HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	ボアホール地震観測網により観測された札幌周辺の微小地震
Author(s)	吉田, 邦一; 笠原, 稔; 笹谷, 努
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 72, 315-330
Issue Date	2009-03-15
DOI	10.14943/gbhu.72.315
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/38162
Type	bulletin (article)
File Information	22_Yoshida.pdf

Instructions for use

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.72, March 2009, pp.315-330

ボアホール地震観測網により観測された札幌周辺の微小地震

吉田　邦一
産業技術総合研究所活断層研究センター
笠原　　稔
北海道大学大学院理学研究科附属地震火山研究観測センター
笹谷　　努
北海道大学大学院工学研究科建築都市空間デザイン専攻

(2009 年 1 月 13 日受理)

Microearthquakes beneath Sapporo Urban Area Observed by Using Borehole Seismometers

Kunikazu YOSHIDA
Active Fault Research Center,
National Institute of Advanced Industrial Science and Technology
Minoru KASAHARA
Institute of Seismology and Volcanology,
Faculty of Science, Hokkadio University
and
Tsutomu SASATANI
Division of Architectural and Structural Design,
Faculty of Engineering, Hokkadio University

(Received January 13, 2009)

On May, 1997, Sapporo municipality installed three borehole seismometers in Sapporo city to observe microearthquakes in and in its vicinity of Sapporo. Ueyama company has also installed strong-motion and high-gain seismometers at three borehole stations in and around Sapporo since 1999. We have collected seismic record from these borehole stations as well as other high-gain seismic stations operated by various organizations and have determined hypocenters of 128 microearthquakes (M=0.2－2.8) occurring beneath Sapporo urban area from May, 1997 to January, 2004. Hypocentral distribution shows

clusters of earthquakes near the central part and the eastern－southeastern part of Sapporo. A focal mechanism for one earthquake estimated from P-wave first motion polarities has nearly east－west pressure axis.

Ⅰ．はじめに

札幌市周辺での内陸地殻内地震の性質を明らかにすることは，札幌市の都市地震防災を考える上で必要不可欠である．このためには，歴史地震や微小地震による地震活動が有力な手がかりとなる．札幌市周辺では，近代的な地震観測が行われるようになってからは大地震に襲われていないが，札幌が都市化した過去約 100 年間にも，札幌市直下で発生した有感地震がいくつか観測されている．本谷（1975）は，1973 年に開設された北海道大学札幌地震観測所（HSS）の観測による札幌市周辺の微小地震活動について最初の報告を行っている．その後，鈴木・本谷（1985）は 1985 年の M 3.5 の地震の概要とアンケート震度による震度分布について述べた．笠原・宮崎（1998）は，札幌市周辺の地震について歴史地震の資料や比較的近年の地震観測結果をまとめ，震源分布について考察した．これらの研究により，過去に札幌市周辺で発生した歴史地震のうち最大のものは 1834 年石狩地震で，その規模は M 6.4 と推定されている．

1997 年以前，札幌市付近で微小地震の観測を行っていた観測点は北海道大学札幌地震観測所（HSS）と札幌管区気象台のみで，札幌市周辺で発生する地震の検知能力は低く，震源決定精度は良いとは言えなかった．1997 年 4 月に，札幌市は市内の 3 ヶ所に深さ約 500m の地震観測井を設置した．その後，札幌とその周辺には北海道大学や防災科学技術研究所により深さ 200～750m のボアホール地震計が順次設置され，札幌市周辺で発生する微小地震を，都市の雑音を避けて観測できるようになった．北海道大学地震火山研究観測センター（ISV，以下北大地震火山センター），気象庁（JMA），防災科学技術研究所（NIED）は，これらのデータを用いて震源決定を行い，札幌市周辺での地震活動もある程度把握されるようになってきた．

札幌市や北大がボアホール地震観測点を整備したのとほぼ同じ時期に，上山試錐工業（株）は 3 点のボアホール地震観測点を札幌周辺に設置し，1999 年より微小地震および強震動の観測を開始した．これらの観測点では多くの微小地震を観測しているが，気象庁や ISV での震源決定には用いられていない．上記すべての観測点のデータを集めると，Fig. 1 のように札幌市周辺にはかなり高密度の観測網が設置されていることになり，札幌直下で発生する地震をより詳細に解析できる可能性がある．

本報告では，上山試錐工業による観測データを取りまとめ，上記のルーチンの地震観測網による記録とあわせて解析し，1997 年 5 月から 2004 年 1 月の間に札幌市周辺で発生した地震のカタログを作成したので報告する．

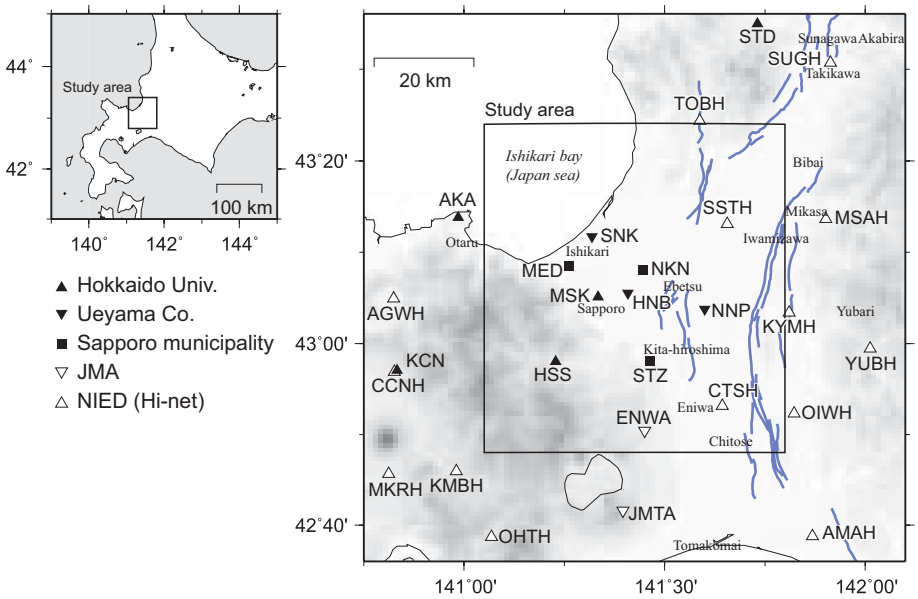

Fig. 1. Map showing seismic stations used in this study. Study area is indicated in Table 2. Gray lines indicate active faults (see Fig. 2).

