

第 5 章 日本各地の繰り返し相似地震の発生状況調査

5.1 北海道地方の繰り返し相似地震

菅ノ又淳一・齋藤祥司・松山輝雄・太田良久・菅原政志・平山達也・松島功・高橋賢二・

大山浩明(札幌管区気象台技術部)・山本剛靖・佐鯉央教(気象庁地震火山部)

所属は平成 24 年度当時

5.1.1 はじめに

札幌管区気象台は気象研究所との地方共同研究「日本各地域の繰り返し相似地震発生状況に関する研究」として平成 23、24 年度の 2 ヶ年計画で北海道周辺の繰り返し相似地震(以下「繰り返し地震」という)の調査を行った。

調査は、溜渕・他(2011)により求められた「日本周辺における相似地震の可能性の高い地震グループの分布図」(図 5.1.1)で得られている北海道周辺の地震グループが繰り返し地震であるかどうかを過去の波形記録(マイクロフィルムや記象紙)等に遡って確認する方法で行った。

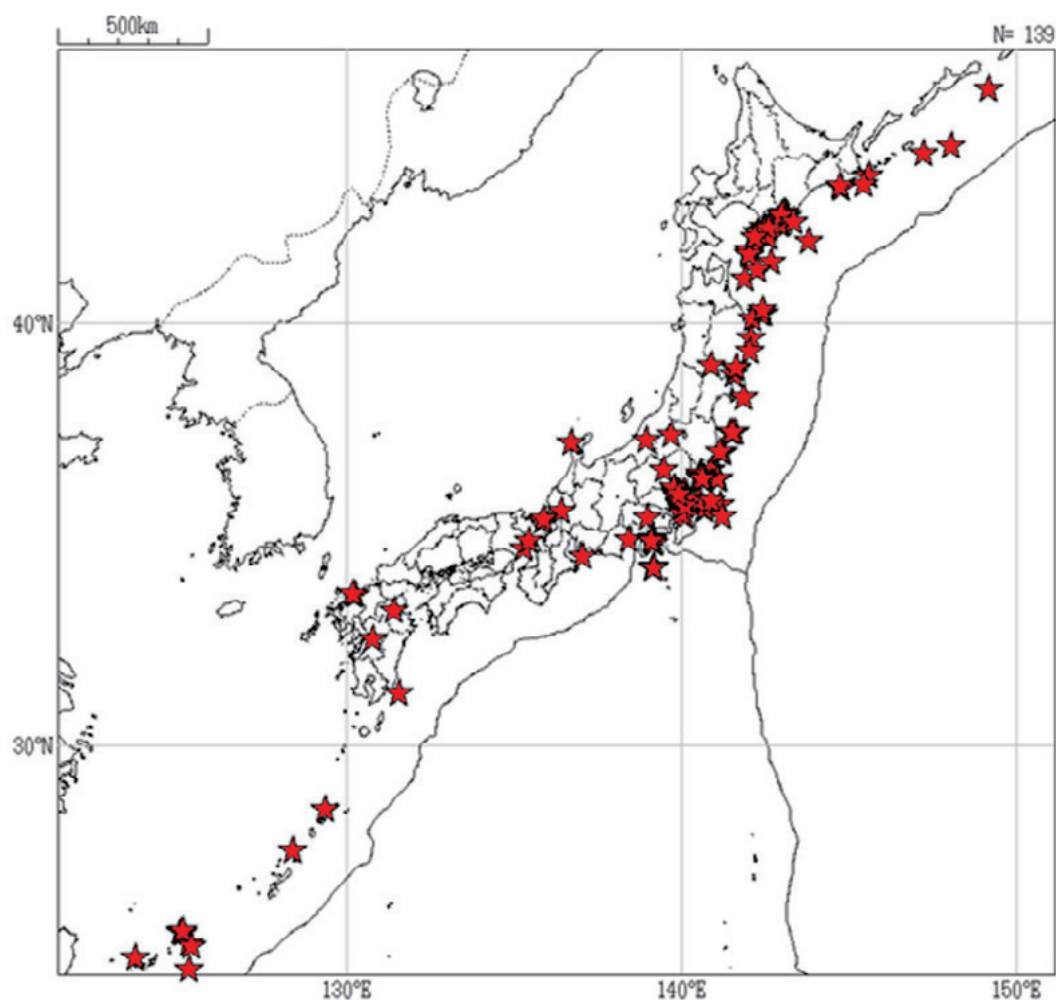


図 5.1.1 87 型電磁式強震計及び計測震度計記録の波形相関から相似地震の可能性の高いものを抽出したグループ (139 グループ ; 溜渕・他, 2011) の分布図。

5.1.2 解析方法

調査は、図5.1.1の「日本周辺における相似地震の可能性の高い地震グループの分布図」の中にプレート境界以外の地震グループが含まれていることから、北海道周辺の地震グループそれぞれについて、波形の重ね合わせ（図5.1.2）や波形相関（表5.1.1）を再度求めて相似性の再確認を行うことから始めた。

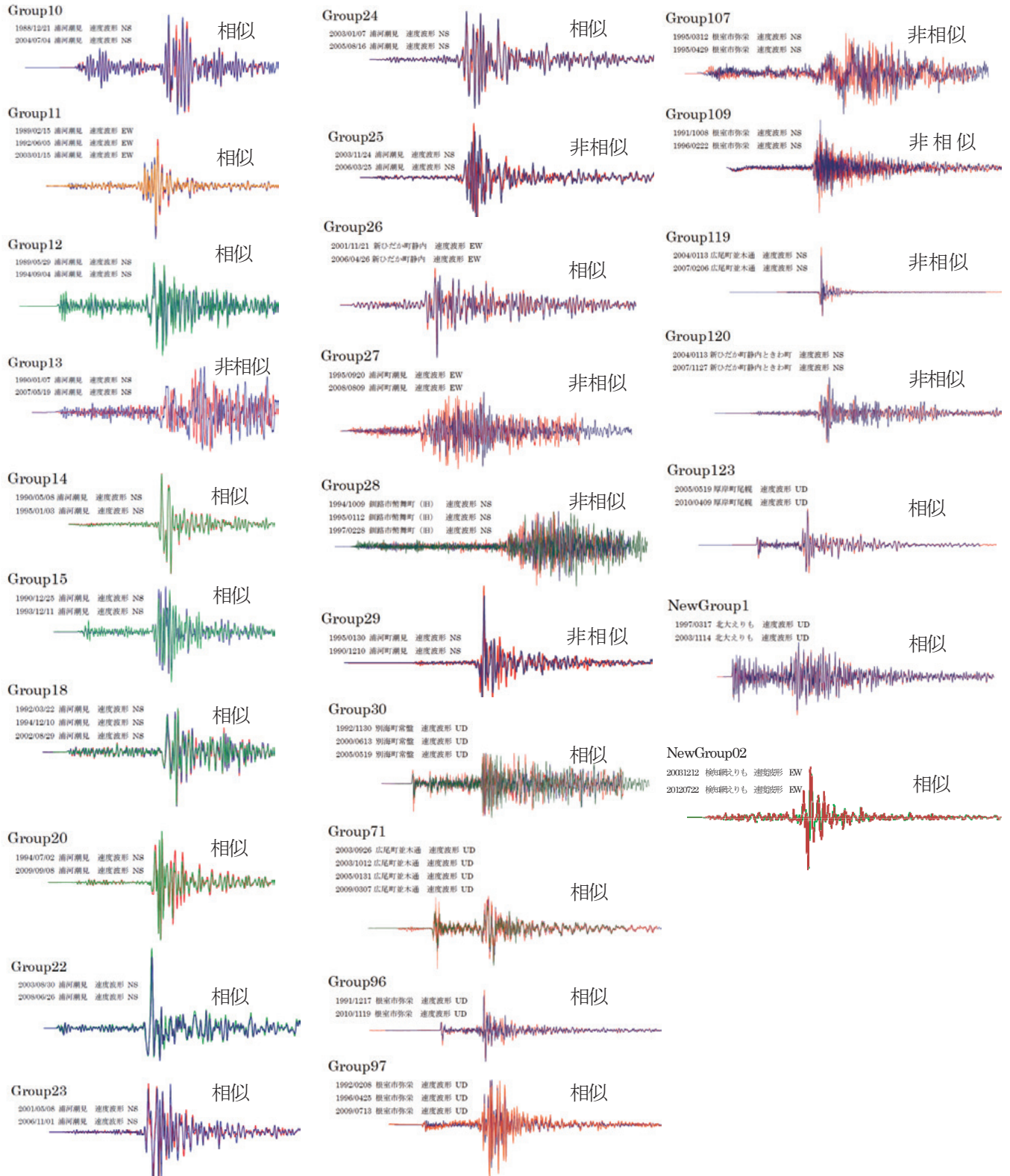


図 5.1.2 デジタル波形の重ね合わせによる比較 (87 型電磁式強震計、計測震度計の加速度データを用いた速度波形を示す。「えりも」は、速度型センサーの波形を示す。色の違いは異なる地震であることを表す。

表5.1.1 北海道周辺の27グループの地震の相似性を確認した表。

Group	No	地震			観測点	見た目の相似性	波 形 相 関 (0.95未満を赤字で区別)										
		年月日	時分	M			成分	速度	変位	速度	変位	速度	変位				
10	1	2004年07月04日	21時31分	4.9	浦河町潮見	1,2,3は相似	40秒間	N/S	0.991	0.990	1と3	0.986	0.985	2と3	0.993	0.991	
	2	1988年12月21日	19時53分	5.0			下0.3Hz	E/W	1と2	0.940		0.939	0.951		0.950	0.991	0.987
	3	2011年07月26日	7時58分	4.8			上1.2Hz	U/D		0.997		0.984	0.993		0.992	0.993	0.978
11	1	2003年01月15日	18時02分	4.3	浦河町潮見	1と3と4は相似	40秒間	N/S	0.984	0.982	1と3	0.980	0.963	1と4	0.985	0.981	
	2	1995年09月27日	08時43分	4.3		非相似	40秒間	E/W	1と2	0.930		0.929	0.956		0.901	0.949	0.945
	3	1992年06月05日	21時52分	4.5		1と3と4は相似	下0.3Hz	U/D		0.939		0.728	0.959		0.925	0.970	0.969
	4	1989年02月15日	09時05分	4.6		1と3と4は相似	上1.2Hz	N/S		0.986		0.989	0.985		0.989	0.990	0.987
							E/W	2と3	0.965	0.975		0.976	0.975		3と4	0.978	0.936
12	1	1994年09月04日	21時29分	4.5	浦河町潮見	相似	40秒間	N/S	0.996	0.992							
	2	1989年05月29日	17時29分	4.7			下0.3Hz	E/W	1と2	0.994		0.973					
							上1.2Hz	U/D		0.965		0.932					
13	1	2007年05月19日	00時59分	5.3	浦河町潮見	非相似	40秒間	N/S	0.960	0.961							
	2	1990年01月07日	22時28分	5.3			下0.3Hz	E/W	1と2	0.976		0.977					
14	1	1995年01月03日	13時42分	4.3	浦河町潮見	1と3は相似	40秒間	N/S	0.956	0.912	1と3	0.957	0.902	2と3	0.962	0.965	
	2	1991年09月02日	13時38分	4.4		非相似	下0.3Hz	E/W	1と2	0.977		0.958	0.984		0.942	0.967	0.936
	3	1990年05月08日	07時19分	4.5		1と3は相似	上1.2Hz	U/D		0.853		0.816	0.938		0.952	0.880	0.856
15	1	1993年12月11日	08時15分	4.9	浦河町潮見	1と2は相似	40秒間	N/S	0.993	0.993	1と3	0.988	0.987	2と3	0.986	0.984	
	2	1990年12月25日	06時09分	4.9		1と2は相似	下0.3Hz	E/W	1と2	0.991		0.990	0.983		0.985	0.992	0.987
	3	1990年07月30日	09時01分	4.8		非相似	上1.2Hz	U/D		0.981		0.956	0.967		0.962	0.979	0.959
18	1	2002年08月29日	21時19分	4.7	浦河町潮見	相似	40秒間	N/S	0.989	0.987	1と3	0.990	0.991	2と3	0.997	0.991	
	2	1994年12月10日	07時48分	4.7			下0.3Hz	E/W	1と2	0.977		0.973	0.982		0.974	0.995	0.983
	3	1992年03月02日	18時04分	4.8			上1.2Hz	U/D		0.986		0.986	0.994		0.986	0.978	0.978
20	1	2009年09月08日	12時42分	4.8	浦河町潮見	1と3は相似	40秒間	N/S	0.985	0.985	1と3	0.998	0.999	2と3	0.986	0.987	
	2	2003年09月28日	07時23分	5.2		非相似	下0.3Hz	E/W	1と2	0.991		0.990	0.998		0.995	0.989	0.982
	3	1994年07月02日	07時43分	4.9		1と3は相似	上1.2Hz	U/D		0.995		0.996	0.994		0.796	0.989	0.776
22	1	2008年06月26日	08時37分	5.4	浦河町潮見	相似	40秒間	N/S	0.998	0.997	1と3	0.986	0.986	2と3	0.989	0.989	
	2	2003年08月30日	19時06分	5.4			下0.3Hz	E/W	1と2	0.994		0.994	0.976		0.976	0.985	0.985
	3	1995年01月11日	16時48分	5.4		若干異なる	上1.2Hz	U/D		0.994		0.995	0.991		0.968	0.994	0.975
23	1	2006年11月01日	23時21分	4.8	浦河町潮見	相似	40秒間	N/S	0.998	0.997							
	2	2001年05月08日	06時27分	4.6			下0.3Hz	E/W	1と2	0.986		0.986					
24	1	2005年08月16日	08時29分	4.6	浦河町潮見	相似	40秒間	N/S	0.997	0.995	1と2						
	2	2003年01月07日	03時27分	4.7			下0.3Hz	E/W		0.983		0.997					
							上1.2Hz	U/D		0.996		0.994					
25	1	2006年03月25日	07時16分	4.8	浦河町潮見	若干異なる	40秒間	N/S	0.987	0.987	1と2						
	2	2003年11月24日	18時48分	4.8			下0.3Hz	E/W		0.988		0.988					
26	1	2006年04月26日	23時10分	4.6	新ひだか町静内	相似	40秒間	N/S	0.998	0.998	1と2						
	2	2001年11月21日	19時25分	4.6			下0.3Hz	E/W		0.999		0.999					
							上1.2Hz	U/D		0.999		0.999					
27	1	2008年8月9日	0時53分	5.2	浦河町潮見	非相似	40秒間	N/S	0.824	0.824	1と2						
	2	1995年9月20日	6時05分	5.4			下0.3Hz	E/W		0.834		0.838					
28	1	1994年10月9日	21時24分	6.4	釧路市幣舞町(旧)	非相似	40秒間	N/S	0.729	0.724	1と3	0.752	0.710	2と3	0.771	0.771	
	2	1995年1月12日	19時26分	6.2			下0.1Hz	E/W	1と2	0.834		0.741	0.831		0.673	0.789	0.789
	3	1997年2月28日	20時32分	6.6			上0.5Hz	U/D		0.651		0.644	0.692		0.688	0.634	0.634
29	1	1990年1月30日	12時15分	5.7	根室市弥栄	非相似	40秒間	N/S	0.969	0.970	1と2						
	2	1990年12月10日	16時27分	5.4			下0.3Hz	E/W		0.987		0.983					
30	1	1992年11月30日	9時20分	5.1	別海町常盤	相似	40秒間	N/S	0.980	0.981	1と2						
	2	2000年6月13日	1時54分	4.9			下0.3Hz	E/W		0.997		0.997					
							上1.2Hz	U/D		0.978		0.979					
71	1	2003年10月12日	3時26分	5.9	広尾町並木通	相似	40秒間	N/S	0.999	0.999	1と3	0.998	0.998	2と3	0.998	0.998	
	2	2005年1月31日	18時39分	5.9			下0.1Hz	E/W	1と2	0.999		0.999	0.991		0.988	0.994	0.992
	3	2009年3月7日	23時33分	5.7			上0.5Hz	U/D		0.999		0.999	0.999		0.999	0.999	0.999
96	1	1991年12月17日	13時23分	5.7	根室市弥栄	相似	40秒間	N/S	0.993	0.994	1と2						
	2	2010年11月19日	13時01分	5.4			下0.3Hz	E/W		0.997		0.995					
97	1	1992年2月8日	11時15分	4.4	根室市弥栄	相似	40秒間	N/S	0.988	0.951	1と3	0.982	0.981	2と3	0.994	0.937	
	2	1996年4月25日	10時57分	4.2			下1.0Hz	E/W	1と2	0.987		0.947	0.986		0.932	0.996	0.988
	3	2009年7月13日	4時28分	4.4			上4.0Hz	U/D		0.980		0.950	0.980		0.947	0.994	0.889
107	1	1995年3月12日	0時21分	6.2	根室市弥栄	非相似	40秒間	N/S	0.917	0.935	1と2						
	2	1995年4月29日	2時08分	6.4			下0.1Hz	E/W		0.819		0.822					
109	1	1991年10月8日	12時31分	6.1	根室市弥栄	非相似	40秒間	N/S	0.581	0.663	1と2						
	2	1996年2月22日	23時59分	6.2			下0.1Hz	E/W		0.720		0.715					
							上0.5Hz	U/D		0.710		0.731					
119	1	2004年1月13日	5時12分	4.6	広尾町並木通	非相似	40秒間	N/S	0.997	0.996	1と2						
	2	2007年2月6日	2時44分	3.9			下0.3Hz	E/W		0.986		0.980					
120	1	2004年9月5日	3時25分	4.6	静内町ときわ	非相似	40秒間	N/S	0.988	0.987	1と2						
	2	2007年11月27日	19時22分	4.5			下0.3Hz	E/W		0.984		0.983					
123	1	2005年5月19日	1時33分	5.2	厚岸町尾幌	相似	40秒間	N/S	0.998	0.998	1と2						
	2	2010年4月9日	3時41分	5.1			下0.3Hz	E/W		0.999		0.999					
							上1.2Hz	U/D		0.996		0.995					
New Group 01	1	1991年6月23日	20時38分	4.9	浦河町潮見	相似	40秒間	N/S	0.995	0.995	1と2						
	2	2009年12月30日	4時23分	4.8			下0.3Hz	E/W		0.989		0.981					
New Group 02	1	2003年12月12日	10時46分	5.0	えりも	相似	40秒間	N/S	0.985		1と2						
	2	2012年7月22日	13時41分	5.1			下0.3Hz	E/W		0.993							

*:グループ 10~123 は図 5.1.1 の地震グループのうち、北海道周辺で相似地震として確認されたグループである。また、NewGroup01,02 は札幌管区気象台で独自に発見したグループである。

この結果、表5. 1. 1にある北海道周辺の27地震グループのうち、16地震グループと札幌管区气象台で独自に発見した2つの地震グループが相似地震であると確認された（表5. 1. 1、図5. 1. 3参照）。次に、この18地震グループのうち、過去の波形データ（マイクロフィルム）が多く残っている、6地震グループ（図5. 1. 3のオレンジ色のグループ）について、以下の方法により繰り返し地震であるか否かの調査を行った。

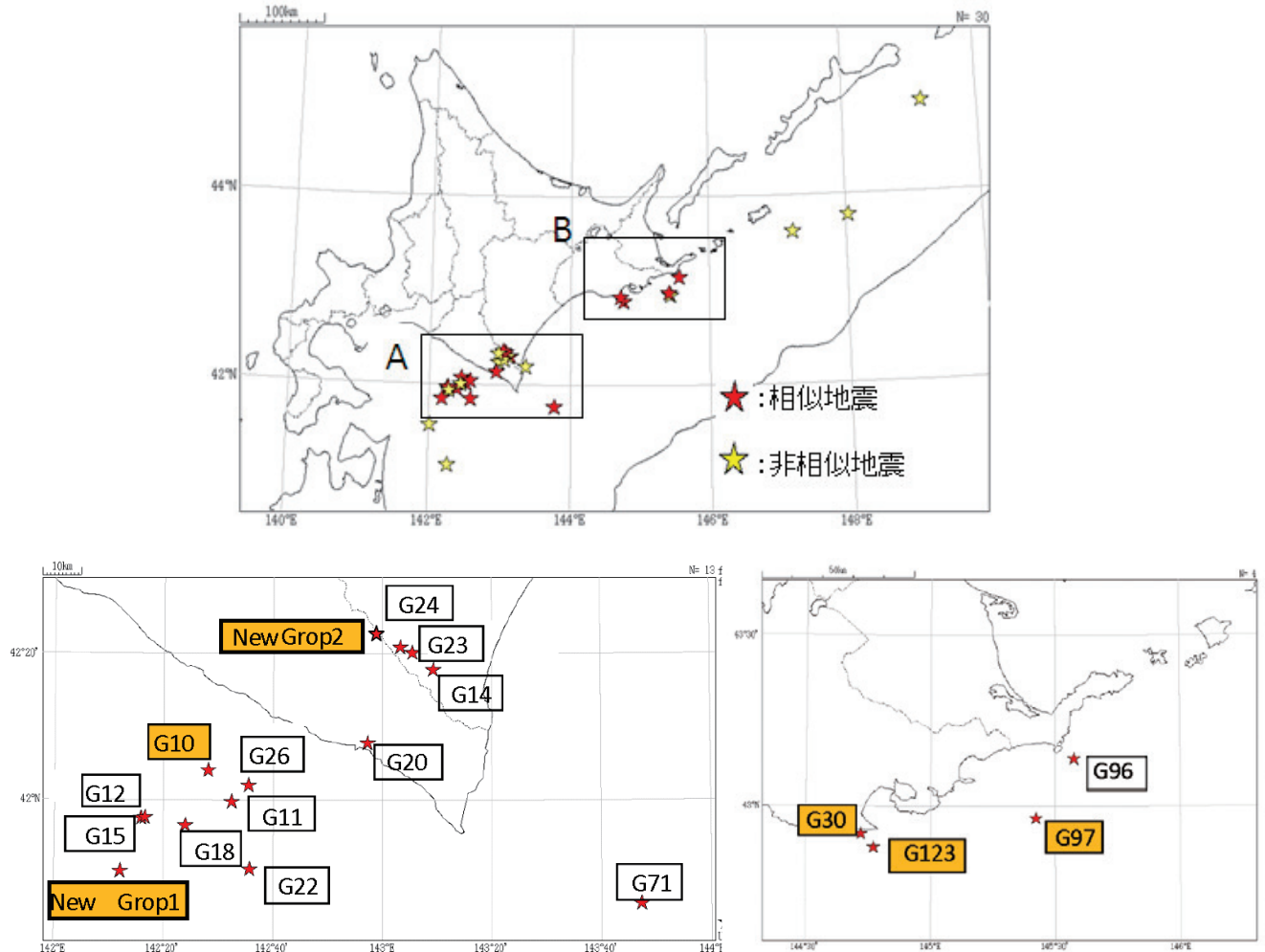


図 5. 1. 3 北海道周辺で地震波形の相似性が認められたグループの配置図（オレンジ色は今回の調査対象グループ）。

- (1) 各地震グループにおける最新の地震の震央を中心に半径約10kmの領域を設定し、その領域内における過去地震の地震活動経過図（M-T図）から、規模と発生間隔が同程度の地震を抽出する。
- (2) 抽出した地震の波形（デジタル波形やアナログ波形）の重ね合わせや波形の特徴の比較、或いは波形相関（P波付近から40秒間の波形データを用い、0.3～1.2Hzのバンドパスフィルター処理を施した波形データを使用）を求め、抽出した地震の相似性を確認する。

なお、波形の確認には、同一観測点、同一地震計による長期間の記録が必要であるが、長期間に渡り観測条件が同一な観測点がないため、複数の観測点で共通する地震を含めて比較することで長期間に渡る地震波形の相似性を確認する。

- (3) (1) で抽出した地震の震源を観測点限定により再評価し、震源の纏まり具合を確認する。

ただし、年代により観測点の配置が変わっているため、抽出したすべての地震を同じ観測点の組み合わせ（使

用する相も同一) で評価できないことから共通の観測点で計算できる期間を分け、それぞれの期間に同一の地震が含まれるようにして震源の纏まり具合を確認する。

(4) 抽出した地震の発震機構解或いは初動分布の相似性を確認する。

(5) (1) から (4) の結果で繰り返し地震であることの同定を行う。繰り返し地震と同定した地震グループについては地震の発生間隔とすべり量(Nadeau and Johnson, 1998)から平均滑り速度を推定し、その平均滑り速度がその周辺の平均的なプレートの滑り量と整合していることを確認すると共に、その地震グループにおける次の地震発生年月を大阪管区気象台地震火山課作成の L-CAT (地震長期発生確率計算ツール) を用いて推定する。

