やや深発地震および深発地震の発生地域、頻度、被害歴

REVIEW OF HISTORICAL DAMAGES DUE TO INTERMEDIATE AND DEEP FOCUS EARTHQUAKES

武村雅之 ——— *1
加藤研一 ——— *2
八代和彦 ——— *3

Masayuki TAKEMURA
Kenichi KATO
Kazuhiko YASHIRO

*1

*2

*3

Historical damages due to intermediate and deep focus earthquakes are reviewed on the basis of earthquake catalogs in past 100 years. These earthquakes occurred at North-Eastern and South-Western parts of the Japan islands at a rate of 4 to 5 times per year. The earthquake catalogs indicate that only the intermediate depth earthquakes, with magnitude exceeding 7.5 and focal depth shallower than 150 km, caused destructive damages. However, the damage rank is lower than the typical interplate earthquakes along the Japan trench such as the 1968 Tokachi-oki earthquake ($M=7.9$).

キーワード：

やや深発地震、深発地震、被害歴、地震カタログ

Keywords：

Intermediate-depth earthquake, Deep focus earthquake, Damage history, Earthquake catalog

1. はじめに

地震は震源の深さによって浅発地震、やや深発地震、深発地震に分けられ、その境目は70kmと300kmにとることが多い¹⁾。このうち、過去に物的・人的被害を及ぼした地震の多くはプレート境界や内陸直下の浅い地震であり、震源が深い地震は被害想定の対象に含まれることは少なかった。しかし、1993年1月15日に発生した釧路沖地震（気象庁マグニチュード $M=7.8$ ）は、震源が107kmと深いにもかかわらず釧路市を中心に被害をもたらした²⁾、地震工学者や地震防災関係者に衝撃を与えた。

釧路沖地震に代表される震源が深い地震は、どのようなメカニズムで発生し、どの地域にどの程度の頻度で起こるのであろうか。また、被害の面から過去にどのような影響を日本各地に与えてきたのであろうか。本報は過去100年間に発生した深さ70km以上の地震を宇津³⁾の資料および地震月報に基づいて網羅的に調査し、これらの課題を系統的にまとめることを目的とする。

2. 発生メカニズム

2-1 やや深発・深発地震の発見の歴史

和達⁴⁾は深さ300km以上にもおよぶ地震が存在することを1920

年代後半に発見し、深層地震と命名した。当時モホ面の存在は既に知られており、通常、地震の深さは30~40kmでモホ面より浅い位置で発生していると考えられていた。これに対し、和達は深い地震の存在を指摘し、その判別法として①初期微動継続時間の観測値が長いこと、②等発震時線または等P-S線を引く時、震源が深ければ深いほど等曲線群の間隔が広がること、③深発地震は地震記象に特有の型を示すこと、④人体感覚の各地分布の異常、地震計観測の可能範囲が広範に及ぶことを挙げている。

和達はその後、更に中間的深さの地震としてやや深層地震の存在を指摘している⁵⁾。上記①から④は深層地震について指摘されたことであるが、②③④は程度の差こそあれやや深層地震においても指摘できるとし、①のように走時が特定できる場合には、その確定は容易であると述べられている⁵⁾。

2-2 発震機構

和達^{4), 5)}以来やや深発・深発地震は世界中で発見され、浅い地震に混じって地震リストにも記載されるようになる（例えばRichter⁶⁾）。1960年代から1970年代にかけては、プレートテクトニクス理論との関連で、島弧の地殻構造と深い地震の震度分布や発震機構が主に環太平洋の各地で調べられた⁷⁾。これらの調査によって潜り込む海洋プレートの形が明らかになり、そこで発生する地震の

*1 鹿島小堀研究室 主管研究員・理博

*2 鹿島小堀研究室 主任研究員・工博

*3 東京電力

*1 Kabori Research Complex, Kajima Corporation, Dr. Sc.

*2 Kabori Research Complex, Kajima Corporation, Dr. Eng.