II．活断層と微小地震活動

石狩平野は，北海道の地質構造区分の西部と中央部の境界をなす領域で，東西で地質が大きく異なることが知られている．石狩平野は現在東西圧縮場であることが地質などから示されており(例えば，岡，1986)，それを反映して札幌の東側にはいくつかの活断層が存在している（Fig. 2）．札幌市街に近い活断層としては，野幌断層（NP），当別断層（TB），増毛山地西縁断層（MT）からなる一連の断層帯が，また，石狩平野の東端には石狩低地東縁断層帯（IT）がある．

Fig. 2 に気象庁震源カタログによる震央分布を示す．ここでは，本研究で対象とする 1997 年 5 月から 2004 年 1 月までに発生した深さ 40km 以浅の地震を示す．札幌直下には，北西－南

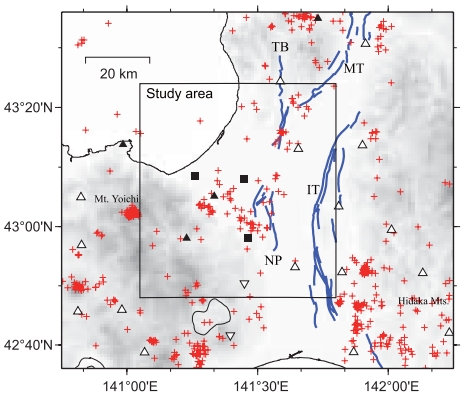

Fig. 2. Map showing epicentral distribution from Japan Meteorological Agency (JMA) catalogue for the period from May 1997 to January 2004 with depthes shallower than 40 km (crosses). Solid curves trace active faults (Active fault database of Japan, from web site of Active Fault Research Center, Geological Survey of Japan, AIST). NP: Nopporo fault; IT: Ishikari-techi Toen fault; TB: Tobetsu fault; MT: Mashike-sanchi Toen fault. Seismic stations used by JMA are also shown by the same symbol as Fig. 1.

東方向の地震の配列が見える．また，野幌断層帯に沿っていくつかの地震があるが，その数はあまり多くない．いずれにしても気象庁などの震源決定に用いられている札幌周辺での微小地震の観測点はそれほど多くはなく，微小地震の発震機構の推定などはほとんど行われていない．このため，この地域での地震の特性を議論するためには，まず，多くの観測点により得られた地震のデータを用いた震源決定や発震機構の解析が必要である．

III．札幌市およびその周辺での微小地震観測

札幌市は，現在 200 万人近い人口を抱える大都市であるため，微小地震活動を捉えるためには都市ノイズを避けて地震観測を行う必要がある．都市部において都市ノイズを避けて微小地震観測を行うためには，ボアホール地震計を用い，地中に地震計を設置することが有効である．また，札幌市郊外の比較的ノイズの少ない地点では，地表の地震計でデータを得ることもできる．現在，札幌付近にはこのような都市ノイズを避けて微小地震を観測するために，北海道大学，札幌市，上山試錐工業（株）によりボアホール地震観測点が設置されている（Fig. 1）．それぞれの観測点の情報を Table 1 にまとめた．なお，すべての観測点において GPS による時刻校正がなされており，概ね 0.01 秒の刻時精度が確保されている．以上あげた観測点のほかにも，気象庁と防災科学技術研究所による高感度地震計のデータも解析に使用した．本研究では，震源決定に最低限必要な 4 点以上の観測点が揃った 1997 年 4 月以降に発生した地震を対象に，2004 年 1 月までの記録の解析を行った．次に，それぞれの観測点について観測開始時期や地震計などの概要を述べる．

1．北海道大学

北海道大学の観測点は，HSS（簾舞）と MSK（南新川）観測点が札幌市内に位置する．HSS

Table 1. Seismic stations in the study area (Table. 2). Cont.: Continuous recording; Trig.: Event trigger recording; Sapporo M.: Sapporo municipality.

Station	Resolution	Record mode	Operating period	Sensor depth	Network
HSS	16 bit	Cont.	1973 Jul. −	25 m	Hokkaido Univ.
MSK	24 bit	Trig.	2001 May − 2002 Oct.		
		Cont.	2002 Oct. −	750 m	Hokkaido Univ.
MED	22 bit	Cont.	1997 Apr. −	509 m	Sapporo M.
NKN	22 bit	Cont.	1997 Apr. −	502 m	Sapporo M.
STZ	22 bit	Cont.	1997 Apr. −	499 m	Sapporo M.
HNB	24 bit	Trig.	1999 Jan. −	550 m	Ueyama Co.
SNK	16 bit	Trig.	1999 Jan. − 2000 Oct.		
	24 bit		2000 Oct. −	578 m	Ueyama Co.
NNP	24 bit	Trig.	1999 Jul. −	545 m	Ueyama Co.
ENWA	16 bit	Cont.	1994 Apr. −	0 m	JMA
SSTH		Cont.	2003 Mar. −	130 m	NIED
CTSH		Cont.	2003 Mar. −	256 m	NIED

は比較的静かな南西部の第三紀の山地部にあり，固有周波数 1Hz の高感度地震計が深さ 25m の観測坑内に設置されている．この観測点は，1973 年 7 月より観測を開始している（本谷，1975）．

2001 年 5 月より MSK（南新川）が観測を始めている．この観測点は深さ約 750m の地震観測井戸に，勝島製作所製の 3 成分速度型高感度地震計と加速度型強震計が，深さ 10m に加速度型強震計が設置され，9 成分のデータが収録されている．2001 年の設置当初は，イベントトリガー方式による現地収録によりデータを収集し，定期的にデータを回収していた．その後，2002 年 10 月にテレメータ化され，連続記録が北大地震火山センターで収録されるようになった (Table 1)．この観測点の詳細については，楊（2003）に詳しい．

このほか，札幌からやや離れた地点にも観測点があり，短周期高感度地震計が設置されている．震源決定では必要に応じてこれらの観測点のデータも使用した．

２．札幌市

札幌市は 1997 年に MED（手稲前田），NKN（中沼），STZ（里塚）の市内 3 箇所に深さ約 500m のボアホールを掘削し，ボアホール地震計を設置した．これらの観測点には，孔底に 3 成分短周期高感度地震計（マークプロダクツ社製 L22D）が設置されており，そのデータはテレメータで北大地震火山センターに送信されている．

３．上山試錐工業（株）

上山試錐工業（株）は，自社の研究として，1999 年 1 月より HNB（東苗穂），SNK（石狩新港）において，1999 年 7 月より NNP（南幌）においてボアホール地震計を設置し観測を行っている．これらの観測点では，勝島製作所製の地震観測システム（Datol-2001）を用い，深さ 500～600m の孔底に速度型高感度地震計と加速度型強震計が，地表に加速度型強震計が設置されている．観測点の概要は，札幌地盤震動研究会（1999）にまとめられている．また，観測装置の詳細については，笹谷（2002）に詳しい．なお，SNK では 2000 年に機器の更新を行い，分解能の向上などが行われている（Table 1 参照）．観測データは，各観測点で独立にイベントトリガー方式で収録され，電話回線によって定期的に回収されていた．イベントトリガー方式での収録ではあるが，初動を読み取れるような地震では概ねトリガーされている．なお，何らかの原因（例えば，大地震が発生したなど）により数多くトリガーされた場合，記憶容量が限られていることから，記録が失われている場合がある．

４．気象庁

解析には気象庁による高感度地震計データも利用した．札幌周辺では，ENWA（恵庭）が 1994 年 4 月から運用を開始している．この観測点を含め，北海道内のデータは北大地震火山センターにテレメータされており，必要に応じてこれらのデータを使用した．

