

## 世界の地震カタログ（1900～1999 年）とマグニチュードの不均質性

野口伸一\*

### Note on the Heterogeneity of Earthquake Magnitudes in the Global Centennial Catalog (1900-1999)

Shin-ichi NOGUCHI

*\*Earthquake Research Department*

*National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Japan*

*shin@bosai.go.jp*

#### Abstract

The centennial earthquake catalog 1900–1999 of instrumentally recorded worldwide earthquakes compiled by Engdahl and Villaseñor (2002) is basically important in various fields of seismology ; however, the details of the catalog have not necessarily been clarified. In this paper we examine the constituent ratio of magnitude scale (msc) and source catalog (mso) of the preferred magnitude *Mag* of individual earthquakes, which was selected uniquely from various source catalog based on CENT.CAT (all earthquakes) and CENT7.CAT (earthquakes with magnitude  $\geq 7$ ) database in the centennial catalog. We also examined sources of moment magnitude *M<sub>w</sub>* which constitute 59.4 % of a catalog of *Mag*  $\geq 7$  based on CENT7.CAT. From these investigations, we found noticeable features in the centennial catalog and the following points should be noted. First, the temporal variations of earthquake number in terms of the constituent ratio of msc and mso in each year indicate that the preferred *Mag* of earthquakes before 1964 is particularly heterogeneous, due to the various compositions of msc and mso. Also, the frequency-magnitude relation in terms of the constituent ratio of msc and mso shows remarkable variation of the constituent ratio depending on *Mag*. In particular the characteristics of *Mag*6.8 are distinct from other *Mag* levels. Further, the number of earthquakes of *Mag*  $\geq 7$  and their frequency-magnitude distribution based on CENT.CAT and CENT7.CAT are different. This difference is due to the exclusion of 55 earthquakes of *Mag*  $\geq 7.0$  with particular mso from CENT.CAT in the process of establishing a catalog of *Mag*  $\geq 7$ . Secondly, the moment magnitude *M<sub>w</sub>* of the catalog of *Mag*  $\geq 7$  before 1976 is mostly based on the seismic moment catalog by Pacheco and Sykes (1992), most of which is based on the conversion of surface wave magnitude *M<sub>s</sub>* to seismic moment *M<sub>0</sub>* and then to *M<sub>w</sub>* through an empirical formula. In addition, these *M<sub>s</sub>* are corrected temporally based on the hypothesis of the constant occurrence rate of worldwide seismicity. Considering the temporally fractal nature and long-term correlation of seismic activity revealed by Ogata and Abe (1991), *M<sub>w</sub>* converted from temporally corrected *M<sub>s</sub>* may have large uncertainty. These features and contents of the centennial catalog revealed by this study are important to utilize the catalog correctly and effectively.

**Key words** : Centennial earthquake catalog, Heterogeneity of catalog, Moment magnitude, Seismicity rate, Long-range correlation

#### 1. はじめに

地震カタログは地震活動の調査研究や地震危険度評価に不可欠な基礎資料である。地震カタログを利用する上で、そのカタログの使用条件、カタログ作成の背景 変

遷等の情報も欠かせない。カタログを無条件に使用して解析した結果、カタログの人為的要因を誤って自然現象と解釈することが稀ではないからである。例えば、活発化傾向にある最近のユーラシアプレート南東部の地震活動

\*独立行政法人 防災科学技術研究所 地震研究部

の推移, 日本列島周辺の地震活動との相関, 連動性等を, 予測精度を上げて的確に解釈するためには, マグニチュード決定に一貫性がある長期的に均質な世界的カタログに基づく解析が基本的に重要である。

最近の世界的な地震のカタログとして, 1900~1999年の100年間の器械観測による地震データを編集し統合した Engdahl and Villaseñor (2002)のカタログがある。このカタログは, 国際地震学及び地球内部物理学連合 IASPEI (International Association of Seismology and Physics of the Earth's Interior) の百周年を記念して刊行された「地震学及び地震工学国際ハンドブック」(Lee *et al.*, 2002; 通称 IASPEI ハンドブック) に収められ, 百年カタログ (Centennial catalog) と総称されている。

この百年カタログは, 全データベースを収めた CENT.CAT と, マグニチュード7以上の地震のデータベース CENT7.CAT, および CENT7.CAT に基づく本文中の「1900-1999年のマグニチュード $\geq 7$ の地震リスト」で構成されている。CENT.CAT と CENT7.CAT のデータベースは付属の CD に収録され, 大学や諸機関, 研究者個人が作成 刊行した多数の地震カタログの出典とマグニチュードの情報を地震毎に収録している。Engdahl and Villaseñor (2002)の主要な意図は, 全データベース CENT.CAT に基づいて, 100年間を通して漏れなく観測される地震の最小マグニチュード(カットオフマグニチュード)を見積り, その最小マグニチュード以上の地震の地震発生率(単位時間当たりの地震数)を評価するための, ひとつの完全なカタログ (complete catalogue) を作成することであった。そのため, 既存のカタログから各地震を代表する最適なマグニチュード (preferred magnitude) *Mag* を選択し, その *Mag* の種類と出典カタログの情報, および各地震の震源の発震時, 震源位置をまとめて, ひとつのカタログを作成した。これが本文に掲載された「1900-1999年のマグニチュード $\geq 7$ の地震リスト」である。

このマグニチュード $\geq 7$ の地震リストは, 世界の地震活動や危険度評価の基礎データとして広く参照されている。使用に際して, 特に選択した最適マグニチュード *Mag* の情報が極めて重要である。しかし, Engdahl and Villaseñor (2002)は, このマグニチュード $\geq 7$ のリストは相当に不均質であることを述べているが (Engdahl and Villaseñor, 2002, p667), リストの詳細についての具体的な解説や図表は示されていない。またこの百年カタログの内容に関する調査 文献等も, これまでの所, 見当たらない。このような事情から, 本論文ではこの百年カタログのデータベースに遡り, 特にマグニチュードの構成と時間変化の詳細を調べる。これにより, 百年カタログの特徴, 留意点を示し, 適切 有効なカタログの利用に資することを主な目的とした。

以下, 次章では二つのデータベース CENT.CAT, CENT7.CAT の構成を示し, 各地震の最適なマグニチュード *Mag* の選択方法について述べる。具体的にマグニチュードの種類と出典の構成と時間変化, 不均質性を CENT.CAT について調べる。第3章では, CENT7.CAT に基づいて作

成された「1900-1999年のマグニチュード $\geq 7$ の地震リスト」の内訳を調べる。その中で, 比較的古い地震の最適なマグニチュード *Mag* は, 元のカタログのマグニチュードの特性を考慮して取捨選択され, CENT7.CAT は CENT.CAT から単純に *Mag* $\geq 7.0$  を取り出したものではないことを示す。第4章では「1900-1999年のマグニチュード $\geq 7$ の地震リスト」へ寄与の大きい Pacheco and Sykes (1992)のカタログと, このカタログの作成の元となった Abe (1981, 1984), 及び Abe and Noguchi (1983a, 1983b)のカタログに遡り, 両カタログのマグニチュードの相違を検討する。Pacheco and Sykes (1992)のカタログは地震モーメントカタログと称しているが, 多くは経験式に基づき表面波マグニチュードから換算した地震モーメントである。さらにその表面波マグニチュードは, *Mag* $\geq 7$ の地震発生率(単位時間当たりの地震数)は長期的に一定であることを仮定して, 時間補正が施されている。Ogata and Abe (1991)の地震活動の長記依存性の解析結果から, このマグニチュードの時間補正には議論の余地があることを第5章で述べる。第6章で第2~第5章の要点をまとめた。

## 2. 百年カタログのデータベースの構成とマグニチュード

まず次節で百年カタログ (Centennial catalog) のデータベースの構成例とマグニチュードの種類について述べる。次にデータベースから選択された各地震の最適なマグニチュード *Mag* の種類 (msc) を説明し (2.2 節), msc とともに *Mag* の出典 (mdo), 及び元のカタログの情報 (icat) の構成要素と構成比を CENT.CAT と CENT7.CAT について示す (2.3 節)。さらに全データベース CENT.CAT に基づき, 地震数の時間変化を msc 別と mdo 別構成比の変化 (2.4 節), *Mag* 毎度数分布を msc と mdo 別構成比から調べる (2.5 節)。

### 2.1 データベースの構成とマグニチュードの種類

百年カタログのデータベースは, IASPEI ハンドブック (Lee *et al.*, 2002) の付属 CD#1 (ディレクトリーマ '41Engdahl') に, テキストファイル CENT.CAT および CENT7.CAT として収録されている。各地震の 168 バイトのデータ読み込み形式は, Engdahl and Villaseñor (2002) の Appendix1 に解説されている。CD から計算機 (パーソナルコンピュータ) に取り込まれた地震の数は, CENT.CAT は *Mag* $\geq 5.5$  が 11,911 個, CENT7.CAT は *Mag* $\geq 7.0$  が 1,553 個である。なお, CENT.CAT を改訂して 2007年2月まで拡張したデータベースが, 米国地質調査所の Web ページで公開されている (U. S. Geological Survey, 2008)。

CENT7.CAT のデータベースの構成例を表1に示す。これは CENT7.CAT から取り出した5つの期間のデータ例である。各地震は, カatalogの出典, 震源決定等の情報 (icat, asol, isol), 震源時 (yr, mon, day, hr, min, sec) と震源位置 (glat, glon, dep), 地域番号 (greg), 観測点数 (ntel), および最大8組のマグニチュードのデータセット (*mag*, msc, mdo) で構成されている。ここで, *mag* は

**表 1** IASPEI ハンドブック (Lee *et al.*, 2002) の CD に収録されている Engdahl and Villaseñor (2002) による Global Earthquake Catalog of Magnitude  $\geq 7$  (1900-1999) から抜粋した 5 つの期間の地震リスト例。各地震は、カタログの出典と震源決定等の情報 (icat, asol, isol), 震源時 (yr, mon, day, hr, min, sec), 震源位置 (glat, glon, dep), 観測点数 (greg), 観測点数 (ntel) と、その後元のカタログ毎に、マグニチュードデータセット (*mag*, msc, mdo) を最大 8 組まで収録。最初のデータセットがその地震を代表する最適マグニチュード *Mag* と種類 (msc) および出典 (mdo) を示す。その構成を表 2 に示す。

**Table 1** Example of listing extracted from the global earthquake catalog of magnitude  $\geq 7$  for 1900-1999, compiled by Engdahl and Villaseñor (2002) and included on the CD of the IASPEI Handbook (Lee *et al.*, 2002). Each line shows hypocenter parameters of one earthquake; source catalogs and hypocenter determination symbols (icat, asol, isol), origin time (yr, mon, day, hr, min, sec), epicenters (glat, glon, in degrees), focal depth (dep, in km), and up to 8 magnitude datasets (*mag*, msc, mdo). The first dataset is the preferred magnitude *Mag*, its scale (msc) and source (mdo), adopted as representative of each event. The groupings of msc, mdo, and icat of the preferred magnitude *Mag* are shown in **Table 2**.