5.1.3 浦河沖 1 (NewGroup01)

5.1.3.1 同系列と思われる地震の抽出

表5.1.1で確認したNewGroup01付近の震央分布図と領域a内の地震活動経過図(図5.1.4)から、1997年3月17日と2003年11月14日の地震と規模および発生間隔が同程度で、プレート境界付近で発生したと思われる11地震を抽出した(表5.1.2)。なお、抽出した期間は53型、54型普通地震計が整備され始めた1954年以降とした。

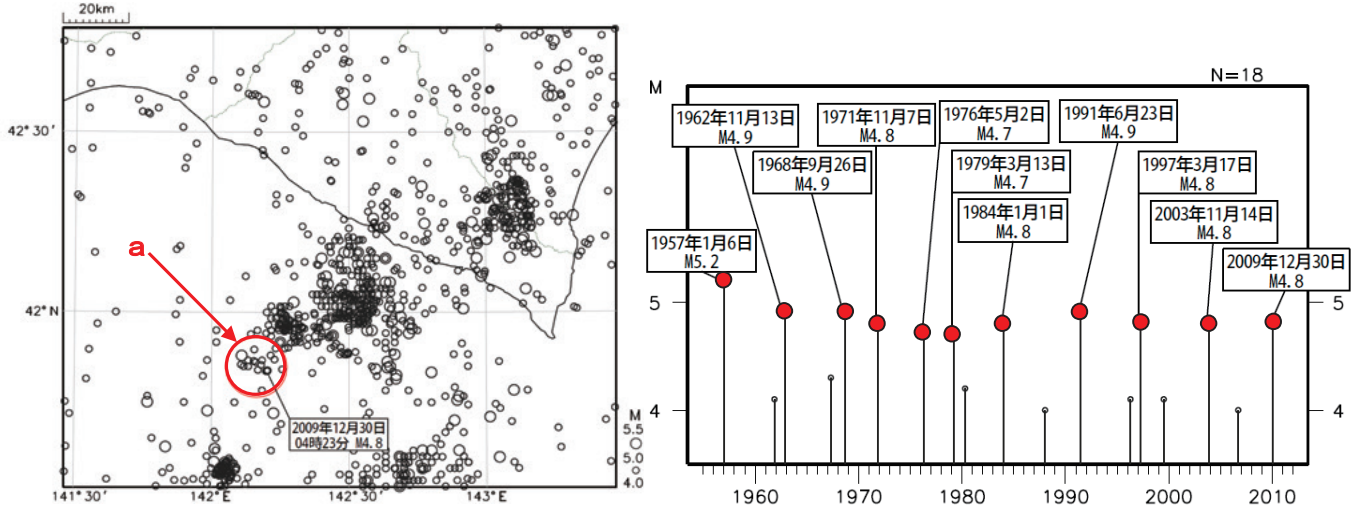


図 5.1.4 震央分布図と領域a内の地震の発生状況 (M-T 図)。1954 年 1 月 1 日～2012 年 6 月 30 日、深さ 0～100km、 $4.0 \leq M \leq 5.5$ 。

表5.1.2 相似性の確認対象とした地震 (浦河沖 1)。

番号	発 生 日 時	M	深さ (km)	番号	発 生 日 時	M	深さ (km)
1	1957/01/06 14:15	5.2	69	7	1984/01/01 11:22	4.8	69
2	1962/11/13 17:54	4.9	78	8	1991/06/23 20:38	4.9	66
3	1968/09/26 06:36	4.9	80	9	1997/03/17 18:23	4.8	66
4	1971/11/07 16:51	4.8	70	10	2003/11/14 07:39	4.8	70
5	1976/05/02 04:34	4.7	70	11	2009/12/30 04:23	4.8	72
6	1979/03/13 12:35	4.7	60				

5.1.3.2 波形の比較

選択した 11 地震の相似性を確認するため、デジタル波形データ及びアナログ波形記録の比較を行った。

(1) デジタル波形データの比較

気象庁のデジタル波形記録は、1988 年以降のものが利用可能であるが、観測点の移設等により波形比較ができない地震がある。このことから気象庁の波形データで相似性を確認できない地震については、北海道大学から波形データの提供を受け、波形の重ね合わせや波形相関を求め相似性の確認を行った(図 5.1.5)。この結果、2009 年、2003 年、1997 年及び 1991 年の地震波形が相似であることが確認された。

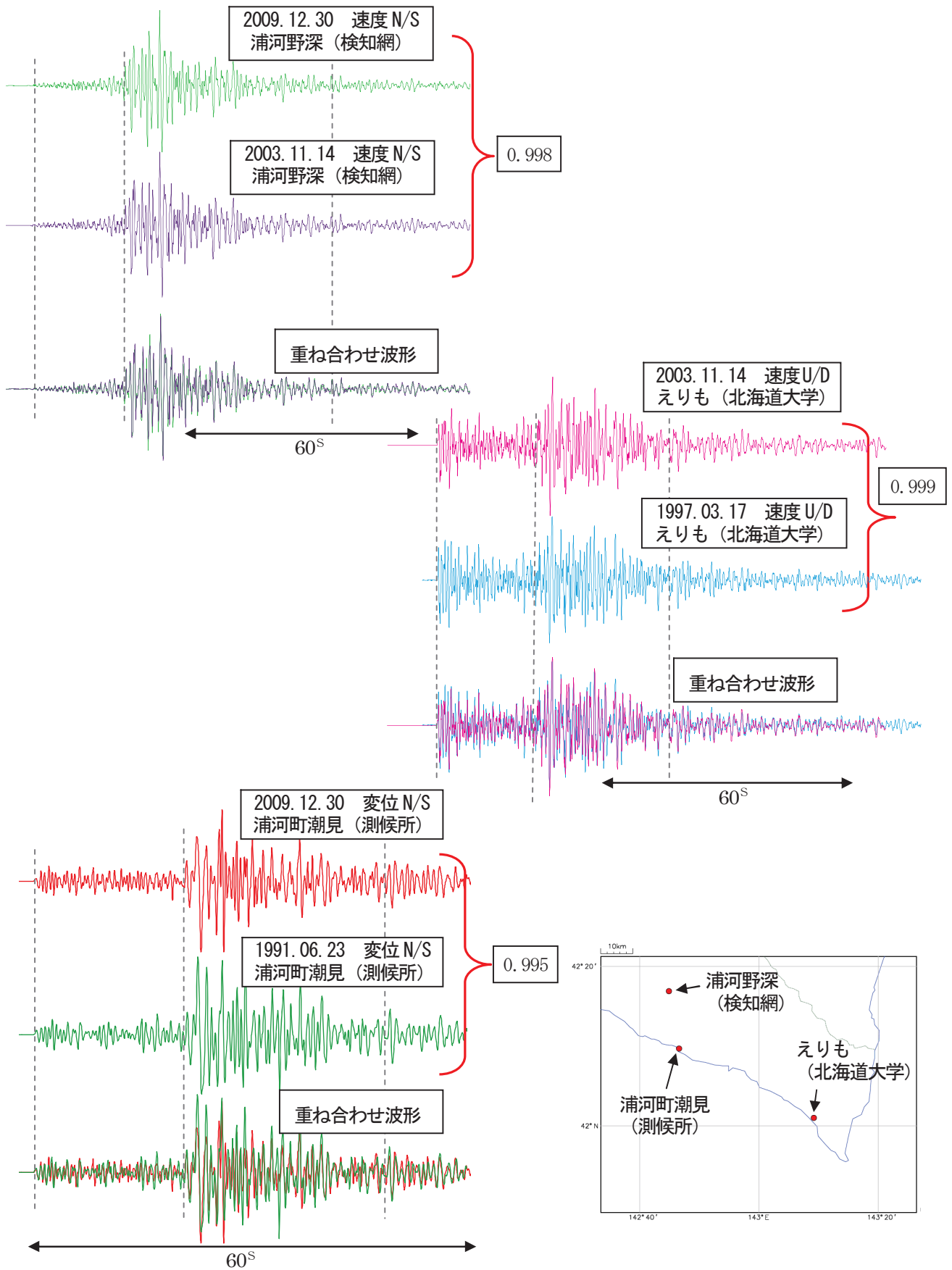


図 5.1.5 地震波形 (デジタルデータを再現) の比較。数値は波形のコヒーレンスを表す。破線は比較のための補助線である。

(2) アナログ記録の比較

デジタル波形の無い1991年から1968年までの6地震については、浦河測候所の59型電磁地震計記録の特徴(図5.1.6)から、また1968年から1957年までの3地震については、帯広測候所の53型又は54C型普通地震計記録の特徴(図5.1.7)から地震波形が相似であることを目視により確認した。

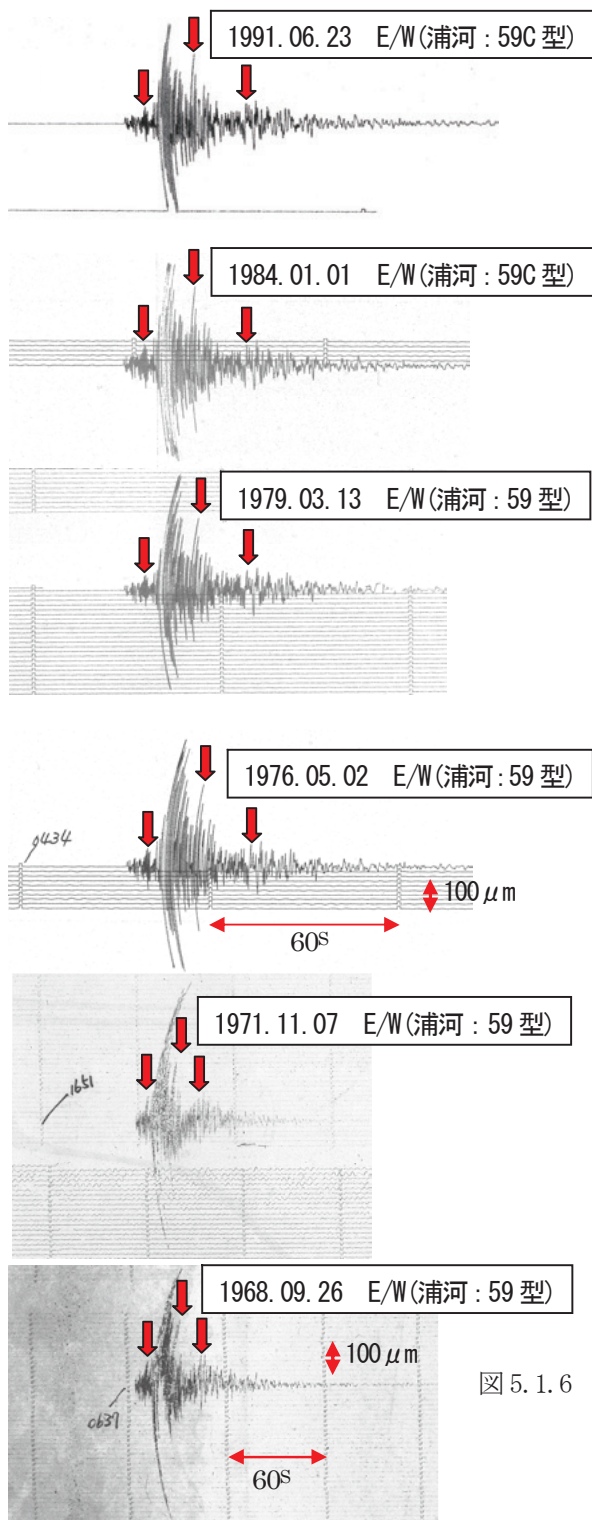


図 5.1.6 地震波形 (マイクロフィルムから再現) の比較。【浦河測候所 : 59 型電磁地震計】矢印は特徴的な位相を示す。

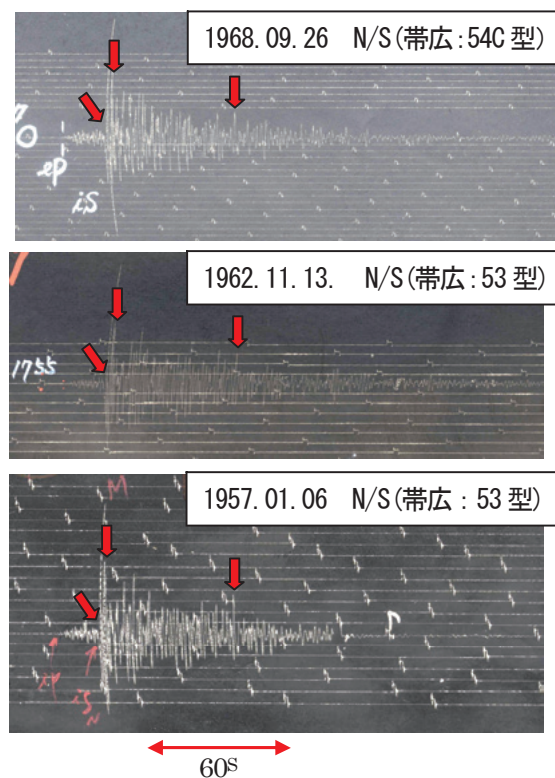


図 5.1.7 地震波形 (マイクロフィルムから再現) の比較。
【帯広測候所 : 53 型/54C 型普通地震計】
矢印は特徴的な位相を示す。

(3) 比較結果

デジタル波形記録とアナログ波形記録の相似性の確認結果から選択した11地震はすべて相似であることを確認した(表5.1.3)。

表5.1.3 各観測点の記録から相似地震と認められた地震(浦河沖1)。色つきのセルは複数観測点において波形の相似性が確認できたことを表す。

地点(種別) 地震発生日時	浦河測候所 (59 型) アナログ記録	帯広測候所 (53/ 54C 型) アナログ記録	浦河測候所 (強震データ) デジタル記録	浦河野深 (検知網) デジタル記録	えりも (北海道大学) デジタル記録
1957/01/06 14:15	—	○	—	—	—
1962/11/13 17:54	—	○	—	—	—
1968/09/26 06:36	○	○	—	—	—
1971/11/07 16:51	○	—	—	—	—
1976/05/02 04:34	○	—	—	—	—
1979/03/13 12:35	○	—	—	—	—
1984/01/01 11:22	○	—	—	—	—
1991/06/23 20:38	○	—	○	—	—
1997/03/17 18:23	—	—	—	—	○
2003/11/14 07:39	—	—	—	○	○
2009/12/30 04:23	—	—	○	○	—

○:各観測点において相似と認められた地震

—:記録なし

5.1.3.3 震源再計算による震源の精査

表5.1.2の11地震の震源について観測点限定を行い再決定した。ただし、11地震全てを同じ観測点で評価できないことから、二つの期間に分け、それぞれの期間では共通の観測点を用い、また二つの期間に同一地震（1979年、1984年、1991年）が含まれるよう再計算を行った。その結果、東西約10kmに分布していた震源は、それぞれほぼ同一場所に纏まった。このことから11地震はほぼ同一場所で発生したものと考えられる（図5.1.8、図5.1.9）。なお、図中のカタログ震源とは気象庁震源カタログあるいは一元化处理震源カタログに掲載されている震源を指す。

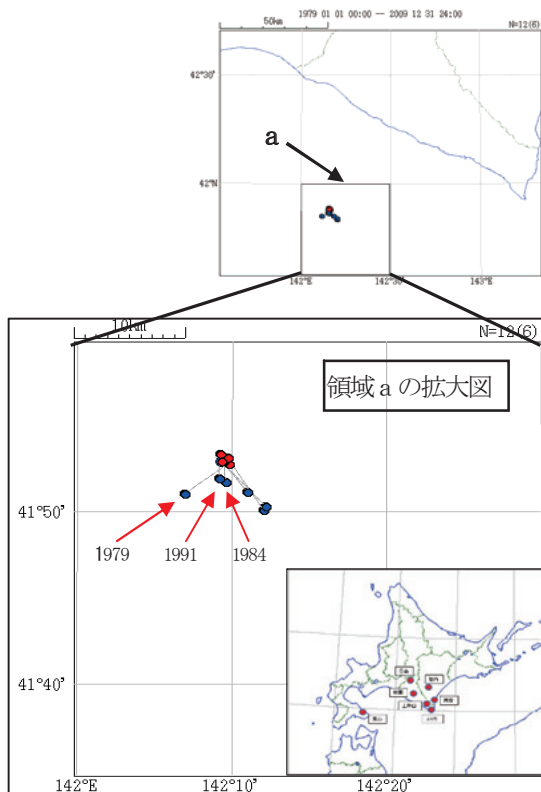


図 5.1.8 使用した観測点と、観測点限定による再計算震源（1979～2009 年の 6 地震：北海道大学の検測値を使用）。●：カタログ震源 ●：再計算後。赤矢印は図 5.1.9 と共通の地震を示す。

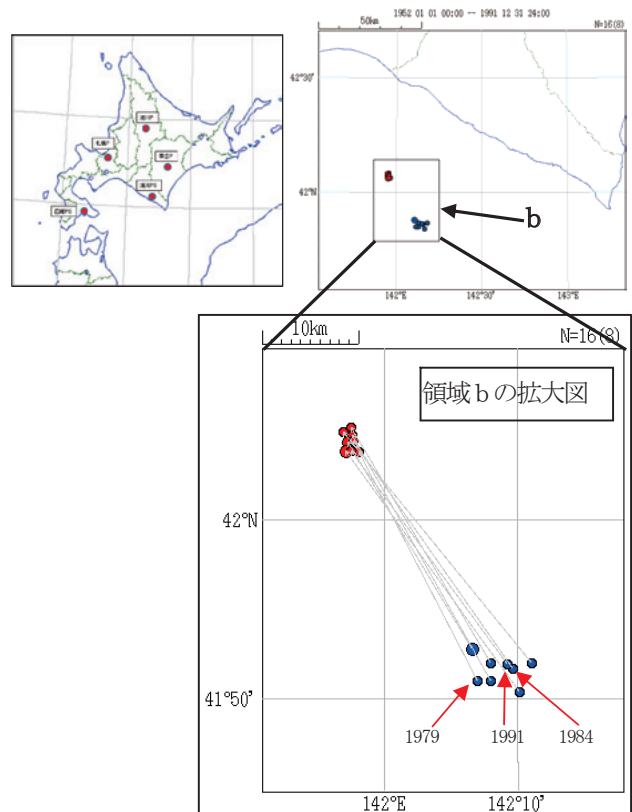


図 5.1.9 使用した観測点と観測点限定による再計算震源（1957～1991 年の 8 地震：気象官署の検測値を使用）。※旭川の P 相を一部精査
●：カタログ震源 ●：再計算後。
赤矢印は図 5.1.8 と共通の地震を示す。

5.1.3.4 発震機構解及び P 波初動分布

表5.1.2の11地震のうち、発震機構解及び P 波初動分布のデータがあるものを図5.1.10に示す。2009年、2003年及び1997年の地震は発震機構解が求まっており、同じ型の地震と考えられる。また、他の 6 地震についても初動の分布から発震機構解が求まっている地震とほぼ同様の型の地震と推測される。

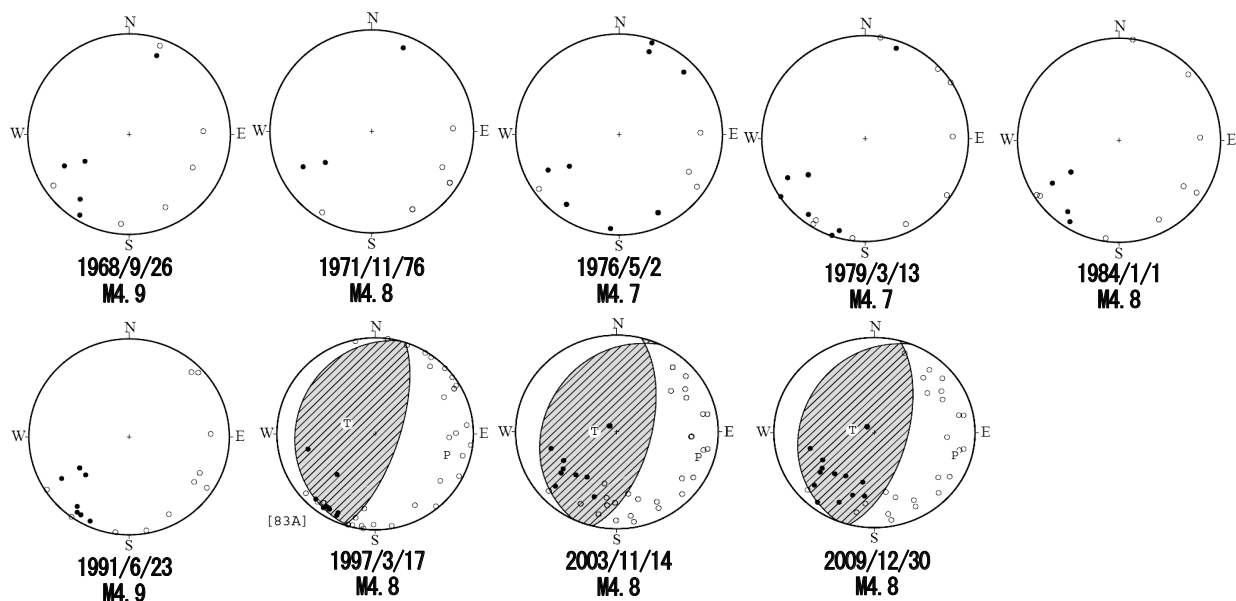


図 5. 1. 10 発震機構及びP波初動分布。

5. 1. 3. 5 平均滑り速度の推定と次回の発生予測

地震波形比較、震源再計算による震源の精査、発震機構解及びP波初動分布から図5. 1. 4で抽出した11地震は繰り返し地震であると同定した（表5. 1. 4）。

この地震グループの地震発生間隔と各地震の推定すべり量(Nadeau and Johnson, 1998)から平均滑り速度7.7cm/年（図5. 1. 11）を得た。この値は、これらの地震が発生している付近の太平洋プレートの平均的な速度(8cmから10cm)と調和的である。

なお、図5. 1. 12に繰り返し地震の地震活動経過図と発生間隔を、次回の発生予測を表5. 1. 5に示す。次回の発生予測は小標本論対数正規分布を用いる方法(岡田, 2009)によった。

表 5. 1. 4 同定された繰り返し相似地震とその確認結果。

種 別 日 時	地震波形	震源再計算	発震機構解	P波初動分布
1957/01/06 14:15	○	○		
1962/11/13 17:54	○	○		
1968/09/26 06:36	○	○		○
1971/11/07 16:51	○	○		○
1976/05/02 04:34	○	○		○
1979/03/13 12:35	○	○		○
1984/01/01 11:22	○	○		○
1991/06/23 20:38	○	○		○
1997/03/17 18:23	○	○	○	○
2003/11/14 07:39	○	○	○	○
2009/12/30 04:23	○	○	○	○

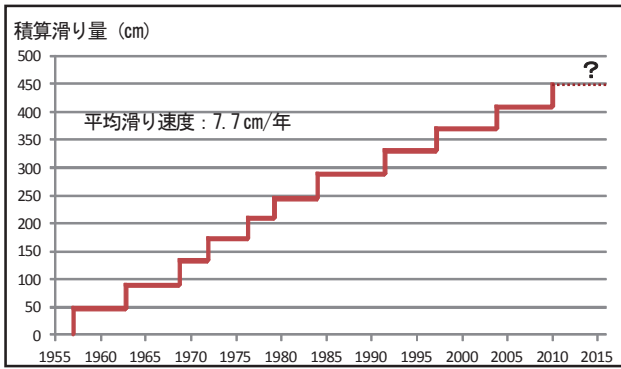


図 5. 1. 11 積算滑り量と平均滑り速度。

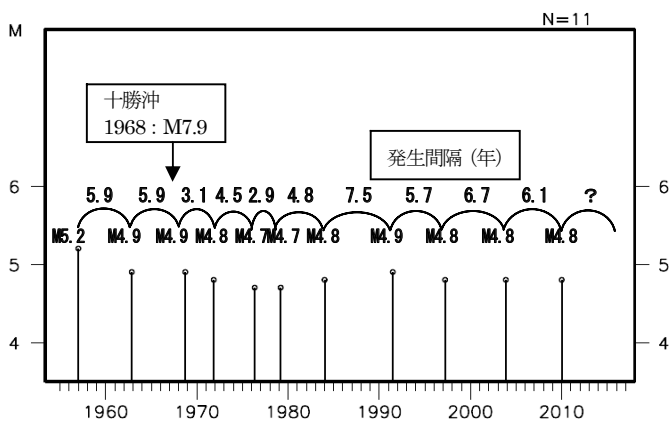


図 5. 1. 12 繰り返し相似地震の地震活動経過図と発生間隔。

表5. 1. 5 繰り返し間隔と次回の予測。

平均M : 4. 8

繰り返し間隔 最短 : 2. 9 年

最長 : 7. 5 年

平均 : 5. 3 年

(標準偏差 1. 41)

