

## 4 - 12 伊東沖群発地震活動に前駆する傾斜変動

### Tilt change preceding to earthquake swarms off Ito, central Japan

防災科学技術研究所

National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

伊豆半島東方沖では、ここ 20 年近くにわたって活発な群発地震活動が間欠的に繰り返されており<sup>1)</sup>、海底噴火のあった 1989 年以降は、主として伊東沖を震源域とする群発地震活動が続いている。第 1 図は、伊東沖から半径 50km 以内の観測点のみを用い、観測点補正値を加えて再決定した震源による、1989 年 5 月以降最近 9 年間の群発地震(深さ 30km 未満)の震央分布、および図中に示す矩形領域 A B 内の地震の時空間分布を示す。活動は一般にバースト的であるが、1997 年 7 月以降は伊東港に近い場所で慢性的な地震活動が見られる。下段は M 2 以上の地震の分布であり、記入された主要イベント 8 件の活動域は、その都度異なっている。なお、図中の二重丸印は伊東観測点の位置を示す。

第 2 図上段は、伊東観測点のテレメータ化がなされた 1989 年 7 月 18 日以降約 9 年間における傾斜及び 2 日間毎の地震回数の時系列を示す。また、同図下段は、1989 年 7 月 18 日を原点とする、伊東観測点のベクトル傾動図を示す。なお、ここには、現地記録に基づく 1989/5/1 ~ 7/18 のベクトル傾動図<sup>2)</sup>も書き加えられている。観測開始以来 1997 年まで続いていた東南東下がり傾動は、1997 年以降、北西下がり傾動に転じている。同図で、傾斜速度が早くなっている箇所は大規模な群発地震活動に伴う急速な傾斜変化に対応しているが、その傾動方向は、1996 年までは東南東下がり、その後の 2 ケースは北西下がりとなっている。第 3 図は、この理由を定性的に説明したものである。図左上は、開口断層による地表上下変動の様子を模式的に示しており、ソースと観測点との位置関係により様々な傾斜変化が期待される。図右上および右中は、1989 年に生じた群発地震活動に対して、断層面上端の深さ  $d$  と、伊東観測点で期待される傾斜ベクトルとの関係を示したものである<sup>2)</sup>。伊東観測点では、岩脈貫入が深い内は北東傾斜、浅くなると南東傾斜を生じることがわかる。次に、図左中に示す 1989 年 7 月 18 日以後の震央分布に沿って、西側と東側に各々 3km の長さの垂直開口断層を仮定し、上記モデル化と同様の考察を行なうと、伊東観測点では同図下段のような傾斜変化が期待される。岩脈貫入が深い内はいずれも北北東傾斜を示すが、浅所への貫入が西側で生じた場合は東傾斜に、東側で生じた場合は西傾斜に転じる。

次に、群発地震活動の開始する前後における傾斜変化に注目する。第 4 図左上は 1997 年 3 月の群発地震開始前 1 週間の伊東観測点における傾斜変化と毎時地震回数を示す。また、同図中段は、2 月 27 日 06 時から 24 時間毎のベクトル傾動図を 4 日分描いたものである。同図右上に示すように、伊東観測点のすぐ北側は東北東 - 西南西走向の海岸となっており、常時は、これに直交する方向に、海洋潮汐の荷重による規則的な傾斜変動が生じている。しかし、3 月 2 日 06 時からのベクトル傾動図では、同日 16 時頃より北東下がり傾動がこれに重畳し、その後 7 ~ 8 時間を経過した 3 月 3 日 01 時より群発地震が始まっている。これと同様の前駆的地殻変動は、同図左下の東伊豆における体積歪記録(気象庁)<sup>3)</sup>、及び同図右下の新井における地殻活動総合観測装置による傾斜記録(東大震研)<sup>4)</sup>にも現われている。

第5図は、1998年4月の群発地震活動時における同様の解析結果を示す。ここには、伊東(ITO)観測点のほか、近接する岡(OKA)・徳永(TNG)両傾斜観測点の記録も示されている。岡・徳永は内陸に位置するため、伊東に比べ潮汐成分の振幅は小さい。群発地震は4月20日16時頃より始まっているが、同日朝方より伊東では北東下がり、岡では北西下がり、徳永では西下がり傾斜変化が見られ、群発地震発生に半日ほど先行して前駆的傾斜変動が生じていたことがわかる。同図右上には、潮汐補正を施した伊東観測点のベクトル傾動図(気象庁作図)が示されているが、4月20日の明け方より傾斜ベクトルは北北東へ動き始め、群発地震開始に数時間先行する同日12時には、傾斜変化が0.1マイクロラジアンを超えて、はっきりとした異常を示している。

本会報の別報告に示す通り、群発地震開始後の4月21日18時頃には、地震活動の沖合浅部への移動に呼応して、伊東・岡両観測点の傾斜は大きく西方向に転じている。第6図は、各観測点における傾斜の空間分布とその時間変動の原因を、開口断層モデルにより定性的に説明したものである。同図上段は、岩脈貫入が伊東観測点のすぐ北側の深いところに生じた状態(群発地震開始前および開始直後)を示しており、伊東(ITO)では北北東傾斜、岡(OKA)では北北西傾斜、徳永(TNG)・中伊豆(JIZ)ではほぼ西傾斜となる。ところが、同図下段に示すように、岩脈貫入が沖合いの浅いところに移ると(4月21日18時以降)、伊東は北西傾斜、岡は西傾斜に転じることがわかる。