icat	asol	isol	yr	mon	day	hr	min	sec	glat	glon	dep	greg	ntel	mag	msc	mdo	mag	msc	mdo	mag	msc	mdo	mag	msc	mdo	mag	msc	mdo
ABE			0	1	5	19	0	0.00	-3.000	102.000	0.0	274	0	7.0	Ms	AN2	0.0	0.0		0.0	0.0		0.0	0.0		0.0	0.0	
ABE			0	1	11	9	7	0.00	-5.000	148.000	0.0	192	0	7.0	Ms	AN2	0.0	0.0		0.0	0.0		0.0	0.0		0.0	0.0	
ABE			0	1	20	6	33	0.00	20.000	-105.000	0.0	55	0	7.3	Mw	P&S	7.4	Ms	AN2	7.3	Ms	P&S	8.2	UK	B&D	0.0	0.0	
UTSU			0	1	31	19	22	0.00	48.000	146.000	450.0	663	0	7.5	Mj	UTSU	0.0	0.0		0.0	0.0		0.0	0.0		0.0	0.0	
UTSU			0	5	11	17	23	0.00	38.700	141.100	5.0	228	0	7.0	Mj	UTSU	6.8	Ms	BJI	0.0	0.0		0.0	0.0		0.0	0.0	
G&R			17	8	31	11	36	24.00	4.000	-74.000	0.0	103	0	7.1	Ms	ANI	7.2	mB	ABE1	7.3	UK	G&R	7.1	UK	B&D	0.0	0.0	
ISS			17	11	4	12	3	30.00	4.800	96.800	0.0	706	0	7.1	Ms	ANI	7.1	UK	B&D	7.1	Ms	BJI	0.0	0.0		0.0	0.0	
G&R			17	11	16	3	19	30.00	-29.000	-177.500	0.0	178	0	7.3	Mw	P&S	7.5	Ms	ANI	7.3	Ms	P&S	7.5	UK	G&R	7.8	UK	B&D
ISS			17	12	29	22	50	20.00	15.000	-97.000	0.0	66	0	7.7	UK	B&D	0.0	0.0		0.0	0.0		0.0	0.0		0.0	0.0	
EHB	ADEQ		18	1	30	21	18	36.38	45.447	136.741	330.4	661	29	7.4	Mw	ABE1	7.7	UK	G&R	7.7	UK	B&D	7.7	UK	PAS	7.8	Mj	UTSU
EHB	BLEQ		18	2	7	5	20	33.87	6.778	126.688	218.1	259	7	7.2	mB	ABE1	7.5	UK	G&R	7.5	UK	B&D	7.5	UK	PAS	0.0	0.0	
EHB	AFEQ		18	2	13	6	7	13.98	23.540	117.243	15.0	242	13	7.2	Mw	P&S	7.4	Ms	ABE1	7.2	Ms	P&S	7.2	mB	ABE1	7.3	UK	B&D
EHB	ADEQ		18	4	10	2	3	53.83	43.476	130.919	564.9	657	17	7.0	mB	ABE1	7.2	UK	G&R	7.2	UK	B&D	7.2	UK	PAS	7.5	Mj	UTSU
EHB	AFEQ		42	11	10	11	41	28.11	-49.726	29.947	15.0	430	52	8.0	Mw	P&S	7.9	Ms	ABE1	7.7	Ms	P&S	7.7	mB	ABE1	8.3	UK	B&D
EHB	ADEQ		42	11	26	14	27	31.50	45.405	150.175	76.0	221	55	7.4	mB	ABE1	7.4	UK	B&D	7.4	UK	PAS	0.0	0.0		0.0	0.0	
EHB	AFEQ		42	11	28	10	38	46.57	7.280	-35.644	15.0	406	64	7.1	Ms	ABE1	7.1	mB	ABE1	7.1	UK	B&D	7.1	UK	PAS	0.0	0.0	
EHB	AFEQ		42	12	20	14	3	11.12	40.671	36.450	35.0	366	22	7.2	Mw	P&S	7.3	Ms	ABE1	7.1	Ms	P&S	7.3	UK	B&D	7.3	UK	PAS
G&R			43	2	22	9	20	45.00	17.750	-101.500	0.0	58	0	7.4	Mw	P&S	7.5	Ms	ABE1	7.2	mB	ABE1	7.2	mB	ABE1	7.5	UK	G&R
G&R			43	2	28	12	54	33.00	36.500	70.500	210.0	718	0	7.1	mB	ABE1	7.0	UK	G&R	7.0	UK	B&D	7.0	UK	PAS	0.0	0.0	
G&R			43	3	9	9	48	55.00	-60.000	-27.000	0.0	153	0	7.1	Mw	P&S	7.2	Ms	ABE1	7.4	mB	ABE1	7.3	UK	G&R	7.3	UK	PAS
G&R			43	3	14	18	37	56.00	-20.000	-69.500	150.0	123	0	7.1	mB	ABE1	7.2	UK	G&R	7.2	UK	B&D	7.2	UK	PAS	0.0	0.0	
ISS			55	8	6	8	31	24.00	-21.100	-177.500	287.0	181	0	7.0	mB	ABE1	7.0	Ms	ROTHE	7.0	UK	B&D	6.9	UK	PAS	0.0	0.0	
ISS			55	10	8	57	46.00	-5.100	152.800	0.0	192	0	7.3	Mw	P&S	7.3	Ms	ABE1	7.3	Ms	P&S	6.9	mB	ABE1	7.3	UK	B&D	
ISS			55	10	13	9	26	49.00	-10.000	160.700	33.0	193	0	7.1	mB	ABE1	7.3	Ms	ROTHE	7.3	UK	B&D	7.1	UK	PAS	0.0	0.0	
ISS			55	11	10	1	44	5.00	-15.600	-173.600	64.0	173	0	7.2	Ms	ROTHE	6.8	UK	PAS	0.0	0.0		0.0	0.0		0.0	0.0	
EHB	ADEQ		56	2	1	13	41	52.75	18.853	145.060	379.9	216	104	7.0	mB	ABE1	7.0	Ms	ROTHE	7.0	UK	B&D	7.0	UK	PAS	0.0	0.0	
EHB	ADEQ		56	2	18	7	34	24.70	30.173	138.275	480.2	211	124	7.1	mB	ABE1	7.3	Ms	ROTHE	7.3	UK	B&D	7.1	mB	BJI	0.0	0.0	
EHB	ADEQ		56	5	23	20	48	29.75	-15.523	-178.589	402.5	181	227	7.2	mB	ABE1	7.5	Ms	ROTHE	7.5	UK	B&D	7.5	UK	PAS	0.0	0.0	
EHB	AFEQ		56	6	9	23	13	56.38	35.031	67.476	35.0	718	207	7.6	Mw	P&S	7.5	Ms	ABE1	7.3	mB	ABE1	7.6	UK	B&D	7.6	UK	PAS
EHB	DEQM		80	7	8	23	19	24.06	-12.485	166.482	55.7	184	226	7.5	Mw	HRV	7.5	Mw	P&S	7.3	Ms	ABE1	7.3	Ms	P&S	7.3	Ms	ISC
EHB	DEQM		80	7	16	19	56	48.66	-4.434	143.579	86.3	202	313	7.3	Mw	HRV	7.4	mB	ABE3	6.3	mB	ISC	6.5	mB	NEIS	6.9	UK	PAS
EHB	DEQM		80	7	17	19	42	24.60	-12.481	166.004	32.3	184	184	7.8	Mw	HRV	7.8	Mw	P&S	7.7	Ms	ABE1	7.7	Ms	P&S	7.5	Ms	ISC
EHB	DEQM		80	10	10	12	25	25.52	36.141	1.401	12.4	396	248	7.1	Mw	HRV	7.1	Mw	P&S	7.1	Ms	P&S	7.1	Ms	P&S	7.2	mB	ABE3
EHB	DEQM		80	10	24	14	53	35.62	18.176	-98.235	64.8	523	318	7.2	Mw	HRV	7.0	mB	ABE3	6.3	mB	ISC	6.4	mB	NEIS	6.8	Ms	ISC
EHB	DEQM		99	11	15	5	42	45.37	-1.350	88.869	13.3	425	452	7.0	Mw	HRV	6.9	Ms	NEIC	6.3	mB	NEIC	7.7	ME	GS	0.0	0.0	
EHB	DEQM		99	11	19	13	56	49.48	-6.359	148.813	45.5	192	238	7.0	Mw	HRV	7.0	Ms	NEIC	5.9	mB	NEIC	0.0	0.0		0.0	0.0	
EHB	DEQM		99	11	26	13	21	15.78	-16.393	168.314	24.3	186	194	7.4	Mw	HRV	7.3	Ms	NEIC	6.4	mB	NEIC	7.3	ME	GS	0.0	0.0	
EHB	DEQM		99	12	6	23	12	34.48	57.346	-154.519	58.5	13	461	7.0	Mw	HRV	7.0	Mw	GS	6.8	mB	NEIC	0.0	0.0		0.0	0.0	
EHB	DEQM		99	12	11	18	3	38.95	15.758	119.758	43.5	249	445	7.3	Mw	HRV	7.1	Ms	NEIC	6.5	mB	NEIC	7.1	ME	GS	0.0	0.0	



元の各カタログのマグニチュードの値, *msc* と *mdo* は, その種類と出典の略号である. 表 1 の最上段は, CENT7.CAT の最初の期間 (1900 年 1 月 5 日~1900 年 5 月 11 日) の 5 個の地震, 最下段は最後の期間 (1999 年 11 月 15 日~1999 年 12 月 11 日) の 5 個の地震を示す. 第 2 段~第 4 段は, 年(yr)の切り替わり時にカタログの種類 (*icat*) や震源決定の観測点方位や精度の情報 (*asol, isol*) が変化する例を示している. 第 5 段の 1980 年代の地震には, 8 組のデータセットから成る例がある. また, 同じ地震でもデータセットにより *mag* の値が互いに相当異なる例がみられる. このようなマグニチュードデータセットから, 各地震の最適マグニチュード *Mag* を選択して, ひとつの総合カタログを作成するため, Engdahl and Villaseñor (2002) は *Mag* の選択順位を次のように定めた.

## 2.2 マグニチュードの種類と *Mag* の選択

世界的に観測される地震の代表的なマグニチュードの種類 *msc* は, モーメントマグニチュード *Mw*, 表面波マグニチュード *Ms*, 広帯域実体波マグニチュード *mB*, および短周期実体波マグニチュード *mb* である. このうち *Mw* は, 地震の規模を表す物理量であるスカラー地震モーメント  $M_0$  (Aki, 1966) から, 合理的に次のように定義される (Kanamori, 1977 ; Hanks and Kanamori, 1979).

$$Mw = 2/3(\log M_0 - 9.1) \quad (1)$$

ここで  $M_0$  は,

$$M_0 = \mu SD \quad (2)$$

で表される (単位は  $N \cdot m$ ). ここで  $\mu$  は剛性率,  $S$  は断層面積,  $D$  は断層面上の平均くいながい量である. 近年は広帯域デジタル波形と解析の高度化により, セントロイドモーメントテンソル解とスカラー地震モーメント  $M_0$ , したがって *Mw* がルーチンの求められ (Dziwonski *et al.* 1981), 1976 年以降の  $M_0$  はハーバード

CMT カタログ (現在はグローバル CMT カタログ) に公表されている (CMT project, 2006).

一方, 歴史的には, 地震計の固有周期の制約と周期 20 秒前後に卓越する表面波振幅から, 浅い地震のマグニチュードは表面波マグニチュード *Ms* が広く用いられてきた. また深い地震は, 広帯域実体波マグニチュード *mB*, または深い地震でも長周期が卓越しない地震や比較的小さな地震は短周期実体波マグニチュード *mb* が用いられてきた. これら特定の周期範囲の地震波振幅に基づくマグニチュードスケールは, 断層運動パラメータの相似則と震源スペクトルの周期依存性のため,  $M_0$  (したがって *Mw*) が大きくなると *Mw* と非線形関係となり, 本来の地震の大きさを正確に表さない (Kanamori and Anderson, 1975 ; Kanamori, 1983).

このような各種マグニチュードの特徴と歴史的背景から, Engdahl and Villaseñor (2002) は, 各地震の最適マグニチュード *Mag* を選択するため, 次のような階層的な手順を採った. 1) 地震モーメント  $M_0$  が決められている地震の *Mag* は, 上記 (1) 式から換算した *Mw* を採用する. 2) 震源の深さ  $h \leq 60 \text{ km}$  で  $M_0$  が決められていない地震の *Mag* は, *Ms*, *mB*, *mb* の選択順とする. 3) 深さ  $h > 60 \text{ km}$  で  $M_0$  が求められていない *Mag* は, *mB*, *mb* の順とする. この選択方式による各地震の最適マグニチュード *Mag* とその種類 (*msc*), 出典 (*mdo*) が, CENT7.CAT と CENT.CAT のマグニチュードデータセットの 1 番目に記載されている. 例えば表 1 の最初の 1900 年 1 月 5 日の地震は, *Mag* = 7.0, *msc* = *Ms*, *mdo* = AN2, 最後の 1999 年 12 月 11 日の地震は, *Mag* = 7.3, *msc* = *Mw*, *mdo* = HRV である. 「1900-1999 年のマグニチュード  $\geq 7$  の地震リスト」の *Mag* と *msc*, *mdo* がこの CENT7.CAT の 1 番目のデータセットに対応している. これら *Mag*  $\geq 7$  の地震 1,553 個の震央分布を図 1 に示す. 震源の深さは区別せず, *Mag* の範

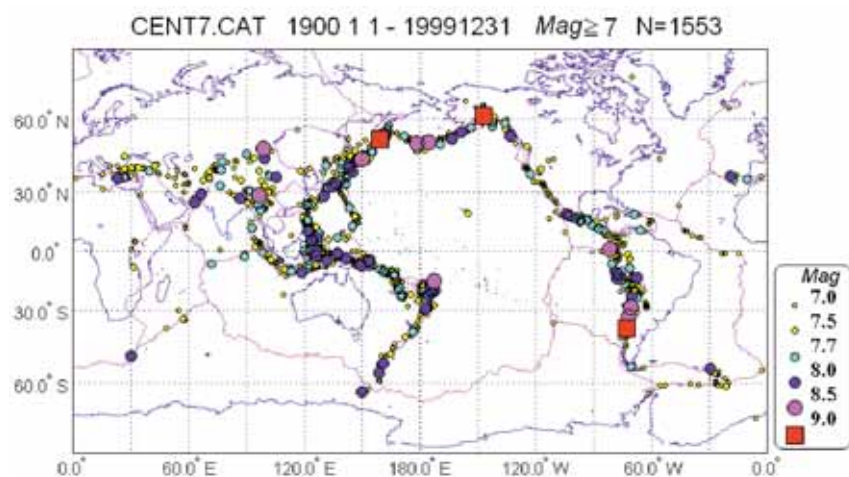


図 1 Engdahl and Villaseñor (2002) の表 1 「1900-1999 年のマグニチュード  $\geq 7$  の地震リスト」 (CENT7.CAT の *Mag*  $\geq 7.0$  の震源要素) の 1,553 個の震央分布. プレート境界は Bird (2003) による.

Fig. 1 Epicenter distribution of 1,553 earthquakes taken from the Table 1 of list of earthquakes (Magnitude  $\geq 7$ ) for 1900-1999, by Engdahl and Villaseñor (2002), i.e., the preferred magnitude events with *Mag*  $\geq 7.0$  in CENT7.CAT. Plate boundaries are from Bird (2003).

囲毎に記号の大きさを変えて示した。これらの中には、*Mag* が同じ値でも *msc* や *mdo* が異なるものが相当含まれる。

### 2.3 マグニチュード *Mag* の分類

前節で述べた各地震の最適マグニチュード *Mag* の種類 *msc* と出典 *mdo*、及びカタログ情報 *icat* は、表 1 の例のような文字列の記号である。これら *msc*、*mdo* 及び *icat* を、CENT.CAT と CENT7.CAT の *Mag* について分類した

結果を表 2 に示す。また *msc* と *mdo* について、その構成比を図 2 に円グラフで示した。表 2 と図 2 から次のような特徴が挙げられる。

*msc* の構成では、表 2 上段と図 2 (a), (b) のように *Mw* が最も多く、半数以上を占める (CENT.CAT の 51%, CENT7.CAT の 59.4%)。次いで、CENT.CAT では *Ms* が 18.9%であるが、CENT7.CAT では *mB* が 23.1%である。

表 2 CENT.CAT と CENT7.CAT のデータベースのうち、各地震の最適マグニチュード *Mag* について、その種類 *msc*、出典 *mdo* 及び震源カタログ *icat* の分類と構成表。 *mdo* は元の *mdo* を 14 種類にまとめて示す。 *msc* と *mdo* の構成比を図 2 に円グラフで示す。

Table 2 Grouping of magnitude scale (*msc*), source for magnitude (*mdo*), and source catalog (*icat*) of the preferred magnitude *Mag* based on databases CENT.CAT and CENT7.CAT. Here we classify *mdo* into fourteen constituents by summing the subdivision of original *mdo*. The composition ratios of *msc* and *mdo* are shown in Fig. 2 by pie charts.

