

## 2007 年新潟県中越沖地震の地震活動の特徴と地質学的要因について

川辺 孝幸 \*

### Feature and geologic origin of the main shock and aftershocks of the Niigataken Chuetsu-oki Earthquake in 2007

KAWABE Takayuki \*

**Abstract** This paper presents the results of detailed study of the relationship between the distribution of the hypocenters of the Niigataken Chuetsu-oki Earthquake in 2007 and geology there based on three dimensional distribution of hypocenters and their focal mechanisms by JMA.

Aera of hypocenters of the Niigataken Chuetsu-oki Earthquake in 2007 is divided into four focal distribution segments according to their tree dimensional distribution: i.e., the Focal Distribution Segment I, the Focal Distribution Segment II, the Focal Distribution Segment III and the Focal Distribution Segment IV.

While most of estimated fault type of 30 focal mechanisms are reverse fault type, normal fault type focal mechanisms are recognized in the Focal Distribution Segment II and the Focal Distribution Segment III within 24 hours after the main shock. This means that the maximum stress in the Focal Distribution Segment II and the Focal Distribution Segment III just after the main shock was relatively vertical.

Zone where the hypocenters are infrequent exists between the Focal Distribution Segment I to the Focal Distribution Segment III and the Focal Distribution Segment IV. The zone is approximately 1.5km wide, and trends NNE and dips NW. This zone is consistent with the location of asperity of source process analyses of the Niigataken Chuetsu-oki Earthquake in 2007. Thus the zone seems to consist of a hard and brittle rock.

Since the hypocenters distribute accordantly with the geologic and geotectonic elements, geologic and geotectonic elements seem to control the occurrence of earthquakes in the area of the main shock and aftershocks.

According to above mentioned results and the perturbation of the seismic tomography of the area, the earthquakes of the Niigataken Chuetsu-oki Earthquake in 2007 seem to be occurred under the stress in the lower part of the Upper Crust caused by uplifting melts from the Upper Mantle to the Lower Crust.

*Key Words*: the Niigataken Chuetsu-oki Earthquake in 2007, focal distribution segment, focal mechanism, asperity

#### はじめに

近年, 1995 年兵庫県南部地震をはじめ, 2000 年鳥取県西部地震, 2001 年芸予地震, 2004 年新潟県中越地震, 2005 年福岡県西方沖, 2007 年能登半島地震, 2007 年新潟県中越沖地震など, 島弧内陸部におけるマグニチュード 7 前後の大規

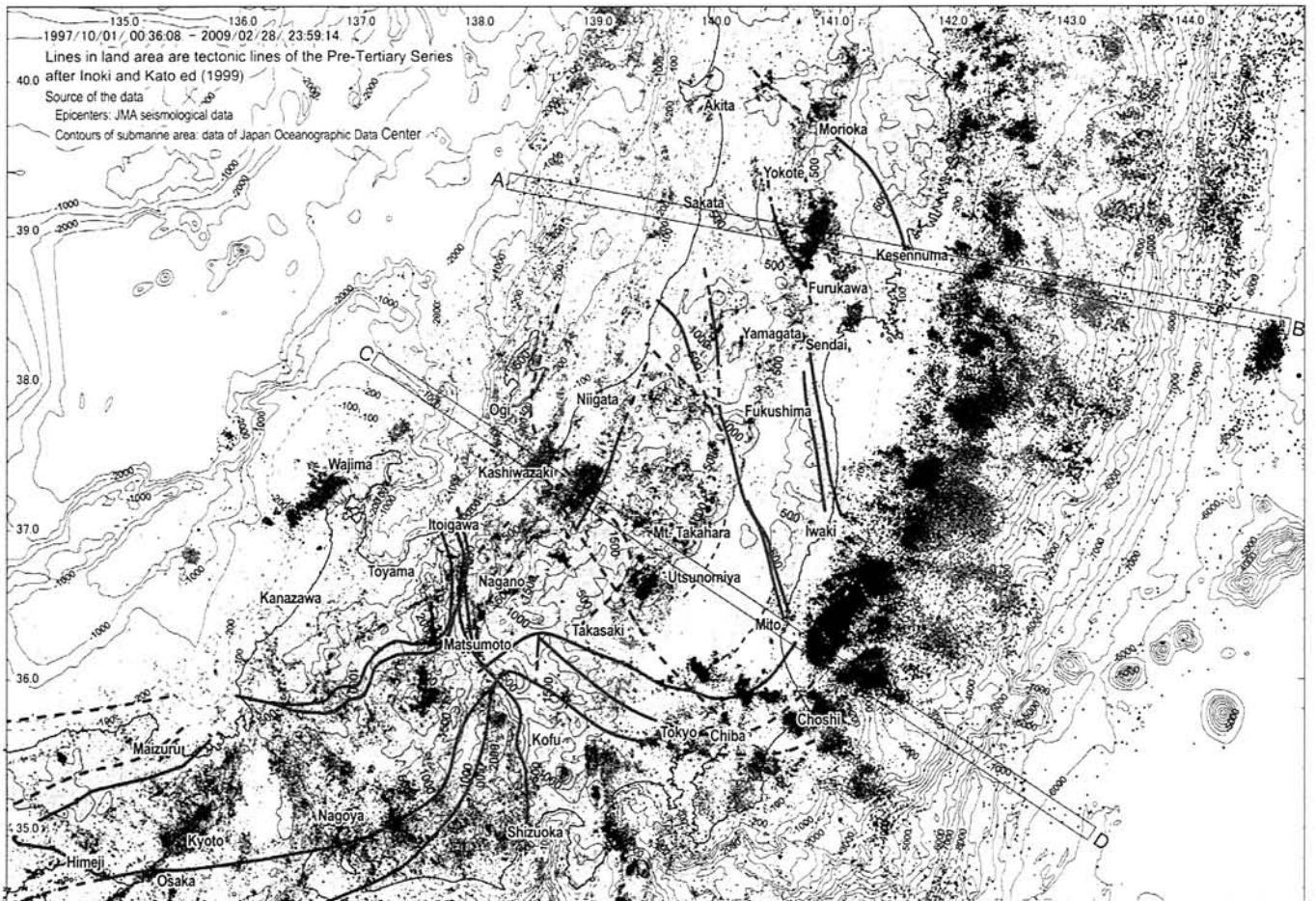
模な地震が高い頻度で起こっている。

筆者は, このような大規模な地震だけでなく島弧内陸部で発生する地震について, 1995 年兵庫県南部地震以前から, 島弧内陸部における微小地震分布に注目してきた。その理由は, 島弧変動 (藤田, 1974, 藤田ほか, 1977) によって形成された鮮新~更新世の堆積盆地, とくにその地下構造に関連して発生すると考えられる微小地震群は, 堆積盆地とその後

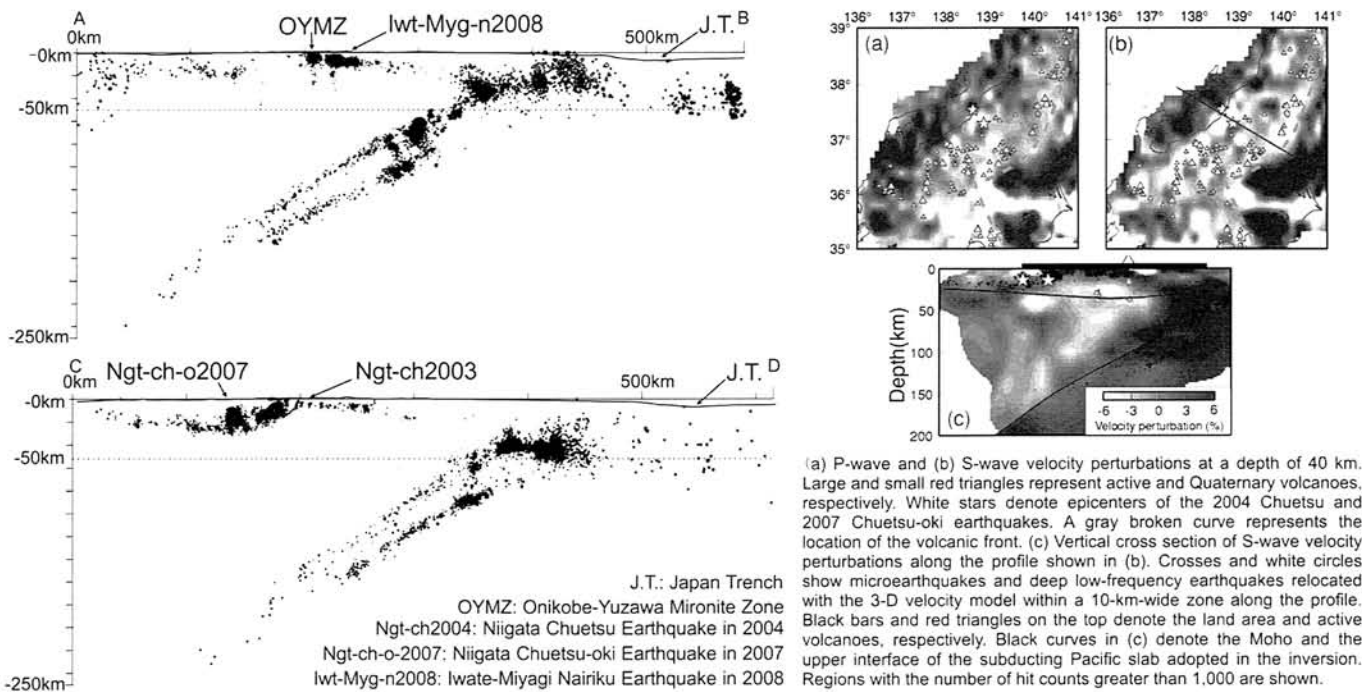
2009 年 4 月 30 日受付, 2009 年 8 月 6 日受理。

\* 山形支部 山形大学地域教育文化学部生活総合学科生活環境科学コース 〒990-8560 山形市小白川町 1-4-12

Faculty of Education, Art and Science, Yamagata University, Kojirakawa 1-4-12, Yamagata, 990-8560 Japan. e-mail: kawabe@kescriv.kj.yamagata-u.ac.jp



**Fig. 1** Epicenters of earthquakes less than 50km deep in Central Kinki to Off Southern Tohoku Area (N34.5-N40.5, E134-E145) during the period of 1997 October 1 to 2009 February 28. Magnitude of plotted earthquakes is more than M0.1. Boxes A-B and C-D show the areas of the projected vertical cross sections in Fig. 2.