*3 Tokyo Electric Power Company

メカニズムも多く研究者によって明らかにされてきた。

1970年代後半には、やや深発地震を語る上で最も重要な現象である二重深発地震面の発見があった。もぐり込むスラブに沿ってやや深発地震が二重に分布することを最初に明確に示したのは、東北大学の微小地震観測網による結果である^{8), 9)}。その後この二重面の存在は北海道から関東地方まで広い範囲で潜り込む太平洋プレートに沿って確認されるとともに、その様子に地域性があることも知られるようになった。また同時に、東北日本で発生したやや深発地震の震源メカニズムも調査され、二重深発地震面の上面では地震を発生させる応力場の圧縮軸(P軸)がプレートのもぐり込み方向を向く、いわゆる Down Dip Compression 型(以下 DC 型と呼ぶ)のメカニズム、下面では張力軸(T軸)がプレートのもぐり込み方向を向く Down Dip Extension 型(以下 DE 型と呼ぶ)メカニズムが卓越することが示された。これらのメカニズムを模式的に図1に示す。

何故、このような震源メカニズムが卓越するかについては、二重面を形成する原因とともに幾つかの仮説が1970年代から1980年代にかけて提唱されてきた。主なものだけでも、プレート内部の物質の相変化¹⁰⁾、プレートのアンベンディング¹¹⁾、サギング(たわみ)モデル¹²⁾、プレート内部の熱応力¹³⁾等様々である。近年の研究によれば、南米のように二重面がない場合¹⁴⁾や、断層の走行がプレートのもぐり込み方向を向く場合(Hinge Fault)¹⁵⁾や、局所的に全く異なるタイプ、例えば正断層型等の地震が存在する¹⁶⁾等、当初思われていたよりもやや深発地震の発生様式は複雑であることが分かってきた。このため、いずれの仮説も全ての現象を説明するには到っていない。潜り込むスラブの形状を精度よく推定することや、スラブ内部の速度構造や温度構造の正確な推定が、問題解決の重要な鍵になると考えられている⁷⁾。

3. 発生地域と頻度

3-1 データ

前項は深い地震の発見の歴史、最近の研究成果に基づく発生メカニズム等について説明した。このような性質をもつやや深発・深発地震が、被害の面から過去にどのような影響を与えてきたかについて調査する。

歴史地震では震源の深さを特定することが非常に難しいため、本報では1885年から1993年釧路沖地震までのデータを対象とした。1925年以前は宇津³⁾の資料、1926年以後は地震月報を用い、 $M = 6$ 以上、深さ70km以上の地震を選び出しデータセットとした。宇津の資料では大正以前のデータに深さが数字で記載されていないものがあり、表1に示す記号 vs, s, d による分類がなされている。d の記載のあるものはデータセットとしたが vs および s はデータから除外した。ただし、s のうち震源が深い地震の可能性が強く、さらに被害がかなり出たものについては、4-4 項で別途取り上げる。

3-2 やや深発・深発地震の発生地域と頻度

対象とした地震の震央分布を図2に示す。深さ70km以上の地震の発生域は北海道から東北地方さらに関東地方から小笠原諸島に沿う地域と、九州から琉球列島におよぶ西南日本が中心である。この

表1 宇津による震源深さの分類記号³⁾

記号	意味
vs	陸側のプレート内地震で、日本列島の内陸部から縁海側にかけての地殻中に起こったものが多く、近年のデータから類推すれば、ほとんどが深さ0-15km程度である。
s	プレート境界またはその近くの地震で内陸部ではほとんど深さ数十kmのマントル内地震であろうが、海溝寄りではより浅いものが多いと思われる。
d	100kmを越える深い地震であるが、数値で示すほど深さが良く決まらないことを示す

図1 北海道・東北地方におけるやや深発地震の発生機構

図2 $M \geq 6$ 、深さ $D \geq 70$ km の地震の震央分布

うち、北海道から関東地方にかけては、2-2で述べたようにやや深発地震が二重に分布することが明らかにされている^{8), 9)}。また、関東地方では二重深発地震面の他に、フィリピン海プレートと太平洋プレートの相互作用により発生するやや深発地震がある¹⁷⁾。九州-琉球列島はフィリピン海プレートのもぐり込みによりやや深発地震が発生している地域であるが、二重深発地震面の存在は現時点では否定されている¹⁸⁾。また、九州ではDE型¹⁸⁾、トカラ海峡より南ではDC型¹⁹⁾の震源メカニズムが卓越するなど、地域性が見られる。

