



Title	日本列島における深部低周波地震の発生状況
Author(s)	高橋, 浩晃; 宮村, 淳一
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 72, 177-190
Issue Date	2009-03-15
DOI	https://doi.org/10.14943/gbhu.72.177
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/38152
Type	departmental bulletin paper
File Information	12_Takahashi_Miyamura.pdf



日本列島における深部低周波地震の発生状況

高橋 浩晃

北海道大学大学院理学研究院附属地震火山研究観測センター

宮村 淳一

気象庁地震火山部火山課火山監視・情報センター

(2009 年 1 月 9 日受理)

Deep Low-Frequency Earthquakes occurring in Japanese Islands

Hiroaki TAKAHASHI

Institute of Seismology and Volcanology,

Faculty of Science, Hokkaido University

and

Jun'ichi MIYAMURA

Volcanic Observation and Information Center, Volcanological Section,

Seismological and Volcanological Department, Japan Meteorological Agency

(Received January 9, 2009)

We investigate the activity of deep low-frequency earthquakes (DLE) in Japanese Islands by JMA hypocenter catalogue during 1997 to 2008. It is confirmed that DLE cluster is distributed in every region. This implies that DLE phenomenon is common in Japanese subduction zone. Many active DLE clusters are identified in and around the quaternary volcanoes in whole area. There are also many non-volcanic clusters in Hokkaido and Tohoku regions, but very few in Kanto, Koushinetsu, Chubu, Hokuriku and Kyushu regions. High activity of non-volcanic clusters is observed in Kinki region. No clear correlation between DLE number and volcano activity index during 100 and 10,000 years is recognized. This fact implies the possibility that DLE activity is not precursor signal of shallow volcanic activities such as eruption at any time. Lower limit of DLE hypocenter depth generally coincides with depth of Moho discontinuity of each region. This may indicate that structure of upper mantle and lower crust and its boundary strongly control the occurrence of DLE's.

．はじめに

1997 年 10 月に開始した大学と気象庁との地震データ一元化処理（以下、一元化）を皮切りに、防災科学技術研究所の Hi-net の整備など、この 10 年間で地震観測点の高密度化が著しく進んだ。その結果、地震の検知能力が向上し、いままで検知できなかったようなマグニチュードの小さな震動現象が捉えられるようになった。中でも特筆すべき成果として、フィリピン海プレート沈み込み帯に発生する深部低周波微動の発見と、日本列島全域における深部低周波地震の活動状況を詳細に把握することが初めて可能になったことが挙げられる。

このうち、深部低周波地震は、その存在自体は 1980 年代前半にすでに知られていた。たとえば、東北地方では Hasegawa and Yamamoto (1994)、関東地方では鶴川・小原 (1993) などにより、その発生状況が報告されている。特に、第四紀火山地域でその発生が多いことから、火山活動との関連性が指摘されており、その力源の推定からも火山性流体の関与が示唆されている (Nakamichi et al., 2003)。

気象庁は、1997 年の一元化開始以来、地殻深部で発生する低周波成分の卓越した地震について、新たに低周波イベントとしてフラッグを設定した。この結果、気象庁の震源カタログ上で深部低周波イベントの識別が可能となり、その活動状況を詳細に調査出来るようになった。たとえば、高橋ほか (1999) は、低周波イベントフラッグ設定が始まった 1997 年 10 月から 1998 年 6 月までの 9 ヶ月間のデータを用いて、北海道地方に発生している深部低周波地震の特徴について考察した。また、鎌谷・勝間田 (2004) は、2003 年 3 月までのデータを用いて全国の発生状況の概要を報告し、その発生原因について議論を行っている。

本論では、一元化開始から現在までに蓄積された約 11 年間のデータを用いて、深部低周波地震の全国的な発生状況を概観し、その活動の特徴について考察する。

．震源データ

利用する震源データは、1997 年 10 月 1 日の一元化開始以降、2008 年 12 月 15 日までに気象庁が決定した震源のうち、確定および参考登録されているものを用いる。参考登録震源は、震源精度がやや劣るものであるが、本論では深部低周波地震の発生状況を知るために参考震源も利用する。この間、2000 年から 2002 年にかけて防災科学技術研究所の Hi-net が追加されたのははじめ、地震観測点の改廃も含まれているが、それに伴う検知能力の変遷については考慮しない。

はじめに、気象庁の震源カタログから低周波フラッグがついたイベントを抜き出した。次に、フィリピン海プレートの沈み込みに伴ういわゆる深部低周波微動と考えられるイベントを除外するため、Obara (2002) で示された深部低周波微動の震源域に入っているイベントを取り除いた。

第四紀火山のリストとしては日本火山学会発行の『日本の第四紀火山カタログ』（第四紀火山カタログ委員会、1999）および産業総合技術研究所の『日本の第四紀火山データベース』（http://riodb02.ibase.aist.go.jp/strata/VOL_JP/index.htm）を利用した。気象庁は「概ね過去 1

万年以内に噴火した火山及び現在活発な噴気活動のある火山」を活火山と定義し、過去 100 年間に組織的に収集された詳細な観測データに基づく 100 年活動度指数及び過去 1 万年間の地層にのこるような規模の大きい噴火履歴に基づく 1 万年活動度指数を算定して日本活火山総覧 (第 3 版) に掲載している (気象庁, 2005). 本論では、この指数を利用して深部低周波地震の発生状況との比較を行う.

・ 深部低周波地震の活動特性

1. 全国的な特徴

1997 年 10 月 1 日から 2008 年 12 月 15 日までの 11 年 2 ヶ月間に全国で検知され検測された 60km より浅い深部低周波地震は 9882 個であった (Fig. 1). Hi-net 導入による検知能力向上に伴いイベント数の増加が 2000 年と 2003 年に見られるものの、それ以降は年間 1200 個