	CENT.CAT		CENT7.CAT	
	number	%	number	%
<i>msc</i> : magnitude scale				
Mw: Moment magnitude	6079	51.0	922	59.4
Ms: Surface-wave magnitude	2254	18.9	222	14.3
mB: Broad-band body wave magnitude	449	3.8	359	23.1
mb: Body-wave magnitude	1999	16.8	0	0.0
Mj: Japan Meterological Agency magnitude	111	0.9	19	1.2
UK: Unknown magnitude	1019	8.6	31	2.0
Total	11911	100	1553	100

	CENT.CAT		CENT7.CAT	
	number	%	number	%
<i>mdo</i> : source for magnitude				
ABE123 (ABE1,ABE2,ABE3): Abe(1981, 1984)	764	6.4	492	31.7
AN12 (AN1, AN2): Abe and Noguchi (1983a,b)	145	1.2	51	3.3
B&D: B�ath and Duda(1979)	60	0.5	27	1.7
BJI: State Seismological Bureau, Beijing, China	60	0.5	9	0.6
BRK: Seismological Station, University of California, Berkeley, USA	117	1	3	0.2
G&R: Gutenberg and Richter (1954)	379	3.2	1	0.1
HRV: Harvard/Global CMT catalog, Harvard University, USA	5485	46.1	350	22.5
ISC: International Seismological Centre, Newbury, UK.	2366	19.9	9	0.6
NEIC (NEIC, NEIS, USCGS, GS): US Geological Survey	1163	9.8	19	1.2
PAL: Lamont-Doherty Earth Observatory, Palisades, USA	31	0.3	0	0.0
PAS: California Institute of Tecnology, Pasadena, USA.	431	3.6	0	0.0
P&S: Pacheco and Sykes (1992)	585	4.9	572	36.8
ROTHE: Roth�e (1969)	213	1.8	1	0.1
UTSU: Utsu (1979, 1982a, b)	111	0.9	19	1.2
Total	11910	100	1553	100

	CENT.CAT		CENT7.CAT	
	number	%	number	%
<i>icat</i> : source catalog				
ABE: Abe(1981, 1984), Abe and Noguchi (1983a,b)	141	1.2	66	4.2
B&D: B�ath and Duda(1979)	20	0.2	11	0.7
BJI: State Seismological Bureau, Beijing, China	27	0.2	5	0.3
CGS: US Coast and Geodetic Survey, USA	3	0.0	0	0.0
EHB: Engdahl, Van der Hilst and Buland (1998)	10633	89.3	1009	65.0
G&R: Gutenberg and Richter (1954)	618	5.2	337	21.7
ISS: International Seismological Summary	292	2.5	66	4.2
P&S: Pacheco and Sykes (1992)	7	0.1	7	0.5
UK: Unknown	1	0.0	1	0.1
UTSU: Utsu (1979, 1982a, b)	167	1.4	51	3.3
Total	11909	100	1553	100

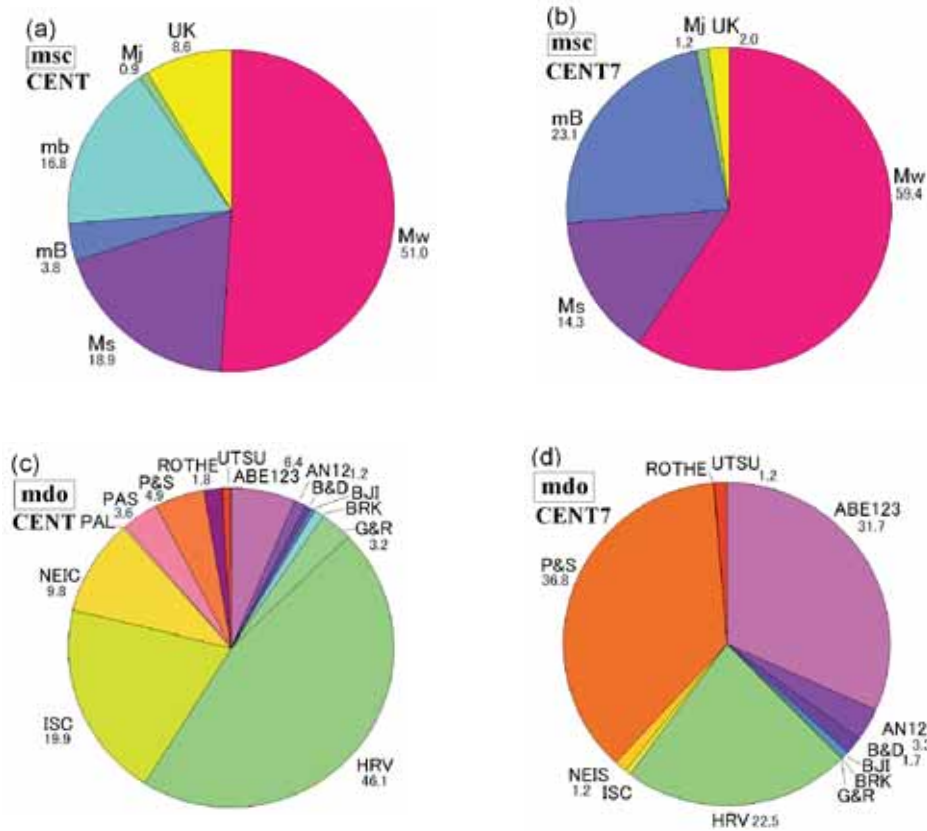


図 2 CENT.CAT と CENT7.CAT の各地震の最適マグニチュード *Mag* について、(a), (b) その種類 *msc* 別と、(c), (d) 出典 *mdo* 別の構成比率 (数値はパーセント). 表 2 参照.

Fig. 2 The component ratios of *msc* and *mdo* of the preferred magnitude *Mag* in CENT.CAT and CENT7.CAT are shown by pie charts. (a), (b) Grouping by *msc*, (c), (d) grouping by *mdo*, for CENT.CAT and CENT7.CAT, respectively. See Table 2.

これは CENT7.CAT の比較的深く深い地震の *Mag* の多くが *mB* であることによる. 一方, *mb* は CENT.CAT の 16.8% を占めるが, CENT7.CAT の *mb* は 0 個である. つまり  $Mag \geq 7$  の地震で *mb* が *Mag* の地震はみられない. この他の *msc* は, *Mag* の種類が不明な UK (Unknown magnitude), および少数の気象庁マグニチュード *Mj* (Japan Meteorological Agency magnitude) である.

*mdo* の構成では, 表 2 の中段のように 14 種類に分類した. 元の *mdo* はさらに細かく分類されている (表 1 の各 *mdo* 参照) が, 表 2 のように関連する *mdo* をまとめて示した. 例えば, ABE1, ABE2, ABE3 の 3 種類の *mdo* は文献 Abe (1981) と Abe (1984) であるので, 表 2 のように文字列 ABE123 とした. 同様に *mdo* が AN1 と AN2 は, Abe and Noguchi (1983a, 1983b) であり AN12 とした. 米国地質調査所 (USGS) の *mdo* も時代によって文字列が異なるが, 表 2 のようにまとめて NEIC とした. また HRV はハーバード大学の CMT カタログ (現在はコロンビア大学の GCMT カタログ; CMT project, 2006), P&S は Pacheco and Sykes (1992) のカタログである.

この *mdo* の構成比は, 表 2 中段と図 2 (c), (d) に示した. *mdo* が ABE123 である地震は CENT.CAT の 6.4%, CENT7.CAT の 31.7% を占める. これに対し *mdo* が P&S

(Pacheco and Sykes, 1992) である地震は, CENT.CAT の 4.9% であるが, CENT7.CAT では最多の 36.8% を占める (図 2d). この *mdo* が P&S の *Mag* は, その種類 (*msc*) の多くは *Mw* である. 以下, *Mag* の値と種類 (ここでは *Mw*) および出典 (ここでは P&S) を含めて, *Mw*(P&S) のように表示する. この *Mw*(P&S) には, 第 4 章でみるように表面波マグニチュード *Ms* から換算された *Mw* が相当含まれる. 一方, *mdo* が HRV の *Mag* はすべて *Mw*, すなわち *Mw*(HRV) であり, CENT.CAT の *mdo* の半数近く (46.1%), CENT7.CAT の *mdo* の 22.5% を占める (図 2c, d). 時間的には *Mw*(HRV) の大多数は 1976 年以降の地震である (図 3, 図 6).

表 2 の下段の *icat* は, 震源位置や震源決定の文献や機関等を表し, 表 2 には 10 種類を示した. この中で EHB は, Engdahl *et al.* (1998) の著者 Engdahl, Hilst and Buland の頭字語を表し, CENT.CAT の 89.3%, CENT7.CAT の 65% を占める. Engdahl *et al.* (1998) は, 新たな速度モデル (ak135 モデル; Kennett *et al.*, 1995) の走時表と世界各地の観測点で観測された膨大な各種波形の位相読取データを用いて, 古い地震まで遡り組織的に震源を再決定し, 特に震源の深さの精度を改善している. 例えば表 1 では 1918 年代にも, *icat* が EHB で震源再決定されている地震



がみられる。

以上、各地震の最適マグニチュード  $Mag$  の種類  $msc$  と出典  $mdo$ 、及び震源情報に関する  $icat$  の全期間 1900～1999 年の構成を、CENT.CAT ( $Mag \geq 5.5$ ) と CENT7.CAT ( $Mag \geq 7$ ) についてみてきた。次に、 $msc$  と  $mdo$  の構成と地震数が 100 年間でどのように変化してきたかを CENT.CAT について調べる。

2.4 CENT.CAT の地震数と  $msc$  と  $mdo$  別構成の時間変化

ここでは、全データベース CENT.CAT ( $Mag \geq 5.5$ ) に収録されている地震数の時間変化と  $msc$  別と  $mdo$  別の構成、および  $Mag$  の時間分布と累積度数の時間変化の特徴を調べる。

CENT.CAT ( $Mag \geq 5.5$ ) の地震数の時間変化をみるため、図 3 (a) と (b) に  $msc$  と  $mdo$  の構成で区分した 1 年毎の度数分布を示した。また図 4 (a) は、 $Mag$  毎の累積度数の時間変化(地震総数で正規化した相対度数)、図 4 (b)

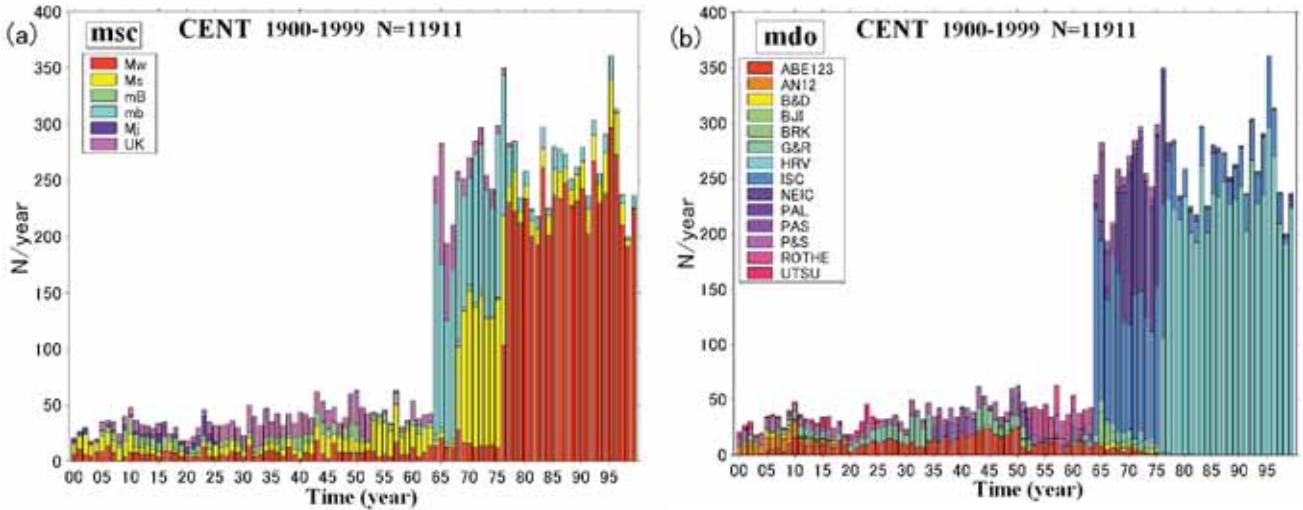


図 3 CENT.CAT の各地震の最適マグニチュード  $Mag$  の 1 年毎の地震数を、図中の凡例のように、(a)  $msc$  別、(b)  $mdo$  別の構成分布で示す。

Fig. 3 Temporal change of the number of events per year of earthquakes with preferred  $Mag$ , shown by the frequency distribution of constituents (a)  $msc$ , and (b)  $mdo$  as in the legend, respectively.

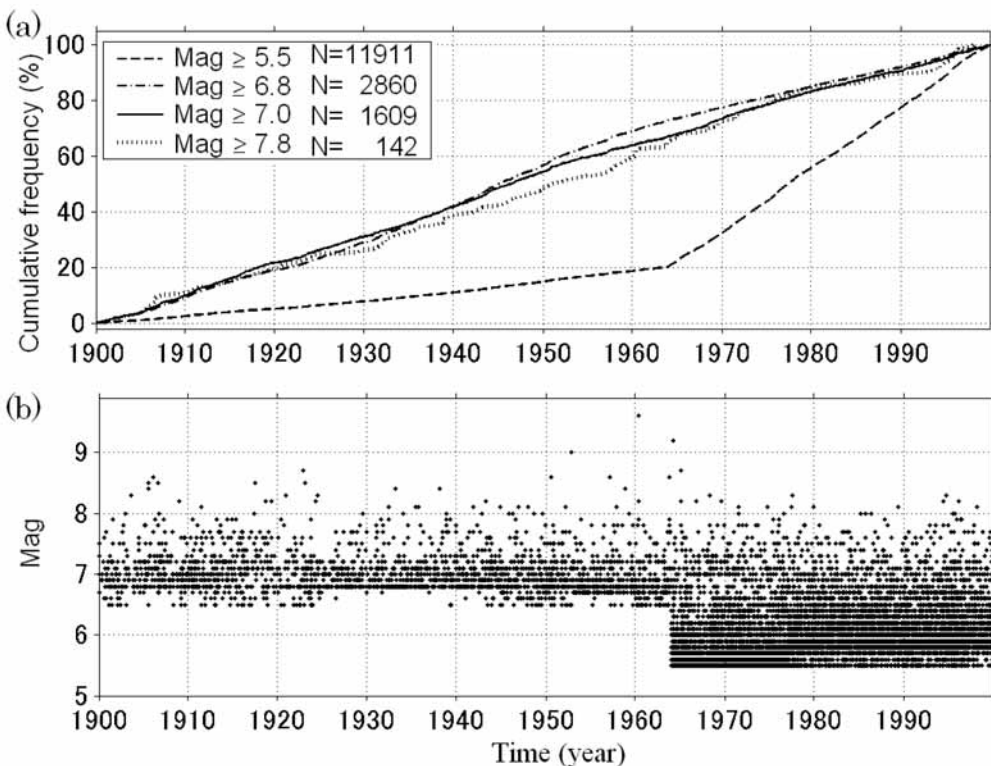


図 4 CENT.CAT の各地震の最適マグニチュード  $Mag$  について、(a) 総数で正規化した累積度数 ( $Mag \geq 5.5, 6.8, 7.0, 7.8$ ) の時間変化、(b) M-t 図

Fig.4 (a) Temporal change of the cumulative number of earthquakes normalized by the total number for each magnitude level with preferred  $Mag \geq 5.5, 6.8, 7.0$  and  $7.8$  based on CENT.CAT, respectively. (b) Mag-time plot.

