

日向灘の地震に先立つ九州内陸の地震

山岡 耕 春* 中 禮 正 明** 安 藤 雅 孝*

Inland Earthquakes Preceded the Interplate Earthquakes in Hyuga-nada, Kyushu, Japan

Koshun YAMAOKA *, Masaaki CHUREI ** and Masataka ANDO *

Abstract

The temporal relationship between the interplate and inland earthquakes of Kyushu Island region was investigated. We analyzed this relationship by stacking the temporal frequency of the inland earthquakes with reference to the occurrence time of each major interplate earthquake in the Hyuga-nada region, that occurred between 1900 and 2000. A good coincidence of occurrence between the inland and the interplate earthquakes is recognized. While the tendency of the occurrence after the interplate events has already been pointed out, we found that the inland earthquakes also tend to occur before the interplate events. Abrupt activation of the inland earthquakes within several months before major interplate earthquakes is recognized in addition to the tendency to occur afterwards. The preceding inland earthquakes may indicate that they are triggered by precursory slow slips around the hypocenters of the Hyuga-nada earthquakes.

Key words : triggering, Kyushu, Hyuga-nada earthquake

キーワード : トリガリング, 九州, 日向灘の地震

I. はじめに

どこかで地震が起きますと、この地震は別の地震につながる可能性がないかというような質問を受けることが多い。また、あの地震とこの噴火は関係あるだろうかというような質問もしばしば受ける。もちろんこれらの質問は一般やマスコミ関係者から発せられることがほとんどであるが、それだけ地震と地震、地震と噴火の連動性は興味を持たれている現象である。しかしながら、そのよう

な質問に対して正確に答えることは難しいのが現状である。

このような地震と地震、地震と噴火との関連は地震・火山研究者にとっても大変興味深い問題で、その中でも海溝沿いのプレート間地震と内陸で起きるプレート内地震との関連については多くの研究がある。これは巨大地震が内陸の広い地域の応力場に変化を与え、内陸地震の発生に影響を与えやすいからであろう。例えば南海トラフ沿いの地震の前後に西南日本の内陸地震の活動が活発にな

* 名古屋大学大学院理学研究科附属地震火山観測研究センター

** 気象庁

* Research Center for Seismology and Volcanology, Graduate School of Science, Nagoya University

** Japan Meteorological Agency

るという指摘がある。これは南海トラフ沿いのプレート間地震による内陸での応力変化 (ΔCFF) によってほぼ説明が可能である (例えば, Hori and Oike, 1999)。内陸の断層では徐々に応力が高まっていつかは限界に達して地震を発生させると仮定する。海溝沿いの地震が発生すると、地震の滑りによる応力変化によって地震の発生時期が早まる断層と遅くなる断層がある。発生時期の早まる断層の中でほぼ限界に達していたものが、海溝の地震の直後に地震を起こす。このようにして、海溝沿いの巨大地震の直後に内陸地震の頻度が上がる。逆に満期を迎えていた断層のいくつかのものは発生時期を遅らされる。それらの断層では再び応力が高まってくるまでしばらく活動しないため、南海トラフ沿いの地震直後に頻度の低い状態が続く。やがて通常の内陸地震へ応力の蓄積によって内陸での地震の頻度が増え始める。これが「活動期を迎える」という表現となる。

本論文で扱う九州においては、日向灘で 10 年から 20 年に一度大きな地震が発生している。それらの日向灘の地震が九州の内陸地震をトリガーしているという報告は宇津 (1999) によってなされていて、統計的にも有意であると述べられている。やはり九州においても日向灘の地震による応力変動が内陸地震に影響を与えたのであるとみなすことができる。筆者らは、日向灘の地震と内陸の地震との時間的関連について気象庁のデータを用いてあらためて調べる機会があった。その際、日向灘地震の後だけでなく、直前においても内陸の地震活動が活発になっている可能性を見いだしたので、報告することにした。

II. データ

データは、1926 年以降は気象庁による震源カタログ、それ以前は理科年表によるカタログから、1900 年から 2000 年までの震源データを用いた。またデータ整理には SEIS-PC for Windows を用いている。解析には日向灘の地震としてはマグニチュード 6.8 以上のものを、内陸地震としてはマグニチュード 5 以上のものを選んだ。取り出された日向灘の地震は、1913 年 (M6.8), 1929 年