さて、前報<sup>1)</sup>に述べた通り、伊東観測点においては、1989年3月の傾斜計設置以来、伊東沖で繰り返された10例あまりの群発地震活動に対して、必ずと言ってよいほど顕著な傾斜変動を記録している。第7図(a)~(l)は、このような過去の伊東沖群発地震活動のエポックを遡って、前駆的な傾斜変化があったかどうかを系統的に調べたものである。左側には各エポックの全体像が、また右側には群発地震開始前後の様子が示されており、海底噴火を伴った同図(k)のエポック8907の全傾斜に対するスケールを除くと、すべての図について表示期間やスケール等は同一にしてある。具体的には、左側に群発地震を含む1ヶ月間の震央分布と毎時地震回数、及び伊東観測点におけるベクトル傾動図が、また右側には、群発地震開始前1週間の傾斜変化時系列と毎時地震回数、及び6日分の24時間毎のベクトル傾動図が示されている。同図(a)は最新のエポック9804に対する図であるが、地震データの未処理期間を含んでいるため、全体の震央分布および毎時地震回数は「歯抜け」状態となっている。また、同図(k)のエポック8907、及び(l)のエポック8905については、現地収録データに基づいて傾斜変化を復元しているため、同図(a)~(j)に比べて傾斜データの質は劣っている。これらの図を眺めると、群発地震の規模が大きく、これに伴う全体としての傾斜が数マイクロラジアンを超えるような場合には、はっきりと前駆的な傾斜変化が認められることがわかる。

第8図は、1989年以降の伊東沖群発地震の各エポックに対する震央分布と、伊東観測点において観測された群発地震に伴う傾斜変化、及び前駆的傾斜変化の出現の様子をまとめたものである。このうち、エポック9402は震源域がはるか南の城ヶ崎沖であったため、群発地震に伴う傾斜変化の見出されなかった唯一の例となっている。一方、前駆的傾斜変化は、一般に群発地震の規模が大きい場合にのみ出現し、その先行期間は数時間から半日である。このような特徴は群発地震の発生予測にとって好ましいものであり、また、群発地震が大規模なものに発展するか、それとも小規模なまままで終わるかは、群発地震発生前に既に決まっていると言える。

例外的なケースとして、イベント8905は小規模な活動であったにも拘らず、前駆的傾斜変化が認

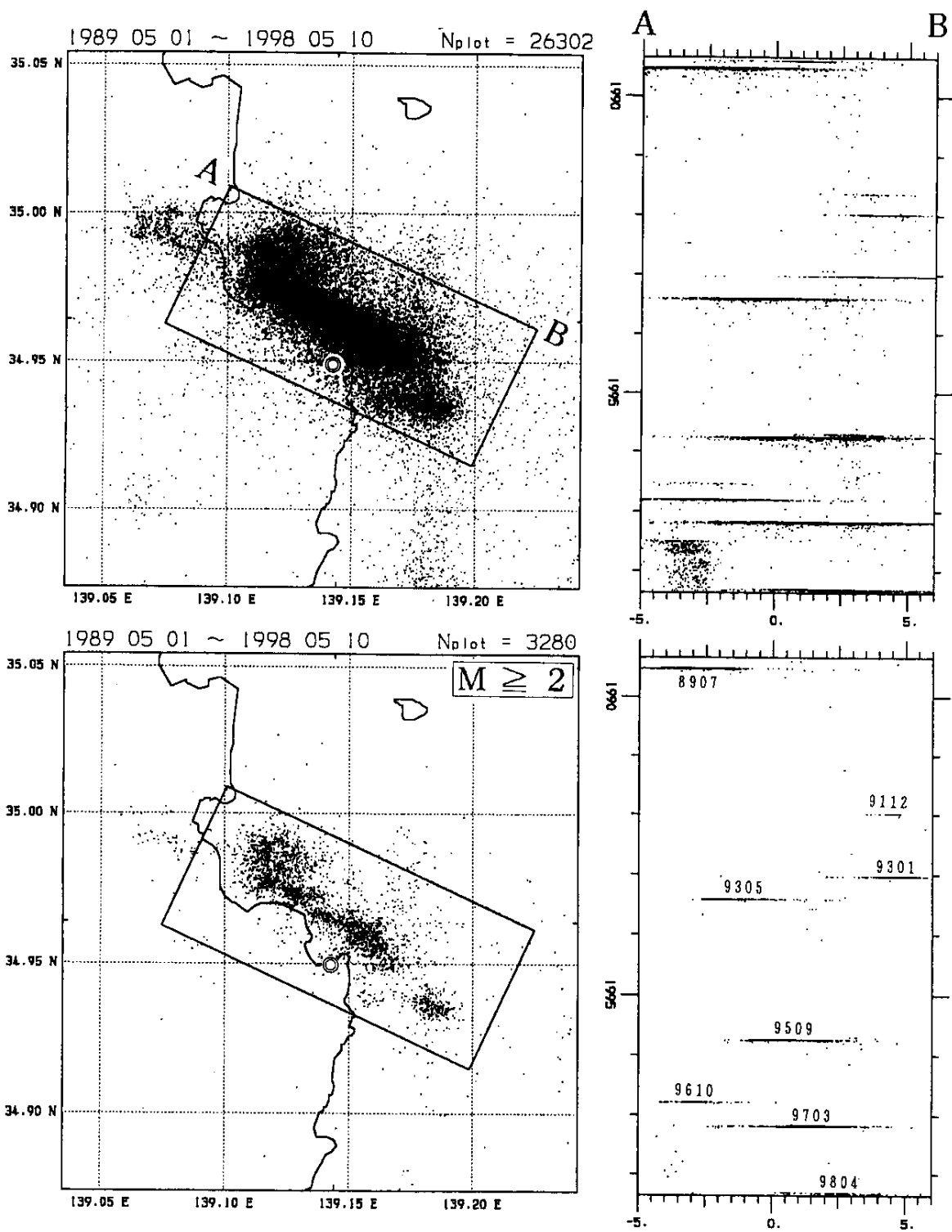
められているが、これは伊東観測点の直近で群発地震が発生したためと考えられる。また、イベント 9301 は比較的大規模な活動であったにも拘らず、前駆的傾斜変化が認められていない。この時の震源域は、第 1 図上段に示した全期間の震央分布において、川奈崎沖合のやや南に離れた孤立地震群に相当しており、伊東港沖から川奈崎に連なる地震群とは異なったメカニズムのものであった可能性がある。ただ、この活動に伴って記録された全体の傾斜は 1 マイクロラジアン足らずであり、前駆的傾斜変化は、あったとしても非常に小さかったと予想される。今回の解析は、原記録をそのままベクトル傾動図にして眺めただけであり、それでもなお、明らかな変化が見られる例しかピックアップしていない。今後は、潮汐補正を施した記録について、より詳細な解析を行う必要がある。