５．Hi-net

防災科学技術研究所では全国規模の微小地震観測網として，1998 年以降，順次全国に高感度地震観測網（Hi-net）を展開している（Okada et al., 2004）．札幌市内には Hi-net の観測点は存在しないが，札幌の西側の山地においては 2002 年 1 月頃から，札幌の東側の石狩平野では

2003 年 3 月頃から深さ約 100～250m 前後のボアホール地震計が設置され，観測を開始した．これらの観測点のデータも北大地震火山センターにテレメータされており，必要に応じ使用した．

Ⅳ．札幌地震データセットの作成

まず，観測記録から札幌付近で発生したと思われる地震の記録を選び出した．収録された観測記録から札幌付近の地震と思われる記録を選択する作業は，次のような手順で行った．

(1) ISV で連続記録を収録している ISV，札幌市，気象庁，Hi-net の観測点の記録については，ISV がルーチンで行っている震源決定によって札幌付近に震源が決められたイベントのデータファイルを取り出した．なお，ルーチン処理で震源が決定されなかったものを再検討した結果，札幌周辺の地震であると考えられるものをいくつか見つけたので，それらも対象とした．

(2) イベントトリガー方式の観測点（HNB, SNK, NNP, 2002 年 10 月以前の MSK）のイベントデータについては，ほぼすべての地震記録を検討し，S-P 時間が 5 秒程度以下の，札幌付近で発生したと考えられる地震を検索した．

(3) 札幌付近で発生したと思われる地震が MSK（2002 年 10 月以前）や HNB，SNK，NNP で観測されたにもかかわらず，ISV での収録システムでイベントのデータファイルが生成されなかったときは，別途保存されている連続記録から，該当する時刻の記録を取り出した．

別々の観測機関の記録を集めているため，それぞれで別々にデータが記録されており，統一の形式になっていない．解析にあたっては，北大地震火山センターで 1 つのデータセットにまとめられている北大地震火山センター，気象庁，札幌市，Hi-net のデータと，各観測点独立のデータとなっている MSK（2002 年 10 月以前），HNB，SNK，NNP の記録を統合し，1 イベントに対し 1 つの win ファイルからなるデータセットを作成した．

Ⅴ．震源決定

作成した地震記録のデータセットから，win システム（卜部・東田，1992）を用い，イベントごとに P 波，S 波初動，最大振幅の読み取りを行った．このとき，無理に初動を読み取ることはせず，比較的明瞭なもののみを読み取るようにした．そのため，小さな地震では微動に埋もれるなどのため，震源決定に必要な数の初動が読み取れないものがあった．

4 点以上の観測点において P 波初動を読み取れた地震について，HYPOMH（Hirata and Matsu'ura, 1987）を用いて震源決定を行った．震源決定と同時に，速度記録の振幅を用い，地震の M を渡辺（1971）の方法で計算した．ただし，この M については，気象庁マグニチュードに比べやや大きめに推定されていることを，Ⅶ-2.で示す．

震源決定に用いる速度構造モデルには，Okada et al.（1973）や本谷・岡田（1986），吉田・笹谷（2003）などを参考に，概ね岩盤観測点とみなせる HSS 付近での速度構造に近くなるようなものを作成した（Fig. 3）．HYPOMH で用いられる速度構造モデルは，各層内で鉛直勾配を

持つ速度構造を仮定する必要がある．HSS 近傍では，Okada et al.（1973）は表層に Vp=4km/s の層を置いているので，震源決定の速度構造モデルでも地表で Vp=3.0km/s，深さ 2km で地震基盤の Vp=5.5km/s となるようにし，表層の平均 Vp が概ね 4km/s となるようにした．地震基盤に相当する層では，Okada et al.（1973）と吉田・笹谷（2003）ともに Vp=5.5 km/s 前後であることが示されているので，2 層目表層の Vp にはこの値を用いた．

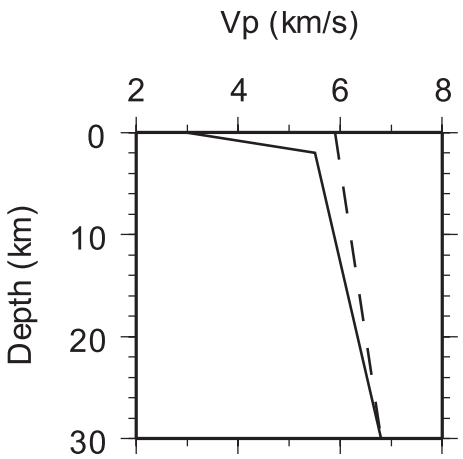

Fig. 3. P-wave velocity model for calculation of travel time in this study (solid line). Dashed line shows the P-wave velocity model used for routine hypocenter determination by the ISV (Institute of Seismology and volcanology of Hokkaido University).

ここで地表での Vp を 3.0km/s，地震基盤の深さを 2km と仮定したが，この表層の Vp や厚さを多少変えて震源決定を行ったところ，ほとんどの地震の震源の位置には，水平方向は数 100m 程度，深さ方向に数 km 程度の変化が見られた．このことから，今回求めた震源位置は，水平方向にはかなり信頼性があるが，深さ方向には任意性が大きいことがわかる．なお，速度構造モデルに ISV のルーチン処理で用いられているモデルを用い震源決定を行ったところ，水平方向に震源位置が変動するほか，深さ方向に大きなばらつきが見られ，空中に震源が求まるものも多くあった．ISV のルーチン処理で用いている速度構造モデルは，地表での Vp が 5.9km/s であるが（Fig. 3），これがこの地域に対しては妥当でないために，震源が妥当な位置に求まらないものと考えられる．

震源決定では S 波読み取り値も用いたため，Vs も与える必要がある．ここでは，Vp/Vs=1.73 として与えたが，森谷（1983）によれば，石狩平野は Vp/Vs 比が大きく変化する境界領域であるので，今後詳細な解析では，Vp/Vs 比も再検討する必要があろう．

このほか，石狩平野では堆積層が厚いため，堆積層を反映した初動到達時刻の観測点補正が必要と考えられる．しかし，妥当な補正値の設定が難しいため，ここでは観測点補正は行っていない．

記録の中には，時々S 波が不明瞭で表面波が多く励起されるなどの特徴から，自然地震によるものではなく砕石発破による記録と推測されるものがある．砕石発破によるものと推測された記録には，システムに実装されている分類機能を用いて，発破であることを示す BLAST マークを付けた．ただし，判断に迷う場合は，特にマークをつけなかった．

震源決定の結果，Table 2 に示す領域に震源が決められた地震を，ここでは札幌地震とした．この領域は，次節で統計処理を行う際に，札幌市街地直下の地震の議論に支障が出ないよう，余市岳の群発地震（Fig. 2 に示した札幌地震の領域の西側に隣接する地震群）や日高山脈西側の地震活動の活発な領域（同図の南東側）が外れるように設定した．決定された震源の分布を

Table 2. Event selection criteria for Sapporo event.

