HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	2010年12月２日に札幌市直下で発生した石狩地方中部の地震（MJMA4.6）と札幌周辺の地震活動
Author(s)	一柳, 昌義; 山口, 照寛; 高田, 真秀 他
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 76, 1-13
Issue Date	2013-03-19
DOI	https://doi.org/10.14943/gbhu.76.1
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/52301
Type	departmental bulletin paper
File Information	76-P1-13.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

北海道大学地球物理学研究報告
Geophysical Bulletin of Hokkaido University, Sapporo, Japan
No. 76, March 2013, pp. 1－13

論説

2010年12月2日に札幌市直下で発生した石狩地方中部の地震（MJMA4.6）と札幌周辺の地震活動

一柳　昌義・山口　照寛・高田　真秀・東　龍介・黒井　和典・山田　卓司・高橋　浩晃
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
前田　宜浩
防災科学技術研究所

（2013年1月17日受理）

Seismic Activity Associated with the 2010 M4.6 Sapporo Earthquake in central Ishikari region, Hokkaido

Masayoshi ICHIYANAGI, Teruhiro YAMAGUCHI, Masamitsu TAKADA
Ryosuke AZUMA, Kazunori KUROI, Takuji YAMADA and Hiroaki TAKAHASHI
Institute of Seismology and Volcanology, Graduate School of Science,
Hokkaido University
Takahiro MAEDA
National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

(Received January 17, 2013)

On December 2, 2010, MJMA4.6 shallow felt earthquake occurred beneath southeastern part of Sapporo city. Three temporal seismic stations were installed near epicentral area. Reliable hypocenter data estimated by double difference procedure with local seismic velocity structure indicated clear southeastern-dipping distribution. Fault plane from focal mechanism estimated from P-wave polarization well agreed with this hypocenter distribution. Geometry of hypocenter distribution was also well consistent with an anticline structure and possible buried active fault estimated for earthquake disaster damage assumption by local government. Recalculation of hypocenters of the 1985, 1990, and 2010 felt earthquakes under equal condition implied that epicentral locations of these three events were approximately same. These facts implied possible stress concentration in epicentral region.

Ⅰ．は　じ　め　に

2010 年 12 月 2 日 6 時 44 分に石狩地方中部を震源とする気象庁マグニチュード 4.6 の地震が発生した（Fig. 1 の赤星印）．気象庁によると，震源は札幌市南部の清田区里塚付近の深さ 3 km である．この地震により，震源に近い場所では，地すべりや学校の窓ガラスが割れる等の被害が発生した．震源に最も近い震度観測点である防災科学技術研究所の K-NET 広島観測点（HKD182）での計測震度は 3 であった．一方，道央自動車道北広島インターチェンジに設置されている道路管理用の震度計では参考震度 5 弱が観測されており（札幌管区気象台，2010），重藤・他（2011）によるアンケート調査の結果では最大震度 6 弱程度の揺れを感じた住民がいるなど，震源に近い場所では局所的に強い揺れがあった可能性が高い．

今回の震源域周辺では，本震の約 1 カ月半前の 2010 年 10 月 20 日から地震活動が活発化しており，臨時地震観測を 1 観測点で実施していたが，本震の発生を受けて更に 2 点を追加した．本研究では，臨時地震観測によって得られた余震分布の特徴と，過去に発生したこの付近の地震との関係について検討する．

Ⅱ．観測方法及び震源決定

2010 年 10 月 20 日に北広島市西の里を震源とする M3.0 の有感地震（最大震度 3）が Fig. 1 の領域 A で発生した．その後，周辺での地震活動が活発化したため，北海道大学地震火山研究観測センター（以下，ISV）では 10 月 26 日に臨時地震観測点を 1 点設置した（Fig. 2a，b の観測点名 KTH）．臨時観測では，微小地震から有感地震まで振り切れなく記録するために，マーク

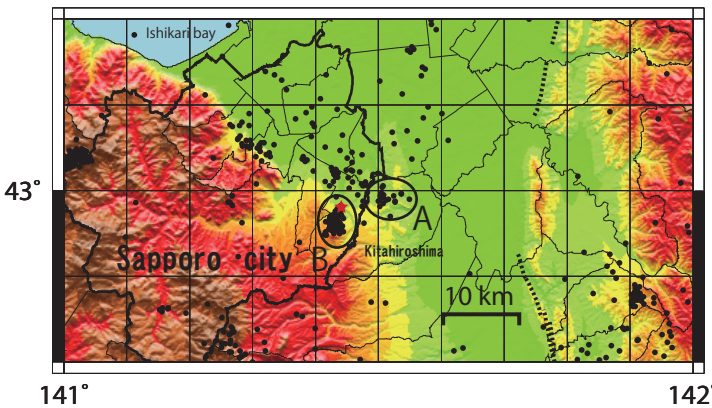

Fig. 1. Map showing seismic activity in Central Ishikari area determined by Japan Meteorological Agency (JMA) from 1st August 1923 to 30 June 2011. Star indicates the epicenter of the 2 December 2010 M4.6 earthquake. Dash lines indicate Ishikari-Toen active faults. Regions of A and B indicated epicental areas for October, November and December 2010 activities, respectively.