今回見出された前駆的傾斜変化の方向は、群発地震開始直後の傾動方向と一致しており、その発生メカニズムとしては、深部における岩脈貫入がもっとも考えやすい。一方、当地域における群発地震の発生は、深さ 8km くらいから始まり、その後急激に浅くなる性質をもつことが知られている。伊東周辺では 8km の深さで温度が 300 ~ 350 に達すると考えられており、ここに何らかの物性的に不連続的な性質があるために、岩脈貫入がこれより深いところにある内は地殻変動のみを生じ、この不連続層を突破して貫入が浅い所に進むと、群発地震の発生が始まるものと想像される。

(岡田義光)

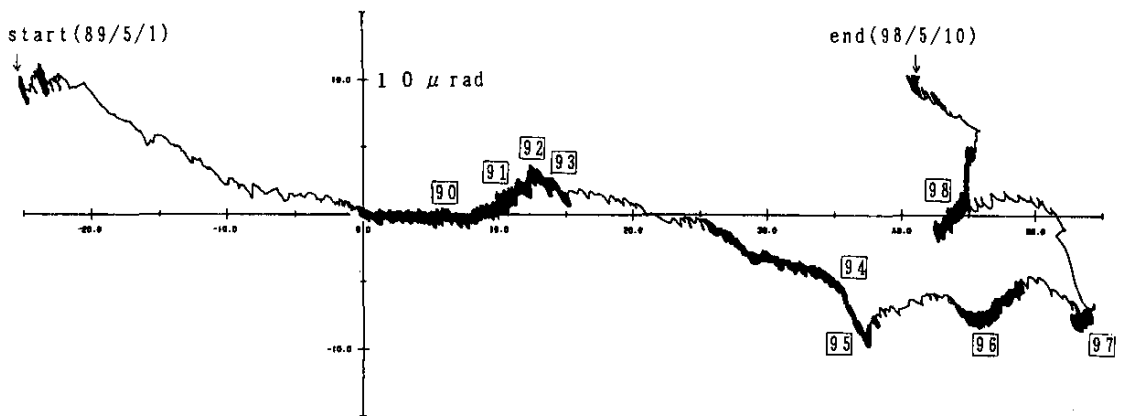
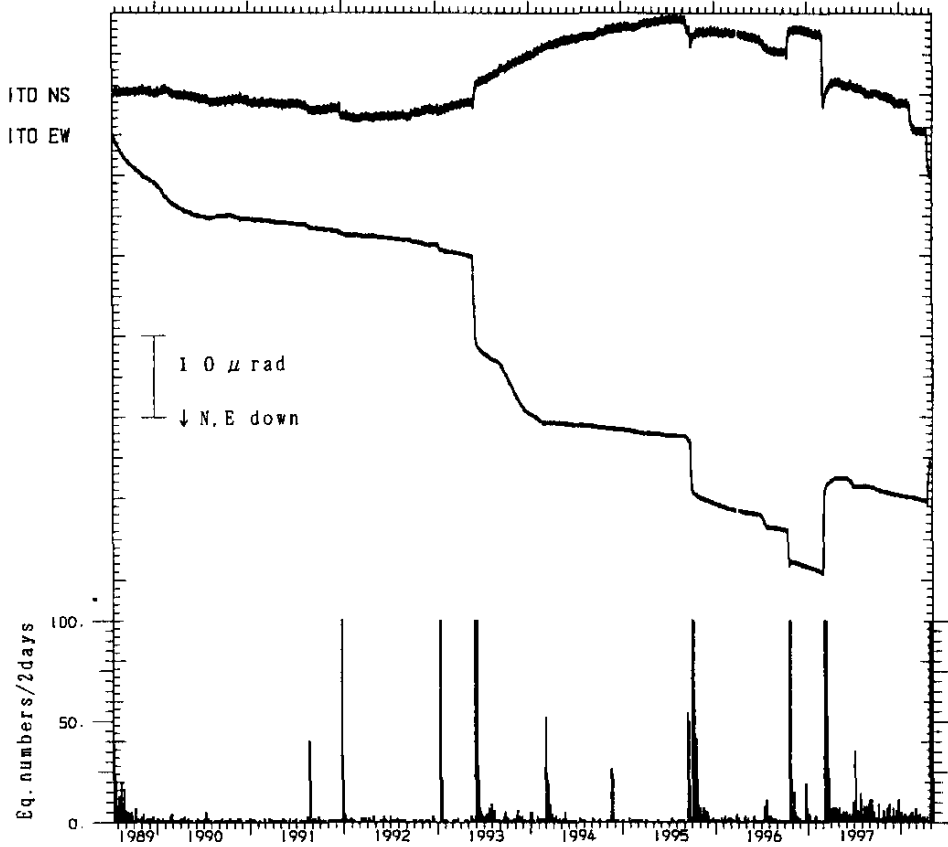
#### 参 考 文 献