は  $Mag$  の時間分布 ( $M-t$  プロット) である。図3の1年毎の地震数と図4(b)の  $Mag$  の下限の時間変化から、1964年を境とする著しい変化が明瞭である。地震発生率は1900年~1963年の平均37.5個/年に対し、1964年~1999年は平均264.3個/年と7倍に増加する。これは、図4(b)の  $M-t$  プロットから1963年までは  $Mag \geq 6.5$ 、1964年以降は  $Mag \geq 5.5$  の地震を収録していることを表している。

このCENT.CAT ( $Mag \geq 5.5$ )の地震データの時間変化は、次のような事情を示している。Engdahl and Villaseñor (2002)は1900~1963年を歴史時代 (historical period) と称し、漏れなく検出される地震の最小マグニチュード (カットオフマグニチュード) は  $M_s$  相当で6.5とした。ただし1900年~1935年は  $M_s 6.5 \sim 7.0$  の漏れがもっとも多いとしている。一方、1960年代初期から世界標準地震観測網 WWSSN (World Wide Standardized Seismograph Network) の整備が始まり、同一型の短周期と長周期地震計によるデータ蓄積が飛躍的に増えた。これにより1964年からISC (the International Seismological Centre) の報告書や NEIS (the National Earthquake Information Service of the U.S. Geological Survey) の報告から世界の地震カタログが組織的に得られるようになり、1964年以降を近代期間 (modern period) とした。さらに1976年からハーバードグループにより、ほぼマグニチュード  $\geq 5.5$  の地震のモーメントテンソル解が求められるようになった。

これらのカタログに基づくマグニチュード度数分布から、1964以降のカットオフマグニチュードを  $M_s$  相当で5.5とした。したがって百年カタログは、1930年~1963年は  $M_s \geq 6.5$ 、1964年~1999年は  $M_s \geq 5.5$ 、そして全期間を通して  $M_s \geq 7.0$  の地震について漏れが無く完全であろうとしている。「1900-1999年のマグニチュード  $\geq 7$  の

地震リスト」はこのような事情で作成された。このマグニチュード  $\geq 7$  の地震の詳細については第3章で述べる。

図3と図4に戻ると、次のような特徴が挙げられる。

(1) 図3(a)の1年毎の  $m_s c$  別度数から、1964年からの地震数の著しい増加は  $m_b$  の増加によるもので、1976年まで目だって多い。この  $m_b$  の増加は図3(b)の1年毎の  $m_d o$  別度数から、1964年からのISCのカタログ刊行による。 (2) 図3(a)の1968年~1976年までは  $m_b$  とともに  $M_s$  も比較的多く、その大多数はNEIC (NEIS/USGS) の  $M_s$  である。一方、1964年~1976年の期間、ISCカタログには  $M_s$  が組織的に掲載されていない。それを補うためにEngdahl and Villaseñor (2002)は、図3(b)のように  $m_d o$  がPAL, PAS, BRK等の単一観測点の  $Mag$  を採用したとしている。これらの  $Mag$  は図3(a)で1964年~1976年のUK (Unknown magnitude) に対応する。 (3) 1976年半ば以降、HRVのモーメントテンソル解による  $M_w$  がルーチン的に公表され、 $m_s c$  の大多数を占める。HRVに次いで図3(b)に少数のISCと僅なNEICがみられる。 (4) 図4(a)の  $Mag \geq 6.8$  の累積度数 (一点鎖線) は、1920年代の初め頃~1950年代半ば、その前後より勾配が急な時間変化を示す。これは図4(b)の  $M-t$  図で  $Mag 6.8$  の地震の密集度がこの期間目立って高いことに対応する。また  $Mag \geq 7.0$  の累積度数 (実線) は全体に1950年代の初め頃を境にそれ以降勾配が緩い。これについては第5章で触れる。

## 2.5 CENT.CATの $Mag$ 別度数分布と $m_s c$ 及び $m_d o$ の構成

前節ではCENT.CATの地震数の時間変化と  $m_s c$  別と  $m_d o$  別の構成比の特徴をみてきた。ここでは、CENT.CATの  $Mag$  毎度数を  $m_s c$  別と  $m_d o$  別の構成比から調べる。

図5(a), (b)は、CENT.CATの  $Mag 0.1$  の区切り毎の度数を、さらに  $m_s c$  と  $m_d o$  の構成で区分したヒストグラム

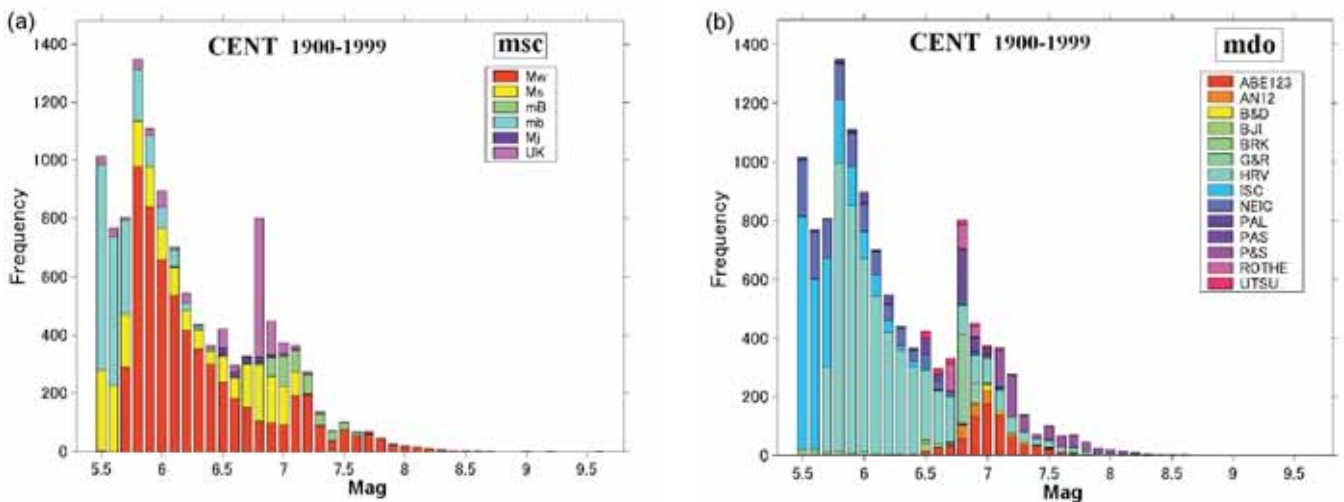


図5 CENT.CATの各地震の最適マグニチュード  $Mag$  の規模別度数を、図中の凡例のように、(a)  $m_s c$  別、(b)  $m_d o$  別の構成分布で示す。

Fig. 5 Frequency-magnitude distribution of preferred  $Mag$  in CENT.CAT, shown by (a) constituents  $m_s c$ , and (b) constituents  $m_d o$  as in the legend, respectively.



表 3 CENT.CAT の *Mag* 0.1 毎の度数を mdo 別に示す．右側に累積度数を示す．*Mag* の度数分布の mdo 別の構成比の積上げグラフ図 5 (b) を参照．

Table 3 Frequency distributions of *Mag* in each division of 0.1 are shown for individual mdo in the CENT.CAT. Cumulative frequency is shown in the right column. Frequency-*Mag* relation with mdo component ratio is shown by stacked bar graph in Fig. 5 (b) .

mdo Mag	ABE 123	AN12	B&D	BJI	BRK	G&R	HRV	ISC	NEIC	PAL	PAS	P&S	ROTHE	UTSU	N	Σ N
9.6												1			1	1
9.5															0	1
9.4															0	1
9.3															0	1
9.2												1			1	2
9.1															0	2
9.0												1			1	3
8.9															0	3
8.8															0	3
8.7												2			2	5
8.6												4			4	9
8.5												4			4	13
8.4												4			4	17
8.3			1				2					3			6	23
8.2			1				2					9			12	35
8.1	1						4					11			16	51
8.0			1				6					12			19	70
7.9	2						6					18			26	96
7.8	3						12					31			46	142
7.7	5		5				18					41			69	211
7.6	12						17					39			68	279
7.5	21		3	2	1		25	3				46		1	102	381
7.4	34		1				21					15		1	72	453
7.3	40		7		1		31	2				56		2	139	592
7.2	66		8	1		1	54					143	1	2	276	868
7.1	134	6	12	1			68	4	7		1	125	4	5	367	1235
7.0	174	45	21	5	1	1	84		12		15	7	1	8	374	1609
6.9	131	44		3		70	92	4	9		46	5	36	10	450	2059
6.8	58	46		4	3	302	100	2	13		172	5	80	16	801	2860
6.7	32	4		7		5	150	7	12		2	1	91	20	331	3191
6.6	27			12	1		179	5	30		21	1		20	296	3487
6.5	16			25	11		240	11	41		54			26	424	3911
6.4	3						300	17	36	2	9				367	4278
6.3	2				1		353	17	61		5				439	4717
6.2					3		416	41	55		31				546	5273
6.1	2				3		538	72	79	2	5				701	5964
6.0	1				14		655	93	90	6	37				896	6860
5.9					8		842	132	114	6	9				1111	7971
5.8					16		979	216	120	5	12				1348	9319
5.7					11		291	368	135		1				806	10125
5.6					22			580	157	5	5				769	10894
5.5					21			792	192	5	6				1016	11910
Total	764	145	60	60	117	379	5485	2366	1163	31	431	585	213	111	11910	

(積上げグラフ) である．縦軸の度数は対数ではなく線形尺度である．横軸の *Mag* の範囲は 5.5～9.6 で，最大の *Mag* = 9.6 は 1960 年 5 月 22 日のチリ地震 *Mw* = 9.6 である．度数分布は，*Mag* が同じでも msc と mdo の構成はそれぞれ異なり，その構成比は *Mag* の値に依存して変化する．全体的特徴として，最も度数が多い最頻値は *Mag* 5.8 で度数は 1,348 個であること，この最頻値 *Mag* 5.8 以上で度数は一旦急減するが *Mag* 6.8 に再び目立った峰（度数 802 個）が表れること，が挙げられる．

図 5 (a) の msc 別の度数分布で，*Mag* 5.8 未満の 5.5～5.7 の範囲では半数以上の 59% が *mb* であるが，最頻値 *Mag* 5.8 以上の多くは *Mw* である．これに対し，2 番目の峰の *Mag* 6.8 では 60% が UK (Unknown magnitude) である．こ

れを図 5 (b) の mdo 別の度数分布でみると，最頻値の *Mag* 5.8 から度数が急減する *Mag* 6.7 の範囲の多くは HRV であるが，2 番目の峰の *Mag* 6.8 は G&R (Gutenberg and Richter, 1954) の mdo が最も多く，mdo 別でも特異な構成である．すなわち，*Mag* 6.8 の msc と mdo の構成比は，その前後の *Mag* の構成比と際立って異なる．先の図 4 (a) でみると，この *Mag* 6.8 の度数の多さは，図 4 (a) の *Mag* ≥ 6.8 の累積度数の勾配が急な期間，図 4 (b) の *Mag* 6.8 が密集した期間の寄与が大きいと考えられる．

このように *Mag* の度数分布の mdo 別構成は，*Mag* の範囲で異なり不均質である．mdo 別構成を詳しくみるため，表 3 に mdo 別度数を *Mag* 0.1 毎に示した．上述のように *Mag* 6.8 では，mdo が G&R である地震数は 302 個

と際立って多い (*Mag* 6.8 の総数  $N=801$  個の 38%). 次いで *mdo* が PAS である *Mag*(PAS)6.8 の地震が 172 個である (*Mag* 6.8 の 21%). この *Mag*(PAS)は 5.5~7.1 の範囲にあり, PAS の欄で *Mag* 6.8 の度数が最多である. これら G&R と PAS の *mso* は UK (Unknown magnitude)であり, 先の図 5 (a)で *Mag* 6.8 の 60%を占める UK の大多数の *mso* はこの G&R と PAS である. このように *Mag* 6.8 の地震数が目立って多く, かつその *mso* と *mdo* の構成比が特異であることの原因として, マグニチュード  $\geq 7$  のカタログ作成のために, *Mag* 6.8 程度以上のデータを多種類のカタログから収集したことが考えられる.

