

# 日光・足尾地域の地震活動 —1993年11月～1997年1月—

萩原弘子\*

## Seismic Activities in the Nikko-Ashio Area —November 1993～January 1997—

Hiroko HAGIWARA

### Abstract

The Nikko-Ashio area, the northwestern part of Tochigi prefecture, is one of the most seismically active regions in Japan. We detected many earthquake swarms by routine observation of Earthquake Observation Center, Earthquake Research Institute. This paper reports those seismic activities in the area during the period from November 1993 to January 1997. This area is divided into four active regions. The Ashio region, lying along the Uchinokomori-fault, had the remarkable activity in the period. The earthquake swarm occurred at the bending part of the fault at first on February 1994. In the following three years, the swarms gradually migrated from the north to the south along the lineament of the fault, accompanying many microearthquakes, and then spread toward the east and the west. Finally, those microearthquakes filled up the area of  $10 \times 3$  km along the Uchinokomori-fault.

*Key words* : Nikko-Ashio, microearthquake, earthquake swarm, Uchinokomori-fault, low frequency earthquake

### はじめに

日光・足尾地域は日本で最も多くの群発地震が観測されている地域である。この地域には確実度Ⅱの活断層である中禅寺湖北西断層, 内ノ籠断層があり(活断層研究会, 1991), 内陸地震の発生と活断層との関係が注目されている。さらに火山フロント上に位置し, 日光白根山, 男体山, 女峰山などの活火山の近傍にあるため, 火山活動やマグマの挙動とこの地震群との関連も興味深いところである。

日光周辺の地震観測は1970年の古峰原での委託観測が始まりである(神沼ほか, 1970; 萩野, 1974)。一方, 地震予知観測情報センター地震予知観測室は関東甲信越地域にテレメータ方式の微小地震観測網を構築し, 定常観測点の一つとして1980年9月に日光(NIK)観測点を設置した。それらの観測から, この地域の活発な地震活動の存在と顕

著な後続波が検出された。その詳細を知るために臨時観測が実施され, 後続波の解析から, 日光白根山の南に白根山に向かって浅くなる反射面の存在が指摘された(溝上, 1980; Mizoue *et al.*, 1982)。さらに白根山の北側である福島県の檜枝岐にも反射面が求められた(岩瀬ほか, 1989)。1993年には全国の大学が共同で日光合同観測を行い, 火山の深部構造と内陸地震を探る多くの研究成果が得られている(例えば, Tsukada, 1995; 植平, 1995; 松本ほか, 1995; 平田ほか, 1995; 吉原, 1996)。

地震研究所の地震地殻変動観測センターでは, 1993年11月より, 定常観測の処理方式にWIN波形検測支援システムを導入した。さらに1995年1月には, 地上無線や電話回線によるテレメータから衛星通信によるテレメタリングシステムに移行した。ここでは, WINシステム導入以降の定常観測で得られた1993年11月より1997年1月までの日光-足尾地域の地震活動の推移(東京大学地震研究所地震地殻変動観測センター, 1994a, 1994b, 1995a, 1995b, 1995c, 1995d, 1996a, 1996b, 1996c, 1996d, 1997a, 1997b, 1997c)を報告する。

1997年12月12日受付, 1998年2月10日受理。

\*地震地殻変動観測センター, (東京大学地震研究所)。

\*Earthquake Observation Center, (Earthquake Research Institute, University of Tokyo)。



表 2. 地震地殻変動観測センターの定常観測に用いられている関東地方の速度構造. 水平多層構造で, 例えば, 深さ 4 km で P 波速度が 5.5 km/s から 6.1 km/s のように変化している.

深さ (km)	p 波速度 (km/s)	
0.0	5.5	
4.0	5.5	6.1
14.6	6.1	6.7
30.5	6.7	8.0
630.5	8.0	8.2
Vp/Vs=1.73		

達時刻と上下動成分の最大振幅を読みとり, 震源とマグニチュードを計算している. 震源計算には Hirata and Matsu'ura (1987) のプログラムを使用し, 速度構造は水平多層構造の通常の関東地方の構造を用いている (表 2). 周辺域の震源決定には, 足利 (ASK), 広神 (HRG), 関谷 (SEK) などの日光地域を囲む観測点を適宜用いている. 求められた震源の精度は観測点のある足尾地域では震央で約 0.2 km, 深さで約 0.3 km, 皇海山地域では震央で約 0.4 km, 深さで約 0.5 km, 中禅寺湖南西地域では震央で約 0.3 km, 深さで約 0.5 km, 中禅寺湖以北では震央で約 0.7 km, 深さで約 3 km である. 1995 年 1 月 18 日より 2 月 12 日までテレメータ入れ換えのため欠測となり, 2 月 13 日より徐々に復旧した. また GPS 時計が不調のことがあり, 震源が決められないことがあったが, おおむね良好な記録が得られている.

### 震源分布の特徴と活動の概略

ここではまず, 1993 年 11 月から 1997 年 1 月にかけての日光・足尾地域の震源分布の全体的な特徴をまとめる. 図 2 に 1993 年 11 月より 1997 年 1 月までの震源分布図を示す. 大きく分けて足尾町直下 (A), 皇海山周辺 (B), 中禅寺湖南西 (C), 中禅寺湖以北 (D) の 4 つの活動域がある. この期間では, 足尾町直下の地域が非常に活発になっている. 従来少なかった中禅寺湖以北の活動も見られるようになった.

図 3 に地震の深さ別頻度分布を, 図 4 に深さ別の震央分布図を示す. 大部分の地震は 7~9 km の深さを持つが, 4 つの地域では震源の深さの下限が異なっており, 東側の足尾地域 (A) が最も深く 7~9 km で, 北側と西側は浅くなっている. 中禅寺湖南西 (C) では 3~6 km の深さで, 皇海山地域 (B) では 8 km を下限とし, 多くの地震は 4~5 km に集まっている. 皇海山地域で最も深い 8 km の震源は皇海山直下に起きている. 白根山から東に広がる地域 (D) では 4 km より浅い地震が起きている.

図 5 にマグニチュード別頻度分布図を示す. この期間で観測された地震の最大のマグニチュードは 4.4 で (以下 M 4.4 と記す) 最小のものは M (-0.4) であった. 大部分の地震は M 0.0~M 1.0 の極微小地震である.

図 6 に (M ≥ 1.0) の地震の時系列を示す. 1994 年の始めの頃より地震数が増えてきて 1995 年の 7 月に活動のピークを持ち, 1995 年の末には一度活動が低下した後に 1996 年の 5 月に再度活発になり, その後は低下している. この期間で観測された地震の総数は 26,017 個で, 平均すると 1 日に 22 個の地震が起きている.

1993 年 11 月より 1997 年 1 月までの地震活動の概略を見るために, 図 7 に 3 ヶ月ごとの震央分布図を示す. 1993 年から微小地震が発生している中禅寺湖北部の地域 (D) では, 震源が集中することなく西南西-東北東の方向へ広がった震源域を持っている. 1994 年の 10 月に地震活動が最も活発になった. この地域の西端にある日光白根山では, 1995 年の 4 月から 10 月に浅い地震が連続して発生した. この地震は 2~3 Hz の卓越周波数の波に短周期成分が重なっていて, 通常の地震より長い継続時間を持っている. 初動の部分は短周期成分になっている. 震源が決められた地震は白根山直下で深さ 3 km 位に位置する (図 8) (岡田ほか, 1997). この期間は, 日光・足尾地域全体が最も活動的になった時期に一致する. 足尾地域 (A) では, 1994 年 2 月から群発活動が徐々に南下して 1995 年 2 月から 7 月に足尾町中心部近傍でもっとも活発となり, その後震源域が拡散している. 中禅寺湖南西地域 (C) では, いくつもの小群発活動が少しずつ時期をずらして発生しそれぞれ空間的に重ならず起きており, 全体に南西-北東の走向を持っている. 皇海山地域 (B) では, 県境の尾根に沿って地震活動があり, それらは, いくつかの小群発活動からなっている. 1995 年 8 月には M 4.1 を含む群発活動があった.

### 足尾地域の地震活動の推移

この期間もっとも活動的であった足尾地域の活動を詳細に見てみる. 図 9 に 1993 年 11 月~1997 年 1 月までの足尾地域の N30°E の方向に回転させた震央分布 (図 9-a) と時空間分布図 (図 9-b) を示す. この N30°E の方向は内ノ籠断層の走向と一致する. 1994 年の 2 月に内ノ籠断層の北部で始まった地震活動は, 1996 年の 10 月頃までに時間と共に断層のリニアメントに沿って南下し, その後, 西南西-東北東の活動になって震源域を拡大させ, 拡散している. この一連の群発地震はその中の小地震活動からなり, それらの活動は時間的にも, 空間的にも異なり, 全体として北から南へ推移している. それらを詳しく調べるために小地震群を A, B, C, ..., I, J と分類し, その模式図を図 10 に示す. さらに 1994 年 2 月より 1997 年 1 月までの 3 ヶ月毎



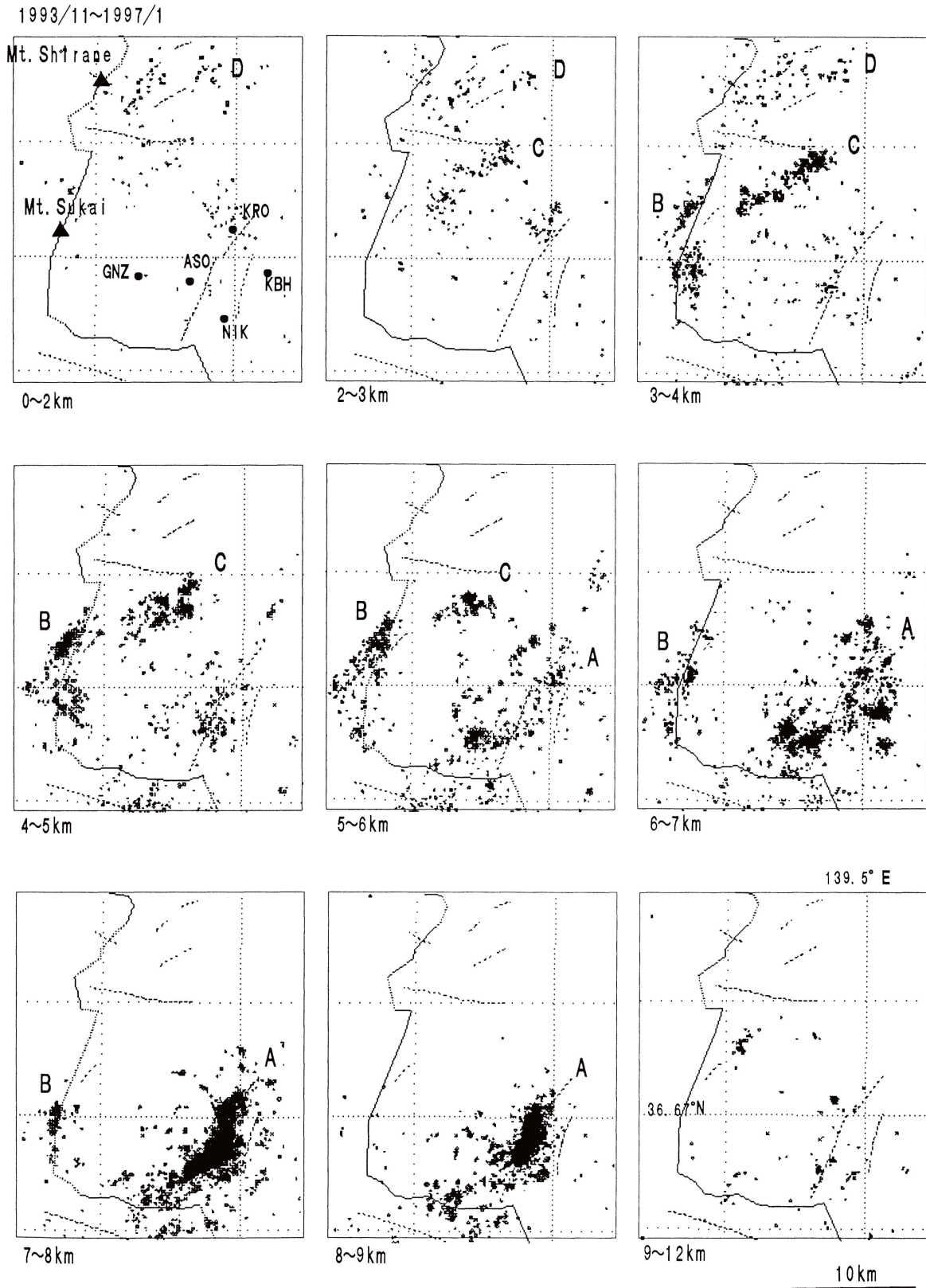


図 4. 日光・足尾地域の地震の深さ別の震央分布図（1993年11月～1997年1月）。震源の深さがA, B, C, Dの活動域で異なっている。

### 3. 1994年8月～10月 (図11-c)

2月～4月に活動した領域Aの密集した震源域を取り囲む様に地震が発生し、領域Aの中心部は逆に活動が低下している。震源は北北東の方向へ約2km拡大し、北は黒沢(KRO)観測点付近にまで達した。南の方向へも約1km震源域が拡大し、南端の部分が活発に活動している。

### 4. 1994年11月～1995年1月 (図11-d)

11月より領域Aの活動は低調になったが、前期の活動域の最も南の震源域が活発になり、これまでで最大のM4.2の地震(深さ7.4km)が1994年12月12日に発生した。この震源を囲むように微小な地震が発生している(領

域B)。その後さらに南西2kmの所に震源が移り、新しい活動域が出来た(領域C)。この震源の深さは約7kmで若干浅い。

### 5. 1995年2月～4月 (図11-e)

領域Bの活動域の震源分布は拡散してきた。領域Bの活動域の南側で足尾(ASO)観測点の南東約2kmの所が激しく活動した(領域D)。その活動域は内ノ籠断層と同じ北北東-南南西の走向を持っている。領域Dの活動域の深さは約8kmである。さらにこの前の期に活動した領域Cの西側が活動している(領域E)。この震源域の深さは7km位でやや浅い。内ノ籠断層に沿った活動域全体が東西に拡大して幅約2km位になった。

### 6. 1995年5月～7月 (図11-f)

2カ所で盛んな活動があった。1つは銀山平(GNZ)観測点の南東3kmの位置に新たな活動域ができた(領域F)。この領域内で1995年7月7日には深さ6.4kmでM4.4の地震が発生している。その余震の深さは6km位に集中している。もう一つは領域Dの北側にあり、内ノ籠断層のリニアメントの東側で激しい活動があった(領域G)。この活動は領域Bと領域Dの隙間を埋めている。この領域Gでは1995年7月18日に深さ6.4kmでM4.2の地震が発生している。

### 7. 1995年8月～10月 (図11-g)

足尾(ASO)観測点の南東の活動が活発で領域D、Gにまたがって激しく発生している(領域H)。それと同時に

日光の地震のマグニチュード別頻度分布

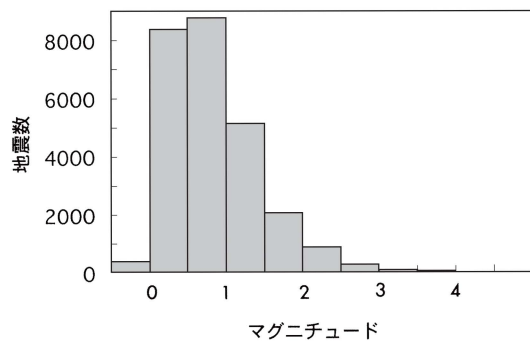


図5. 日光・足尾地域の地震のマグニチュード別の頻度分布図(1993年11月～1997年1月)。多くの地震はM0.0～1.0の範囲にある。

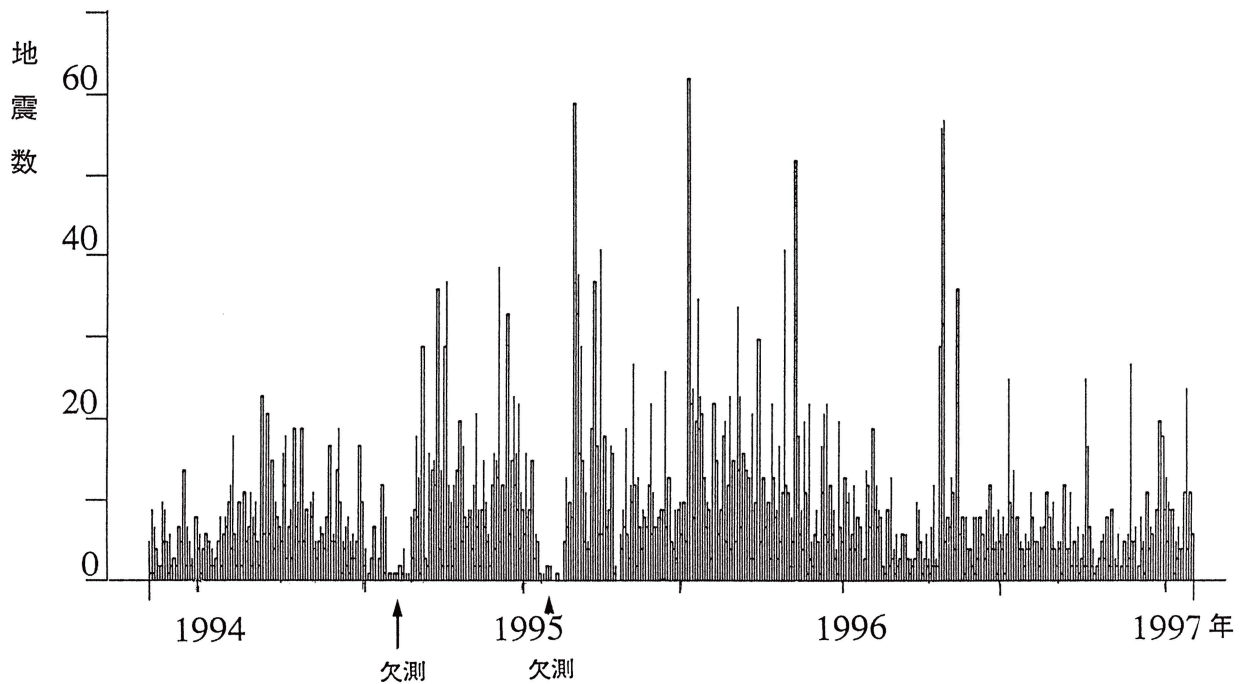
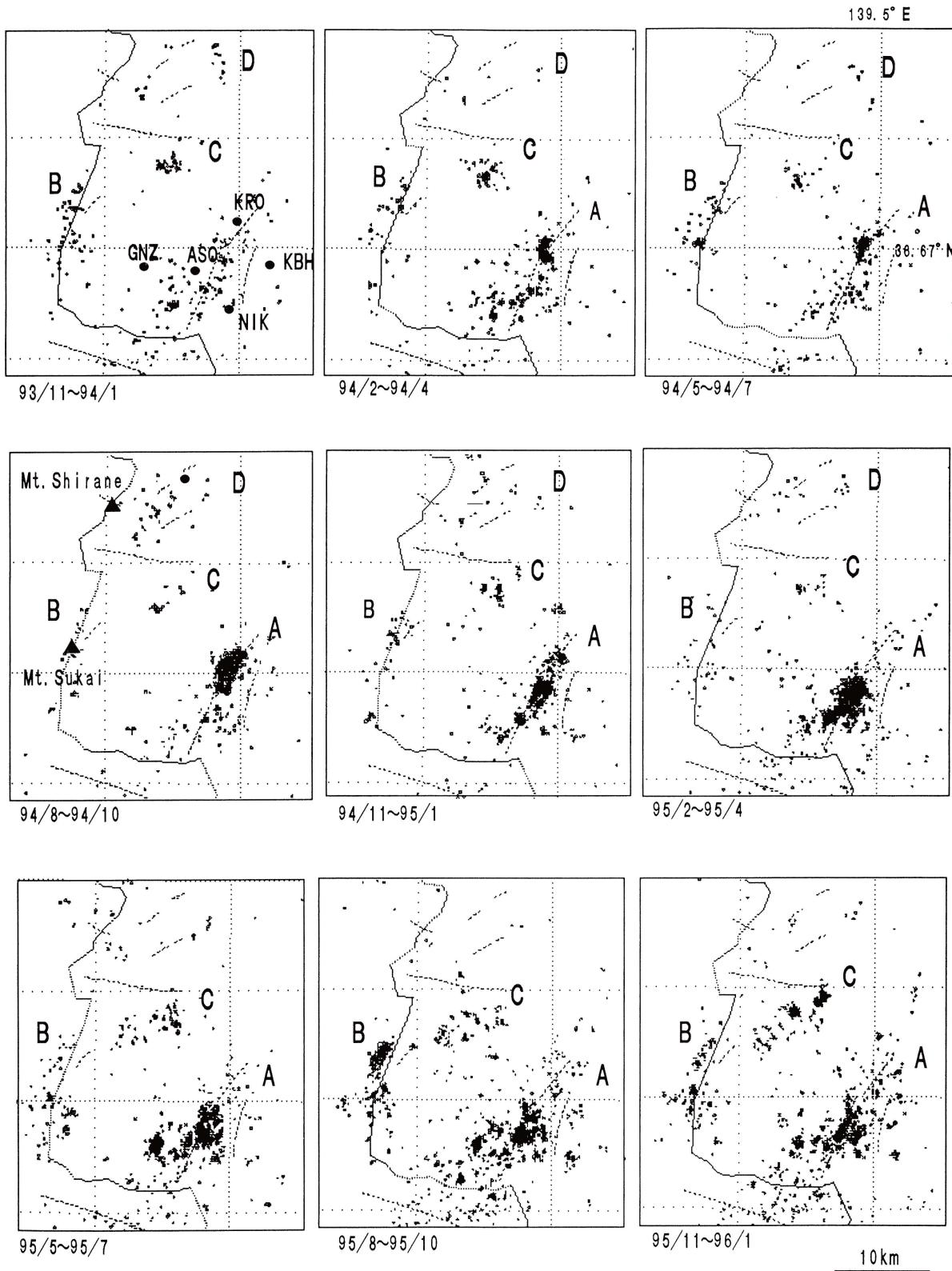