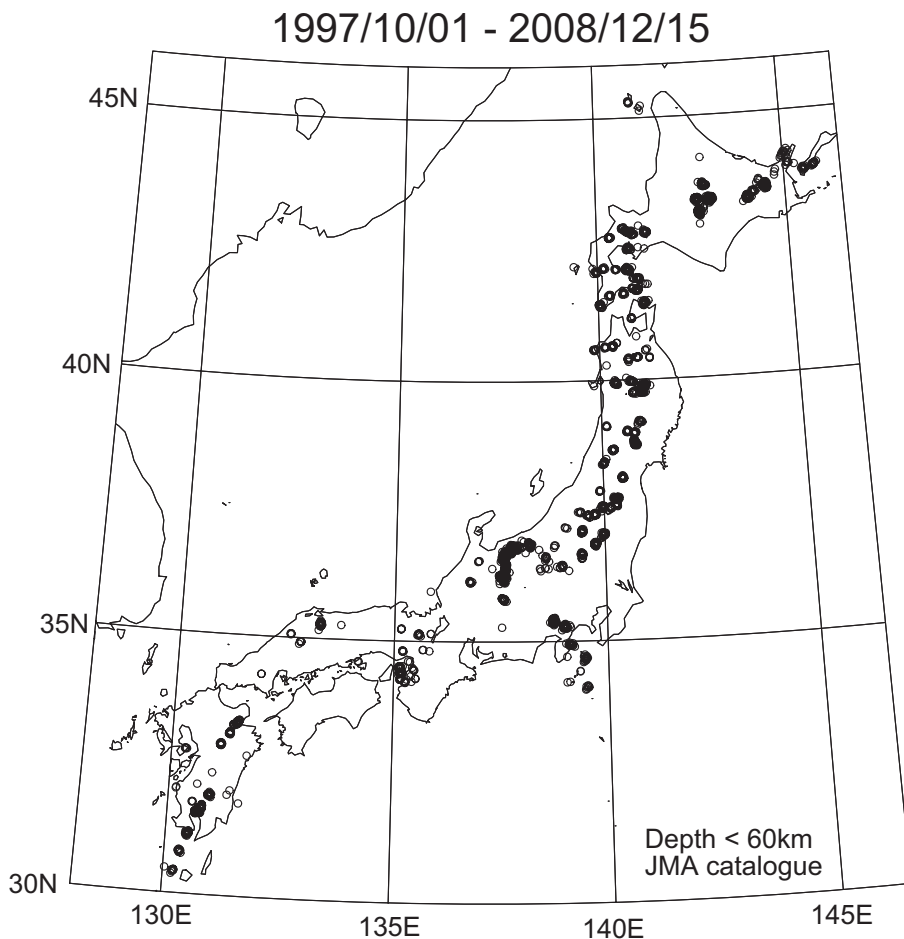


Fig. 1. Epicenter distribution of deep low-frequency earthquakes listed in Japan Meteorological Agency earthquake catalogue.

前後で推移している (Fig. 2a). マグニチュードは -1.0 から 2.2 の範囲であり, その頻度分布は通常の地震と同じように GR 則に乗るものの, b 値は 2 に近い大きな値をとる (Fig. 2b). 深さ分布を見ると, 一番多いのは $15\text{--}35\text{km}$ の範囲であるが, 概ね $10\text{--}40\text{km}$ の深さに分布していることがわかる (Fig. 2c). なお, Fig. 1 図外ではあるが, 石垣島付近では 1 つの地震が観測されている.

2. 震央分布と活火山・第四紀火山との関係

Fig. 3 では, 地域ごとにわけた深部低周波地震の震央分布と, それが活火山および第四紀火山 (これらをまとめて火山地域と呼ぶ) に一致する場合には震央域を四角で囲ってその火山地域名を示した. ただし, 火山地域の判定は, 震央分布の中心から概ね 10km 以内に第四紀火山がある場合とした.

北海道・東北地方では, 火山地域以外でも深部低周波地震が発生している地域が多くみられる. 関東・甲信越・中部・北陸・九州地方では, 深部低周波地震の発生域は火山地域とほぼ重なる. 近畿・中国地方では, そもそも火山地域が少ないこともあり, 火山地域以外での活動が目立つ.

一方, 活動的な火山であっても, 樽前山のように深部低周波地震がまったく発生していない地域があることは興味深い. なお, 伊豆諸島のような島嶼部においては検知能力が低下するため, 陸域と同一基準で活動状況を議論することができないことに注意する必要がある.

3. 深さ分布

鶴川 (2007) は, 様々な火山地域の深部低周波地震の震源の深さ範囲についてまとめているが, 本論でもそれに倣って深さ分布について調査した. まず, おのこの震源域で深さ分布を調査し, 空間的に複数に分かれるもの, バイモーダルな深さ分布を示すものについては分割して示した. そして, それぞれのクラスターの深さの分布を調べるために, 最小値・第 1 四分点・中央値・第 3 四分点・最大値をもとめ, それらを箱髭図で示した (Fig. 4). 箱髭図では, 箱の部

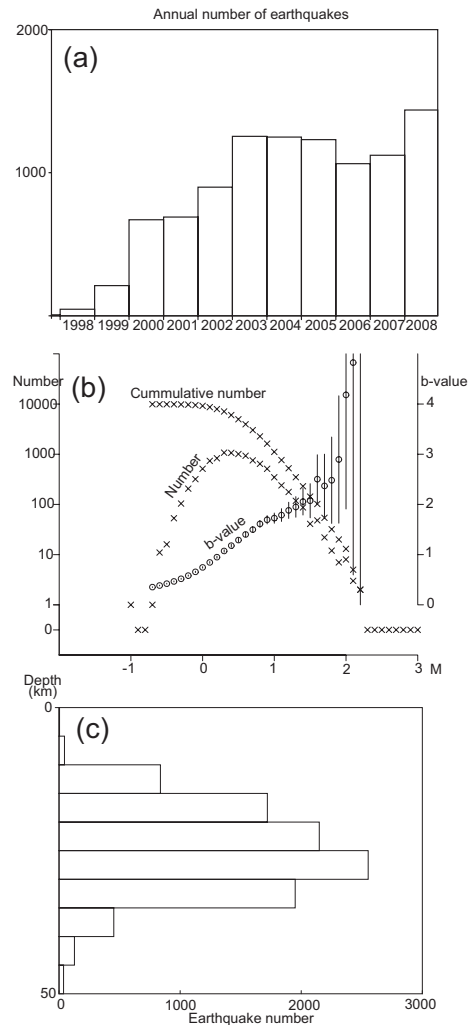


Fig. 2. (a) Annual number of deep low frequency earthquakes, (b) magnitude-frequency diagram and b -value, (c) depth distribution of earthquakes showing in Fig. 1.

