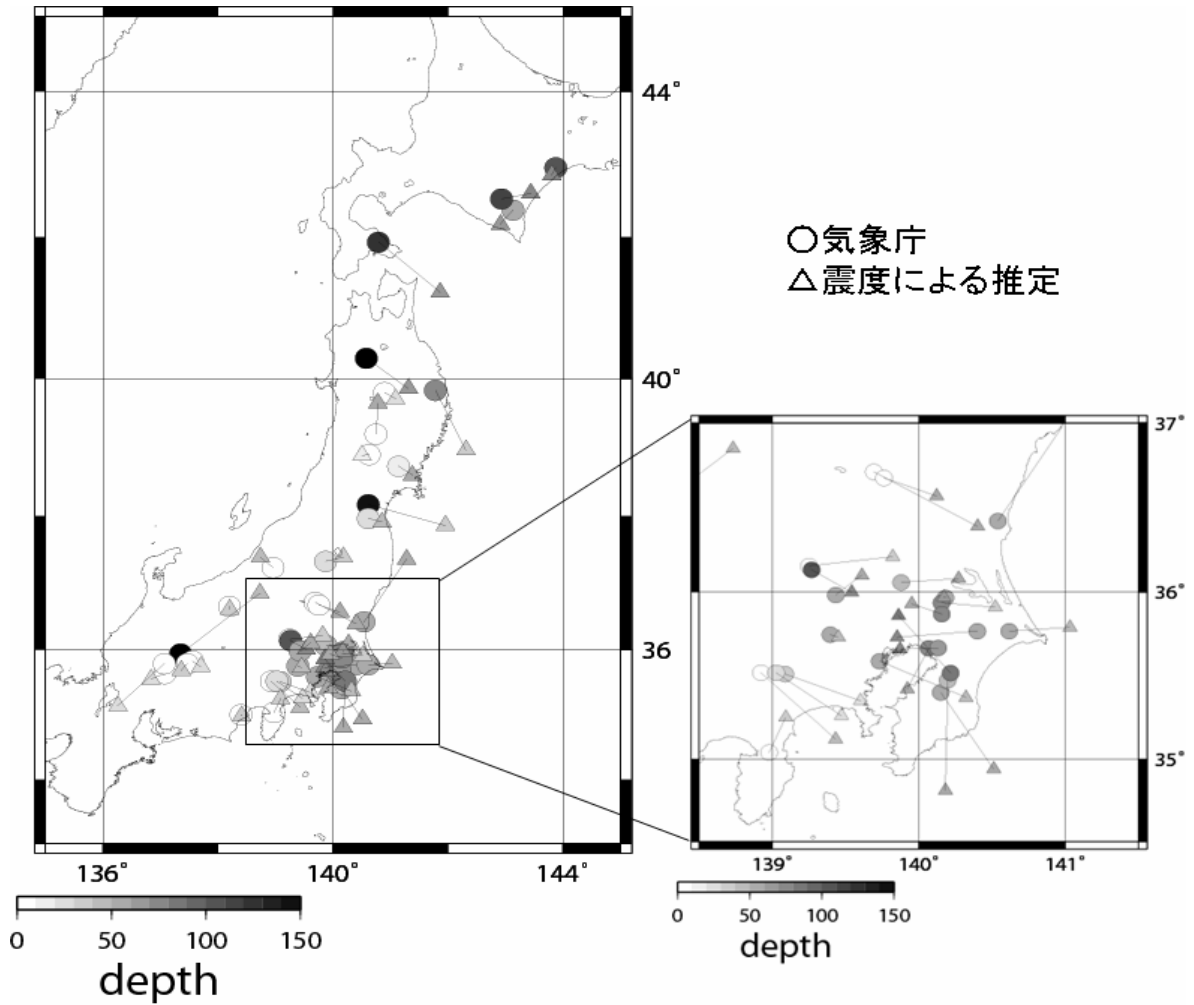
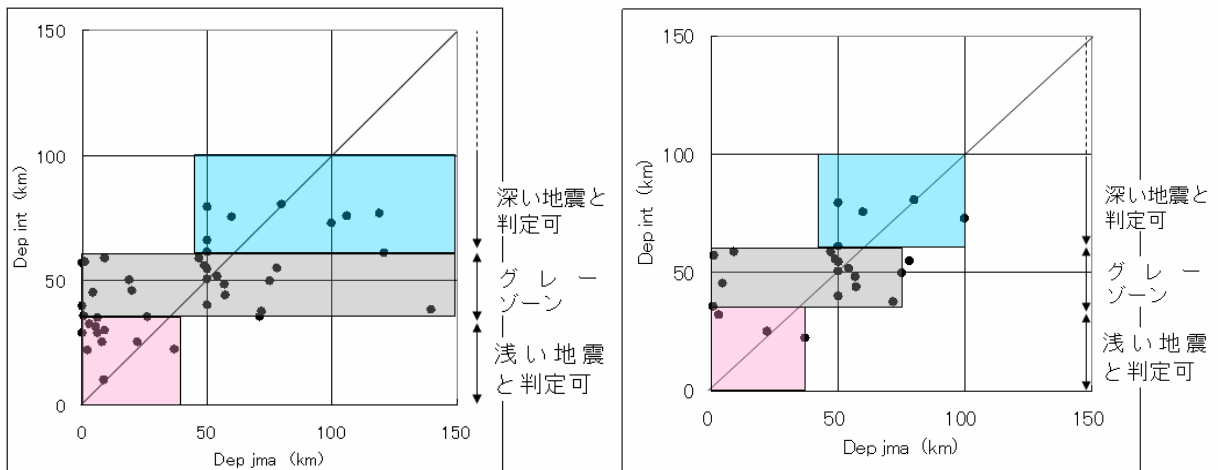