図6. 日光・足尾地域の日別頻度分布図(1993年11月～1997年1月)(M≥1)。1994年8月1日より8月23日まではGPS時計不調の為欠測、また、1995年1月18日より2月12日まではテレメーター入れ替えのため欠測。



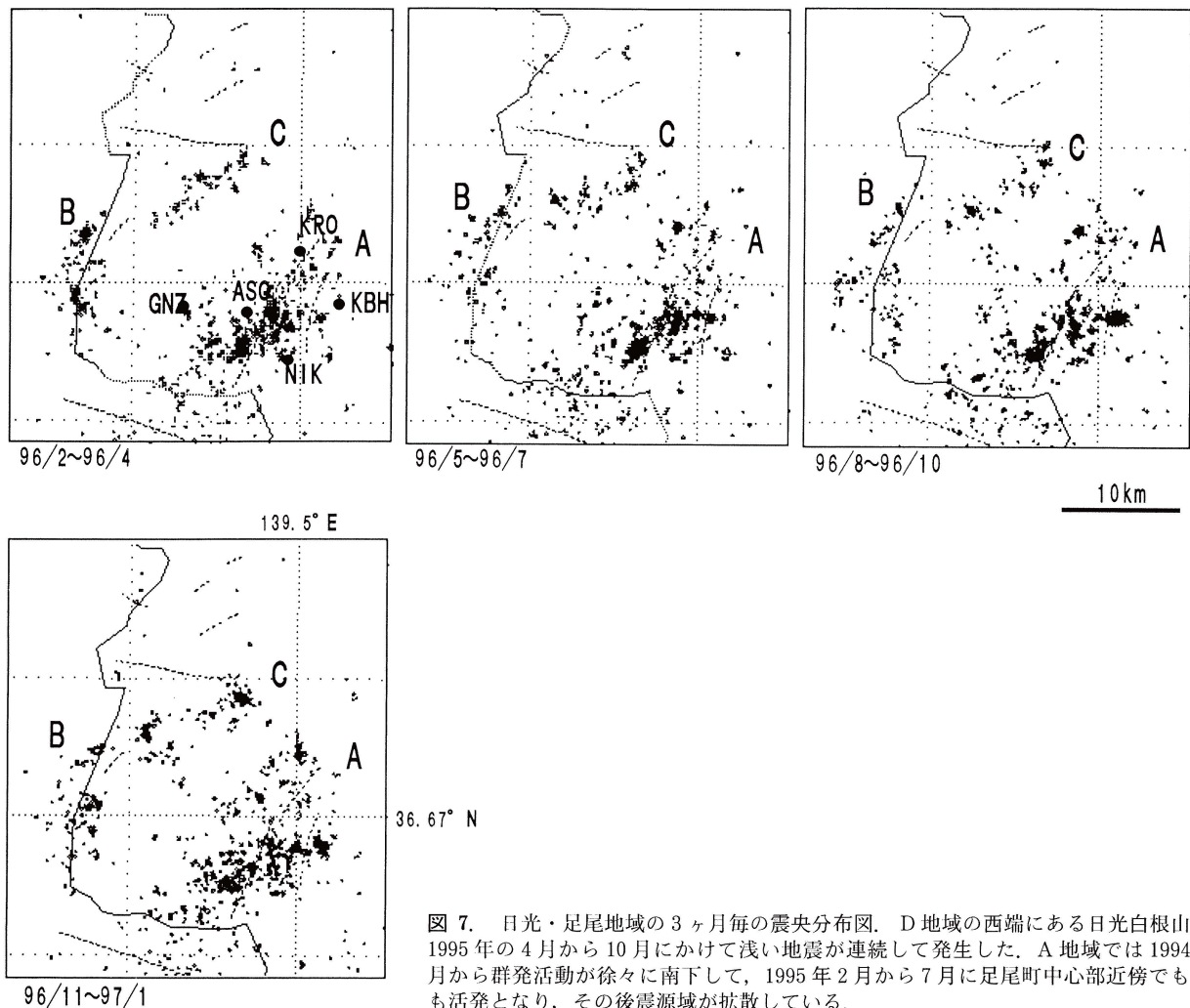


図 7. 日光・足尾地域の3ヶ月毎の震央分布図. D地域の西端にある日光白根山では1995年の4月から10月にかけて浅い地震が連続して発生した. A地域では1994年2月から群発活動が徐々に南下して, 1995年2月から7月に足尾町中心部近傍でもっとも活発となり, その後震源域が拡散している.

小さいいくつもの小地震活動域を作り, 震源域が全体に拡散している. 今までの震源域の周辺でM3クラスの地震が3個発生している. 9月5日にM3.7, 9月25日にM3.6の地震が領域Hの東側2kmの位置で発生し, また, 内ノ籠断層の南西の延長線上に9月27日にM3.8の地震が発生している.

#### 8. 1995年11月~1996年1月 (図11-h)

領域D, Hの活動域の西端で断層のリニアメントに沿って線状に活動している. また, 領域Hの東側にM3.7の地震が起きて(領域I), 領域Hの主な震源域は活動が低下している. 全体の震源が拡散してきている.

#### 9. 1996年2月~4月 (図11-i)

足尾(ASO)観測点の北東1km位で領域Gの活動域の北側が活動している. 他に, 内ノ籠断層のリニアメントの西側で, 1995年の2月~4月に活動した領域Eの震源域が活動している. さらにその西側で, 2月1日にM3.7で深さ6.2kmの地震が発生している(領域F). 震源はさらに拡散してきている.

#### 10. 1996年5月~7月 (図11-j)

領域Eが前期に引き続き活発に活動している. 1996年5月6日に深さ7.2kmでM4.0の地震が発生している. この領域から古峰原(KBH)観測点を結ぶ北東-南西に震源が並んでいる. 全体としてはますます震源が拡散している.

#### 11. 1996年8月~10月 (図11-k)

領域Eの活動が続いている. この前の期に発生した古峰原(KBH)観測点の南西の活動がまとまって起きている(領域J). この震源は緩く西側に傾斜して下がっている薄い幅の領域に起きている. 内ノ籠断層と古峰原西の2本の断層に囲まれた地域の震源を合わせると, 断層のリニアメントの直下を最深とし, 東に浅くなる震源域が見えている. 領域Eの内ノ籠断層の西側の震源も入れると, 東西断面がV字状になった領域に震源がある. また震源は, 断層に沿っては, 南から北へ深くなっている.

#### 12. 1996年11月~1997年1月 (図11-l)

震央全体の方向は古峰原(KBH)観測点から足尾(ASO)観測点を通り, 銀山平(GNZ)観測点の南東に向かう, 東北東-西南西の方向に伸びている. 小さな地震の塊はあるが高密度で発生しているところがない. 震源はさらに



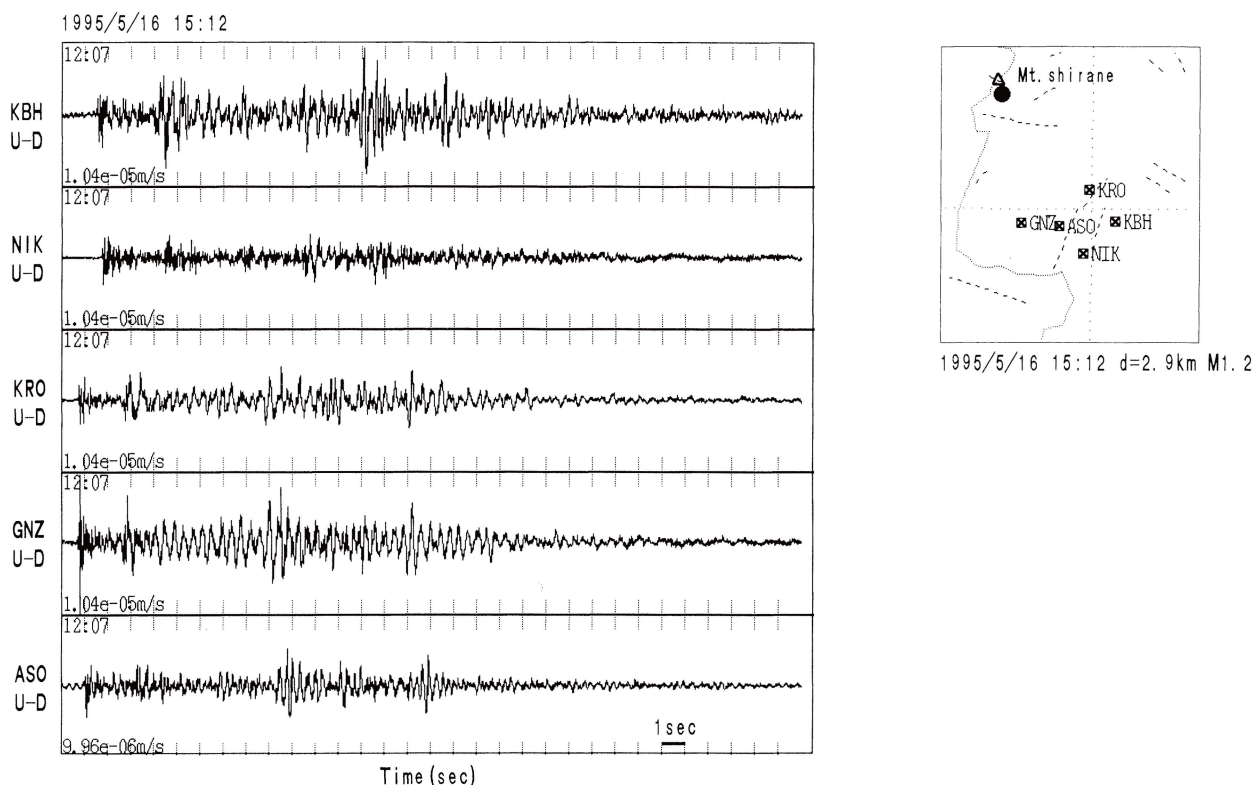


図 8. 日光白根山直下の地震の波形例 (1995/5/16 15h12m,  $d=2.9$ km,  $M1.2$ ). 横軸は時間 (単位;秒), 縦軸は振幅 (単位;  $m/s$ ) で, 各波形の枠の幅がそれぞれの枠の左下の速度を示す. 枠の左上の 12:07 は 12m07s で, 波形表示開始時間を示す. 日光白根山では, 1995 年の 4 月から 10 月に浅い地震が連続して発生した. これらの地震は 2~3Hz の卓越周波数を持ち, 通常地震より継続時間が長い.

拡大し, ばやけている. 断層のリニアメントの最南端の 2 km 位西で  $M3$  クラスの地震が発生している. 東西方向の断面図に V 字状の震源域が, 南北方向の断面図に北へ向かって深くなる震源域が見えている.

### 足尾地域の震源の深さ分布

今まで足尾地域の震源の移動を見てきたが, 次に深さ分布を見てみる. 図 12 に深さ毎の震央分布図を示し, 図 13 に図 12 より, 地震群を抜き出して楕円または閉じた曲線で表示した模式図を示す. 図 14-a, b に,  $N30^\circ E$  の方向に回転した震央を北東から南西に A-A', B-B', C-C', ..., I-I', J-J' の領域で区切った断面図を示す. 内ノ籠断層のリニアメント直下で断層の走向に沿った深さ 8~9 km の細長い  $2 \times 1$  km の震源域が下限になっている (図 12, 図 13). この下限は左右逆の“く”の字の形で, 中央部はリニアメントより東側に約 1 km 広がっている. 7~8 km の深さの震源はその上部で内ノ籠断層の走行に沿って南北に 1 km 位広がっているが, 西へは広がらず, 東側に膨らんでいる (図 12, 図 13). 9 km から 7 km へと東側に浅くなる震源の下限が断面図に見える (C, D, E, F, G 断面, 図 14-b). これらの深さ 7 km から 9 km の震源域を密集域と呼ぶことにする. 密集域の周辺には 5~7 km の地震が

発生していて中央部は少ない (図 12, 図 13). また密集域の東端に深さ 7~2 km に至る震源の列が見えている (F 断面の中の上下の矢印, 図 14-b). この矢印から西側にはどの断面でも深さ 0~7 km の震源が散在しているが, 東側は少ない. また密集域の上部に北西に向かって 5~3 km へと浅くなる帯状の震源の列がある (F, G 断面の中の細い矢印, 図 14-b). 足尾観測点付近の最深部から古峰原観測点へ向かう震源は, 東へ向かって  $30^\circ$  位の角度で浅くなる薄い領域上にある (D, E 断面, 図 14-b). また密集域の南部から銀山平観測点へは, 北西側に向かって浅くなっている帯状の領域がある (H, I 断面, 図 14-b). その中の地震群はこの走向とは直交する北東へ向かって浅くなる配列に並びながら, 全体的には北西側に浅くなっている (H, I 断面, 図 14-b). 9~12 km の深い震源は密集域の縁の 3 カ所に点在している (C, G, H 断面, 図 14-b, 図 13). 浅い 2~4 km の震源で密度の高い固まりも密集域の縁に点在している (F, G 断面, 図 14-b, 図 13).

### 規模の大きな活動

今まで足尾地域の群発活動の推移を述べてきたが, その地震群の中には本震-余震型や, 前震-本震-余震型の活動が含まれていて, それぞれが特徴ある活動をしている. そ

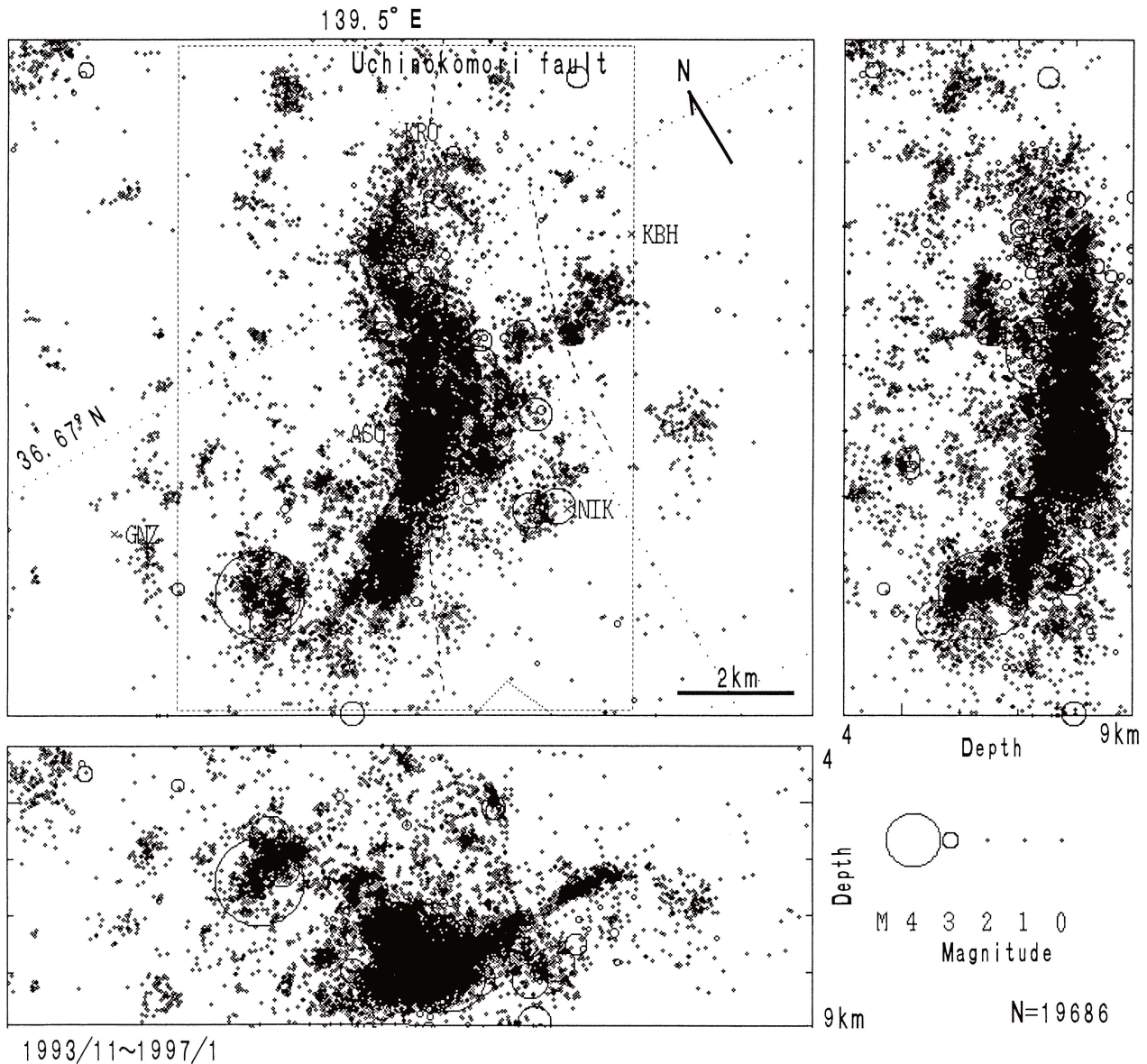


図 9-a. 足尾地域の震源分布図。内ノ籠断層の走向の方向、 $N30^{\circ}E$  の方向に回転。中央が平面図、右側が  $N30^{\circ}E-S30^{\circ}W$  断面図、下側が  $N60^{\circ}W-S60^{\circ}E$  断面図。期間は 1993 年 11 月～1997 年 1 月。深さ  $4\text{ km} \leq h < 9\text{ km}$ 。右下にあるマグニチュードに応じた円でプロットする。図中の地震数は 19686 個。