- 1) 岡田義光(1997)：連絡会報，**58**，202-219.
- 2) Okada, Y. and E. Yamamoto(1991)： J.Geophys.Res., **96**, 10361-10376.
- 3) 気象庁地震予知情報課(1997)：連絡会報，**58**, 229-238.
- 4) 石井紘(1998)：月刊地球，号外 No.20，198-204.



第 1 図 再決定震源による，最近 9 年間の伊東沖群発地震活動の震央分布，および矩形領域内の地震の時空間分布（下段は  $M \geq 2$  の地震）。二重丸印は伊東観測点の位置を示す。

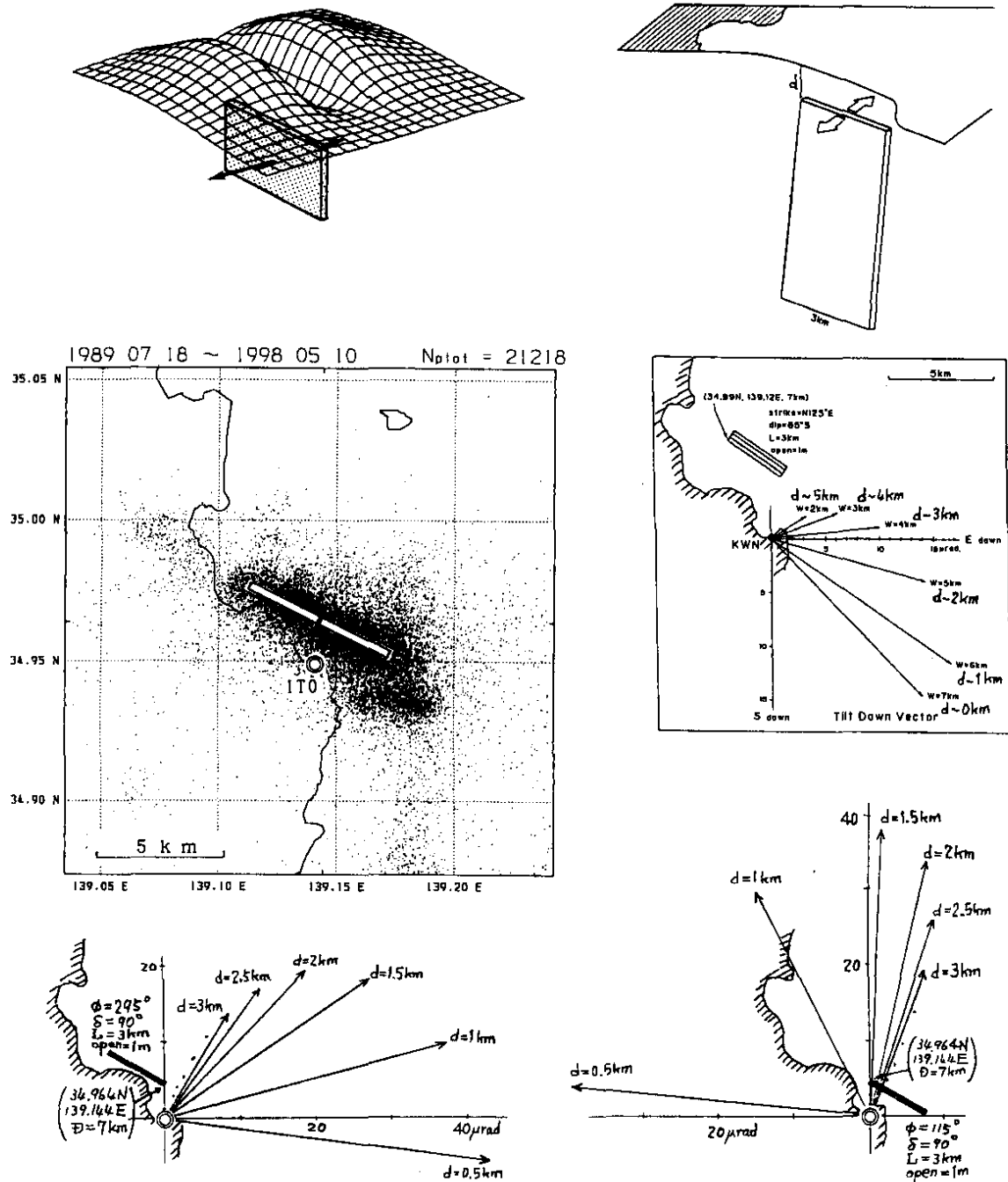
Fig.1 Epicentral distribution of relocated earthquake swarms off Ito in recent 9 years and space-temporal plot of the events in a rectangle region, AB. A double circle mark shows the location of ITO station. Those for major events with magnitude 2 or larger are shown at bottom.



