

Hi-net 自動震源決定処理のための発破頻発地域データベースの構築

汐見勝彦*

Construction for Blast Location Database for the Hi-net Automatic Hypocenter Determination System

Katsuhiko SHIOMI

* *Network Center for Earthquake, Tsunami and Volcano,
National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, Japan
shiomi@bosai.go.jp*

Abstract

Automatic hypocenter determination system operated by NIED has the master database of blast frequent areas. By using this database, the system automatically determines that a detected event is whether a natural earthquake or artificial one. By more than 10 years operation of the system, we know that the blast frequent areas are changing dynamically. In this study, we arranged the idea to extract new blast frequent areas based on the hypocenter catalog of NIED Hi-net. Then, we applied the same method to two years before and after the 2011 Tohoku earthquake, and checked the time and spatial variation of the blast frequent areas in Tohoku district.

Key words: Blast, Automatic hypocenter determination, Hypocenter catalog, NIED Hi-net, the 2011 Tohoku earthquake

1. はじめに

防災科学技術研究所(防災科研)では、自らが運用する高感度地震観測網(Hi-net)の観測波形データのほか、気象庁や大学等、他機関による高感度地震計等の観測波形データをリアルタイムで収集、蓄積するとともに、インターネットを介して広く一般に公開している。同時に、これらの波形データを自動的に解析することにより、地震の震源位置や発震機構解の推定を行っており、その結果についてもHi-netのウェブページを介して速報的に公表されている(例えば、汐見ほか, 2009)。一般的な自動震源決定システムでは、観測された地震波形に平常時の雑微動と異なる信号が混入しているかどうかを監視しており、そのような信号が近接する複数点でほぼ同時に観測された場合に地震が発生した可能性があ

るとして、震源決定処理に入る(例えば、松村ほか, 1988)。この処理によって、車両の通行等による比較的小規模なノイズ源による震動の混入を避けることができるが、砕石・採鉱や道路等の工事のための発破に代表される人工的な震動については、微小な浅い地震として検知してしまうことがよく知られている(岡田, 1996; 平・津村, 2001)。

防災科研が、2016年現在、定常的に運用している震源決定システム(以下、Hi-netシステム)では、あらかじめ砕石・採鉱のための発破が頻発すると想定される地域と時間帯をデータベースに保持している。自動処理により決定した震源情報がこのデータベースに設定された情報に該当する場合、当該イベントを発破(人工地震)と判断し、発破頻発地域で発生したことを表すために「BLAST」ラベルを付記して

* 国立研究開発法人 防災科学技術研究所 地震津波火山ネットワークセンター

いる。手動検測のためのツールでも同じデータベースを参照しており、震源決定結果が発破頻発地域内外か、震源時刻が指定された時間に該当するかどうかによって、発破の可能性についての確認を促すメッセージが表示されるようになっている。目視確認の結果、発破頻発地域外であっても人工地震による震動と判断される場合は、手動で BLAST ラベルを付与する。逆に、発破頻発地域内であっても自然地震による震動と判断される場合は、BLAST ラベルを削除し、自然地震を意味する「EQ」ラベルを付与する。

Hi-net システム整備直後は、日本全国を対象とした発破頻発地域が十分に把握されていなかったこともあり、国土地理院発行の地形図に表示されている採鉱地等の緯度・経度を目視により抽出し、その点を中心とする水平 0.03 度四方、深さ 10 km までの直方体を発破頻発地域とした。発破頻発地域データベースは、2007 年 2 月に 1 度だけ改訂を行っている。初期のデータベースは、採鉱地の位置を基準に直方体を設定していたため、地域に無駄な重なりを生じていた。そこで、2007 年の改訂時には、日本列島を北緯 30 度、東経 129 度を基準点とする水平 0.025 度四方のセルに分割し、採鉱値が含まれるセルを発破頻発地域として再定義した。さらに、改訂作業を行った直前の 2 年間 (2005 年 2 月から 2007 年 1 月) に手動検測により BLAST ラベルが付与されたイベント (BLAST イベント) の分布を調査し、各セルに BLAST イベントが 3 個以上含まれる場合、初期のデータベースにおける採鉱値の有無にかかわらず、発破頻発地域として採用することとした。

2007 年の発破頻発地域データベース改訂作業では、地形図から読み取った採鉱地の情報は全て保持した。しかし、箱根山の太田谷周辺の硫黄採取地も「採鉱地」として発破頻発地域に登録していたため、太田谷周辺で昼間に発生した群発地震を軒並み BLAST イベントと自動判断してしまう事態が発生した。Hi-net システム稼働から 15 年余を経て、BLAST イベントの登録状況を確認してみると、手動検測で 1 度も BLAST イベントが登録されていない発破頻発地域が存在する一方、2007 年に発破頻発地域として追加した領域外であっても多くの BLAST イベントが手動検測結果として登録されていることが判明した。実際、岡田 (1996) が指摘す

るとおり、道路工事の現場等で、短期間で発破地域が移動することが知られている。地震活動、特に地殻内で発生する浅い地震を対象とした活動の消長をモニタリングする際に、発破等による人工的な震動が混入することは極力避けなければならない。そのようなイベントは出来る限り自動的に地震活動データベースから排除されることが望ましい。そのためには、発破頻発地域データベースを出来るだけ簡便に構築し、更新する方法を整理しておく必要がある。