の詳細を見るために次の 5 つの地震活動を見る。

### 1. 1994 年 2 月から 7 月の群発活動

領域 A の活動にあたる。図 15 に 1994 年 2 月から 7 月までの震源分布 (図 15-a) と時空間分布 (図 15-b) を示す。この活動は一連の足尾地域の地震活動の始まりとなった。内ノ籠断層の折れ曲がり部分から発生し、2 つの部分に分かれて活動し、相補的な関係がある。始めに北側の地震群が 2 月 8 日頃より活動を開始し、3 月に南側の地震群に移って 3 月 14 日に M 3.1 と M 3.0 (深さ 7.6 km と 7.5 km) の地震、15 日には M 3.2 の地震 (深さ 7.6 km) が発生し、集中した活動が見られる。4 月になると北側に活動が移り、北側の最浅部で 4 月 5 日に深さ 7.4 km で M 3.7 の最

大地震が発生している。両方の地震群とも深さ 7.4～8 km の浅い部分と 7.9～8.4 km の深い部分に分離している。これらの地震群の中では、規模の大きい M 3 以上の地震は 4 個あり、すべて浅い部分に発生しているが、地震が密集しているのは深部の方である。南側は内ノ籠断層の走向に斜交した震源分布を持っており、北側は平行な震源分布をしている。4 月 5 日の地震の P 波初動より決められた発震機構解は、北西-南東の圧縮軸の逆断層解で、内ノ籠断層の走向と一致する節面を持つ。西側の面を断層面とすれば、断層のリニアメントの西側が隆起している地形とも合う。

### 2. 1995 年 7 月 7 日の活動

領域 F の活動にあたる。図 16 に 1995 年 7 月の震源分布

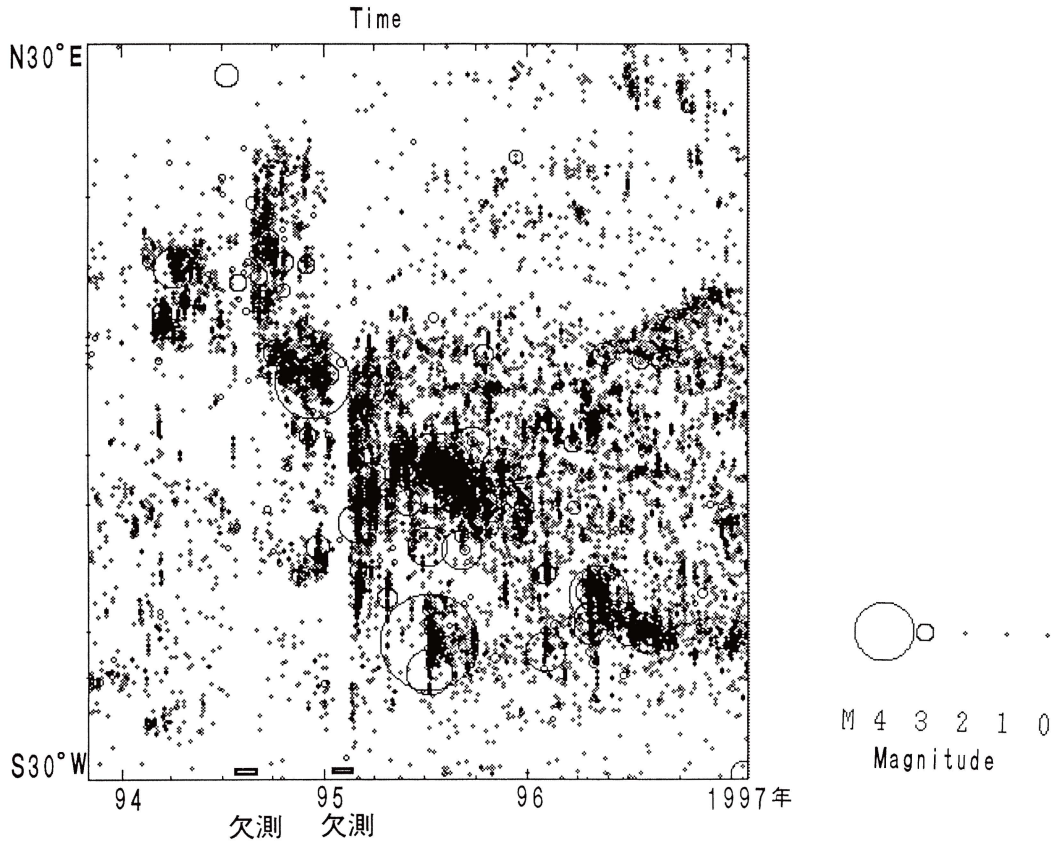


図 9-b. 図 9-a. の平面図の中の鎖線で囲まれた領域の時空間分布図 (N30°E-S30°W の方向). 期間は 1993 年 11 月～1997 年 1 月. 1994 年 8 月 1 日より 8 月 23 日までは GPS 時計不調の為欠測, 又, 1995 年 1 月 18 日より 2 月 12 日まではテレメーター入れ替えのため欠測. 1994 年の 2 月に内ノ籠断層の北部で始まった地震活動は 1996 年の 10 月頃まで断層に沿って南下し, その後西南西-東北東の活動になった.

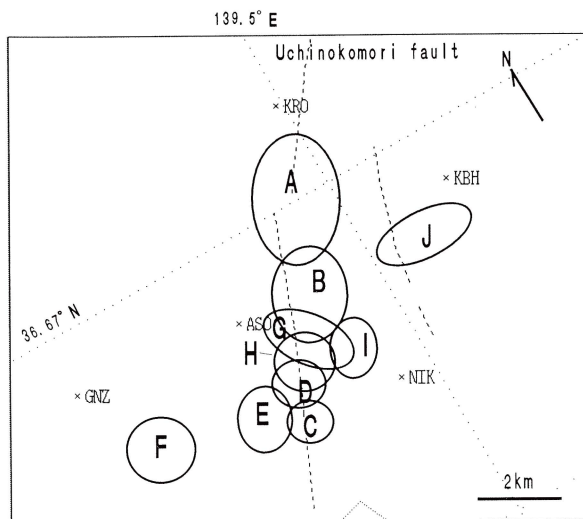


図 10. 足尾地域の主な地震群の分布. N30°E の方向に回転. 地震群を模式的に A, B, C, …, I, J の時間順の楕円で表示. 期間は 1993 年 11 月～1997 年 1 月.

は 5.5～7km で足尾地域の地震としては浅い, 1995 年 7 月 7 日 11 時 15 分に深さ 6.4km で M4.4 の地震が発生した. この地震が本震で, その 1 時間前より前震があった. 本震直後に本震の周辺に余震が広がっている. 余震分布は北に 40°傾き下がる長さ約 1.5km で厚さが約 500m 位の面状に分布している. P 波初動より得られた発震機構解は北西-南東圧縮軸の縦ずれ成分を含む横ずれ型で, 余震分布はその東西の節面と合う. 7 月 7 日 18 時頃より一度余震活動が静穏になり, その後南端の最浅部 (深さ 5.6km) で, 7 月 7 日 21 時 10 分に M 3.8 の最大余震が発生し主な活動が終わった.

### 3. 1995 年 7 月 18 日の活動

領域 G の活動にあたる. 図 17 に 7 月 1 日から 7 月 31 日までの震源分布 (図 17-a) と時空間分布 (図 17-b) を示す. この活動は内ノ籠断層のリニアメントに沿った活動で領域 F の活動がほぼ収束した 1995 年 7 月 10 日頃より活発になり, その後何度も同じ場所で小活動を起こしている. 最大地震は 7 月 18 日 20 時 13 分に発生し, 深さ 8.1km で M4.2 であった. 北西-南東の圧縮軸を持つ発震機構解が得られている.

(図 16-a) と時空間分布 (図 16-b) を示す. 領域 F は銀山平 (GNZ) 観測点の南東 3km を震源域としている. 深さ

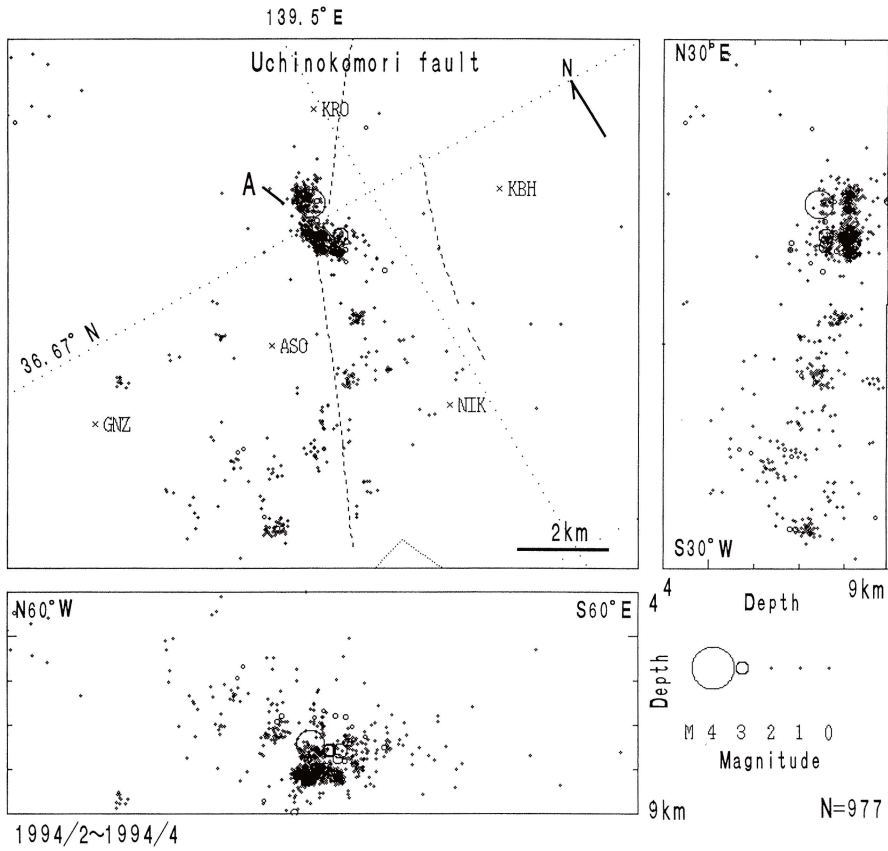


図 11-a. 足尾地域の3ヶ月毎の震源分布図. N30°Eの方向に回転. 中央が平面図, 右, 下側が断面図. 期間は1994年2月~1994年4月. 深さ4 km ≤ h < 9 km. 右下のMはマグニチュードを, Nは地震数を示す. 領域Aで1994年2月より群発活動が始まった. その場所は地表に現れた内ノ籠断層のリニアメントの折れ曲がり地点で, 不連続になっている部分である.

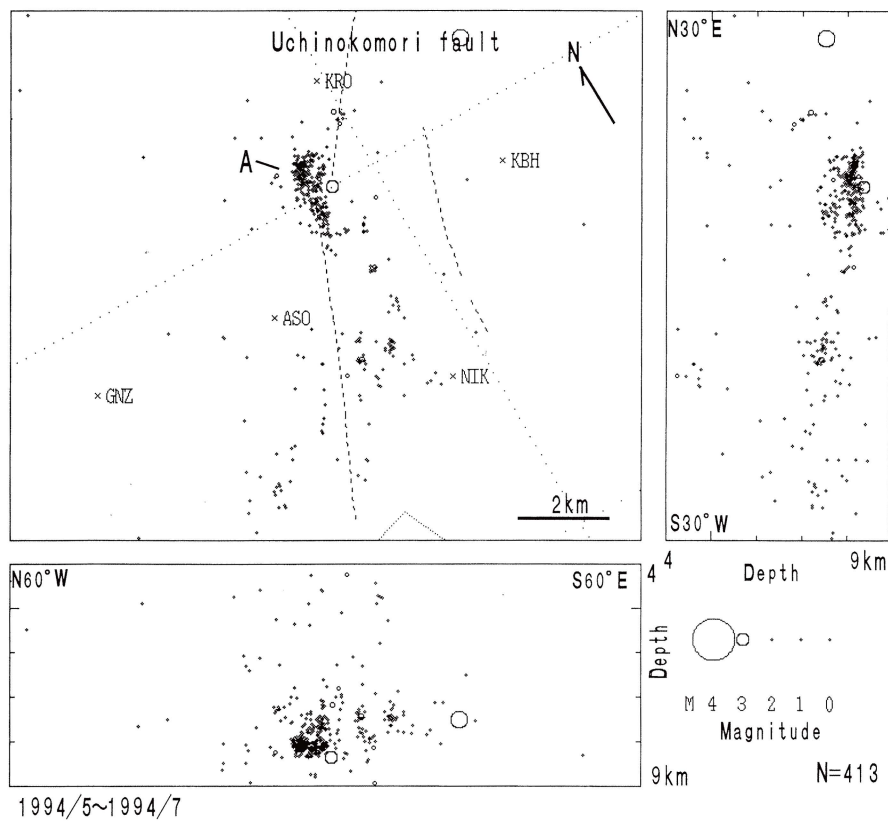


図 11-b. 続き, 1994年5月~1994年7月. 領域Aの内ノ籠断層に沿った走向の活動がやや広がってきた.

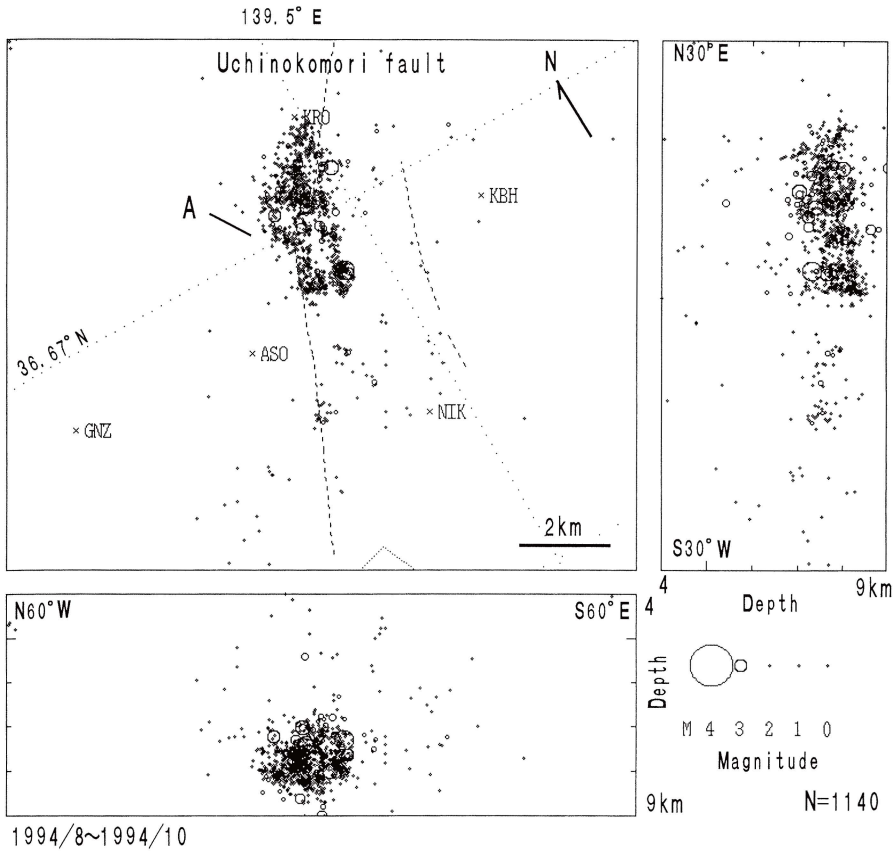


図 11-c. 続き. 1994年8月～1994年10月. 2月～4月に活動した領域Aの密集した震源域を取り囲む様に地震が発生し, 領域Aの中心部は逆に活動が低下している.

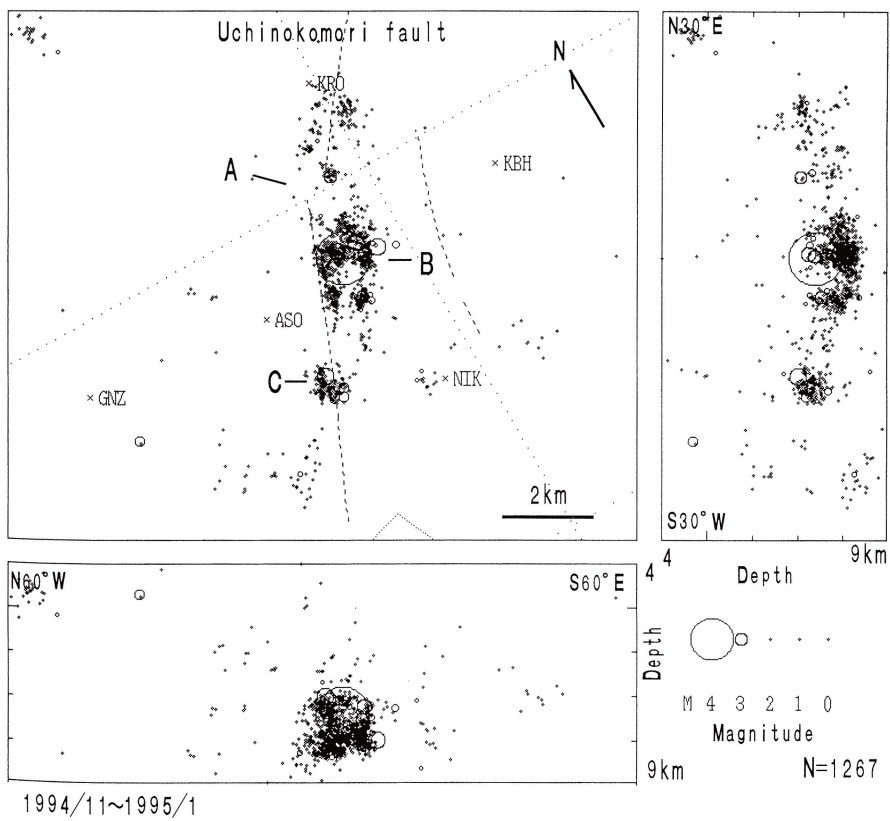


図 11-d. 続き. 1994年11月～1995年1月. 領域Aから領域Bに活動の中心が移る. 領域Bで1994年12月12日にM4.2, 深さ7.4kmの地震が発生した. さらに領域Cに震源が移動した.