**Fig. 2** Projected vertical cross sections of hypocenters (left) and P-wave and S-wave velocity perturbations at a depth of 40km in Central Japan and vertical cross section (right; Nakajima and Hasegawa, 2008). Each location of the projected vertical cross section are shown in Fig. 1. Deep earthquakes more than 50km deep are in these cross sections, while they are not shown in Fig. 1.

背山地の形成、堆積盆地の移動や傾動運動などの起因となった、地下の構造運動を直接的に反映している可能性が高いためである。

1995年1月17日に発生した1995年兵庫県南部地震を契機に、大阪層群堆積盆地や古琵琶湖層群堆積盆地における微小地震の三次元分布をもとに、堆積盆地の運動は、下部地殻以深における上昇を伴う流動変形によるものであることを述べて、上昇する流動変形の実体は“いわゆるマグマ”性の流動体であるとの仮説を述べた(川辺 1995; 川辺ほか 1995; 川辺・藤田 1997)。この一連の研究をとおして明らかなのは、地震は地表地質のオーダーである数 km から 10 数 km を単位として、地表地質構造と調和的に起こっており、地表地質と同様に、下部地殻～上部地殻下部もこのようなオーダーを単位とする物質の不均質分布と地質構造になっているとみなさなければならない。

一方、地震学などの地球物理学分野でも、地震発生のメカニズムとして地下深部でのマグマの活動に求める見解があり(石本, 1943; 早川, 1980)、地震の高精度観測に基づくマントル上部や地殻内流動体に関する研究(長谷川ほか 1991; 伊藤 1995; 佐藤・長谷川 1995; 松本ほか 1995; 松本ほか 1996)がおこなわれはじめた。地震波トモグラフィーによるマントル上部以浅の速度構造の解析に基づく溶融体の把握(たとえば松本ほか 1995; Nakajima and Hayakawa 2007 など)や、個々の地震のメカニズム解に基づく地表地震と起震断層との関連性の実体の研究(たとえば平松・和田 2007)など、この10数年間の地震学の発展はめざましい。

本報告では、2007年新潟県中越沖地震の本震発生以降の余震の時系列および三次元分布の特徴を明らかにするとともに、地殻下部が地殻表層と同様な単元の地質構造をなしていることを示し、地震の発生がマントル上部からの溶融体の押し上げによって地震発生層～地表の地質構造までの一連の運動の過程として起こっていることを示す。

なお、震源データに関しては、気象庁検定済み一元化データと Kato et al (2008), Nakajima and Hasegawa (2008) などの再決定による震源の位置、とくに深さに関する差があり、再決定による深さの方が浅くなる傾向があるが(図版 1-3)、本論文では均質データとして、気象庁検定済み一元化データをそのまま使用した。

### 本州中部～東北地方における浅発地震分布からみた2007年新潟県中越沖地震の位置

2007年7月16日午前10時13分に、新潟県中越沖の北緯37.56度、東経138.61度、深さ16.75kmで発生したMj6.8の2007年新潟県中越沖地震(以下、中越沖地震と略記)は、震央に近い新潟県中越～上越地域に被害をもたらした。さらに、原子力発電所のすぐ近くで発生し、東京電力柏崎刈羽原子力発電所にも被害をもたらした。

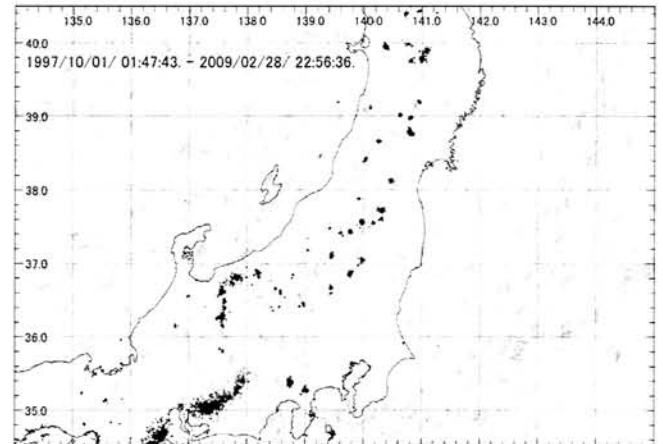


Fig. 3 Epicenters of low-frequency earthquakes in Central Kinki to Off Southern Tohoku Area (N34.5-N40.5, E134-E145) during the period of 1997 October 1 to 2009 February 28.

中越沖地震の震源域は、第1図の震央分布図および震源域を通り本州中部～東北部に直交する断面(第2図C-D断面)で示すように、浅発地震の多発域が示す本州の脊梁山地に調和的な、大局的にはアーチ状の高まりの、その基部から肩の部分にかけての領域に位置している。浅発地震の震源集中域の下限はコンラッド面にあると考えられるが、本州中央部から北東部にかけての浅発地震の集中域上面の深度は、太平洋側から日本海側にかけて、深さ25km前後から、脊梁山山地で深さ10km前後と最も浅くなり、日本海側で再び深さ25km前後と深くなる。深さの変化は、なだらかな変化を示しているのではなく、日本海側の2004年新潟県中越地震および2007年新潟県中越沖地震の震源域を通る断面のように、本州脊梁部から日本海にかけて、本州脊梁部の最も浅いところから深さ12km前後まではなだらかで、深さ12km前後から20数kmまでの間で急激に深くなり、そこから再びなだ

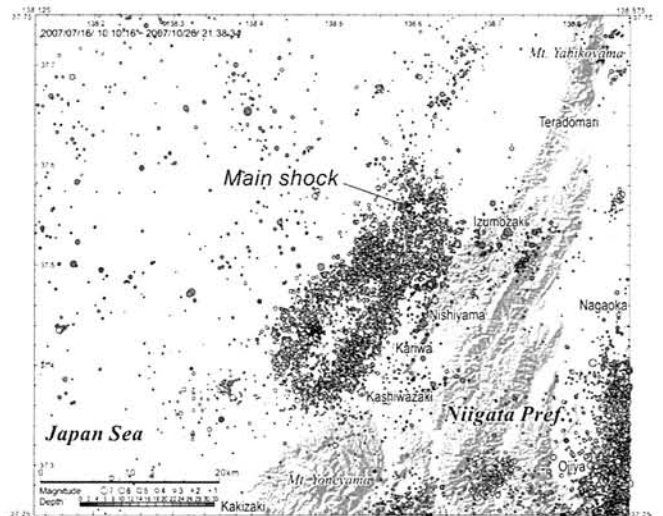
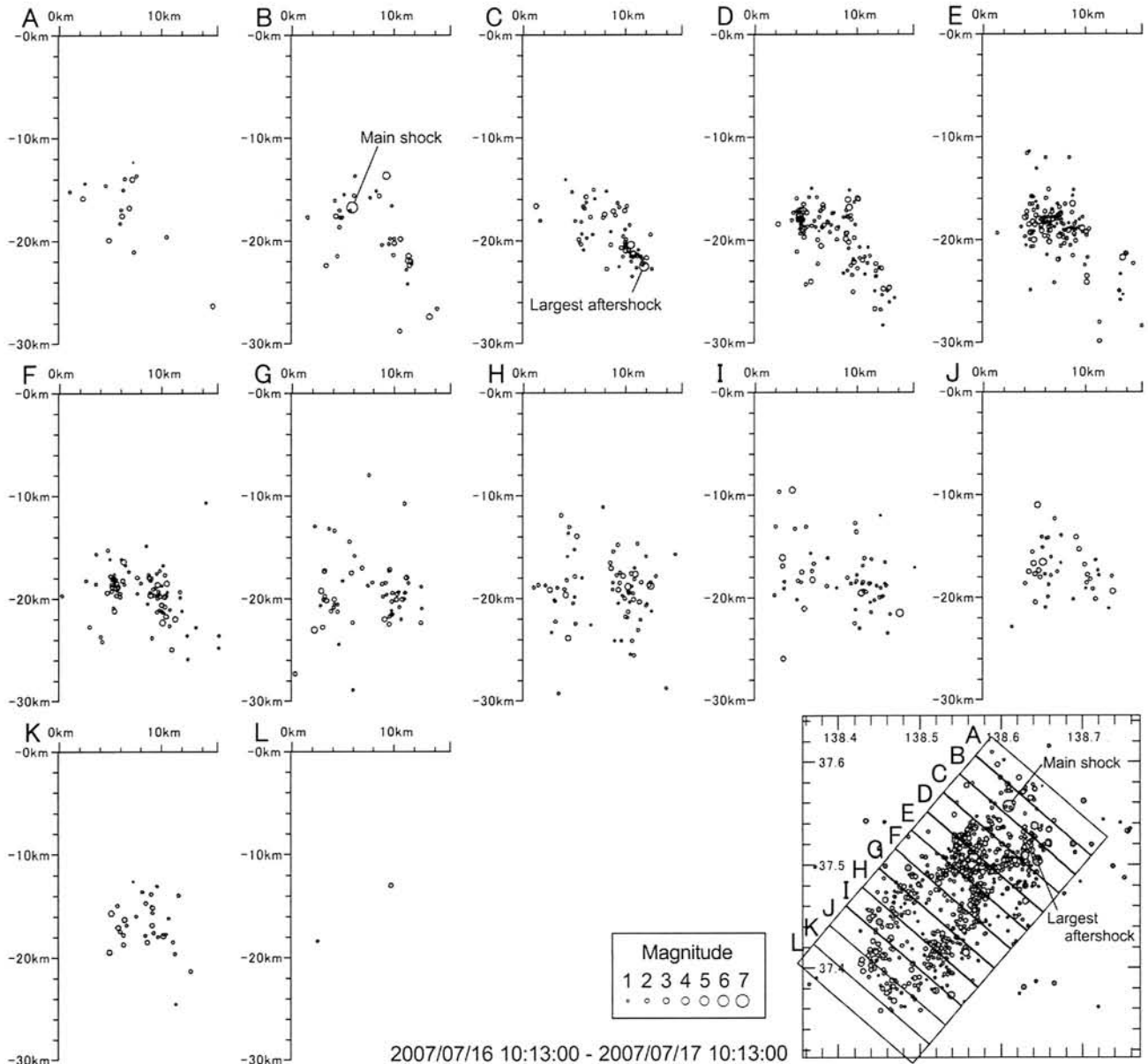


Fig. 4 Distribution of the main shock and aftershocks (M>0.1) during the period of 2007/07/13/ 10:13:22.55 JST to 2007/10/30 23:59:59.99 JST.