プロダクツ社製の L4C-3D 短周期地震計（固有周期１秒）とミツトヨ社製のポータブル強震計 JEP-6A3 を併設した．データ収録装置としては白山工業社製のデータロガー LS7000XT（ダイナミックレンジ 24bit）を用い，データサンプリングを 100Hz，増幅率を 0 dB とした．当初は，2 Gbyte のコンパクトフラッシュ（CF）カードを用いてデータを現地収録していたが，その後，携帯電話を利用した公衆インターネット網経由でリアルタイムにデータ送信を行う方式に変更した（平原，2011）．また，12 月 2 日に M4.6 の地震が Fig.1 の領域 B で発生したのを受け，2 か所の臨時地震観測点を新たに設置した（Fig. 2a，b の観測点名 NSO と KSM）．使用機材は，最初に設置した KTH 観測点と同じ仕様である．

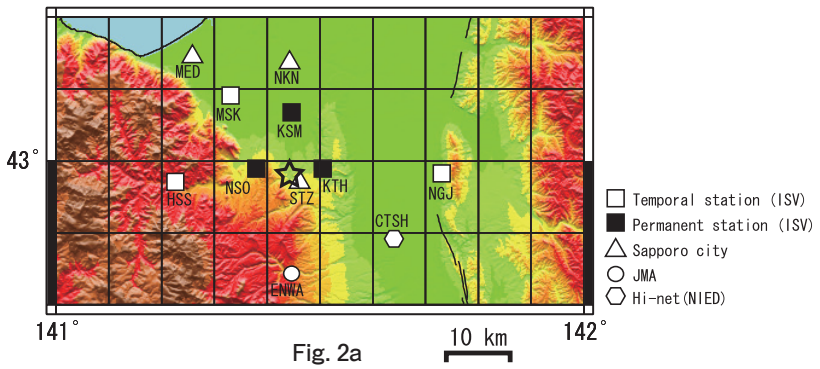

Fig. 2a

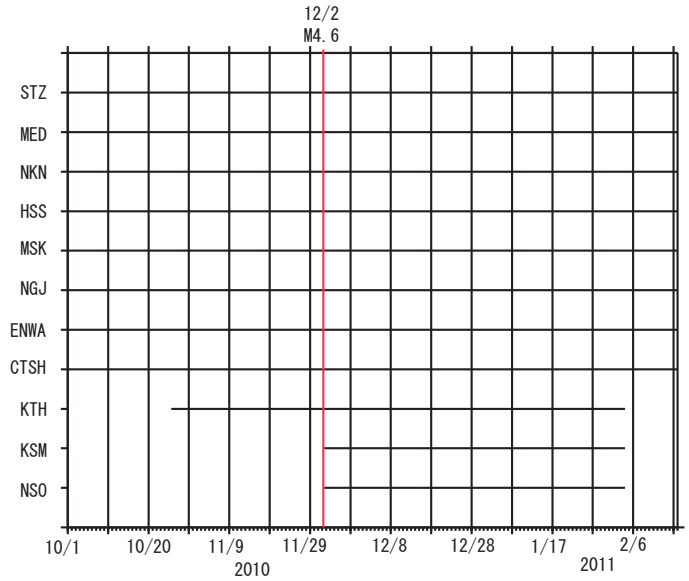

Fig. 2b

Fig. 2. (a) Seismic stations used in this study. Open star indicated epicenter of M4.6 mainshock. (b) Operation history of each seismic station shown in Fig. 2a. Red line indicated day of main shock.

テレメータでリアルタイム伝送を実施する前のデータについては，CF に蓄えられたデータを手動で定常観測点のデータとマージして連続波形ファイルを作成し，地震判定を行ってイベント波形ファイルを作成した．P 相と S 相は win システム（卜部・束田，1991）を用いた目視検測作業により同定された．

震源決定には，Double-Difference hypocenter determination 法（以下 DD 法）（Waldhauser and Ellsworth, 2000）を用いた．DD 法では，それぞれの地震に対し，初期震源を与えることが必要であるため，震源計算プログラム HYPOMH（Hirata and Matsuura, 1987）により推定された震源を初期値として与える．一柳・他（2010）は，石狩低地東縁断層帯の定常地震観測網とその隙間を埋めるように増設された 8 カ所の地震観測点から得られた高密度なデータを用いて石狩低地東縁断層帯周辺の地震波速度構造の推定を行っている．本研究では，一柳・他（2010）によって求められた 3 次元 P 波速度構造モデルのうち，今回の地震の震源域付近の値を採用した（Fig. 3 の黒色実線）．但し，一柳・他（2010）の速度構造は離散的な層構造であるのに対し，HYPOMH では連続的な速度勾配により構造を表現するため，層構造モデルを内挿した灰色実線のような 1 次元 P 波速度構造モデルを設定した．なお，Vp/Vs 比は 1.73 と仮定した．

具体的な震源計算は以下のように行った．はじめに，読み取りを行った全地震に対して HYPOMH を用いて震源計算を行った．この結果得られる各観測点における P 相と S 相の走時残差の平均値を観測点補正値（Table 1）として与え，再度 HYPOMH で震源計算を行った．この結果，102 個の初期震源が求められた．次に，初期震源が求まった地震の各観測点での波形

Table 1. Travel time corrections for each station used in hypocenter calculation.