図-6 東日本の地震の震央位置の検討結果(1926～1999年)



(a)全地震

(b)関東地方(138.5°-141.5°,34.5°-37°)

図-7 東日本の地震の震源深さの検討結果

横軸：気象庁の震源深さ 縦軸：震度による震源深さ

(b) 東日本を対象とした検討

東日本を対象に、太平洋プレート上に発生する地震と内陸地殻内に発生する地震が震度分布によって分離出来るかどうかの確認を目的とした検討を行った。

まず、検討する対象を絞り込むため、1926年から1999年の地震をM6以上の地震のうち、陸域に震央がくる地震を選ぶこととした。これは海域に震央がある地震は観測データが陸域に限定されるため、データの片寄りによる震源決定の困難さが予想されるためである。

歴史地震については、震央位置も不確定であることをふまえ、震央位置(東経, 北緯)・震源深さ・震源加速度 S_a を未知数にした厳しい条件で検討を行うこととした。なお、マグニチュードについての評価は震源加速度 S_a とマグニチュードの関係に地域性が見られる(中村ほか,2006)ため、さらに検討が必要と考え、今回は検討対象とはしていない。

震源深さとして、内陸地殻内(0-30km)または太平洋プレートの上面深さよりも深い場所で発生するものとし、その間では地震が発生しないとする拘束条件を与えた。ここでは、震源深さ、地震規模、遺伝的アルゴリズムの等の条件は、上述の内陸地殻内地震による検討と同じとし、乱数は10ケースとして平均をとった。

検討結果を図-6及び図-7に示す。震央位置は、深い地震では、大きく外れる傾向が見られる。実際に深い地震は深く求まる傾向が出てくるが、浅い地震との差異が明確でなく判断できないグレーゾーンが未だに残っており、さらに検討が必要である。しかしながら、震度データによる震源決定で、深さ30~40kmよりも浅く求まった場合には浅い地震であり、60~70kmよりも深く求まった場合には、やや深発地震と判定できる。