**Fig. 5** Narrow cross sections of NW-SE direction in the area of the focuses of the main shock and aftershocks of the Niigataken Chuetsu-oki Earthquake in 2007 within one day from the time of the main shock.

らかに深くなり、急な勾配から緩い勾配への変換点になっている。また、その変換点付近を詳しく見ると、多発域の上面は、前述のように連続的に深度が変化してアーチ状をなすが、多発域の下底面は、深さが急激に変化して折れ曲がり状の形態をなしている。2004年新潟県中越地震および2007年新潟県中越沖地震の震源域は、このような、日本海側に向かって急な勾配から緩い勾配への変換点付近の位置にあっている。

なお、断面図では、浅発地震面の下に、深さ40数km付近から上下に伸びる地震群の分布が認められるが、これらは低周波地震である。低周波地震は、第3図に示すように、中部～東北地方の日本列島の脊梁山地の下で点々と認められ、第四紀火山の分布域と重なる。低周波地震は溶融体由来である

と考えられているが、地震波トモグラフィーによる速度構造解析によれば(第2図右, Nakajima and Hasegawa, 2008), 低速度域はマントル上部から地殻下部にかけて発達している。長谷川ほか(1991), Nakajima and Hasegawa (2008)では、浅発地震の集中域の上面が本州脊梁部でアーチ状の高まりをつくっているのは、上部マントル中の溶融体が軽くなって浮上して、下部地殻を不均一に押し上げているためであると解釈している。従って、浅発地震の多発域のアーチ状の分布の原動力は、上部マントル中からの溶融体の不均一な押し上げによるもので、その上面形態はなだらかであるのに対して下底面が折れ曲がり状の形態をなすのは、このような上昇する溶融体の不均一な下からの押し上げを反映しているからであると考えられる。

2007年新潟県中越沖地震とその余震の特徴

中越沖地震の本震以降、2007年10月30日までの間に発生したM0.1以上の震央分布を第4図に示す。この分布を見ると、震央の分布形態が場所によって異なっていることがわかる。

第5図は、北西-南東方向の断面に、幅数kmの範囲の余

震分布を投影した断面図である。

図版1-1は、本震発生時から2007年10月30日までに発生した震源の分布を三次元的に俯瞰した図である。

これらの図から、ほとんどの地震は、深さ30km付近から深さ10km付近までの間で発生していることがわかる。このうち、余震の多くは、20数km~10数kmの深さの上部地殻下部で発生している。

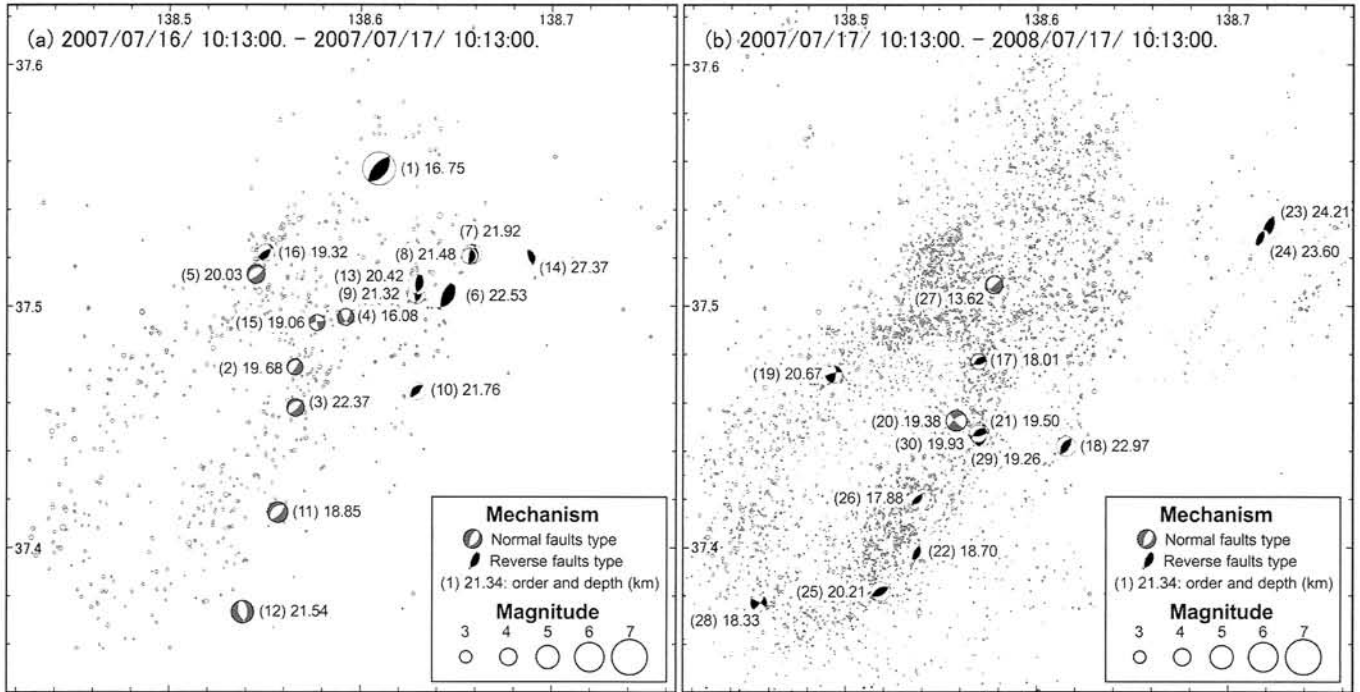


Fig. 6 Focus mechanisms of the earthquakes of the main shock and aftershocks of the Niigatoken Chuetsu-oki Earthquake in 2007 by JMA. Specification of each focus mechanism is shown in Table 1.

No.	Date	Time	Latitude (N)	Longitude (E)	Depth (km)	Mag.	Type	Slip *1	Plane A			Plane B			P Axis		T Axis		N Axis		Segment
									Strike	Dip	Slip	Strike	Dip	Slip	Azimuth	Dip	Azimuth	Dip	Azimuth	Dip	
1	2007/07/16	10:13:23.23	37.55683	138.60950	16.75	6.8	R	DS	37	37	93	222	53	93	310	8	148	82	40	2	I
2	2007/07/16	10:57:30.30	37.47467	138.56600	19.68	3.4	N	DS	233	21	-93	45	69	-93	310	66	137	24	46	3	III
3	2007/07/16	11:00:55.55	37.45783	138.56600	22.37	3.7	N	DS	216	14	-91	32	76	-91	301	59	123	31	32	1	III
4	2007/07/16	11:53:57.57	37.49533	138.59200	16.08	3.5	N	DS	29	53	-133	151	55	-133	1	56	270	1	179	34	II
5	2007/07/16	12:20:37.37	37.51300	138.54517	20.03	3.4	N	DS	235	22	-91	52	68	-91	320	67	143	23	53	1	II
6	2007/07/16	15:37:40.40	37.50400	138.64450	22.53	5.8	R	DS	40	33	79	199	59	79	297	13	79	74	205	10	II
7	2007/07/16	16:00:28.28	37.52150	138.65800	21.92	3.8	R	DS	347	23	104	205	71	104	284	25	136	61	20	13	I
8	2007/07/16	16:32:19.19	37.52067	138.65717	21.48	3.5	R	DS	0	17	93	189	73	93	277	28	103	62	8	2	I
9	2007/07/16	16:54:45.45	37.50467	138.62917	21.32	3.7	R	DS	23	30	79	181	62	79	279	16	66	71	186	10	I
10	2007/07/16	17:13:11.11	37.46483	138.62983	21.76	3.6	R	DS	228	30	88	44	60	88	135	15	308	75	45	2	IV
11	2007/07/16	17:42:26.26	37.41467	138.55683	18.85	4.2	N	AM	225	39	-51	126	82	-51	71	40	186	27	300	38	III
12	2007/07/16	18:19:46.46	37.37317	138.53850	21.54	4.4	N	DS	0	42	-101	163	50	-101	17	81	261	4	170	8	III
13	2007/07/16	21:08:02.02	37.50883	138.62967	20.42	4.4	R	DS	26	30	77	181	62	77	280	16	64	70	187	11	I
14	2007/07/16	21:15:44.44	37.52000	138.68850	27.37	3.4	R	DS	351	26	85	159	64	85	253	19	59	70	161	4	I
15	2007/07/17	00:39:52.52	37.49300	138.57733	19.06	3.3	N	SS	258	78	-12	167	81	-12	122	15	213	2	310	75	II
16	2007/07/17	08:39:43.43	37.52200	138.55033	19.32	3.5	R	DS	25	36	112	243	61	112	318	13	195	67	52	19	II
17	2007/07/18	11:47:55.55	37.47683	138.56933	18.01	3.7	R	DS	227	44	114	83	52	114	156	4	55	71	247	19	III
18	2007/07/18	16:53:05.05	37.44183	138.61533	22.97	4.3	R	DS	216	38	89	34	52	89	125	7	297	83	35	1	IV
19	2007/07/18	20:02:56.56	37.47200	138.49350	20.67	3.7	R	SS	2	58	146	259	71	146	313	8	217	37	53	52	III
20	2007/07/20	01:52:05.05	37.45267	138.55783	19.38	4.2	N	SS	233	62	-28	136	77	-28	92	29	187	10	294	59	III
21	2007/07/20	21:54:44.44	37.44800	138.56933	19.50	3.6	R	SS	346	54	137	230	59	137	289	3	195	51	21	39	III
22	2007/07/24	15:51:53.53	37.39817	138.53700	18.70	3.5	R	DS	13	32	98	209	58	98	293	13	142	75	25	7	III
23	2007/07/25	06:52:04.04	37.53283	138.72117	24.21	4.8	R	DS	26	44	86	200	46	86	293	1	41	87	203	3	IV
24	2007/07/25	07:27:04.04	37.52867	138.71683	23.60	3.5	R	DS	17	42	101	214	50	101	296	4	180	81	27	8	IV
25	2007/08/03	11:01:16.16	37.38167	138.51833	20.21	4.1	R	DS	243	44	87	59	46	87	151	1	267	88	61	2	III
26	2007/08/04	00:16:22.22	37.42017	138.53733	17.88	3.2	R	DS	40	36	96	230	54	96	316	9	165	80	47	5	III
27	2007/08/06	14:53:21.21	37.50883	138.57733	13.62	3.5	N	AM	161	13	-78	48	85	-78	330	49	127	39	226	11	II
28	2007/08/08	23:02:29.29	37.37683	138.45450	18.33	3.4	R	SS	37	74	163	304	77	163	351	2	260	21	86	69	III
29	2007/09/18	01:35:45.45	37.44533	138.57150	19.26	3.4	R	DS	18	35	110	234	60	110	310	13	185	68	44	17	III
30	2008/03/12	17:59:59.59	37.44750	138.56950	19.93	4.1	R	DS	239	33	73	25	62	73	128	15	261	68	34	15	III