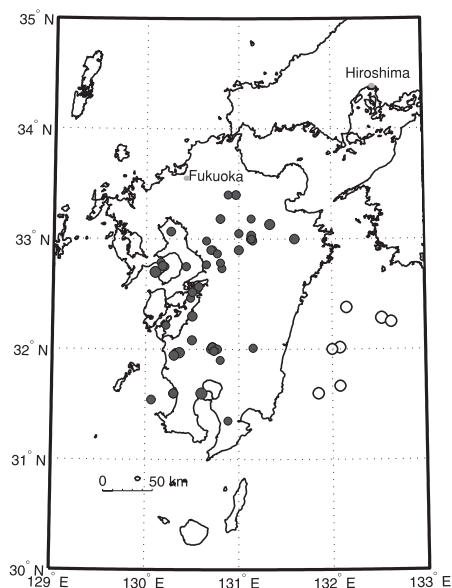


図 1 本研究で用いた地震の震央分布。白丸は日向灘の地震として用いたもの。黒丸は九州内陸の地震として用いたもの。

Fig. 1 Epicenters of the earthquakes used in this study.

Open circles denote the inter-plate earthquakes in Hyuganada area, closed circles indicate those for inland Kyushu.

(M6.9), 1931 年 (M7.1), 1941 年 (M7.2), 1961 年 (M7.0), 1968 年 (M7.5), 1984 年 (M7.1) の 7 つである。日向灘の地震は、南海トラフ沿いの地震とは異なり必ずしも固有地震的に独立した大きな地震があるわけではないが、マグニチュードで 6.8 を下限として用いることにより比較的時間的に独立したイベントを取り出すことができる。また、後に述べるように、下限として M6.8 を選んだ結果、選ばれた日向灘の地震の前の日向灘の地震活動の活発化は見られず、内陸地震との前後関係が見やすくなっている。

用いた地震の震源分布を図 1 に示す。内陸地震の多くのものはいわゆる別府島原地溝帯に沿って分布しているほか、天草や九州南部にも分布している。内陸地震は九州全域に分布しているというよりは、おもに九州の西半分に分布している。こ

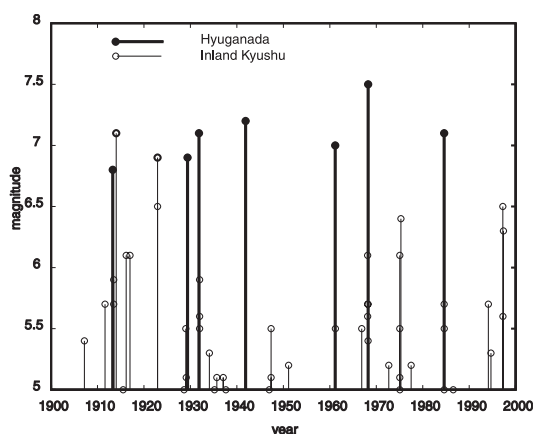


図 2 本研究で用いた地震の発生時刻とマグニチュード．
太線は日向灘のプレート間地震．細線は九州内陸の地震．

Fig. 2 Magnitude and the time of occurrence for the earthquakes used in this study. Thick lines denote the interplate earthquakes in Hyuga-nada area, thin lines for inland Kyushu.

の傾向は震源決定精度の良い最近微小地震の震源分布を見ても同様な傾向が見られ（例えば，九州大学，2001a，b），別府から南西方向に延びる帯状の地域に地震活動が集中している。

図 1 に示した日向灘の地震と内陸の地震の発生時刻とマグニチュードを図 2 に示す。この間の日向灘の地震は 7 回あり，その間隔は 1930 年前後にやや狭いものがあるものの，おおむね 10 ～ 20 年である。 $M5$ 以上の内陸地震はこの間に 49 回発生している。図に重ねてプロットしてある九州内陸の地震の発生時期と日向灘の地震の発生時期を比べてみると図の分解能のなかで両者の発生は明らかに一致しているものが多いことがわかる。日向灘の地震前後に起きた多くの内陸地震が日向灘の地震よりも小規模であるが，一つだけとびぬけて大きな地震が 1914 年に起きている。これは桜島の大正噴火にともなうものであり，噴火にともなった地震としても世界で最大級のものである。これは桜島の噴火と日向灘の地震との時間的一致を表すものかも知れない。