Period	Latitude	Longitude	Depth
May 1997 − January 2004	42.8 − 43.4	141.05 − 141.8	Shallower than 40 km

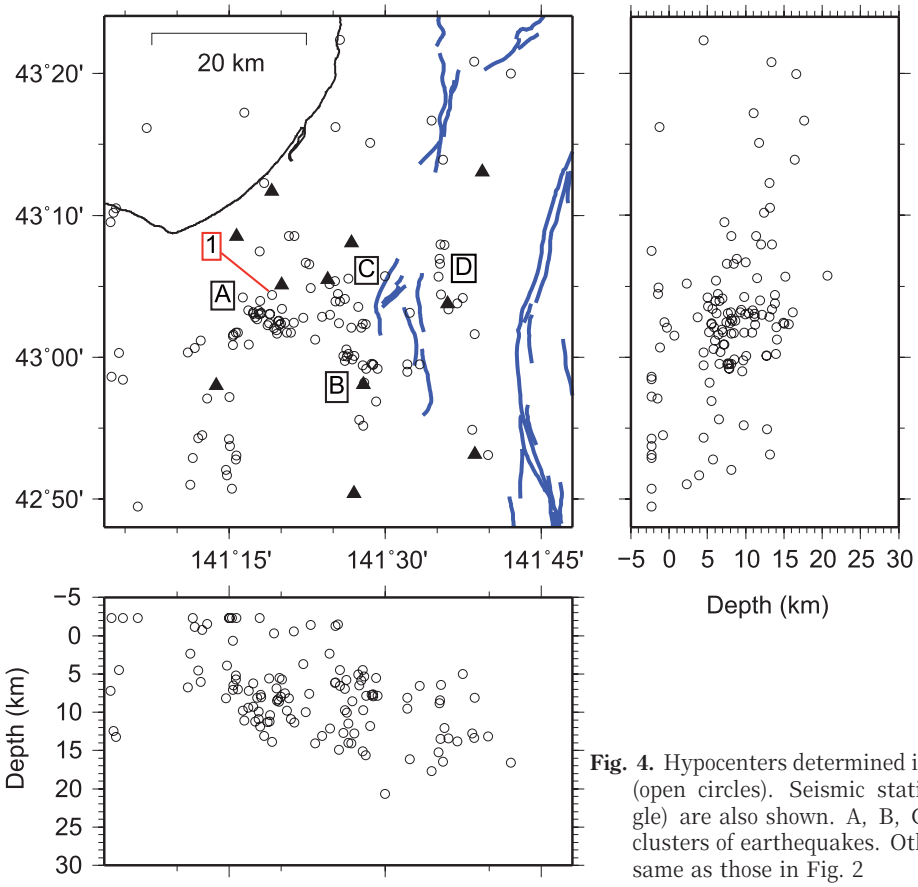

Fig. 4. Hypocenters determined in this study (open circles). Seismic stations (triangle) are also shown. A, B, C and D are clusters of earthequakes. Others are the same as those in Fig. 2

Fig. 4 に示す．

ここまでの処理により，1997 年 5 月から 2004 年 1 月までの 6 年 9 ヶ月の観測データから震源を決められた札幌地震は 128 個であった（Table 3）．この中には，発破によるものと思われるものも含む．震源の決められた最小，最大の地震の M はそれぞれ 0.2，2.8 であった．

VI．地震活動

決定された震源の分布（Fig. 4）には，いくつかの地震群が見られる．Fig. 4 中 A の領域では，観測網が最も密な領域にあたることもあり，多くの震源が決定されている．この地震群は，西北西－東南東方向に，ちょうど札幌の山地－平野の境界に沿って分布しているように見える．また，

Table 3. Hypocentral parameters of microearthquakes in the study area. J: listed in the JMA catalogue; BLAST: event seemed to be quarry blast.