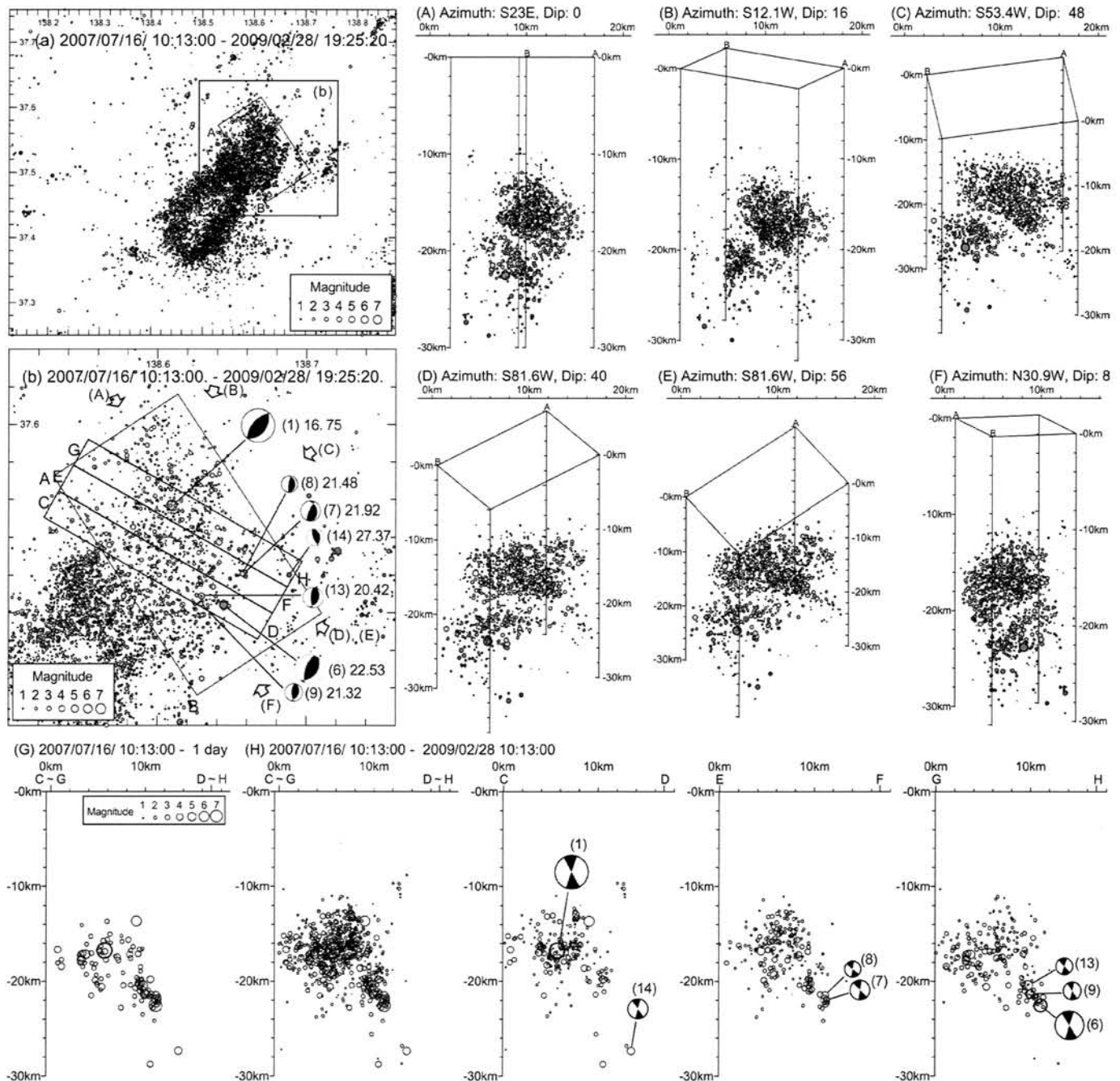
\*1 R: reverse type, N: normal type. \*2 DS: dip slip, SS: strike slip, AM: ambiguous

Table 1 Specifications of focus mechanisms of the main shock and aftershocks of the Niigatoken Chuetsu-oki Earthquake in 2007 by JMA.

余震の発生域は、その深度と三次元分布から、大まかにみて、本震を含む範囲と最大余震を含む範囲との間の、北西に傾く幅 1.5km 程度の地震の発生頻度のきわめて低いゾーンを挟んで、北西側と東側の 2 つの領域に大きく分けることができる。両地域を分ける地震の発生頻度のきわめて低いゾーンは、幅が約 1.5km で、走向がほぼ  $N12^{\circ} E$ 、傾斜は  $50^{\circ} W$  前後であり、深いほど低角度である。このゾーンを挟んで北西側は、さらに、本震を含む北東部（以下、震源分布セグメント I）、範囲内に集中して分布する中央部（以下、震源分布

セグメント II）、および、北東-南西方向の伸びを示す楕円状の周囲に分布する南西部（以下、震源分布セグメント III）の、3 つの震源分布セグメントに分けることができる（図版 1-2）。東側のもの（以下、震源分布セグメント IV）は、分布の南側に向かって陸上の刈羽周辺まで南南西方向に伸び、北西側の分布域から離れる。

これらの震源分布セグメントとその境界の地震の発生頻度のきわめて低いゾーンは、震源過程の解析（防災科学技術研究所 2008；東京電力 2008a, 2008b）によるアスペリティの



**Fig. 7** Bird's eye views and projected cross sections of the focuses of the Focal Distribution Segment I and the Focal Distribution Segment IV of the main shock and aftershocks of the Niigatiken Chuetsu-oki Earthquake in 2007. Specification of the focus mechanisms are shown in Table 1.

分布と調和的である。

なお、本震を引き起こした震源断層は、上記震源過程の解析では、震源セグメント III の南西縁の領域まで切って発達していると考えられるが、各震源分布セグメント内での具体的な断層の位置は、余震分布からは不明である。

メカニズム解

第6図は、中越沖地震の震源分布域において、国立大学、防災科研等の地震観測データを気象庁が収集し一元的に処理して得られた、本震以降2009年2月28日までの、本震を含

む30の地震についてのメカニズム解を示した図である。それぞれの地震のメカニズム解の諸元は、第1表に示すとおりである。メカニズム解が得られている地震はMj3.2以上のものであるが、Mj3.2以上の地震は、実際にはこれよりはるかに多い。しかし、それらの震源のほとんどが海側で、震源球下半球の4象限の節面を決定するだけの領域に観測点のデータをプロットできないために解が得られない(気象庁地震津波監視課談)。

メカニズム解の得られている30の地震のうち、16の地震が本震から24時間以内に発生した地震で、残りのうち12が

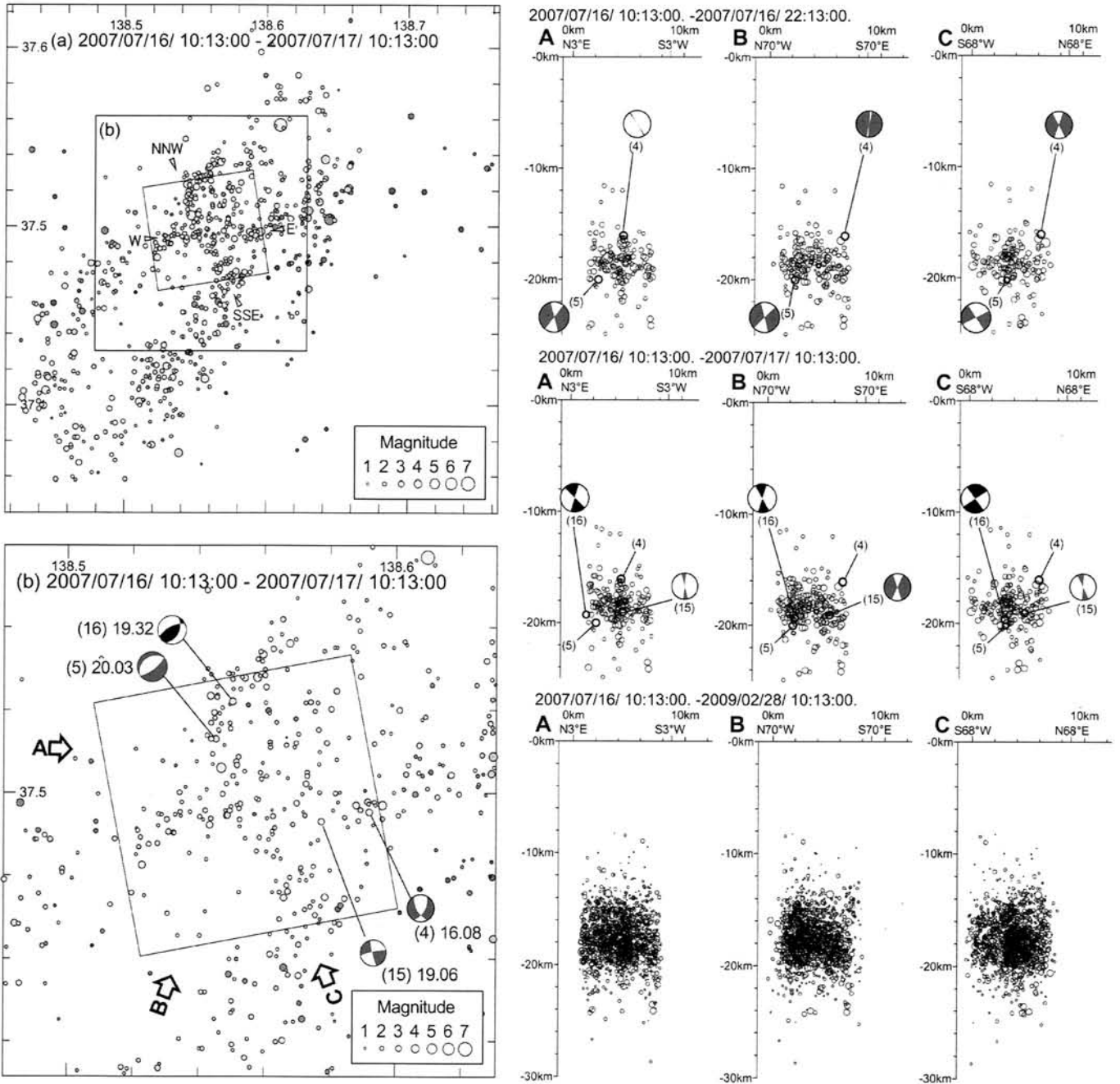


Fig. 8 Projected cross sections of the focuses of the Focal Distribution Segment II of the main shock and aftershocks of the Niigatoken Chuetsu-oki Earthquake in 2007. Specification of the focus mechanisms are shown in Table 1.