深さ70km以上の地震の深さ別頻度分布を図3に示す。深さ方向に一樣に地震が発生するわけではなく、深さ200kmから300km付近に頻度が最小となる領域があり、それを過ぎると地震数は再び増加し、400km付近で極大に達する。また最大深さは約600kmである。次に発生頻度であるが、全期間の地震の総数は434個で、全期間を通じた平均個数は約4個/年、データの精度が高い1926年以後に限ると約5個/年となっている。

4. 被害歴

4-1 被害ランク

被害ランクは宇津³⁾の分類に従い、A, B, Cと設定した。ランクAは宇津のランク1, 2に相当する軽微な被害を、ランクBは宇津のランク3に相当する死者19名以下全壊家屋999棟以下の被害を示す。ただし、宇津の資料は1980年までの地震を対象としているため、1981年以後は地震月報記載の被害の程度、および最大震度を表2のように宇津の分類に対応させて用いた。最大震度Vを宇津のランク1, 2に対応させたのは、最大震度IVを被害ランクに入れると被害地震の数が1981年以後だけ急増するためである。また、震度VIをランク3に対応させているのは、釧路沖地震の死者数や被害状況を参考としたもので、他のケースに一般的に当てはまるものではない。宇津の被害ランクはランク7までであるが、今回のデータの中にはランク4以上の地震はなかった。ちなみに震源が浅い被害地震の例では1938年の塩屋崎沖地震はランク3、1968年十勝沖地震と1964年新潟地震はランク4である。

4-2 地震被害が発生する条件

以上のデータを用いて、震源が深い地震が被害地震になる条件を検討する。マグニチュードと深さの関係に被害の有無およびラン

図3 日本付近における $M \geq 6$ 、
深さ $D \geq 70$ km の地震の発生頻度

図4 震源深さ、地震規模と被害ランクの関係

表2 被害ランクの定義

宇津の被害ランク ³⁾ (1885 - 1980) ランク 被害状況	地震月報 (1981-1984)	地震月報 (1985-1993)	本研究の 被害ランク
1 : Slight damage	Slight damage	最大震度 = V	A
2 : Light damage			
3 : 2-19 persons killed or 2-999 houses completely destroyed	この期間に該当する地震がない	最大震度 = VI	B
4 : 20-199 person killed	この期間に該当する地震がない		C

クを示した結果を図4に示す。地震の数が極大値を示す深さ 400km 付近にランクAの軽微な被害を出した地震がいくつかあるが、他の被害地震の全ては 150km 以内の深さで発生している。唯一 $M = 6$ クラスでランクBに分類されている地震は 1980 年に発生した千葉県中部地震であり、4-3 で述べるように被害はそれほど大きいものではない。このことから、深さ 70km 以上の地震が相当の被害を起こす条件は、地震規模が $M = 7.5$ 以上で深さが 150km 以内のやや深発地震であり、1993 年釧路沖地震も含め 1885 年以後 3 回生じている。表 3 に被害地震のリストをまとめて示す。

4-3 主な地震被害

表3に示した被害地震の震央を図5に示す。図中の黒丸はBランクで比較的被害が大きかった地震の震央である。尚、地図の範囲の関係から石垣島付近の2つの地震がプロットされていないが、いずれも被害のランクはAで軽微なものである。また、千島列島のエトロフ島で 1958 年に発生した $M=8.1$ の地震は、深さが 80km と深いにもかかわらず低角逆断層型の地震である²⁰⁾。4つのBランクの地震のうち、北海道の一つは 1993 年釧路沖地震である。図から分かるようにこの付近では以前から被害を伴うやや深発地震が度々発生している。被害の詳細については各種調査報告書（例えば文献 2)）にありここでは省略するが、死者 2 人、負傷者数百人、全壊住家十棟余り、被害住家数百棟の被害である。