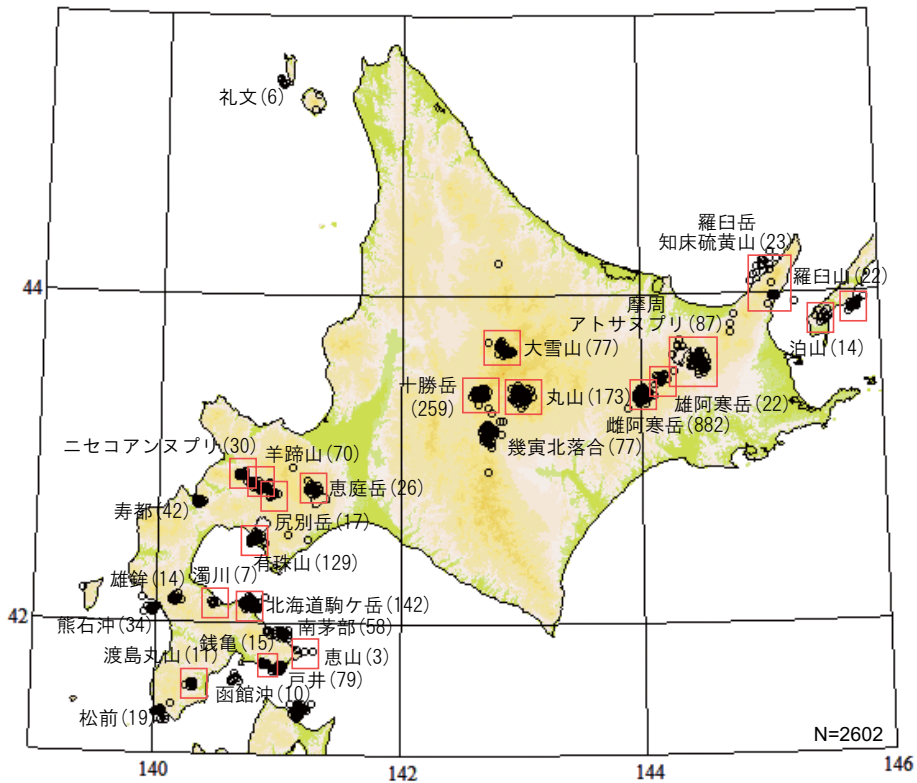


Fig. 3a.

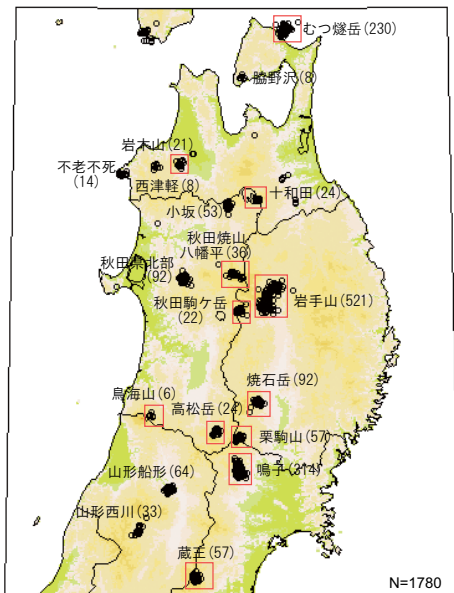


Fig. 3b.

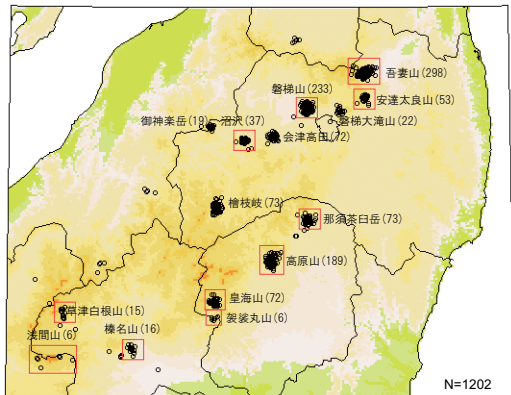


Fig. 3c.

Fig. 3. Detailed epicenter distribution of deep low-frequency earthquakes. Clusters of earthquakes in and near quaternary volcanoes are shown by red rectangles. (a) Hokkaido region, (b) northern Tohoku region, (c) southern Tohoku and northern Kanto regions, (d) Koushinetsu, Chubu, and Hokuriku regions, (e) southern Kanto region, (f) Kinki and Chugoku regions, (g) Kyushu region. Number of each cluster indicates total earthquake number from October 1997 to December 2008.

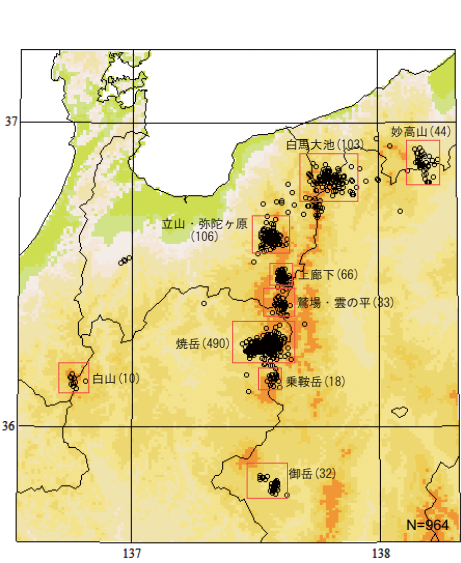


Fig. 3d.

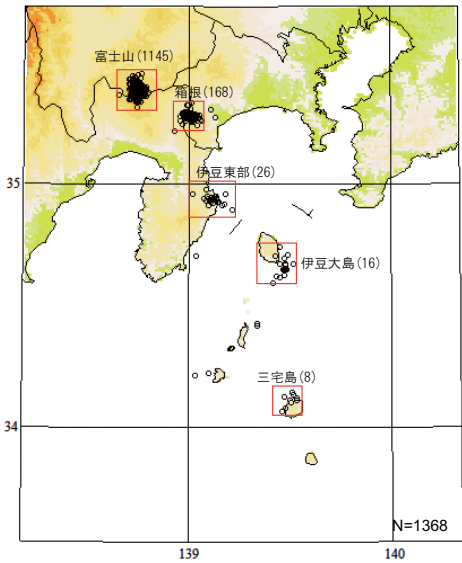


Fig. 3e.