第2図 (上)テレメータの開通した1989/7/18以降約9年間の伊東観測点の傾斜,及び2日間毎の地震回数の時系列。

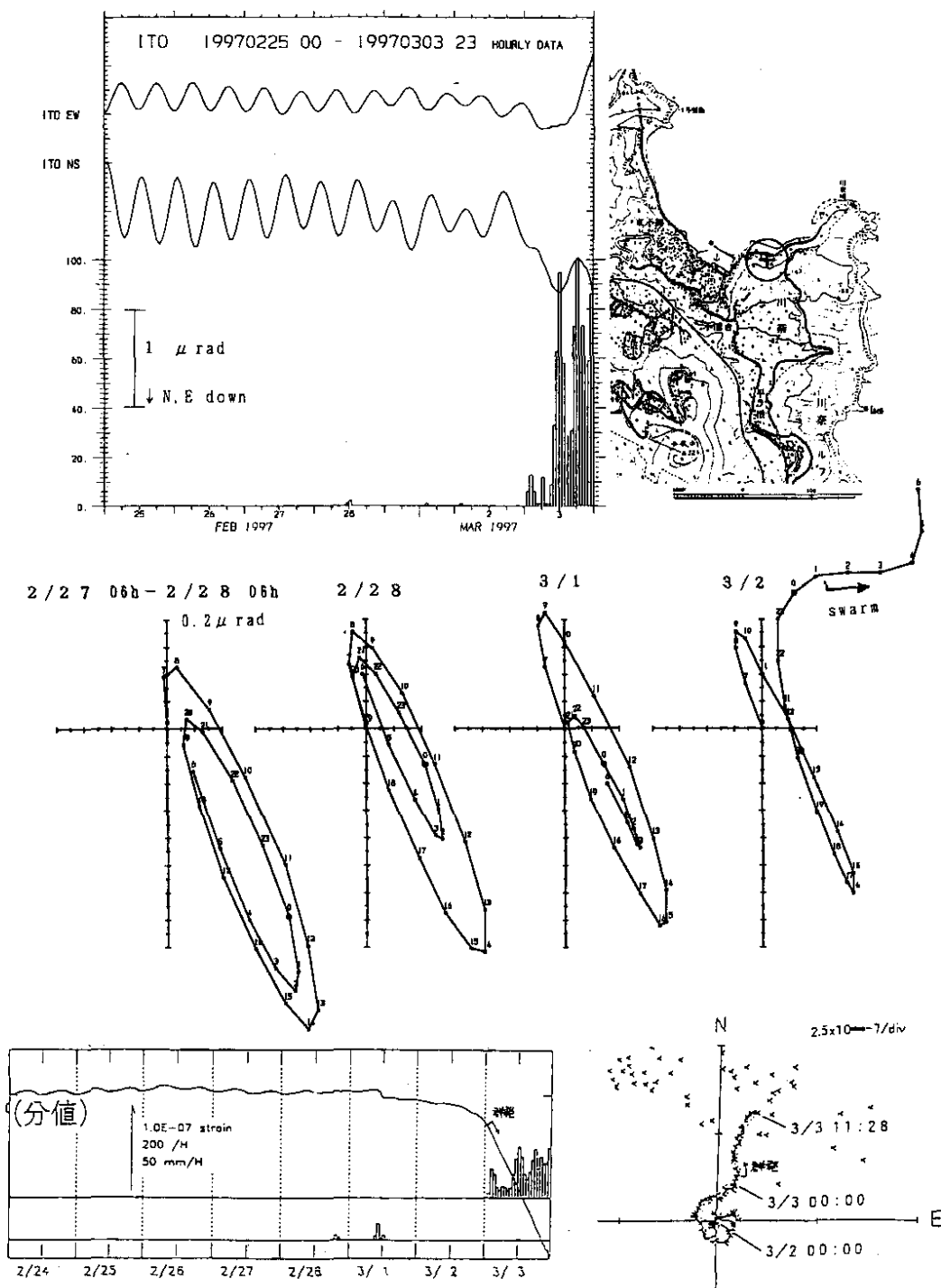
(下)1989/7/18を原点とした伊東観測点におけるベクトル傾動図。1989/5/1~7/18の分は,現地記録による。