本稿では、防災科研 Hi-net のデータベースに蓄積された過去 8 年間 (2008 年 4 月から 2016 年 3 月) の震源カタログの情報から、まず、発破が頻発していると考えべき時間帯の選定を行う。次に、直近 3 年間のデータに対し、発破が頻発している時間帯に偏重してイベントが発生している領域を抽出する。また、手動再検測で BLAST ラベルを付与したイベントが頻発している地域を抽出する。これらの地域とシステムに発破頻発地域データベースとして既に登録されている地域を比較、検討し、新たな発破頻発地域データベースとして登録すべき領域の抽出を行う。また、過去のデータとの比較等から、発破頻発地域の特徴やその変遷について考察を行う。

2. データ

本稿では、近年の発破頻発地域抽出対象期間として、2013 年 4 月から 2016 年 3 月までの 3 年分のデータを対象とする。また、より長期的な時空間変化を確認するため、2008 年 4 月以降のデータも取得した。この期間には、平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震が含まれている。東日本大震災の影響については、6 章で後述する。なお、本稿で用いる Hi-net システム上のイベントカタログは、全て 2016 年 11 月 4 日に Hi-net システムから直接取得した。

本解析では、2007 年に整備した発破頻発地域データベース (MASTER)、手動検測により BLAST ラベルが付与されたイベントのカタログ (MANUAL)、および Hi-net システム上に登録されている全てのイベントのカタログ (EVENT) を用いる。以下に、各データの詳細についてまとめる。

2.1 MASTER データ

発破頻発地域に関する情報は、Hi-net システムで用いるデータベースのマスタ情報のひとつとして登録し、使用している。このデータを「MASTER」デー

タと称することとする。本稿では、2007年に整備したMASTERデータを用いる。MASTERデータには、発破頻発地域として指定する領域の南西端および北東端の緯度・経度、BLASTイベントと判定する深さの下限、BLASTの開始および終了時刻が定義されている。深さは10 kmを基準値としている。なお、前述のとおり、現在は0.025度四方の領域として設定している。

2.2 MANUAL データ

Hi-netのデータベースに収録されているイベントのうち、手動検測によってBLASTラベルを付与して保存されているデータのみを抽出する。このデータセットは手動検測に基づくことから、「MANUAL」データと称することとする。深さ10 km以浅に決まっているイベントを対象とし、震源時誤差1 s未満、水平誤差5 km未満、深さ誤差15 km未満のイベントのみを抽出対象とした。本データには、各イベントの震源時刻、震源位置(東経・北緯・深さ)に関する情報が含まれている。2013年4月から2016年3月までの3年間を対象とした。

2.3 EVENT データ

Hi-netシステムにより、EQあるいはBLASTの

ラベルが付与された全てのイベント情報を抽出する。このデータセットを「EVENT」データと称することとする。手動検測が行われている場合は手動検測結果を優先的に利用するが、自動検測のみの結果も積極的に活用する。深さ10 km以浅に決まっているイベントのみを対象とすること等の抽出条件はMANUALデータと同様であるが、自動処理震源を使用する場合、震源決定精度に不安が残るため、深さ誤差は10 km未満のものに限定した。EVENTデータには、各イベントの震源時刻、震源位置(東経・北緯・深さ)のほか、マグニチュード(M)、付与されたラベル(EQ/BLAST)、検測種別(自動/手動)に関する情報が含まれている。なお、BLASTラベルが付与されているイベントの大半はM1.0相当に満たない程度の微小なものであるが、地下構造探査等を目的とした発破にはM2.0相当程度の規模を記録したものもある。発破頻発地域抽出用として、2013年4月から2016年3月までの3年間のデータを抽出するとともに、発破対象時間の設定や長期間に亘る活動の推移確認用として2008年4月から2016年3月までの8年間のデータも用意した。

Hour	2008.04-2016.03		2013.04-2016.03	
	%	N=24423	%	N=11584
0	0.1		0.0	
1	0.1		0.1	
2	0.1		0.0	
3	0.1		0.0	
4	0.0		0.0	
5	0.0		0.0	
6	0.0		0.0	
7	0.1		0.1	
8	1.3		1.3	
9	4.4		4.9	
10	7.4		8.0	
11	29.9		30.3	
12	19.1		17.7	
13	2.7	99.5	3.0	99.7
14	6.5		7.2	
15	12.4		13.5	
16	10.8		9.8	
17	3.9		3.5	
18	0.9		0.4	
19	0.0		0.0	
20	0.0		0.0	
21	0.0		0.0	
22	0.0		0.0	
23	0.0		0.0	
Total				

図1 対象期間中に登録された時間別のBLASTイベント発生状況。
 左)2008年4月～2016年3月、右)2013年4月～2016年3月。
 Fig. 1 Frequency distribution of the BLAST events for every hour.
 Left) Apr. 2008 ~ Mar. 2016. Right) Apr. 2013 ~ Mar. 2016.

3. 発破対象時間の設定

砕石・採鉱発破に代表される産業用の人工地震は昼間に実施されることが多く、岡田(1996)は6時から19時まで、平・津村(2001)は7時から19時までを発破対象時間と設定している。昼夜を問わない発破作業や人工地震探査などで夜間に人工的な震動が発生することもあるが、件数はさほど多くは無い。本節では、実際に Hi-net の手動検測で BLAST ラベルを付与されたイベントの発生時間を調査することにより、自動的に BLAST イベントを検出する際の対象として適切な時間帯の確認を行う。