本震の24時間後から1ヶ月以内のものである。

### 24時間以内の地震のメカニズム解

本震発生から24時間以内に発生したメカニズム解の得られている地震は、第6図(a)で示されるように、震源域の南西部を除いて万遍なく分布している。

メカニズム解は、上記の震源分布セグメントごとに異なる。すなわち、震源分布セグメントIおよび震源分布セグメントIVでは、本震を含む7つの全部が、圧縮軸（以下P軸）が北西-南東方向の逆断層型である。これに対して、震源分布

セグメントIIの4つ（リスト番号：4；以下no.4と記す、no.5、no.15、no.16）のうち、その中央部で発生したもの2つ（no.4、no.15）は、P軸および引張軸（以下T軸）が水平に近い配置の正断層型、その北西部では、本震の約2時間後に発生したno.5はT軸が北西-南東方向の正断層型であり、本震の約22時間後に発生したno.16は、P軸が北西-南東方向の逆断層型である。一方、震源分布セグメントIIIでは、メカニズム解が得られている南東部の4つ全てが正断層型で、T軸が北西-南東方向を示す。

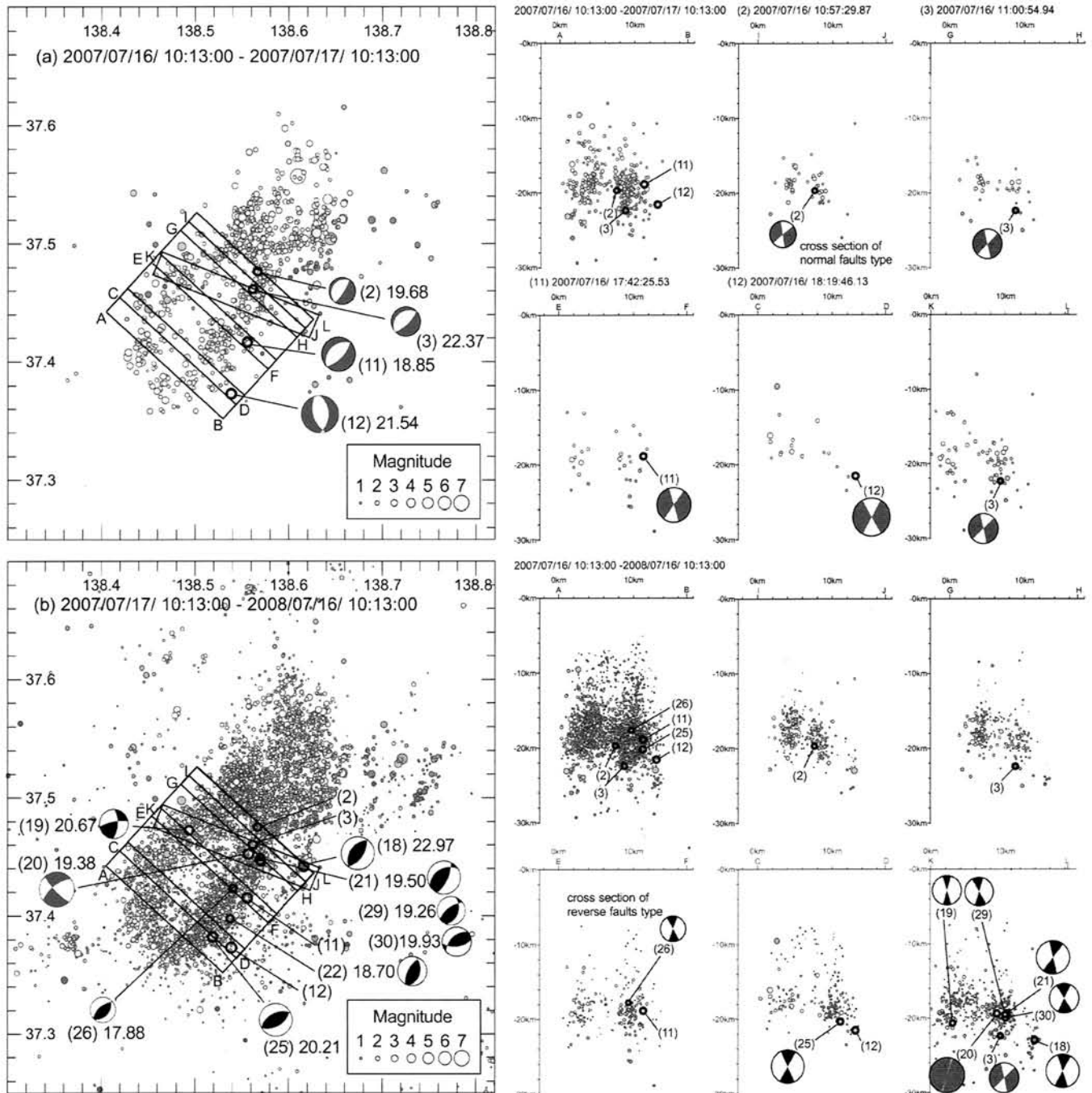


Fig. 9 Projected cross sections of the focuses of the Focal Distribution Segment III of the main shock and aftershocks of the Niigataken Chuetsu-oki Earthquake in 2007. Specification of the focus mechanisms are shown in Table 1.



## 24時間以降の地震のメカニズム解

本震発生から24時以降に発生したメカニズム解の得られている地震は、第6図(b)に示すように、多くが震源分布セグメントIIIのものである。震源分布セグメントIIIの南東部のうち、同じ範囲内で24時間以内におこったメカニズム解の4つ全てが正断層型であったのに対して、24時間以降に起こった10個のうち、1つ(no.20)を除いて、P軸が北西-南東方向の逆断層型である。震源分布セグメントIIIの北西部で唯一得られているメカニズム解(no.19)は、P軸が北東-南西方向で、T軸ともに傾斜がほぼ水平に近い横ずれの逆断層型を示している。また、震源分布セグメントIIIの南西端で唯一得られているno.28は、P軸が東西方向、T軸が南北方向で、傾斜が両者ともほぼ鉛直に近い横ずれの逆断層型である。

## 個々の震源分布セグメントの特徴

## 震源分布セグメントIおよび余震の発生頻度のきわめて低いゾーン

本震を含む震源分布セグメントIでは、余震の多くが深さ19km付近より浅い深度で発生している。震源分布セグメントIの南東縁の、余震の発生頻度のきわめて低いゾーンとの境界は、この範囲の中心方向である西北西方向への数10度の傾斜を保ちながら、分布域の南東縁から北東縁、北縁へと、北西走向から南北走向、南南西走向へと、走向を変えて連続する。断面では、震源の分布範囲は、より浅い深度ほど平面的に広がる、逆台形の形をなす(第7図)。本震発生後24時間以内のものでも、明瞭な面をつくるような分布は見られない(第5図A~C、第7図G)。この地域の余震分布の範囲

をたとえば、横に寝かせた卵の下半分のような形態にと表現できる。

震源分布セグメントIで発生した地震のメカニズム解のうち、本震のものは、P軸が北西-南東方向で、8°西に傾斜している。節面は、北西側に53°のものと南東側に37°のものが求められている。余震分布でも明瞭な構造が現れていないこともあり、当初はどちらが断層面に対応するのか議論が分かれていた(防災科学技術研究所, 2008)。現在は地表~海底部分の活断層との関係から、南東傾斜のものが断層面とする見解が多い(東京電力 2008b)。

## 震源分布セグメントII

震源分布セグメントIIでは、余震は20km~10数kmの深さで多く発生している。本震発生後24時間以内の震源分布を見ると(第8図)、発生深度は深さ24~11kmで、深さ20km~15kmが卓越する。この範囲の中では、周囲に向かって深く、内側に向かって浅くなる傾向がある。また、震源分布セグメントIIの中央部では、ほぼ東西方向と北北西-南南東方向の、互いにほぼ直交する二つの鉛直な面をなす集中域が認められる。すなわち、震源分布セグメントIIの余震分布は、ドーム上に凸に湾曲した分布範囲の中に、東西方向と北北西-南南東方向のほぼ直交する、二つの鉛直に近い面をつくる集中域があると表現できる。

震源分布セグメントIIで発生した地震でメカニズム解が得られているものは、5つある。北側の逆断層型のもの(no.16)以外は、すべて正断層型のメカニズム解が得られている。とくに、震源分布セグメントIIの中央部に近いno.15の地震のメカニズム解は、T軸が北西-南東方向で、T軸、P