次回の予測

2015 年 3 月 ± 21 ヶ月

3 年以内の発生確率 : 63. 6%

(予測モデル : 小標本論対数正規分布、
2012. 11. 1 基準、70%の確率)

5.1.4 浦河沖 2 (Group10)

5.1.4.1 同系列と思われる地震の抽出

表5.1.1 で確認したGroup10付近の震央分布図(図5.1.13)と領域a内の地震活動経過図から、2011年7月26日と2004年7月4日および1988年12月21日の地震と規模も発生間隔も同程度で、プレート境界付近で発生したと思われる9地震を抽出した(表5.1.6)。なお、抽出する期間は53型、54型普通地震計が整備され始めた1954年以降とした。

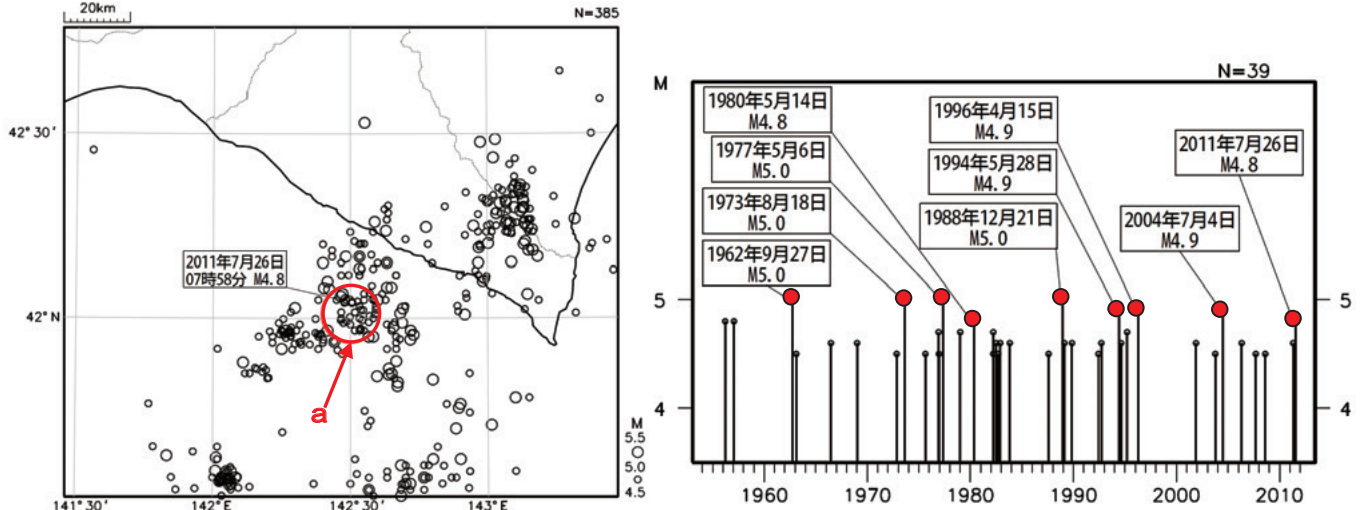


図 5.1.13 震央分布図と領域 a 内の地震の発生状況 (M-T 図)。 1954 年 1 月 1 日～2012 年 6 月 30 日、深さ 0～75km、 $4.5 \leq M \leq 5.5$ 。

表5.1.6 相似性の確認対象とした地震 (浦河沖 2)。

番号	発 生 日 時	M	深さ (km)	番号	発 生 日 時	M	深さ (km)
1	1962/09/27 18:18	5.0	70	6	1994/05/28 10:21	4.9	62
2	1973/08/18 11:08	5.0	70	7	1996/04/15 06:44	4.9	66
3	1977/05/06 07:14	5.0	70	8	2004/07/04 21:31	4.9	62
4	1980/05/14 17:07	4.8	70	9	2011/07/26 07:58	4.8	67
5	1988/12/21 19:53	5.0	74				

5.1.4.2 波形の比較

選択した9地震の相似性を確認するため、デジタル波形データ及びアナログ波形記録の比較を行った。

(1) デジタル波形データの比較

気象庁のデジタル波形記録は、1988年以降のものが利用可能であるが、観測場所の移設等により波形比較ができない地震がある。このことから気象庁のデジタル波形記録で相似性を確認できない地震については、北海道大学から波形記録の提供を受け、波形の重ね合わせや波形相関を求め相似性の確認を行った(図5.1.14)。

この結果、2011年、2004年、1996年及び1988年の地震波形の相似性が確認された。

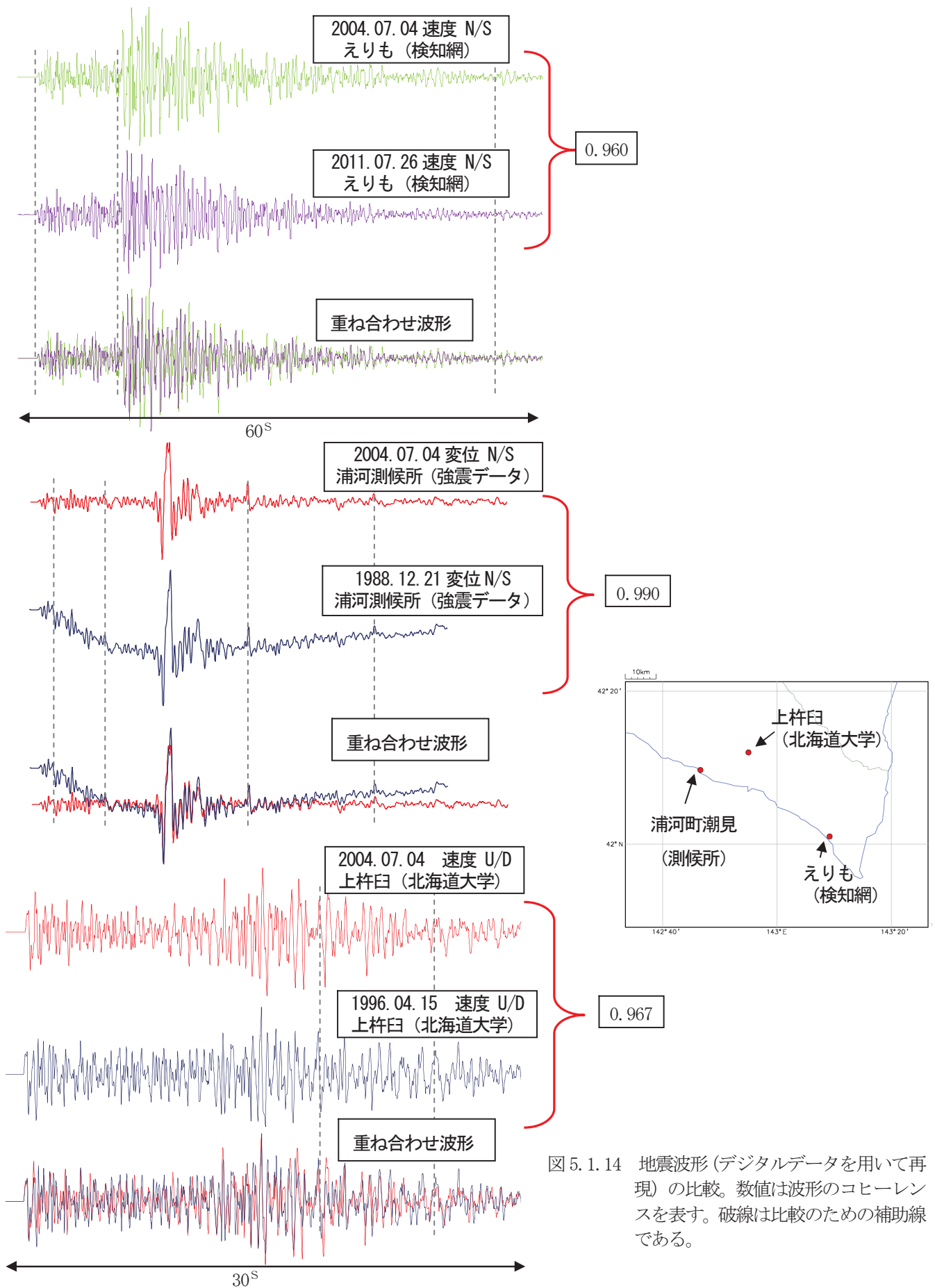


図 5. 1. 14 地震波形 (デジタルデータを用いて再現) の比較。数値は波形のコヒーレンスを表す。破線は比較のための補助線である。

(2) アナログ記録の比較

デジタル波形の無い 1988 年、1980 年及び 1973 年の 3 地震と 1988 年、1980 年の 2 地震については、それぞれ浦河測候所及び帯広測候所の 59 型電磁地震計による記録の特徴 (図 5.1.15) から、地震波形が相似であることを確認した。

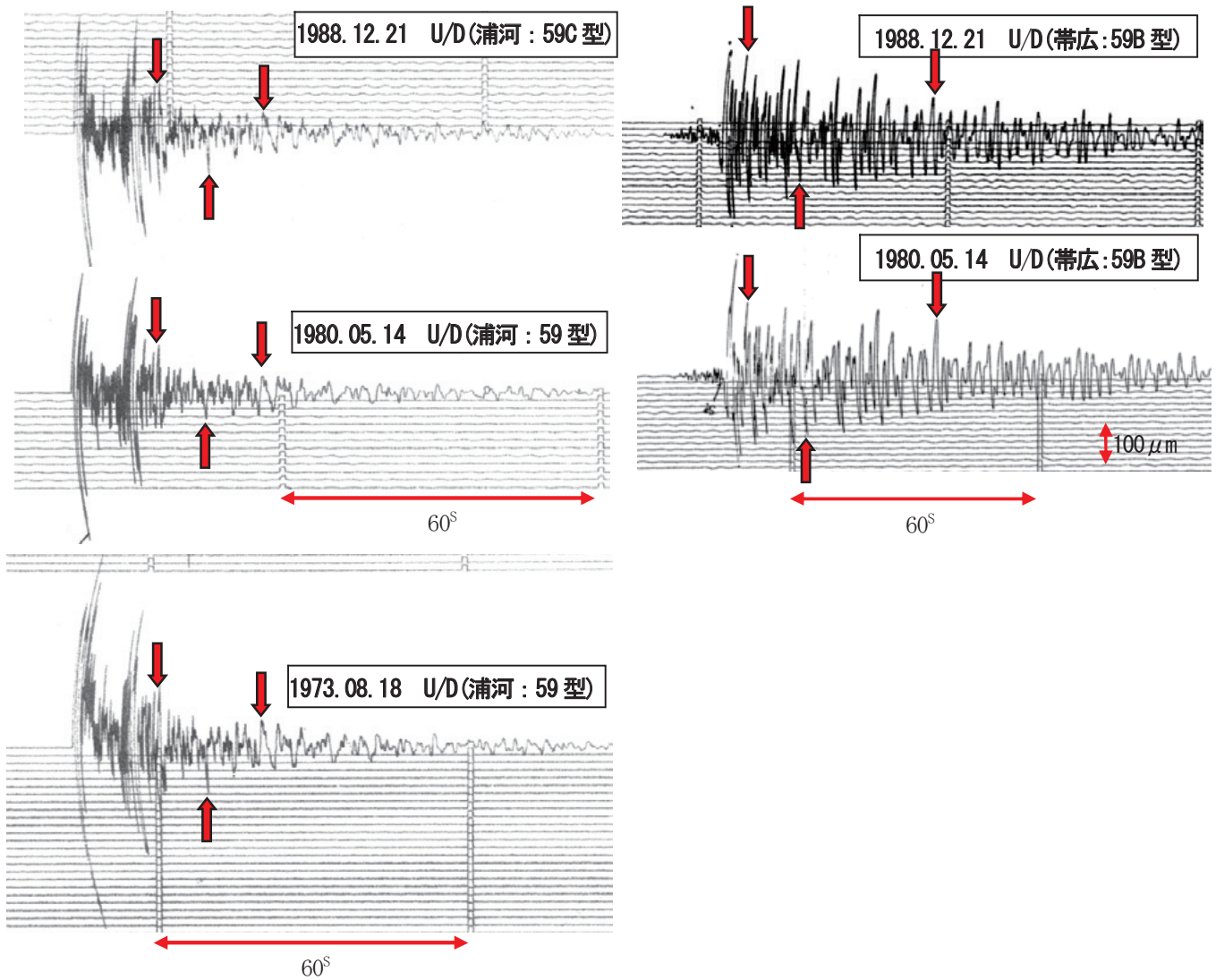


図 5.1.15 地震波形 (マイクロフィルムから再現) の比較
矢印は特徴的な位相を示す。

(3) 比較結果

デジタル波形記録とアナログ波形記録の相似性の確認結果から選択した9地震のうち6地震が相似であることを確認した(表5.1.7)。

表5.1.7 各観測点の記録から相似地震と認められた地震（浦河沖2）。色つきのセルは3観測点において波形の相似性が確認できたことを表す。

地点（種別） 日 時	浦河測候所 (59 型) アナログ記録	帯広測候所 (53/54C 型) アナログ記録	浦河測候所 (強震データ) デジタル記録	えりも (検知網) デジタル記録	上杵臼 (北海道大学) デジタル記録
1962/09/27 18:18	—	—	—	—	—
1973/08/18 11:08	○	—	—	—	—
1977/05/06 07:14	×	—	—	—	—
1980/05/14 17:07	○	●	—	—	—
1988/12/21 19:53	○	●	●	—	—
1994/05/08 10:21	×	—	—	—	—
1996/04/15 06:44	—	—	—	—	●
2004/07/04 21:31	—	—	●	●	●
2011/07/26 07:58	—	—	—	●	—

○：各観測点において相似と認められた地震 ×：相似と認められない地震 ー：記録なし

5.1.4.3 震源再計算による震源の精査

表5.1.6 の9地震の震源について観測点限定を行い再決定した。ただし、9地震全てを同じ観測点で評価できないことから、二つの期間に分け、二つの期間のそれぞれには同じ観測点を用い、二つの期間に同一地震(1988年)が含まれるよう再計算を行った。その結果、1988年以降の5地震では、1994年の地震を除く4地震が、震央、深さ共にほぼ同一の場所に纏まった(図5.1.16)。また、1988年以前の5地震では、1962年及び1977年の地震を除く3地震がほぼ同一場所に纏まった(図5.1.17)。このことから6地震はほぼ同一場所で発生したものと考えられる。

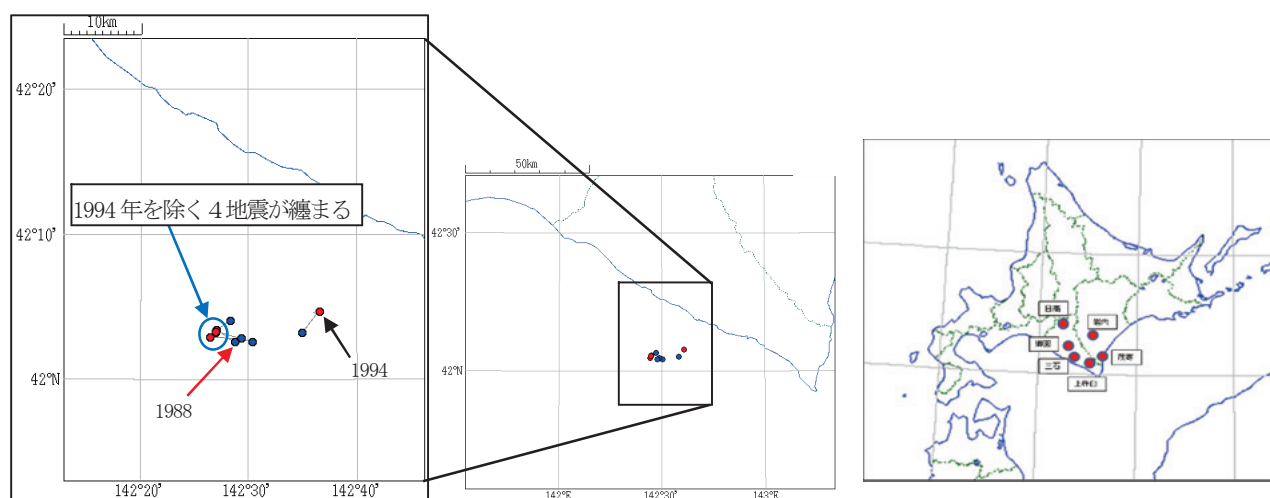


図 5.1.16 使用した観測点と観測点限定による再計算震源 (1988～2011 年の 5 地震：北海道大学の 6 点の P 相を使用)。

●: カタログ震源 ●: 再計算後。赤矢印は図 5. 1. 17 と共通の地震を示す。

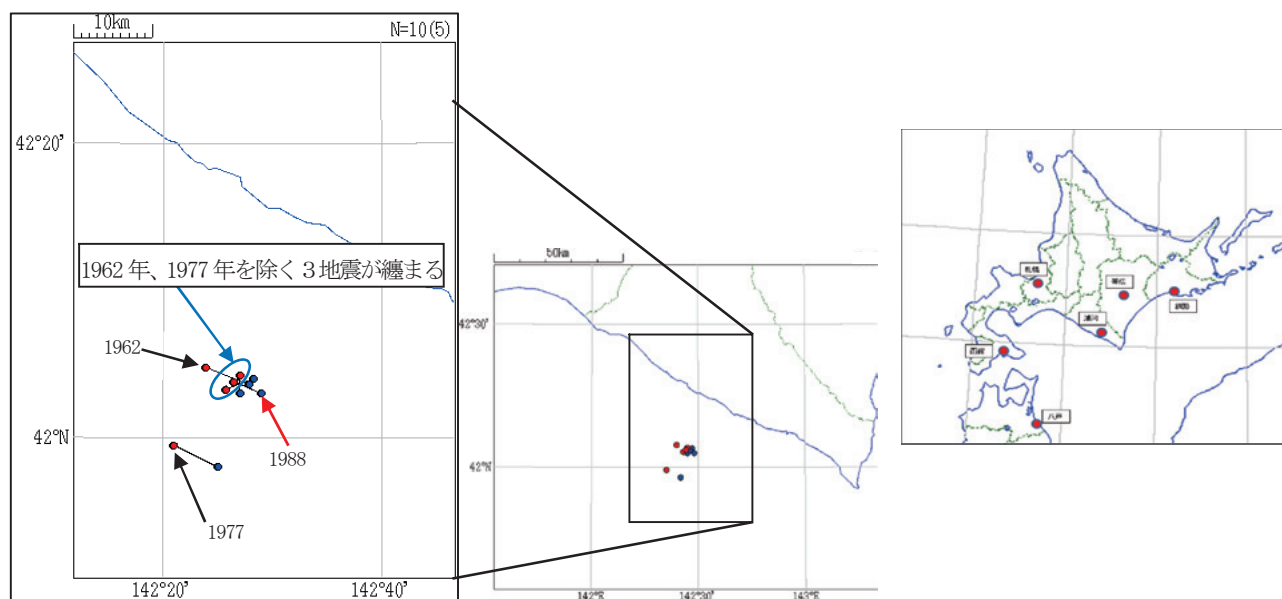


図 5. 1. 17 観測点の限定による震源再計算（1962～1988 年の 5 地震：気象庁観測点 6 点の P 相使用）。●：カタログ震源 ●：再計算後。赤矢印は図 5. 1. 16 と共通の地震を示す。

5. 1. 4. 4 発震機構解及び P 波初動分布

図 5. 1. 13 から選択した 9 地震のうち、発震機構解及び P 波初動分布のデータがあるものを図 5. 1. 18 に示す。2011 年、2004 年及び 1996 年の地震は発震機構解が求まっており、同じ型のプレート境界で発生した地震と考えられる。また、他の 5 地震についても初動分布は発震機構解の求まっている地震と同様の型の地震と矛盾はしない。

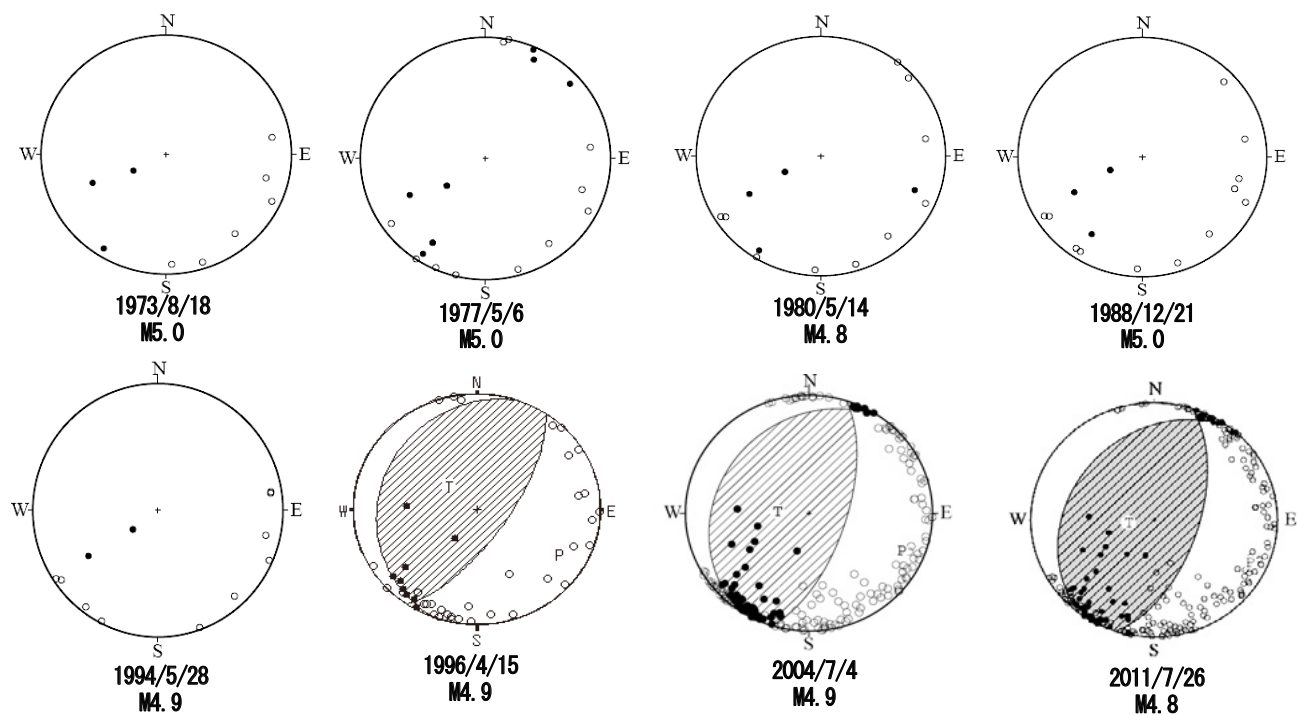


図 5. 1. 18 発震機構解及び P 波初動分布。

5.1.4.5 平均滑り速度の推定と次回の発生予測

地震波形の相似性、震源の纏まり具合、発震機構解及びP波初動分布の類似性から、図5.1.13 で抽出した9地震のうち6地震は繰り返し地震であると同定した（表5.1.8）。

この地震グループの地震発生間隔と各地震の推定すべり量から平均滑り速度5.5cm/年（図5.1.19）を得た。この値は、これらの地震が発生している付近の太平洋プレートの平均的な速度（8cmから10cm）と調和的である。なお、図5.1.20 に繰り返し地震の地震活動経過図と発生間隔を、次回の発生予測を表5.1.9に示す。