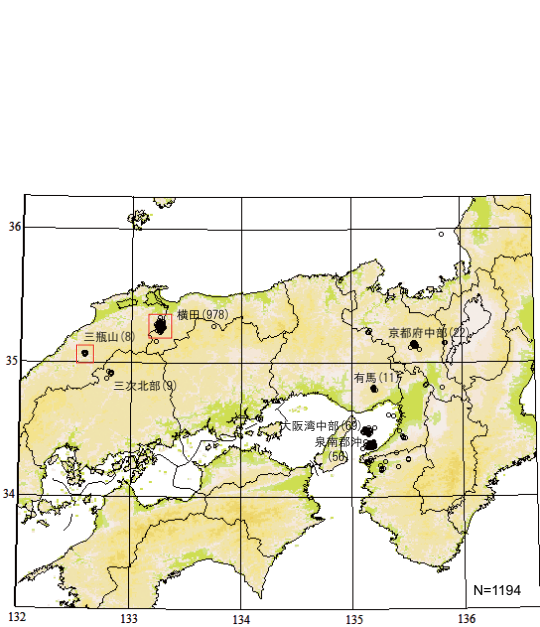


Fig. 3f.

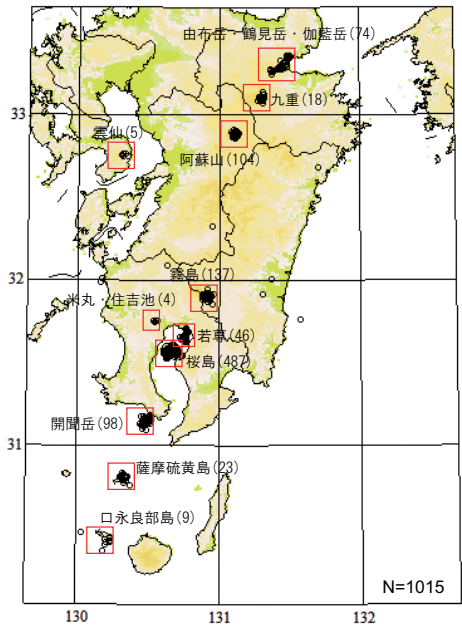


Fig. 3g.

分は第 1 四分点と第 3 四分点を示し，中央値を菱形で示してある．また，最大値と最小値は直線で示されている．以下の深さの議論では，2 つの四分点と中央値について扱う．

九州地方では概ね 30-15km の範囲の深さで発生しているが、中国・近畿地方では 30km の深さに集中している。中部・甲信越地方では、35km 付近のやや深い中央値を持つような活動が多く、その深さの範囲も深さ 50km から 20km 程度までと幅広い。富士山は発生数が最も多いものの、その深さ分布は 15km 付近の比較的浅部に集中している。東北地方になると、再び活動の中央値は 25km 程度になり、35km を超えるような深い活動は少なくなる。また、深さ方向の広がりの幅は小さい。岩手山では活動域が明瞭に 3 つに分けられるが、このうち 1 つのかたまりは中央値が 10km と浅くなっている。東北地方で見られた傾向は北海道地方南部にも続いているように見えるが、北海道地方東部になると深さ方向の幅がやや広がりを持つようになる。

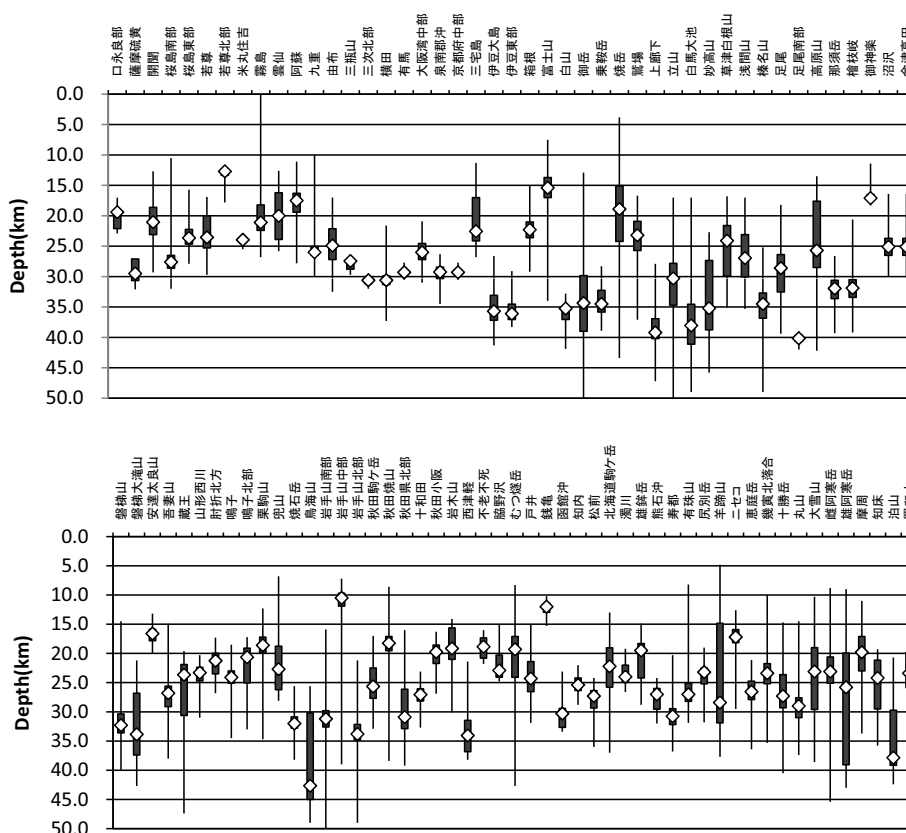


Fig. 4. Depth distribution of earthquakes in each cluster by box-and-whisker diagram. Diamonds indicate median value. Lower and upper points of each box indicate first and third quartile values, respectively. End points of each whisker indicate deepest and shallowest depths of each cluster.

Table 1. Earthquake number ranking of volcanic clusters with activity rank and volcano activity index determined by Japan Meteorological Agency.