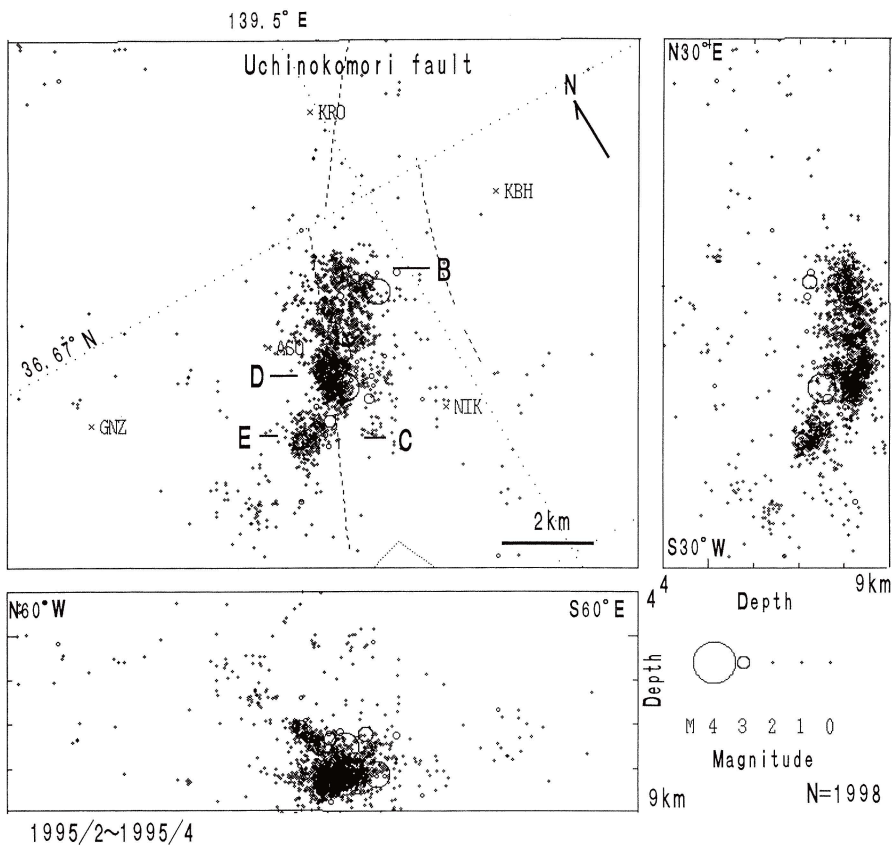


図 11-e. 続き. 1995年2月~1995年4月. 領域Bの活動域の震源分布は拡散してきた. 領域Bの南にある領域Dと, 領域Cの西側の領域Eが活動している.

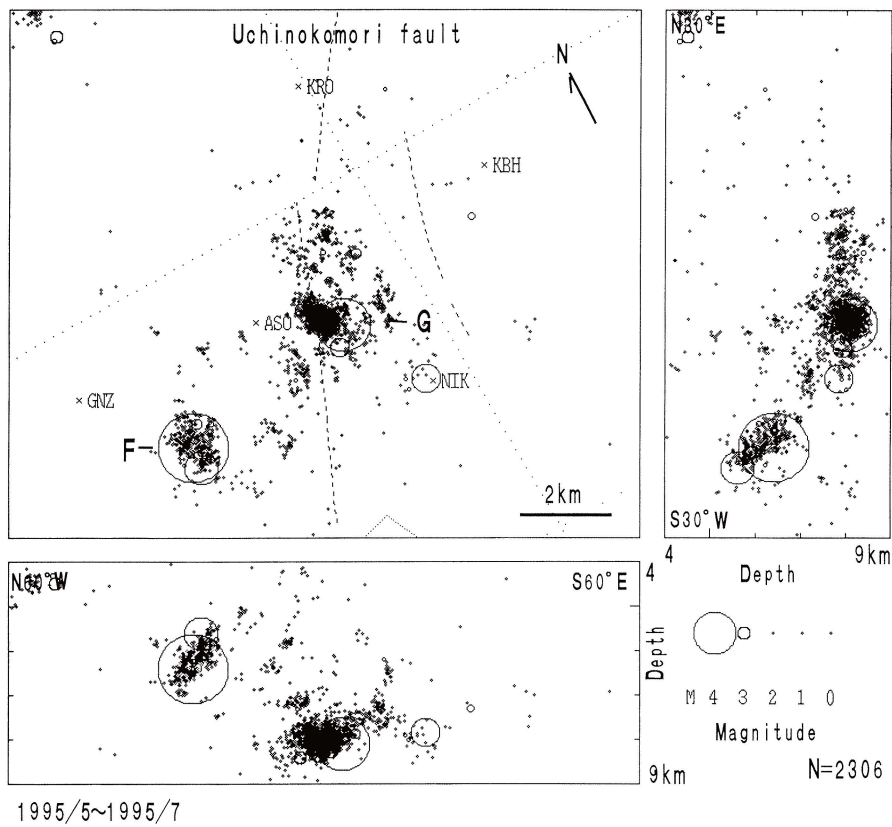


図 11-f. 続き. 1995年5月~1995年7月. 銀山平 (GNZ) 観測点の南東3kmの位置に新たな活動域が出来た (領域F). 又, 領域Bと領域Dの隙間を埋めるように領域Gで激しい活動があった.

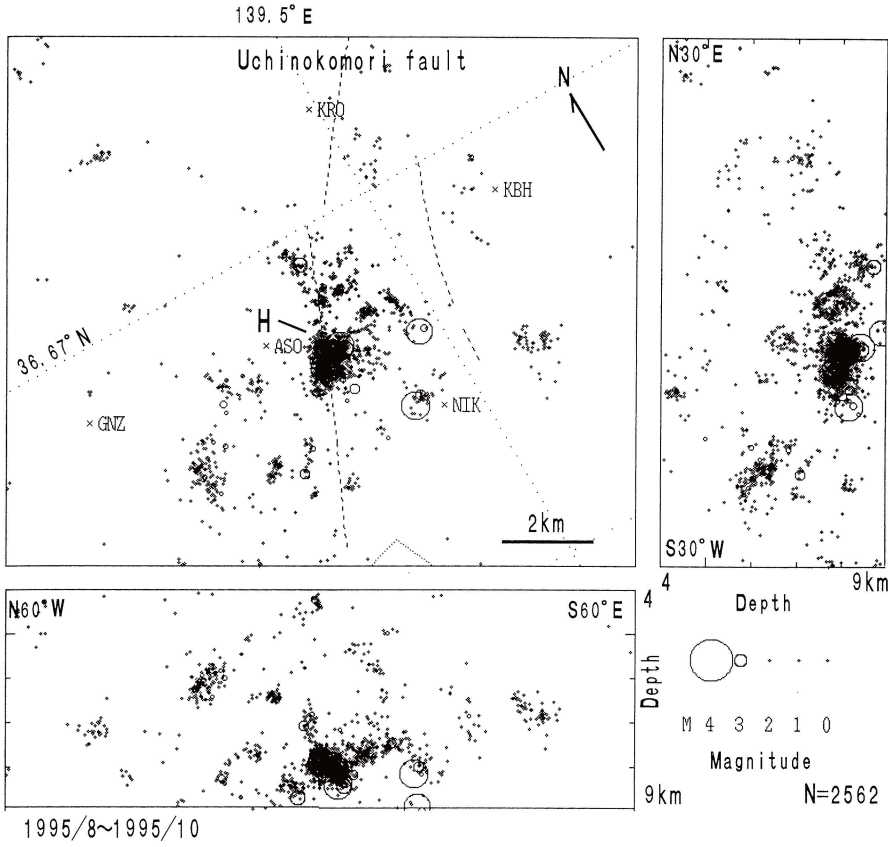


図 11-g. 続き. 1995年8月～1995年10月. 足尾 (ASO) 観測点の南東の活動が活発で領域 D, G にまたがって領域 H が活動している.

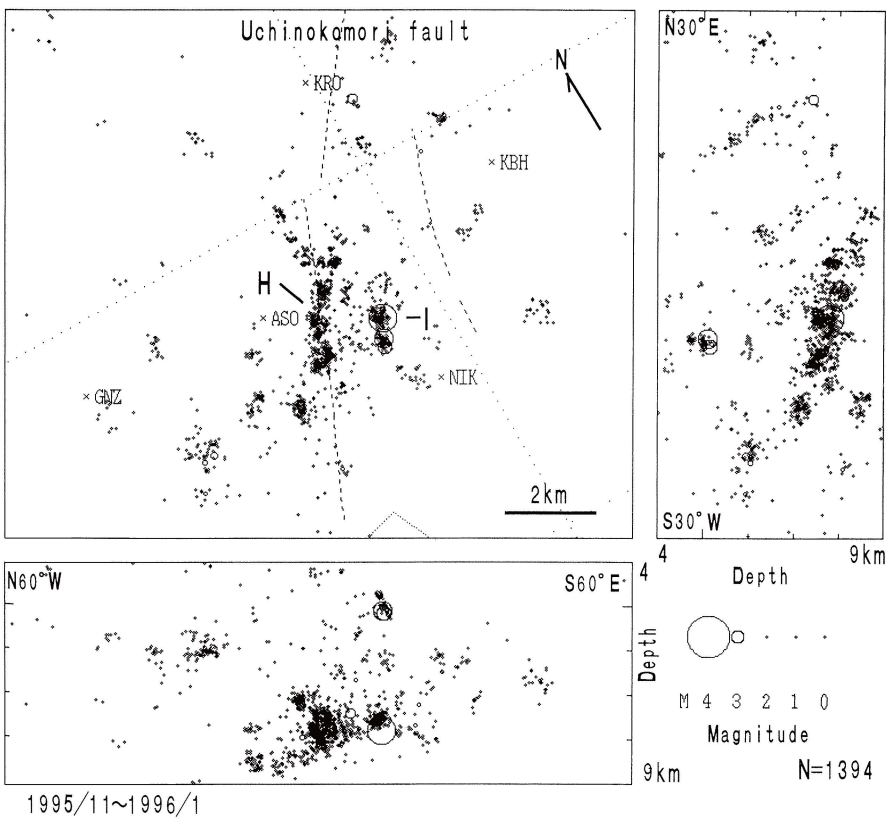


図 11-h. 続き. 1995年11月～1996年1月. 領域 H は活動が低下し, 西端で断層のリニアメントに沿って線状に活動している. 領域 H の東側の領域 I が活動している. 震源が拡散して来ている.

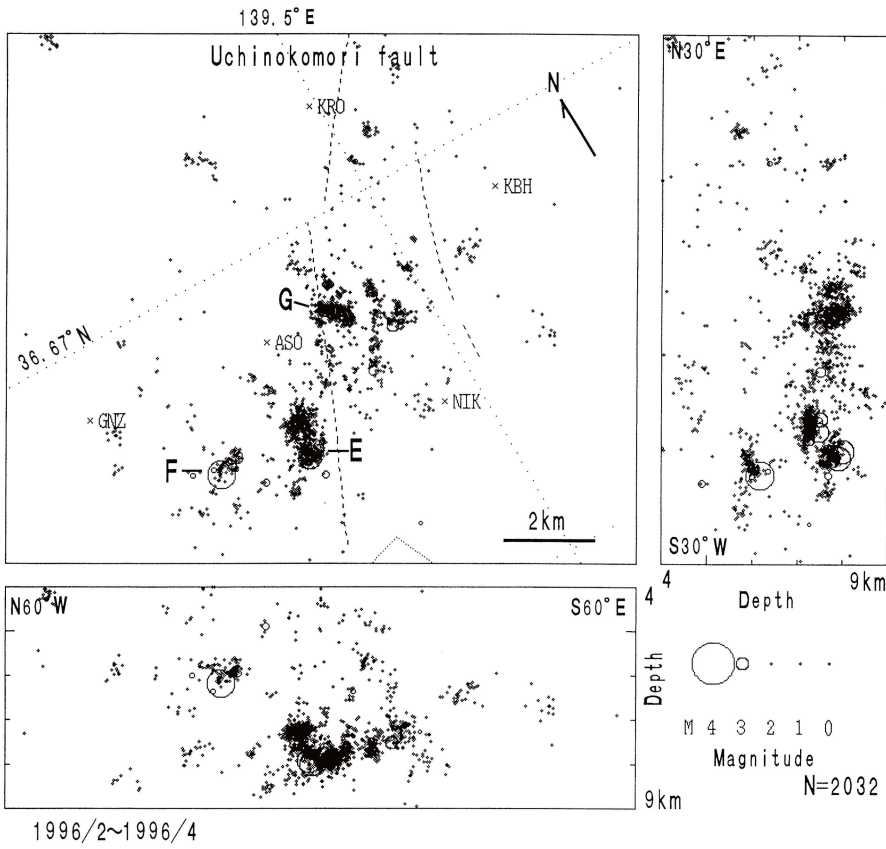


図 11-i. 続き. 1996年2月~1996年4月. 領域G, E, Fが活動している. さらにいっそう全体の震源が拡散して来ている.

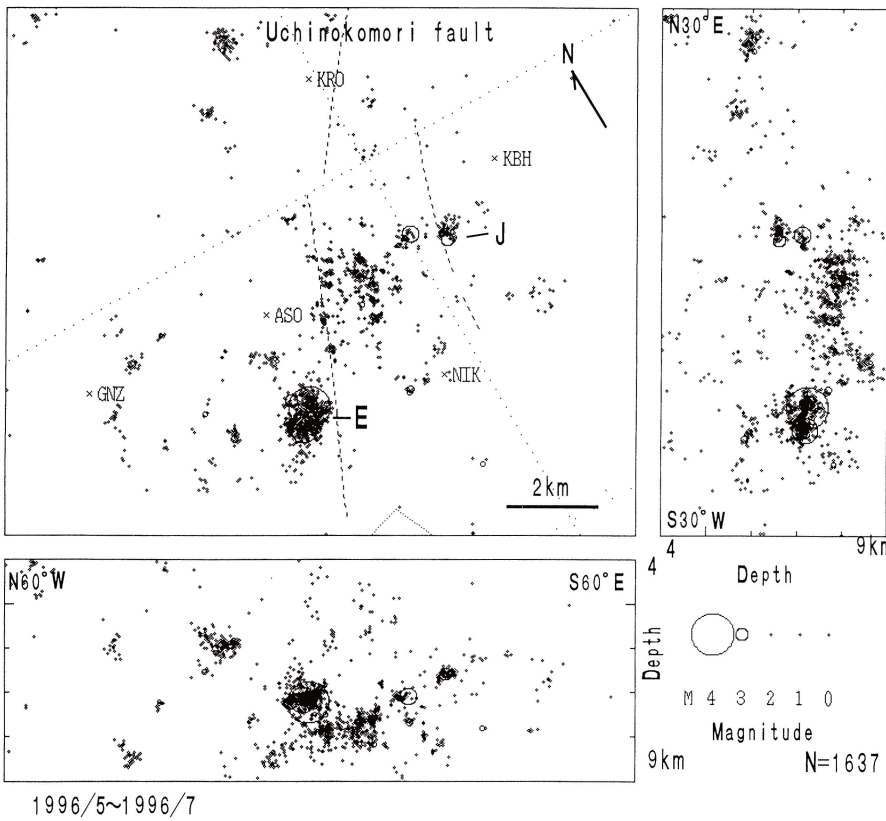


図 11-j. 続き. 1996年5月~1996年7月. 領域Eが前期に引き続き活動している. 領域Eから古峰原(KBH)観測点を結ぶ北東-南西に震源が並んでいる.



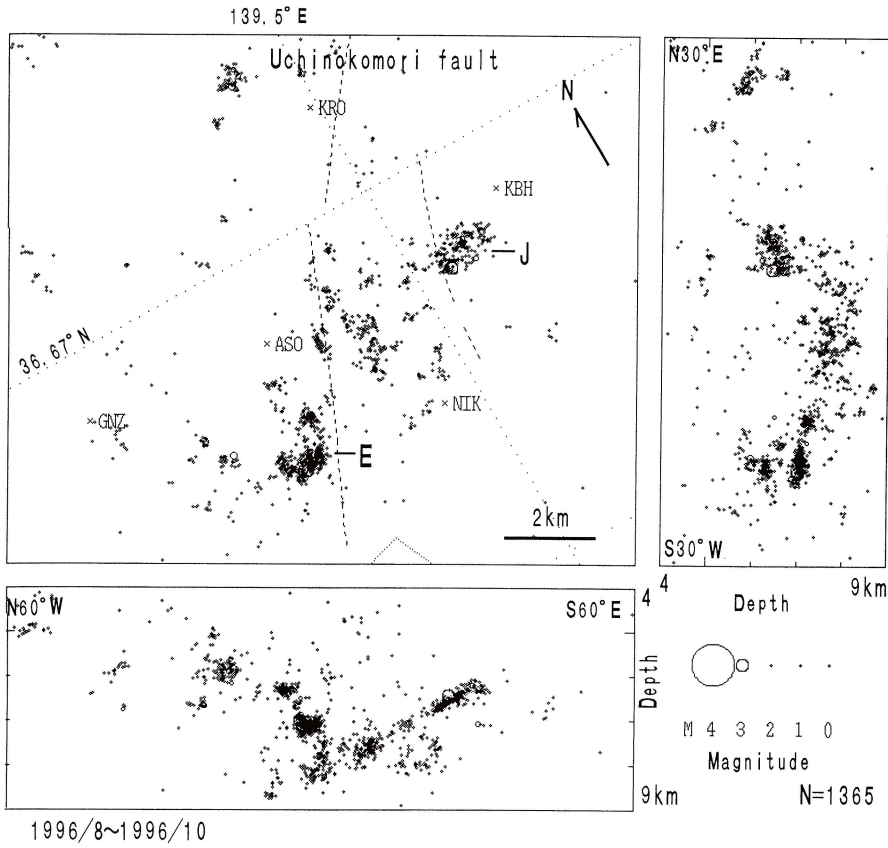


図 11-k. 続き. 1996年8月～1996年10月. 領域Eの活動が続いている. 古峰原 (KBH) 観測点の南西の活動がまとまって起きている (領域J). 断層のリニアメント直下を最深として領域Jに向かう震源は東に向かって浅くなり, 領域Eの震源は西に浅くなり, N60°W-S60°E断面はV字状になっている.