	P wave (sec)	S wave (sec)
STZ	0.132	0.003
MSK	0.110	−0.010
NKN	−0.16	−0.748
HSS	0.222	0.242
ENWA	−0.137	−0.367
CTSH	−0.221	−0.964
NGJ	0.336	0.140
KTH	0.122	−0.384
NSO	0.195	−0.642
KSM	−0.185	−1.561

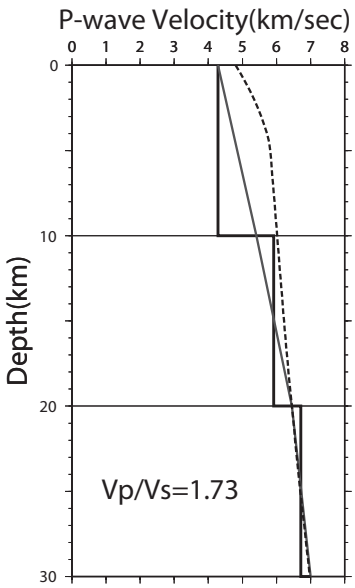

Fig. 3. One dimensional P-wave velocity structure model from Ichiyanagi et al. (2010). Solid and gray lines indicated velocity models for Double-difference hypocenter determination method (Waldhauser and Ellsworth, 2000) and HYPOMH program [Hirata and Matsuura, 1987], respectively. Dash line was the JMA2001 velocity structure model (Ueno et al., 2002).

に対し，5-15Hz のバンドパスフィルターをかけたうえ相互相関係数を求めた．求められた相関係数を各観測点の重みとした上で初期震源を与え，DD 法で 25 回の反復計算を実施して最終震源を決定した．DD 法の適用前後で走時残差の variance は 2.141 秒から 0.038 秒に減少した．

Ⅲ．議　　論

1．臨時地震観測点の効果

すべての臨時地震観測点の設置が完了しデータの取得が開始された 12 月 2 日 16 時以降の震源分布を Fig. 4 に示した．Fig. 4a は定常地震観測点のみで決定した震源分布，Fig. 4b は定常観測

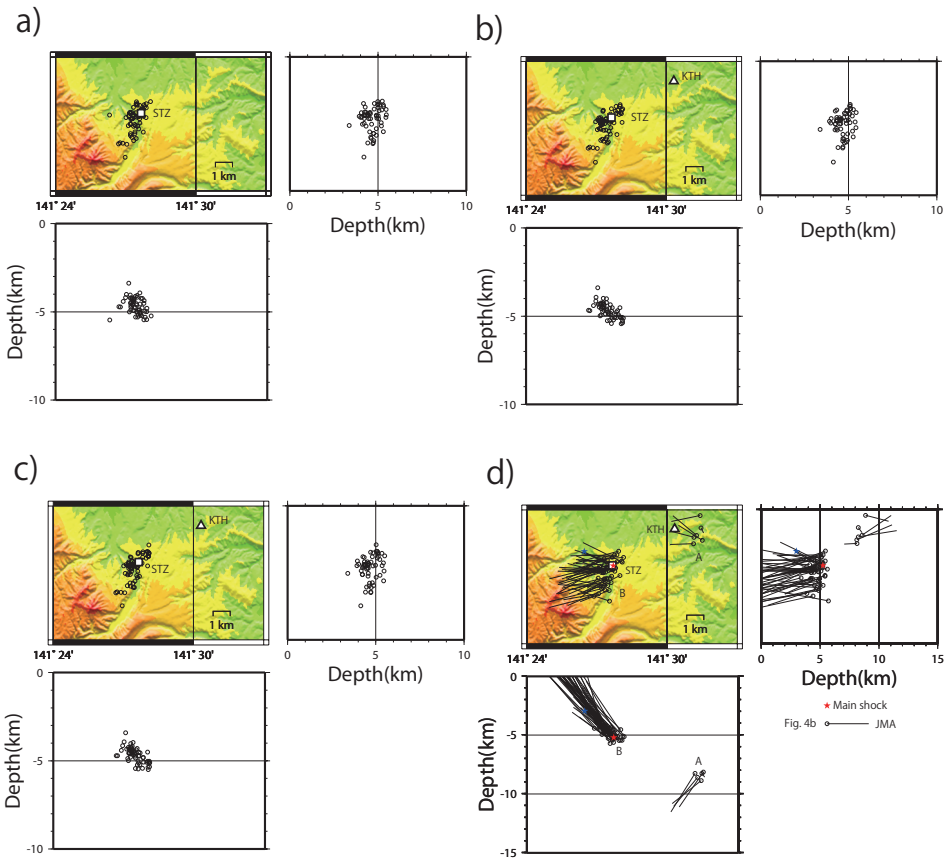

Fig. 4. (a) Relocated aftershock distribution from 2 December 2010 to 24 January 2011 determined using the double-difference hypocenter determination method by only permanent stations. Open square is STZ permanent seismic station. (b) Relocated aftershock determined by KTH temporal station (open triangle) and permanent stations. (c) Relocated aftershocks determined by three temporal stations (KTH, NSO and KSM) and permanent stations. (d) Hypocenter location comparison between Fig. 4b (open circles) and JMA catalogue (tip of the bar connected to an open circle) from 22 October 2010 to 24 January 2011. A red and blue star indicated main shock hypocenter from Fig. 4b and that from JMA catalogue, respectively.