表5.1.8 同定された繰り返し相似地震とその確認結果。色つきのセルは複数観測点において波形の相似性が確認できたことを表す。

種 別 日 時	地震波形	震源再計算	発震機構解	P波初動分布
1962/09/27 18:18	—	×	—	—
1973/08/18 11:08	○	○	—	○
1977/05/06 07:14	×	×	—	○
1980/05/14 17:07	○	○	—	○
1988/12/21 19:53	○	○	—	○
1994/05/28 10:21	×	×	—	○
1996/04/15 06:44	○	○	○	○
2004/07/04 21:31	○	○	○	○
2011/07/26 07:58	○	○	○	○

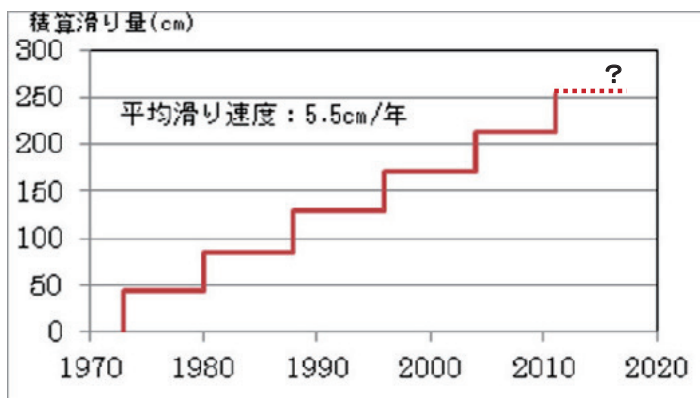


図 5.1.19 積算滑り量と平均滑り速度。

表5.1.9 繰り返し間隔と次回の予測。

平均M : 4.9

繰り返し間隔 最短 : 6.7 年

最長 : 8.6 年

平均 : 7.6 年

(標準偏差 0.71)

次回の予測

2019 年 3 月 ± 12 ヶ月

3 年以内の発生確率 : 0.4%

(予測モデル : 小標本論対数正規分布、
2012.11.1 基準、70%の確率)

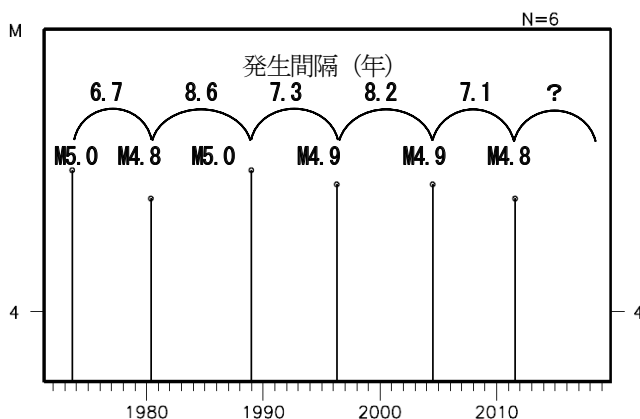


図 5.1.20 繰り返し相似地震の地震活動経過図と発生間隔。

5.1.5 十勝地方南部 (NewGroup02)

5.1.5.1 同系列と思われる地震の抽出

表5.1.1で確認したNewGroup02震央分布図(図5.1.21)と領域a内の地震活動経過図から、2003年12月12日と2012年7月22日の地震と規模および発生間隔が同程度で、プレート境界付近で発生したと思われる11地震を抽出した(表5.1.10)。なお、抽出する期間は59型電磁式地震計が整備され始めた1963年以降とした。

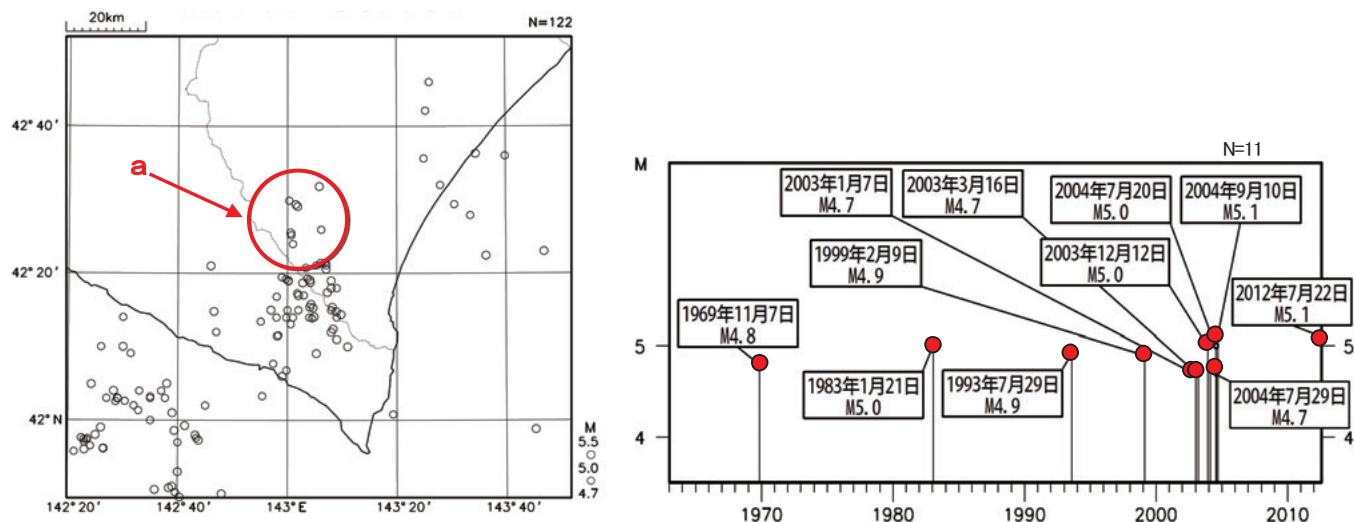


図 5.1.21 震央分布図と領域a内の地震の発生状況 (M-T 図)。1963 年 1 月 1 日～2012 年 7 月 31 日、深さ 50～100km、 $4.7 \leq M \leq 5.5$ 。

表5.1.10 相似性の確認対象とした地震 (十勝地方南部)。

番号	発 生 日 時	M	深さ (km)	番号	発 生 日 時	M	深さ (km)
1	1969/11/07 07:06	4.8	80	7	2003/12/12 10:46	5.0	59
2	1983/01/21 19:25	5.0	76	8	2004/07/20 05:58	5.0	98
3	1993/07/29 23:53	4.9	77	9	2004/07/29 13:08	4.7	50
4	1999/02/09 09:19	4.9	52	10	2004/09/10 13:22	5.1	51
5	2003/01/07 03:27	4.7	52	11	2012/07/22 13:41	5.1	61
6	2003/03/16 14:35	4.7	100				

5.1.5.2 波形の比較

選択した 11 地震の相似性を確認するため、デジタル波形データ及びアナログ波形記録の比較を行った。

(1) デジタル波形データの比較

気象庁の地震デジタル波形データは、1988 年以降のものが利用可能であるが、観測場所の移動や波形の再現ができない地震がある。このことから気象庁の波形データで相似性を確認できない地震については、北海道大学から波形データの提供を受け、波形の重ね合わせや波形相関を求め相似性の確認を行った(図 5.1.22)。この結果、2012 年、2003 年 12 月及び 1993 年の地震波形が相似であることが確認された。

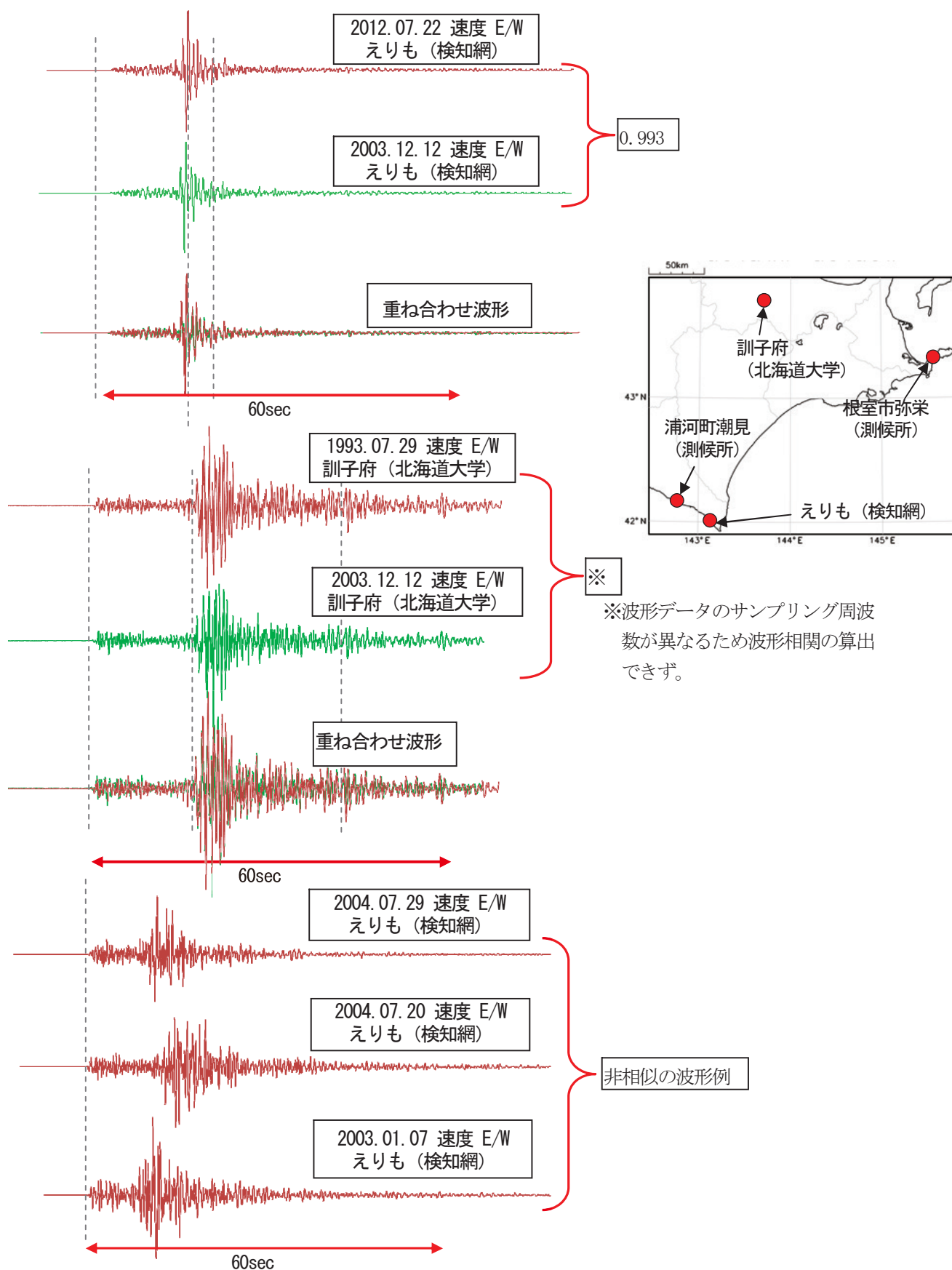


図 5.1.22 地震波形 (デジタルデータを再現) の比較。数値は波形のコヒーレンスを表す。破線は比較のための補助線である。

(2) アナログ記録の比較

デジタル波形の無い 1993 年、1983 年及び 1969 年の 3 地震については、浦河測候所及び根室測候所の 59 型電磁式地震計記録の特徴から、図 5.1.23 に示すとおり、地震波形が相似であることを確認した。

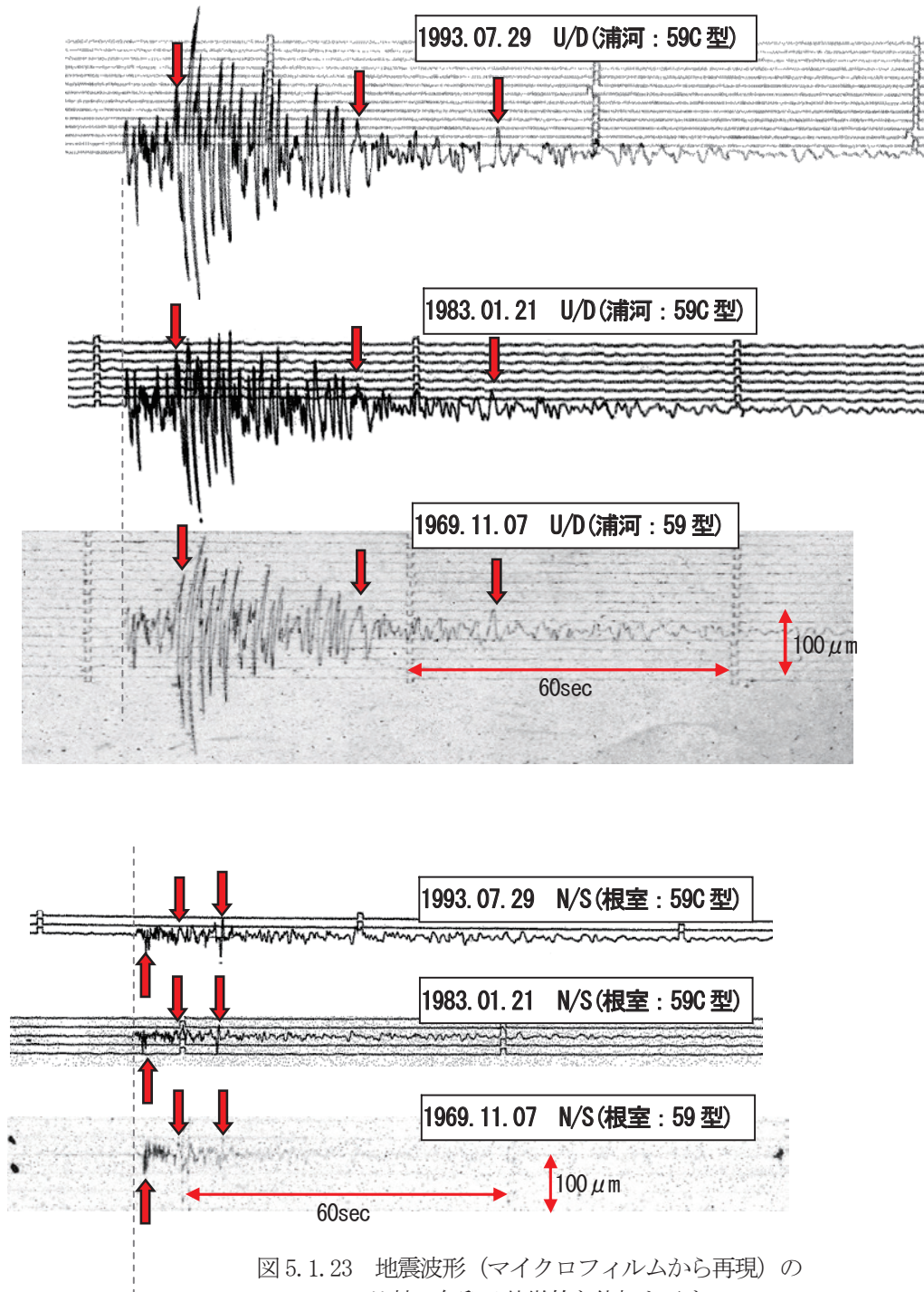


図 5.1.23 地震波形（マイクロフィルムから再現）の比較。矢印は特徴的な位相を示す。

(3) 比較結果

デジタル波形記録とアナログ波形記録の相似性の確認結果から選択した 11 地震のうち 5 地震が相似であることを確認した（表 5.1.11）。

表5. 1. 11 各観測点の記録から相似地震と認められた地震（十勝地方南部）。色つきのセルはデジタル記録の観測点において波形の相似性が確認できたことを表す。

地点（種別） 日 時	浦河測候所 (59/59C 型) アナログ記録	根室測候所 (59/59C 型) アナログ記録	えりも (検知網) デジタル記録	訓子府 (北海道大学) デジタル記録
1969/11/07 17:06	○	○	—	—
1983/01/21 19:25	○	○	—	—
1993/07/29 23:53	○	○	—	○
1999/02/09 09:19	—	—	×	—
2003/01/07 03:27	—	—	×	—
2003/03/16 14:35	—	—	×	—
2003/12 12 10:46	—	—	○	○
2004/07/20 05:58	—	—	×	—
2004/07/29 13:08	—	—	×	—
2004/09/10 13:22	—	—	×	—
2012 07 22 13:41	—	—	○	—

○：各観測点において相似と認められた地震 ×：相似と認められない地震 —：記録なし

5. 1. 5. 3 震源再計算による震源の精査

表5. 1. 10の11地震の震源について、観測点限定等を行い再決定した。ただし、11個の地震全てを同じ観測点で評価できないことから、二つの期間に分け、それぞれの期間には同じ観測点を用い、二つの期間に同一の地震（1993年）が含まれるよう再計算を行った。その結果、1993年以降の9地震では、2012年7月22日、2003年12月12日及び1993年7月29日の地震が、震央、深さ共にほぼ同一の場所に纏まった（図5. 1. 24）。また、1993年以前の3地震は半径約5km以内に纏まった（図5. 1. 25）ことから、5地震はほぼ同一場所で発生したものと考えられる。

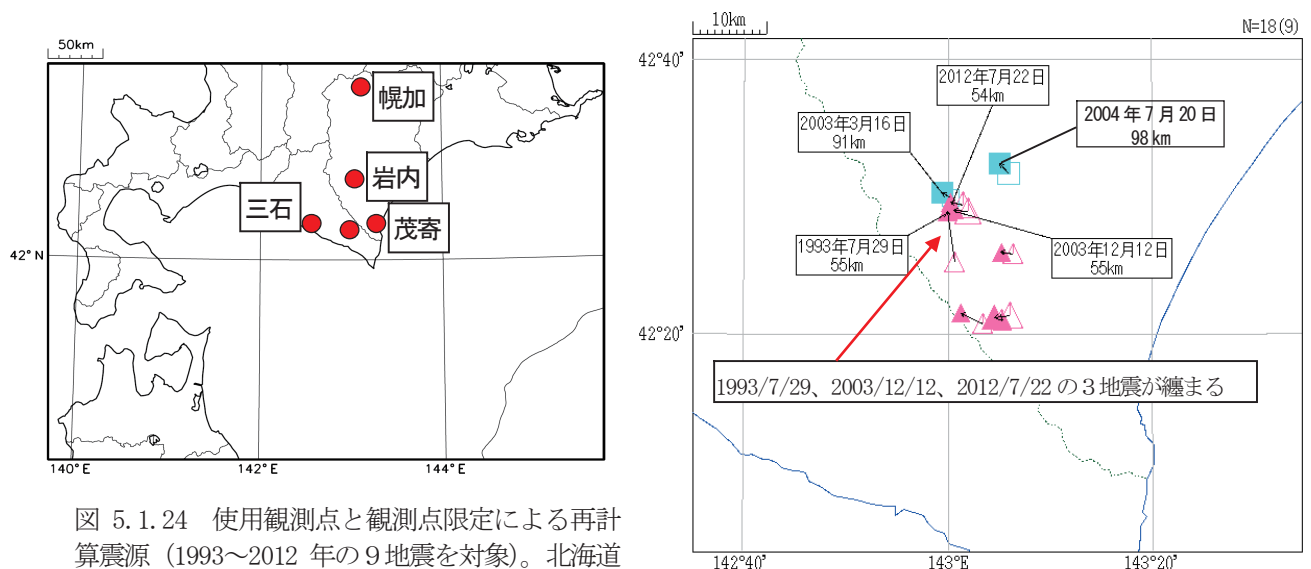


図 5. 1. 24 使用観測点と観測点限定による再計算震源（1993～2012 年の 9 地震を対象）。北海道大学観測点の P 相 6 点と S 相 1 点を使用。△：カタログ震源 ▲：再計算後。

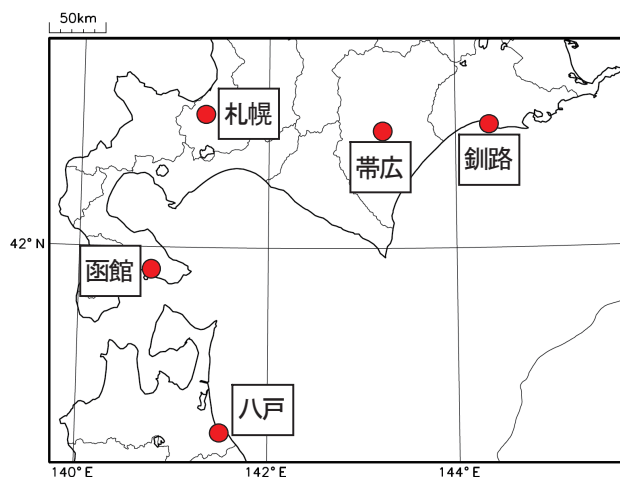
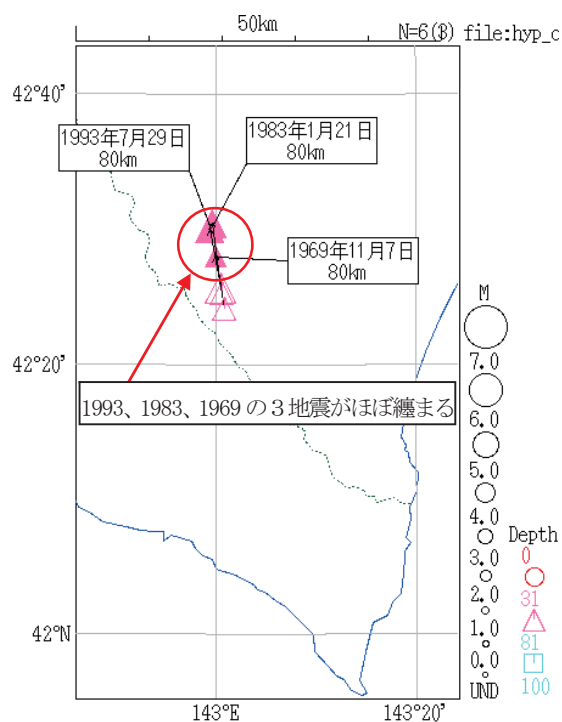


図 5. 1. 25 使用観測点と観測点限定による再計算震源 (1969～1993 年の 3 地震を対象)。気象庁観測点 5 点の P 相と帯広の S 相を使用。△：カタログ震源 ▲：再計算後



5. 1. 5. 4 発震機構解及びP波初動分布

表5. 1. 10の11地震のうち、発震機構解及びP波初動分布のデータがあるものを図5. 1. 26に示す。2012年から1993年7月29日までの地震は発震機構解が求まっており、2004年の地震を除く 4 地震は同じ型のプレート境界で発生した地震と考えられる。また、1983年及び1969年の地震も初動の分布からプレート境界で発生した地震と推測される。