Origin time	Latitude	Longitude	Depth (km)	Mag.	Note
1997-05-24 23:39:20.9	43.0548	141.2983	10.9	1.6	
1997-06-29 05:41:30.7	42.9484	141.4861	5.5	1.7	
1997-07-06 12:37:53.7	42.9198	141.4650	9.8	1.1	
1997-10-03 04:38:20.7	43.2703	141.4214	-1.3	1.4	
1997-12-03 08:30:50.7	42.9866	141.4701	7.9	1.5	J
1998-01-04 09:39:32.0	43.3470	141.6431	13.4	1.9	J
1998-02-04 01:35:21.1	43.0530	141.2886	9.3	1.5	J
1998-02-06 07:19:09.5	43.0097	141.4384	5.8	2.0	J
1998-06-13 16:40:40.5	42.8676	141.2455	8.2	1.3	
1998-08-31 10:16:47.3	43.0380	141.3117	11.3	1.5	J
1998-11-21 11:07:11.2	43.0474	141.2920	11.2	1.1	J
1999-02-25 09:07:22.7	43.2323	141.5931	16.4	1.8	J
1999-05-30 13:33:49.4	42.9962	141.4358	9.7	0.7	
1999-06-01 11:50:11.2	42.8243	141.1042	-2.3	1.4	BLAST
1999-06-03 11:46:35.6	42.8818	141.1920	-2.3	1.4	
1999-06-26 21:08:24.4	42.8504	141.1875	2.3	0.9	
1999-08-12 20:33:14.3	43.0746	141.4248	-1.5	0.2	
1999-08-20 16:01:14.3	43.0059	141.1844	6.7	1.0	BLAST
1999-09-15 16:17:49.5	42.9085	141.2074	-0.8	1.3	
1999-10-06 16:48:58.0	42.8800	141.2609	5.7	1.1	
1999-10-16 12:40:44.1	43.0666	141.3002	11.9	1.1	
1999-10-21 07:39:32.2	43.0508	141.3145	11.2	1.3	J
1999-10-25 02:42:33.7	43.0708	141.2720	9.8	1.3	
1999-11-25 02:38:14.7	43.0410	141.3542	-0.6	0.3	
1999-12-05 18:51:05.6	42.9977	141.4476	8.6	1.4	J
1999-12-14 21:54:24.1	43.3330	141.7019	16.6	2.0	J
1999-12-22 13:16:27.4	42.9907	141.4644	4.5	1.1	J
1999-12-28 02:40:46.6	43.0431	141.3295	8.6	1.6	J
2000-01-03 09:32:22.4	43.0555	141.2811	9.4	0.6	
2000-02-27 10:13:51.8	43.2520	141.4758	11.8	1.5	J
2000-04-06 08:43:00.9	43.0515	141.3158	10.4	1.0	
2000-05-08 19:45:58.6	43.2871	141.2748	11.1	1.6	J
2000-05-11 02:56:41.6	43.0412	141.3398	7.5	0.8	
2000-05-15 15:59:48.2	43.0426	141.3285	8.3	1.2	
2000-09-29 10:55:22.0	42.9053	141.2011	4.5	1.5	
2000-10-18 22:10:08.7	43.0507	141.2982	10.0	1.6	J
2000-10-31 03:29:08.6	43.0291	141.3492	10.9	0.6	
2000-11-28 11:44:33.9	42.8613	141.2473	3.9	1.2	BLAST
2000-11-30 07:39:44.4	43.0291	141.3427	9.8	1.2	J
2001-01-18 04:20:54.5	43.0398	141.3333	8.0	1.4	J
2001-01-24 11:38:40.7	43.0282	141.3267	8.5	1.2	
2001-02-01 01:48:32.1	43.0469	141.3690	3.7	0.2	
2001-03-20 22:39:26.6	43.0565	141.6023	13.4	1.7	J
2001-04-08 06:52:19.6	42.9917	141.4811	7.7	1.4	J
2001-04-08 06:58:28.5	42.9921	141.4809	7.9	2.4	J
2001-04-08 07:43:29.0	42.9868	141.4878	7.8	1.9	J
2001-04-11 12:24:40.6	42.9928	141.4790	7.7	2.3	J
2001-05-07 20:19:21.9	43.0516	141.3013	7.7	0.9	
2001-05-07 20:36:00.1	43.0525	141.3017	8.1	0.8	
2001-07-05 14:33:21.5	42.9702	141.4666	5.3	1.2	
2001-09-05 12:24:40.1	43.0817	141.3809	-1.4	0.5	
2002-01-04 19:08:20.7	43.0570	141.3353	5.7	0.2	
2002-01-08 16:05:55.8	43.0395	141.4638	15.1	1.1	J
2002-01-19 23:54:29.6	43.3727	141.4284	4.5	1.0	J
2002-04-03 02:11:50.9	43.0277	141.6441	8.1	1.3	J
2002-04-09 06:46:08.5	43.0406	141.4264	14.9	1.4	J
2002-06-02 03:24:58.1	43.0525	141.5396	16.2	1.4	J
2002-06-14 23:58:21.3	43.0348	141.3224	-0.3	0.5	J
2002-06-15 03:42:50.9	43.0401	141.3140	5.6	0.5	
2002-08-05 14:02:03.7	43.0115	141.1953	-1.2	0.9	BLAST
2002-08-16 16:25:50.5	43.2047	141.3056	13.1	1.0	
2002-11-05 16:20:56.6	43.2781	141.5751	17.7	1.7	J
2002-12-06 07:37:16.4	43.0353	141.4457	14.1	0.7	
2003-01-26 23:57:05.8	43.0209	141.3880	14.1	1.2	J
2003-01-30 18:34:29.2	43.1427	141.3457	8.2	2.0	J
2003-01-31 23:12:36.3	43.1426	141.3548	11.4	0.8	
2003-03-02 17:27:15.2	43.0742	141.5904	6.4	0.3	
2003-03-20 05:03:55.6	42.8854	141.6654	13.2	1.5	J
2003-03-27 12:32:31.8	43.0352	141.4623	5.8	1.2	
2003-03-27 16:10:53.0	43.0661	141.4215	6.1	1.4	J
2003-03-28 03:47:52.3	43.0689	141.4357	7.0	0.6	
2003-03-28 23:56:45.7	43.0662	141.4279	6.6	1.2	J
2003-04-06 04:13:47.0	43.1327	141.5895	13.5	1.9	J
2003-04-06 05:14:56.3	43.1324	141.5954	12.0	1.5	J
2003-04-11 20:29:57.6	43.0948	141.5856	15.2	0.9	
2003-04-22 10:04:22.9	43.2691	141.1184	31.8	1.3	
2003-04-29 05:54:55.9	43.0016	141.4389	10.1	1.4	J
2003-05-01 09:26:04.7	43.0321	141.3262	6.9	1.0	
2003-05-09 14:31:00.9	43.0864	141.4114	2.3	1.8	J
2003-05-15 20:16:36.0	42.9920	141.5359	8.1	1.4	J
2003-05-26 12:07:32.2	43.0597	141.4575	5.1	0.9	
2003-06-06 00:26:23.6	43.0928	141.4414	11.5	0.9	J
2003-06-21 11:00:38.4	43.0500	141.4116	12.1	1.3	
2003-06-21 11:35:31.8	43.0477	141.3988	13.1	1.5	
2003-06-27 14:45:09.3	42.8849	141.2617	-2.3	1.4	
2003-07-03 08:23:09.3	42.9041	141.2502	-2.3	0.9	BLAST
2003-07-16 21:43:30.6	43.0295	141.2636	7.0	1.0	
2003-07-18 11:51:30.6	42.8957	141.2515	-2.3	0.8	BLAST
2003-07-20 23:33:20.6	43.0516	141.2890	6.2	1.0	
2003-07-27 01:19:46.5	43.0267	141.2571	6.5	1.9	J
2003-07-28 18:07:41.4	43.0293	141.2609	5.2	2.3	J
2003-07-29 01:53:52.9	43.0151	141.2819	7.2	0.4	
2003-07-31 05:25:16.7	43.0254	141.2564	0.7	1.5	J
2003-08-08 09:55:39.6	43.0149	141.2563	7.1	1.2	
2003-08-11 11:14:40.8	42.9538	141.2507	-2.3	1.1	BLAST
2003-08-14 07:53:17.1	43.0956	141.4998	20.7	1.6	J
2003-08-20 16:24:09.9	43.1248	141.2992	-2.3	1.3	BLAST
2003-08-25 02:02:10.1	42.9740	141.0799	-2.3	1.4	J
2003-08-27 10:39:13.4	42.9517	141.2146	-1.5	1.0	BLAST
2003-08-28 06:38:27.6	42.9772	141.0622	-2.3	2.7	J
2003-08-28 06:50:33.4	43.0055	141.0738	4.5	1.1	J
2003-08-29 16:32:26.1	43.0198	141.2047	6.0	0.2	
2003-09-03 03:29:48.6	43.0018	141.4508	12.8	1.2	
2003-09-13 16:17:08.7	43.0020	141.4328	12.7	1.2	J
2003-09-20 07:58:15.9	42.8453	141.2550	-2.3	1.0	BLAST
2003-09-22 15:25:46.1	43.0700	141.6254	5.0	1.3	
2003-09-23 12:01:01.5	43.1589	141.0598	7.2	0.9	
2003-09-26 07:59:17.7	43.0899	141.4202	6.2	1.5	J

Table 3. continued

Origin time	Latitude	Longitude	Depth (km)	Mag.	Note
2003-10-04 04:02:05.5	43.0040	141.4414	14.0	1.4	J
2003-10-04 13:30:54.9	43.0634	141.6162	13.8	1.7	
2003-10-08 10:19:14.9	43.0734	141.3188	13.9	2.6	J
2003-10-13 03:14:47.6	42.9835	141.5361	9.6	0.9	J
2003-10-13 10:55:15.5	43.1114	141.3727	10.0	2.8	J
2003-10-13 10:55:45.1	43.1098	141.3785	7.6	2.0	J
2003-10-17 14:58:38.3	43.0386	141.3312	5.5	1.3	J
2003-10-18 14:43:13.4	43.0449	141.2954	8.1	1.2	
2003-10-31 07:57:30.0	43.0389	141.4688	15.6	1.2	