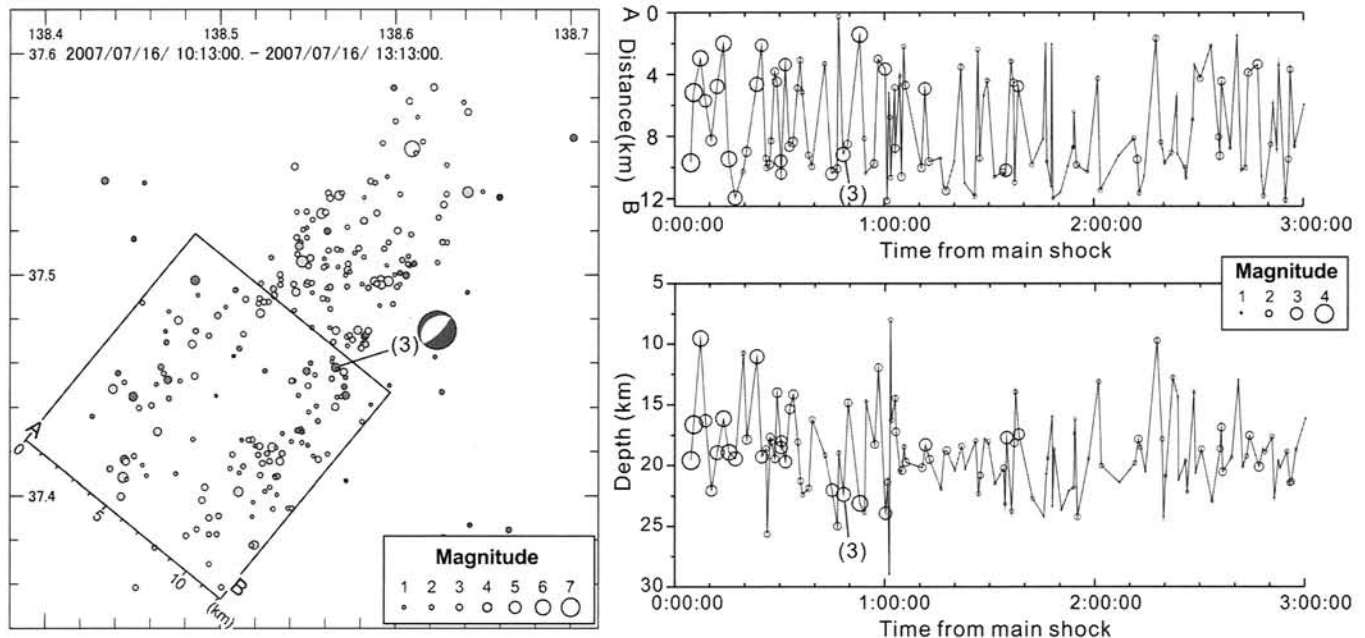


Fig. 10 Sequential distribution of horizontal (right upper) and depth (right lower) of aftershocks within 3 hours later in the Focal Distribution Segment III.

軸ともに水平に近い伏角である。

### 震源分布セグメント III

震源分布セグメント III は、北西-南東方向の断面で、地震の発生頻度のきわめて低い台形の領域を挟んで、その北西側と南東側に、それぞれ北西側および南東側に傾斜する分布を示し、両側を合わせて、ハの字型をなしている（第5図、第9図）。平面的に見れば、北西側と南東側の両側の、それぞれ外側に傾いた分布域は、その北東端と南西端の両方で互いに接近する方向に向きを変えて、全体として卵形をなしている。すなわち、たとえれば、横にした卵の上半分のうち、頂部を切り取って残った形と形容できる。

震源分布セグメント III の震源分布について、本震後3時間以内に発生した約105個の余震を、北西-南東方向の断面に投影した場合の、北西端からの距離と深度を、時系列で示した図が第10図である。第10図からは、余震は、北西側の深い位置に起これば次は南東側の浅い位置に起こるというように、位置も深度も、北西側の分布域と南東側の分布域で交互に起こる傾向を示している。さらに、深さの時系列変化からは、最初、深さ20kmより浅い深度で地震が起き、その後、徐々に深度を増し、深さ20数kmまで達すると、また浅い深度で起きる、という傾向が見られる。

本震発生後から1年間の余震分布をみると（第9図）、本震発生後1日以内と同様に14km以深に多数発生しているのに加えて、深さ12km～6km付近で余震が多数発生している。北西-南東方向の断面では、深さ12km～6kmの範囲では、それ以深のものとは逆に、浅いほど外側に広がる、逆ハの字型の分布を示している。

震源分布セグメント III でメカニズム解の得られている地震は、本震発生後1日以内のもので4つ、1日後以降では8つある。1日以内のものは、4つすべてが陸側に近い南東側の地震で、いずれも正断層型の解が得られている。南東端のno.12はT軸が西北西-東南東方向でほぼ水平、残りの3つは、T軸が北西-南東方向で、南東側に20数°傾いている。いずれも、節面の南東傾斜のものは、余震分布の伸びの方向に調和的である。1日以降のものは、1日以内のものとは逆に、no.20を除いて、いずれも逆断層型である。P軸は北西-南東方向で水平に近いが、やや南東に傾いている。no.20は、中央部に隣接する位置にあり、T軸が南北方向でほぼ水平、T軸は東西方向で、やや東に傾き、中央部と同様な傾向を示す。

### 震源分布セグメント IV

最大余震を含む震源分布セグメント IV は、その北部の、本震を含む震源分布セグメント I に接する範囲では、本震発生後1日間では南東に傾斜するゾーンをつかって分布している（第5図、第7図）。1日以降では、余震の起こる範囲が広がってゾーンが不明瞭になる。震源分布セグメント IV の

南部では、幅を狭めて、ほぼ鉛直の面をなし、南南西方向に直線的に連続している。

震源分布セグメント IV でメカニズム解の得られている地震は、最大余震のno.6を含め、本震発生後1日以内で6つ、1日以降ではno.18の1つである。それぞれの地震のメカニズム解は、P軸が北西-南東方向で、北西に傾斜するものと南東に傾斜するものがある。

## 余震の発生頻度のきわめて低いゾーン —地震発生層の地質とアスペリティー—

中越沖地震の本震を含む北東部の震源分布セグメント I と最大余震を含む東部の震源分布セグメント IV の間には、幅約1.5kmの地震の発生頻度のきわめて低いゾーンがある（図版1-1、第5図、第7図）。また、南西部の中央部の楕円体の上半分の領域も、同様に地震の発生頻度のきわめて低いゾーンになっている（第9図）。

このような地震の発生頻度のきわめて低いゾーンは、硬くて脆性的であるか、あるいは、極めて軟らかく塑性的で脆性破壊を起こさない物質でのいずれかである。

本震を引き起こした震源断層面の位置は、余震分布からはわからないが、既述のように、本震のインバージョン結果（防災科学技術研究所2008；東京電力2008a, 2008b）では、断層は、北東-南西方向に、震源分布セグメント I～III を貫く位置に、南東傾斜の面として推定されている。また、本震と最大余震との間の余震の発生頻度のきわめて低いゾーンおよび震源分布セグメント III の余震の発生頻度のきわめて低い領域に、それぞれ強いアスペリティーの存在が見積もられている。

アスペリティーの位置と余震の発生頻度のきわめて低い領域とがほぼ一致していることは、すなわち、これらの余震の発生頻度のきわめて低い領域が非常に硬くて脆性的な岩石からなっていて、そのために、大きいエネルギーの本震の際に割

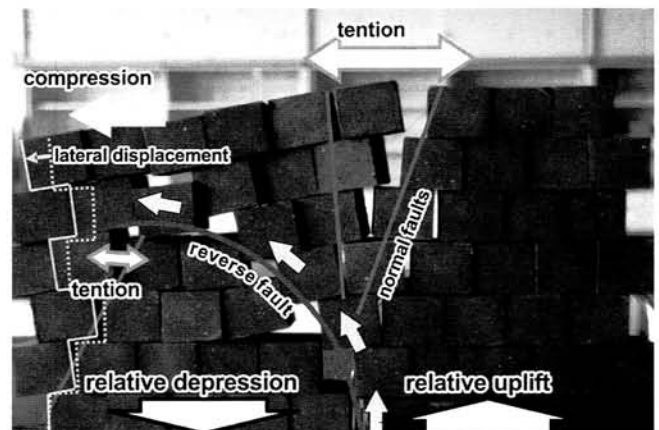


Fig. 11 Result of an experiment of the deformation of the overlying layers on the basal fault movement. Vertical fault movement of the basement is deformed through the overlying layers.

れたことによって、それ以降の本震より小さい応力状態では、脆性破壊を起こしにくい状態にあると想定することができる。

地表地質では、北東部の地震の発生頻度のきわめて低いゾーンと雁行する位置関係で、地震の発生頻度のきわめて低いゾーンの北東方に、安山岩、玄武岩、流紋岩など種々の火山岩からなる角田・弥彦山地の火山岩体がある。したがって、地震発生層である上部地殻の下部にある、余震の発生頻度のきわめて低い、幅約1.5kmの板状の硬く脆性的な地質体の実体は、弥彦山の火山岩体と同様な、ダイク状の貫入岩体である可能性がある。また、震源分布セグメントIIIの中央部は、陸域では、南西側にほぼ雁行する関係で、同じような規模の鮮新統の米山火山体があり、同様な岩株状の貫入岩体であるかもしれない。

### 応力変化速度に対する変形の 応答速度による変形の違い

2007年新潟県中越沖地震の余震分布に関して、とくに南西部の震源分布セグメントでは、深さ20km前後の余震で得られたメカニズム解からは、本震発生後24時間以内とそれ以降で、応力配置が異なる(第9図)。また、本震発生後24時間以内では、深さ14km以浅ではほとんど余震が発生しておらず、深さ14km以深ではハの字型の震源分布をなしているのに対して、本震発生後1年間の余震分布では、深さ約8km以深まで、本震発生後1日以内と比べて浅所まで余震が分布している。そして、深さ12km以浅では、それ以深ではハの字型の分布形態を示すのとは対照的に、逆ハの字型の分布を示している。

このような、応力配置および分布形態の時間経過による違いは、その場の岩石に応力が加わったときの応力変化速度に対する岩石の変形の応答速度の違いを反映していると考えられる。すなわち、応力増加速度が速い場合には、弾性限界を超えて以降、応力の増加に塑性的な変形が追いつかず破断してしまうが、その後の時間的経過とともに変形が追いついて、クリープとして、その変形に対応した応力の元でさらに変形が進むからであると考えられる。

第11図で示したレンガを積み重ねておこなったスケールモデル実験でも、基盤(実際は昇降式のバリアフリー対応実験台)を一気に上昇させてしまうと、写真のような撓曲変形は起こらずに平面にちかい高角の逆断層ができるのみである。しかし、変形が落ち着くまで充分な時間をかけて徐々に上昇させると、第11図のような変形をさせることができる。実際の地震を起こす断層の運動と変形についても、このような応力増加速度と変形速度の関係が効いていると思われる。

### 2007年新潟県中越沖地震をもたらした力学 —上部マントルからの溶融体の押し上げ

以上のように、北東部の震源分布セグメントIは、寝かした卵の下半分のような余震分布の形態をなし、逆断層型の応力で本震を含む地震が発生している。一方、中央部の震源分布セグメントIIでは、ドーム状の中に直交する2つの鉛直な幅の狭い面をなす集中域があって、P軸、T軸ともに水平方向を示す応力分布である。南西部の震源分布セグメントIIIは、横にした卵の上半分のうち、頂部を切り取って残った形の震源分布をなし、発生1日間では、その南東側は正断層型の応力分布を示す。