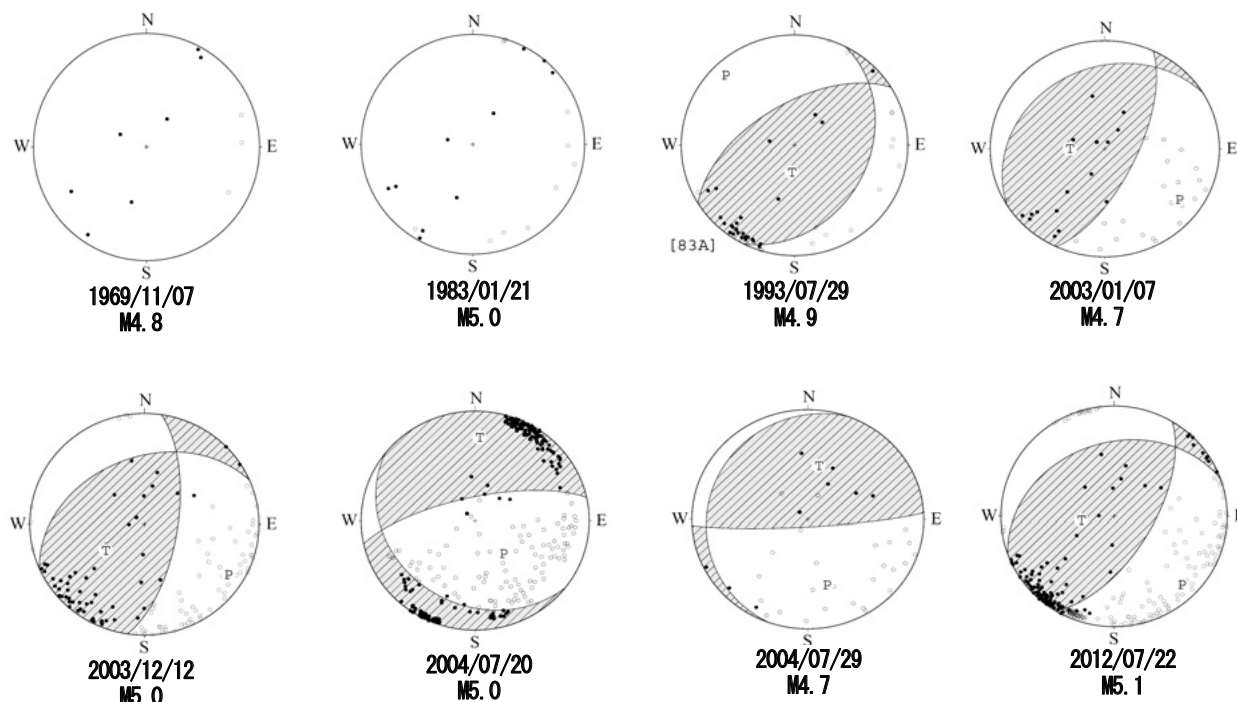


図 5. 1. 26 発震機構解及びP波初動分布。

5.1.5.5 平均滑り速度の推定と次回の発生予測

地震波形比較、震源再計算による震源の精査、発震機構解及びP波初動分布から図5.1.21で抽出した11地震のうち5地震は繰り返し地震であると同定した(表5.1.12)。この地震グループの地震発生間隔と各地震の推定すべり量から平均滑り速度4.4cm/年を得た(図5.1.27)。なお、図5.1.28に繰り返し相似地震の地震活動経過図と発生間隔を示す。また、次回の発生予測を表5.1.13に示す。

表5.1.12 同定された繰り返し相似地震とその確認結果。色つきのセルは地震波形比較・震源再計算を含む複数の手段によって確認できたことを表す。

種 別 日 時	地震波形	震源再計算	発震機構	P波初動分布
1969/11/07 17:06	○	○	—	○
1983/01/21 19:25	○	○	—	○
1993/07/29 23:53	○	○	○	○
2003/01/07 03:27	×	×	○	○
2003/03/16 14:35	×	×	—	—
2003/12/12 10:46	○	○	○	○
2004/07/20 05:58	×	×	×	×
2004/07/29 13:08	×	×	×	×
2004/09/10 13:22	×	×	—	—
2012/07/22 13:41	○	○	○	○

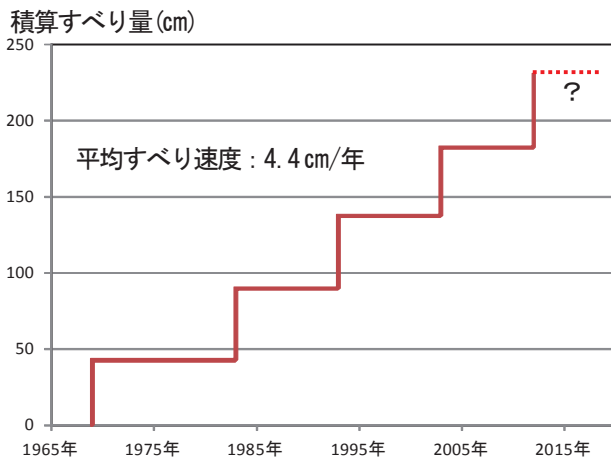


図 5.1.27 積算滑り量と平均滑り速度。

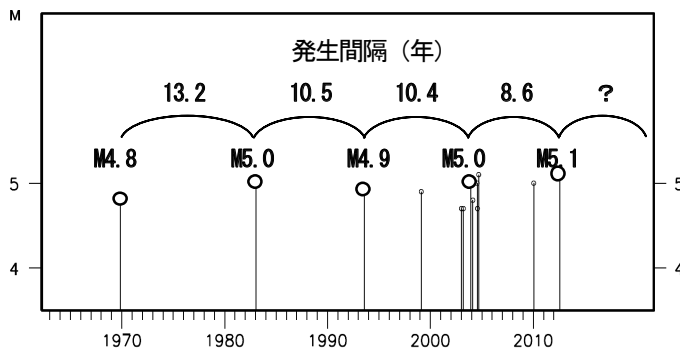


図 5.1.28 繰り返し相似地震の地震活動経過図と発生間隔。

表5.1.13 繰り返し間隔と次回の予測。

平均M : 5.0
 繰り返し間隔 最短 : 8.6 年、
 最長 : 13.2 年、
 平均 : 10.7 年
 (標準偏差 1.64)
 次回の予測 : 2023 年 6 月 ± 32 ヶ月
 3 年以内の発生確率 : 0.5%
 (予測モデル : 小標本論対数正規分布、
 2012.11.1 基準、70%の確率)

5.1.6. 釧路沖 1 (Group30、123)

本項の論文は、日本地震学会からの転載許可を受けて掲載している。

(佐鯉央教・松山輝雄・平山達也・山崎一郎・山本剛靖・一柳昌義・高橋浩晃, 2012 : 釧路沖の中規模繰り返し地震活動, *地震*2, **65**, 151-161)

釧路沖の中規模繰り返し地震活動

気象庁札幌管区気象台* 佐 鯉 央 教[†]・松 山 輝 雄
平 山 達 也 ・山 崎 一 郎
山 本 剛 靖[†]

北海道大学大学院理学研究院附属地震火山研究観測センター** 一 柳 昌 義 ・高 橋 浩 晃

Moderate Repeating Earthquakes off Kushiro, Eastern Hokkaido, Japan

Hisayuki SAKOI[†], Teruo MATSUYAMA, Tatsuya HIRAYAMA,
Ichiro YAMAZAKI and Takeyasu YAMAMOTO[†]

Sapporo District Meteorological Observatory, Japan Meteorological Agency,
Kita 2, Nishi 18, Chuo-ku, Sapporo 060-0002, Japan

Masayoshi ICHIYANAGI and Hiroaki TAKAHASHI

Institute of Seismology and Volcanology, Graduate School of Science, Hokkaido University,
Kita 10, Nishi 8, Kita-ku, Sapporo 060-0810, Japan

(Received June 29, 2012; Accepted September 7, 2012)

We identified 10 moderate sized repeating earthquakes from 1954 to 2010 off Kushiro region, eastern Hokkaido, Japan, by careful visual and quantitative inspections of waveform data. Relocated hypocenters calculated by reconfirmed arrival time data indicated that these earthquakes occurred at the same location on the interface between the subducting Pacific plate and the overriding plate. Reanalysis of focal mechanisms of recent three events showed approximately the same solution. These facts strongly suggested recurrent rupturing of an asperity. Average magnitude and average recurrence interval were $M4.9$ and 6.2 ± 0.88 years, respectively. Estimated average slip rate was 6.5 cm/year , which is equivalent to an interplate coupling ratio of 78–86%. The next earthquake is expected to occur in a period between May 2015 and July 2017 with a 70% probability based on the small sampling theory with a lognormal distribution model. Recurrent interval tended to shorten when large earthquakes occurred in the surrounding region. This might suggest recurrence interval is probably affected by the stress disturbance due to coseismic and postseismic slip on the plate interface.

Key words: Repeating earthquake, Waveform similarity, Recurrence interval, Off Kushiro, Hokkaido

§1. はじめに

近年、プレート沈み込み境界における地震発生メカニズムに関する様々な仮説が提唱されてきている [松澤 (2009)]. たとえば, Matsuzawa *et al.* (2004) は沈み込み境界には準静的すべり域に囲まれた大小様々な大きさのアスぺリティが存在し, 準静的すべり域における非地震

性すべりの進行がアスぺリティの破壊を引き起こしているという仮説を提唱した.

この仮説の構築の基になったのは, 釜石沖で見いだされた特徴的な地震活動である. Matsuzawa *et al.* (2002) は, 釜石沖で $M4.9$ 前後の地震が繰り返し発生していること, その累積すべり量がプレート間相対すべり量とほぼ同じ程度になることなどから, この地震系列が準静的すべり域に囲まれた小さなアスぺリティで繰り返し発生していることを示した. なお, このように特定のアスぺリティが繰り返し破壊して発生する地震 (repeating earth-

* 〒060-0002 札幌市中央区北 2 条西 18 丁目

** 〒060-0810 札幌市北区北 10 条西 8 丁目

[†] 現所属: 気象庁地震火山部

〒100-8122 東京都千代田区大手町 1-3-4

quake) に対して松澤 (2001) は「繰り返し地震」の語を当てており、本稿でもこれに倣って、以降「繰り返し地震」の語を用いることにする。

Igarashi *et al.* (2003) は、東北日本の太平洋側において、波形の相関性が高い地震の組み合わせを抽出することでマグニチュード (M) 3.0~4.6 の小規模な繰り返し地震を多数検出した。そして、これらの地震がより大きな地震のアスペリティを避けて分布していることを示した。また、小繰り返し地震の発生頻度の変化がプレート境界の非地震性すべり速度の変化を反映していることを指摘した。

$M4.5 \sim 7.0$ の中規模地震について波形の相似性を網羅的に調査することによって繰り返し地震を抽出することは、内田・他 (2010a) により比較する 2 つの地震のうち小さい地震のコーナー周波数付近の相関値をみることで抽出する手法が提案されている。しかし、小繰り返し地震に比べて繰り返し間隔が長くなるのに対してデジタル波形が利用できる期間に限られるため、アナログ波形まで利用し個々の地震活動に着目して行われてきたのが現状である。たとえば、溜渕・他 (2010) は沖縄地方の宮古島近海で $M5.1$ 前後の繰り返し地震を見いだした。この系列を含めた沖縄地方や東北地方、関東地方の中規模繰り返し地震系列について気象庁地震予知情報課 (2009) が報告している。検知能力からみれば、小繰り返し地震は大学の微小地震観測網の地震波形データが利用可能な 1980 年代ぐらいまでしか遡れないのに対し、中規模繰り返し地震はそれ以前にまで遡れることが期待される。気象庁震源カタログにおける地震の検知能力は、たとえば千島海溝から日本海溝にかけての海域で 1960 年代まで $M4.5$ は確保できている [太田・他 (2002), Katsumata (2011)]。このことから、中規模繰り返し地震を見いだすことは、より長期間のプレート沈み込みの履歴を明らかにする可能性がある点で重要である。

北海道太平洋側の沖合では千島海溝から太平洋プレートが沈み込んでいて、 $M8$ 前後の巨大地震が十勝沖 (1952 年及び 2003 年) や根室沖 (1973 年) で発生している。また、2003 年の十勝沖地震の後にゆっくりすべりの発生が GPS によって観測される [Ozawa *et al.* (2004)] など、多様な沈み込み様式を示している地域である。この地域では、Matsubara *et al.* (2005) や Uchida *et al.* (2009) により小繰り返し地震の時空間分布が調べられているが、中規模繰り返し地震については未発見であった。

われわれは、この地域のうち釧路沖で $M4.9$ 程度の中規模地震が繰り返し発生していることを見いだした。そして、地震波形の相似性に関する検討と震源の再決定を

行って、これらの地震が繰り返し地震であることを確認した。本稿ではそれらの解析の詳細について報告する。

§ 2. 繰り返し地震の同定

2.1 地震の概要と繰り返し地震の抽出

2010 年 4 月 9 日 3 時 41 分に釧路沖 (釧路町知方学^{ちほまな}の南方沖約 3 km) の深さ 57 km で $M4.8$ の地震 (最大震度 4) が発生した。この地震は、Fig. 1 (a) が示すように「平成 15 年 (2003 年) 十勝沖地震」($M8.0$) と「1973 年 6 月 17 日根室半島沖地震」($M7.4$) の 2 つの地震の余震域に挟まれた場所で発生した。更に、この挟まれた領域において、2004 年 11 月 29 日に $M7.1$ の地震が発生しているが、その余震域からも西側に外れており、今回の地震は周辺の規模が大きい地震の余震域から外れている場所で発生した。

気象庁では、1997 年 10 月から大学等の関係機関から提供された地震観測データを併せて一元的に処理することにより、高精度の震源の決定が可能となった (地域地震情報センター業務: 以下、一元化)。この一元化以降の気象庁震源カタログの震源分布を見ると、今回の地震の震源とほぼ同一の場所で、2000 年 6 月 13 日と 2005 年 5 月 19 日に同規模の地震が発生している。これらの地震の P 波初動分布と発震機構解を Fig. 1 (b) に示す。P 波初動の読み取り値の有無によって解の節面が違ってしまふことを回避するため、P 波初動の読み取り値は 3 個の地震に共通した観測点網 (気象庁及び大学) のみに限定して節面を決定した。得られた発震機構は、非常によく似た初動分布と節面を持つ西北西-東南東方向に圧力軸を持つ低角逆断層型であり、この地域で発生する太平洋プレートと陸のプレート境界で発生する地震の典型的な型であった。

また、これら 3 個の地震は約 5 年間隔で発生しており (Fig. 1 (c)), 繰り返し地震である可能性があると考えられた。そこで、一元化以前の期間についても、気象庁震源カタログを用いてこの場所での繰り返し地震の有無について調査を行った。

Fig. 2 に 1954 年 6 月から 1997 年 9 月までの深さ 30 ~ 90 km, $M4.5 \sim 5.5$ の地震の震央分布を示す。さらに、一元化以降で繰り返し地震である可能性のある 3 個の地震の震央を逆三角印で示している。地震を抽出する期間は、気象庁が 53 型地震計を北海道東部で整備し始めた 1954 年 6 月以降とした。1997 年 10 月の一元化以前では、観測点数が少なく震源位置の誤差は大きいと推測される。よって、繰り返し地震の候補を抽出する領域を 2010 年の震央付近を含む厚岸湾より約 15 km 沖合を中心半径 20 km 以内 (Fig. 2 の円内) に設定した。深さ

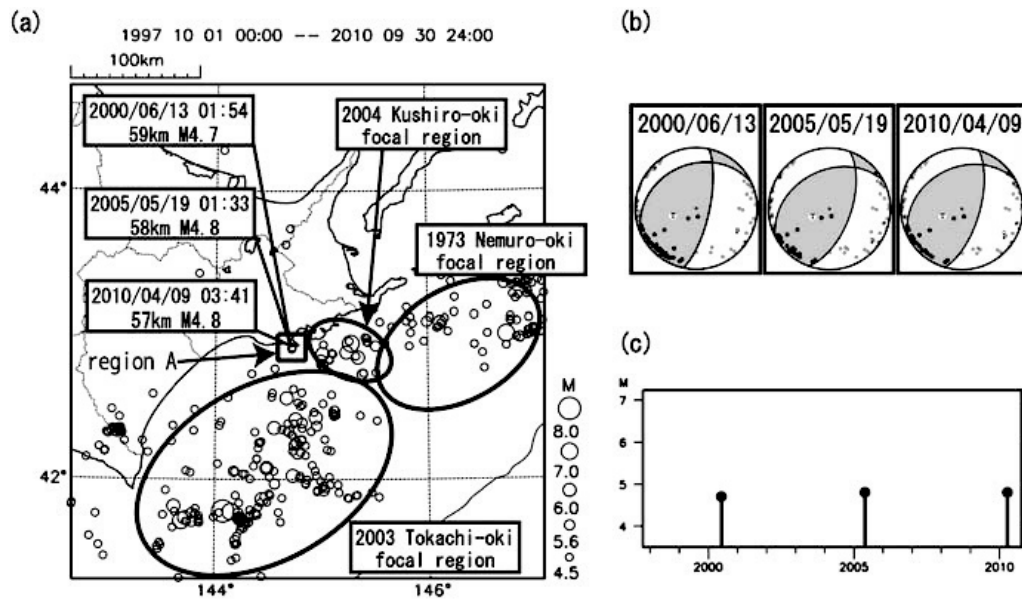


Fig. 1. (a) Seismic activities in the eastern Hokkaido and the surrounding region. Open circles denote epicenters in the period from October 1997 to September 2010 ($M \geq 4.5$, depth ≤ 70 km). Thick ellipses denote the focal regions of 1973 Nemuro-oki, 2003 Tokachi-oki and 2004 Kushiro-oki earthquakes. (b) Focal mechanism solutions of three earthquakes in the 'region A' by P-wave first motion polarity data. (c) Magnitude-Time diagram of the three earthquakes.

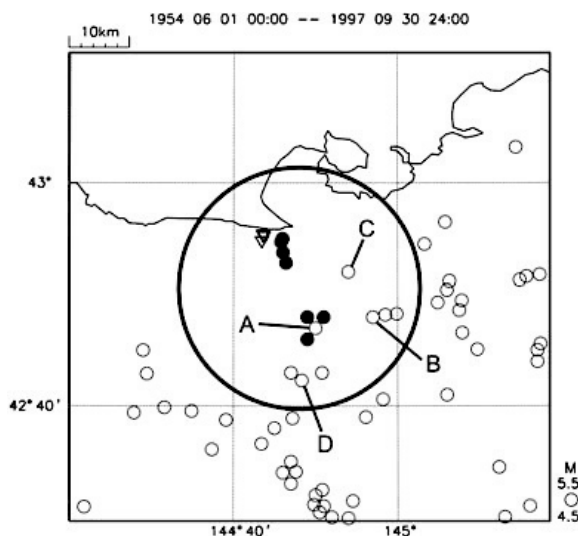


Fig. 2. Distribution of epicenters off Kushiro in the period from June 1954 to September 1997 ($4.5 \leq M \leq 5.5$, $30 \text{ km} \leq \text{depth} \leq 90 \text{ km}$). Large thick circle denotes the repeating earthquake study area. Solid circles denote identified repeating earthquakes. Epicenters labeled A-D are non-repeating earthquakes records of which are shown in Fig. 5 (b)-(c). Inverted triangles show repeating earthquakes after October 1997.

さらに、地震の規模の範囲は $M4.5 \sim M5.5$ とした。調査対象として抽出された地震の発生年月日を Table 1 に示す。これらの地震について波形の相似性から繰り返し地震を選別した。次節に波形相似性の詳細について述べる。

2.2 波形相似性の確認

繰り返し地震は同一アスペリティの破壊と考えられており、お互いの地震波形が似ていることが大きな特徴である。そこで、それぞれの地震波形について、波形の相似性を調査し、繰り返し地震の同定を行った。

1954 年 6 月から現在まで、同一場所かつ同一の地震計で継続して観測を続けている地点は無い。そのため、複数地震で共通する観測点の波形を比較し、その結果をつなぎ合わせることで地震波形の相似性を評価した。

デジタル波形がある地震 (1992 年～) については、相関係数を計算し、波形の相似性を定量的に評価した。

Fig. 3 に一元化以降の 2000 年, 2005 年, 2010 年の地震の気象庁観測点の根室豊里 (TOYOSA), 羅臼 (RAUSU), 十勝忠類 (CHURUI) と北海道大学観測点の浦幌 (HU. URH), 訓子府 (HU.KNP) における上下動成分変位波形とその相関係数を示す。これら 3 個の地震の波形を比較すると、波形の細かい部分まで相互によく似ており、更に相関係数が 0.95 程度と非常に高く、繰り返し地震と判断される。また、水平動の波形についても同様に高い相関係数を得た。

一元化以前を含む 1992 年以降の 4 個の地震に対して、

の範囲は、一元化以降の震源の深さが 57～59 km であることからその前後約 30 km とし 30～90 km とした。

Table 1. Data set used for the identification of repeating earthquakes. Double circles and circles denote digital and analogue data of repeating earthquake, respectively. Mark 'X' denotes analog data of non-repeating earthquake.

	REDC (JMA, Hokkaido Univ.)	HU.OKS (UD vel.)	KUSHIR (Type 59)	NEMURO (Type 59 or 61)	OBIHIR (Type 53 or 54C)
1954/09/17					○
1958/09/14					×
1960/09/03					○
1961/08/10					×
1962/01/22					×
1966/12/12				○	○
1969/02/17				×	
1973/06/16			○	○	
1979/05/17				○	
1979/08/03			×	×	
1980/07/14				×	
1985/06/07			○	○	
1986/07/07			×	×	
1991/04/24				×	
1992/11/30		◎	○	○	
2000/06/13	◎	◎			
2005/05/19	◎	◎			
2010/04/09	◎	◎			

北海道大学奥尻青苗 (HU.OKS) 観測点のみが同一地震計のデジタル波形を記録している。この観測点は震源から遠く離れているため、波形記録の脈動が大きく S/N 比が低い。そこで 1 Hz のハイパスフィルターを処理した変位波形に対して相関係数を計算し、0.90 程度と高い値を得た (Fig. 4)。

以上の解析により、デジタル記録が残る 1992 年以降の 4 個の地震に対しては、波形間に高い相関係数が得られていることから繰り返し地震であると考えられる。

1992 年より前の地震の波形については、マイクロフィルムのアナログ記録となる。アナログ記録では、相関係数のような定量的な評価が難しい。そこで、波形の全体的な相似の他、波形の中にある特徴的なフェイズの時間差の比較から相似性を検証した。

Fig. 5 (a) に旧釧路地方気象台 (KUSHIR) の 59 型地震

計の上下動成分変位波形を示す。各地震の波形は全体的な比較からは相互によく似ている。特に、特徴的なフェイズ (Fig. 5 中の丸、四角及び逆三角印) の振幅の大小関係が非常に似ている。また、これらの特徴的なフェイズの時間差がほぼ同一であることから、これらの地震は繰り返し地震である可能性が非常に高い。同様の波形比較を根室測候所 (NEMURO) の 59 型上下動成分変位波形、61 型東西動成分変位波形に対しても行った (Fig. 5 (b))。59 型の比較において、丸印を付けたパルス状の変位や逆三角印を付けた鋸歯状の変位などの特徴が良く似ており、61 型の比較においても、最大振幅付近が E 側に大きく片寄って振れる点などの特徴が酷似している。また、特徴的なフェイズの時間差もほぼ同一であった。1966 年以前の地震に対しては、帯広測候所 (OBIHIR) の 53 型、54C 型上下動成分変位波形のみが波形比較に

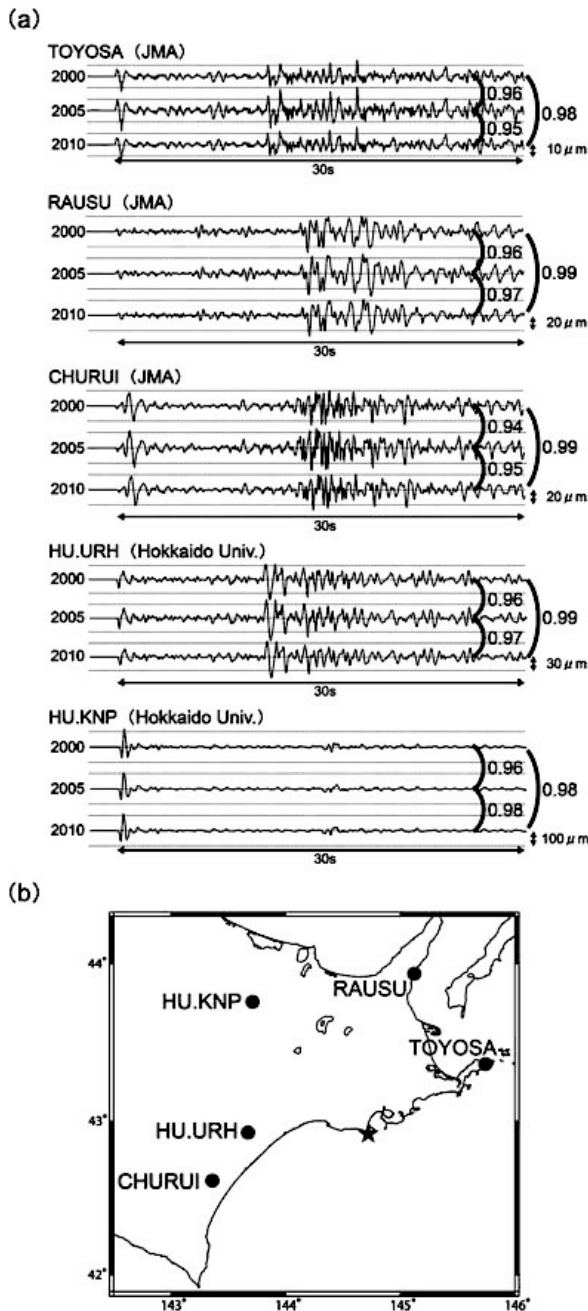


Fig. 3. (a) Original displacement waveforms (the UD component) of the repeating earthquakes in 2000, 2005 and 2010 observed at five stations. The correlation coefficient of each pair of waveforms is indicated on the right side. (b) Locations of the five observation stations. The star denotes the epicenter of the repeating earthquakes.