なお、上述の内陸地殻内地震による検討において対象とした地震と共通した地震として、1962年宮城県北部地震、1970年秋田県南西部の地震、1983年神奈川県・山梨県県境の地震、1984年長野県西部地震があるが、前者2つの地震は50km前後に求まり、グレーゾーンに、後者2つは浅い地震と判定される結果となった。実際の歴史地震では震央位置も未知数と扱う必要があり、グレーゾーンの精度向上が今後の課題と考えられる。

§4 まとめ

最近の地震まで含めて、震央距離200km以内の震度データを用いて求められた三次元減衰構造を用いることにより、震源深さの推定が大きく改善された。

東日本の陸域で発生した地震について、深さ30~40kmよりも浅く求まった場合には浅い地震と判定でき、60~70kmよりも深く求まった場合には、やや深発地震と判定できることがわかった。

謝辞

気象庁の震度データを使用させて頂きました。宇佐美龍夫・東京大学名誉教授には貴重なご意見を頂きました。作図の一部にはGMT(1998)を使用させて頂きました。また、鹿島建設(株)諸井孝文博士には丁寧な査読を頂きました。記して感謝いたします。

文献

- Bakun, W. H. and Wentworth, C. M., 1997, Estimating Earthquake Location and Magnitude from Seismic Intensity Data, Bull. Seism.Soc. Am., **87**, p.1502 - 1521
- Bakun, W. H., 1999, Erratum to Estimating Earthquake Location and Magnitude from Seismic Intensity Data, by Bakun and Wentworth, Bull. Seism.Soc. Am., **89**, p.557 - 557
- 橋田俊彦・島崎邦彦, 1984, 震度データによる震源位置およびマグニチュードの決定, 地震学会予稿集 1,96
- Hashida, T. and K. Shimazaki, 1984, Determination of seismic attenuation structure and source strength by inversion of seismic intensity data: Method and numerical experiment, J. Phys. Earth, **32**, 299-316
- Hashida, T. and K. Shimazaki, 1985, Seismic Tomography : 3-D Image of upper mantle attenuation beneath the Kanto district, Japan, Earth and Planetary Science Letters, **75**, 403-409
- 石垣祐三・高木朗充, 2000, 気象庁震度データベースの整備及び活用例について, 験震時報, **63**, 75-92
- 神田克久・武村雅之・宇佐美龍夫, 2003, 震度データを用いた震源断層からのエネルギー放出分布のインバージョン解析, 地震第2輯, **56**,

- 河角広, 1943, 震度と震度階, 地震 1, 15, 6-12.
- 気象庁編, 2002, 気象年報、平成 14 年, CD-ROM, 気象業務支援センター
- 中村亮一・島崎邦彦・橋田俊彦, 1994, 震度データトモグラフィーによる日本列島下の三次元減衰構造および広域震度予測, 地震 第 2 輯, 47, 1, p.21-32
- 中村亮一・西村功・渡辺健, 1997, 地震動における三次元減衰構造の影響—遺伝的アルゴリズムを用いた震度データによる震源決定の検討—, 歴史地震, 13, p.5-11
- 中村亮一・湯沢豊・菅原正晴, 2006, 最近の震度データを含むインバージョンによる三次元減衰構造及び仮想的な震源加速度と気象庁マグニチュード Mj の関係, 第 12 回日本地震工学シンポジウム, 226-229
- 菅原正晴・西村功・渡辺健・中村亮一. 1996, 地震動における三次元減衰構造の影響(1)震度データによる震源決定の検討, 日本建築学会大会講演梗概集, B-2, p.237-238
- 宇佐美龍夫・浜松音蔵・田中貞二(1985) 被害中心・震度中心としての震央位置(1874~1984)
- Wessel, P., and W.H.F. Smith, 1998, New improved version of Generic Mapping Tools released. EOS, Trans. AGU, 79, 579