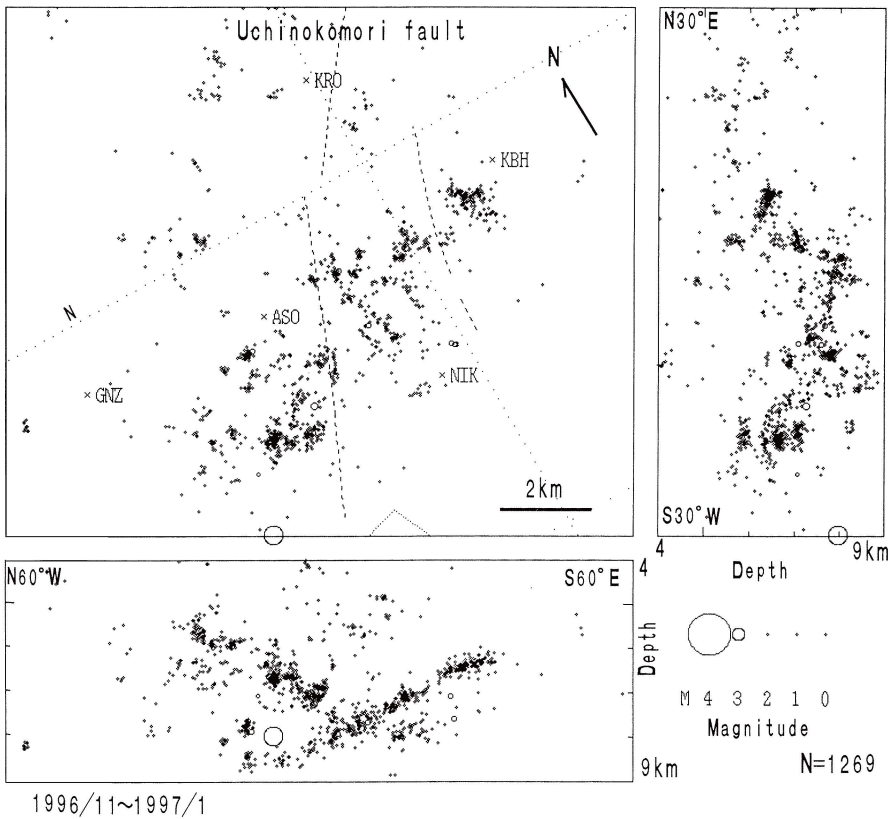


図 11-l. 続き. 1996年11月～1997年1月. 震央の方向は古峰原 (KBH) 観測点から銀山平 (GNZ) 観測点の南東に向かう, 東北東-西南西の方向に伸びている. 震源はさらに拡大し, ぼやけている. 東西方向の断面図にV字状の震源域が見えている.

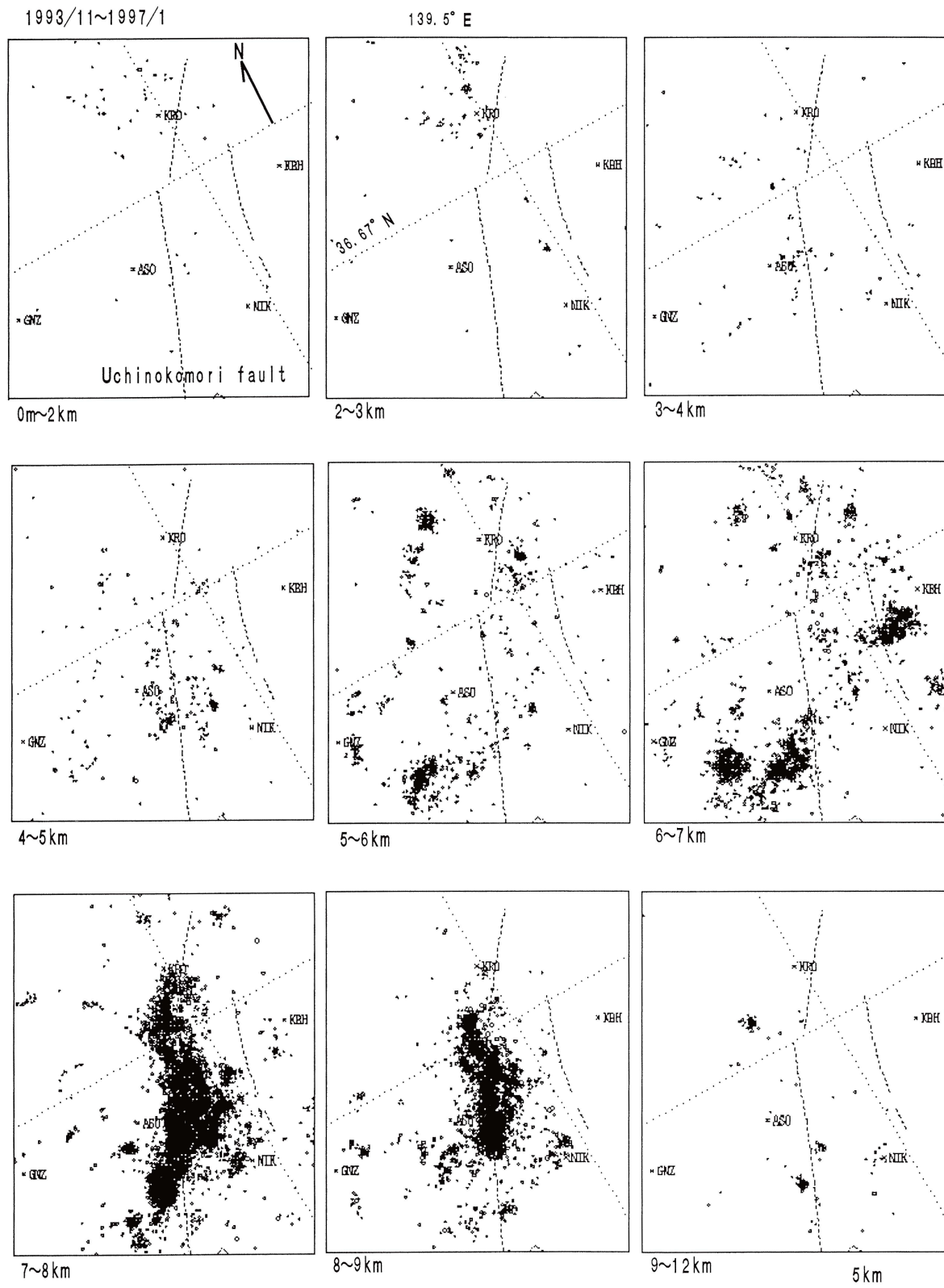


図 12. 足尾地域の地震の深さ別の震央分布図.  $N30^{\circ}E$  の方向に回転. 内ノ籠断層に沿った深さ  $8\sim 9$  km の細長い  $2\times 1$  km の震源域が下限となって,  $7\sim 9$  km の深さに震源が密集している. この密集域の周辺に浅い地震 ( $5\sim 7$  km) が発生している.

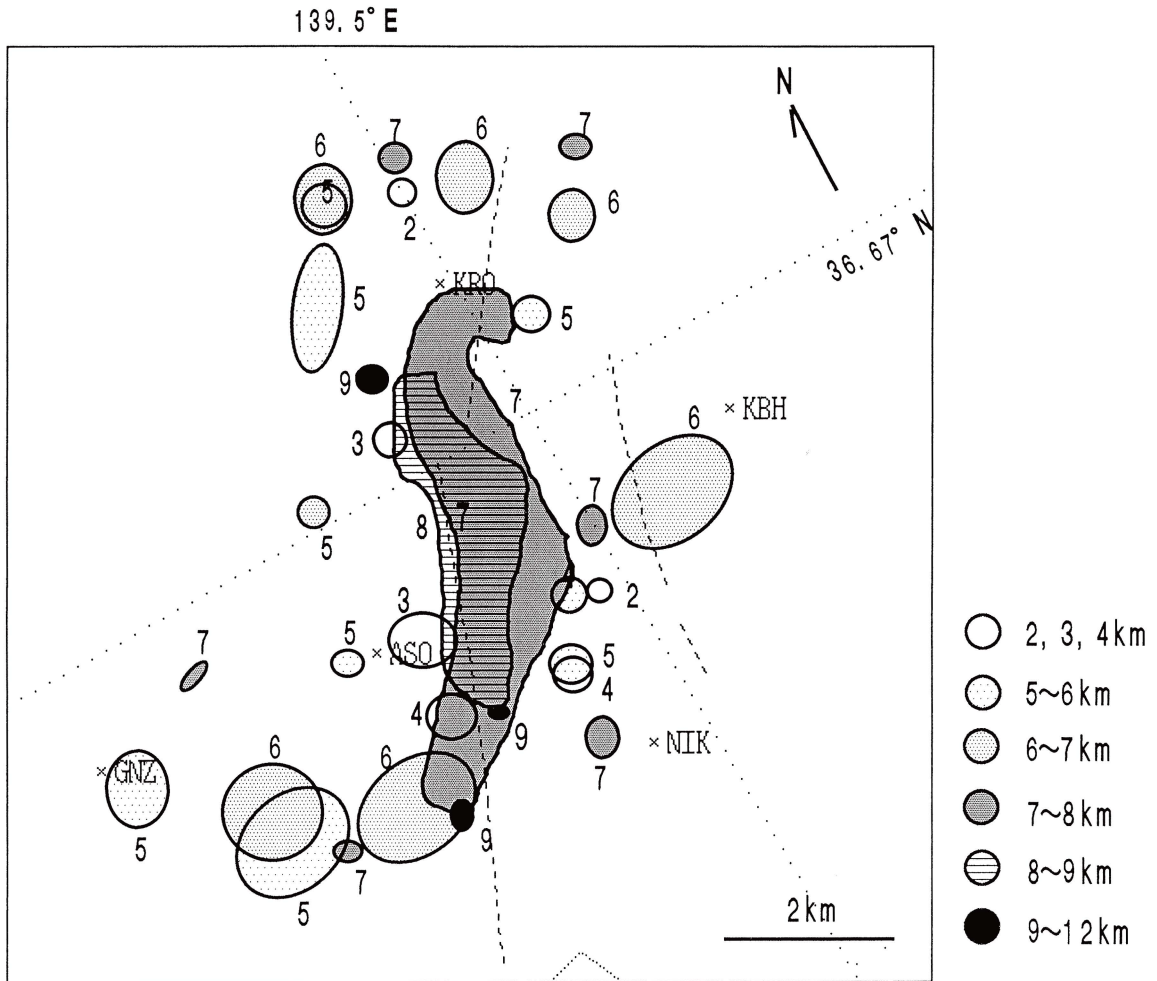


図 13. 深さ毎の地震群を識別した模式図。N30°E の方向に回転。密集域（深さ 7～9 km）は断層のリニアメントの西側へはあまり拡がらず、中央部で東側へ膨らんでいる。密集域の周辺に浅い地震（5～7 km）が起きる領域があり、密集域の縁に極浅い地震（0～4 km）と深い地震（9～12 km）が起きる領域が点在している。

#### 4. 1995年8月4日の活動

領域 H の活動にあたる。図 18 に 1995 年 8 月の震源分布（図 18-a）と時空間分布図（図 18-b）を示す。足尾（ASO）観測点の 1 km 南東のこの地域はもっとも活動度が高い。まず震源域の東端でかつ最も深い 8.4 km のところで 1995 年 8 月 4 日 17 時 18 分に M 3.7 の地震が発生した。余震が発生し、続いて 8 月 5 日の 16 時 14 分に深さ 8.1 km で M 3.5 の地震が発生した。その後、短時間に集中した活動を含みながら震源が徐々に浅くなり、かつ東から西に向かって移動していき、8 月 23 日の 06 時 27 分に深さ 7.9 km で M 3.6 の地震と、8 月 27 日の 11 時 57 分に深さ 7.8 km で M 3.5 の地震が発生してこの群発活動は収束に向かった。この地震群は小群発活動を繰り返しながら 1 ヶ月かけて東から西へ徐々に約 1 km 移動し、かつ約 1 km 浅くなった。地震発生領域は西へ向かって 30°位の角度で浅くなる面状の領域で、長さは約 1 km で約 500 m の幅を持っている。8 月 4 日の M 3.7 の地震は、P 波初動より北西

–南東の圧縮軸を持つ逆断層の発震機構解が得られた。その節面の走向は内ノ籠断層の走向と一致し、震源分布から東側の節面が断層面と考えられる。

#### 5. 1996年4月～5月の活動

領域 E の活動にあたる。図 19 に震源（図 19-a）、及び時空間分布図（図 19-b）を示す。この活動は浅部と深部の 2 つに分かれ、浅部は北へ傾斜してやや深くなり、深部は東へ傾き下がっている。それぞれ約 1 km の長さがある。1996 年 4 月 19 日より浅部が活動し、4 月 23 日に深部に移り、4 月末には収束していたが、5 月 9 日 3 時 9 分に深さ 7.2 km で M 4.0 のこの活動の最大地震が浅部で発生した。この最大地震は浅部の震源域全部を覆っている。活動の特徴をつかむために代表的な期間をプロットする（図 19-c）。ここでのプロットはマグニチュードと断層の面積との関係から推定した円で震源を表している（宇津，1984）。

a. 1 期 4 月 19 日～4 月 22 日 微小な地震がこの小活動域の浅部で発生し、4 月 20 日 0 時 6 分に深さ 7.5 km

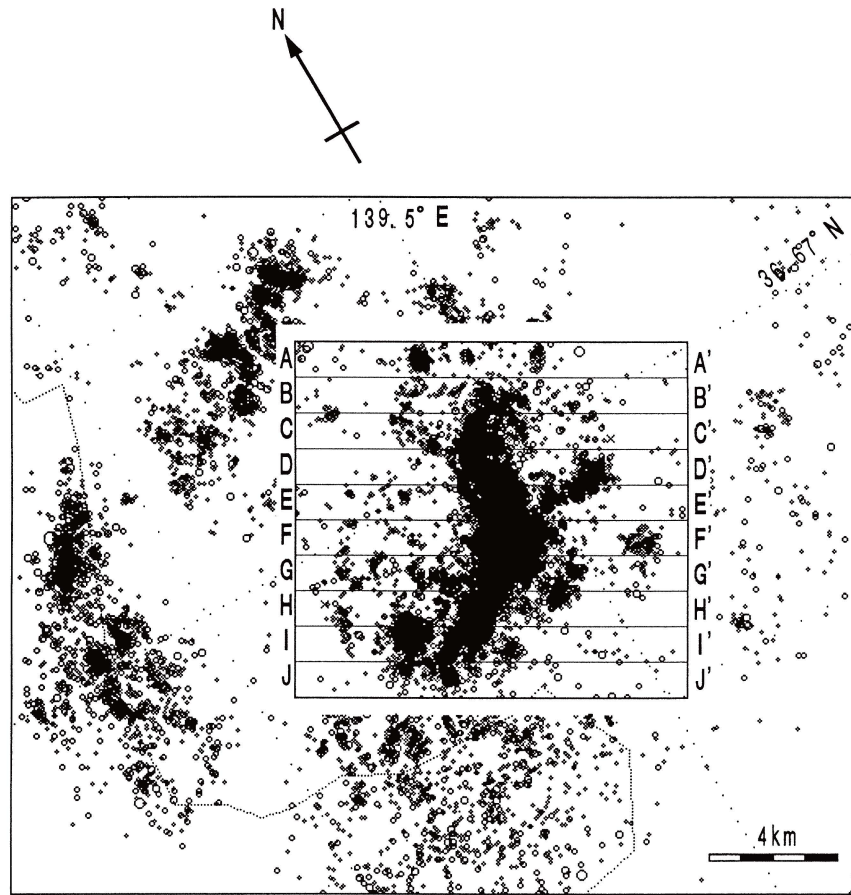


図 14-a. 足尾地域の N30°E の方向に回転した震央分布を北東から南西に約 1 km ごとに A-A', B-B', C-C', ..., J-J' に区切る. 期間は 1993 年 11 月~1997 年 1 月.

で M3.4 のこのグループ最大の地震が発生して 1 つの活動がほぼ収束した. 余震域は北へ向かって緩く傾き下がっている領域にある.

**b. 2 期 4 月 23 日~4 月 27 日** 次に地震は深部の活動域に移った. 4 月 23 日 0 時 40 分に深さ 7.9 km で M3.5 の地震が発生した. つづいて 4 月 23 日 05 時 44 分に深さ 8.0 km で M3.5 の地震が発生した. 余震域は東へ向かって 30° 傾き下がる面状の領域にある.

**c. 3 期 5 月 9 日~5 月 14 日** a, b の活動が収束した後, 5 月 9 日 3 時 9 分に深さ 7.2 km で M4.0 の最大の地震が浅部の東南端で発生し, 浅部の活動域すべてをカバーした. この最大地震の発震機構解は北西-南東の圧縮軸を持ち, 水平と垂直な節面が得られているが, 北へ緩く傾斜している浅部の余震分布からは水平な面が断層面と考えられる.

### 低周波地震

日光足尾及びその周辺の地域では, 低周波地震が発生することが知られている (西富・武尾, 1996). 低周波地震と呼ばれるものの中には火山の噴火活動に伴い火口近くで発

生する地震もあるが, ここでは近年明らかになってきた深さ 25~40 km 位のモホ面近傍に発生する低周波地震をさす. この低周波地震は, 通常の微小地震が 10~20 Hz 程度の卓越周波数を持つものに対して, 2~4 Hz の卓越周波数を持ち, P 波の立ち上がり不明瞭であるのに比べ S 波が明瞭に見られるという特徴を持っている. 日光・足尾地域で観測される低周波地震は, 初動部分で短周期成分が低周波の上に重なっていることが多い. 1993 年 11 月から 1997 年 1 月の期間において, 震源の決められた数個の低周波地震が観測されている. それらの震源の深さは 22~41 km で M1.3~2.5 の範囲であった. 震央は足尾の観測点近傍と, 栃木県の塩原温泉近くの高原山付近にある. 高原山付近の低周波地震は 22~30 km の深さで足尾地域のものより震源の下限が浅くなっている. 図 20 にその震源の位置 (図 20-a) と波形例 (図 20-b, c) を示す. 比較のため通常の日光足尾地域の地震波形も表示する (図 20-d).