震源分布セグメントIIでみられる、周囲に向かって深く、内側に向かって浅い、ドーム状に上に湾曲した震源分布の形状と、その中でみられる、互いにほぼ直交する二つの鉛直な面をなす集中域は、側方圧縮による縦曲げ褶曲で、中立面より上側に働く引張域によって直交する2面の鉛直な集中域ができたか、あるいは、震源分布セグメントII自体が下方からの押し上げによるドーム状の横曲げ褶曲で、褶曲部全体が引張域になって直交する2面の鉛直な集中域ができたかのいずれかである。メカニズム解からは、上に湾曲したドーム場の震源分布の形状の下部でも上部でも正断層型の解が得られている。従って、震源分布セグメントIIでは、下からの押し上げによる応力で分布形態がもたらされたと考えられる。

一方、本震を含む震源分布セグメントIは、本州脊梁部のアーチ状の浅発地震の集中域の緩い勾配から急な勾配への変換点付近に位置しているが、第2図右(Nakajima and Hasegawa 2007)および図版1-3の地震波トモグラフィー(Nakajima and Hasegawa 2008)で見ると、地下では、セグメントIの下で下部地殻における低速度域の分布境界になっており、東側には下部地殻のより浅所まで低速度域が分布している。本震は、その低速度域の境界部の角の部分からさらに突き出した低速度域の、北西上側への延長上に位置している。従って、下部地殻に貫入した溶融体によって押し上げられて隆起する上部地殻に隣接する領域では、第11図のように側方圧縮力が働いており、これに角の部分からさらに突き出した低速度域の押し上げが加わって本震がもたらされたと考えられる。

このように、震源分布セグメントごとの余震分布の特徴とメカニズム解からは、中越沖地震で発生した本震および余震の全体が、単純に一樣な応力の元で形成されたとは考えられない。とくに、中央部および南西部の震源分布セグメントIIおよびIIIの形態および現象は、下からの押し上げによる応力によるとしか説明できない。Nakajima and Hasegawa (2008)では、トモグラフィーの結果から、上部マントルから溶融体が下部地殻に貫入して、中越地震および中越沖地震の発生域の下位層である下部地殻に、上部マントルから続く低速度を

示す領域があって、地震発生層である上部地殻を押し上げていると解釈されており（図版 1-3）、これが下からの押し上げをもたらしている実体であると考えられる。

震源分布セグメントごとの余震分布と応力配置の違いは、上部マントルから溶融体が下部地殻に貫入した際の、下からの押し上げの様式の違いと、それによって押し上げられて脆性破壊を起こした地殻の不均一性や地質構造要素の違いによって、それぞれ異なった反応を示した結果であると考えられる（図版 1-4）。

震源分布セグメント III の上に広がる余震の、上に広がる逆ハの字形の分布形態も、既述のように、下からの鉛直方向の圧縮応力がより浅所に伝達する際に、上昇側の境界部で、地表に近く、かつ固結度の低いより上層での応力開放により上下方向に T 軸が急傾斜になり、それに対応して P 軸が緩傾斜になることによると解釈できる（第 11 図）。

このような上部地殻の破壊をもたらしたマントル上部から下部地殻へと貫入した溶融体の上昇に伴う上部地殻の押し上げは、もちろん地震直前に突如としておこったのではなく、持続的におこっていると考えられる。持続的な上昇に伴う押し上げによって、上部地殻中の応力が徐々に増大し、やがて破断する。その際に、下部地殻に貫入して上昇する溶融体の上昇形態と上部地殻の物性の違い＝地質構造要素の違いが、震源分布セグメントごとの震源分布の形態と破壊点の応力分布を決めていると考えられる。

## おわりに

2007 年新潟県中越沖地震をもとに、気象庁による発震機構解の解析結果をもとに、震源分布と発震機構との関係を検討し、さらに、震源分布と基盤岩類～新生界の地質および地質構造との関係を検討した。その結果、地震の発生が、とくに基盤の地質構造と密接にかかわっていることを明らかにした。また、震源分布と応力場の関係や低周波地震の存在、Nakajima and Hasegawa (2008) などによる地震波トモグラフィーによるマントル上部の速度構造などから、地震をもたらした地殻の変動は、マントル上部の上昇する溶融体による押し上げによることを明らかにした。このようなマントル上部からの溶融体の押し上げによる変動は、島弧における島弧変動の、堆積盆地の発生・発達をもたらす、現在の地震をもたらす変動の実体であろう。

一方、本震を引き起こした震源断層の分布と余震分布が示す震源分布セグメントとの関係や、さらに具体的な地表地質構造との関係、さらには、本論文では触れなかったが、中越沖地震の北東縁と 2004 年新潟県中越地震の北東縁が、それぞれの震源域にほぼ直交するかたちでほぼ同一線上に並んでいることの地質学的要因など、今後解明しなければならない課題も多い。

今後の地震の発生を予測していくためには、基盤の地質構

造やさらに地震発生層である地殻下部の地質を考えていく必要がある。しかし、その実体は、新生界などの被覆層に覆われてわからないことが多い。本研究では、これらの一端を知るために、震源分布と個々の地震の発震機構の解析が有用であった。また、地震波トモグラフィーによる地下の速度構造の解析はきわめて有用であった。今後、地表の地質のより詳細な解析とあわせて、このような地震学的手法との総合化がいっそう必要である。

謝辞：本論文をまとめるにあたっては、千葉支部 風岡 修会員・新潟支部 大河内 誠会員には北部フォッサマグナ地域の地質に関して討論していただき、貴重なご教示・ご意見をいただいた。東北大学中島淳一博士には、図の引用について快諾いただいた。また、気象庁地震津波課には発震機構解の精度についてご教示いただいた。気象庁震源データについては、気象庁、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、産業技術総合研究所地質調査総合研究センター、東京都、静岡県、神奈川県温泉地学研究所、横浜市および海洋科学技術センターのデータを気象庁・文部科学省が処理した気象庁一元化処理検測値データを利用させていただいた。日本海洋データセンターの J-EGG500 (500m メッシュ水深データ) を使用させていただいた。記してお礼申し上げる。

## 文献

- 防災科学技術研究所 (2008) 近地強震動記録による 2007 年新潟県中越沖地震の震源インバージョン (暫定版)。http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net/topics/chuetsuoki20070716/inversion/ksw\_ver070816\_NIED\_Inv.pdf.
- 藤田至則 (1974) 進行しつつある変動－島弧変動－。関東地方の地震と地殻変動。ラティス社、東京、19-30.
- 藤田至則・川村善也・和田晴美・川辺孝幸・和田幸雄 (1977) 新生代末期における応力場。月刊地球、1:440-422.
- 長谷川昭・趙大鵬・山本明・堀内茂木 (1991) 地震波からみた東北日本の火山の深部構造と内陸地震の発生機構。火山、36:197-210.
- 早川正巳 (1980) 地殻内の熱の挙動 - 部分溶融による地震発生機構 -。地震 - 地震学者と地質学者の対話 -。東海大出版、東京、91-102.
- 平松良浩・和田博夫 (2007) 能登半島南部で発生した 2006 年 M3.8 の地震は眉丈山断層帯の深部延長上で発生したのか?。地震 2、60:117-121.
- 石本巳四男 (1943) 地震とその研究。古今書院、東京、336p.
- 伊藤 潔 (1995) 日光付近における地震発生層と内陸大地震。月刊地球、17:68-72.
- Kato A, Sakai S, Kurashimo E, Igarashi T, Ikeda T, Hirata N, Iwasaki T, Kanazawa T, and Group for the aftershock observations of the 2007 Niigataken Chuetsu-oki Earthquakes (2008) Imaging heterogeneous velocity structures and complex aftershock distributions in the source region of the 2007 Niigataken Chuetsu-oki Earthquake by a dense seismic observation. EPS, 60, 1111-1116.
- 川辺孝幸 (1995) 過去 11 年間の微小地震の震源分布からみた兵庫県南部地震の必然性について。地団研専報、44:73-78.
- 川辺孝幸・藤田至則・山岸猪久馬 (1995) “いわゆるマグマ” によ

- る地震発生の要因に関する試論. 地団研専報, 44:5-34.
- 川辺孝幸・藤田至則 (1997) 堆積盆地と地震活動 - 古琵琶湖層群堆積盆地の場合 -. 地球科学, 51:212-222.
- 松本 聡・津村紀子・岡田知己・長谷川 昭 (1995) 日光周辺域における地震波速度トモグラフィ. 月刊地球, 17:81-85.
- 松本 聡・西村卓也・堀修一郎・西村太志・渡辺俊和・長谷川昭・小原一成・笠原啓司・梅田康宏・伊藤 潔・片尾 浩・渡辺 晃 (1996) 1995年兵庫県南部地震と地殻内流動体. 地惑連合大会講演要旨集, A21-P24.
- Nakajima J and Hasegawa A (2007) Deep crustal structure along the Niigata-Kobe Tectonic Zone, Japan: its origin and segmentation. EPS, 59:e5-e8.
- Nakajima J and Hasegawa A (2008) Existence of low-velocity zones under the source areas of the 2004 Chuetsu and 2007 Chuetsu-oki Earthquakes inferred from travel-time tomography. EPS, 60, 1127-1130.
- 佐藤博樹・長谷川昭 (1995) 東北日本上部マントルの部分溶融域と低周波微小地震・地殻内反射面との対応について. 地震2, 48:433-434.
- 東京電力 (2008a) 中越沖地震の震源インバージョンとF-B断層の地震動評価について. <http://www.nsc.go.jp/senmon/shidai/kaisekigijutu/kaisekigijutu02/siry03.pdf>.
- 東京電力 (2008b) 震源インバージョン解析に基づく2007年新潟県中越沖地震の震源モデルの推定と, 広帯域地震動再現のための特性化震源モデルの構築に関する補足説明. <http://www.nsc.go.jp/senmon/shidai/kaisekigijutu/kaisekigijutu01/siry07.pdf>.