点に KTH 臨時観測点を 1 点加えた場合の震源分布，Fig. 4c は更に NSO，KSM 観測点も加えた場合の震源分布を示している．気象庁一元化震源カタログに収録されている地震に対し，Fig. 4b の震源位置と比較したものを Fig. 4d に示した．

臨時観測点を加えた余震分布では，震源分布が東落ち傾斜であることがより明瞭である．一元化震源との比較では，全体的に 3 km 程度東側に決定されていることが分かる．領域 B においては，一元化震源で多くの地震の深さが 0 km であったが，本研究では 5 km 付近に決定された．これらの特徴は，震源決定で使用された観測点を震源域近傍の観測点に限定したこと，用いた P 波速度構造の深さ 0–10 km の部分が気象庁の用いている日本列島の標準的な速度構造である JMA2001（上野・他，2002）と比較して相対的に遅くなっていることなどを反映したものと考えられ，ルーチン的なものに比べ高精度な震源を求めることができたと考える．

2. 震源分布の特徴

Fig. 5 には，定常観測点に KTH 観測点のみを加えた場合の震央分布と，C–D と E–F の鉛直断

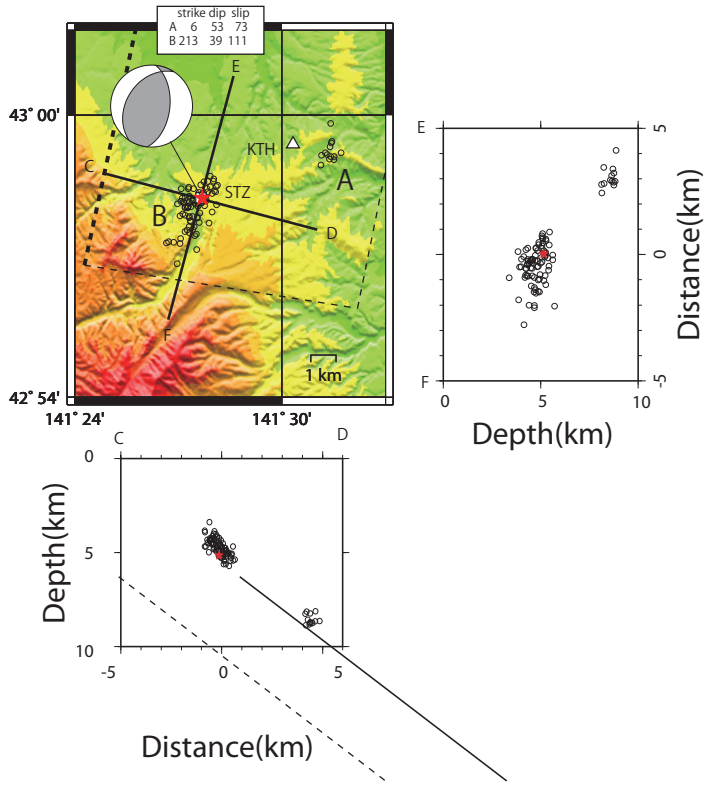

Fig. 5. Relocated aftershock distribution from 26 October 2010 to 24 January 2011 determined using KTH station (open triangle) and permanent station (open square). Vertical sections along the line C–D and E–F are also shown. Red star indicated main shock. Focal mechanism of the main shock determined from P wave polarities is also shown. Dash and solid lines indicated Tsukisamu fault estimated by Sapporo city and this study, respectively.

面に投影した震源の深さ分布を示している．また，Fig. 6 には東西方向に投影した震源の時空間分布を示した．これらの図によると，今回の地震活動は 2010 年 10 月 20 日に領域 A で発生し始めた．地震の深さは約 8 km であった．その後，11 月 24 日からは，領域 B に活動域が移り，領域 A では地震が発生しなくなった．領域 B での地震の深さは，約 3-6 km に分布し，それ以前の領域Aの地震活動と比較して有意に浅くなった．

12 月 2 日の本震を含む領域 B の余震分布は，北北東 - 南南西方向に楕円状に分布するとともに，深さ方向では東南東方向に約 55 度の傾斜で深くなるような面上に分布している．Fig. 5 には，本研究で決定した P 波初動メカニズム解を示した．東南東－西北西方向に主圧力軸（P 軸）を持つ逆断層解が得られており，メカニズム解の一節面は余震分布と調和的である．また，このメカニズム解の P 軸の方向は，この地域の水平主歪の縮みの方向（国土地理院，1997）とも調和的でもある．