### ま と め

定常観測によって得られた 1993 年 11 月~1997 年 1 月の日光・足尾地域の地震活動をまとめると次のようにな

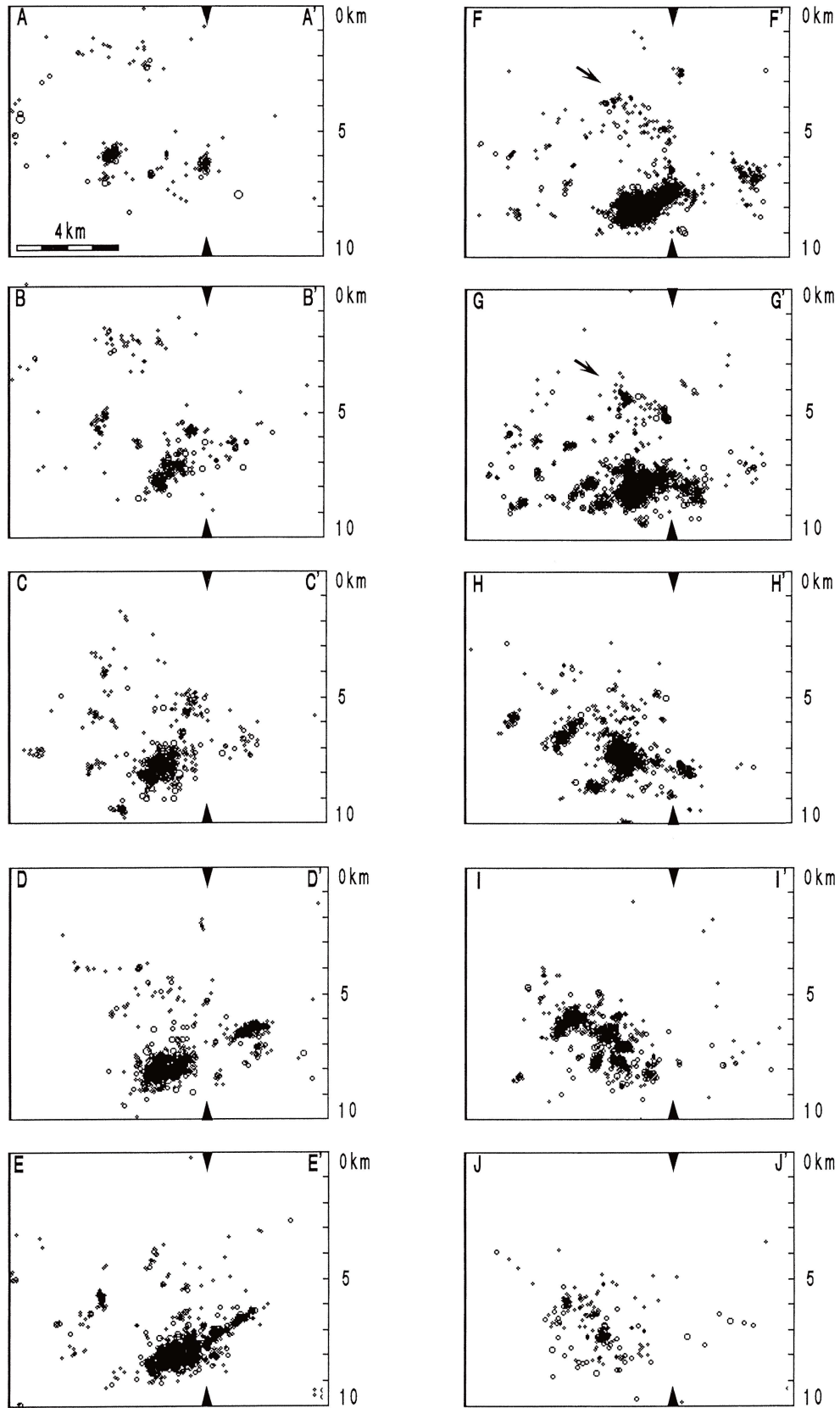


図 14-b. A-A', B-B', C-C', ..., J-J'の断面図. 図中の F-F'断面の上下の矢印の位置に深さ 7~2 km に至る震源の列が見えている. また矢印を境に東西の震源分布が変化している. F-F', G-G'断面の中の細い矢印は帯状の震源の列を示す. E-E'断面に東に向かって浅くなる帯状の震源域がある. H-H', I-I'断面には全体として北西側に浅くなりながら, この向きとは直交する北東へ向かって浅くなる震源の列がある.

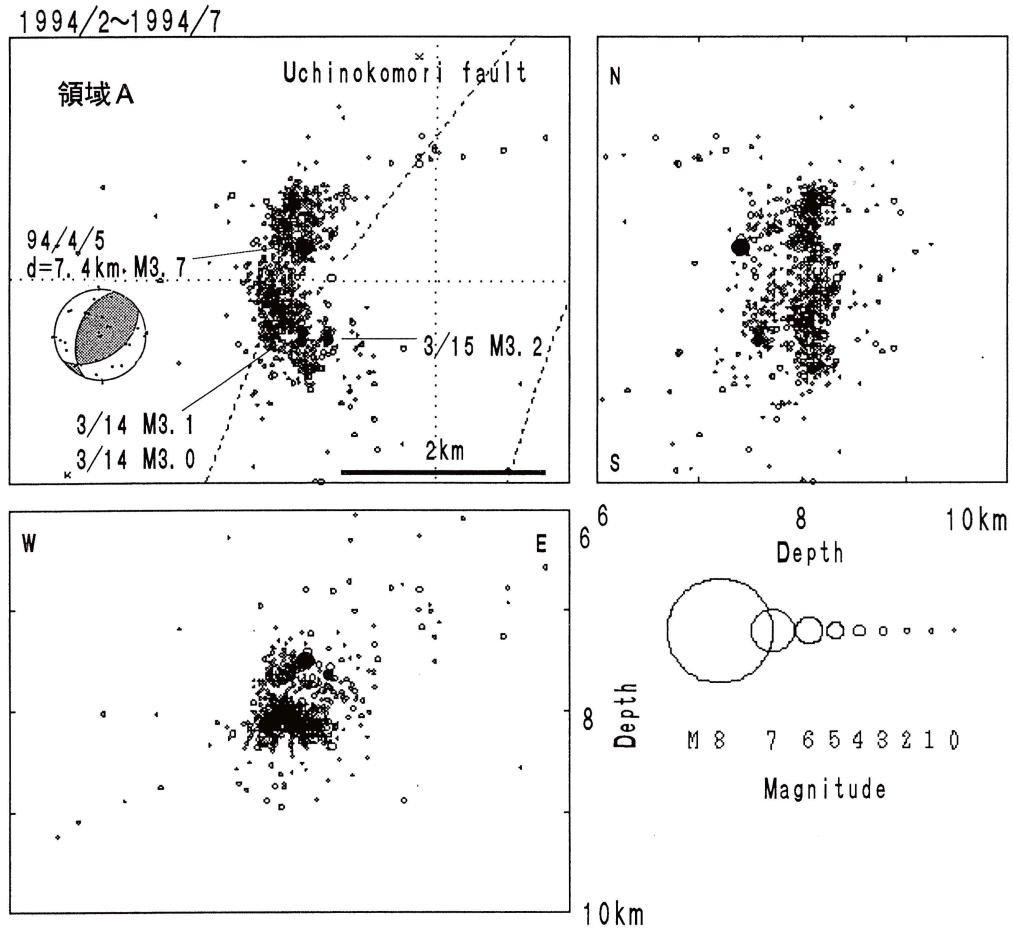


図 15-a. 領域 A の震源分布図（平面図，東西，南北断面図）と発震機構解（1994/4/5  $d=7.4$  km,  $M3.7$ ）。期間は 1994 年 2 月～7 月。この活動は一連の足尾地域の地震活動の始まりとなった。震源は深さ 7.4～8 km の浅い部分と 7.9～8.4 km の深い部分に分離している。M3 クラスの地震は 4 個あり，すべて上部で発生しているが，地震が密集しているのは深部の方である。

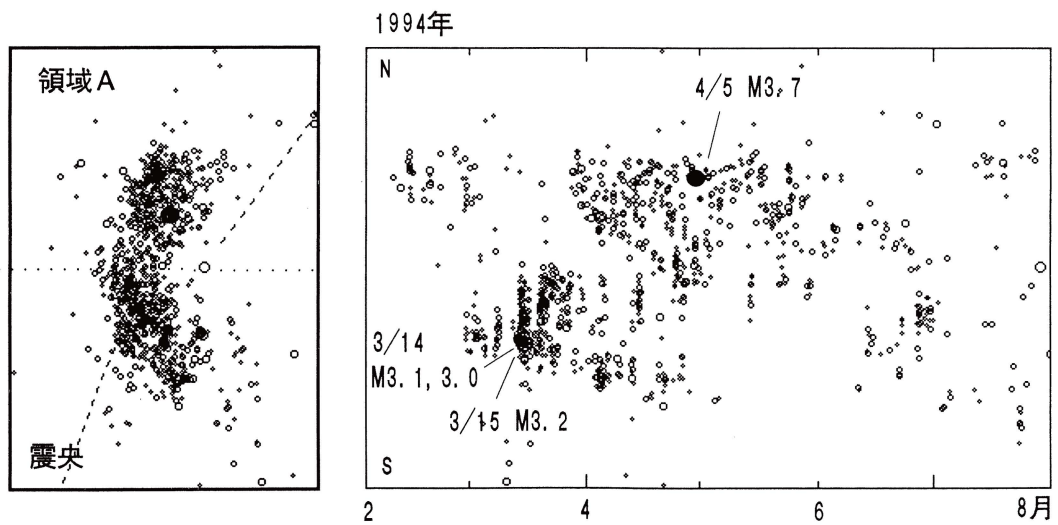


図 15-b. 領域 A の南北方向の時空間分布図。期間は 1994 年 2 月～7 月。群発活動は内ノ籠断層の折れ曲がり部分から発生し，2 つの部分に分かれて，相補的に活動している。

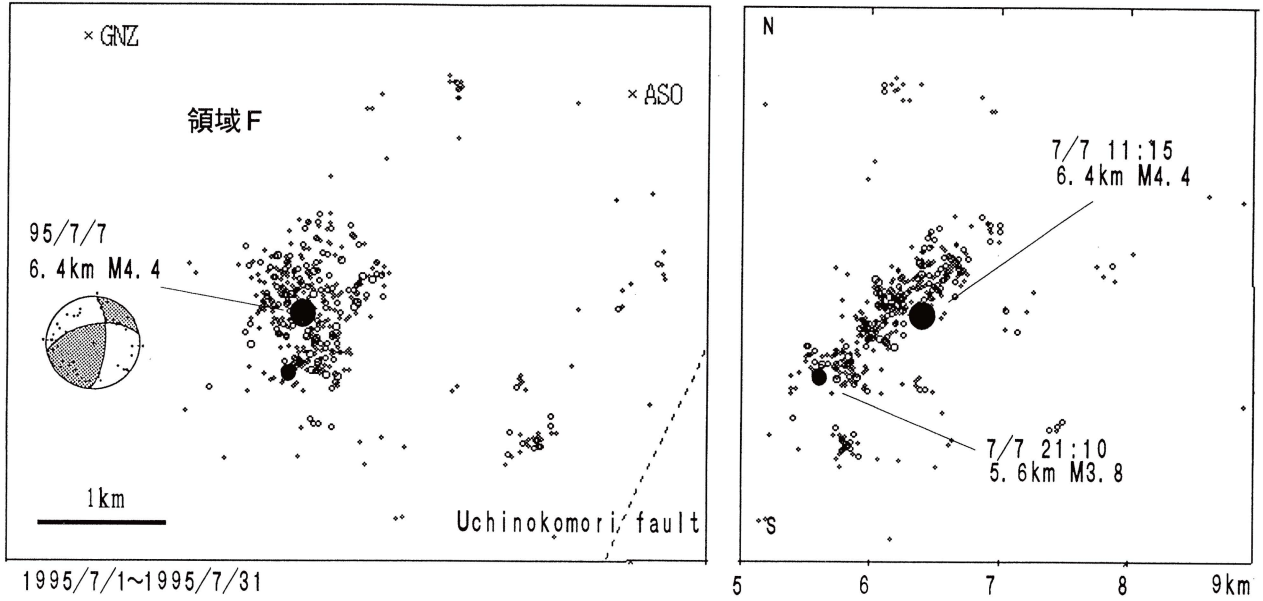


図 16-a. 領域Fの震源分布図（平面図，南北断面図）と発震機構解（1995/7/7 11 h15 m, d=6.4 km, M4.4）. 期間は1995年7月1日～7月31日. 余震分布は北に40°傾き下がる長さ約1.5 kmで厚さが約500 m位の面状に分布している.

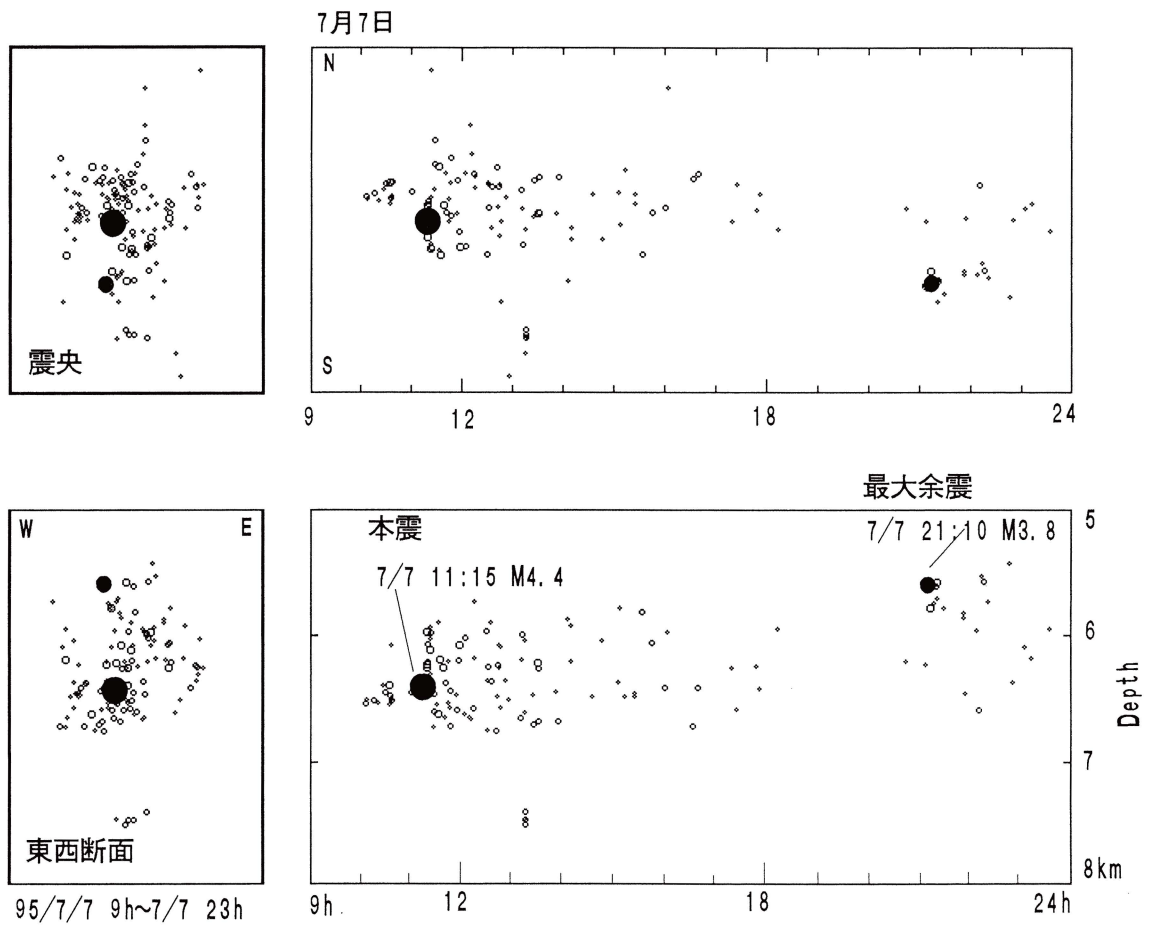


図 16-b. 領域Fの南北方向と東西断面の時空間分布図. 期間は1995年7月7日9h～24h. 前震-本震-余震型の活動をしている.

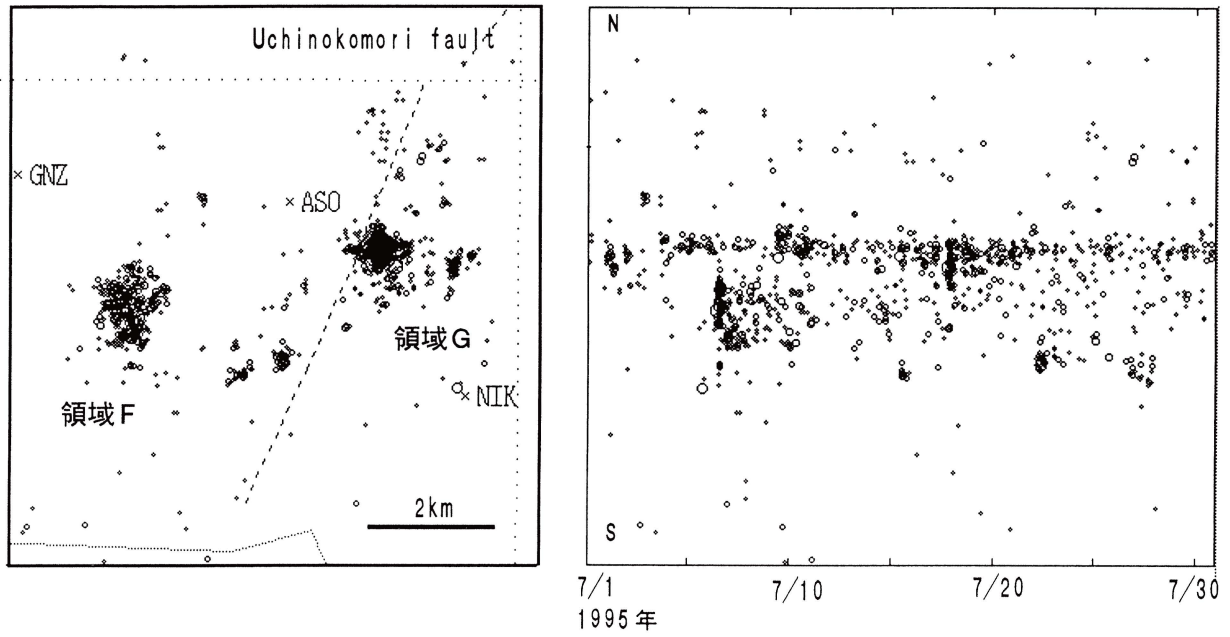


図 17-a. 領域 F, G の時空間分布図. 期間は 1995 年 7 月 1 日～7 月 31 日. 領域 G の活動は領域 F の活動がほぼ収束した 1995 年 7 月 10 日頃より活発になり, その後何度も同じ場所で小活動を起こしている.