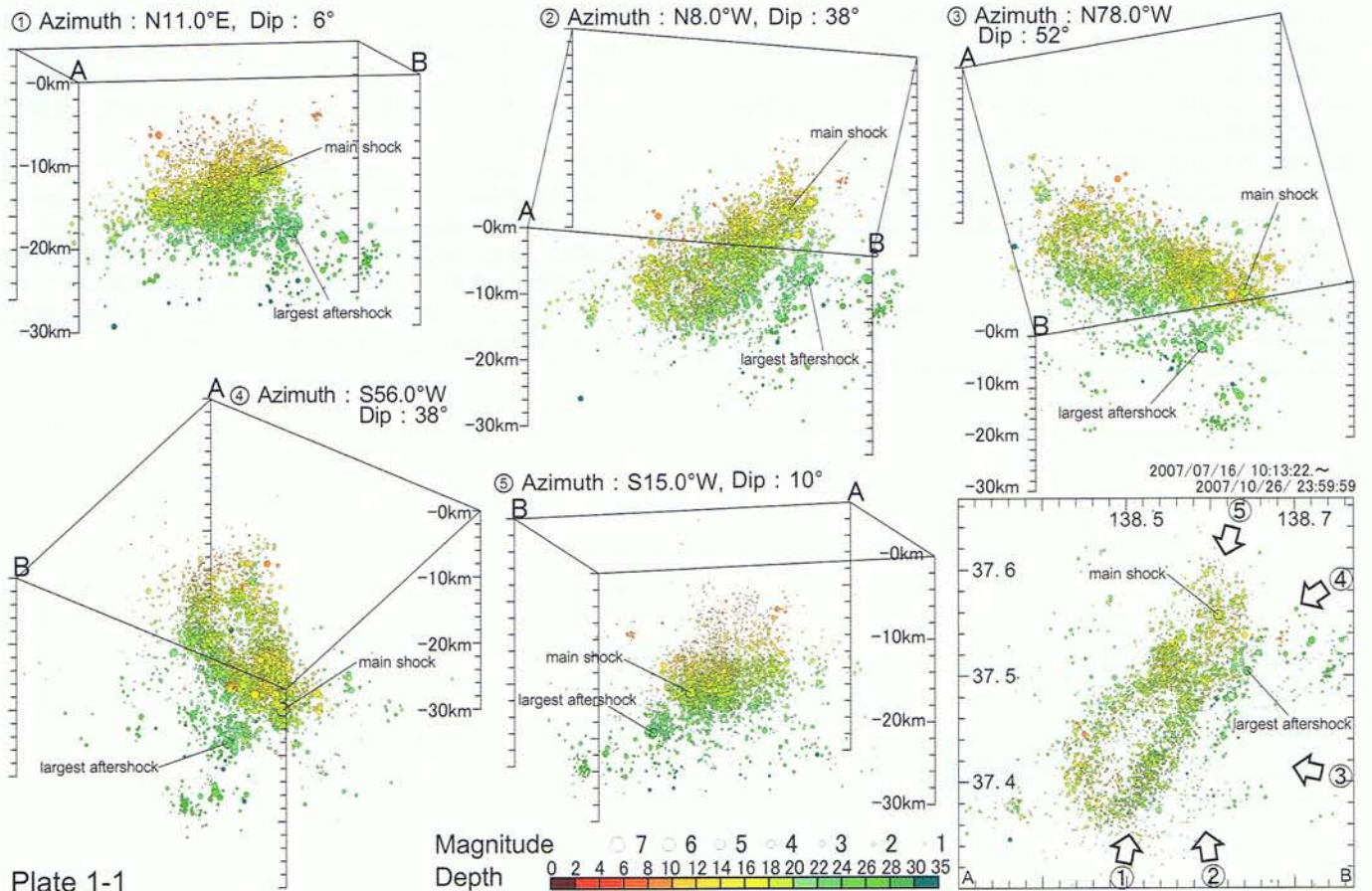


Plate 1-1

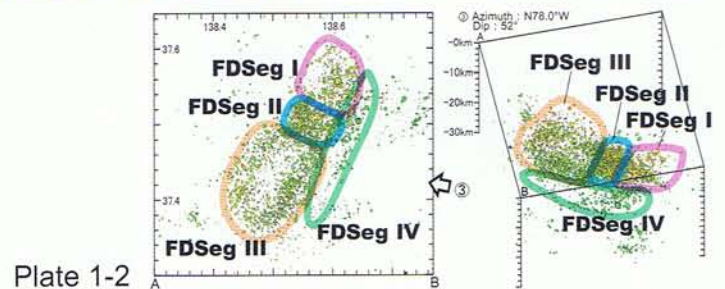


Plate 1-2

**Plate 1-1** Bird's eye view of focuses of the main shock and aftershocks of the Niigataken Chuetsu-oki Earthquake in 2007. Gap between the northeastern and the eastern areas is remarkably shown.

**Plate 1-2** Four focal distribution segments of the area of focuses of the main shock and aftershocks of the Niigataken Chuetsu-oki Earthquake in 2007. I: Focal Distribution Segment I, II: Focal Distribution Segment II, III: Focal Distribution Segment III, IV: Focal Distribution Segment IV.

**Plate 1-3** Vertical cross sections of (a) P-wave and (b) S-wave velocity perturbations along the profile shown in (c). Crosses denote earthquakes relocated with the 3-D velocity model within a 2-km-wide zone along the profile. Note that earthquakes plotted in figures include smaller earthquakes that are not used in the inversion. Black curve denotes the Moho discontinuity adopted in the inversion. (c) Comparison of hypocenters relocated with the 3-D velocity structures (red crosses) with those in the JMA catalogue (black crosses). All figures are after Nakajima and Hasegawa, 2008.

**Plate 1-4** Models of deformational patterns of the lower part of the upper crust by uplifting melt into the Lower Crust from the Mantle, estimated from the focuses of the main shock and aftershocks of the Niigataken Chuetsu-oki Earthquake in 2007.

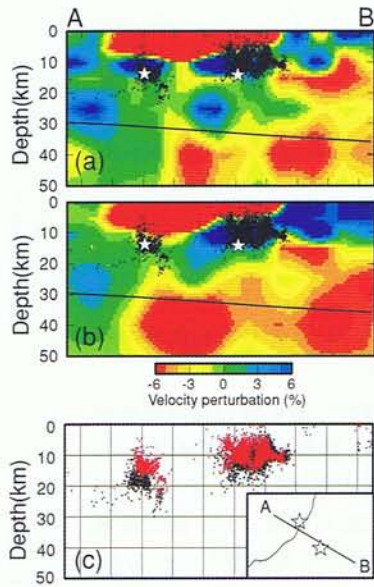


Plate 1-3

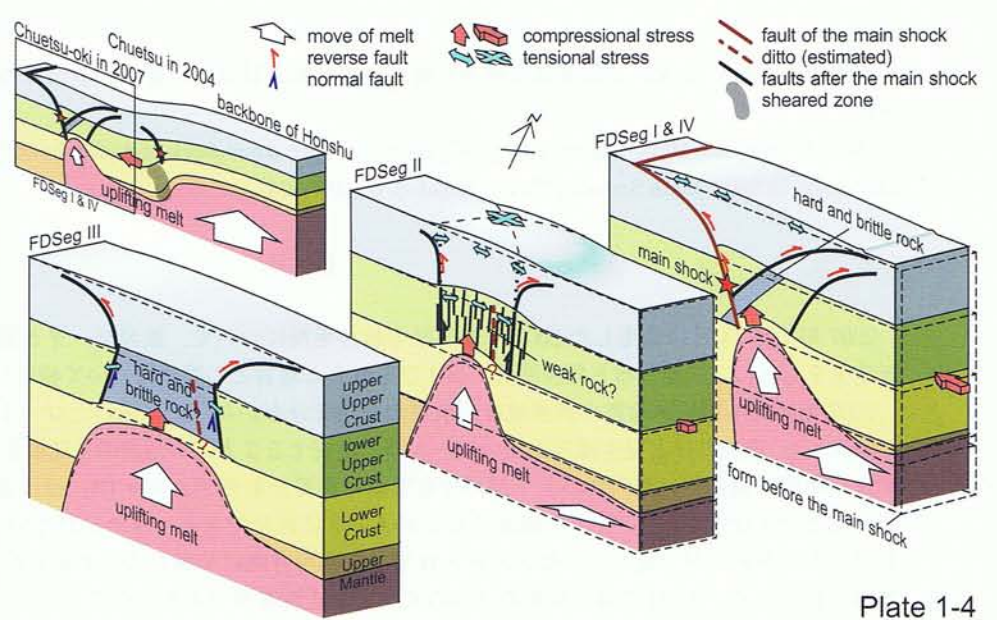


Plate 1-4

川辺孝幸. 2009. 2007年新潟県中越沖地震の地震活動の特徴と地質学的要因について. 地球科学, 63, 289-304.

KAWABE Takayuki, 2009. Feature and geologic origin of the main shock and aftershocks of the Niigataken Chuetsu-oki Earthquake in 2007. Earth Science (Chikyu Kagaku), 63, 289-304.

### 要 旨

2007年7月13日に発生した2007年新潟県中越沖地震について、震源データと気象庁による発震機構解の解析結果をもとに、震源分布と発震機構、およびそれらと地質との関係について検討した。

2007年新潟県中越沖地震の震源域は、余震の3次元分布から、上に開いたロート型の分布形態の震源分布セグメント I. 中央部ほど発生深度が浅いドーム型で直交する2方向の地震の多発面を伴う震源分布セグメント II. 北東-南西方向に長い楕円体の上半部の分布形態の震源分布セグメント III. ほぼ南北方向に伸びるゾーンの震源分布セグメント IV の、4つの震源分布セグメントに区分できる。求められている30のメカニズム解は逆断層型のものが多いが、震源分布セグメント II では、水平方向にT軸およびP軸が配置する正断層型ものがある。震源分布セグメント III では、初期の4つのすべてが正断層型である。このことは、地震の発生初期には上下方向の応力が働いていたことを示している。

震源分布セグメント I ~ III と震源分布セグメント IV との間には、北東-南西方向で北西に50°前後傾斜する幅約1.5kmの地震の発生頻度のきわめて低いゾーンがある。このゾーンは、本震のアスペリティの分布にはほぼ一致する。従って、これらのアスペリティに対応する地震の発生頻度のきわめて低いゾーンは、硬くて脆性的な岩質の地質からなっている可能性がある。

震源の三次元分布は、基盤岩類の岩相分布や地質構造と調和的で、地質の差異が地震の発生に密接にかかわっている。トモグラフィーによる速度構造と合わせて考えると、2007年新潟県中越沖地震の発生は、マントル上部から下部地殻に上昇する溶融体によって上部地殻下部が押し上げを受けることによると考えられる。