EVENT データから手動検測で BLAST ラベルが付与されたイベントを抽出し、その時間帯別発生頻度分布を作成した結果を図 1 に示す。左列は長期(8年間)、右列は直近3年間のみ結果であるが、いずれの期間においても、BLAST イベントの発生傾向に違いは生じていない。11時台に全体の約3割の BLAST イベントが集中していること、13～14時台の発破頻度は1割以下に低下するものの、15時台に再び1割を超えること等の特徴が挙げられる。また、発生頻度が1%以上となる8時台から17時台だけで、全体の99%のイベントが集中している。本稿では、0.1%以上の発生頻度を連続的に記録した7時から19時までの12時間を発破対象時間とする。直近3年間では、この時間帯に登録された BLAST イベントは全体の99.7%を占めている。0時以降に若干の BLAST イベントが検知されていることがあるが、これらは主に人工地震探査による振動である。

4. 発破頻発地域候補の抽出

4.1 発破対象時間に基づく領域候補抽出

図 1 で示したとおり、手動検測による BLAST イベントの検知は7時から19時までの12時間に極端に偏っている。一方、自然地震活動は、通常、時間による制約を受けることはない。本節では、EVENT データを用いて、空間別・時間別のイベント数を計数することにより、7時から19時までの12時間にイベントの検出が偏っている領域を抽出する。EVENT データには、自動か手動かの検測種別および地震(EQ)による震動か人工地震(BLAST)による震動かを区別するラベル情報が付記されているが、本節の検討ではこれらの違いは区別しない。

本稿の検討では、北緯 24.0 度から 46.0 度、東経

122.0 度から 146 度の範囲を対象領域とし、この領域を東西、南北それぞれ 0.025 度のセルに分割した。EVENT データに登録されているイベントの震央情報を各セルに分配し、各セル中で発生したイベント数を時間別に計数した。各セルのイベントの 90% 以上が発破対象時間帯に集中している場合、そのセルを震源時刻に基づく発破頻発地域候補として抽出することとした。ただし、各セルに含まれるイベント数が年平均3個以上、すなわち3年間で9個に満たないセルについては、イベント数不足として対象から除外した。

4.2 MANUAL データに基づく領域候補抽出

手動検測による波形確認で BLAST イベントであると判断された場合、Hi-net システムのカタログには BLAST ラベルが付与された状態で保存されている。すなわち、MANUAL データに登録されたイベントは BLAST イベントの発生が目視確認されているものであり、その分布はそのまま活用されるべき重要なデータである。

そこで、MANUAL データに登録されているイベントの震央情報を前節と同じ 0.025 度四方の各セルに分配し、そのイベント数を計数した。前節同様、各セルにおいて、年平均3個以上のイベントが含まれる場合、そのセルを手動検測に基づく発破頻発地域候補とした。

5. 発破頻発地域候補の比較と選定

本章では、前章で求めた2種類の発破頻発地域候補と MASTER データの比較を行うとともに、各セルでのイベントの時間帯別発生状況の検証に基づき、現時点での発破頻発地域を設定する。本章での検討には 2013 年 4 月から 2016 年 3 月の 3 年間のデータを用いるが、各セルにおけるイベント発生状況の時系列表示には、8 年間のデータを合わせて表示する。

まず、MASTER データ、震源時刻および手動検測に基づく発破頻発地域候補を比較し、各セルの抽出状況を確認した。セルの抽出状況のまとめを表 1 に示す。表 1 から、手動検測で BLAST と判定されたイベントが頻発する地域は、当該解析期間においては、全て震源時刻に基づく抽出で網羅されていたことが分かる。また、MASTER データとして登録されているセルの7割で、人工地震が頻発したと思われる徴候がこの3年間で見られなかった一方、

MASTER データに登録されていない 200 カ所以上で昼間だけにイベントが偏重して発生している領域があったことが分かる。

これらの分布の一例として、**図 2** に岩手県周辺の結果を示す。この地域では、**図中**に黒枠で示されているとおり、もともと内陸の北上川沿いや遠野周辺に発破地点が多数存在することが認識されていたが、その地域だけでなく、その周辺部でも実際に昼間のみの振動が多数記録されていることが分かる。また、陸前高田周辺などでは、黒枠で囲まれていない赤四角が存在する。これは、現行のマスターデータに登録されていないが、震源時刻および手動検測の両方で選択された地域、すなわち発破が頻発していると認識すべき地域が存在することを意味する。逆に、現行 MASTER データに登録されているにもかかわらず、震源時刻、手動検測どちらの条件でも抽出されていない領域（塗色されていない黒枠）が岩手県北部を中心に散見される。

新たな発破頻発地域の設定にあたり、2 章で述べたとおり 3 種類の候補データを用意した。ここでは、3 種類のデータのうち、2 種類以上で抽出されたセルについては、発破頻発地域として自動的に選定することとする。一方、1 種類のみで抽出された地域は、セルごとのイベント発生状況の確認を行ったうえで判断することとした（**表 1**）。**図 3** に確認に用いた図の一例を示す。作図には 8 年間の EVENT データを使用し、当該セルで発生したイベントの震源時刻のうち、発生年月日を横軸に、時分秒を縦軸に取った。白抜きのは自動処理結果を表す。黒丸および赤丸は手動検測により、それぞれ EQ あるいは BLAST ラベルが付与されて保存されているデータを意味する。なお、本稿で発破対象時間外とした 19 時から翌朝 7 時までを灰色で塗色した。同様の作図