順位 Order	活火山名: Name of volcano	英名: Name of volcano	ランク Activity Rank	1万年活動度指数 10kys activity index	100年活動度指数 100kys activity index	地震回数 Earthquake number
1	富士山	Fujisan	B	9.0	0.8	1145
2	雌阿寒岳	Meakandake	B	5.5	3.9	882
3	岩手山	Iwatesan	B	8.0	2.9	521
4	焼岳・アカンダナ山	Yakedake and Asakanozama	B	8.0	3.9	490
5	桜島	Sakurajima	A	10.0	8.7	487
6	鳴子	Naruko	C	4.0	0.3	314
7	十勝岳	Tokachidake	A	7.0	6.1	259
8	磐梯山	Bandaisan	B	8.0	1.1	233
9	高御山	Takaharayama	C	2.0	0.3	189
10	丸山	Maruyama	C	6.0	0.3	173
11	苗根山	Hakoneyama	B	4.5	2.1	168
12	北海道駒ヶ岳	Hokkaido-Komagatake	A	10.0	6.7	142
13	奥山	Kitadimiyama	B	9.0	3.2	137
14	有珠山	Usuzan	A	10.0	6.9	129
15	磐梯川原	Midagahara	C	2.5	0.3	106
16	阿蘇山	Asosan	A	9.0	7.0	104
17	開聞岳・池田・山川	Kaimondake, Ikeda and Yamazawa	C	7.0	0.6	98
18	摩周・アトサヌプリ	Mashu and Atosanupuri	B	8.5	0.8	87
19	大雪山	Taiseisuzan	C	4.5	0.3	77
20	鶴見岳・御蔵岳・由布岳	Tsurumidake, Garandake and Yufudake	B	6.5	1.3	74
21	那須岳	Nasudake	B	8.0	2.0	73
22	羊蹄山	Yoteisan	C	3.0	0.0	70
23	室駒山	Kurikomayama	B	5.0	1.5	57
23	蔵王山	Zaozan	B	6.0	1.1	57
25	安達太良山	Adatayama	B	5.0	1.6	53
25	青森山	Wakamori	—	—	—	46
26	妙高山	Myokosan	C	6.0	0.3	44
27	沼沢	Numazawa	C	7.0	0.0	37
28	秋田仙山・八幡平	Akita-Yakeyama	B	5.0	2.0	36
29	御嶽山	Ontake-san	B	7.0	2.5	32
30	二ツコ	Nitsuko	C	3.5	0.3	30
31	恵庭岳	Eniwadake	C	7.0	0.8	26
31	伊豆東部火山群	Izu-Tobu Volcano Group	B	8.0	3.2	26
32	十和田	Towada	B	7.5	0.0	24
33	知床硫黄山・羅臼岳	Shiretoko-Izan and Rausudake	B	7.5	1.9	23
33	薩摩硫黄山	Satsuma-Iojima	A	12.0	—	23
34	羅臼山	Raususan	—	—	5.0	22
35	岩木山	Iwakisan	B	5.0	1.5	21
36	栗駒岳	Norikuradake	C	3.0	0.3	18
36	九重山	Kojusan	B	7.0	2.7	18
37	焼岳	Yakedake	B	7.5	0.0	16
37	伊豆大島	Izu-Oshima	A	8.0	6.7	16
38	草津白根山	Kusatsu-Shiranesan	B	6.0	3.7	15
39	泊山	Tomaruyama	—	—	0.3	14
40	白山	Hakusan	C	6.5	0.3	10
41	口永良部島	Kuchinoerabujima	B	6.0	3.8	9
42	三宅島	Miyakajima	A	9.0	5.5	8
42	三輪山	Sanshan	G	6.0	0.0	8
42	島山	Ohshima	B	5.5	1.6	6
43	浅間山	Asamayama	A	10.0	5.9	6
43	雲仙岳	Unzendake	A	9.0	7.2	5
44	米丸・住吉港	Yonemaru and Sumiyoshiike	C	5.0	0.0	4
45	那志	Enan	B	8.0	0.3	3
46	利尻山	Rishirisan	C	3.5	0.0	2
46	新島嶺山	Nigata-Yakeyama	B	9.0	3.5	2
46	新島	Nijima	B	6.5	2.3	2
46	神津島	Kanzushima	B	6.5	2.2	2
47	根多奈	Kuttara	C	5.0	0.3	1
48	樽前山	Tanumasan	A	10.0	5.9	0
48	流島大島	Oshima-Oshima	B	9.0	0.3	0
48	荒山	Osorezan	C	2.5	0.3	0
48	八甲田山	Hakkodasan	C	3.5	0.6	0
48	肝煎	Hijiri	C	7.0	0.0	0
48	樺ヶ岳	Huugadake	C	5.5	0.0	0
48	日光台榭山	Nikko-Shiranesan	C	5.5	0.8	0
48	赤城山	Akagisan	C	3.5	0.0	0
48	横岳	Yokodake	C	4.5	0.0	0
48	利島	Toshima	C	3.5	0.0	0
48	阿蘇火山群	Abu Volcanoes	C	3.5	0.0	0
48	福江火山群	Fukue Volcanoes	C	3.5	0.0	0
48	西表島北東海底火山	Submarine Volcano NNE of Iriomotejima	—	—	—	0

4. 活火山の活動度指数との関係

気象庁は、活火山の過去 1 万年活動度指数及び 100 年活動度指数を算定するとともに、活火山のランクを発表している（気象庁，2005）。ランクは火山学的に評価された過去の火山活動度に基づくものであり、噴火の切迫性を分類したものではないことに留意が必要であると説明されている。

これら 2 つの活動度指数と深部低周波地震の発生回数との比較を行った。各活火山で発生した深部低周波地震の数をカウントしたのが Table 1 である。活火山が隣接して深部低周波地震の震源の分離が難しいものはまとめてカウントし、それに応じて活火山の表示もまとめてある。

深部低周波地震の発生数が最も多いのは 1145 個の富士山であり、第 2 位が 882 個の雌阿寒岳であった。上位 10 位のうち、ランク A の活火山は桜島と十勝岳の 2 つだけである。

Fig. 5 には、深部低周波地震の発生数と 1 万年活動度指数及び 100 年活動度指数の相関を片対数グラフで示した。先にも述べたように、検知能力が劣る島嶼部の火山は一概に比較できないものの、主に陸域の火山においては、少なくとも最

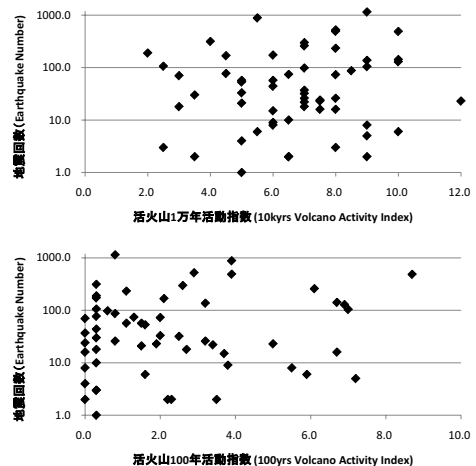


Fig. 5. Single logarithm plot between volcano activity index determined by Japan Meteorological Agency and earthquake number of each volcanic cluster.