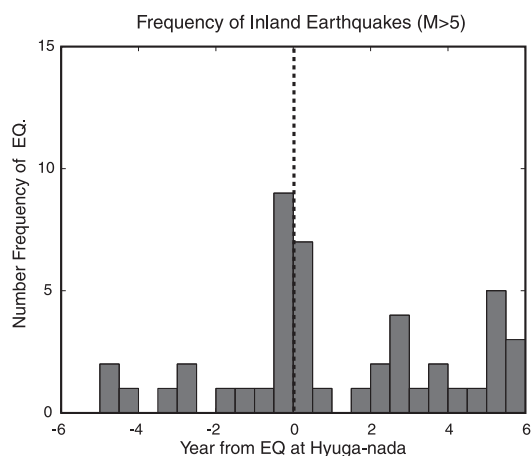


図 3 日向灘の地震前後に発生する九州内陸地震 ($M > 5$) の頻度分布．
日向灘の地震の発生時刻に合わせて九州内陸の地震の発生数を足し合わせた．

Fig. 3 Frequency of inland-Kyushu earthquakes ($M > 5$) occurring before and after the interplate earthquakes in the Hyuga-nada area. The numbers are stacked with reference to the occurrence of Hyuga-nada events.

III．日向灘の地震と九州内陸の地震

九州の内陸での地震が日向灘の地震の前後にどのように発生しているかを示すために，日向灘の地震の発生時刻を基準として九州内陸地震の発生時期を重ね合わせてヒストグラムとしてみた（図 3）。それぞれの日向灘の地震の発生時刻を基準として，前後 6 年間を取り出し，日向灘の地震との相対的時間をデータとしている。ヒストグラムの中の一つの bin の間隔を 0.5 年として頻度分布を示したところ，日向灘の地震と九州内陸の地震が非常によく同期していることがわかる。日向灘の地震の直後の半年間だけでなく，直前の半年にも九州内陸で多くの地震が発生していることは注目すべき点である。直前に発生したものは 9 回に上り，直後に発生した地震の 7 回よりも多くなっている。これらの地震の発生頻度はバックグラウンドの地震発生頻度よりも明らかに大きくなっている。内陸地震全体としては 49 回発生しているが，

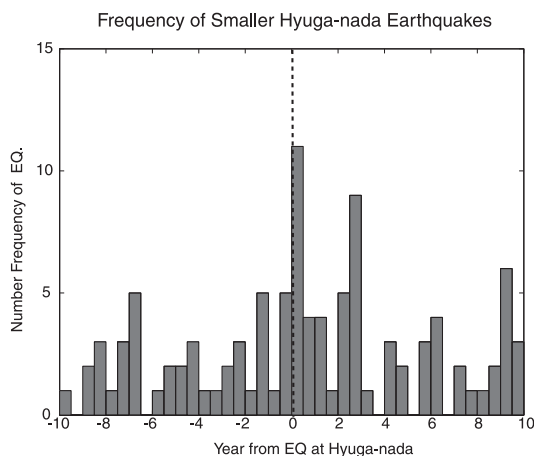


図 4 日向灘で発生したより小さな地震の発生頻度分布。
図 1・図 2 で示した大きな日向灘の地震にそろえて足し合わせた。

Fig. 4 Frequency of smaller earthquakes in the Hyuga-nada area.
The numbers are stacked with reference to the large Hyuga-nada earthquakes shown in Figs. 1 and 2.

これらの地震がランダムに発生すると考えると日向灘の地震の前後半年（あわせて 1 年）に起きる地震数の期待値は約 4 回となり、実際に発生した 16 回という頻度は明らかに大きい。ランダムだとしてこれだけの地震が発生する確率は 3×10^{-6} 程度であり、明らかに地震前後に集中している。確率の計算手法は本特集の中禮の報告に詳しく説明されている（中禮，2002）。なお，ヒストグラムにおいて日向灘地震の 3 年後と 6 年後付近にピークがあるように見えるが，これは日向灘の地震相互の発生間隔が短い場合（1930 年前後と 1960 年代）があるためで，地震のカウントに重複があるためである。

日向灘の地震によって九州の内陸部に応力変化が起き，断層に沿ったせん断応力と法線応力を変化させ地震が起きやすくなるというのはありそうなことである。しかしながら，日向灘の地震の前にも九州内陸の地震活動が活発になる原因は何だろうか。原因について考えてみたい。南海トラフ沿いの地震と西南日本内陸地震との関連では，南