Origin time	Latitude	Longitude	Depth (km)	Mag.	Note
2003-10-31 18:30:36.1	42.9922	141.5557	6.6	1.4	J
2003-11-10 14:49:52.1	43.1755	141.0687	13.2	1.0	
2003-11-12 10:55:00.6	43.1700	141.0645	12.4	1.4	
2003-11-17 21:30:50.4	43.1159	141.5871	8.9	1.4	J
2003-11-22 15:05:57.6	43.1101	141.5877	8.5	1.6	
2003-12-30 10:47:40.4	42.9151	141.6402	12.8	1.1	
2004-01-13 11:01:54.1	42.9267	141.4588	6.5	2.3	J
2004-01-24 20:44:15.4	42.9803	141.4958	6.9	0.8	J

札幌市の南東部にあたる B の領域にも多くの地震が求められている．この地震群も，西北西－東南東に分布しているようにも見える．B の領域の 2～3km 北北西の領域 C には，やや散開した地震群があり，B の領域と合わせて野幌断層帯西縁に沿うように分布しているようにも見える．野幌断層帯東縁の東側の領域 D にも地震群があり，野幌断層に沿うようにして南北に分布しているように見える．D の地震群は，領域 A や B の地震群よりも地震の数は少ないように見えるが，領域 D は観測点密度の最も高いところからはやや外れるため，領域 A や B と比べ地震の検知能力が低いことが考えられる．

震源の決定された地震は少ないが，領域 D にある NNP 観測点では，S-P 時間が 1～2 秒程度の極近傍で発生した地震のものと思われる記録が少なからず観測される．領域 C，D の近くに位置し，各観測点で独立してトリガーをかけている HNB と NNP での読み取りデータから S-P 時間の分布を調べた（Fig. 5）．この読み取りデータには，読み取り数が少なく震源決定に至らなかったものも含まれる．HNB，NNP 共に S-P 時間が 1 秒前後の地震が見られる．特に NNP では，S-P 時間が 2 秒以下の地震で震源決定されていないものが 20 個程度あり，これらは領域 D の地震活動が活発なことを反映していると考えられる．

地震活動の時間変化，あるいは地震観測点の変化による検知能力の変化を見るため，マグニチュード－時間図（M-T 図）を作成した（Fig. 6）．明らかに 1999 年と 2003 年に震源の決定できた地震の数が増加している．まず，1999 年の増加は，上山試錐工業（株）の観測点が設置されたのがこの時期であることから，増加した観測点により極小さな地震でも震源が求まるようになっ

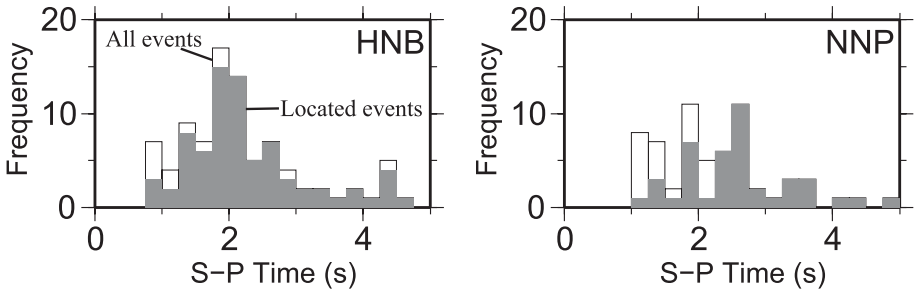

Fig. 5. Histograms of the number of events in each 0.25-second interval of S-P time at HNB and NNP stations.

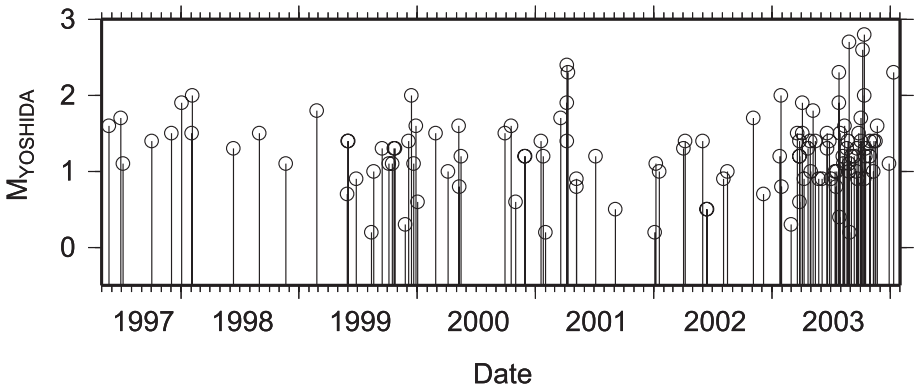

Fig. 6. Magnitude-time diagram.

たことによると考えられる．それは，1998 年までは M <1 の地震が見られなかったのが，1999 年以降になると M <1 の地震も現れていることからも明らかである．

2003 年は，それまでと比べ急激に地震活動が活発になったように見える．Hi-net が 2002～2003 年頃に観測に加わったことにより，微小地震の震源が決まりやすくなった影響も多少あると考えられるが，M <1 の小さな地震の数だけが特段増加したわけではなく，M >1 の地震の数も明らかに増加していることから，この時期は実際に地震活動が活発だったと思われる．2003 年 9 月 26 日には，十勝沖地震（M 8.0）が発生したが，その前後において，北日本で地震活動が変化したことが報告されている（Ogata, 2005）．そうすると，札幌での地震活動の変化は，十勝沖地震震源域での何らかの変化に伴う，やや広域の応力変化を反映している可能性がある．しかも非常に興味深いことに，9 月 26 日の地震発生に先立ち，ほぼ半年前の 3 月頃から地震活動が増大しているように見える．札幌の地震活動は，2003 年十勝沖地震の地震発生準備過程において何らかの影響を受けていた可能性がある．

Ⅶ．議　　論

１．発震機構・断層面

震源決定できた地震のうち，2003 年 10 月 8 日の地震（M 2.6）は，多くの観測点で P 波初動の押し引きを読み取ることができた．この地震は，Fig. 4 中に「1」と示した地震で，札幌中心街に最も近い領域 A での地震群の地震である．震源決定による深さの正確さに問題がある可能性はあるが，試みに押し引き分布を図に描いてみると，東西あるいは北東－南西圧縮の逆断層型であることがわかる（Fig. 7）．Fig. 7 の発震機構の解では走向を 340 ℃としたが，南北に観測点が少ないために，走向には 320-350 ℃程度の自由度がある．北東－南西圧縮（走向が 320 ℃に近い場合）の逆断層である場合は，地震の分布が札幌の山地と平野の境界に沿って北西－南東の分布を示す（Fig. 4）のに対応する断層が考えられる．一方で，走向が 350 ℃に近い場合は，札幌の直下にほぼ南北に走向を持つ逆断層があることが考えられ，現世の札幌付近の広域応力場が

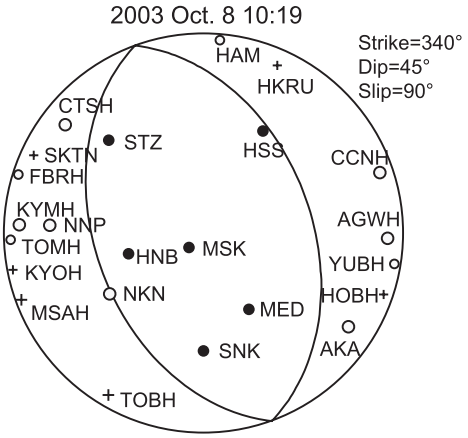

Fig. 7. An equal area lower hemisphere projection of the first motion data and mechanism solution for the 2003 October 8 M2.6 event (event `1' in Fig. 4). Compressions of P-waves are represented by solid circles, dilatations by open circles, and uncertain arrivals by crosses.