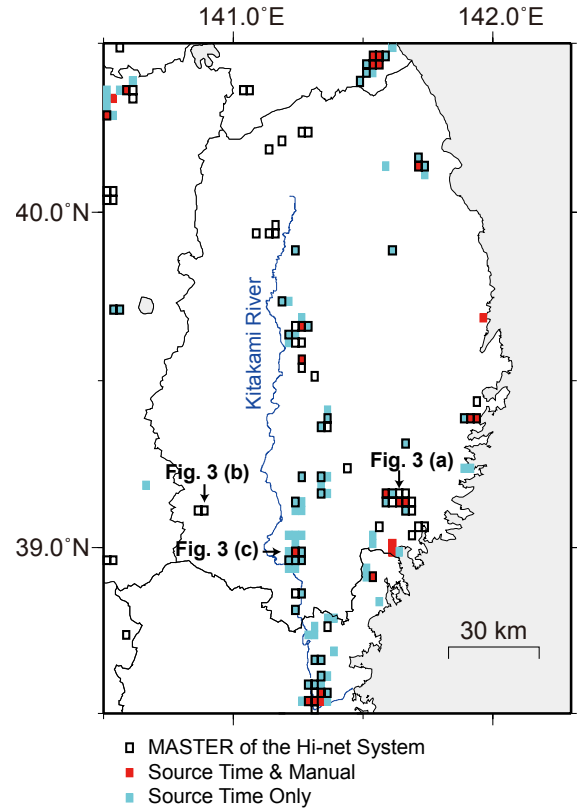


図 2 岩手県周辺における発破頻発地域候補抽出結果。黒枠は MASTER データ、赤は震源時刻と手動検測ともに抽出された場所、青は震源時刻のみで抽出された場所を示す。

Fig. 2 Candidates of blast areas in Iwate prefecture. Open boxes are the MASTER data of blast areas of the Hi-net system. Red squares indicate areas extracted from both source time and manually checked data. Blue squares mean areas from source time data only.

は、**表 1** で示した全 1,252 セルに対して実施したが、1 種類のデータセットのみで抽出されたセルを中心に、特定の時間に集中してイベントが登録されているかどうか、BLAST ラベルが付与されたイベントが頻発しているかどうか等を目視確認した。

表 1 発破頻発地域候補抽出状況と判断基準。各行の色は**図 2** に対応する。

Table 1 Relations of the blast area candidates and their judgements. Color in each line corresponds to **Fig. 2**.

MASTER	Source Time	Manual	Fig. 2	Number of Cells	Judgements
○	○	○	■	127	Accept
○	○	—	■	178	Accept
○	—	○	□	0	N/A
○	—	—	□	710	Check before Rejection
—	○	○	■	22	Accept
—	○	—	■	215	Check before Acceptation
—	—	○	□	0	N/A

○: Selected / —: Unselected

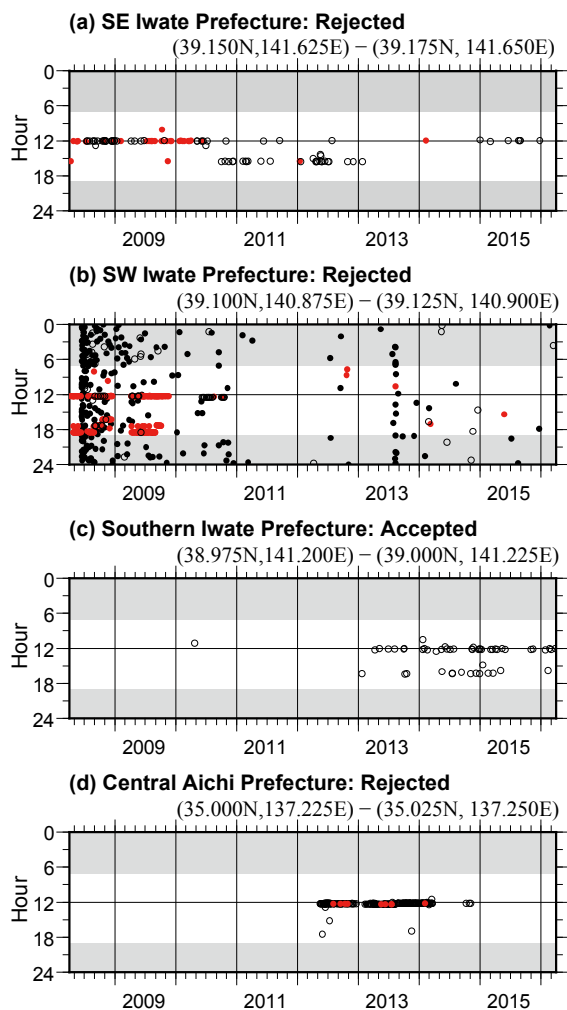


図 3 各セルにおける 2008 年 4 月から 2016 年 3 月までのイベントの発生状況。横軸はイベントの発生日月、縦軸は発生時刻を表す。黒丸、赤丸、白丸はそれぞれ、手動検測により地震と判断されたイベント、手動検測により発破と判断されたイベント、自動処理で検出されたイベントを表す。

Fig. 3 Source time distribution at each cell (April 2008 to March 2016). Horizontal and vertical axes indicate year and hour of source time of events, respectively. Black and red circles represent natural earthquakes and blast events confirmed manually. Open circles are events detected automatically.