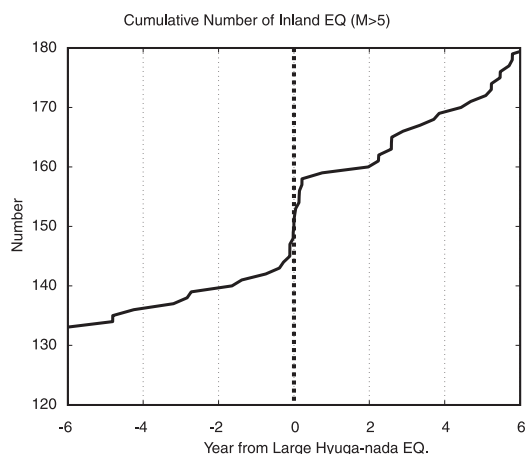


図 5 日向灘の地震を基準とした九州内陸地震の積算頻度分布。
日向灘の地震を基準として九州内陸地震の発生時刻をならべて積算したもの。縦軸は相対値のみが意味を持ち，絶対値には意味がない。

Fig. 5 Stacked cumulative number of earthquakes for inland Kyushu sorted with reference to the Hyuga-nada events shown in Figs. 1 and 2.

海トラフ沿いの地震の発生前には活動期に入ったとしている。しかしながらその場合は単に内陸地震の発生レベルが通常のレベルに戻ったことを示しているだけで，南海トラフの地震後しばらく静かであったため相対的に活発になったとみなされるのであろう（Hori and Oike，1999）。

日向灘と九州内陸の地震との関連はそれとは明らかに異なり直前に増加している。その可能性の一つとして，日向灘の，より小さな地震に反応している可能性がある。それをチェックするためにここで取り上げた M6.8 以上の地震を基準にして日向灘に発生した M5.0 ~ 6.7 の地震についても，発生回数を足し合わせた図を作ってみた（図 4）。この図を見ると，日向灘の小さな地震はここで選んだ M6.8 以上の地震の直後に増加しているものの直前にはほとんど増加が見られない。したがって，日向灘の地震の直前に頻度の増加する九州内陸の地震が，日向灘で起きる地震による応力変化によるとは考えにくい。

日向灘地震前後の九州内陸地震の発生をもう少し詳しく見るために、日向灘の地震を基準にして内陸で起きた地震の累積回数を累積頻度曲線として示した(図5)。日向灘の地震のタイミング(時刻0)で地震活動が急激に増加していることは一目瞭然であり、日向灘と内陸地震との同期性はよくわかる。それにも増して明らかなことは、日向灘の地震の3~4年前から徐々に累積頻度曲線の傾きが急になり直前数カ月からさらに急傾斜となっている。これは日向灘地震の直前に内陸地震が増加するだけでなく、はるか以前から徐々に頻度が増加していることを表している。日向灘の地震の準備が、地震のはるか以前から地震に向けて加速的に進行し、内陸地震を引き起こしているのかも知れない。日向灘の地震後にも内陸の地震活動が急激に増加するものの数カ月程度の短い時間で活動がおさまっていることは対照的である。

それでは、日向灘の地震前後に内陸のどこで地震が発生していたのであろうか。図6には日向灘の地震の前後、それぞれ1年間に起きた地震の震源分布を示した。図の白丸は日向灘地震の前に起きた地震の震央、黒丸は日向灘地震の後に起きた地震の震央である。九州南部の霧島付近(えびの地震)では日向灘の地震の前にも後にも発生しているが、それらを除けば日向灘の地震の前に起きた内陸地震は九州の北部に、日向灘の地震の後に起きたものは南部に分布しているように見える。また図1に示した内陸地震の震央と比較すると、日向灘の地震の直前直後に起きた地震は九州の西半分に集中して起きているようにも見える。

日向灘の地震の前に地震が起きた例は調査した7回の地震のうち3回である。そのうち1968年の地震($M7.5$)に先立つ内陸地震は霧島火山北西で発生したえびの地震(最大6.1)で、1半月前に発生している。また1984年の地震($M7.1$)に先立つ内陸地震は雲仙の西方で発生した千々石湾の地震($M5.7$)で、日向灘の地震(8月7日)の前日に発生した。さらに、1929年の日向灘の地震($M6.9$, 5月22日)に5カ月先立ち、熊本県の別府島原地溝帯に地震が発生している。古い地震なので震央の精度が悪くはっきりしたことは言えない