Fig.2 Tilt record at ITO station and earthquake number in each 2 days since 1989/7/18 at when telemetry observation was started. The bottom shows corresponding tilt down vector diagram, together with the one in 1989/5/1-7/18 which was recorded on site.



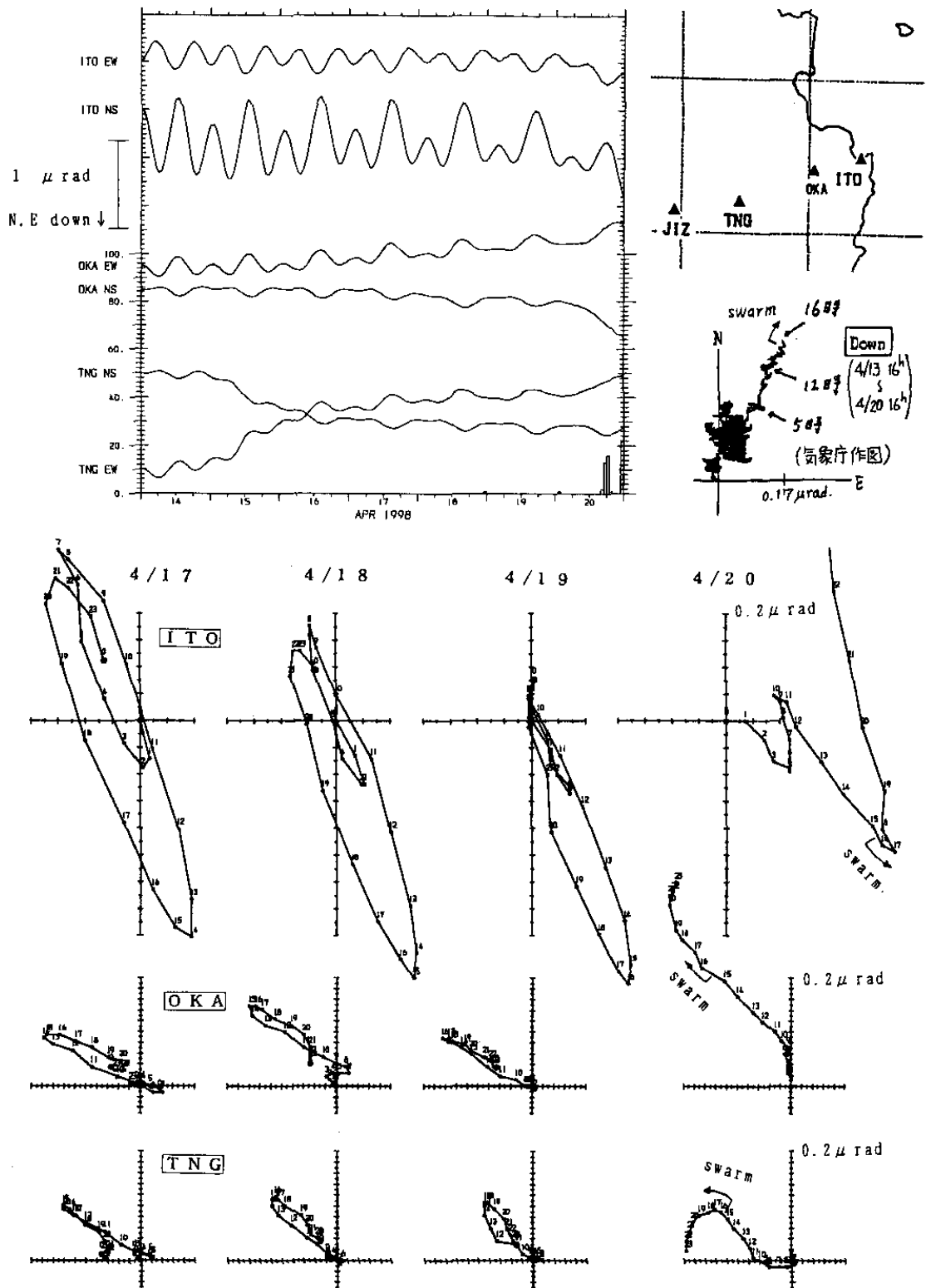
第3図 開口断層による地表上下変動の模式図(左上)と、1989年の群発地震活動のモデル化に用いた、断層面上端の深さ  $d$  と、伊東観測点で期待される傾斜ベクトルとの関係(右上および右中)。同様にして、1989/7/18 以後の群発地震震源域に沿って、西側と東側に各々3kmの長さの垂直開口断層(左中)を置くと、伊東観測点では下段の図のような傾斜変化が期待される。

Fig.3 Schematical surface elevation change due to a buried tensile fault(top-left) and the relation between the depth of top margin,  $d$ (top-right), and expected tilt change at ITO station(middle-right), which was used for modeling of 1989 event. Similarly, if we put vertical tensile faults of 3km length at western or eastern part of the swarm region, tilting motions at ITO are expected as shown in the bottom.