近約 11 年間の深部低周波地震の発生数と両活動度指数との間には有意な相関を見出すことは難しい。

特に、最近 100 年間に得られた観測事実も含めた火山活動状況から算出された 100 年活動度指数と深部低周波地震の発生数との間に直接的な関係が認められないことは、深部低周波地震の発生状況により噴火発生の可能性などを単純に推測できないことを示唆している。たとえば、100 年活動度指数が 5.9 と高い浅間山では 6 個しか発生しておらず、同じく 100 年活動度指数 5.9 の樽前山では発生が見られないことなどが、この無相関関係を端的に示している。

． 考 察

1. 深さ分布の地域的特徴とモホ面・地殻の厚さ・マグマ供給系との関係

中国・近畿地方では、大阪湾中部を除き発生している深さが 30km にほぼ集中している。Yamauchi et al. (2003) によると、中国・近畿地方にあるクラスター付近のモホ面の深さは 30km ほどであり、深部低周波地震が集中して発生している深さとほぼ一致する。中部・甲信越地方では深さ 40km 付近から浅部側に活動が見られるが、Yoshimoto et al. (2004) によると、これらの地域のモホ面の深さは 40km 付近に推定されており、他の地域よりも地殻が厚くなっていることが分かる。一方、九州・東北・北海道地方西部のモホ面の深さは概ね 35km 程度と推定されており (Miyamachi et al., 1994; Nakajima et al., 2002; Oda and Ushio, 2007)、この地域の活動のほとんどの中央値はモホ面より浅い部分にある。このように、特に深部低周波地震の深さ分布の下限は、モホ面の深さ分布とよい一致を示す。

一方、深さ分布の上限については、深さ 15km がひとつの閾値となっており、これより浅い領域に中央値が求まるのは稀である。しかし、富士山の 15km や岩手山中部の 9.7km など、1 万年活動度指数が高い火山において浅い部分の中央値が得られている場所もあり、マグマ供給システムを考える上でも興味深い。

それぞれのクラスター毎の深さ分布の広がりには、羊蹄山のように 15km と比較的広い範囲に及ぶものもあれば、富士山のように 5km 程度の狭い範囲に集中的に発生する傾向が見られるものまで様々である。活火山のうち、震源の深さ精度と同等の精度を持ったマグマ供給系が岩石学的あるいは地球物理学的に明らかにされた火山の例はまだ少ないが、それと深部低周波地震の発生深度との関連性を調査することが、深部低周波地震の発生メカニズムを明らかにする上で今後必要であると考えられる。

2. 非火山地域での深部低周波地震活動

深部低周波地震は、非火山地域でも発生している。このうち、北海道・東北地方で発生している活動は、火山フロントよりも内弧側に位置している。このため、その発生原因としては太平洋プレートの沈み込みによる脱水に起因したマグマティズムがまず考えられる。しかしながら、たとえば檜枝岐や、幾寅北落合など、火山地域から明らかに離れている場所でも活発な活動が見ら

れる。今後の調査によりこれらの地域での第四紀の火山活動が発見される可能性もあるが、いずれにせよ、顕著な活動を示すものではないと考える。

東北・北海道地方では、既存の火山体がなかった場所に、突然爆発的な噴火が発生した事例が知られている。宮城 (2007) によると、一の目潟・肘折・安達・銭亀などがそれにあたり、これらを「新規火山」と呼んでいる。この事実は、現在火山体が認められる場所でなくとも、新たに火山活動が発生することがあり得ることを示している。

Takahashi (1986) は、新規火山の 1 つである一の目潟の噴出物の岩石学的研究から、噴火の数千年前に深さ 30-40km のモホ面直下の最上部マントルへ高アルミナ玄武岩質マグマが貫入してマグマ溜りを形成したのち、2 次的にカルクアルカリ安山岩を生成し、それらが同時に地表に一気に噴出したというモデルを提案している。つまり、地殻浅部にマグマ溜りを持つようなマグマ供給系とは異なった活動様式を持つ火山活動も存在し、それが既存の火山体の分布に関係なく噴火を起こす事例がある、ということを示している。東北・北海道地方の非火山地域で発生している深部低周波地震と新規火山との直接的な関連を示すようなデータは現在のところない。しかし、たとえば放射性廃棄物の地層処分のような長期間にわたる噴火ポテンシャルを考える場合には、このような視点での検討も必要であろう。

近畿地方では、有馬・大阪湾中部・泉南沖など、第四紀の火山活動が見られないような火山フロントの前弧側でも深部低周波地震の発生が見られる。このうち、有馬温泉では 11 個の深部低周波地震がモホ面付近で観測されている。Sano and Wakita (1983) は、有馬温泉の $3\text{He}/4\text{He}$ 比が高いことを指摘し、温泉水がマントル起源の熱水である可能性を指摘した。風早ほか (1999) や Matsumoto et al. (2003) も近畿地方の地下水や孔井ガスに $3\text{He}/4\text{He}$ 比の高い場所があることを指摘し、それらの原因として、沈み込んだフィリピン海プレートから脱水した水がマントル内を溶融させることなく通過して上昇し、高 $3\text{He}/4\text{He}$ 比の温泉として湧出している可能性が高いとした。

深部低周波地震は、発震機構の研究から体積変化を伴うような運動である可能性が指摘されている (Nakamichi et al., 2003)。これらの知見は、近畿地方で発生している深部低周波地震の直接的な原因がフィリピン海プレートのスラブから脱水した水であり、それがモホ面付近において体積変化を伴うような運動を引き起こしている可能性を支持する。特に有馬温泉では、その流体が地表まで到達している可能性が地球化学的な研究から指摘されており、深部低周波地震の活動と温泉水との直接的な関係に興味を持たれる。

近畿地方では、深部低周波地震の発生深度がモホ面付近に集中している特徴も興味深い。これは、他の地域で発生しているものの多くが、深さ方向にある広がりをもった分布をしているのに対照的である。非火山地域である近畿地方の深部低周波地震の原因として、メルトではなく水である可能性が高いことを指摘したが、火山地域での原因としてはメルトそのものである場合と、メルトから分離した水である可能性も指摘されている (たとえば、Hasegawa et al., 2005)。近畿地方での例は、たとえば、深部低周波地震の原因が同じ流体であっても、水なのか、あるいはメルトなのかの違いにより、発生できる深度が規定されていることを示唆していると捉えること