MASTER データにのみ登録され、本検討では発破頻発地域の候補として抽出されなかったセルについては、そもそもイベントがほとんど発生していない場合とイベントが昼間に偏っていない場合が考えられる。前者の例を図 3(a)に示す。岩手県大船渡市と住田町の境界付近に位置するこのセル周辺には、セメント等の採鉱場が複数存在する。セルの位置を図 2 に示す。2010 年 3 月頃までは正午付近、2013

年 3 月頃までは 15 時頃の決まった時間にイベントが発生していたが、それ以降のイベント検知は非常に散発的になっており、2013 年 4 月以降を解析対象とした今回の検討では、イベント数不足と判断された。なお、このセル内に位置する大船渡市日頃市町のセメント鉱山の採鉱は 2013 年 2 月に終了したことが公表されており(太平洋セメント大船渡工場, 2016)、イベントの検知状況と一致している。このように直近の期間でイベント数が少ない地域については、発破頻発地域としての登録を解除することとした。

イベント発生が昼間に偏っていない例を図 3(b)に、その位置を図 2 に示す。岩手県奥州市付近に位置するこのセルでは、2009 年頃までは正午付近と 18 時前後の決まった時間に BLAST イベントが発生していたことが確認されている。2008 年 6 月 14 日にこのセルの極近傍で岩手・宮城内陸地震が発生した。この地震後は、セル内でも昼夜を問わずイベントが発生しており、手動検測の結果、昼間のイベントの多くが自然地震活動であると確認されている。通常、BLAST イベントの震源深さは極めて浅く決まる傾向にあることから、震源の深さの違いで両者を分離できないかを検討した。ただし、近傍に観測点が存在しない場合や地盤条件によっては、求められた震源深さによる両者の区分は困難になる。実際、図 3(b)に示したセルでは、BLAST イベントは深さ 8.4 ± 0.8 km、自然地震活動は 8.8 ± 1.0 km 周辺に分布しており、有意に分離することは出来なかった。明らかに地震活動が混在している場合は、発破頻発地域としての登録を解除した。

震源時刻によってのみ抽出されたセルについては、ある限られた時期に集中して発生していないかを確認した。一例を図 3(c)および(d)に示す。図 3(c)に示した岩手県一関市付近のセルは、図 2 に示したように北上川沿いの発破頻発地域として MASTER データに登録されている領域に近接している。このセルでは、2013 年 4 月以降にイベントの検知が急増した。イベントを検知する時刻も正午付近と 16 時頃に偏りが見られることから、新たな採鉱が始まったと考えられる。このように、最新時期においても活動が継続しており、かつ隣接する地域が発破頻発地域である場合は、隣接地から発破地域が移動あるいは拡大した可能性がある。このようなセルについ

ては発破頻発地域として新たに登録することとした。一方、**図 3 (d)** に示した愛知県中部の岡崎市付近のセルの事例では、大半のイベントが 2012 年 5 月から 2014 年 3 月までの 12 時 10 分頃に発生していた。現在、このセル内を通過している新東名高速道路が 2016 年 2 月に開通していることから、このセルにおけるイベントは、高速道路整備に関連する一時的な工事であったと判断出来る。このように解析期間の終盤には活動が見られなくなっている場合は、発破頻発地域としての追加登録はしないこととした。一定期間活動が継続しているものの、その地域が孤立的に存在する場合は、地形図や航空写真等で周辺に採石場、採鉱場等が存在しないかを確認し、関連しそうな施設が存在する場合は発破頻発地域として登録することとした。

以上のルールに従い、最終的に 657 セルを新たな発破頻発地域として指定した。岩手県周辺の結果を一例として**図 4** に示す。**図 4 (a)** は、既存 MASTER データを黒枠で、新たに指定した発破頻発地域を橙色で示した。**図 4 (b)** には、新たに指定した発破頻発地域と手動検測で BLAST ラベルが付与されたイ

ベントの震央位置を重ねて示した。北上川沿いや大船渡市周辺で新たな指定を追加した一方、岩手県北部の八幡平周辺等では指定を解除したセルもある。なお、上述の岩手・宮城内陸地震の余震域(**図 3b**)など、BLAST イベントの存在が確認されているものの、自然地震活動も活発化したことにより、指定を解除した地点もある。このような地域では、今後も手動検測により BLAST イベントを判定する必要がある。

6. BLAST イベントの地域的特徴と変遷

前節では、2013 年 4 月から 3 年間のデータベースを基礎データとして、新たな発破頻発地域の抽出を行ったが、**図 3** に示したように過去のイベント発生状況の推移を確認する際には、2008 年 4 月以降の 8 年間のデータを用いた。表 1 で示した全 1252 セルのイベント発生状況を確認した結果、**図 3 (a)** および **(d)** で示したように、昼間に偏ったイベントの発生がある時期に突然終了する、あるいは一定の期間だけ昼間にイベントが集中する地域が存在し、それぞれ採鉱や道路工事の終了に対応している可能性が