その他のBランクの地震を年代順に見ると、最も古い地震は 1909 年の宮崎県の地震($M=7.6$)である。この地震は、日本付近で発生した $M=8$ クラスの大地震を集めた Richter の地震リスト⁶⁾にも掲載されている。新編日本被害地震総覧²¹⁾の記述によれば、九州を中心に遠く岡山県でも全壊家屋が出たとのことである。さらに翌々年の 1911 年に発生した喜界島の地震($M=8.0$)の規模は更に大きく、Richter のリストでは $M=8.7$ となっている。総覧の震度分布を見ると、震源直上の奄美大島付近では震度 VI で 1993 年釧路沖地震と同様であるが、震度 V 以上と見られる強震の範囲は半径 250km にもおよび、釧路沖地震のそれが 150km 程度であるのと比べるとはるかに大きい。本報で抽出した地震の中では最も強い地震動を発生させたと考えられる。また、震源が深いにも関わらず津波を発生させていることから、震源のすべりは釧路沖地震のように水平運動卓越ではなく上下運動卓越であったのかもしれない。また、九州-琉球列島のやや深発地震の発生の特徴から、先の宮崎県の地震は DE 型、この地震は DC 型の震源メカニズムであった可能性が考えられる。

残る 1 つは関東で 1980 年に発生した地震である。この地震はショック死で 2 人の死者を出したために宇津³⁾がランク 3 に分類しているが、被害の規模は他の 3 地震に比べて非常に小さい。この地震はメカニズム解が求められているが²²⁾、震源深さが 80km と深いにもかかわらず低角逆断層型を示している。これは、もぐり込む太平洋プレートとフィリピン海プレートがこすれ合って起こったことによるためと考えられ、他の地域で発生するやや深発地震の震源メカニズムとは異なっている。

4-4 震源が深い可能性のあるその他の被害地震

以上の検討は 3-1 で述べたデータに基づいて検討した結果である。

表 3 日本付近で発生したやや深発、深発地震と被害ランク

発震時 Y D H	震央位置 Lon. Lat.		震央地名	深さ 被害 M km ランク		
1898	1204	145	131.1 32.7	熊本県北部	6.7 150	*A
1899	324	1305	131.1 31.8	宮崎県南部	6.4 100	*A
1906	121	2249	137.0 34.0	三重県沖	7.6 350	*A
1907	706	46	145.5 43.7	根室海峡	6.7 100	*A
1907	1223	1013	145.0 43.8	根室北部	6.9 150	*A
1909	1110	1513	131.1 32.3	宮崎県西部	7.6 150	*B
1911	615	2326	130.0 28.0	奄美大島付近	8.0 100	*B
1911	906	954	143.0 46.0	樺太南方沖	7.1 350	*A
1915	106	826	123.3 25.1	石垣島北方沖	7.4 150	*A
1928	521	129	140.0 35.6	東京湾北部	6.2 70	*A
1931	330	252	143.9 43.1	釧路西部	6.6 70	*A
1958	311	926	124.5 24.7	石垣島付近	7.2 80	*A
1958	1107	758	148.5 44.3	択捉島沖	8.1 80	*A
1961	812	51	145.6 42.9	根室沖	7.2 80	*A
1964	623	1026	146.5 43.0	根室沖	7.1 80	*A
1965	1026	734	145.5 43.7	国後島南岸	7.1 160	*A
1968	921	2206	142.8 42.0	日高沖	6.9 80	*A
1972	229	1823	141.3 33.2	八丈島東方沖	7.1 70	*A
1974	1109	623	141.8 42.5	胆振沖	6.5 130	*A
1979	713	1710	132.1 33.9	伊予灘	6.1 70	*A
1980	925	254	140.2 35.5	千葉県中部	6.1 80	*B
1981	123	1358	142.2 42.4	日高地方西部	7.1 130	*A
1983	227	2114	140.2 35.9	茨城南西部	6.0 72	*A
1983	826	523	131.6 33.6	瀬戸内海西部	6.8 116	A
1984	101	1803	136.8 33.6	東海道はるか沖	7.3 388	*A
1984	306	1117	139.2 29.3	鳥島近海	7.9 452	*A
1987	109	1514	141.8 39.8	岩手県中部	6.6 71	A
1987	114	2003	142.9 42.5	日高山脈北部	7.0 119	A
1993	115	2006	144.4 42.9	釧路沖	7.8 103	B

*印は文献21に被害状況が記載されている地震

図 5 $M \geq 6$ 、深さ $D \geq 70$ km で被害を発生させた地震の震央分布 (1885 年～1993 年)