耐えうる記録を残している (Fig. 5 (c)). 旧釧路地方気象台および根室測候所の記録と比較すると、波形の相似性の議論は難しいものの、特徴的なフェイズの時間差はほぼ同一であり、これらの地震も繰り返し地震であると判断した。

繰り返し地震と判断した地震の震央を Fig. 2 に黒丸

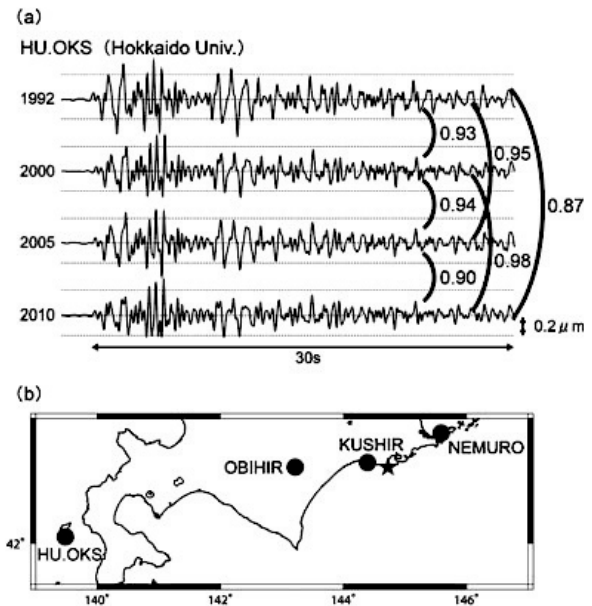


Fig. 4. (a) Filtered displacement waveforms (the UD component) of the repeating earthquakes in 1992, 2000, 2005 and 2010 observed at the Hokkaido University Okushiri Aonae (HU.OKS) station. The correlation coefficient of each pair of waveforms is indicated on the right side. (b) Locations of the observation station in (a) and Fig. 5 (a)-(c). The solid star denotes the epicenter of the repeating earthquakes.

印で示すとともに、発生年月日および比較調査項目の対応結果を Table 1 に示す。各観測点における地震どうしの波形が似ている結果をすべてつなぎ合わせることで、波形の相似性の高い 1954 年 6 月以降の 10 個の地震は繰り返し地震と判断できた。

一方、波形に相似性がなく、繰り返し地震ではないと判断した地震のうち、Fig. 2 に A~D を付した 4 個の地震について波形の例を示す。A (1958 年) では、繰り返し地震には丸印を付けた位置からいくつか見られる U 側へ飛び出るようなピークが見られず、また、逆三角印が付いた位置から始まる振幅の大きな波形の細かい形状が異なる (Fig. 5 (c)). B (1980 年) では、繰り返し地震の波形の最大振幅 (四角印) とその前後のピーク (丸及び逆三角印) の組み合わせという特徴的な形状が出ていない (Fig. 5 (b)). また、C (1969 年) では、振幅が小さい上に繰り返し地震の波形の特徴である E 側に片寄った振動をしていない (Fig. 5 (b)). D (1991 年) では、振幅が大きい上に最大振幅部分の波形が繰り返し地震の波形と全く異なっている (Fig. 5 (b)). これら以外の地震についても、C や D と同様に、振幅や全体の形状が全く異なっていた。以上のように、繰り返し地震ではない地震波形は明らかに波形の特徴に違いがあることがわか

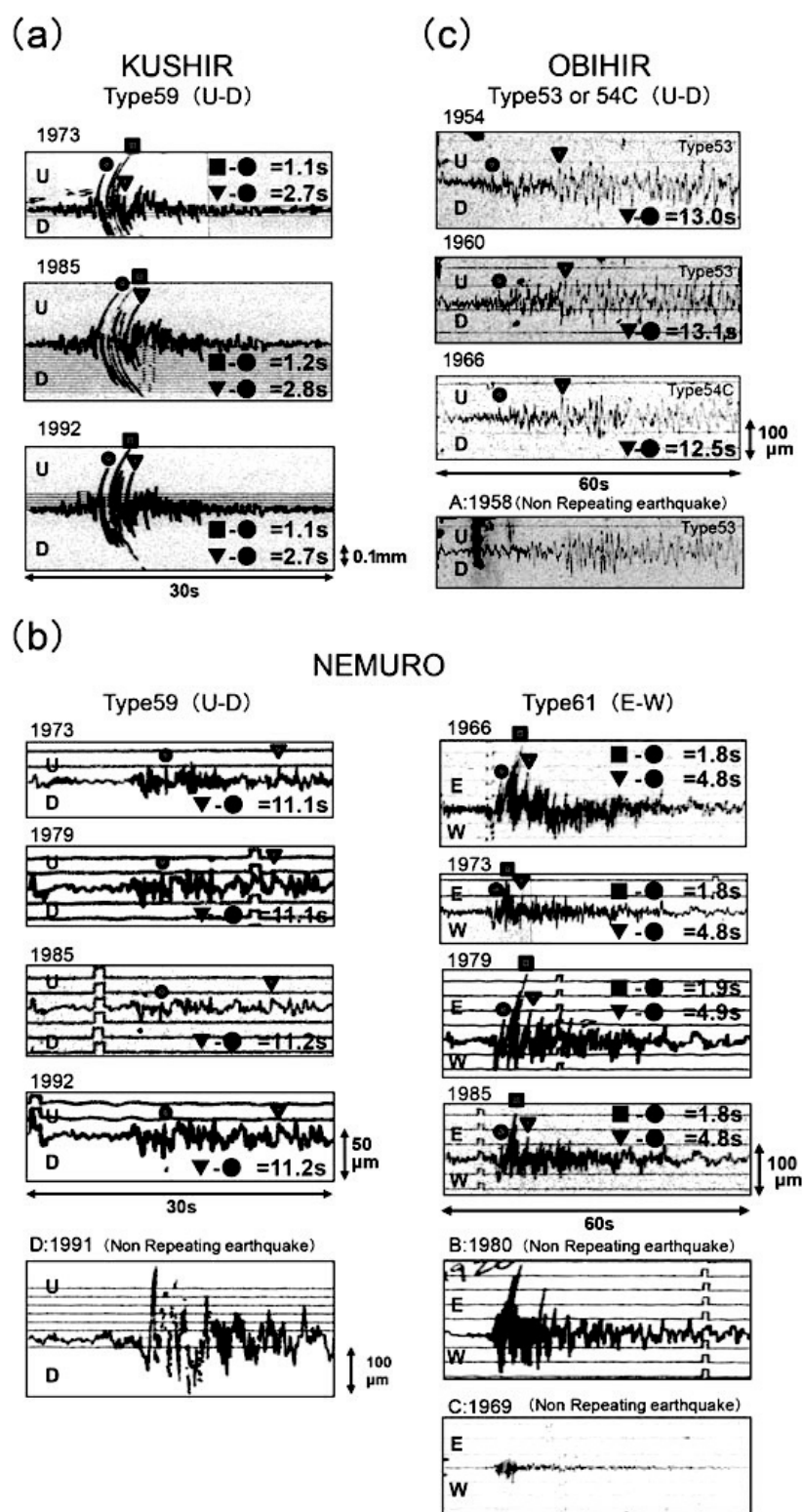


Fig. 5. Records of repeating and non-repeating earthquakes. (a) Seismograms (the UD component) observed by the type 59 seismograph at the JMA Kushiro Local Meteorological Observatory (before move) (KUSHIR). (b) Seismograms observed by the type 59 (the UD component) or type 61 (the EW component) seismograph at the JMA Nemuro Weather Station (NEMURO). (c) Seismograms (the UD component) observed by the type 53 or 54C seismograph at the JMA Obihiro Weather Station (OBIHIR). Circles, inverted triangles and squares denote their characteristic phases.

り、釧路沖で発生した繰り返し地震の検出は波形の相似性を用いることによって可能であることが示された。

§ 3. 繰り返し地震の震源再計算

波形の相似性から抽出した 10 個の繰り返し地震の震央分布図を Fig. 2 に示す。M5 程度の地震の震源断層の大きさは 2~3km 程度であり、繰り返し地震が同一のアスぺリティで発生しているとすれば、震源位置もこの程度の範囲ではほぼ同一であることが必要である。観測点が増えて震源の決定精度が高まった一元化以降の 3 個の地震 (Fig. 2 の逆三角印) については、震源位置はほぼ同じ位置に決定されている。しかし、一元化以前の 7 個の地震 (Fig. 2 の黒丸印) のうち 4 個の震央は一元化以降の震央から約 3~6km 東から南東に、3 個の震央は約 17km 東南東に離れている。つまり、気象庁震源カタログにおいて、繰り返し地震として抽出した 10 個の地震の震央は 3 つの領域に分かれて分布している。

この震央分布のばらつきは震源計算に使用する観測点の相違や相の読み取り誤差による結果と考えられる。特に観測点が気象官署のみの時期の震源は、1 つの観測点での位相の読み間違いや相の有無が震源位置に大きく影響することが懸念される。そこで、マイクロフィルムによる地震波形を見返し、各地震の相の読み取り位置が一致しているかどうかを精査し、場合によっては相の読み直しを行った。更に、震源計算に使用する観測点及び相を限定した震源再計算を行うことで、観測点の組み合わせの違いによる系統的誤差の無い、震源の相対位置関係を求めた。なお、震源計算には気象庁が一元化業務で使用しているプログラム [浜田・他 (1983)], 走時表は JMA 2001 [上野・他 (2002)] を使用した。

Fig. 6 (a) に一元化 (1997 年 10 月) 以前の 1954 年から 1992 年の 7 個の地震について、震源再計算に使用した観測点を示す。古い時期の波形記録は分解能が良くないために読み取りが不正確な相を外した結果、観測点を限定して震源決定に使用した相は 7 個の地震全てに対して同じ 6 観測点 8 要素 (P 相 3 点) となった。観測点は震源を囲むように分布している。Fig. 6 (b) に観測点限定による震源再計算結果を示す。気象庁震源カタログでは 10km 以上離れて 2 つの領域に分かれていた震央分布は、再計算によりその広がりが明瞭に小さくなり、直径 5km 程度の範囲内に収まった。深さは、最も古い 1954 年の地震が他よりも約 10km 深く求まることを除き、6km の範囲内に収まった。この程度の震源の広がりは、得られた震源の緯経度誤差が 1~6km 程度となったこと、震源決定に使用した観測点の分布が粗いこと、及び当時の波形記録からの相の読み取り精度を考慮する

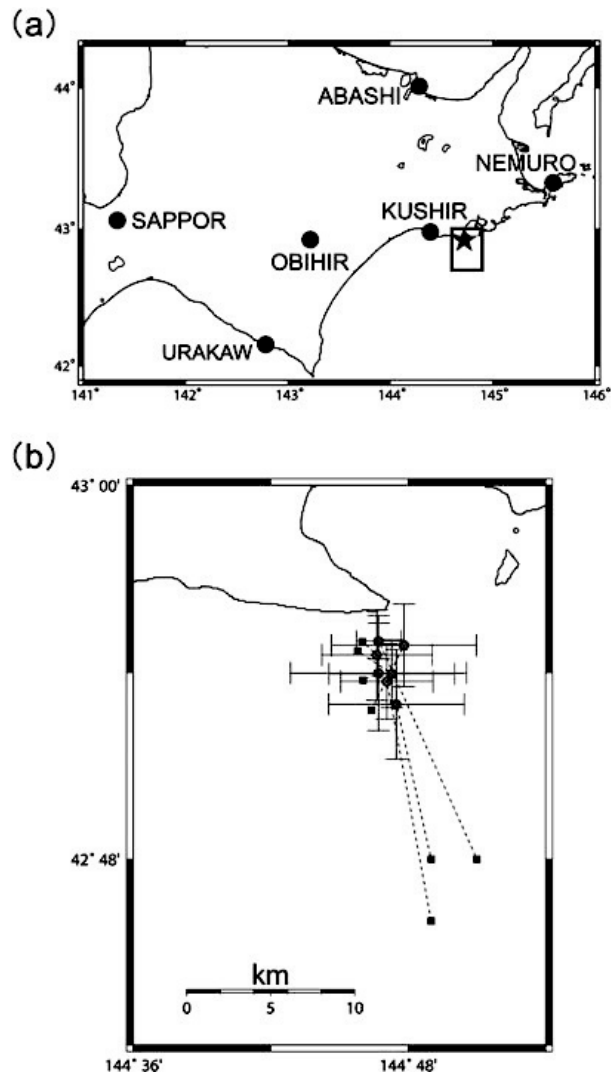


Fig. 6. Result of hypocenter relocation of seven repeating earthquakes in 1954-1992 based on the waveforms observed at six JMA stations. (a) Location of the observation stations used for the relocation. Rectangle expresses the area shown in Fig. 6 (b). (b) Location of the epicenters. Circles: relocated epicenters. Squares: JMA catalog epicenters. Bars: error ranges of the latitude and longitude directions.

と充分許容範囲であり、これら 7 個の地震は同一場所で発生したと判断してよいと考えられる。

同様に 1985 年から 2010 年の 5 個の地震については、北海道大学が継続して観測をしている観測点を使用して観測点を限定した震源再計算を行った。Fig. 7 (a) に震源再計算に使用した観測点分布を、Fig. 7 (b) に震源再計算結果を示す。使用した観測点は震源を囲むように選択した 6 点である。これらの地震の北海道大学の波形記録では、S 相部分が振りきれて不明瞭なものが含まれる。よって、相の読み取りが確実であると推測される P 相

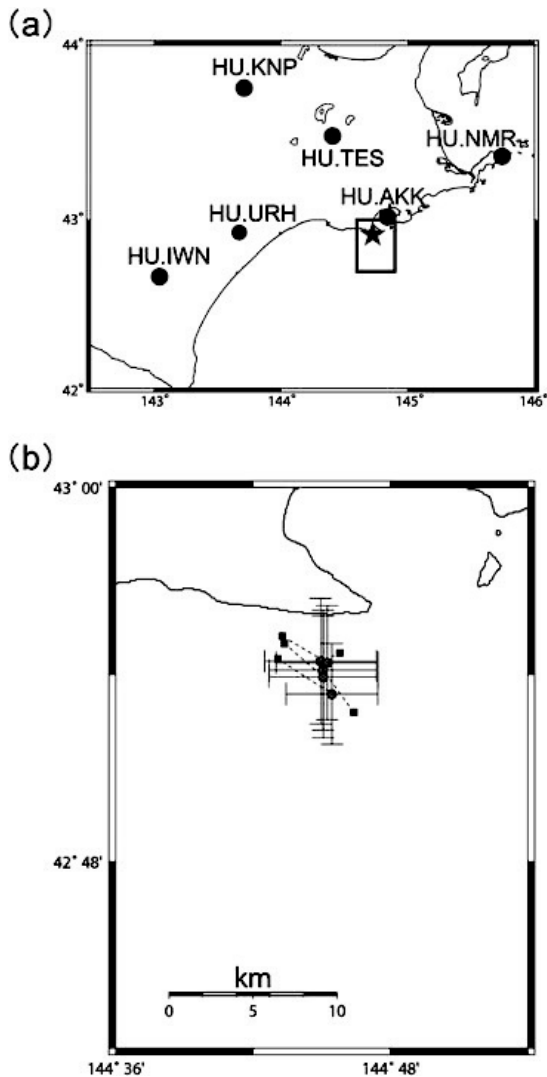


Fig. 7. Result of hypocenter relocation of five repeating earthquakes in 1985–2010 based on the waveforms observed at the Hokkaido University stations. (a) Location of the observation stations used for the relocation. Rectangle expresses the area shown in Fig. 7 (b). (b) Location of the epicenters. Circles: relocated epicenters. Squares: JMA catalog epicenters. Bars: error ranges of the latitude and longitude directions.

のみを用いて震源再計算を行った。その結果、一元化前後で分かれて分布していた震源は、1 km 以内に収まった深さ方向も含めて、ほぼ1箇所に集まり、これらの5個の地震は同一場所で発生したと判断できる。

以上2つの観測点限定による震源再計算結果では、共に1985年と1992年の地震が共通している。従って、2つの震源再計算結果より、繰り返し地震として抽出した10個の地震は震源位置においてほぼ同じ場所で発生していると考えられ、繰り返し地震が同一のアスペリティで発生している可能性を強く示す結果となった。

§ 4. 議 論

相関係数による波形相似性の確認、及び観測点限定による震源再計算を行った結果、釧路沖では中規模の繰り返し地震が1954年6月以降10個発生していることが明らかになった。この地震の繰り返し間隔はFig. 8に示すように、最短が4.9年、最長が7.5年で平均は6.2年（標準偏差0.88年）であった。

気象庁震源カタログに掲載されている地震の規模（マグニチュード, M ）は、適用された計算方法が地震によって異なる。また、本研究で行った震源再計算により震源位置が大きく変化したものがある。そこで、10個の地震すべてが変位 M 計算式〔勝間田 (2004)〕を用いた結果に統一されるよう再計算した。このとき、観測点数が少ない古い地震では1つの観測点の有無で M の値が見かけ上異なる可能性がある。そこで、一元化以前の7個の地震については、全ての地震で共通して変位振幅の読み取り値がある5観測点（釧路、根室、網走、浦河、札幌）の平均値とすることで観測点の有無によるばらつきの無い変位 M を求めた。一元化以降の3個の地震については、観測網が大きく変わったため前述した5観測点の変位記録は無いが、変位振幅の読み取り観測点が多く、観測点の有無による影響が軽減されていると判断して、全ての観測点の平均値を変位 M とした。

釧路沖の繰り返し地震活動経過を縦軸にマグニチュード、横軸に時間をとってFig. 8に示す。 M は4.7～5.1の範囲で、平均規模は M 4.9であった。ほぼ同じ平均規模 (M 4.9) である釜石沖の繰り返し地震系列の繰り返し間隔は平均5.6年（最短4.7年、最長6.7年）、標準偏差0.67年〔内田・他 (2010b)〕である。また、宮古島近海の地震 (M 5.1) では平均5.9年（最短5.0年、最長6.9年）、標準偏差0.73年〔溜淵・他 (2010)〕であり、他地域で発生した中規模繰り返し地震活動と比較して、ばらつきの程度に大きな違いはない。

次に、この繰り返し地震系列のすべり量を推定した。Uchida *et al.* (2003) や溜淵・他 (2010) に倣い、モーメントマグニチュード (M_w) と地震モーメント (M_0) の変換には Hanks and Kanamori (1979) の式

$$\log(M_0) = 1.5M_w + 16.1 \quad (1)$$

を、地震モーメントからすべり量への変換には Nadeau and Johnson (1998) の式

$$\log(d) = -2.36 + 0.17\log(M_0) \quad (2)$$

を用いた。ただし、再計算した変位 M をモーメントマグニチュードとみなして計算に使用した。結果をFig. 9に示す。平均すべり速度は6.5 cm/年となった。一方、千島海溝における太平洋プレートと陸側プレートに対する相対すべり速度は、7.6 cm/年 [Sella *et al.* (2002)], あ

釧路沖の中規模繰り返し地震活動

159

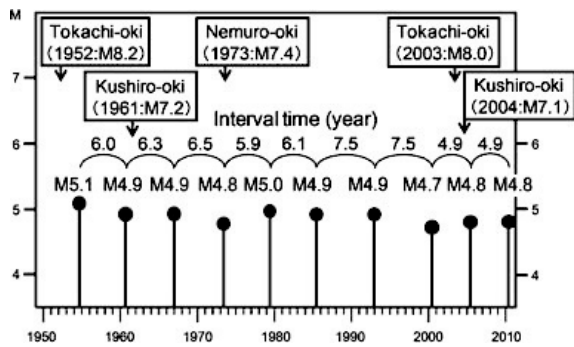


Fig. 8. Magnitude-Time diagram of repeating earthquakes and their interval times. The large scale earthquakes (over $M7.0$) occurring around the area of repeating earthquakes are also shown on the diagram.

るいは 8.3 cm/年 [Wei and Seno (1998)] などと推定されているので、カップリング率は $78\sim 86\%$ と 100% をやや下回る程度となり、求められた平均すべり速度は概ね妥当な値であると考えられる。

また、発生間隔から、次の繰り返し地震の発生確率を計算した。計算には、少ない繰り返し地震数から適切に評価することができる更新過程小標本論対数正規分布モデル [岡田 (2009)] を用いた。基準日を 2011 年 1 月 1 日とすると、次の地震は 2015 年 5 月から 2017 年 7 月までの間に 70% の確率で発生するという結果が得られた。ただし、これは過去の発生履歴から統計的に求めた確率であり、次に検討するように準静的すべり速度の変化など外的要因が加わった場合には変わりうる値であると考えられる。

繰り返し地震の規模が毎回ほぼ同じで、アスペリティ周辺の準静的すべり域におけるすべり速度が一定であれば、発生間隔はほぼ一定になるはずである。釜石沖の繰り返し地震は平均 5.6 年の発生間隔に対して 1 年程度のゆらぎがあるが、平均より短くなった時期は近傍で群発地震が発生した時期に対応しており、その際には周辺での小繰り返し地震の発生頻度も増加していたことが示されている [Uchida *et al.* (2005)]。釧路沖の場合も発生間隔は 4.9 年から 7.5 年とばらつくが、特に最近 2 回 (2000 年- 2005 年、及び 2005 年- 2010 年) の発生間隔はいずれも 4.9 年と短い。十勝沖から根室沖にかけての領域における $M7.0$ 以上の地震の発生時を Fig. 8 の上部に示す。 2003 年 9 月には「平成 15 年 (2003 年) 十勝沖地震」 ($M8.0$)、 2004 年 11 月には釧路沖の地震 ($M7.1$) が発生している。GPS 観測データから、 2003 年の十勝沖地震の後からその震源域周辺でゆっくりすべりが発生したことが明らかにされ [Ozawa *et al.* (2004)]、そのゆっくりす

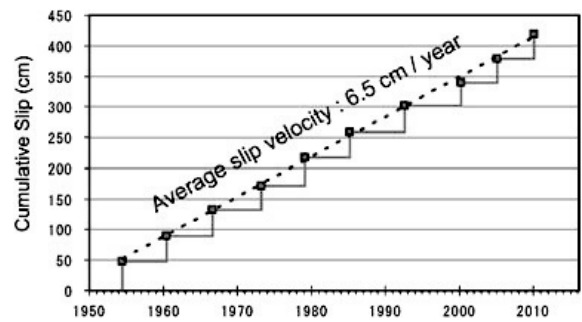


Fig. 9. Cumulative slip amount and estimated average slip rate of repeating earthquakes.