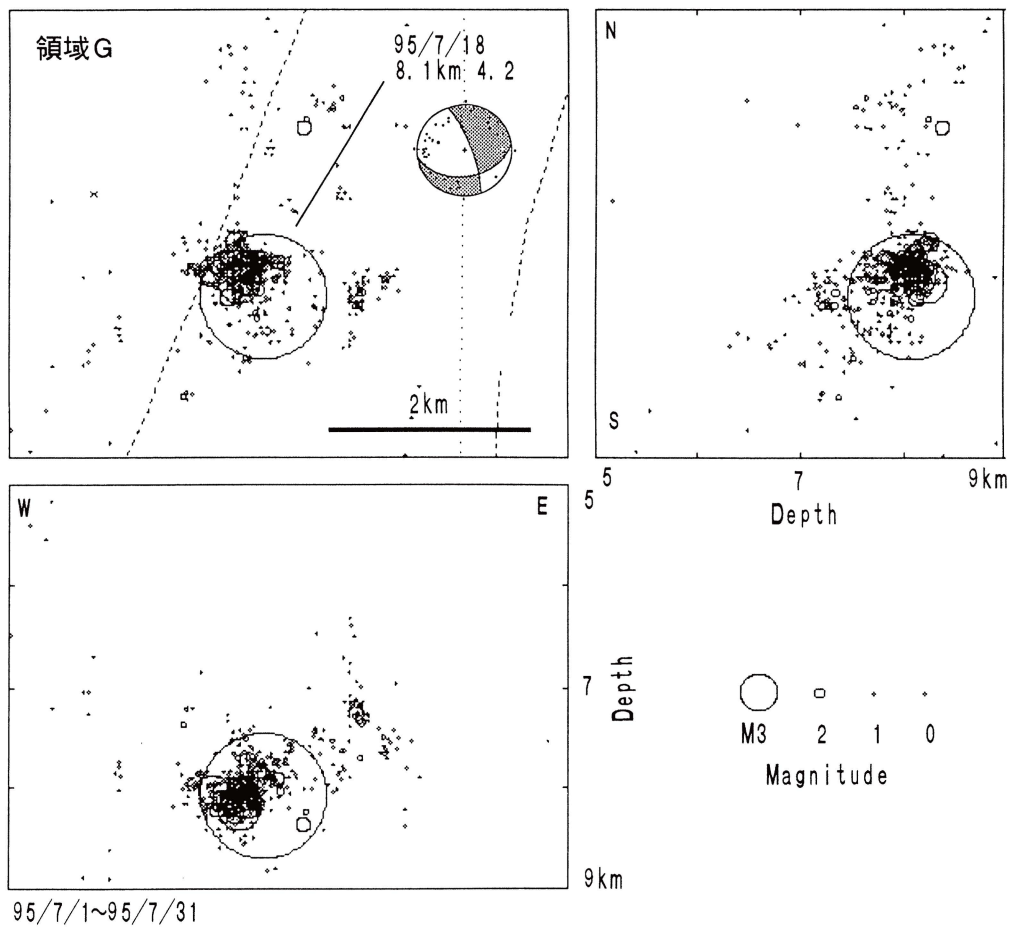


図 17-b. 領域 G の震源分布図 (平面図, 東西, 南北断面図) と発震機構解 (1995/7/18 20 h13 m,  $d=8.1$  km,  $M4.2$ ). 7 月 18 日 20 時 13 分に最大地震が発生した.



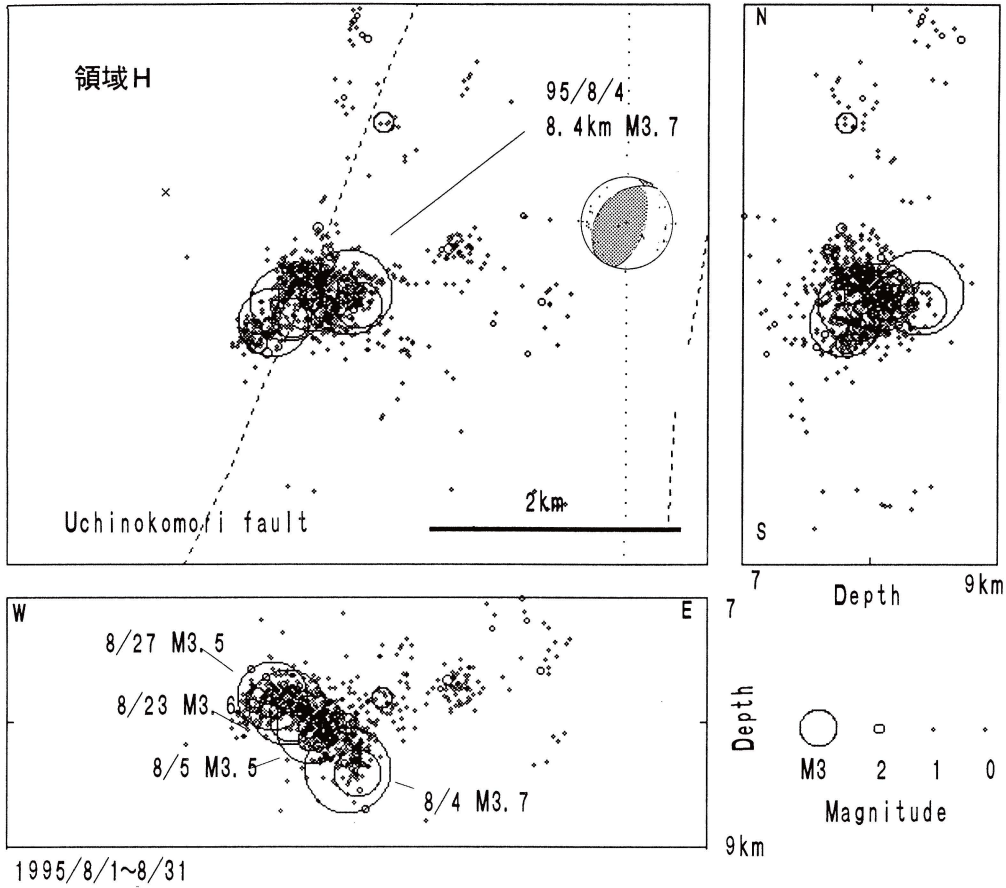


図 18-a. 領域Hの震源分布図（平面図，東西，南北断面図）と発震機構解（1995/8/4 17h18m, d=8.4km, M3.7）。期間は1995年8月1日～8月31日。震源域の東端の深さ8.4kmで8月4日にM3.7の地震が発生し，その後，震源が徐々に浅くなりながら東から西に向かって移動し，8月27日に深さ7.8kmでM3.5の地震が発生して活動は収束に向かった。

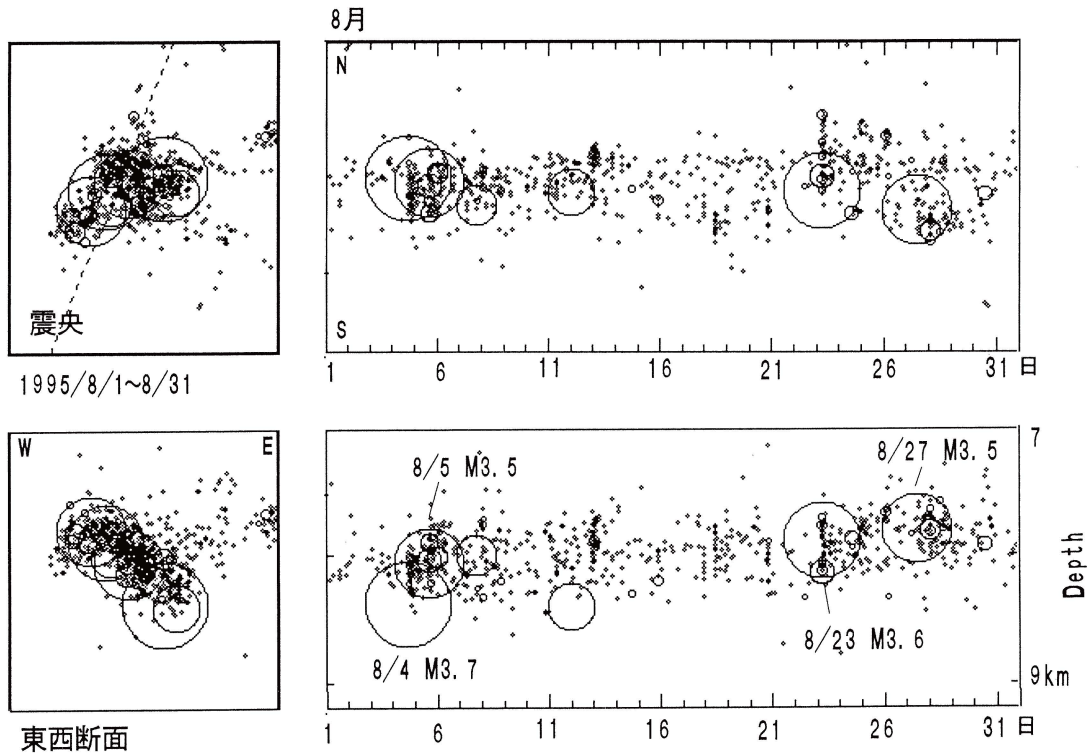


図 18-b. 領域Hの南北方向と東西断面の時空間分布図。期間は1995年8月1日～8月31日。地震発生領域は西へ向かって30°位の角度で浅くなる面状の領域で，長さは約1kmで約500mの幅がある。

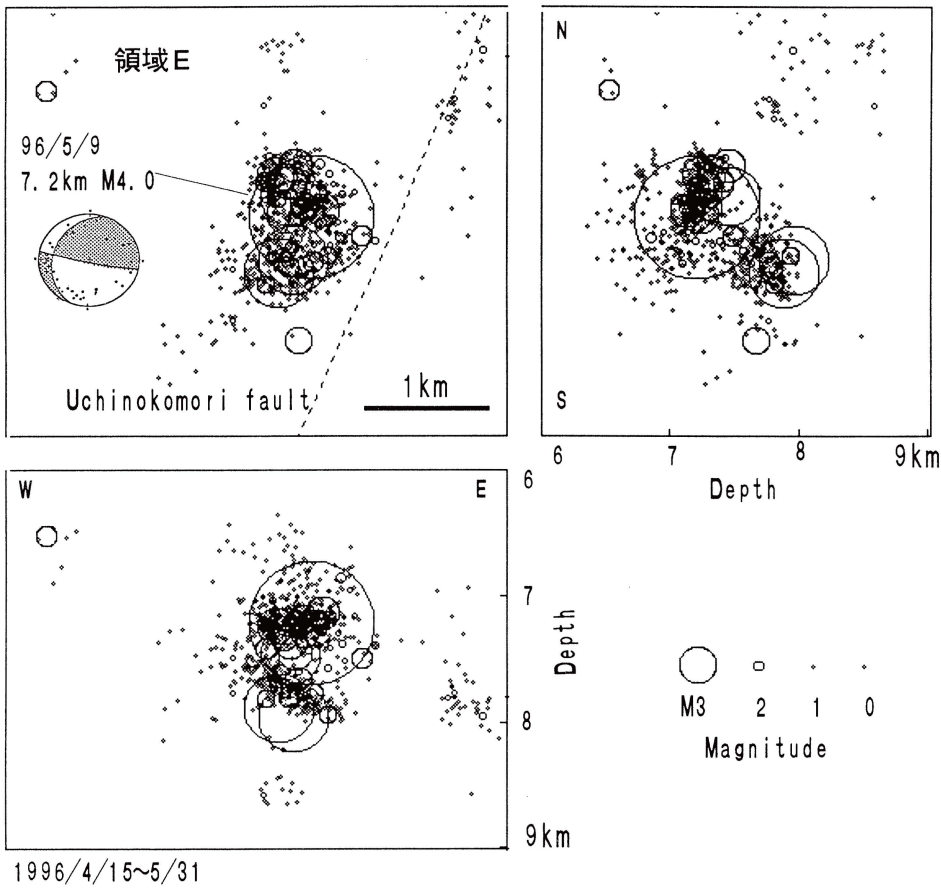


図 19-a. 領域 E の震源分布図 (平面図, 東西, 南北断面図) と発震機構解 (1996/5/9 3h9m, d=7.2km, M4.0). 期間は 1996 年 4 月 15 日~5 月 31 日. この活動は浅部と深部の 2 つに分かれ, 浅部は北へ傾斜してやや深くなり, 深部は東へ傾き下がっている.

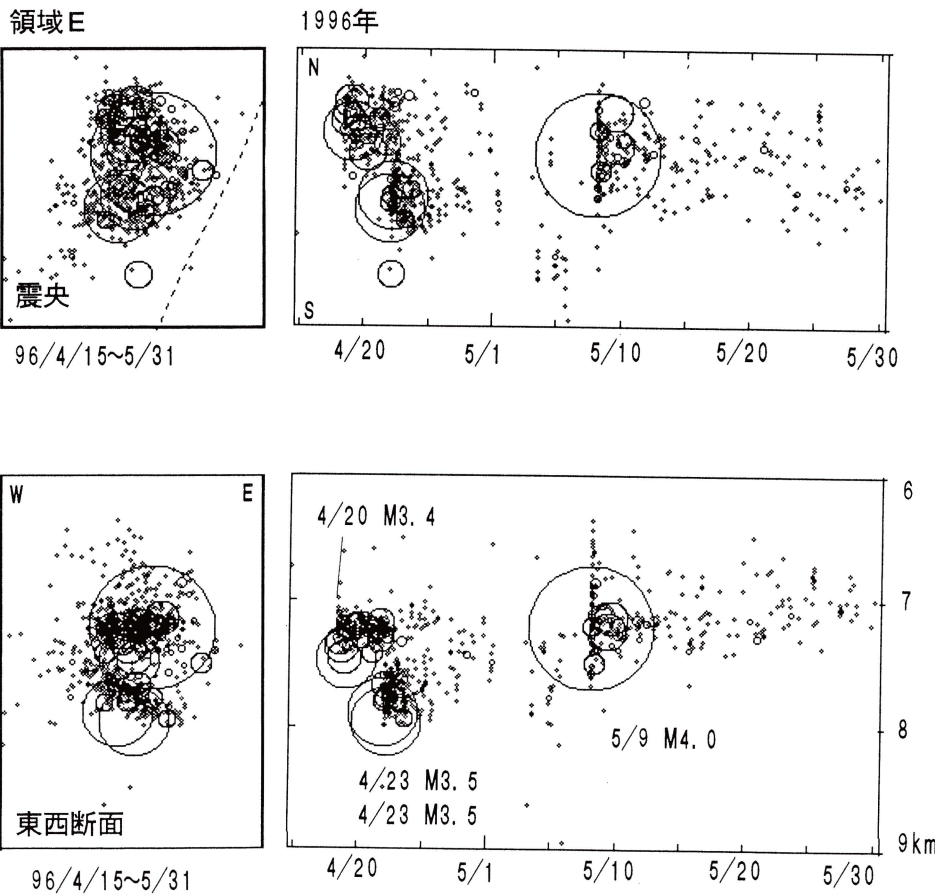


図 19-b. 領域 E の南北方向と東西断面の時空間分布図. 期間は 1996 年 4 月 15 日~5 月 31 日. 4 月 19 日より浅部が活動し, 4 月 23 日に深部に移り, 4 月末には収束していたが, 5 月 9 日 3 時 9 分に深さ 7.2 km で M4.0 のこの活動の最大地震が浅部で発生した. この最大地震は浅部の震源域全部を覆っている.

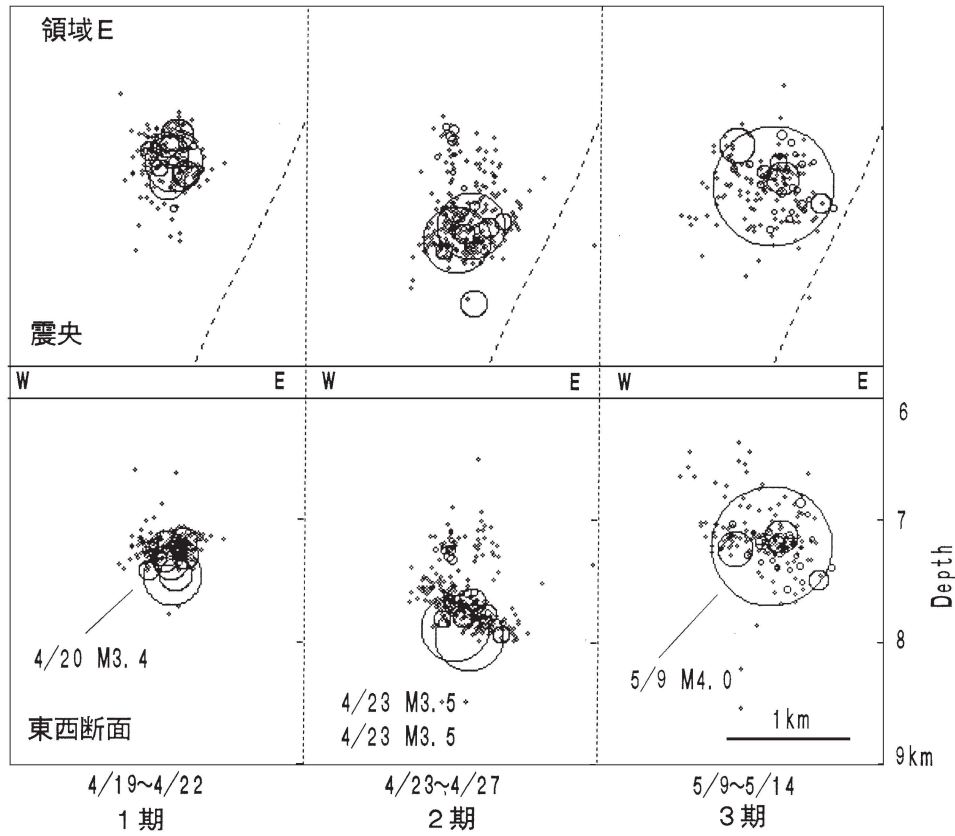


図 19-c. 領域 E の 3 つの期間毎の震央と東西断面図. 1 期: 微小な地震がこの小活動域の浅部で発生し, 4 月 20 日 0 時 6 分に深さ 7.5 km で M3.4 の地震が発生して活動は収束した. 2 期: 地震は深部の活動域に移った. 4 月 23 日に M3.5 の 2 つの地震が発生した. 余震域は東へ向かって 30°傾き下がる面状の領域にある. 3 期: 1, 2 期の活動が収束した後, 5 月 9 日 3 時 9 分に M4.0 の最大の地震が浅部の東南端で発生した.

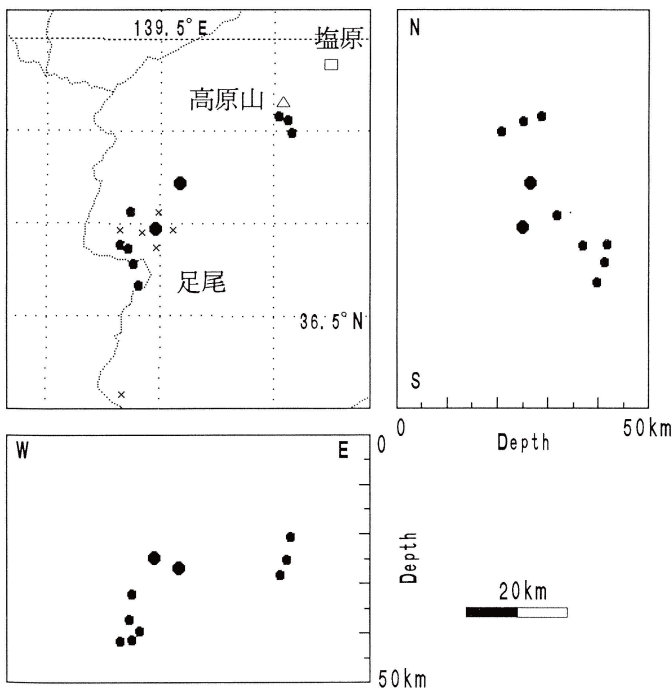


図 20-a. 定常観測で得られた日光周辺地域の低周波地震の震源分布図. 1993 年 11 月～1997 年 1 月. 中央が平面図, 右側が南北鉛直断面図, 下側が東西鉛直断面図. 震央は足尾地域と高原山付近にあり, 高原山付近の震源は 22～30 km に分布し, 足尾地域では 25～41 km に分布している.