一方, 表 3 の *Mag* 7.0 以上の *mdo* 別度数をみると, *Mag* 7.0 と 7.1 では ABE123 が最も多い (*Mag* 7.0 の 47%, *Mag* 7.1 の 37%). しかし *Mag* 7.2 では P&S が 52%を占める. *Mag  $\geq 7.2$  の全体でみても P&S が 51%を占め, 次いで HRV が 23%である (図 5 (b)参照). また, *Mag* 7.4 の総数は  $N=72$  個で, その前後 (*Mag* 7.3 の  $N=139$  個, *Mag* 7.5 の  $N=102$  個) に比べて少なく, 全体の度数分布でみても特異である (図 5 参照). この *Mag* 7.4 の少なさは, 表 3 から, 特に *mdo* が P&S (Pacheco and Sykes, 1992) の *Mag* 7.4 の度数 (15 個) がその前後の度数より異常に少ないことの影響と考えられる. その原因は現在のところ明らかではない.*

以上の *mdo* 別の *Mag* の度数の特徴とともに, 表 3 の留意すべき特徴は, CENT.CAT の累積度数 (Cumulative frequency)  $\Sigma N$  が, *Mag  $\geq 7.0$  で  $\Sigma N=1,609$  個であることである. 先のように CENT7.CAT と「1900-1999 年のマグニチュード  $\geq 7$  の地震リスト」の *Mag  $\geq 7.0$  の地震数は 1,553 個である. したがって CENT.CAT の *Mag  $\geq 7.0$  は CENT7.CAT の *Mag  $\geq 7.0$  より 56 個多い. これは次章で述べるように, マグニチュード  $\geq 7$  のリスト作成のためのやや複雑な選択の操作によっている.****

### 3. CENT7.CAT の *mso* と *mdo* の構成と CENT.CAT の *Mag $\geq 7.0$ の地震との相違*

2.4 節と 2.5 節の CENT.CAT と同様に, CENT7.CAT について, 地震数の時間分布と *Mag* 別度数分布の *mso* 別と *mdo* 別の構成比を示す (3.1 節). また CENT7.CAT の *Mag  $\geq 7$  の選択方法と CENT.CAT の *Mag  $\geq 7.0$  の地震数との相違について述べる (3.2 節).**

#### 3.1 CENT7.CAT の *Mag $\geq 7$ の地震の時間分布と度数分布の *mso* 別と *mdo* 別構成*

CENT7.CAT 全体の *Mag* の *mso* 別と *mdo* 別の構成分布は, 先に表 2 と図 2 (b), (d) に示した. それらの 1 年毎の地震数と *mso* 別および *mdo* 別の構成が図 6 (a), (b) である. 平均は 15.5 個/年, 標準偏差は 4.6 個, 最小度数は 1989 年の 6 個, 最大度数は 1943 年の 32 個である.

図 6 (a) の *mso* 別の 1 年毎地震数の時間変化では, *Mw* が全期間を通して 59.4%を占める (図 2 (b) 参照). 1976 年以降はほとんど *Mw* で, その *mdo* は図 6 (b) のように HRV である. 一方, 1975 年以前は, *Mw* とともに同程度の度数の *Ms* と *mB* で構成されている. 1975 年以前の *Mw* の大多数は図 6 (b) のように *mdo* が P&S, すなわち *Mw*(P&S)である. 1975 年以前の *Ms* と *mB* の *mdo* は ABE123 である. 1900 年~1917 年の *mdo* には AN12 と B&D, 1900 年~1925 年の *mdo* には UTSU がみられる.

図 7 (a), (b) は CENT7.CAT の *Mag* 0.1 毎の度数分布の *mso* 別と *mdo* 別の構成を示している. 縦軸の度数は線形尺度である. 全体の特徴は, 度数の最頻値は *Mag* 7.1 にあり *Mag* 7.0 の度数より多いことである. この分布形は先の CENT.CAT の度数分布図 5 (a), (b) の *Mag  $\geq 7.0$  の分布形と異なる. 実際, 表 3 から CENT.CAT の *Mag* 7.0 は 374 個, *Mag* 7.1 は 367 個であるが, CENT7.CAT の *Mag* 7.0 は 336 個, *Mag* 7.1 は 350 個であり, 両ファイルの *Mag* 7.0 と 7.1 に 55 個の違いがある. この相違については次節で*

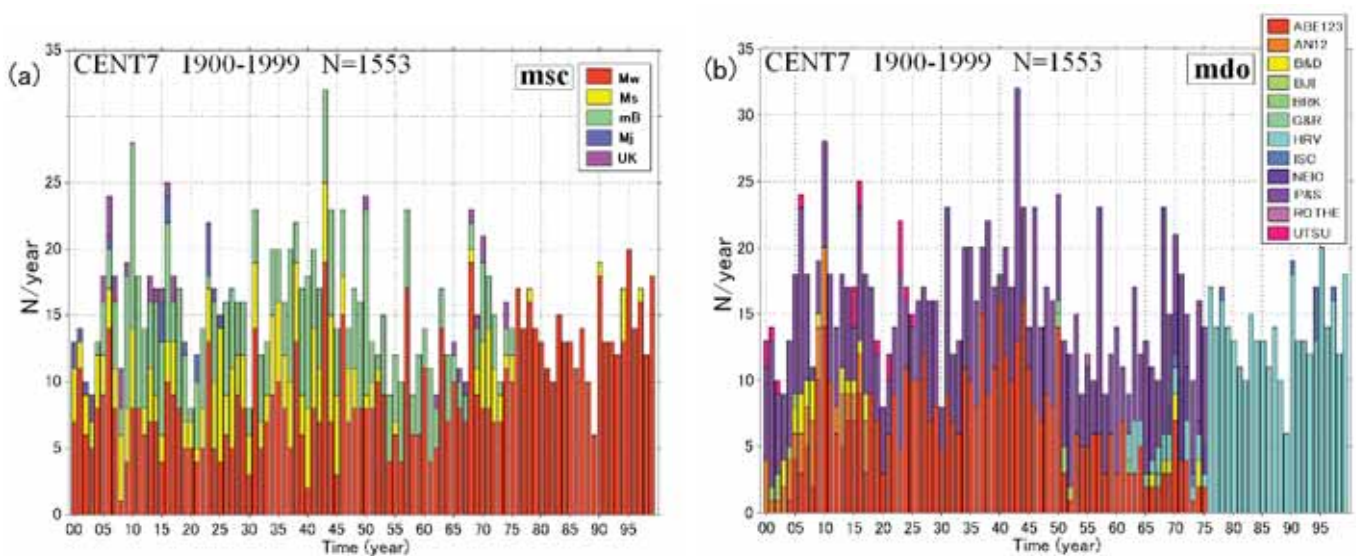


図 6 CENT7.CAT の各地震の最適マグニチュード *Mag* の 1 年毎の地震数を, 図中の凡例のように, (a) *mso* 別, (b) *mdo* 別の構成分布で示す.

Fig. 6 Temporal change of number of events per year of earthquakes with preferred *Mag*, shown by the frequency distribution of constituents (a) *mso*, and (b) *mdo* as in the legend, respectively.

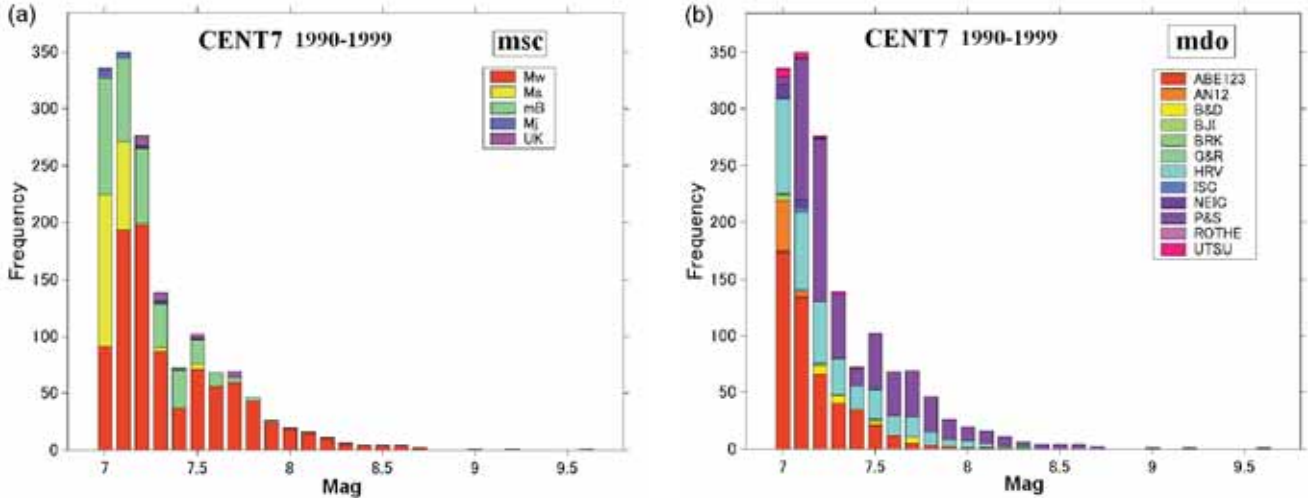


図7 CENT7.CATの各地震の最適マグニチュード *Mag* の規模別度数を、図中の凡例のように、(a) msc 別、(b) mdo 別の構成分布で示す。図5のCENT.CATの  $Mag \geq 7.0$  の度数分布と異なることに注意。  
 Fig. 7 Frequency-magnitude distribution of preferred *Mag* for CENT7.CAT, shown by the constituent ratio of (a) msc and (b) mdo, as in the legend, respectively. Note that the distribution differs in frequency and form from  $Mag \geq 7.0$  for CENT.CAT shown in Fig. 5.

扱う。また2.5節で述べたように、 $Mag 7.4$ の度数はその前後の  $Mag$  の度数より少ない。

図7(a)のmsc別の構成では、 $Mag 7.0$ と7.1はMw, Ms, mBの度数の差は小さいが、 $Mag \geq 7.2$ ではMwの比率が増し、 $Mag \geq 8.0$ では69個のうち65個がMwである。図7(b)のmdo別の構成では、 $Mag 7.0$ はABE123, AN12, HRVが多いが、 $Mag 7.1$ 以上では、ABE123, HRVに対してP&Sの割合が目立って増える。先の表3のP&Sの度数をみると、 $Mag 7.0$ の7個に対して、 $Mag 7.1$ は125個、 $Mag 7.2$ は143個と増加し、 $Mag 7.0 \sim 7.2$ のP&Sの度数分布の構成は不自然である。 $Mag \geq 7.2$ ではP&Sが51%を占め、また $Mag \geq 8.0$ の69個のうち51個がP&Sである。

### 3.2 CENT.CATとCENT7.CATの $Mag \geq 7$ の地震数の相違

2.4節で述べたように、Engdahl and Villaseñor (2002)は、多種類のmscと多数のmdoのマグニチュード *M*を含むCENT.CATから、100年間を通した地震活動を評価するための、ある *M*以上の完全なカタログ (complete catalogue) を作ることを意図した。その結果各地震の最適なマグニチュード  $Mag \geq 7.0$  の地震のデータベースCENT7.CAT (先の表1参照)と、その震源要素を取り出した「1900-1999年のマグニチュード  $\geq 7$  の地震リスト」が作成された。このマグニチュード  $\geq 7$  の地震は次のような手順で選択された。

まずEngdahl and Villaseñor (2002)は、最も広く扱われてきた表面波マグニチュード *Ms* を基準に採り、他の種類の *M* との関係調べた。その結果、 $Ms 6.5$ 程度以上の浅い地震について、*Mw*の決められている地震は  $Ms \approx Mw$  と近似する。深い地震については、情報が少なく極めて粗い仮定であるが、 $Ms \approx Mw \approx mB \approx mb$  と近似する。また浅い地震で *Mw* の決められていない地震は、上記mdoがABE1~ABE3 (Abe, 1981; Abe, 1984)及びAN1

とAN2 (Abe and Noguchi, 1983a, 1983b)の *Ms* を基準とした。ここでは、ABE1~ABE3とAN1, AN2の *Ms* をまとめて *Ms*(ABE)とする。

このようにして、Engdahl and Villaseñor (2002)は同じ地震について *Ms*(ABE)と他のmdoの *M* との差、 $M(\text{mdo}) - Ms(\text{ABE})$  のヒストグラムを作成し、その平均値を求めて基準の *Ms*(ABE)に対する偏差とした。その結果、mdoがG&R, B&D, ROTHE, およびPASの *M* について、それぞれ  $Ms(\text{ABE}) \approx M(\text{G\&R}) - 0.2$ ,  $Ms(\text{ABE}) \approx M(\text{B\&D}) - 0.2$ ,  $Ms(\text{ABE}) \approx M(\text{ROTHE}) - 0.2$  が得られた。また *M*(PAS)については、1960年以前は  $Ms(\text{ABE}) \approx M(\text{PAS}) - 0.2$ , 1960年以降は  $Ms(\text{ABE}) \approx M(\text{PAS})$  が妥当であるとした。これらのヒストグラムと結果はEngdahl and Villaseñor (2002)のFIGURE 1に示されている。この結果に基づき、*Ms*(ABE)の決められていない地震について他のmdoの *Mag* を *Ms* に調整し、その *Ms*0.1毎の平均度数分布 (1年当りの地震数) を求めた。その度数分布とGutenberg-Richterの関係式の仮定から、1900~1999年の全期間では  $Ms \geq 7.0$  でカタログは完全であるとして「1900-1999年のマグニチュード  $\geq 7$  の地震リスト」が作成された。

この操作の結果、上記の *M*(G&R), *M*(B&D), *M*(ROTHE), *M*(PAS)で  $Ms 7.0$  に達しない地震は足切りされCENT7.CATから除かれている。例えば、 $M(\text{G\&R}) = 7.1$ は  $Ms(\text{ABE}) = 6.9$ に、 $M(\text{B\&D}) = 7.0$ は  $Ms(\text{ABE}) = 6.8$ に相当するので、これらの地震はCENT7.CATに含まれない。ここで注意すべきことは、これら *M*(G&R), *M*(B&D), *M*(ROTHE), *M*(PAS)でも、 $Mag \geq 7.2$ の地震は、元の *M*の値でCENT7.CATに収録されていることである。例えば、 $M(\text{B\&D}) = 7.2$ は  $Mag = 7.0$ に調整されるのではなく  $Mag = 7.2$ としてCENT7.CATに含まれている。



このように、CENT7.CATは単にCENT.CATからMag≥7を取り出したものではなく、上のような調整と選択の結果、CENT.CATでMag≥7.0であるがCENT7.CATに含まれない地震が存在する。これが先の表3のCENT.CATのMag≥7.0の地震数とCENT7.CATの地震数の56個の

違いである。表4にこれら56個の地震のリストを示した。この中で1969年8月11日のMw8.2は、CENT.CATにほぼ同じ震源時と震源位置のMw8.2の地震が別みられるので、このMw8.2はCENT.CATに二重に収録されていると考えられる。したがってこれを除いた表4の

表4 CENT.CATのMag≥7.0のうち、CENT7.CATに含まれない56個の地震リスト。この中で1969年8月11日のMw8.2は、CENT7.CATに誤って二重に登録された地震と考えられる。したがってMag7.0と7.1の55個がCENT7.CATから省かれた地震である。

Fig. 4 List of 56 earthquakes of Mag ≥ 7.0 in the CENT.CAT which are not included in CENT7.CAT. Among these events the 1969 8 11 Mw8.2 seems to be erroneously or double registered in CENT7.CAT. Accordingly, the 55 events of Mag 7.0 and 7.1 are omitted from CENT7.CAT.