東西圧縮である（例えば，岡，1986）と対応する．

札幌では，過去にいくつかの有感地震が発生しており（笠原・宮崎，1998），僅かながら発震機構などの解析が行われたものもある．1985 年 1 月 23 日には，M 3.5 の地震が札幌で発生しており，市内で震度 II の領域があったことが鈴木・本谷（1985）に示されている．この地震のアンケート震度による震度分布と，今回決定した地震の分布（Fig. 4）を比較すると，この地震は領域 B の地震であった可能性がある．鈴木・本谷（1985）はこの地震の発震機構解を，東西圧縮の逆断層タイプと決定した．断層面としては高角な面を断層面とし，南北走向の西側が深くなる（西傾斜）断層面を選択している．震央位置を領域 B と考えると，野幌断層（Fig. 2 の NP）の西縁との関連が考えられる．しかし，野幌断層西縁は東傾斜の逆断層と考えるのが妥当であるため，この地震が野幌断層で発生したとは断定できない．ここでは，2003 年 10 月 8 日の地震と今回の地震のどちらもおおむね東西圧縮の逆断層タイプの地震であった点を指摘しておきたい．

いずれにしても，札幌直下の断層や応力場を推定するためには，多くの地震の震源位置を高精度に求め，発震機構を求める必要がある．このためには，速度構造モデルや観測点補正値の検討などが必要である．

2．気象庁カタログとの比較

本研究で対象とした期間の地震の気象庁カタログによる震源位置と，本研究による震源位置とを比較した（Fig. 8）．気象庁カタログからは，深さ 40km 以浅のものを選択し，本報告による地震と対応するものを探し出した．気象庁と本報告の震源位置を比較すると，札幌市の都市部に震源が求められているものについては，水平方向にはそれほど大きく動いていない．深さ方向には数 km 移動しているが，V.で述べたとおり，本報告による震源は速度構造モデルを変化させると深さ方向に大きく変化することから，もともと決定精度が良くないことを反映していると考えられる．なお，観測点密度が低くなる札幌市周辺部では，震源が水平方向にも大きく変化するものもある．例えば，札幌地震の領域の西端に，朝里岳の地震群から動いた震源が入っている．

本研究により決定された 128 個の震源のうち，気象庁カタログに記載されているものは 59

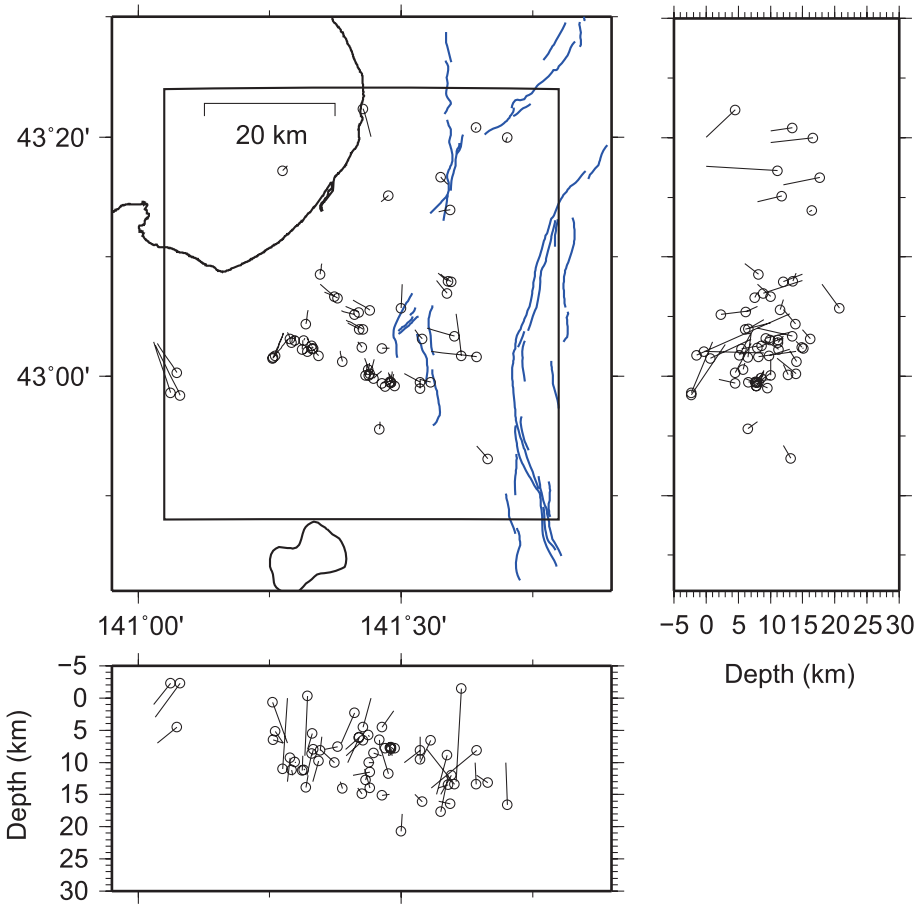

Fig. 8. Comparison of hypocenter locations determined in this study (Open circle) to those from Japan Meteorological Agency (JMA) catalogue (the other end of thin lines).

個であった．本研究の結果，Fig. 9 に示すように，気象庁カタログの地震の倍以上の地震の震源が決定された．

気象庁カタログ，本報告の両方で震源が求められている地震のマグニチュードを比較した (Fig. 10)．両者は多少ずれが認められるが，概ね線形の関係を示す．気象庁によるマグニチュード M_{JMA} と本報告によるマグニチュード M_{YOSHIDA} の回帰直線を求めると，