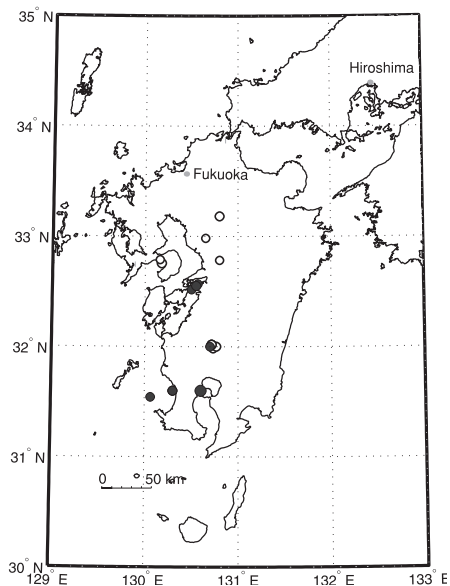


図6 日向灘の地震の直前と直後に発生した内陸地震の震央分布。
直前の1年(白丸)と直後の1年(黒丸)に発生した内陸地震を示した。

Fig. 6 Epicenter distribution of earthquakes that occurred just before and after the Hyuga-nada events. Earthquakes that occurred within one year before (open circles) and after (closed circles) the Hyuga-nada events are shown.

いが、阿蘇山の北西で起きた地震である。日向灘の地震に先立つ地震がいずれも火山の付近で起きている。

九州地域の地震のメカニズムを調べてみると興味深いことがわかる。九州全域ではおおむね南北から北西-南東方向の張力軸を持つ地震が卓越しているものの、別府島原地溝帯を含む北部では正断層型の地震が、天草など別府島原地溝帯よりも南部では横ずれ型の地震が発生している(例えば、九州大学, 2001a, b)。このことは日向灘の地震が起きる直前には九州の北部の別府島原地溝帯で正断層型が起きやすくなるような変動が起き、日向灘の地震そのものは九州の南部で横ずれ型の地震を起こしやすくなるような変動が起きるためかも知れない。ちなみに現在、メカニズムの最もよ

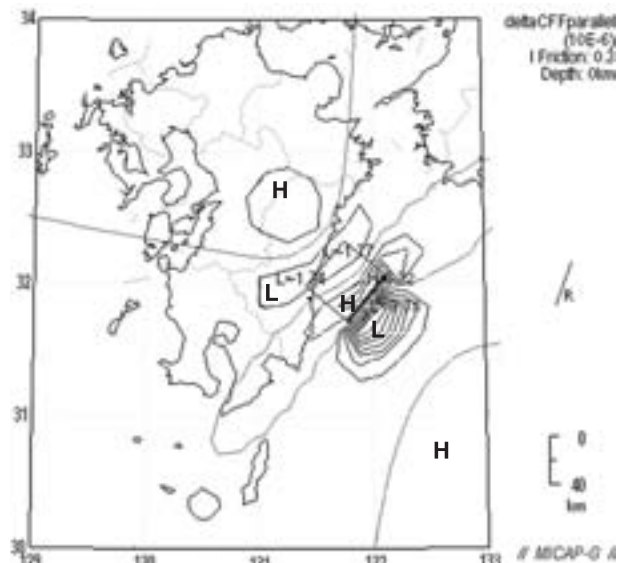


図 7 日向灘の地震による内陸地震の CFS (Coulomb Failure Stress) の変化。

現在メカニズムの最もよくわかっている日向灘の地震として 1996 年 10 月 19 日 (M6.6) の地震について Micap-G (内藤・吉川, 1999) を用いて計算したもの。対象とする内陸地震は N20°E 方向の右横ずれ断層。

Fig. 7 CFS (Coulomb Failure Stress) variations produced by typical earthquakes in Hyuga-nada area.

The source mechanism of the event that occurred in Oct. 19, 1996 (M6.6) is used because the mechanism is well defined. The target fault orients N20°E with right-lateral slip.