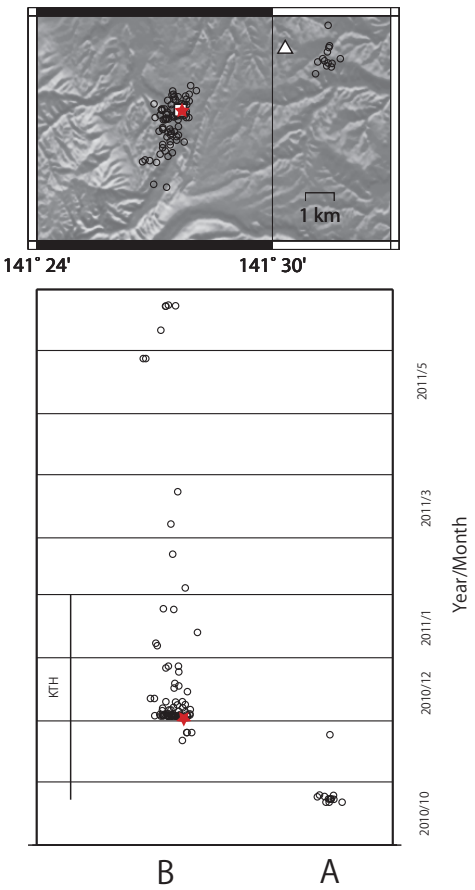

Fig. 6. Space-time distribution of epicenters along N-S profile from 1st October 2010 to 30 June 2011. Red star indicated epicenter of main shock. Solid line is operation term of KTH station. Epicenters were concentrated in region A and B.

3. 札幌市の想定地震断層との関係

札幌市周辺部の石狩低地帯では，第四紀に形成された背斜及び向斜構造が南北方向に発達し（岡，1997），活断層である野幌丘陵断層帯が存在する（池田・他，2002）．札幌市（2008）は地下構造や活構造等の調査結果から札幌市直下に 3 本の伏在活断層を想定し（Fig. 7 の矩形），それらの断層を起震断層として地震被害想定を実施している．ここでは，今回得られた震源分布と，札幌市（2008）が想定した断層との関係を検討する．

今回発生した地震の震源域は，3 つの想定断層のうちのひとつである月寒断層（Fig. 7 の B 断層）の南端付近にあたる．この断層は，札幌市を南北に貫いている月寒背斜に対応するものと考えられ（岡，1997），札幌市（2008）による想定地震のパラメータでは，断層面積 28 km×20 km，断層上端の深さ 6km，東南東方向に 45° で傾斜しており，M7.3 の地震の発生が想定されている．この想定断層の走行や傾斜角は，12 月 4 日の本震のメカニズム解の節面と調和的である．

今回の地震の余震分布と札幌市（2008）による想定月寒断層を Fig. 5 に示す（Fig. 5 の鎖線）．今回発生した地震の震源は，想定月寒断層よりも浅い部分に求まっている．この断層面を 6 km 東南東側に移動させると（Fig. 5 の実線），領域 A の震源域と領域 B の震源域は直線状に並び，その傾斜角は震源メカニズム解とほぼ一致する．札幌市（2008）の想定断層は，バイブロサイスによる構造情報やボーリングデータなどから推定された活構造など間接的な情報に基づいて設定されたものであり，断層の位置や形状については不確実性が大きいと考えられる．今回発生した一連の地震活動は，位置的に月寒背斜に関連した活動である可能性があり，月寒断層の位置や形状に関する基礎的なデータとなることが期待される．特に断層上端の深さは，地震動予測とそれに基づく被害想定において重要なパラメータであり，断層上端が浅くなるに従って地表での揺れも大きくなることが予想される．現在の想定断層の上端は 6 km に設定されているが，今回の活

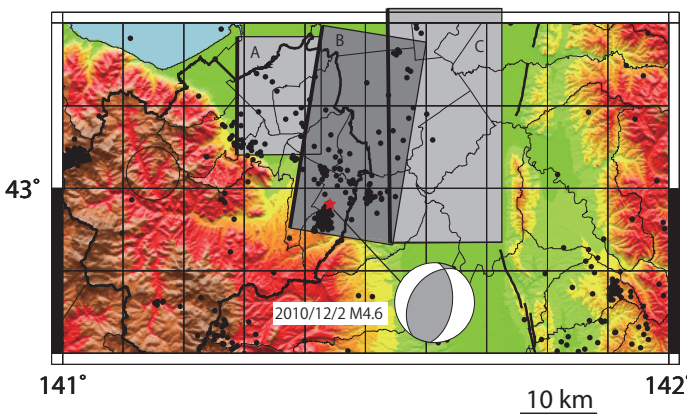

Fig. 7. Location of three active faults estimated by Sapporo city. A, B and C are Nishi-Sapporo, Tsukisamu, and Nopporo faults, respectively. Solid lines indicated Ishikari-Toen active fault. Solid circles are epicenters determined by Japan Meteorological Agency (JMA) from 1st August 1923 to 30 June 2011.