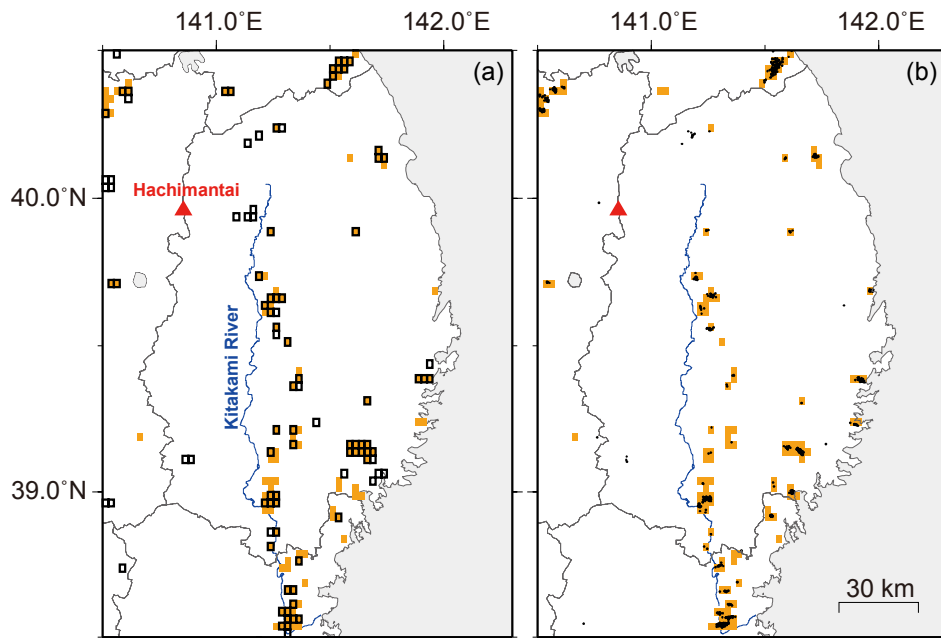


図 4 岩手県周辺における新たな発破頻発地域抽出結果。(a) 既存 MASTER データ (黒枠) と新たに抽出した地域 (橙色) の比較。(b) 新たに抽出した地域と手動で BLAST ラベルが付与されたイベント (2013 年 4 月～2016 年 3 月) の震央位置の比較。

Fig. 4 Distribution of the newly selected blast area in and around Iwate Prefecture. (a) Comparison between the MASTER data (open squares) and the newly selected area (orange squares). (b) Comparison between the newly selected area and the epicenters of the blast events detected manually from April 2013 to March 2016.

あることが明らかになった。本稿の作成にあたっては、前述の通り、表 1 に示した全 1,252 セルに対して同様の作図をしている。本節では、それらの図のうち地域的な特徴として明瞭なものを図 5 に示す。

図 5(a) は北海道上川郡内のセルであり、航空写真の確認を通じて、範囲内に小規模な採石場が存在することが判明している。図 5(a) から、このセルでのイベントは毎年、同じようなパターンを示していることが分かる。実際に検出されたイベントカタログを確認すると、イベント検知は 4 月から 11 月に限定されており、春から夏にかけては概ね 17 時 30 分から 18 時頃の間イベントが発生しているのに対し、9 月中旬頃以降から少しずつイベントの発生時間が早くなる傾向が見られる。これは、現地の積雪状況や日照時間が色濃く反映された結果と考えられよう。

一方、東北地方太平洋沿岸では、2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震の影響を明瞭に見ることが出来るセルが多数存在する。図 5(b) および (c) は、それぞれ岩手県大船渡市および宮城県石巻市周辺に位置するセルのイベント発生状況を表す。これらのセルは、図 4 に示す通り、いずれも今回の検討で発破頻発地域として抽出した領域であり、航空写真により、域内に採石場が存在することが判明している。図 5(b) のセルでは、東北地方太平洋沖地震前は、数日に 1 回の頻度でほぼ正午にイベントが発生していたが、2011 年 3 月 10 日にイベントを検知して以降、6 月 15 日までの 3 カ月間は、イベントが検知されていない。また、正午付近のイベントは地震からちょうど 5 カ月後の 8 月 11 日に初めて検知した。活発な余震活動に埋没する形で発破に関連するイベントの検知を漏らした可能性も否定出来ないが、数カ月にわたり 1 イベントも検知出来ない状況は、東日本大震災による操業停止との関連を考えるべきであろう。図 5(c) のセルでは、2009 年に 13 イベントを検知したものの、2010 年から 2011 年 3 月 5 日までに 5 イベントを検知するのみであり、発破が頻発している領域と言えるほどではなかった。このセルも東北地方太平洋沖地震後にしばらくイベント検知が停止していたが、2012 年 10 月中旬になってイベント検知が再開した。その後、2013 年 3 月以降は非常に活発な状態で推移している。なお、2013 年春には、手動検測で BLAST ラ

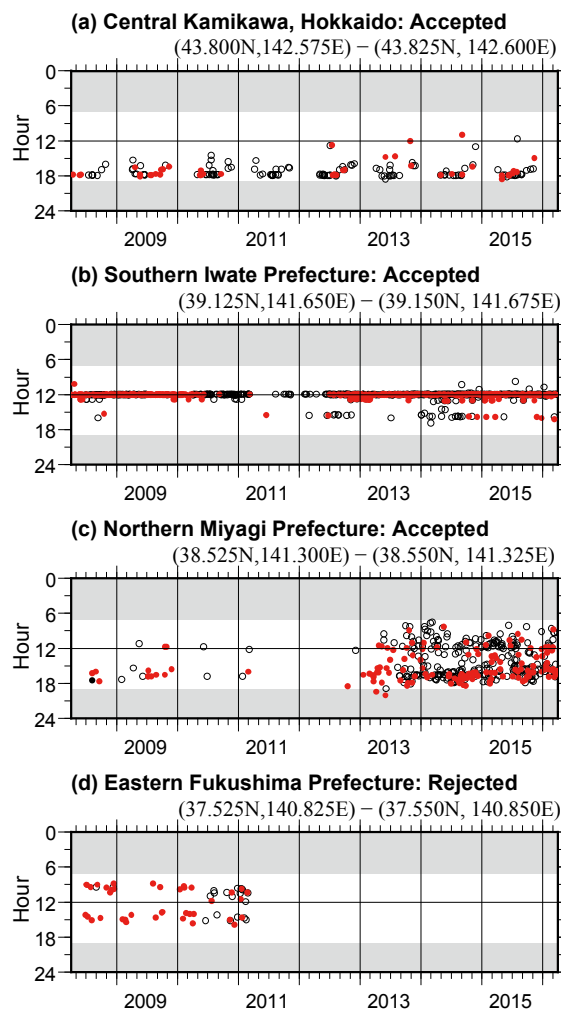


図 5 主なセルにおける 2008 年 4 月から 2016 年 3 月までのイベントの発生状況。表記は図 3 に同じ。

Fig. 5 Source time distribution at characteristic cells (April 2008 to March 2016). Notations are the same as Fig. 3.