データの選択で述べたように、古い時代には震源深さが明確でなく宇津³⁾が深さを s と判定した(表1参照)地震の中にも比較的震源が深いものが含まれている可能性もある。それらの地震のうち、被害程度が比較的大きいランク B, C (宇津のランクで3以上)に属するものを表4の上段に示す。

表4の下段は、1926年以後の地震のうち、地震月報には無いが、宇津⁴⁾の資料と新編日本被害地震総覧²¹⁾に記載されている2地震および1978年2月の宮城県沖地震である。1978年2月の宮城県沖地震は震源の深さは50kmと深さから見るとやや深発地震の範疇に入らないが、震源メカニズムはやや深発地震特有のDC型を示す¹⁵⁾ためここに追加した。

表4の上段の地震の震央を図6に示す。この中で最も大きな被害をもたらした地震は1894年のいわゆる明治東京地震であり、発生域ははっきりしないが、太平洋プレートとフィリピン海プレートが衝突する領域で発生した可能性がある¹⁷⁾。また、1895年の茨城県南西部の地震は震央位置から考えて、1894年の地震と同じ領域または二重深発地震面の上面の可能性もある¹⁷⁾。次に1905年の芸与地震であるが、この地震の発生域は、図6のフィリピン海プレートの等深度線からも分かるようにたいへん複雑な地域である。このため震源深さも明確にはよく分からないが、この地震には津波の記録が無く、規模からすれば、少なくとも普通の浅い地震ではないと考えられる。この地域には、1857年にも同規模の地震があるがこの地震にも津波

表4 震源が深い可能性があるその他の被害地震

発震時 Y D H	震央位置 Lon. Lat.	震央地名	深さ 被害*		
			M	km	ランク
1894 620 1404	139.8 35.7	東京都東部	7.0	s	C(4)
1895 118 2248	140.4 36.1	茨城県南西部	7.2	s	B(3)
1905 602 1439	132.5 34.1	安芸灘	7.3	s	B(3)
1952 718 109	135.8 34.5	奈良県西部	6.8	60	B(3)
1926 629 2326	127.0 27.0	沖縄島北西沖	7.5	130	A(1)
1947 927 101	123.2 24.7	台湾北東沖	7.4	95	B(3)
1978 220 1336	142.2 38.8	宮城県沖	6.7	50	A(2)

*括弧内は宇津³⁾による被害ランク

図6 震源が深い可能性のあるその他の被害地震の震央分布
(コンターはフィリピン海プレートのもぐり込みの深さ)

の記録はない²³⁾。最後は1952年の吉野地震である。この地震は深さが60kmと決められているが、南海トラフから沈み込むフィリピン海プレートの先端部で発生した深くて被害をもたらした珍しい地震と言われている²⁴⁾。この地震の発生メカニズムも明らかになっていない。以上、表4の上段の地震は発生メカニズムが明かでないものばかりであるが、比較的震度分布の広がりが大きく、震源が深いことを示唆するものが多い。

5. まとめ

やや深発・深発地震の発見の歴史から、最近の研究成果および過去の被害歴を調査した。その結果を以下にまとめる。

- (1) 深さ70km以上の地震の発生域は北海道、東北、関東地方および東北日本と九州から琉球列島におよぶ西南日本が中心であり、 $M=6$ 以上の発生頻度は年に4~5回である。
- (2) 東北日本のやや深発地震は二重面を形成し、上面がDC型、下面がDE型の震源メカニズムをもつものが多い^{9), 9)}。これに対し西南日本では二重面はなく、九州ではDE型¹⁸⁾、トカラ海峡より南ではDC型¹⁹⁾の震源メカニズムが卓越する。また、関東地方では、太平洋プレートとフィリピン海プレートの相互作用により、別のメカニズムをもつやや深発地震も発生している¹⁷⁾。
- (3) 深さ70km以上の地震が相当の被害(ランクB)を起こす条件は、地震規模が $M=7.5$ 以上で深さが150km以下である。1993年釧路沖地震も含め1885年以後3回発生している。釧路沖地震を除く他の2回はいずれも西南日本で発生している。
- (4) 被害の程度は大きいもので宇津のランク³⁾で3程度であり、やや深発地震の可能性のある地震を入れても4が最高である。これは1938年の塩屋岬沖地震($M=7.5$)と同程度、1968年十勝沖地震($M=7.9$)や1964年新潟地震($M=7.5$)よりも小さい程度の被害にあたる。