も可能であろう。今後は、発生深度だけでなく、たとえば鎌谷・勝間田（2004）のように他のパラメータを一元的に調査し、火山地域と非火山地域で発生している地震の類似点や相違点を検討する必要がある。

九州地方では、非火山性の活動がほとんど見られず、日向灘に面した東九州でわずかに4つの地震が記録されている。Yoshioka et al. (2008) は、沈み込むフィリピン海プレートの温度構造のモデリングから、日向灘で沈み込んだスラブは四国や紀伊半島よりも生成年代が古く温度が低いため脱水が生じにくく、その結果として単位長さあたりの脱水量が小さくなるために深部低周波微動・地震の活動が四国や紀伊半島に比べて低くなっているとした。これは、深部低周波地震の原因をスラブからの脱水に起因するメルトや水であるとする考えを支持するものであり、深部低周波地震の地域ごとの活動特性がテクトニックな問題とも深く関連していることを示唆している。

3. 深部低周波地震と浅部火山活動の関連性

鶴川（2007）は、深部低周波地震の活動度の高まりと、浅部火山活動とが関連した事例をまとめている。鶴川が指摘するように、たとえば1998年から始まった岩手山の火山活動の活発化（Nakamichi et al., 2003）、あるいは1991年のピナツボ山噴火（White, 1996）のように、深部低周波地震の活発化が浅部火山活動の活発化と関連している事例もある。最近では、雌阿寒岳において2008年9月から深部低周波地震の活動が活発化したあと、11月に小規模な水蒸気爆発が発生した。

しかしながら、富士山で2000年から2001年にかけて見られた活動のように、深部低周波地震の活発化が浅部火山活動の活発化につながらない場合も多く、この問題はそう単純な関係ではない。これは、活火山活動度指数との関係でも指摘したところである。

火山活動のサイクルと比較すると、約11年間という観測期間はあまりにも短く、浅部火山活動との関係を議論できるほどデータが蓄積されていない可能性もある。今後ともデータの蓄積を継続するとともに、深部低周波地震の発生メカニズムについてさらに検討を行う必要がある。

4. 深部低周波地震と内陸での地震活動との関連性

Ohmi and Obara (2002) は、2000年鳥取県西部地震の震源域直下（Fig. 3fの横田に当たる）で深部低周波地震が発生していたことを指摘し、その発震機構がシングルフォースを示すことから、何らかの流体注入が起こり、それが断層すべりを誘発した可能性を指摘した。地震発生後も、この地域では活発な低周波地震活動が継続しており、観測期間中の地震は978個と極めて多い数であった。しかも、そのほとんどが深さ30km付近に集中している（Fig. 4）。

このような内陸での地震活動の震源域と深部低周波地震のクラスターが一致する例は、一元化以前は詳細な深部低周波地震の発生状況が詳細に把握されていなかったこともあり、あまり報告例がない。鳥取県西部地震以外では、1994年から始まった松前の群発地震活動をその例としてあげることができる（高橋ほか, 1999）。

深部低周波地震と既往地震や活断層との対比という視点で、中国地方の三瓶クラスターと三次北部クラスター (Fig.3f) を見てみると、活断層は存在しないものの、それぞれ 1978 年と 1930 年に M6.1 の地震が発生している。これは、2000 年鳥取県西部地震が活断層の記載がない場所で発生したと類似しており、深部流体の動きと上部地殻の断層すべりの関連性という点で興味深い。同じような視点で近畿地方を見ると、深部低周波地震が発生している場所は活断層とほぼ対応しており (活断層研究会, 1991)、たとえば有馬温泉はまさに有馬高槻構造線にあたる。

以上のように、Ohmi and Obara (2002) が指摘した内陸地震の発生と深部低周波地震との関連性は、水というキーワードを介してその理解が進む可能性がある。今後は、モホ面付近で深部低周波地震を発生させた流体が、実際の内陸地震の震源である上部地殻まで上昇していることを、たとえば地球化学的な手法を用いるなどにより明らかにすることが必要であろう。

． ま と め

気象庁の一元化開始以降約 11 年間にわたって蓄積されたカタログを用いて、日本列島での深部低周波地震の発生状況について概観した。その結果、深部低周波地震は日本列島全域で観測されている、普遍的な現象であることが確認された。また、第四紀火山地域のみならず、非火山地域においても活発な活動があることが認められた。活火山で発生している地震数と 100 年活動度指数との間には有意な相関関係が認められず、最近見られている表面現象と深部低周波地震の活動が必ずしも直接的な関係にあるわけではないことが明らかにされた。また、Ohmi and Obara (2002) が指摘したように、内陸上部地殻での地震活動に、深部低周波地震で特徴づけられる水の移動が関与している可能性について 2, 3 の例を示した。活動の下限はモホ面の深さとよい一致を示し、深部低周波地震を引き起こしている流体の種類や地殻・上部マントル構造がその活動特性を規定している可能性が示された。

観測期間は約 11 年を経過したものの、これは大地震の発生サイクルや火山活動の継続時間に比べればきわめて短い。今後は、観測を継続してさらなるデータ蓄積を図るとともに、波形や継続時間・連発性などのパラメータを一元的に調査し、地域毎あるいはクラスター毎の類似点・相違点などを明らかにして、発生メカニズムやその構造・テクトニクスとの関係を明らかにすることが望まれる。また、深部低周波地震は下部地殻で行われているであろう、マグマの集積・分化・上昇プロセスの情報を含んでいる可能性のある数少ない現象であり、上部マントル岩石学の知識などを生かして、モホ面から地表までを統一的に理解できる新しいマグマ供給系モデルの構築を目指していくことが必要であろう。

謝辞 火山・地震・構造・テクトニクスの相互関連の重要性を示唆し、本研究の緒言を与えてくださった笠原稔教授に感謝します。日本の第四紀火山カタログを維持・管理されその利用を許可して頂いた産業総合技術研究所地質情報研究部門火山活動研究グループの方々に感謝いたします。図の作成および b 値の計算には、SEIS-PC (石川・中村, 1997, 中村・石川, 2005) を用