べり領域が釧路・根室地方直下のやや深い部分に拡大して 2004 年の釧路沖の地震の発生を促進した可能性が指摘されている [Murakami *et al.* (2006)]。さらに、「平成 15 年 (2003 年) 十勝沖地震」の震源域周辺で余効変動が継続することに加えて 2004 年の釧路沖の地震の後にも約 1 年間、その震源域周辺でゆっくりすべりが発生した [水藤・小沢 (2006)]。Matsubara *et al.* (2005) と Uchida *et al.* (2009) は、北海道の太平洋側における小繰り返し地震活動の時間経過を調べ、 2003 年の十勝沖地震や 2004 年の釧路沖の地震によって小繰り返し地震の発生頻度が高くなったことを示し、その原因は、ゆっくりすべりによるすべり速度の加速のためだと結論づけた。このように、十勝沖から根室沖にかけての領域は、大地震の発生による地震性すべりだけではなく、それに関連して震源域の周辺でゆっくりすべりが長期にわたって進行している場である可能性がある。釧路沖の中規模繰り返し地震の震源は「平成 15 年 (2003 年) 十勝沖地震」と 2004 年の釧路沖の地震の震源域の中間のゆっくりすべり領域の中にあり、定常的なすべりに加えてゆっくりすべりの影響を受けた結果、最近の発生間隔が短くなった可能性が考えられる。逆に 1980 年代から 1990 年代にかけては繰り返し地震の発生間隔は 7.5 年と長かったが、この時期には $M6.5$ 以上の地震は周辺で発生していない。これら繰り返し間隔の長短がいずれも活動域周辺の大地震の発生状況と相関していることは、それが繰り返し間隔に影響している可能性を強く示唆する。

しかし、 1952 年の十勝沖の地震 ($M8.2$)、 1961 年の釧路沖の地震 ($M7.2$)、そして「 1973 年 6 月 17 日根室半島沖地震」 ($M7.4$) が発生した 1950 年代から 1970 年代にかけての発生間隔は約 6 年で、 2000 年以降の発生間隔 4.9 年ほど短くない。このことは、 1952 年と 2003 年の十勝沖地震が繰り返し発生している同じ型の海溝型巨大地震であるとすれば、一見、前項で推定した繰り返し間隔の長短と大地震の発生との関係に反することのように思え

る。しかし、2003 年の地震が 1952 年の地震の単純な繰り返しではなかった、すなわち、1952 年の地震後には 2003 年の地震後と同じ程度の規模のゆっくりすべりが発生しなかったとすれば説明できるであろう。1952 年と 2003 年の 2 つの十勝沖地震の震源域は、地震波や津波を用いて比較されている。地震波形から求めた震源域は 2 つの地震でほぼ同じ [Yamanaka and Kikuchi (2003)] であるが、津波から求めた震源域は異なり、2003 年よりも 1952 年が東側に広がっている [Tanioka *et al.* (2004), Satake *et al.* (2006)]。また、根室沖の地震についても、津波のデータに基づいて 1973 年の地震より 1894 年の地震の方が震源域が東西に広がった可能性があり、千島海溝南端部における地震時すべり分布の多様性が指摘されている [Tanioka *et al.* (2007), Hirata *et al.* (2009)]。このように、地震時すべりをみただけでも、釧路沖を含む十勝沖から根室沖にかけての地域の沈み込み様式は単純ではない。ゆっくりすべりの履歴については、GPS や小繰り返し地震活動といった最近十数年のデータ蓄積しかない観測項目に依るしかなく、それ以前の履歴は明らかではない。したがって、現時点で確証は得られないが、沈み込み様式の多様性を考えると 1952 年の地震後に 2003 年の地震後と同じ程度の規模のゆっくりすべりが発生しなかった可能性は十分に考えられる。今後、周辺で別の中規模繰り返し地震系列が見つかりその発生間隔を過去にさかのぼって調べることができれば、より長期間にわたるゆっくりすべりの履歴を明らかにできるであろう。

§5. ま と め

北海道東部の釧路沖で一元化 (1997 年 10 月) 以降にほぼ同一場所、同一発震機構、 $M5$ 程度とほぼ同一規模で高い相関係数を持つ 3 個の地震が約 5 年間隔で発生し、繰り返し地震の可能性が高いことが明らかになった。

そこで、1954 年 6 月以降の波形記録を用いてこの領域周辺における繰り返し地震の抽出を行った。繰り返し地震の同定には波形の相似を用い、デジタル波形には相関係数から定量的に相似を評価し、アナログ波形には全体的な波形の形状の他、複数の特徴的なフェイズの時間差の比較から相似を評価した。その結果、1954 年 6 月以降 2010 年 9 月までに 10 個の繰り返し地震を見出すことができた。

また、観測点限定による震源再計算を行い、10 個の地震がほぼ同一場所で発生していることを確認した。これは、繰り返し地震が同じアスペリティで発生している可能性が高いことを支持する。

釧路沖の 10 個の中規模繰り返し地震活動は、平均 6.2

年 (標準偏差 0.88 年) 間隔で発生し、地震の平均規模は $M4.9$ であった。これら平均繰り返し間隔と地震の平均規模の値は他地域における中規模繰り返し地震活動と比較しても大きな差はない。また、この繰り返し地震系列のすべり量を推定した結果、平均すべり速度は 6.5 cm/年 となり、それより求められるプレート間カップリング率は $78\sim86\%$ である。

繰り返し地震の発生間隔は最短で 4.9 年、最長で 7.5 年とバラツキがある。釧路沖の中規模繰り返し地震の震源は「平成 15 年 (2003 年) 十勝沖地震」と 2004 年の釧路沖の地震の震源域の間に存在し、定常的なすべりに加えて周辺の大規模地震の余効すべりやゆっくりすべりが繰り返し地震発生間隔に影響を及ぼしている可能性がある。

今後、北海道東部周辺の小・中規模繰り返し地震の解析を積み重ねることで、大地震後のゆっくりすべり履歴等や準静的すべり等のプレート境界の地震発生メカニズムの解明に繋がると期待される。

謝 辞

2 名の匿名査読者からの意見は、本稿の改善に大変有益であった。ここに記して感謝申し上げる。

文 献

- 浜田信生・吉田明夫・橋本春次, 1983, 気象庁震源計算プログラムの改良 (1980 年伊豆半島東方沖の地震活動と松代群発地震の震源分布の再調査), 験震時報, **48**, 35-55.
- Hanks, T.C. and H. Kanamori, 1979, A moment magnitude scale, *J. Geophys. Res.*, **84**, 2348-2350.
- Hirata, K., K. Satake, Y. Tanioka, and Y. Hasegawa, 2009, Variable tsunami sources and seismic gaps in the southernmost Kuril trench: A review, *Pure Appl. Geophys.*, **166**, 77-96.
- Igarashi, T., T. Matsuzawa, and A. Hasegawa, 2003, Repeating earthquakes and interplate aseismic slip in the northeastern Japan subduction zone, *J. Geophys. Res.*, **108** (B5), 2249, doi:10.1029/2002JB001920.
- 勝間田明男, 2004, 気象庁変位マグニチュードの改訂, 験震時報, **67**, 1-10.
- Katsumata, K., 2011, A long-term seismic quiescence started 23 years before the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake ($M=9.0$), *Earth Planets Space*, **63**, 709-712.
- 気象庁地震予知情報課, 2009, 中～大規模の繰り返し地震についての規則性と不規則性, 地震予知連絡会会報, **83**, 613-632.
- Matsubara, M., Y. Yagi, and K. Obara, 2005, Plate boundary slip associated with the 2003 Off-Tokachi earthquake based on small repeating earthquake data, *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L08316, doi:10.1029/2004GL

022310.
 松澤 暢, 2001, 地震予知の戦略と展望, 地学雑誌, **110**, 771-783.
 松澤 暢, 2009, プレート境界地震とアスペリティ・モデル, 地震 2, **61**, S347-S355.
 Matsuzawa, T., T. Igarashi, and A. Hasegawa, 2002, Characteristic small-earthquake sequence off Sanriku, northeastern Honshu, Japan, *Geophys. Res. Lett.*, **29** (11), 1543, doi:10.1029/2001GL014632
 Matsuzawa, T., N. Uchida, T. Igarashi, T. Okada, and A. Hasegawa, 2004, Repeating earthquakes and quasi-static slip on the plate boundary east off northern Honshu, Japan, *Earth Planets and Space*, **56**, 803-811.
 Murakami, M., H. Suito, S. Ozawa, and M. Kaidzu, 2006, Earthquake triggering by migrating slow slip initiated by $M8$ earthquake along Kuril trench, Japan, *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L09306, doi:10.1029/2006GL025967.
 Nadeau, R.M. and L.R. Johnson, 1998, Seismological studies at Parkfield VI: Moment release rates and estimates of source parameters for small repeating earthquakes, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **88**, 790-814.
 太田健治・藤原義寿・前田憲二, 2002, 気象庁の地震検知能力の時間空間的变化, 験震時報, **65**, 111-122.
 岡田正実, 2009, 繰り返し地震および余震の確率予測, 地震 2, **61**, S143-S153.
 Ozawa, S., M. Kaidzu, M. Murakami, T. Imakiire, and Y. Hatanaka, 2004, Coseismic and postseismic crustal deformation after the M_w 8 Tokachi-oki earthquake in Japan, *Earth Planets Space*, **56**, 675-680.
 Satake, K., K. Hirata, S. Yamaki, and Y. Tanioka, 2006, Re-estimation of tsunami source of the 1952 Tokachi-oki earthquake, *Earth Planets Space*, **58**, 535-542.
 Sella, G.F., T.H. Dixon, and A. Mao, 2002, REVEL: A model for recent plate velocities from space geodesy, *J. Geophys. Res.*, **107** (B4), 2081, doi:10.1029/2000JB000033.
 水藤 尚・小沢慎三郎, 2006, 2004 年釧路沖の地震以降の北海道東部の地殻変動と余効すべり, 国土地理院時報, **110**, 91-94.
 溜渕功史・山田安之・石垣祐三・高木康伸・中村雅基・前田憲二・岡田正実, 2010, 宮古島近海における固有地震活動, 地震 2, **62**, 193-207.
 Tanioka, Y., K. Hirata, R. Hino, and T. Kanazawa, 2004, Slip distribution of the 2003 Tokachi-oki earthquake estimated from tsunami waveform inversion, *Earth Planets Space*, **56**, 373-376.
 Tanioka, Y., K. Satake, and K. Hirata, 2007, Recurrence of recent large earthquake along the southernmost Kurile-Kamchatka subduction zone, *Geophys. Monograph*, **172**, 145-152.
 Uchida, N., T. Matsuzawa, T. Igarashi, and A. Hasegawa, 2003, Interplate quasi-static slip off Sanriku, NE Japan, estimated from repeating earthquakes, *Geophys. Res. Lett.*, **30**, doi:10.1029/2003GL017452.
 Uchida, N., T. Matsuzawa, A. Hasegawa, and T. Igarashi, 2005, Recurrence intervals of characteristic $M4.8 \pm 0.1$ earthquakes off-Kamaishi, NE Japan - Comparison with creep rate estimated from small repeating earthquake data, *Earth Planet. Sci. Lett.*, **233**, 155-165.
 Uchida, N., S. Yui, S. Miura, T. Matsuzawa, A. Hasegawa, Y. Motoya, and M. Kasahara, 2009, Quasi-static slip on the plate boundary associated with the 2003 $M8.0$ Tokachi-oki and 2004 $M7.1$ off-Kushiro earthquakes, Japan, *Gondwana Research*, **16**, 527-533.
 内田直希・松澤 暢・島村浩平・長谷川 昭, 2010a, 釜石沖 $M4.9$ 繰り返し地震のアスペリティにおける 2 つの地震サイクルにわたる地震活動様式, 日本地球惑星科学連合大会予稿集, SSS011-12.
 内田直希・松澤 暢・長谷川 昭, 2010b, 東北日本の中規模繰り返し地震の分布とそのアスペリティでの特徴的地震活動, 日本地震学会講演予稿集 2010 年度秋季大会, 256.
 上野 寛・畠山信一・明田川 保・舟崎 淳・浜田信生, 2002, 気象庁の震源決定方法の改善—浅部速度構造と重み関数の改良—, 験震時報, **65**, 123-134.
 Wei, D.-P. and T. Seno, 1998, Determination of the Amurian plate motion in mantle dynamics and plate interactions in East Asia, *Geodyn. Ser.* v. 27, edited by M. F. J. Flower *et al.*, AGU, Washington D.C., 419 pp.
 Yamanaka, Y. and M. Kikuchi, 2003, Source process of the recurrent Tokachi-oki earthquake on September 26, 2003, inferred from teleseismic body waves, *Earth Planets Space*, **55**, e21-e24.

5.1.7 釧路沖 2 (Group97)

5.1.7.1 同系列と思われる地震の抽出

表5.1.1で確認したGroup97付近の震央分布図と領域 a 内の地震活動経過図 (図5.1.29) から1992年2月8日、1996年4月25日と2009年7月13日の地震と規模及び発生間隔が同程度で、プレート境界付近で発生したと思われる24地震を抽出した表5.1.14)。なお、抽出した期間は、釧路地方気象台及び根室測候所の59型電磁式地震計記録で検証可能な1973年以降とした。

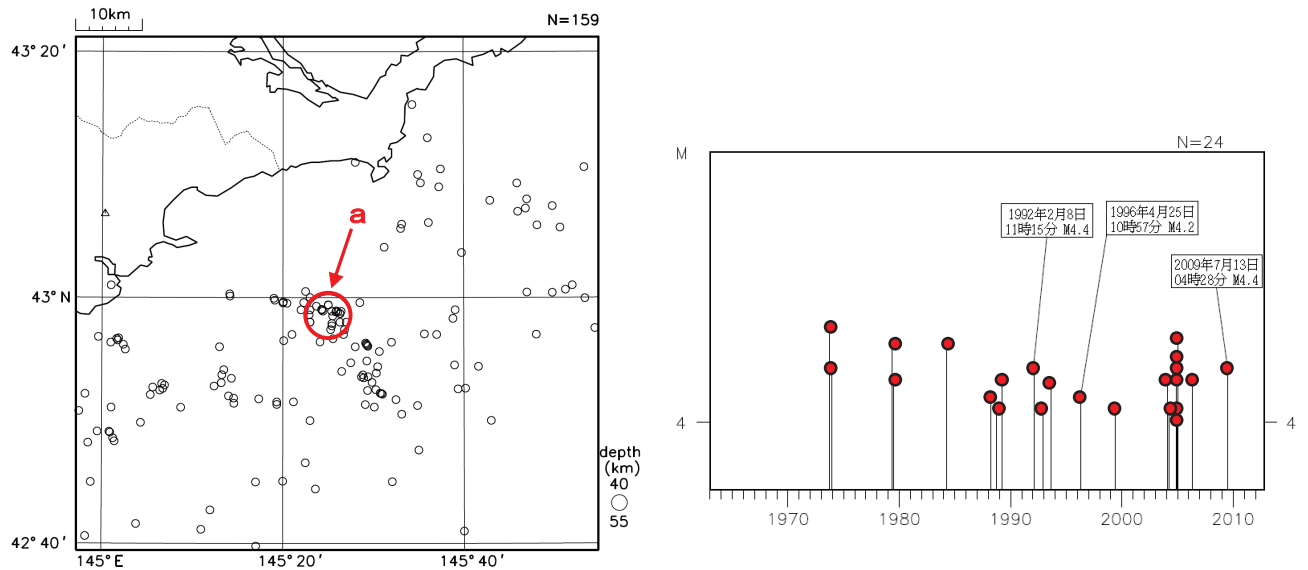


図 5.1.29 震央分布図と領域 a 内の地震の発生状況 (M-T 図)。1963 年 1 月 1 日～2012 年 9 月 30 日、深さ 40～55km、 $4.0 \leq M \leq 4.7$ 。

表5.1.14 相似性の確認対象とした地震 (釧路沖 2)。

番号	発 生 日 時	M	深さ	番号	発 生 日 時	M	深さ	番号	発 生 日 時	M	深さ (km)
1	1973/10/02	4.7	40	9	1992/02/08	4.4	44	17	2004/11/29	4.5	47
2	1973/11/30	4.4	40	10	1992/12/06	4.1	44	18	2004/11/29	4.1	48
3	1979/05/11	4.6	50	11	1993/08/20	4.3	43	19	2004/12/02	4.1	47
4	1979/06/21	4.3	50	12	1996/04/25	4.2	48	20	2004/12/23	4.0	48
5	1984/04/14	4.6	46	13	1999/06/06	4.1	49	21	2005/01/17	4.4	47
6	1988/04/02	4.2	45	14	2004/02/15	4.3	47	22	2005/01/17	4.6	46
7	1988/09/14	4.1	45	15	2004/03/31	4.1	48	23	2006/04/29	4.3	47
8	1989/03/23	4.3	44	16	2004/11/09	4.3	48	24	2009/07/13	4.4	47

5.1.7.2 波形の比較

選択した 24 地震の相似性を確認するため、デジタル波形データ及びアナログ波形記録の比較を行った。

(1) デジタル波形データの比較

気象庁の地震デジタル波形データは、1988 年以降のものが利用可能で、波形の重ね合わせや波形相関を求めて相似性の確認を行った (図 5.1.30)。

この結果、2009 年、2004 年 11 月 9 日、1999 年、1996 年及び 1992 年 2 月の地震波形が相似であることが確認され

た。

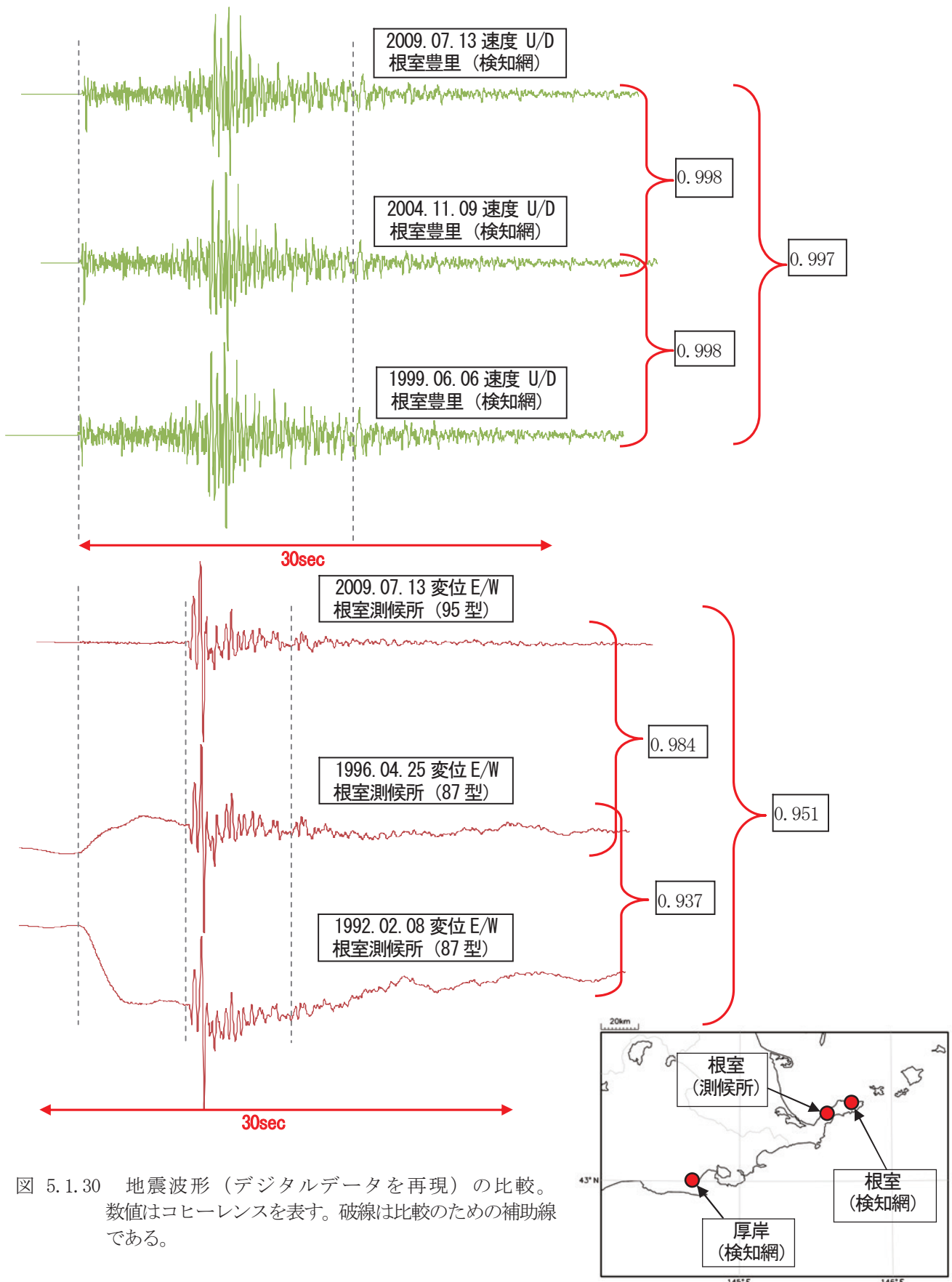


図 5.1.30 地震波形（デジタルデータを再現）の比較。
数値はコヒーレンスを表す。破線は比較のための補助線
である。

(2) アナログ記録の比較

デジタル波形の無い 1992 年から 1979 年の 4 地震については、根室測候所の 59C 型、59 型電磁式地震計記録の特徴 (図 5.1.31) から、地震波形が相似であることを確認した。

(3) 比較結果

デジタル波形記録とアナログ波形の相似性の確認結果から選択した 24 地震のうち 8 地震が相似であることを確認した (表 5.1.15)。

表 5.1.15 各観測点の記録から相似地震と認められた地震 (釧路沖 2)。色つきのセルは複数観測点において波形の相似性が確認できたことを表す。

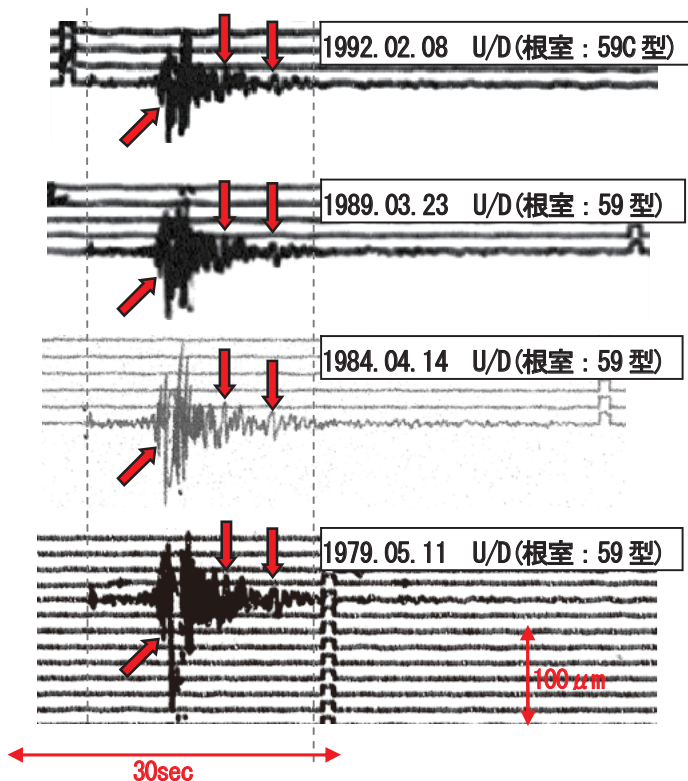


図 5.1.31 地震波形 (マイクロフィルムから再現) の比較。矢印は特徴的な位相を示す。

地点 (種別) 日 時	根室測候所 (59/59C 型) アナログ記録	根室測候所 (強震データ) デジタル記録	根室豊里 (検知網) デジタル記録
1973/10/02 17:29	×	—	—
1973/11/30 02:19	×	—	—
1979/05/11 16:02	○	—	—
1979/06/21 17:23	×	—	—
1984/04/14 15:03	○	—	—
1988/04/02 05:07	×	—	—
1988/09/14 21:27	×	—	—
1989/03/23 04:22	○	—	—
1992/02/08 11:15	○	●	—
1992/12/06 01:31	×	—	—
1993/08/20 07:01	×	—	—
1996/04/25 10:57	—	●	—
1999/06/06 06:45	—	—	●
2004/02/15 20:09	—	—	×
2004/03/31 01:28	—	—	×
2004/11/09 03:34	—	—	●
2004/11/29 04:02	—	—	×
2004/11/29 13:05	—	—	×
2004/12/02 12:56	—	—	×
2004/12/23 19:27	—	—	×
2005/01/17 16:36	—	—	×
2005/01/17 16:36	—	—	×
2006/04/29 00:37	—	—	×
2009/07/13 04:28	—	●	●

○ : 各観測点において相似と認められた地震
 × : 相似と認められない地震 — : 記録なし

5.1.7.3 震源再計算による震源の精査

表 5.1.14 の 24 地震の震源について観測点限定を行い再決定した。ただし、24 地震全てを同じ観測点で評価できないことから、期間を三つに分け、それぞれの期間には同じ観測点を用い、連続した二つの期間に同一地震 (1999 年と 1992 年) が含まれるよう再計算を行った。