謝辞

本稿をまとめるにあたり弘前大学理学部付属地震火山観測所の小菅正裕博士には、東北日本のやや深発地震に関する有益な資料を送りいただきました。記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 宇津徳治：地震学，共立出版，1977
- 2) 鏡味洋史(代表)：1993年釧路沖地震による被害の調査研究，文部省科学研究費突発災害の調査研究，1993
- 3) 宇津徳治：日本付近の $M 6.0$ 以上の地震および被害地震の表，震研彙報，57，401-463，1982
- 4) 和達清夫：深層地震の存在と其の研究，気象集誌，第二号，5，119-145，1928
- 5) 和達清夫：深層地震の存在と其の研究(その二)，気象集誌，第二号，6，192-216，1929

- 6) Richter C. F : Elementary Seismology, W.H. Freeman and Company, 1958.
- 7) 松沢暢 : 島弧の深部構造, 地震特集号, 44, 145-158, 1991
- 8) Hasegawa, A., N. Umino, and A. Takagi : Double-planed structure of the deep seismic zone in the Northeastern Japan Arc, *Tectonophys.*, 47, 43-58, 1978
- 9) Hasegawa, A., N. Umino, and A. Takagi : Double-planed deep seismic zone and upper-mantle structure in the Northeastern Japan Arc, *J. Roy. Astr. Soc.*, 54, 281-296, 1978
- 10) Veith, K. F. : The relationship of island arc seismicity to plate tectonics, Ph. D. thesis Southern Methodist University, Dallas, Tex, 1974
- 11) Engdahl, E. R. and C. H. Sholz : A double Benioff zone beneath the central Aleutians an unbending of the lithosphere, *Geophys. Res., Lett.*, 4, 473-476, 1977
- 12) Sleep, N. H. : The double seismic zone in down going slabs and the viscosity of the mesosphere, *J. Geophys. Res.*, 84, 4565-4571, 1979
- 13) Goto, K., H. Hamaguchi, and Z. Suzuki : Distribution of the stress descending plate in special reference to intermediate and deep focus earthquakes, *Tohoku Geophys. J.*, 29, 81-105, 1983
- 14) Hasegawa, A., and A. Takagi : Comparison of Wadati-Benioff zone geometry and distribution of earthquake generating stress beneath Northeastern Japan and those beneath Western South America, *Tohoku Geophys. J.*, 31, 1-18, 1987
- 15) Kosuga, M., T. Sato, A. Hasegawa, T. Matsuzawa, A. Susuki, Y. Motoya : Spatial distribution of intermediate-depth earthquakes with horizontal or vertical nodal planes beneath northeastern Japan, *Phys. Earth Planet. Int.*, 93, 63-89, 1996
- 16) Matsuzawa, T., N. Umino, A. Hasegawa and A. Takagi : Normal fault type events in the upper plane of the double-planed deep seismic zone beneath the Northeastern Japan Arc, *J. Phys. Earth*, 34, 85-94, 1986
- 17) 国立防災科学技術センター : 関東・東海地域のテクトニクスを統一的に説明するモデル, 地震予知連絡会報, 51-58, 1988
- 18) 高橋道夫 : 九州下のやや深発地震面の非二重性, 地震 2, 40, 115-116, 1987
- 19) 長宗留夫 : 九州一琉球列島におけるやや深発地震とテクトニクス, 地震 2, 40, 417-424, 1987
- 20) 佐藤良輔編著 : 日本の地震断層パラメータハンドブック, 鹿島出版会, 1989
- 21) 宇佐美龍夫 : 新編日本被害地震総覧, 東京大学出版会, 1987
- 22) Ohta, T., H. Koshida, and M. Takemura : Determinant factors of a peak acceleration value on a strong motion record, 3rd Microzonation Conf., 496-506, 1982
- 23) 渡辺偉夫 : 日本被害津波総覧, 東京大学出版会, 1985
- 24) 東京大学地震研究所 : 図説 日本の地震(1872-1972), 研究速報, 第9号, 1973

[1996年6月18日原稿受理 1996年9月10日採用決定]