No	Year	M	d	h	min	sec	Lat.	Long.	Dep.	Mag.	msc	icat	mdo
1	1905	3	4	16	0	20.0	-4.00	149.00	60	7.1	UK	B&D	B&D
2	1905	4	26	21	43	0.0	-21.00	-70.00	60	7.0	UK	B&D	B&D
3	1905	9	26	1	26	9.0	29.00	74.00	60	7.1	UK	B&D	B&D
4	1905	12	4	12	20	25.0	38.00	37.00	60	7.0	UK	B&D	B&D
5	1906	6	19	11	22	41.0	20.00	122.00	60	7.1	UK	B&D	B&D
6	1907	7	9	19	54	50.0	14.00	123.00	60	7.0	UK	B&D	B&D
7	1908	8	20	9	53	0.0	32.00	89.00	60	7.0	UK	B&D	B&D
8	1909	2	26	16	42	0.0	5.00	-95.00	60	7.1	UK	B&D	B&D
9	1909	3	12	23	19	0.0	34.50	141.50	35	7.1	UK	UTSU	B&D
10	1910	11	14	7	34	31.0	24.50	122.00	0	7.0	UK	BJI	B&D
11	1911	2	23	11	14	12.0	27.00	128.00	5	7.1	UK	UTSU	B&D
12	1912	10	18	11	48	0.0	54.60	179.20	60	7.1	UK	B&D	B&D
13	1915	3	8	15	29	43.0	39.00	142.00	0	7.0	UK	ISS	B&D
14	1917	3	15	0	14	11.0	39.70	144.10	0	7.1	UK	ISS	B&D
15	1945	6	3	13	5	33.0	8.40	-82.70	80	7.0	UK	ISS	PAS
16	1947	1	21	20	6	42.0	-24.50	-70.30	0	7.0	UK	ISS	PAS
17	1948	1	6	17	25	58.0	17.00	-98.00	80	7.0	UK	G&R	G&R
18	1948	5	28	5	36	16.0	-13.00	-76.50	60	7.0	UK	CGS	PAS
19	1949	4	18	21	34	42.0	-15.80	-172.80	0	7.0	UK	ISS	PAS
20	1949	5	3	5	56	41.0	48.60	153.50	96	7.0	UK	ISS	PAS
21	1949	5	30	1	32	50.0	-20.80	-69.00	96	7.0	UK	ISS	PAS
22	1949	6	24	22	38	49.0	-6.20	105.70	65	7.0	UK	ISS	PAS
23	1950	1	2	15	14	35.0	-11.50	165.40	0	7.0	UK	ISS	PAS
24	1950	3	27	21	18	29.0	-5.90	102.90	0	7.0	UK	ISS	PAS
25	1950	9	22	23	53	32.0	-17.60	-177.10	413	7.0	UK	ISS	PAS
26	1951	3	24	0	17	43.0	-10.60	165.50	160	7.1	UK	ISS	PAS
27	1951	4	14	0	45	29.0	-23.30	-66.40	223	7.0	UK	ISS	PAS
28	1951	5	6	16	10	52.0	71.50	-9.00	0	7.0	UK	CGS	PAS
29	1951	6	6	16	10	48.0	71.30	-9.70	0	7.0	UK	ISS	PAS
30	1951	12	12	1	37	40.0	16.50	-96.90	160	7.0	UK	ISS	PAS
31	1952	6	22	21	41	53.0	46.70	153.70	0	7.0	UK	ISS	PAS
32	1953	6	25	10	44	56.0	-9.20	123.00	0	7.1	Ms	ISS	ROTHE
33	1956	1	31	9	17	12.6	-3.42	152.04	362	7.1	Ms	EHB	ROTHE
34	1957	4	21	21	12	28.6	6.91	-72.05	15	7.1	Ms	EHB	ROTHE
35	1959	9	15	11	5	37.2	-22.05	-179.32	586	7.1	Ms	EHB	ROTHE
36	1963	3	26	13	25	2.1	-30.05	-177.71	35	7.0	Ms	EHB	ROTHE
37	1965	9	17	16	21	21.1	36.34	141.33	43	7.1	UK	EHB	B&D
38	1965	11	13	4	33	54.4	43.84	87.75	51	7.0	UK	EHB	B&D
39	1966	3	6	2	15	58.0	31.45	80.47	41	7.0	UK	EHB	B&D
40	1966	6	7	13	59	37.8	11.30	139.64	49	7.1	UK	EHB	B&D
41	1966	8	1	21	2	57.6	30.05	68.63	7	7.0	UK	EHB	B&D
42	1966	10	19	8	1	33.6	-1.58	-15.39	20	7.0	UK	EHB	B&D
43	1967	1	20	1	57	20.0	48.07	103.06	2	7.0	UK	EHB	B&D
44	1967	3	4	17	58	4.1	39.10	24.62	8	7.1	UK	EHB	B&D
45	1967	3	19	4	1	35.9	45.63	151.20	8	7.0	UK	EHB	B&D
46	1967	8	30	4	22	4.2	31.63	100.23	7	7.0	UK	EHB	B&D
47	1967	11	23	8	35	53.7	14.45	51.98	12	7.0	UK	EHB	B&D
48	1968	6	17	11	53	1.5	41.10	143.07	36	7.0	UK	EHB	B&D
49	1968	9	16	13	55	36.3	-6.03	148.74	43	7.0	UK	EHB	B&D
50	1969	2	11	22	8	53.6	41.42	79.24	13	7.1	UK	EHB	B&D
51	1969	4	21	7	19	28.4	32.15	131.87	37	7.0	UK	EHB	B&D
52	1969	8	11	21	26	38.1	43.56	147.82	31	8.2	Mw	EHB	P&S *
53	1971	5	18	22	44	42.2	63.92	146.11	9	7.0	UK	EHB	B&D
54	1973	6	26	22	31	59.3	43.11	146.60	29	7.0	UK	EHB	B&D
55	1974	10	10	6	56	51.7	41.08	143.08	43	7.0	UK	EHB	B&D
56	1975	5	23	16	1	52.7	22.75	122.57	17	7.0	UK	EHB	B&D

\* Event #52: probably erroneously registered double in CENT.CAT with the same Mw8.2.

Mag 7.0 と 7.1 の 55 個が, 上記の操作で CENT7.CAT から漏れた Mag  $\geq 7$  の地震である. 表 4 のようにその mdo は上記の B&D, G&R, PAS および ROTHE である. またその msc は大部分が UK (Unkown magnitude) である.

これら表 4 の地震を, 表 3 の CENT.CAT の mdo 別の度数でみると, 例えば B&D では Mag  $\geq 7.2$  の総計 27 個が CENT7.CAT に含まれ, Mag 7.0 と 7.1 の 33 個は CENT7.CAT に含まれない. また, PAS の Mag (1960 年以前) は, Mag 7.0 と 7.1 の 16 個が CENT7.CAT に含まれず, また Mag  $\geq 7.2$  は 0 個なので, mdo が PAS の地震は CENT7.CAT に無い (表 2 の mdo で PAS の度数参照).

以上, 表 4 の特定の mdo の Mag 7.0 と 7.1 の 55 個 (Mag  $\geq 7.0$  の地震数の 3.4%) が選択基準の Ms 7.0 に達せず, CENT7.CAT とマグニチュード  $\geq 7$  のリストに含まれない. その結果, CENT7.CAT の度数分布は, 先の図 7 のように Mag 7.0 より Mag 7.1 の度数が多く, 図 5 の CENT.CAT の Mag  $\geq 7.0$  の度数分布に比べてやや不自然である. またこれら 55 個は, 表 4 のように時間的に 1917 年以前と 1945 年以降に分かれている. 先の図 4 (a) の CENT.CAT の Mag  $\geq 7.0$  の累積相対度数 (実線) にはこれら 55 個が含まれている. 因みにこれら 55 個を除いた Mag  $\geq 7.0$  の累積相対度数は, 上記の図 4 (a) のこれら 55 個を含む実線と見掛け上ほとんど変わらない. しかし, Mag  $\geq 7$  の地震の長期変化や地域性の詳しい解析に, これら 55 個の地震を含む場合と除く場合の評価 検討が必要と考えられる.

**4. CENT7.CAT の Mw と Pacheco and Sykes のカタログ**  
前節のようにして作られたマグニチュード  $\geq 7$  の地震リストのうち, Mag の 59% は Mw である (表 2, 図 2).

時間的には, 図 6 (b) のように 1976 年以降はほとんどが Mw (HRV) である. 1962 年~1975 年にみられる少数の Mw (HRV) は, 300km より深い深発地震である. 一方 1975 年以前の Mw は, 大多数が Pacheco and Sykes (1992) の地震モーメントカタログに基づく Mw (P&S) である. その  $M_0$  は, 波形の計算等による  $M_0$  と, Ms と  $M_0$  の経験式を用いて Ms から換算した  $M_0$  の 2 種類で構成されている. さらにその Ms は元の Ms に時間補正を施した Ms である. これらの混成  $M_0$  に基づく Mw (P&S) は, CENT7.DAT の Mag の中で, Mw 全体の 62% を占め, 百年カタログへの貢献度, 影響は大きい. そこで Pacheco and Sykes (1992) のカタログに戻り,  $M_0$  の内訳, Ms と Mw の関係を調べ, Ms の時間補正について述べることにする.

**4.1 Pacheco and Sykes のカタログの  $M_0$  について**

Pacheco and Sykes (1992) は, 既存のカタログに基づき 1900~1989 年の Ms  $\geq 7$ , 深さ < 70km の浅発地震を編集し, 「1900 - 1989 年の地震モーメントカタログ」を作成した. カタログには 698 個の地震について, 元の参照カタログの Ms (Ms original), Ms original に補正を施した Ms (Ms corrected) および地震モーメント  $M_0$  が掲載されている. 地震モーメント  $M_0$  は, 上記のように, 1) 波形データの計算等から決められた他の文献による  $M_0$  と, 2) Ms corrected から次の Ms と  $M_0$  の平均的な経験式 (Ekström and Dziewonski, 1988) を用いて換算した  $M_0$ , で構成されている. 平均的な経験式は, Ms > 6.8 について

$$\log M_0 = 1.5Ms + 9.14 \tag{3}$$

である (Ekström and Dziewonski, 1988).

この 1) と 2) の方法で求められた  $M_0$  の内訳を, 図 8 (a) に 1 年毎の数で示した. 1900 年~1989 年の総数 (Nall)

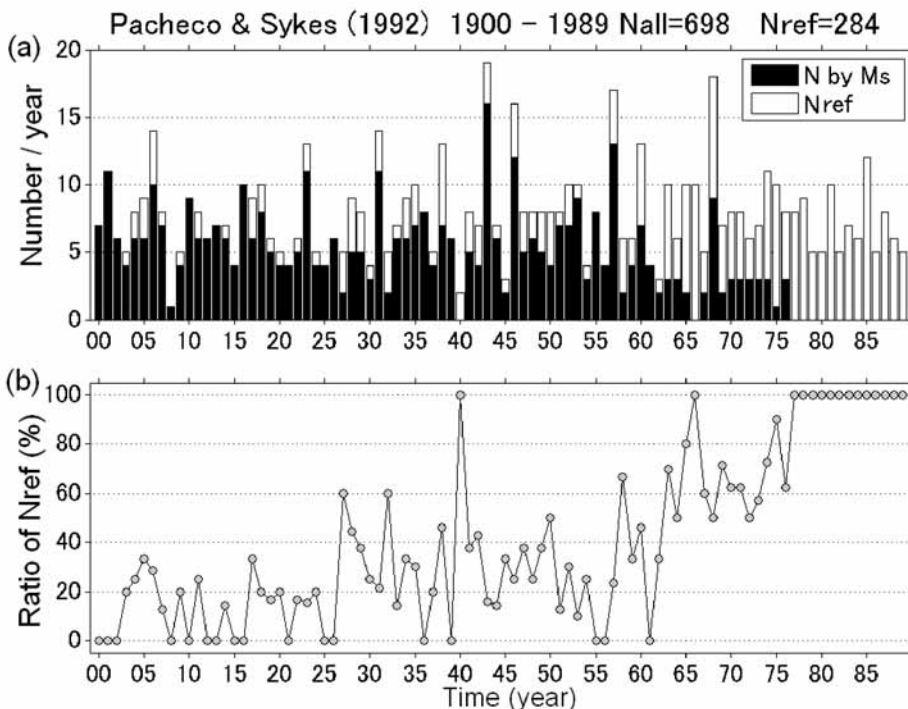


図 8 (a) Pacheco and Sykes (1992) の「1900 - 1989 年の地震モーメントカタログ」の 1 年毎の地震数. 黒塗りは Ekström and Dziewonski (1988) の経験式により Ms から  $M_0$  に換算された地震, 白枠は他の文献による  $M_0$  の地震 (Nref) を示す. (b) 他の文献による  $M_0$  の地震数 Nref の割合の時間変化.

Fig. 8 (a) Number of events per year from the seismic moment catalog of large shallow earthquakes 1900 to 1989, by Pacheco and Sykes (1992). Solid bars show the number of  $M_0$  converted from Ms through an empirical formula derived by Ekström and Dziewonski (1988), and white bars (Nref) are the number of  $M_0$  taken from other individual investigations referenced in the catalog. (b) Temporal variation of the ratio of Nref in each year.