第4図 (上)1997年3月の群発地震開始前1週間の伊東観測点における傾斜変化と毎時地震回数。  
 (中)毎6時から24時間毎のベクトル傾動図。  
 (下)同時期の東伊豆における体積歪記録(気象庁),及び新井における地殻活動総合観測装置の傾斜記録(東大震研)。

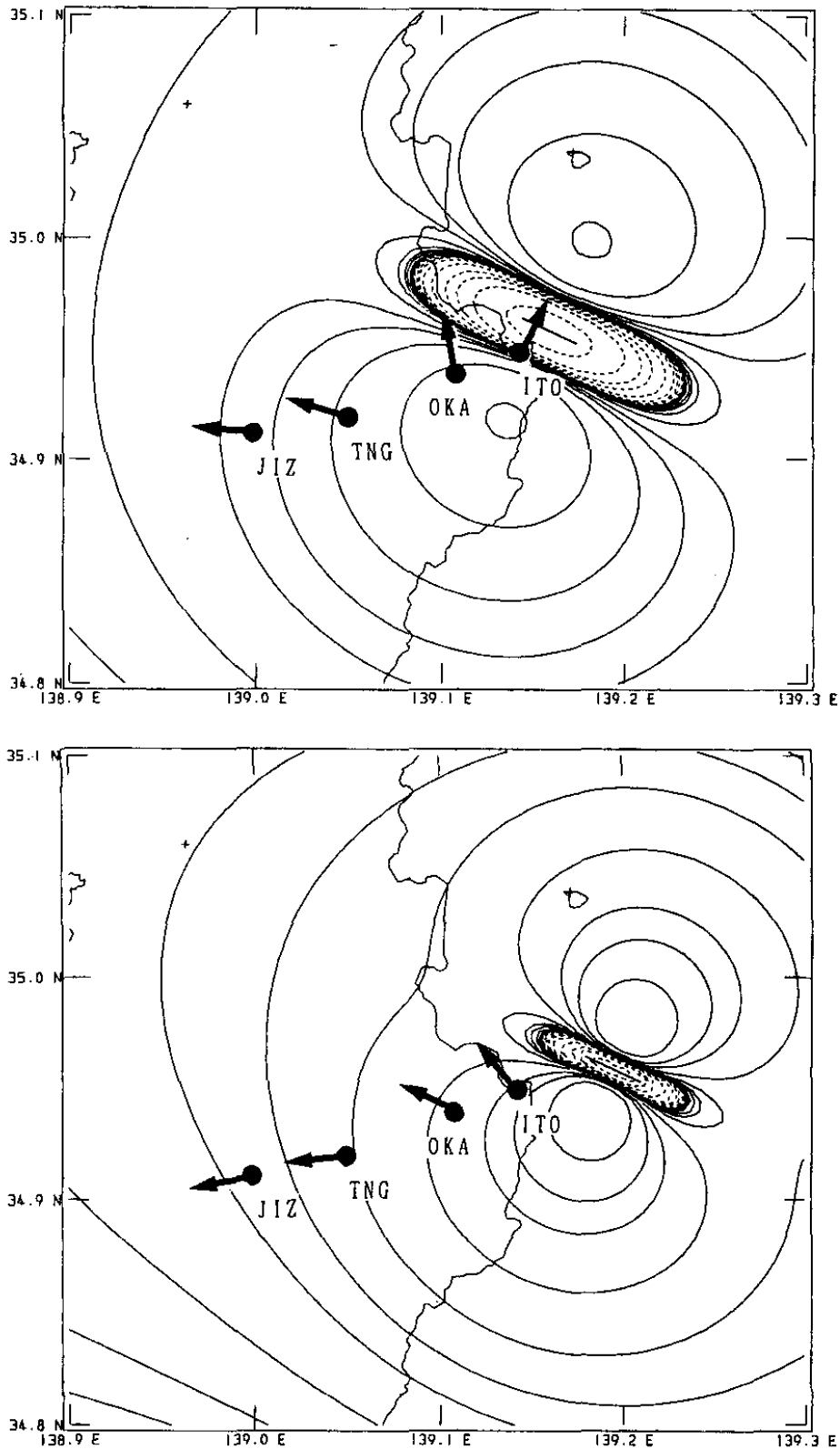
Fig.4 Top : Tilt change at ITO station and hourly earthquake numbers in a week preceding to the start of swarm in March, 1997.  
 Middle : Tilt down vector diagrams at ITO station for each 24 hours starting at 06 o'clock. It shows NE down tilting 7-8 hours preceding to the swarm.  
 Bottom : The record of volume strainmeter at Higashiizu station(JMA) and the tilt down vector at Arai station(ERI) in the same period.