ベルを付与したイベントが 19 時台、20 時台に 1 イベントずつ発生しており、震災復興事業との関連が示唆される。一方、図 5(d) は福島県浪江町付近に存在するセルであり、小規模な採石場が域内に存在する。このセルでは、2011 年 2 月までは年間 20 イベント程度を検知していたが、その後 2016 年 3 月末までイベントは検知していない。このセル周辺は、2016 年 10 月 7 日現在、東京電力福島第一原子力発電所の事故により帰還困難区域に指定されている(浪江町, 2016)。

図 6 に、東北地方周辺における BLAST イベント検知の分布の変化を示す。本図作成にあたって、解析期間の重複を避けるため、東北地方太平洋沖地

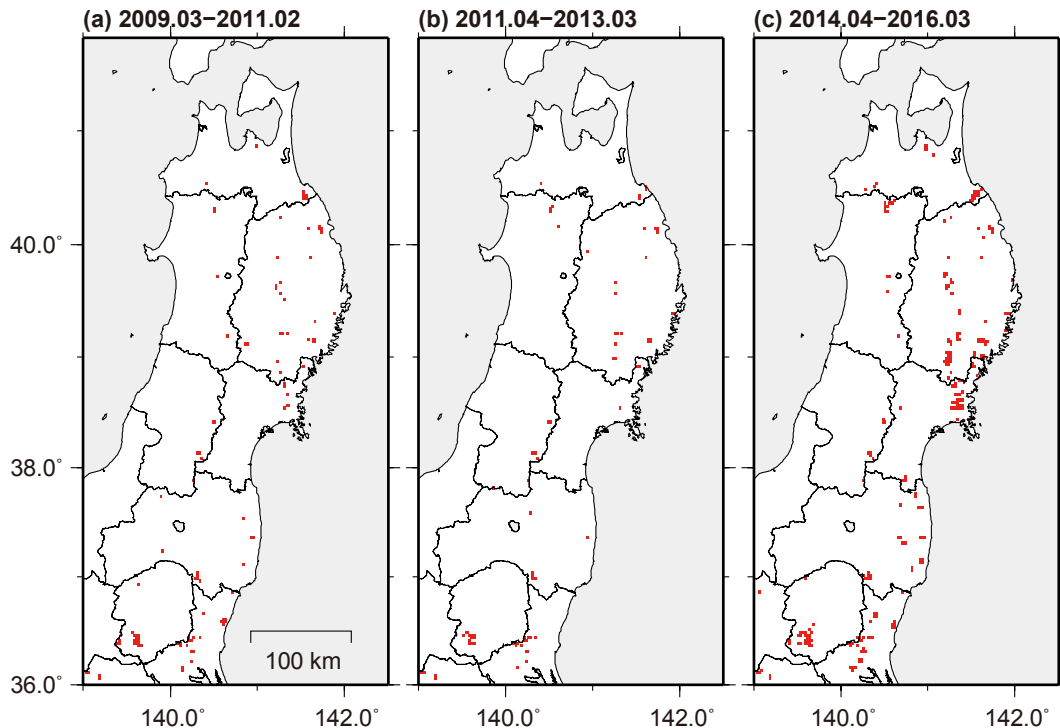


図6 自動的に抽出された東北地方における発破頻発領域の変遷。(a) 2009年3月から2011年2月。(b) 2011年4月から2013年3月。(c) 2014年4月から2016年3月。

Fig. 6 Transition of the automatically detected blast area in the Tohoku district. (a) March 2009 to February 2011. (b) April 2011 to March 2013. (c) April 2014 to March 2016.

震直前(図6a)については2009年3月から、直後(図6b)については2011年4月から、最近(図6c)については2014年4月からそれぞれ2年間のデータを対象とした。領域の抽出に際しては、4章の条件に準じた。すなわち、2年間で6個以上のイベントが含まれるセルについて、セル内のイベントの90%以上が発破対象時間帯(7時~19時)に集中しているセルと、手動検出でBLASTラベルが付与されたイベントが6個以上含まれるセルを抽出して示した。ただし、5章で行ったような各セルのイベント発生状況の詳細は確認していない。図6(a)と(b)から、東日本大震災の影響により、地震発生から2年間は岩手県および宮城県を流れる北上川沿いや福島県浜通り地方、茨城県日立市付近でBLASTイベントが検知されなくなったことに加え、岩手県や秋田県の内陸部でも活動が見られなくなった、あるいは著しく低下した地域が存在することが分かる。一方、2014年以降の2年間(図6c)では、それら活動が休止した地域の多くで活動が再開しているほか、岩手県周辺、福島県浜通り、茨城県北部で発破頻発地域が拡大している。このことは、震災復興需要に

よる採鉱量の増加や工事範囲の拡大による影響によるものと考えられる。

6. まとめ

地震活動のモニタリングを効率的に行う上で、採石発破等の人工地震によるイベントと自然地震を適切かつ確実に区別することは重要である。防災科研Hi-netの自動震源決定処理では、採石発破等の人工的な震動によるイベントを除外することを目的とした発破頻発地域データベースを整備しており、推定された震源の位置や震源時刻がこのデータベースに合致する場合に、当該イベントは発破(人工地震)として分類され、自然地震とは区分される仕組みになっている。しかし、発破頻発地域は工事の進展や様々な環境の変化により、消長を繰り返す。発破に起因するイベントの特徴については既に岡田(1996)らにより報告がなされている。本稿では、それらの特徴をHi-netの震源カタログに適用することにより、直近の発破頻発地域を半自動的に抽出する方法について整理を行った。