くわかっている日向灘の地震として 1996 年 10 月 19 日 (M6.6) の地震について Micap-G (内藤・吉川, 1999) を用いて ΔCFF を計算してみた (図 7)。日向灘の地震のストライクは N40°E, 傾きは 25 度, 滑りは 90 度の逆断層として与えた。対象とする内陸地震は九州南部に発生する地震の典型的なものとして N20°E 方向の断層による右横ずれを考えている。すると熊本県や天草付近では地震を促進する領域となるが, 九州南部では地震の発生を阻害する領域となってしまう。日向灘の地震が九州内陸の地震とどのようなメカニズムで関係しているかはそれほど単純ではないのかも知れない。さらに過去の地震が 1996 年と全く同じメカニズムの地震とは限らないため確定的なことは言えない。なお日向灘の地震の発生場所の変動が石

原・吉田 (1992) にまとめられているが, そのような変動と内陸地震の発生場所にはとくに関係があるようには見られなかった。

IV. 議論—何が起きているか

図 5 で明瞭にわかるように, 九州内陸の地震は日向灘の地震数力月前から活発になっているように見える。その活動は日向灘地震の数力月後に通常のレベルに戻っている。その原因として最もありそうな可能性は, 日向灘地震の前にゆっくりとしたスリップが始まっていることであろう。そのようなゆっくりとしたスリップによって九州内陸に応力変化を与え地震を発生するという考えである。日向灘北方の豊後水道では GPS の観測によってスロースリップが発生していることが報告

されている (Hirose *et al.*, 1999) ので, 地震に先立つゆっくりとした滑りは十分にありそうなことである。そのような滑りに反応して九州内陸で地震が起きる可能性がある。日向灘の地震に先立つ地震は九州内陸では北部に集まっているようにも見えるが例が少ないので意味があるのかどうかはわからない。今後は直前の滑りと本震の滑りの位置や方向の違いを反映している可能性を検討できるようなデータを蓄積する意義があるだろう。

日向灘地震の直前の地震 3 例のうち少なくとも 2 例は火山の近傍で起きている。活動的な火山近傍は応力の変動に非常に敏感であり, 周辺のわずかな応力変動に反応しているのかも知れない。火山で観測される地震や微動の活動が周辺の地震によって変化するという報告は多くある (例えば, 山岡, 1994)。おそらく流体が関与することの多い火山ではわずかな応力の変動が流体の移動などで地震を発生させやすくなるのであろう。日向灘の地震に先立つゆっくりとした滑りは, もしあったとしても, 本震による滑りよりははるか小さいだろうから, 複雑な構造を呈する火山周辺の応力に敏感なメカニズムが地震を発生しやすくしているのかも知れない。

日向灘の地震の前にも九州内陸の地震が活発化しているが, 現状ではそのメカニズムを明らかにできていない。しかしながら国土地理院によって整備されてきた GPS のネットワークにより次の日向灘の地震の際にそのメカニズムが明らかにされることが期待される。またシミュレーション

技術や地震の発生物理の研究の進歩によってもメカニズムが明らかになるかも知れない。九州は火山の多い地域である。メカニズムの議論の際にはマグマや熱水などの火山特有の流体の存在を取り入れた考察が必要となろう。

謝 辞

地震のデータ整理には SEIS-PC for Windows を用いた。また CFF の計算には Micap-G を用いている。

文 献

- 中禮正明 (2002) 東北日本における火山噴火および内陸地震 (M 6.2) と三陸沖の巨大地震 (M 8 クラス) との時間的関連性について. 地学雑誌, **111**, 175–184.
- Hirose, H., Hirahara, K., Kimata, F., Fujii, N. and Miyazaki, S. (1999) A slow thrust slip event following the two 1996 Hyuganada earthquakes beneath the Bungo Channel, southwest Japan. *Geophys. Res. Lett.*, **26**, 3237–3240.
- Hori, T. and Oike, K. (1999) A physical mechanism for temporal variation in seismicity in Southwest Japan related to great interplate earthquakes along the Nankai trough. *Tectonophysics*, **308**, 183–198.
- 石原和彦・吉田明夫 (1992) 九州下フィリピン海スラブの形状と地震活動. 地震 2, **45**, 45–51.
- 九州大学 (2001a) 九州の地震活動 2000 年 5 月 ~ 2000 年 10 月). 地震予知連絡会会報, **65**, 649–660.
- 九州大学 (2001b) 九州の地震活動 (2000 年 11 月 ~ 2001 年 4 月). 地震予知連絡会会報, **66**, 513–523.
- 内藤宏人・吉川澄夫 (1999) 地殻変動解析支援プログラム MICAP-G の開発. 地震 2, **52**, 101–104.
- 宇津徳治 (1999) 日本の地震活動総説. 東京大学出版会.
- 山岡耕春 (1994) 地殻応力から見た火山活動と地震との関係—伊豆大島での観測から—. 火山, **39**, 141–153.

(2001 年 12 月 25 日受付, 2002 年 3 月 8 日受理)