698個のうち、1)による $M_0$ の数( $N_{ref}$ )は284個で41%、残り59%が2)の $M_{scorrected}$ から換算された $M_0$ である。1年毎の $N_{ref}$ の割合は、図8(b)のように1977年以降は、Dziewonski *et al.* (1989)によるHRVの $M_0$ とその他の文献の $M_0$ により100%である。これに対し、1950年代以前の $N_{ref}$ は0~40%代と少なく1960年代から増加する。1900~1976年に限ると、上記2)の $M_{scorrected}$ から換算された $M_0$ が68%である。

**4.2 Pacheco and Sykes のカタログの $M_s$ と補正 (1900~1980年)**

上記の補正を施す前の $M_s$  ( $M_s$  original)とは、1900年~1912年まではAbe and Noguchi (1983b), 1913年~1917年まではAbe and Noguchi (1983a), 1918年~1980年まではAbe (1981,1984)で決められた $M_s$ である。また1981年~1989年は、USGSのPDE (Preliminary Determinations of Epicenters) カタログによる $M_s$ である。Pacheco and Sykes (1992)は、Perez and Scholz (1984)と同様に、世界

的な地震の発生率は時間的に一定であり、累積度数の長期傾向も本来ほぼ一定であると仮定した。この大前提に基づき、1900年~1980年の $M_s$  original  $\geq 7.0$ の累積度数の長期傾向に表れた顕著な変化は、人為的要因による不均質性のためとして、 $M_s$  originalに対して期間毎の補正を施した。すなわち、累積度数の傾向が1900年~1980年ではほぼ一定となるように $M_s$  correctedを求めた。

このPacheco and Sykes (1992)の2種類の $M_s$  originalと $M_s$  correctedは、CENT7.DATに収録されている。 $M_s$  originalはmscが $M_s$ およびmdoがABE1~ABE3とAN1, AN2のデータセット、 $M_s$  correctedはmscが $M_s$ およびmdoがP&Sのデータセットである。そこで、 $M_s$  originalを $M_s$ (ABE)、 $M_s$  correctedを $M_s$ (P&S)として、CENT7.DATから同一地震の $M_s$ (ABE)と $M_s$ (P&S)を取り出して比較した。両者の差 $M_s$ (P&S)- $M_s$ (ABE)の時間分布とヒストグラムを図9(a),(b)に示す。図9(a)のように、実際Pacheco and Sykes (1992)は $M_s$ (ABE)に対して、

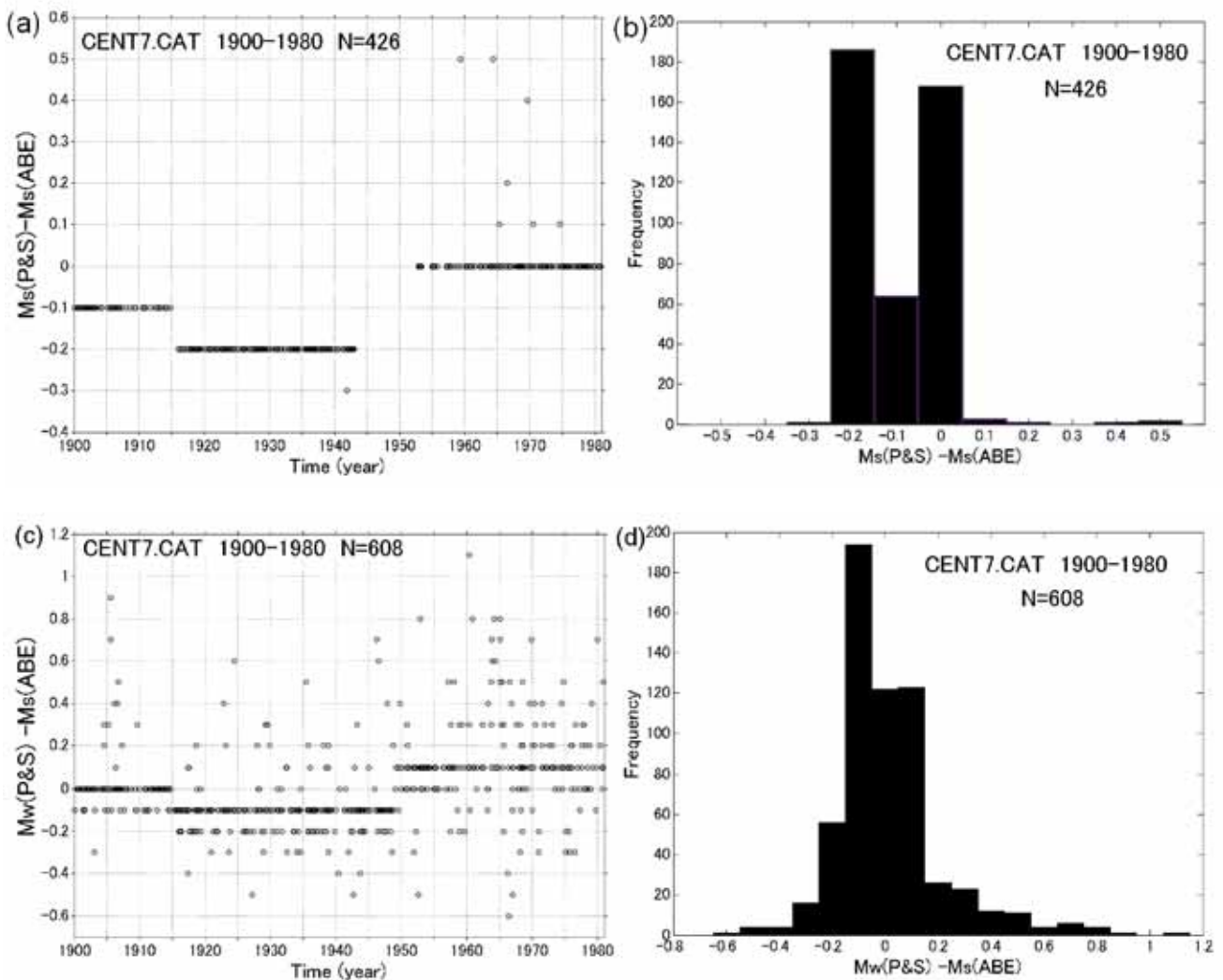


図9  $M_s$ (P&S)と $M_s$ (ABE)の差について、(a) 時間変化、(b) ヒストグラム、及び $M_w$ (P&S)と $M_s$ (ABE)の差について、(c) 時間変化、(d) ヒストグラム。詳細は本文4.2節参照。

Fig. 9 (a) Distribution of  $M_s$ (P&S)- $M_s$ (ABE) as a function of time and (b) histogram of  $M_s$ (P&S)- $M_s$ (ABE). (c) Distribution of  $M_w$ (P&S)- $M_s$ (ABE) as a function of time and (d) histogram of  $M_w$ (P&S)- $M_s$ (ABE). See section 4.2 in the text for details.



1900年～1914年は-0.1, 1915年～1948年は-0.2の補正を施して,  $M_s \text{ corrected} = M_s(\text{P\&S})$ とした. 1949年～1980年の補正は0.0である.

この  $M_s \text{ corrected}$  と(3)式から換算された上記2)の  $M_0$ , 及び上記1)の波形データ等の計算による  $M_0$ , の2種類から換算された  $M_w$  すなわち  $M_w(\text{P\&S})$  を, CENT7.DATのデータセットから取り出し,  $M_s(\text{ABE})$  と比較した結果を図9(c), (d)に示す. 図9(c)の  $M_w(\text{P\&S})-M_s(\text{ABE})$  の時間変化には, 図9(a)の  $M_s(\text{P\&S})-M_s(\text{ABE})$  の時間変化に対応して, 系統的に時間変化する地震とその上下にばらつく地震がみられる. このうち,  $M_w(\text{P\&S})-M_s(\text{ABE})$  が各期間で系統的に縦軸の0.2の範囲に集中する地震は, 上記2)の  $M_s \text{ corrected}$  と(3)式から  $M_0$  さらに  $M_w$  への換算過程で生じた端数処理のためであろう. 一方, ばらつきが大きな  $M_w(\text{P\&S})-M_s(\text{ABE})$  は, 上記1)による  $M_0$  から  $M_w$  へ変換された地震である. 図9(d)の  $M_w(\text{P\&S})-M_s(\text{ABE})$  のヒストグラムは, Engdahl and Villaseñor (2002)のFIGURE 1の  $M_w-M_s(\text{ABE})$  のヒストグラムにほぼ対応する. 彼らは  $M_w$  と  $M_s(\text{ABE})$  の一致性は大変良いとしている. しかし時間的には,  $M_w(\text{P\&S})-M_s(\text{ABE})$  は, 図9(c)のようにばらつき, かつ系統的に変化している.

なお, 図9(a)には, 426個の  $M_s(\text{P\&S})-M_s(\text{ABE})$  のうち, 期間毎の一定値から外れる地震が7個認められる. 元のカタログに遡ると, CENT7.DATの  $M_s(\text{ABE})$  と ABE (1981)のTable A-IIの  $M_s$  は, これら7個について一致するが, Pacheco and Sykes (1992)の  $M_s \text{ original}$  とは異なる. これは, Pacheco and Sykes (1992)のこれら7個の  $M_s \text{ original}$  が ABE (1981)以外の文献によるか, または誤記によるためと考えられる. また, 図9(a)で1943年～1951年にかけてデータが無いことに気づく. これについては, この期間, Pacheco and Sykes (1992)のカタログには  $M_s(\text{P\&S})=M_s \text{ corrected}$  がみられるが, CENT7.DATには  $M_s(\text{P\&S})$  がみられない(例えば, 表2の第3段の1943年の地震のデータセット). またこの期間の  $\text{icat}$  はほとんどがG&Rである. このことから, 1943年～1951年の期間  $\text{icat}$  がG&Rである地震の  $M_s(\text{P\&S})$  のデータセットは, 何らかの理由でCENT7.DATから欠落していると考えられる.

以上, Pacheco and Sykes (1992)のカタログのうち,  $M_s$  から決められた  $M_0$  (したがって  $M_w$ ) は, 1900～1976年の  $M_0$  の68%を占める. その  $M_s$  は  $M_s \text{ original} \geq 7.0$  の地震発生率が長期的に一定と仮定して補正した  $M_s \text{ corrected}$  である. その結果,  $M_w(\text{P\&S})$  と元の  $M_s(\text{ABE}) = M_s \text{ original}$  の関係は, 図9(c)のように系統的に時間変化する.  $M_w(M_0)$  と  $M_s$  の関係は, 断層運動パラメータの相似則や断層運動の違いにより, 相当広い範囲にばらつく. また,  $M_s$  決定のための周期20秒前後の表面波の励起と  $M_s$  の決定精度も様々な要因に依存する. したがって, 図9(c)の  $M_w(\text{P\&S})-M_s(\text{ABE})$  の時間変化が,  $M_s \text{ corrected}$  に基づく  $M_w(\text{P\&S})$  の妥当性を示すのか, または上記世界的な地震発生率が長期的に一定の仮定が成り立たない場合の  $M_s \text{ original}$  に対する  $M_w(\text{P\&S})$  の変化を

表すのか, これらのデータから一義的に判断することは難しく, さらに検討が必要である.

## 5. 議論：地震活動の定常性と長期変化について

前節のように, Pacheco and Sykes (1992)は, Pérez and Scholz (1984)に基づき, 世界的地震の活動度は長期的に一定と仮定して, 元のカタログの  $M_s$  を時間補正して  $M_0$  に換算した. Pérez and Scholz (1984)に戻ると, 世界の大地震の発生率は彼らの解析期間80年間で一定であり, また1960年代初期の世界標準地震観測網WWSSNによる観測開始以降のある  $M$  以上の地震発生率が80年間で代表すると仮定した. これにより, Abe (1981)のカタログの  $M_s \geq 7$  の累積度数の顕著な増加期間は  $M_s$  の過大評価のためとして補正を施し, 結果的に累積度数の傾きが長期的にほぼ一定となる地震発生率が得られた.

これに対し Ogata and Abe (1991)は, Abe カタログ (Abe, 1981, 1984; Abe and Noguchi, 1983a, 1983b)の1897年～1980年の世界の  $M_s \geq 7$ , 深さ  $\leq 70\text{km}$  の地震, および宇津カタログ (宇津, 1982)の1885年～1980年の日本と周辺の  $M_j \geq 6$ , 深さ  $\leq 60\text{km}$  の地震について, 時系列解析から長期的変動の特徴を見出した. Abe カタログを低緯度と高緯度地域に分けた累積度数は, 低緯度と高緯度で時間変化パターンが異なり, かつ全体のパターンとも異なる. また高緯度地域の累積度数と宇津カタログによる日本周辺の  $M_j \geq 6$  の累積度数は, まったく別個のカタログであるにもかかわらず, 長期的変化は互いに似たパターンとなる. これらのことは, それぞれの地域に固有な長期的地震活動であり, 両カタログの人為的要因によるものでないことを示している. 従来の研究からも, 世界的地震活動の周期的な活発化と静穏化, 巨大地震の集中性, マグニチュード度数分布の低緯度と高緯度地域の相違が明らかにされている (Mogi, 1974, 1979; Kanamori, 1977).

Ogata and Abe (1991)はさらに, Abe カタログと宇津カタログの時系列のノンパラメトリックな統計解析から, 両カタログとも長期間の時間スケールで自己相似性を持ち, 累積度数の傾きの変化は地震活動の長記依存性で説明されること, 日本付近の地震発生率の変化が世界の地震発生率の変化に数年程度先行することを示した. このような地震活動の時間的フラクタル性, 長記依存性の抽出は, 広域 長期的地震活動の評価, 予測に重要な手がかりとなる. またこのような特徴は, プレート運動による非平衡開放系として, 地球表層の散逸構造の形成過程 (Anderson, 2002) を反映しているのではないだろうか.