動での最も浅い震源が深さ３km 程度であること，札幌市（2008）が実施したバイブロサイス探査から基盤の深さが３km 程度に推定されていることは，この浅さまで地震性すべりが起こる可能性を示している．これらの新たな知見は，想定地震と被害想定の見直しを行う際には留意すべき点であると考える．

4. 過去の地震活動との比較

札幌市周辺で発生した歴史記録に残る最大級の地震は1834 年石狩湾の地震（M6.5）である．この地震では，震央付近では震度６以上の揺れが起きたと推定されており，当時和人が居住していた石狩川河口で家屋全壊 23 棟等の被害が発生したほか，液状化も数多く報告されている（札幌管区気象台，2000）．笠原・宮崎（1998）は，この地震についての古文書や液状化痕跡などを整理し，震源が内陸の札幌市北部である可能性が高いと推定している．最近 100 年間の札幌市周辺の地震活動については，阿部（1981），札幌管区気象台（1985）．笠原・宮崎（1998），札幌管区気象台（2000）に詳しい．Fig. 8 には，1923 年以降の札幌市周辺の気象庁一元化震源と札幌管区気象台（2000）に掲載している 1927 年（M4.8）と 1951 年（M 不明）の有感地震を加えた

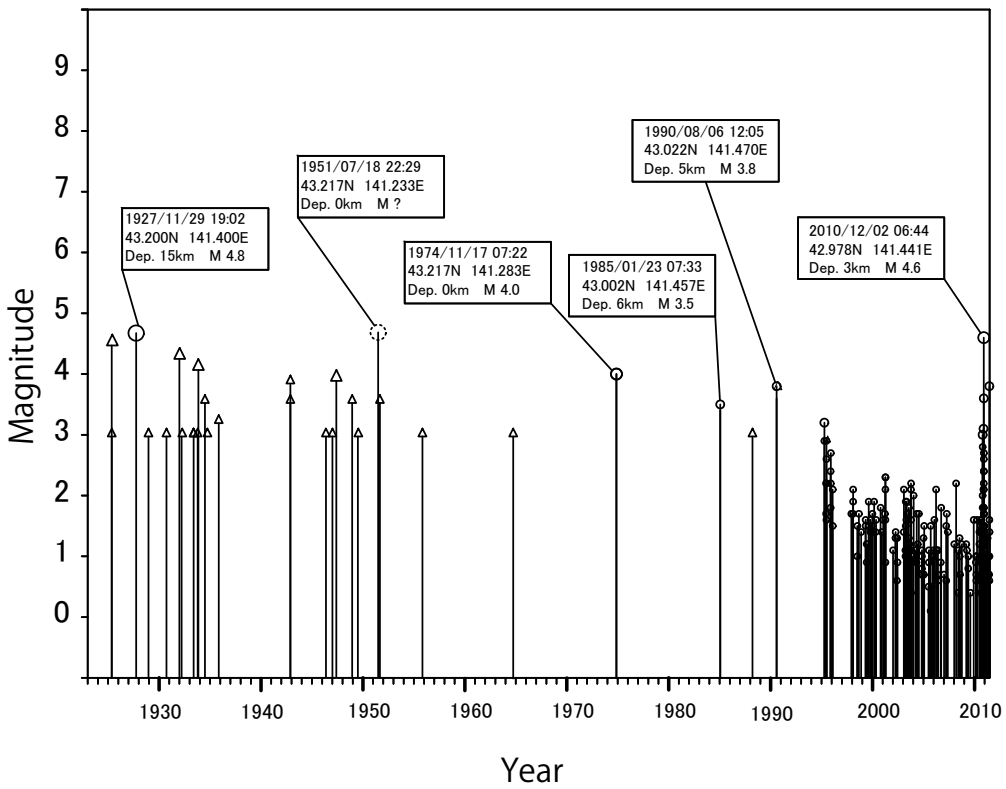

Fig. 8. Magnitude-time diagram of earthquakes in Sapporo region from January 1st 1923 to 30 June 2011. Open circles and triangles are earthquakes determined from JMA and Kasahara and Miyazaki (1998), respectively.

M-T 図を示している（Fig. 8 丸印）．更に笠原・宮崎（1998）によって調査された札幌とその周辺で発生した有感地震も加えてある（Fig. 8 三角印）．この図を見ると，たびたび札幌市周辺直下を震源とする有感地震が発生しており，この地域の地震活動が決して低くないことが分かる．

ISV の札幌地震観測所は 1973 年から微小地震観測を開始し，1976 年からは道内 9 観測点でのテレメータ観測を実施することで，札幌周辺で発生する地震活動をより詳細に把握出来るようになった．また，札幌で震度 2 を記録した 1985 年の地震（M3.5）については，鈴木・本谷（1985）によって震源位置・メカニズム解・震度の調査が行われている．

ここでは，2010 年に発生した地震の震源と，過去に発生した地震の震源との関係を調べるため，1985 年 M3.5，1990 年 M3.8，2010 年 10 月 2 日 M3.0 そして 2010 年 12 月 4 日 M4.6 の地震について検討を行う．1985 年 1 月 23 日 M3.5 の地震については，記録媒体の保存状態が悪く，デジタル波形データを読み出すことができなかったが，波形のハードコピーと検測値が現存する．1990 年 8 月 6 日 M3.8 の地震についても，デジタル波形記録の再生は出来なかったものの，検測値は保存されていた．

まず，検測値を用いて震源の再決定を行った．Fig. 9 に示した観測点（以下，広域観測網）では，これら 3 つの地震をすべて観測している．このため，同じ観測点・P 波速度構造・震源決定方法を用いることにより，3 つの地震の震源位置の比較を行うことが可能である．一次元 P 波速度構造は対象地域の速度構造を反映した Fig. 3 の灰色実線で示したものを用い，HYPOMH プログラム（Hirata and Matsuura, 1987）により震源計算を実施した．その結果を Fig. 9 に示す．1985 年，