いました。記して感謝の意を表します。本研究で仕様した震源データは、気象庁・文部科学省が協力して独立行政法人防災科学技術研究所、北海道大学、弘前大学、東北大学、東京大学、名古屋大学、京都大学、高知大学、九州大学、鹿児島大学、独立行政法人産業技術総合研究所、国土地理院、青森県、東京都、静岡県、神奈川県温泉地学研究所、横浜市、独立行政法人海洋研究開発機構、及び気象庁から提供されたデータを処理した結果を利用しました。これらの機関およびデータの処理に当たられている方々に記して感謝の意を表します。

文 献

- 第四紀火山カタログ委員会, 1999. 日本の第四期火山カタログ, 日本火山学会, CD-ROM.
- Hasegawa, A. and A. Yamamoto, 1994. Deep, low-frequency microearthquakes in or around seismic low-velocity zones beneath active volcanoes in northeastern Japan, *Tectonophysics.*, **233**, 233-252.
- Hasegawa, A., J. Nakajima, N. Umino and S. Miura, 2005. Deep structure of the northern Japan arc and its implications for crustal deformation and shallow seismic activity, *Tectonophysics.*, **403**, 59-75.
- 石川有三・中村浩二, 1997. SEIS-PC for WINDOWS 95, 地球惑星科学関連学会 1997 年合同大会予稿集, 78.
- 鎌谷紀子・勝間田明男, 2004. 火山から離れた地域で発生している深部低周波微動・地震, *地震*, **57**, 11-28.
- 活断層研究会, 1991. 新編日本の活断層, 東京大学出版会, 436pp.
- Katsumata, A. and N. Kamaya, 2003. Low-frequency continuous tremor around the Moho discontinuity away from volcanoes in the southwest Japan, *Geophys. Res. Lett.*, **30**, 1020, doi:10.1029/2002GL015981.
- 風早康平・安原正也・佐藤 努, 1999. 神戸地域の地下水と温泉水：有馬型熱水について, 日本火山学会講演予稿集, 141.
- 気象庁, 2005. 日本活火山総覧 (第 3 版), 624pp.
- Matsumoto, T., T. Kawabata, J. Matsuda, K. Yamamoto and K. Miura, 2003. $3\text{He}/4\text{He}$ ratios in well gases in the Kinki district, SW Japan: surface appearance of slab-derived fluids in a non-volcanic area in Kii Peninsula, *Earth Planets. Sci. Lett.*, **216**, 221-230.
- 宮城磯治, 1997. 高レベル放射性廃棄に関する本格研究：現在火山がない場所は将来も火山がないのか?, 産総研 TODAY, **7**, 14-15.
- Miyamachi, H., M. Kasahara, S. Suzuki, K. Tanaka and A. Hasegawa, 1994. Seismic velocity structure in the crust and upper mantle beneath northern Japan, *J. Phys. Earth*, **42**, 269-301.
- Nakajima, J., T. Matsuzawa and A. Hasegawa, 2002. Moho depth variation in the central part of northeastern Japan estimated from reflected and converted waves, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **130**, 31-47.
- Nakamichi, H., H. Hamaguchi, S. Tanaka, S. Ueki, T. Nishimura and A. Hasegawa, 2003. Source mechanisms of deep and intermediate-depth low-frequency earthquakes beneath Iwate volcano, northeastern Japan, *Geophys. J. Int.*, **154**, 811-828.
- 中村浩二・石川有三, 2005. 卓上の地震活動解析 SEIS-PC for Windows のこの 8 年, 日本地震学会秋季大会講演予稿集, 153.

- Obara, K., 2002. Nonvolcanic deep tremor associated with subduction in southwest Japan, *Science*, **296**, 1679-1681.
- Oda, H. and T. Ushio, 2007. Topography of the Moho and Conrad discontinuities in the Kyushu district, southwest Japan, *J. Seismol.*, **11**, 221-233.
- Ohmi S. and K. Obara, 2002. Deep low-frequency earthquakes beneath the focal region of the Mw 6.7 2000 Western Tottori earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, **29**, 1807, doi:10.1029/2001GL014469.
- Sano, Y. and H. Wakita, 1985. Geographical distribution of $^3\text{He}/^4\text{He}$ ratios in Japan: Implication for arc tectonics and incipient magmatism, *J. Geophys. Res.*, **90**, 8729-8741.
- 産業技術総合研究所, 日本の第四紀火山データベース, http://riodb02.ibase.aist.go.jp/strata/VOL_JP/index.htm.
- Takahashi, E., 1986. Genesis of calc-alkali andesite magma in a hydrous mantle-crust boundary: petrology of lherzolite xenoliths from the Ichinomegata crater, Oga peninsula, northwest Japan, part II, *J. Volcano. Geotherm. Res.*, **29**, 355-395.
- 高橋浩晃・宮村淳一・郷家幸治, 1999. 北海道で発生した深部低周波地震, 北海道大学地球物理学研究報告, **62**, 25-41.
- 鵜川元雄・小原一成, 1993. 関東地方の火山フロント下のモホ面付近に発生する低周波地震, *火山*, **38**, 187-197.
- 鵜川元雄, 2007. 富士山の低周波地震, 荒牧重雄・藤井敏嗣・宮路直道編, 富士火山, 山梨県環境科学研究所, 161-172.
- White, R. A., 1996. Precursory deep long-period earthquakes at Mount Pinatubo: spatio-temporal link to basaltic trigger, Newhall, C. C., and R. S. Punongbayang ed., *Fire and Mud*, 307-326.
- Yamauchi, M., K. Hirahara and T. Shibutani, 2003. High resolution receiver function imaging of the seismic velocity discontinuity in the crust and the uppermost mantle beneath southwest Japan, *Earth Planets Space*, **55**, 59-64.
- Yoshimoto, K., H. Fujisawa, T. Okada, N. Umino, A. Hasegawa, K. Obara, K. Shiomi, H. Tsukahara, S. Okamoto, T. Kawanaka, H. Sato, T. Nishimura, H. Sato and M. Ohtake, 2003. Moho and Philippine Sea plate structure beneath central Honshu Island, Japan, from teleseismic receiver functions, *Earth Planets Space*, **56**, 1271-1277.
- Yoshioka, S., M. Toda and J. Nakajima, 2008. Regionality of deep low-frequency earthquakes associated with subduction of the Philippine Sea plate along Nankai Trough, southwest Japan, *Earth Planet. Sci. Lett.*, **272**, 189-198.