したがって, Pérez and Scholz (1984)と Pacheco and Sykes (1992)の, 世界的地震活動度の長期的一定性の仮定とそれに基づくマグニチュードの補正はむしろ人為的, 本末転倒の可能性も考えられる. 例えば, 図4(a)の  $Mag \geq 7.0$  の100年間の累積度数(実線)は, 前節の時間補正を施した  $Mag$  を含むにも拘らず, 全体に1950年頃を境に後半50年間に相対的活動低下がみられる. 時間補正の無い  $M_s(\text{ABE})$  に基づく  $Mag \geq 7.0$  の累積度数では, こ

の後半の活動低下はさらに顕著に表れる。世界各地の地震活動の重なりによるこのような長期変動については、上記のような地域的活動と地球全体の変動の機構解明の観点からさらに詳しく検討すべき問題である。

Engdahl and Villaseñor (2002)は、諸文献 カタログに基づく *Mag* の一括した選択方式は極めて単純化されたものであること、カタログによるマグニチュードの違いの原因の詳しい解析は彼らの調査報告の範疇を超えるものであるとしている。巨大地震の発生間隔からみて100年のデータ蓄積期間は短い、以上のような百年カタログの特徴、留意点に基づいて、より正確なマグニチュードへの改訂を継続する必要がある。これにより、地震活動の長期変動の基本的特徴、ゆらぎの程度、周期性、地域的相関、連動性等がより精度良く推定、解釈されると考えられる。

## 6. まとめ

既存のカタログを編集、統合した Engdahl and Villaseñor (2002)の1900~1999年の百年カタログは、貴重なデータベースから成り重要であるが、カタログの内容と特徴については従来あまり知られていない。本論文で明らかになったカタログの特徴、留意点等は以下のようまとめられる。

(1) CENT.CAT と CENT7.CAT の全体的特徴：1900~1999年の器械観測による諸カタログを編集、統合した Engdahl and Villaseñor (2002)の百年カタログのデータベース CENT.CAT ( $Mag \geq 5.5$ の全地震)および CENT7.CAT ( $Mag \geq 7$ )に戻り、各地震の最適マグニチュード (preferred magnitude) *Mag*, その種類 (msc), 出典 (mdo) および震源決定等の情報 (icat) の詳細を調べた。各地震の *Mag* は6種類の msc から階層的な順位で選択されている。*Mag* の種類 msc は、モーメントマグニチュード *Mw* がもっとも多く、CENT.CAT の51%、CENT7.CAT の59%を占める。*Mag* の出典 mdo は、CENT.CAT はハーバード CMT カタログ HRV が46%、CENT7.CAT は Pacheco and Sykes (1992) のカタログ P&S が37%である (表2, 図2)。

(2) CENT.CAT と CENT7.CAT の地震数の時間変化と msc と mdo の構成：CENT.CAT の地震数は11,911個である。1900年~1963年は  $Mag \geq 6.5$ , 1964年~1999年は  $Mag \geq 5.5$  の地震が収録され、1年毎の地震数の平均は、1964年以後は1963年以前の7倍である (図3, 図4)。msc と mdo の構成比の時間変化から、1964年~1975年の増加はISC と NEIC のカタログ刊行による短周期実体波マグニチュード *mb* と表面波マグニチュード *Ms* の地震である。1976年以降の大多数はHRVによる *Mw* である。一方、 $Mag \geq 7$  を収録したデータベース CENT7.CAT (および本文中の  $Mag \geq 7$  の地震リスト)の地震数は1,553個 (平均15.5個/年) で (図6), *Mw* が全期間で59%を占め、そのうち1976年以降は *Mw* (HRV), 1975年以前の大多数は Pacheco and Sykes (1992) のカタログによる *Mw* (P&S) である。

(3) CENT.CAT と CENT7.CAT の *Mag* 毎の度数分布と msc と mdo の構成：CENT.CAT ( $Mag \geq 5.5$ ) の *Mag* 毎の度数分布の最頻値は *Mag* 5.8 で、 $Mag \geq 5.8$  の多くは *Mw* (HRV) である (図5)。度数分布にはもうひとつの目立った峰が *Mag* 6.8 に表れる。その msc と mdo の構成は他の *Mag* の構成と際立って異なり、60%が UK (Unknown magnitude), mdo の38%が G&R (Gutenberg and Richter, 1954), 21%が PAS (CIT, Pasadena) の出典である (表3)。 $Mag \geq 7.2$  では P&S の *Mag* が51%、HRV の *Mag* が23%を占める。一方、CENT7.CAT ( $Mag \geq 7.0$ ) の最頻値は *Mag* 7.1 にあり *Mag* 7.0 よりも度数が多い (図7)。mdo 別の構成では  $Mag \geq 7.2$  で P&S の割合が増し、 $Mag \geq 7.2$  の51%を占める。また *Mag* 7.4 の度数はその前後の *Mag* の度数に比べて目立って少なく、P&S の *Mag* 7.4 の度数が少ないことが大きな要因である (表3)。

(4) CENT.CAT の  $Mag \geq 7.0$  の地震数と CENT7.CAT の地震数の相違：CENT.CAT の  $Mag \geq 7.0$  の地震数は1,609個であるが、CENT7.CAT の地震数は1,553個である。この相違は、CENT7.CAT 作成のため、*Ms* を基準にして特定の mdo の *Mag* との偏差を求め *Ms* に調整した結果、*Ms* 7.0 に満たない特定の mdo の  $Mag \geq 7.0$  の地震が除かれたためと考えられる。それらは、msc の多くが UK の *Mag* 7.0 と 7.1 の地震55個である (表4)。これを除いた1,553個が、Engdahl and Villaseñor (2002)の本文に掲載されている1900-1999年のマグニチュード  $\geq 7$  の地震リストである。

(5) Pacheco and Sykes (1992) のカタログと地震活動の長期的定常性、時間的フラクタル性：CENT7.CAT の *Mag* の59%を占める *Mw* のうち、その62%は Pacheco and Sykes (1992) の地震モーメントカタログに基づく *Mw* で、1975年以前の *Mw* の大多数を占める。この1975年以前の地震モーメント  $M_0$  の68%は、表面波マグニチュード *Ms* と  $M_0$  の平均的経験式から換算された  $M_0$  である。さらにその *Ms* は、世界的な地震活動は長期的に一定であるとの仮定の下に、期間毎に補正を施した *Ms* である。しかし、Ogata and Abe (1991) が複数のカタログの解析から見出した地震活動の長時間スケールでの自己相似性と長期依存性から、Pacheco and Sykes (1992) の時間補正を施した *Ms* から換算した  $M_0$  と、それに基づく百年カタログの *Mw* (P&S) が妥当な値であるかは、議論の余地がある。その後公表された調査結果 文献等を参照して、より信頼度の高い *Mag* のカタログに更新していくことが重要である。

## 謝辞

本研究は、プロジェクト研究「地震観測データを利用した地殻活動の評価及び予測に関する研究」(研究代表者:堀 貞喜), および科学技術振興調整費による研究「スマトラ型巨大地震 津波被害の軽減策 巨大地震発生前後の地震活動の解析と応力状態の評価」(研究代表者:井元政二郎)によっている。東京大学名誉教授の阿部勝征先生には著者が1900年代初期の地震カタログに関わる

機会を与えていただきご指導いただいた。統計数理研究所の尾形良彦先生には有益なご教示をいただいた。閲読者の的確なコメントは原稿改善に有益であった。編集委員会と事務局の方々にも多々ご支援いただいた。ここに記して感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) Abe, K. (1981): Magnitudes of large shallow earthquakes from 1904 to 1980. *Phys. Earth Planet. Inter.*, **27**, 72-92.
- 2) Abe, K. (1984): Complements to “Magnitudes of large shallow earthquakes from 1904 to 1980”. *Phys. Earth Planet. Inter.*, **34**, 17-23.
- 3) Abe, K. and Noguchi, S. (1983a): Determination of magnitude for large shallow earthquakes 1898-1917. *Phys. Earth Planet. Inter.*, **32**, 45-59.
- 4) Abe, K. and Noguchi, S. (1983b): Revision of magnitudes of large shallow earthquakes, 1898-1912. *Phys. Earth Planet. Inter.*, **33**, 1-11.
- 5) Aki, K. (1966): Generation and Propagation of G Waves from the Niigata Earthquake of June 16, 1964. Part 2. Estimation of earthquake moment, released energy, and stress-strain drop from the G wave spectrum. *Bull. Earthq. Res. Inst., Tokyo Univ.*, **44**, 73-88.
- 6) Anderson, D. L. (2002): Plate Tectonics as a Far-From-Equilibrium Self-Organized System. in *Plate Boundary Zones*, edited by S. Stein and J. Freymuller, *Geodynamic Ser.*, **30**, 411-425. American Geophysical Union.
- 7) Bird, P. (2003): An updated digital model of plate boundaries. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, **4** (3), 1027, 1-52. American Geophysical Union.
- 8) CMT project. (2006): Global CMT Web Page (<http://www.globalcmt.org/>, September, 2008)
- 9) Dziewonski, A. M., Chou, T. A. and Woodhouse, J. H. (1981): Determination of earthquake source parameters from waveform data for studies of global and regional seismicity. *J. Geophys. Res.*, **86**, 2825-2852.
- 10) Ekström, G. and Dziewonski, A. M. (1988): Evidence of bias in estimations of earthquake size. *Nature*, **332**, 319-323.
- 11) Engdahl, E. R. and Villaseñor, A. (2002): Global Seismicity: 1900-1999. in *International Handbook of Earthquake & Engineering Seismology, Part A*. edited by W. H. K. Lee, H. Kanamori, P. C. Jennings, and C. Kisslinger, 665-690, Academic Press.
- 12) Engdahl, E. R., van der Hilst, R. and Buland, R. (1998): Global teleseismic earthquake relocation with improved travel times and procedures for depth determination. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **88**, 722-743.
- 13) Gutenberg, B. and Richter, C. F. (1954): *Seismicity of the Earth and Associated Phenomena*. 2nd Ed., 310 pp., Princeton University Press, Princeton, NJ.
- 14) Hanks, T. C. and Kanamori, H. (1979): A Moment Magnitude Scale. *J. Geophys. Res.*, **84**, 2348-2350.
- 15) Kanamori, H. (1977): The Energy Release in Great Earthquakes. *J. Geophys. Res.*, **82**, 2981-2987.
- 16) Kanamori, H. (1983): Magnitude scale and quantification of earthquakes. *Tectonophys.*, **93**, 185-199.
- 17) Kanamori, H. and Anderson, D. L. (1975): Theoretical basis of some empirical relations in seismology. *Bull. Seism. Soc. Am.*, **65**, 1073-1095.
- 18) Kennett, B. L. N., Engdahl, E. R. and Buland, R. (1995): Constraints on seismic velocities in the Earth from traveltimes. *Geophys. J. Int.*, **122**, 108-124.
- 19) Lee, W. H. K., Kanamori, H., Jennings, P. C. and Kisslinger, C. (2002): *International Handbook of Earthquake & Engineering Seismology, Part A*, 1-933. in the *International Geophysics Series 81A*, edited by Dmowsda, R., Holton, J. R., and Rossby, H. T., Academic Press.
- 20) Mogi, K. (1974): Active periods in the world's chief seismic belts. *Tectonophysics*, **22**, 265-282.
- 21) Mogi, K. (1979): Global variation of seismic activity. *Tectonophysics*, **57**, T43-T50.
- 22) Ogata, Y. and Abe, K. (1991): Some Statistical Features of the Long-Term Variations of the Global and Regional Seismic Activity. *International Statistical Review*, **59**, 139-161.
- 23) Pacheco, J. F. and Sykes, L. R. (1992): Seismic moment catalog of large shallow earthquakes, 1900 to 1989. *Bull. Seism. Soc. Am.*, **82**, 1306-1349.
- 24) Pérez, O. J. and Scholz, C. H. (1984): Heterogeneities of the instrumental seismicity catalog (1904-1980) for strong shallow earthquakes. *Bull. Seism. Soc. Am.*, **74**, 669-686.
- 25) U.S. Geological Survey (2008): *PAGER-CAT Earthquake Catalog, 2008*. (<http://earthquake.usgs.gov/research/data/pager/>, September, 2008)

(原稿受理：2008年10月9日)



## 要 旨

器械観測による世界の地震カタログを統合した Engdahl と Villaseñor (2002) の 1900~1999 年の百年カタログは、地震学の様々な分野の基礎データとして重要であるが、その詳細は必ずしも知られていない。本論文では、百年カタログの全地震のデータベース CENT.CAT とマグニチュード 7 以上のデータベース CENT7.CAT に基づき、まず既存の諸カタログから選択された各地震の最適マグニチュード  $Mag$  について、その種類 (msc) 別と出典 (mdo) 別の構成要素を調べた。次に CENT7.CAT に基づく  $Mag \geq 7$  の地震カタログの 59.4% を占めるモーメントマグニチュード  $M_w$  の内容を調べた。これにより、百年カタログの特徴が明らかになり、以下のような留意点が挙げられる。第一に、地震数の時間変化の msc 別と mdo 別の構成比は、1964 年以前の歴史時代は、相対的に多数の msc と mdo の構成要素から成り  $Mag$  は特に不均質である。 $Mag$  の度数分布の msc 別と mdo 別の構成比は、 $Mag$  に依存して著しく変化する。特に  $Mag$  6.8 は度数が多く、かつ他の  $Mag$  に比べて特異な構成である。また CENT.CAT の  $Mag \geq 7$  と CENT7.CAT の  $Mag \geq 7$  の地震の数は異なり  $Mag$  毎の度数分布にも違いがみられる。これは CENT.CAT から  $Mag \geq 7$  のカタログを作成する過程で、特定の mdo の  $Mag \geq 7.0$  の地震 55 個が除外され CENT7.CAT と  $Mag \geq 7$  の地震カタログに含まれないためである。第二に、 $Mag \geq 7$  のカタログの  $M_w$  について、1976 年以前は Pacheco and Sykes (1992) の地震モーメントカタログに基づく  $M_w$  であるが、その多くは、 $Mag \geq 7$  程度の地震発生率は長期的に一定であるとの仮定の下に、表面波マグニチュード  $M_s$  に時間的な補正を施して換算した  $M_w$  である。この  $M_w$  は、Ogata and Abe (1991) が明らかにした地震活動の時間的フラクタル性と長期依存性を考慮すると、相当の不確かさと誤差を持つ可能性がある。本調査による 1900~1999 年の百年カタログのこのような特徴 留意点は、カタログを正確 有効に使用する上で重要である。

キーワード：百年地震カタログ，カタログの不均質性，モーメントマグニチュード，地震発生率，長期相関