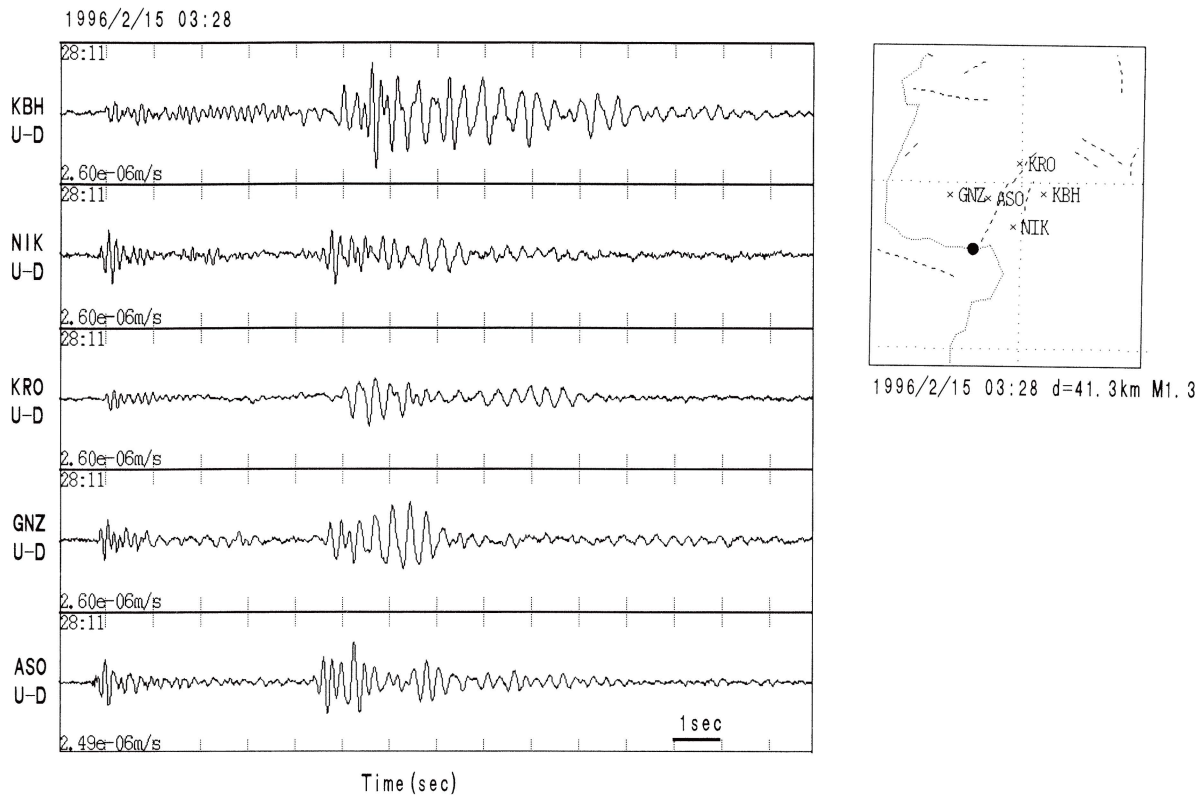


図 20-b. 足尾地域の低周波地震の波形例 1 (1996/2/15 08 h28 m,  $d=41.3$  km,  $M1.3$ ). 横軸は時間 (単位; 秒), 縦軸は振幅 (単位; m/s) で, 各波形の枠の幅が左下の速度を示す. 枠の左上の 28:11 は 28 m11 s で波形表示開始時間を示す. 2~4 Hz の卓越周波数を持つ.

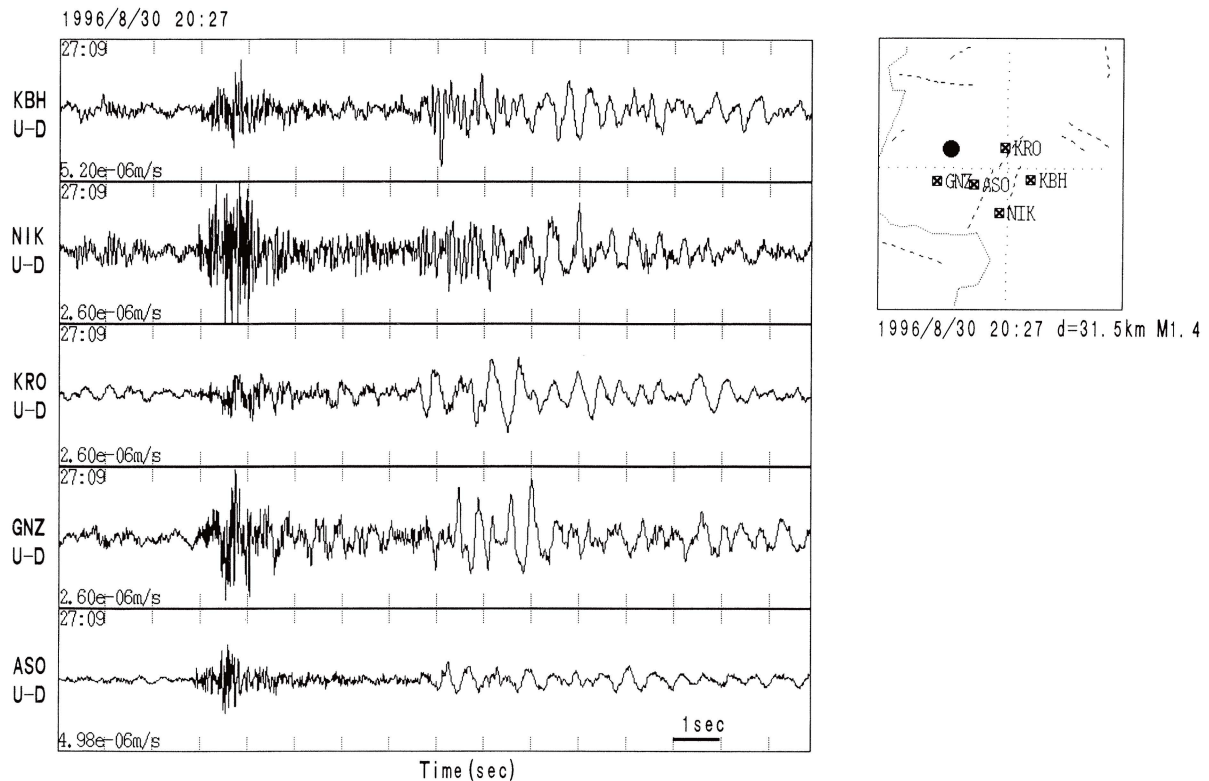


図 20-c. 足尾地域の低周波地震の波形例 2 (1996/8/30 20 h27 m,  $d=31.5$  km,  $M1.4$ ). 横軸は時間 (単位; 秒), 縦軸は振幅 (単位; m/s) で, 各波形の枠の幅が左下の速度を示す. 枠の左上の 27:09 は 27 m09 s で波形表示開始時間を示す. 初動部分は短周期成分が低周波の上に重なっている.

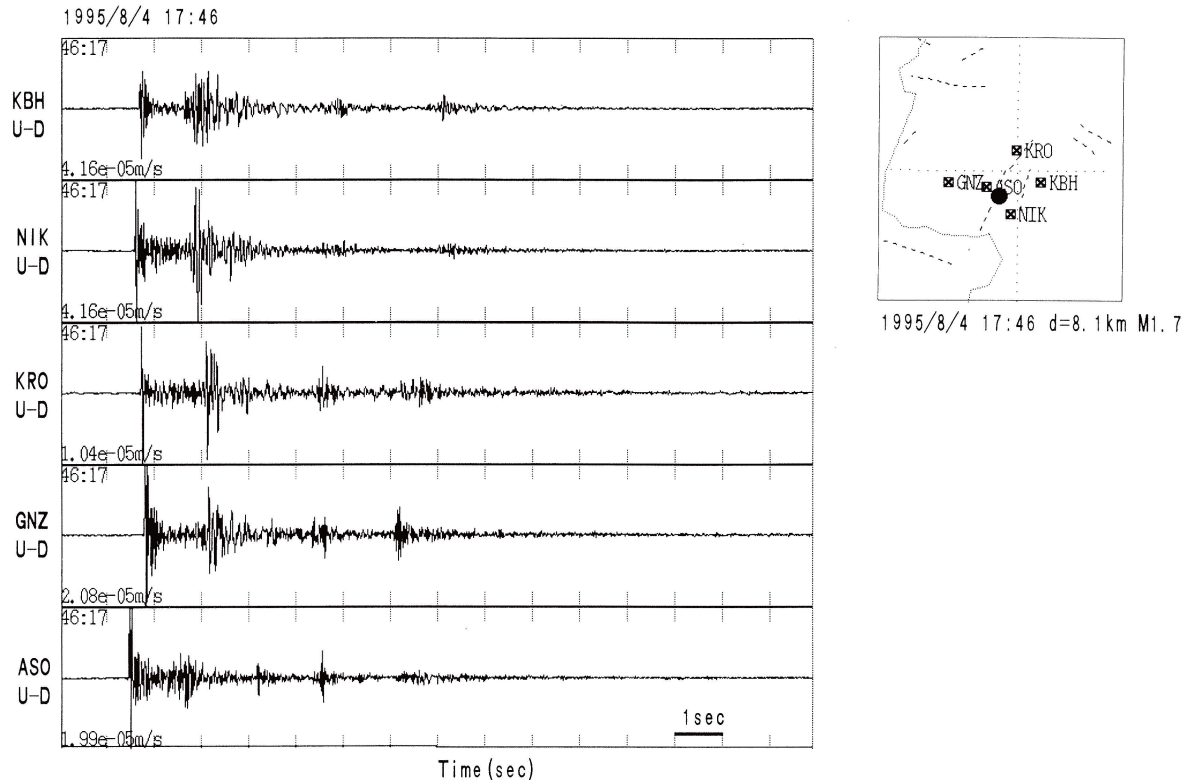


図 20-d. 足尾地域の通常の地震の波形例 (1995/8/4 17h46 m,  $d=8.1$  km,  $M1.7$ ). 横軸は時間 (単位: 秒), 縦軸は振幅 (単位: m/s) で, 各波形の枠の幅が左下の速度を示す. 枠の左上の 46:17 は 46m17s で波形表示開始時間を示す. P, S 波の後ろに明瞭な反射波が見られる.

る.

1. この地域の地震活動域は大きく分けると足尾地域, 皇海山周辺, 中禅寺湖南西, 中禅寺湖以北の 4 つの地域に分かれる. 4 つの地域では震源の深さの下限が異なっており, 足尾地域が最も深く 7~9 km で, 中禅寺湖南西では 3~6 km の深さ, 皇海山地域では 8 km を下限とし, 多くの地震は 4~5 km に集まっている. 中禅寺湖以北では 4 km より浅い地震が起きている.
2. この期間で観測された地震は 26,017 個で, 最大のマグニチュードは  $M4.4$  で最小のものは  $M(-0.4)$  であった. 大部分の地震は  $M0.0\sim1.0$  の極微小地震である.
3. 日光白根山の直下では 1995 年の 4 月から 10 月に深さ 3 km 位の浅い地震が連続して発生した. この地震は 2~3 Hz の卓周波数の波に短周期成分が重なっていて, 通常地震より長い継続時間を持っている. 初動の部分は短周期成分になっている. この期間は日光・足尾地域全体が最も活動的になった時期に一致する.
4. この期間では足尾地域の活動が最も活発であった. 1994 年 2 月より地震数が増えて, 1995 年の 7 月に活動のピークを持ち, 1995 年の末に一度活動が低下した後に 1996 年の 5 月に再度活発になり, その後は低下している.
5. 1994 年 2 月から起きた内ノ籠断層沿いの活動は断

層の折れ曲がり部分から発生した. いくつもの小群発地震活動を繰り返しながら断層のリニアメントに沿って北から南に移動し, その後西南西-東北東の活動となって震源域を拡大させ, 拡散した. 3 年かけてほぼ  $10\times3$  km の地域を埋め尽くした.

6. ひとつひとつの小群発活動域は多少重なり合うものの, 空間的にも, 時間的にも異なっており, それぞれが特徴ある活動をしている. 小群発活動は其中でさらに小さな地震群からなっている.

7. 一連の群発地震の中に  $M4$  級の地震もあり, それらは本震-余震型の活動をする. その余震分布は面状になるものが観測された. 一方で, 本震-余震型の様な大きな規模の地震群ではなく, だらだら続く群発活動の震源分布も面状になっている場合がある.

8. 足尾地域では震源の深さは 7~9 km がほとんどを占めるが, その震源は内ノ籠断層の走向に沿って細長く, 断層のリニアメントの東側に  $8\times2$  km の面積で密集している. この密集域の周辺には 5~7 km の深さの地震が起きる領域があり, 東の古峰原に向かう地震群は密集域からしだいに浅くなる薄い領域にある. 西の銀山平に向かう地震群は南西から北東に向かって浅くなる線状に配列しながら, 全体としては北西に浅くなる帯状の領域を作ってい

る。密集域の東端で活動のパターンが変わり、西側は0~7 kmの地震が多くの小領域で起きているが東側は少ない。密集域の縁には、2~4 kmの浅い震源と、9~12 kmの深い地震の領域が点在する。

9. モホ面付近の低周波地震が観測された。震央は足尾地域と塩原近くの高原山付近にある。それらの震源の深さは22~41 kmでM1.3~2.5の範囲であった。

謝辞：この報告書をまとめるに当たり、地震地殻変動観測センターの武尾実助教には多くの助言と指導をいただきました。ここに感謝とお礼をいたします。酒井慎一博士には本文を読んでいただき、多くの有用な助言とかつ図面の制作を手伝っていただきました。感謝とお礼をいたします。いつも日光の観測を支えてくれている地震地殻変動観測センターの萩野泉氏、卜部卓助教授に深く感謝いたします。また日光・足尾の地震観測に際して、日光、黒沢、足尾観測点では大間々営林署に、古峰原観測点では古峰神社に、銀山平観測点ではかじか荘、足尾町役場に大変お世話になっています。ここを借りてお礼申し上げます。

## 文 献

- Hirata, N. and M. Matsu'ura, 1987, Maximum-likelihood estimation of hypocenter with origin time eliminated using nonlinear inversion technique, *Phys. Earth Planet. Interiors*, **47**, 50-61.
- 平田直・吉原俊博・卜部卓・飯高隆・酒井慎一, 1995, 1993年合同観測による日光周辺域の地殻内地震波反射面, 月刊地球, **17**, 102-105.
- 岩瀬良一・卜部卓・勝俣啓・森谷正義・中村功・溝上恵, 1989, 微小地震反射波で検出された福島県南西部の地殻内溶融体, 地震学会講演予稿集, No. 1, 185.
- 活断層研究会編, 1991, 新編 日本の活断層, 東京大学出版会, 437頁.
- 神沼克伊・津村建四朗・松本英照・唐鎌郁夫, 1970, 古峰ヶ原における極微小地震観測—1969年8月13日の地震の余震観測—, 地震研究所彙報, **48**, 53-63.
- 松本聡・津村紀子・岡田知己・長谷川明, 1995, 日光周辺域における地震波トモグラフィ, 月刊地球, **17**, 81-84.
- 溝上恵, 1980, 微小地震反射波の観測と溶融体をとまなう地殻深部不連続面の検出, 地震研究所彙報, **55**, 705-735.
- Mizoue, M., I. Nakamura, and T. Yokota, 1982, Mapping of an Unusual Crustal Discontinuity by Microearthquake Reflections in the Earthquake Swarm Area near Ashio, Northwestern Part of Tochigi Prefecture, Central Japan, *Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo*, **57**, 653-686.
- 西富一平・武尾実, 1996, 栃木県西部地域モホ面付近に発生する低周波地震の活動とその発震機構, 火山, **41**, 43-59.
- 萩野泉, 1974, 栃木県足尾地域の微小地震について, 地震研究所研究速報, **12**, 159-169.
- 岡田知己・松澤暢・松本聡・河野俊夫・仁田交市・長谷川昭・伊東明彦・藤田英輔・小原一成・笠原敬司・小菅正裕, 1997, 日光白根山付近に発生した微小地震と孤立型微動のモードテンソルインバージョン, 地震, **50**, 37-48.
- Tsukada, S., 1995, Analysis of shear wave splitting by using high density seismic array data —A quantitative study of anisotropy in the upper crust—, 博士論文, 東京大学.
- 東京大学地震研究所地震地殻変動観測センター, 1994a, 関東甲信越地方における地震活動(1993年11月~1994年1月), 地震予知連絡会会報, **52**, 119-126.
- 東京大学地震研究所地震地殻変動観測センター, 1994b, 関東甲信越地方における地震活動(1994年2月~1994年4月), 地震予知連絡会会報, **52**, 127-131.
- 東京大学地震研究所地震地殻変動観測センター, 1995a, 関東甲信越地方における地震活動(1994年5月~1994年7月), 地震予知連絡会会報, **53**, 206-216.
- 東京大学地震研究所地震地殻変動観測センター, 1995b, 関東甲信越地方における地震活動(1994年8月~1994年10月), 地震予知連絡会会報, **53**, 217-232.
- 東京大学地震研究所地震地殻変動観測センター, 1995c, 関東甲信越地方における地震活動(1994年11月~1995年1月), 地震予知連絡会会報, **54**, 172-186.
- 東京大学地震研究所地震地殻変動観測センター, 1995d, 関東甲信越地方における地震活動(1995年2月~1995年4月), 地震予知連絡会会報, **54**, 187-203.
- 東京大学地震研究所地震地殻変動観測センター, 1996a, 関東甲信越地方における地震活動(1995年5月~1995年7月), 地震予知連絡会会報, **55**, 122-139.
- 東京大学地震研究所地震地殻変動観測センター, 1996b, 関東甲信越地方における地震活動(1995年8月~1995年10月), 地震予知連絡会会報, **55**, 140-149.
- 東京大学地震研究所地震地殻変動観測センター, 1996c, 関東甲信越地方における地震活動(1995年11月~1996年1月), 地震予知連絡会会報, **56**, 124-136.
- 東京大学地震研究所地震地殻変動観測センター, 1996d, 関東甲信越地方における地震活動(1996年2月~1996年4月), 地震予知連絡会会報, **56**, 137-151.
- 東京大学地震研究所地震地殻変動観測センター, 1997a, 関東甲信越地方における地震活動(1996年5月~1996年7月), 地震予知連絡会会報, **57**, 157-171.
- 東京大学地震研究所地震地殻変動観測センター, 1997b, 関東甲信越地方における地震活動(1996年8月~1996年10月), 地震予知連絡会会報, **57**, 172-187.
- 東京大学地震研究所地震地殻変動観測センター, 1997c, 関東甲信越地方における地震活動(1996年11月~1997年1月), 地震予知連絡会会報, **58**, 77-89.
- 植平賢司, 1995, 高密度アレイを用いた日光・足尾地域の散乱体のイメージング, 修士論文, 東京大学.
- 卜部卓・東田進也, 1992, WIN-微小地震観測波形験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, No. 2, 331.
- 卜部卓, 1994, 多チャンネル地震波形データのための共通フォーマットの提案, 地震学会講演予稿集, No. 2, 384.
- 卜部卓・酒井慎一・萩野泉・酒井要・小林勝・羽田敏夫・橋本信一・萩原弘子, 1995, 地震研の新しい関東甲信越地震観測網, 地震学会講演予稿集, No. 2, A 25.
- 宇津徳治, 1984, 地震学, 共立出版, 310頁.
- 吉原俊博, 1996, 高密度アレイデータを用いた日光・足尾地域の地震波反射面の解析, 修士論文, 東京大学.