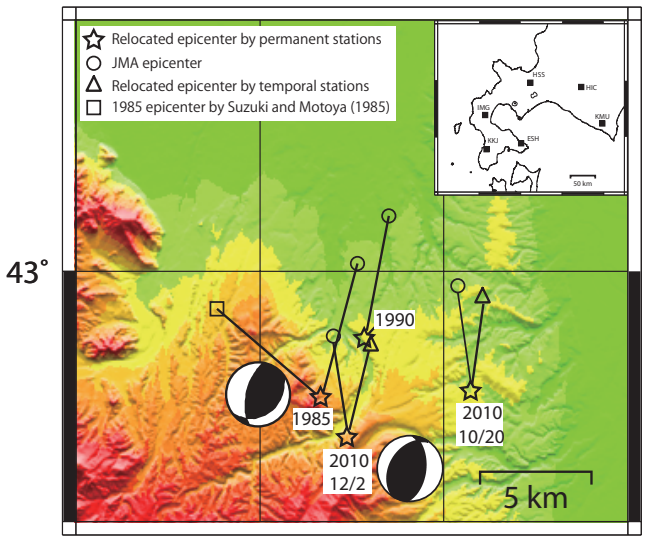

Fig. 9. Epicenter locations of the 1985 M3.5, 1990 M3.8, 2 October 2010 M3.0 and 4 December 2010 M4.6 earthquakes. Inserted map indicated seismic stations used in hypocenter relocation for above four events. Focal mechanisms for the 1985 from Motoya and Suzuki (1985) and 2010 mainshock determined by this study were also shown.

1990 年と 2010 年 12 月 2 日の 3 つの地震の震央は約 5km 以内の狭い範囲に集中している．

一方，2010 年の 2 つの地震について，広域観測網で決定した震央（Fig. 9 の星印）と第Ⅱ章で求めた震源（Fig. 9 の三角印）を比較すると，広域観測網による震央が 4 km 程度，南南西側に位置していることが分かる．第Ⅱ章で求められた震源がより確度が高いため，広域観測網で求められた震源にオフセットがかかっていると見るべきである．これを考慮すると，1985 年と 1990 年の地震は共に 2010 年の震源に近接した場所で発生していた可能性が高い．

Fig. 10 には，1985 年・1990 年・2010 年 12 月 2 日の地震の観測点ごとの上下動成分の速度波形を示した．観測点間の P 相の到着時刻差は 3 つの地震でほぼ同じであるが，1985 年と 1990 年の波形はダイナミックレンジの制約から振り切れてしまっている．また，３つの地震が記録されている観測点が少ないこともあり，波形の類似性を検討することは困難である．

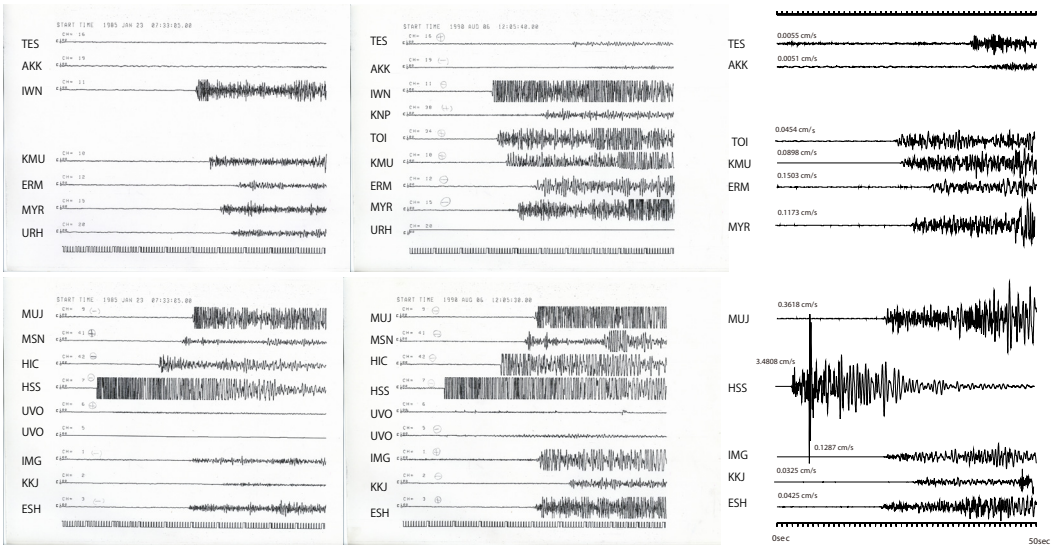

Fig. 10. Seismograms of M3.4 on 23 January 1985, M3.8 on 3 August 1990 and M4.6 on 2 December 2010.