本稿では、2013年4月から2016年3月までの3

年間のデータを準備し、各地域で深さが 10 km よりも浅く決まっているイベントの時空間的な分布状況を調査した。また、2008 年 4 月以降の 8 年間のデータも抽出し、やや長期的なイベント発生状況の変遷の確認も行った。本稿では、発破頻発地域を定める期間を 3 年とした。これは、出来るだけ新しいデータのみで情報を更新する仕組みを作るといった目的と適切な判断を行うためにはある程度のデータの蓄積が求められるという条件が折り合う期間として作為的に設定した。特に現在は東日本太平洋沖地震等の余震や誘発地震などの影響により、「発破頻発地域」内に自然地震活動が発生することがある。一旦、自然地震活動が活発化した場合は、時間的偏りの度合いが低下するため、発破頻発地域の指定からは解除することになるが、図 3 (b) のように自然地震と BLAST イベントが完全に混在する場合は、Matched Filter 法 (例えば、Peng and Zhao, 2009) など別の手法の適用を検討する必要がある。また、東北地方の太平洋側では、東日本大震災からの復興事業の影響と見られる発破頻発地域の拡大も確認されており (図 6)、今後、事業の進展にともなって状況が変化することも想定される。したがって、発破頻発地域は定期的に、できるだけ負担のない、かつ解析者に依存しない形で更新されることが望ましい。一方、本稿では、もともと発破頻発地域としてデータベースに登録されていた情報 (MASTER データ) についても検討対象とし、イベントカタログからの抽出に漏れた領域について、長期間の活動の推移を目視確認した。明らかに活動が停止したと考えられる領域 (例えば、図 3a) や活動が極めて低調な領域は指定解除としたが、手動検出で BLAST ラベルが付与されたイベントが年平均で 1 ないし 2 個発生し、自然地震は検知されていない地域も存在したため、そのような地域は「発破頻発地域」として再度登録することとした。本稿では、人工的な震動を頻繁に生じる領域をデータベース化することを実施したが、自然地震の詳細な震源位置とその活発度についてもデータベース化し、発生したイベントの時間と場所によって、人工地震と自然地震のどちらの可能性が高いのか、あるいは過去に検知されていない非常に珍しいイベントなのかを自動的に評価する方法も検討する必要がある。

謝辞

本稿における一部の図の作成には、Wessel and Smith (1998) による GMT を使用しました。また、地図の作成には、国土交通省による国土数値情報を利用いたしました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 汐見勝彦・小原一成・針生義勝・松村 稔 (2009) : 防災科研 Hi-net の構築とその成果. 地震 2, 61 特集号, S1 – S7.
- 2) 松村正三・岡田義光・堀 貞喜 (1988) : 地震前兆解析システムにおける地震データ (高速採取データ) の処理. 国立防災科学技術センター研究報告, 41, 45 – 64.
- 3) 岡田義光 (1996) : 関東・東海地域における人工震源の分布とその時間的変遷. 防災科学技術研究所研究報告, 57, 33 – 57.
- 4) 平 貴昭・津村建四朗 (2001) : 気象庁, 東北大学の震源カタログに含まれる人工震源の抽出. 地震 2, 53, 255 – 258.
- 5) 太平洋セメント (2016): 太平洋セメント大船渡工場, http://www.taiheiyo-cement.co.jp/oofunato/pdf/co_company_01.pdf, (最終アクセス日: 2016 年 11 月 25 日)
- 6) 浪江町 (2016) : 初めての方へ—すぐわかる浪江町 (なみえまち) の現況 (2016 年 10 月 7 日更新), <http://www.town.namie.fukushima.jp/soshiki/2/namie-factsheet.html>, (最終アクセス日: 2016 年 11 月 4 日)
- 7) Peng, Z., and P. Zhao (2009): Migration of early aftershocks following the 2004 Parkfield earthquake, *Nat. Geosci.*, 2, 877–881, doi:10.1038/ngeo697.
- 8) Wessel, P. and Smith, W. H. F. (1998): New improved version of the Generic Mapping Tools released. *Eos Trans. Am. Geophys. Union*, 79, 579.
(2016 年 11 月 29 日原稿受付,
2016 年 12 月 28 日改稿受付,
2017 年 1 月 5 日原稿受理)

要 旨

防災科学技術研究所が実施している自動震源決定処理では、碎石・採鉱発破などの人工的な震動と自然地震による震動を自動的に区別することを目的に、発破が繰り返し実施される地域をあらかじめ発破頻発地域としてデータベースに登録している。しかし、自動震源決定処理システムを十数年にわたって運用していると、新たに発破が繰り返し実施されるようになった場所や実施されなくなった場所、周辺で自然地震が多発するようになったため発破地域としての指定を解除すべき場所等が見受けられるようになってきた。本研究では、防災科研 Hi-net のデータベースに蓄積された震源カタログの情報から、発破が頻発していると考えべき領域の更新方法について検討を行った。また、この方法を 2011 年東北地方太平洋沖地震前後の 2 年間のデータに適用し、発破地域の変化についての考察を行った。

キーワード：発破，自動震源決定処理，震源カタログ，防災科研 Hi-net，2011 年東北地方太平洋沖地震