それぞれの組み合わせにおいて、波形の相似性が認められた地震については、震源がほぼ同一の場所に纏まった (図 5.1.32、図5.1.33、図5.1.34)。

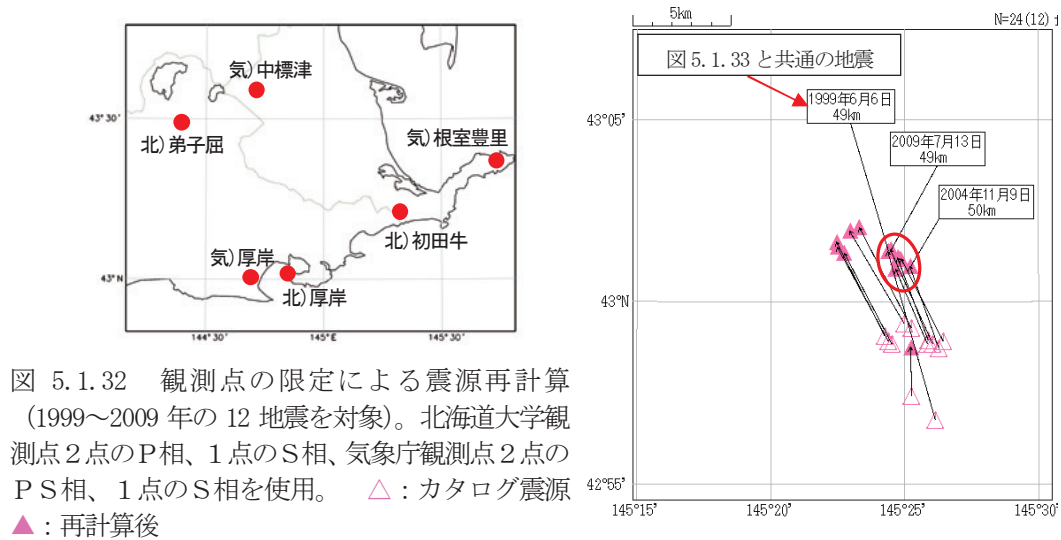


図 5.1.32 観測点の限定による震源再計算 (1999～2009 年の 12 地震を対象)。北海道大学観測点 2 点の P 相、1 点の S 相、気象庁観測点 2 点の P S 相、1 点の S 相を使用。△：カタログ震源 ▲：再計算後

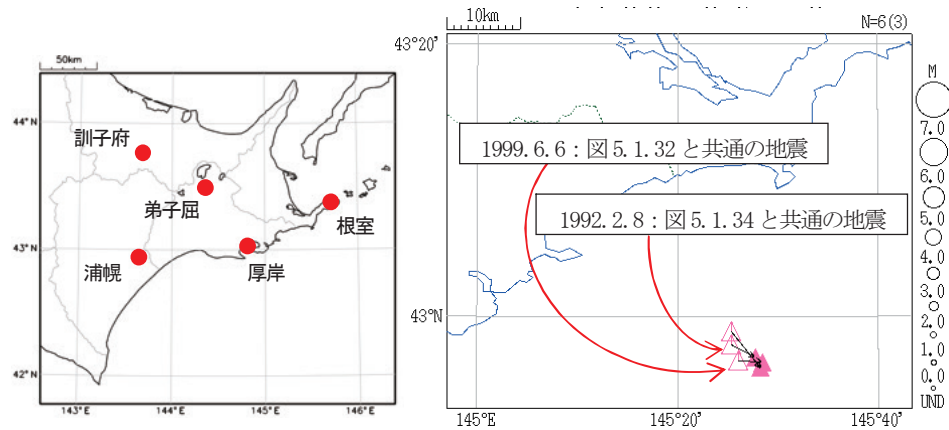


図 5.1.33 観測点の限定による震源再計算 (1992.2.8、1996、1999 年の 3 地震を対象)。北海道大学観測点の 5 点の P 相を使用。△：カタログ震源 ▲：再計算後。

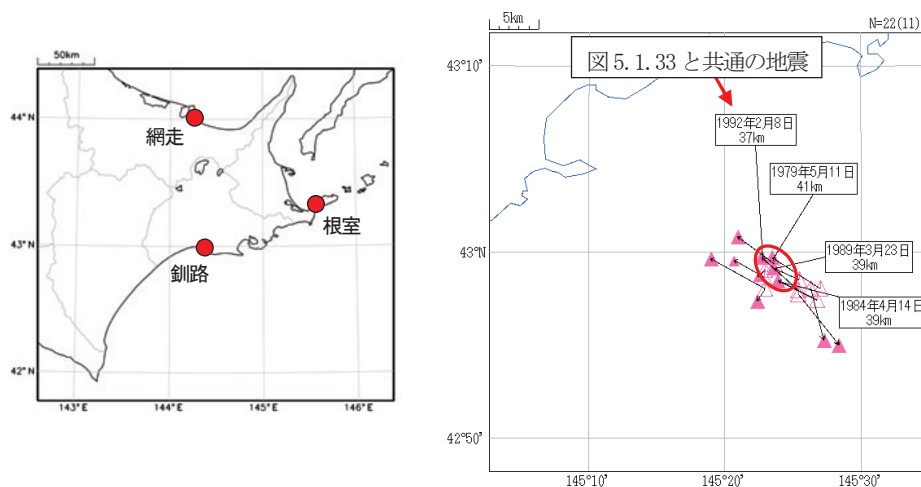


図 5.1.34 観測点の限定による震源再計算 (1973～1993 年の 11 地震を対象)。気象庁観測点 2 点の P S 相と 1 点の P 相を使用。△：カタログ震源 ▲：再計算後

5.1.7.4 発震機構解及びP波初動分布

表5.1.14の24地震のうち地震波形の相似性が認められた8地震については発震機構解が求まっているものはないが、P波初動分布から2009年、2004年及び1999年以降の3地震については、P波初動分布に類似性が認められる(図5.1.35)。

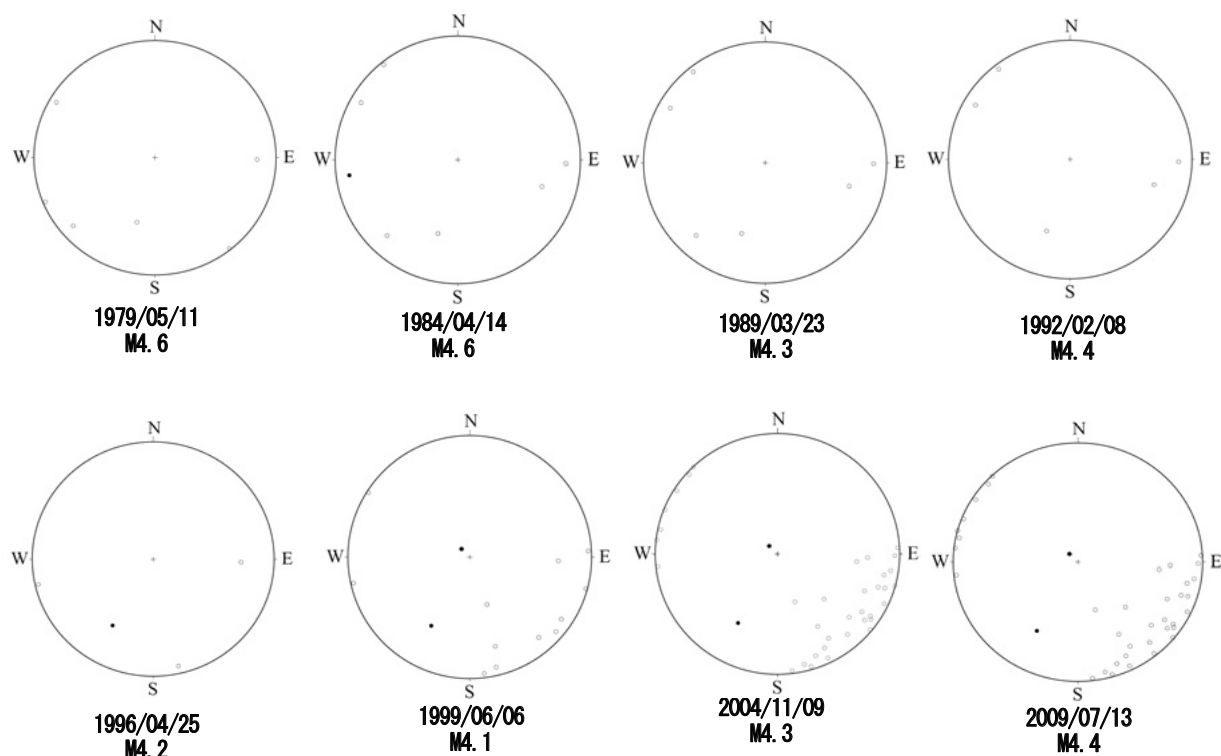


図 5.1.35 P波初動分布。

5.1.7.5 平均滑り速度の推定と次回の発生予測

地震波形比較、震源再計算による震源の精査、P波初動分布から図5.1.29から抽出した24地震のうち8地震は繰り返し地震であると同定した(表5.1.16)。この地震グループの地震発生間隔と各地震の推定すべり量から平均滑り速度5.1cm/年(図5.1.36)を得た。

なお、図5.1.37に繰り返し相似地震の地震活動経過図と発生間隔を、次回の発生予測を表5.1.17に示す。

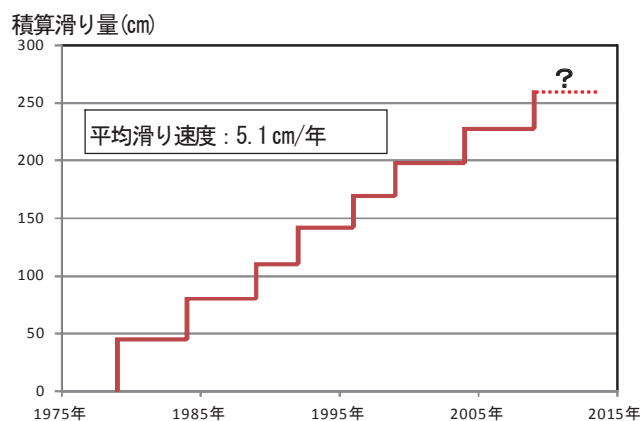


図 5.1.36 積算滑り量と平均滑り速度。

表5. 1. 16 同定された繰り返し相似地震とその確認結果。色つきセルは相似地震であることが確認できたイベントを表す。P波初動分布の△は、発震機構を確認するにはデータが不十分であることを表す。

種 別 日 時	地震波形	震源再計算	P波初動分布
1973/10/02 17:29	×	×	—
1973/11/30 02:19	×	×	—
1979/05/11 16:02	○	○	△
1979/06/21 17:23	×	○	—
1984/04/14 15:03	○	○	△
1988/04/02 05:07	×	×	—
1988/09/14 21:27	×	×	—
1989/03/23 04:22	○	○	△
1992/02/08 11:15	○	○	△
1992/12/06 01:31	×	×	—
1993/08/20 07:01	×	×	—
1996/04/25 10:57	○	○	△
1999/06/06 06:45	○	○	○
2004/02/15 20:09	×	×	—
2004/03/31 01:28	×	×	—
2004/11/09 03:34	○	○	○
2004/11/29 04:02	×	○	—
2004/11/29 13:05	×	×	—
2004/12/02 12:56	×	○	—
2004/12/23 19:27	×	×	—
2005/01/17 16:36①	×	○	—
2005/01/17 16:36②	×	×	—
2006/04/29 00:37	×	×	—
2009/07/13 04:28	○	○	○

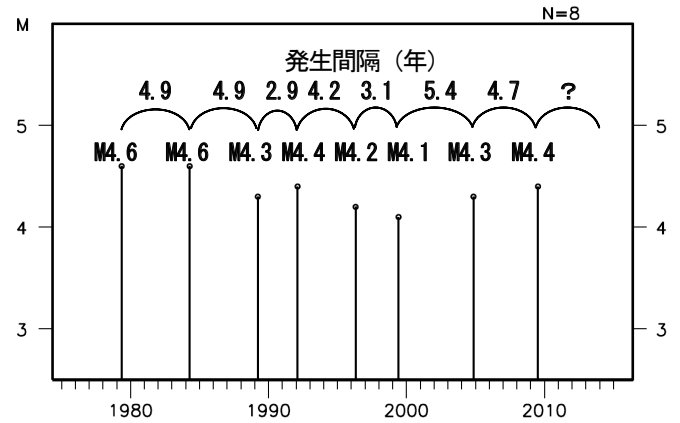


図 5. 1. 37 繰り返し相似地震の地震活動。経過図と発生間隔。

表5. 1. 17 繰り返し間隔と次回の予測

平均M : 4.4
繰り返し間隔 最短 : 2.9 年
最長 : 5.4 年
平均 : 4.3 年
(標準偏差 0.90)
次回の予測
2013 年 8 月 ± 12 ヶ月
3 年以内の発生確率 : 87.6%
(予測モデル : 小標本論対数正規分布、 2012. 11. 1 基準、70%の確率)

5.1.7.6 参考

釧路沖 2 (Group97) の繰り返し相似地震の発生場所は、2004年11月29日に発生した釧路沖の地震 (M7.1) の余震域にあたり、この地震とはほぼ同じ場所で発生した1961年8月12日の地震 (M7.2) と地震波形、検潮記録、震度分布、余震活動が類似していることが平成16年11月の地震・火山月報 (防災編) で報告されている。

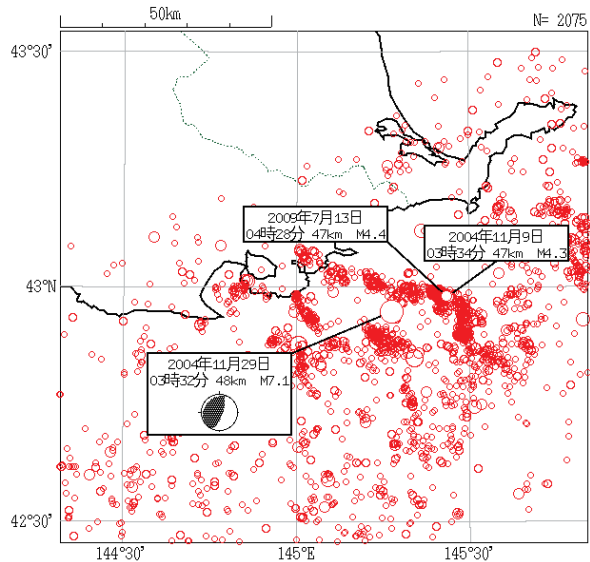


図 5.1.38 震央分布図。2004 年 11 月～2012 年 10 月、深さ 0～80km、 $M \geq 2.0$ 。

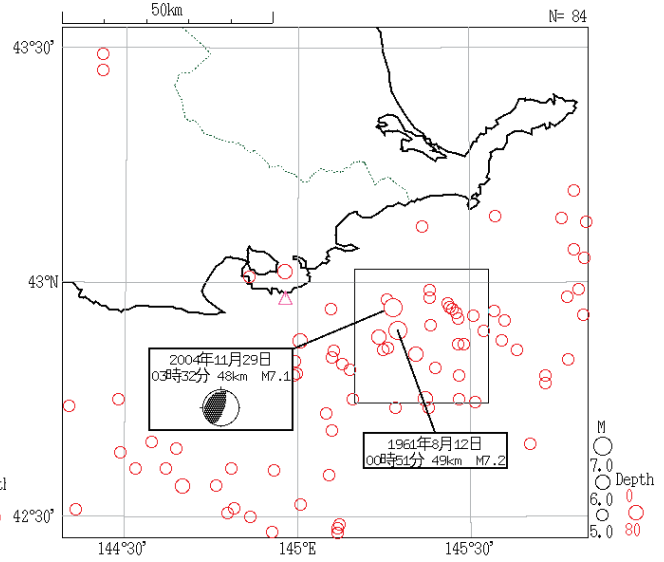


図 5.1.39 震央分布図。1961 年 1 月～2012 年 10 月、深さ 0～80km、 $M \geq 5.0$ 。

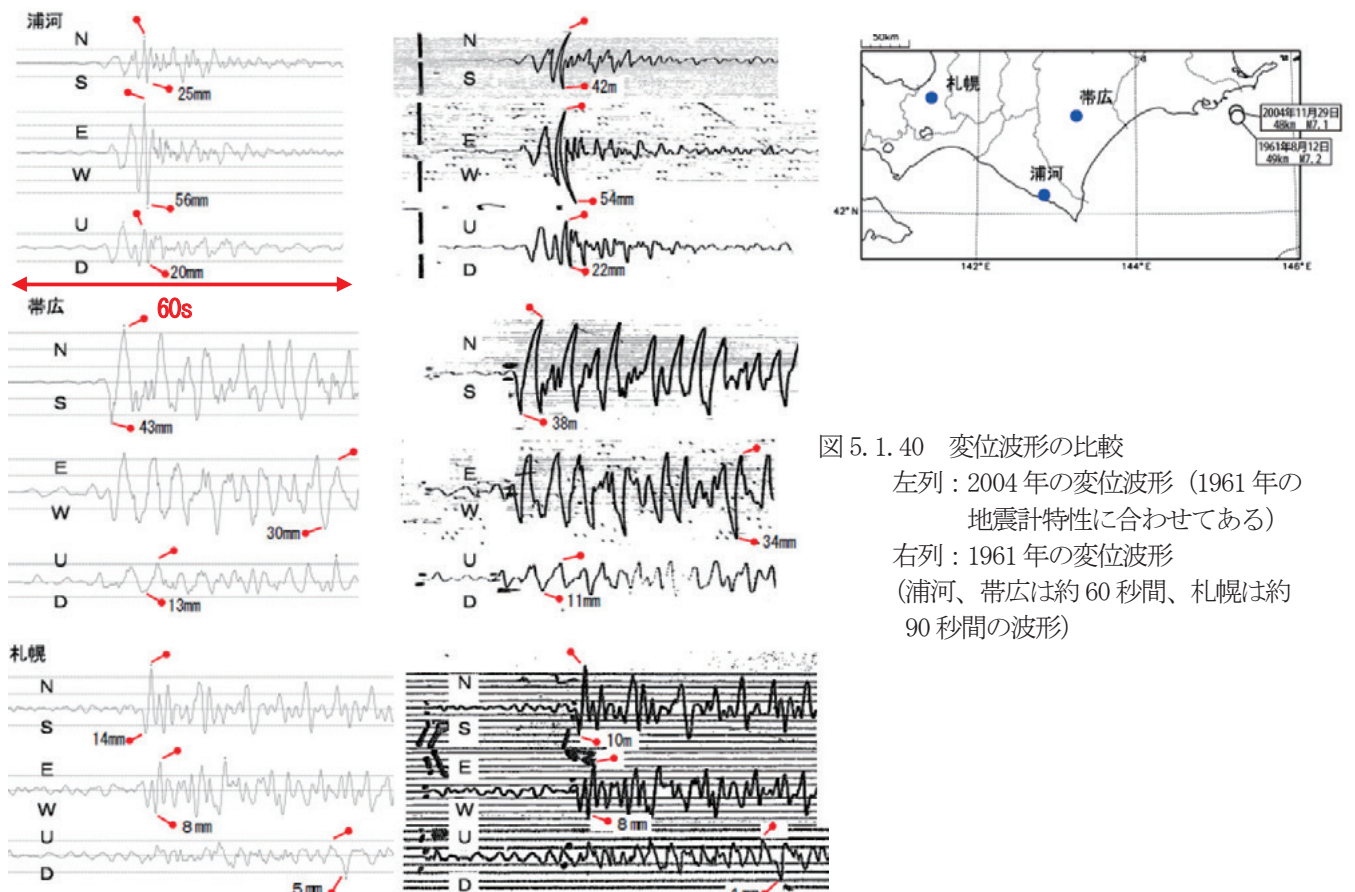


図 5.1.40 変位波形の比較

左列：2004 年の変位波形 (1961 年の地震計特性に合わせてある)

右列：1961 年の変位波形

(浦河、帯広は約 60 秒間、札幌は約 90 秒間の波形)

5.1.8 結果

以上の結果、調査した 5 グループ全てが繰り返し地震であることがわかった。各グループにおける次回の地震発生年月を岡田(2009)に基づいて予測し、その結果を表 5. 1. 18 に示す。また、今回確認できた繰り返し相似地震は、過去の大地震のアスペリティの陸側に分布していることが確認できた(図 5. 1. 41)。

表5. 1. 18 各繰り返し相似地震の繰り返し間隔、次回の発生予測等。

	繰り返し回数	平均 M	繰り返し間隔（年）				最新発 生日か らの経 過年数	予 測		平均滑り 速度 (cm/年)
			最短	最長	平均	標準 偏差		次回の発生 (70%確率)	3年以内の 発生確率	
(基準日：2012 年 11 月 1 日)										
①浦河沖 1 NewGroup01 2009/12/30 04:23 M4. 8	11	4. 8	2. 9	7. 5	5. 3	1. 41	2. 84	2015 年 3 月 ±21 ヶ月	63. 6%	7. 7
②浦河沖 2 Group10 2011/07/26 07:58 M4. 8	6	4. 9	6. 7	8. 6	7. 6	0. 71	1. 27	2019 年 3 月 ±12 ヶ月	0. 4%	5. 5
③ 十 勝 地 方 南 部 NewGroup02	5	5. 0	8. 6	13. 2	10. 7	1. 64	0. 28	2023 年 6 月 ±32 ヶ月	0. 5%	4. 4
④釧路沖 1 Group30、123 2010/04/09 03:41 M4. 8	10	4. 9	4. 9	7. 5	6. 2	0. 88	2. 56	2016 年 6 月 ±13 ヶ月	28. 8%	6. 5
⑤釧路沖 2 Group97 2009/07/13 04:28 M4. 4	8	4. 4	2. 9	5. 4	4. 3	0. 90	3. 30	2013 年 8 月 ±12	87. 6%	5. 1

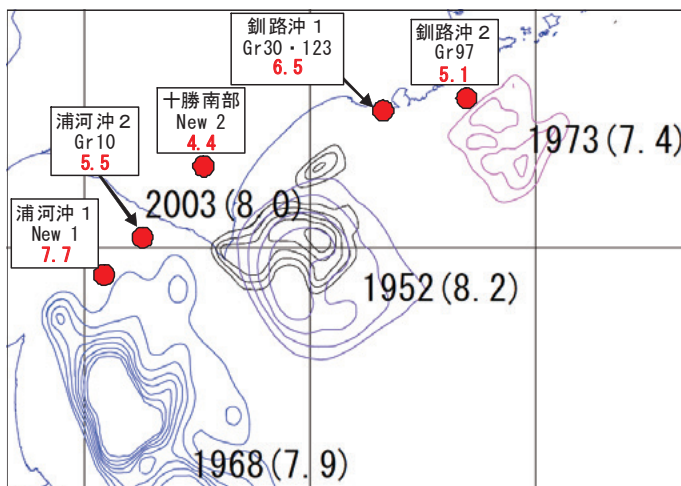


図5. 1. 41 繰り返し相似地震の分布 (●)。
赤数字：本調査による各繰り返し相似地震の平均滑り速度。
コンターは、中央防災会議日本海溝・千島海溝周辺海溝型地震に関する専門調査会(2006)の資料によるアスペリティの分布を示す。

謝辞

本調査には、独立行政法人防災科学技術研究所、北海道大学、弘前大学、東北大学、東京大学、名古屋大学、京都大学、高知大学、九州大学、鹿児島大学、独立行政法人産業技術総合研究所、国土地理院、青森県、東京都、静岡県、神奈川県温泉地学研究所、横浜市及び独立行政法人海洋研究開発機構による地震観測データ及を利用して気象庁が文部科学省と協力して求めた一元化震源を使わせていただきました。地震の相似性の確認にあたり、北海道大学大学院理学研究院附属地震火山研究観測センターから地震波形のデジタルデータの提供と震源精査には検測値を使用させて頂きました。確認できた繰り返し相似地震から次回の発生予測を算出するにあたり、大阪管区気象台地震火山課(長谷川嘉臣氏)作成のL-CAT(地震長期発生確率計算ツール)を使用しました。記して感謝します。

参考文献

- 中央防災会議, 2006: アスぺリティ分布・波源域分布, 日本海溝・千島海溝周辺海溝型地震に関する専門調査会報告, 参考資料 1-9.
- Nadeau, R. M. and L. R. Johnson, 1998: Seismological studies at Parkfield VI: Moment release rates and estimates of source parameters for small repeating earthquakes, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **88**, 790-814.
- 岡田正実, 2009: 繰り返し地震および余震の確率予測, *地震* **2**, **61**, 特集号, S143-S153.
- 溜渕功治・中村雅基・山田安之, 2011: 全国を対象とした客観的な相似地震の抽出, *日本地球惑星科学連合大会予稿集*, SSS026-P02.