$$M_{\mathrm{JMA}} = 0.81\ M_{\mathrm{YOSHIDA}} + 0.00 \tag{1}$$

という関係が得られる．すなわち，本報告によるマグニチュードは気象庁マグニチュードに比べ約 1.2 倍大きい．

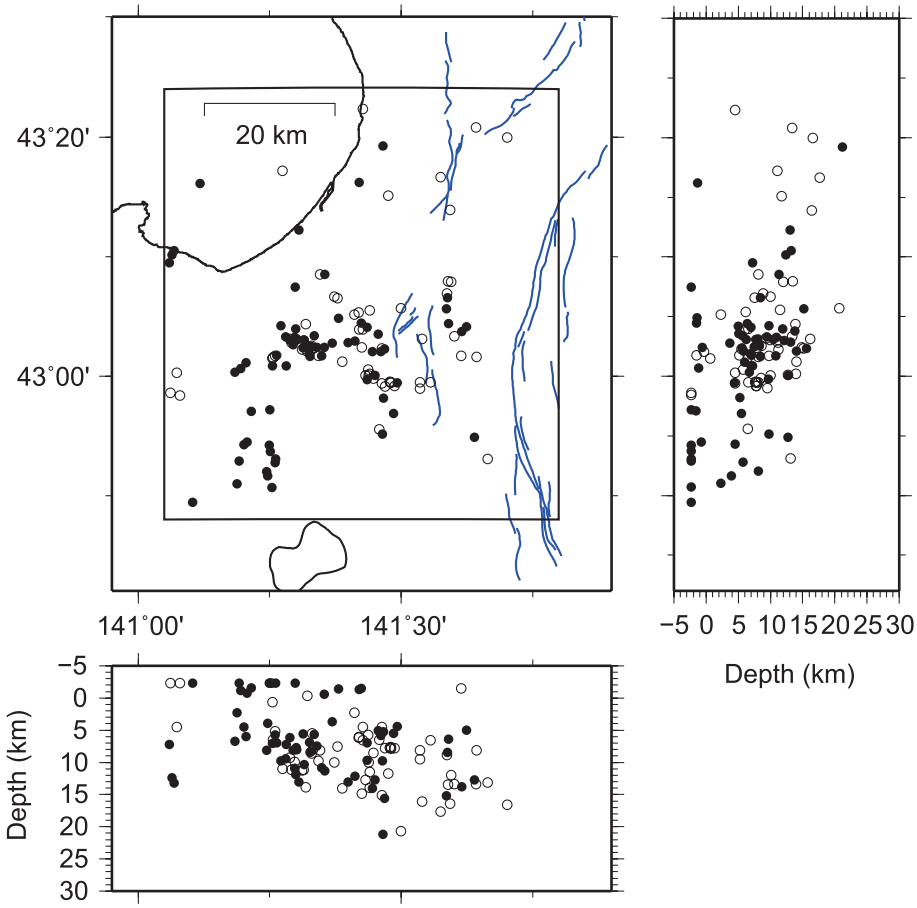

Fig. 9. Comparison of hypocenters by JMA and this study. Open circles show the events listed in both JMA and this study. Solid circles show the events listed in this report only.

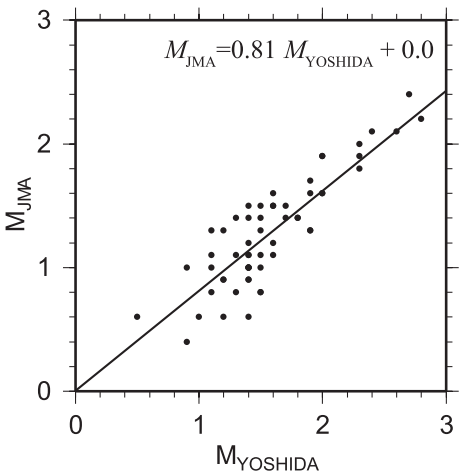

Fig. 10. Comparison of magnitudes determined by JMA (M_{JMA}) and this study ($M_{YOSHIDA}$). Solid line shows the linear regression line of M_{JMA} on $M_{YOSHIDA}$.

Ⅷ．ま と め

札幌周辺でのボアホール地震計などの都市ノイズに汚染されていない記録をできるだけ多く集め，1997 年 5 月から 2004 年 1 月までに観測された 128 個の地震の震源を決定し，微小地震のカタログを作成した．特に 1999 年以降，上山試錐工業（株）による地震観測点のデータが追加されたことから，M <1 の極微小地震についても震源が多数決定できた．震源は，札幌中心部と札幌東部～南東部にかけて数多く分布している．札幌中心部に近い地震群は，札幌西南山地と平野部の境界に沿うように分布している．札幌東部～南東部の地震群は，概ね野幌断層帯西縁に沿って南北に分布している．より詳細な震源決定，特に深さの精度を上げるためには，速度構造モデルや観測点補正値の検討が必要である．震源を求めた地震の一つについて発震機構解を求め，この地震は東西あるいは北東－南西圧縮の逆断層型を示すことを明らかにした．

謝辞　上山試錐工業（株）の上山博明氏，早川福利氏には，データ提供のみならず，観測点の維持や地質に関する議論など，多大なご協力をいただいた．また，札幌市，防災科学技術研究所，気象庁の微小地震観測データを使用した．北海道大学大学院理学院附属地震火山観測研究センターの一柳昌義氏，前田宜浩氏，青池友子氏をはじめとする多くの方々には，地震観測点の維持・管理やデータの管理・再生に多大なご協力をいただき，また議論していただいた．

文　　献

Hirata, N. and M. Matsuura, 1987. Maximum-likelihood estimation of hypocenter with origin time eliminated using nonlinear inversion technique, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **47**, 50 - 61.

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，北海道大学地球物理学研究報告，**61**，239-261．

森谷武男，1983．北海道の地殻上部における Vp/Vs の地域性，北海道大学地球物理学研究報告，**42**，145-154．

本谷義信，1975．札幌地震観測所における地震観測－札幌周辺の地震活動（1973.7-1974）－，北海道大学地球物理学研究報告，**34**，55-65．

本谷義信・岡田　弘，1986．1981 年恵庭岳地震群の調査報告，北海道大学地球物理学研究報告，**47**，17-31．

Ogata, Y., 2005. Synchronous seismicity changes in and around the northern Japan preceding the 2003 Tokachi-oki earthquake of M8.0, *J. Geophys. Res.*, **110**, B08305.

岡　孝雄，1986．北海道の後期新生代堆積盆の分布とその形成に関わるテクトニクス，地団研専報，**31**，295-320．

Okada, H., S. Suzuki, T. Moriya and S. Asano, 1973. Crustal Structure in the Profile Across the Southern Part of Hokkaido, Japan as Derived from Explosion Seismic Observations, *J. Phys. Earth*, **21**, 329-354.

Okada, Y., K. Kasahara, S. Hori, K. Obara, S. Sekiguchi, H. Fujiwara and A. Yamamoto, 2004. Recent progress of seismic observation networks in Japan －Hi-net, F-net, K-NET, KiK-net－, *Earth Planets Space*, **56**, xv-xxviii.

札幌地盤震動研究会，1999．札幌都市域における地盤構造調査と強震動観測，164pp．

笹谷　努，2002．平成 12～13 年度科学研究費補助金[基盤研究（B）（2）]研究成果報告書　深層井戸を利用したボアホール地震観測システムの開発（研究代表者　笹谷努，研究課題番号 12558041），47pp．

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．

卜部　卓・東田進也，1992．win－微小地震観測網波形検測支援のためのワークステーション・プログラム（強化版），地震学会講演予稿集 1992 年秋季大会，P41．

渡辺　晃，1971．近地地震のマグニチュード，地震Ⅱ，**24**，189-200．

楊　軒柱，2003．南新川地震観測井の地質と物理検層結果，平成 12～14 年度科学研究費補助金［地域連携推進研究費（2）］研究成果報告書　石狩低地帯北部の地震活動と活構造に関する研究（研究代表者　笠原　稔，研究課題番号　12792001），14-62．

吉田邦一・笹谷　努，2003．札幌における人工地震動の観測，北海道大学地球物理学研究報告，**66**，1-9．