Ⅳ. お　わ　り　に

2010 年 10 月 20 日に北広島市西の里付近から始まった地震活動は，その後札幌市清田区方面に移動するとともに震源の深さも浅くなった．12 月 2 日に発生した本震の余震は，北北東－南南西方向に楕円状に分布し，東南東方向に約 55 度の傾斜で深くなる傾向を示した．この余震分布は，東西圧縮の逆断層を示す本震のメカニズム解から推定される断層面と調和的である．12 月 2 日の本震余震と 10 月 20 日から発生していた前震の震源分布からは，更に深部に至る東傾斜の構造が示唆される．札幌市を含む石狩低地帯には，石狩低地帯東縁断層帯や野幌断層帯などの

東西圧縮による活断層が存在し，大都市圏である札幌市の直下には活構造の存在が推定されていることから，伏在する断層の実体を明らかにするためにも引き続き詳細な震源の分布などを明らかにしていくことが必要である．また，2010 年・1990 年・1985 年の有感地震の震源がほぼ同じ場所であったことは，今回の震源域が応力集中を起こりやすい場所であることを示唆している可能性もあり，詳細な地下構造を含めた調査が望まれる．

謝辞　本研究は，文部科学省科学技術試験研究委託事業「ひずみ集中帯の重点的調査観測・研究」の観測データ及び解析結果を使用している．臨時地震観測点を設置するにあたり，独立行政法人種苗管理センター北海道農場及び札幌市の協力を得ました．気象庁，独立行政法人防災科学技術研究所，札幌市及び北海道大学の地震観測波形データと，これらの機関に加え，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の地震観測データを使用して作成した気象庁一元化カタログを使用しました．札幌管区気象台の宮村淳一氏（元北海道大学准教授）には，観測に御協力頂きました．元北海道大学の本谷義信博士と笠原稔名誉教授には，過去の地震波形データの検索や本論文を読んで頂き改善点を指摘していただきました．北海道大学の笹谷努元教授，北海道大学工学研究院の高井伸雄准教授，重藤迪子博士との議論は，本論文を作成する上で大変参考になりました．また，作図には，石川・中村（1997）の SEIS-PC と GMT ソフトウエアー（Wessel and Smith, 1995）を使用しました．これらのことに対し，記して感謝いたします．

文　献

阿部勝征，1981. 札幌市とその周辺の地震活動，自然災害資料解析，**8**, 1-9.

平原聡，2011. 長期起動地震観測を可能とする携帯電話データ伝送システムの開発，日本地震学会秋季大会講演予稿集，228.

Hirata, N., and M. Matsu'ura, 1987. Maximum-likelihod estimation of hypocenter with origin time eliminated using nonlinear inversion technique, *Phys. Earth Planet. Int.*, **47**, 50-61.

一柳昌義・高橋浩晃・高田真秀・山口照寛・前田宜浩・本多亮・河野裕希・岡山宗夫・青山裕・橋本武志・笠原稔，2010. 石狩低地東縁断層帯とその周辺の地下構造と地震活動，日本地震学会講演予稿集，2009 年度秋季大会，P2-8.

池田安隆・今泉俊文・東郷正美・平川一臣・宮内崇裕・佐藤比呂志，2002. 第四紀逆断層アトラス，254pp.

石川有三・中村浩二，1997. SEIS-PC for Windows95，地球惑星科学関連学会 1997 年合同大会予稿集，78.

国土地理院，1997. 日本の水平歪，㈶地震予知総合研究振興会，133pp.

笠原稔・宮崎克宣，1998. 札幌市とその周辺の歴史地震と最近の地震活動，**61**，pp239-261.

岡孝雄，1997. 北海道とその周辺海域のネオテクトニクスに関する諸問題　－付，札幌付近での活断層の存在と地震発生についての考察，加藤誠教授退官記念論文集，427-449.

札幌管区気象台，1985. 北海道の地震活動.

札幌管区気象台，2000. 北海道の地震活動（第 2 版）.

札幌管区気象台，2010. 平成 22 年 12 月 2 日 06 時 44 分頃の石狩地方中部の地震に関する現地調査について，‹http://www.jma-net.go.jp/sapporo/news/2010/sp_press101203.pdf›，（参照 2011-10-5）

札幌市，2008．第３次地震被害想定について，‹http:// http://www.city.sapporo.jp/kikikanri/daisannjijisinnhigaisoutei/documents/daisannjijisinnhigaisoutei_souteikekka_1.pdf›，（参照 2011-7-21）．

重藤迪子・高井伸雄・高橋浩晃・一柳昌義・岡島秀樹・澤田耕助・宮原有史，2011．2010 年 12 月 2 日石狩地方中部の地震（Mj4.6）の震源近傍におけるアンケート震度調査，地震工学会・年次大会 2011，260.

鈴木貞臣・本谷義信，1985．1985 年 1 月 23 日札幌直下地震（M3.5）の震源と震度の調査，北海道大学地球物理学研究報告，**46**，85-91.

上野寛・畠山信一・明田川保・舟崎淳・浜田信夫，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.

卜部卓・束田進也，1991．ワークステーションによる微小地震観測網波形検測支援システム，日本地震学会講演予稿集，No.1，70.

Waldhauser, F. and W. L. Ellsworth, 2000. A double-difference earthquake location algorithm: Method and application to the Northern Hayword Fault, California, Geophys. *Bull. Seism. Soc. Am*., **90**, 1353-1368.

Wessel, P. and W. H. F. Smith, 1995. New version of the generic mapping tools released, *EOS Trans*., AGU, **76**, 329.