第5図 1998年4月の群発地震開始前1週間の伊東(ITO),岡(OKA),徳永(TNG)における傾斜変化と毎時地震回数,及び1日毎のベクトル傾動図。右上は潮汐成分を除いた伊東の傾動[気象庁作図]を示す。

Fig.5 Tilt changes at ITO, OKA and TNG stations together with hourly earthquake numbers in a week preceding to the start of swarm in April, 1998. Daily tilt down vector diagrams for each station are shown at bottom. Removing the tidal components, a tilt diagram at ITO station(top-right; plotted by JMA) shows NNE down tilting half a day preceding to the swarm.



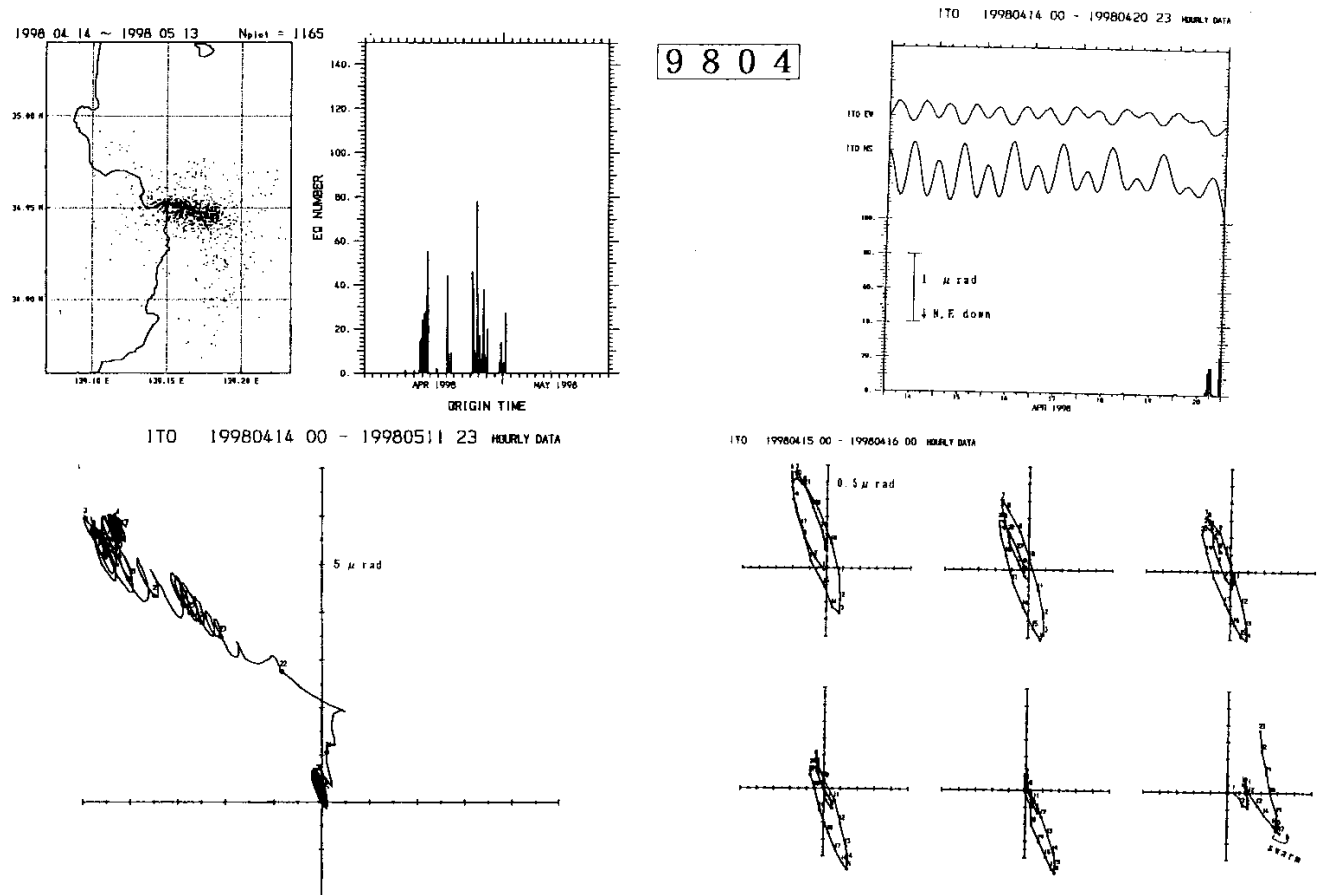


第6図 開口断層モデルによる，各観測点における傾斜の空間分布とその時間変動の定性的説明。

(上)岩脈貫入が川奈崎近くの深いところにある場合。

(下)岩脈貫入が沖合いの浅いところに移った場合。

Fig.6 Qualitative explanation for spatial distribution of tilts and their time variation with a tensile fault model. Top figure shows a case that dike intruded at a deep portion around Cape Kawana, while the bottom one shows a case that dike intrusion moved to a shallower and offshore place.

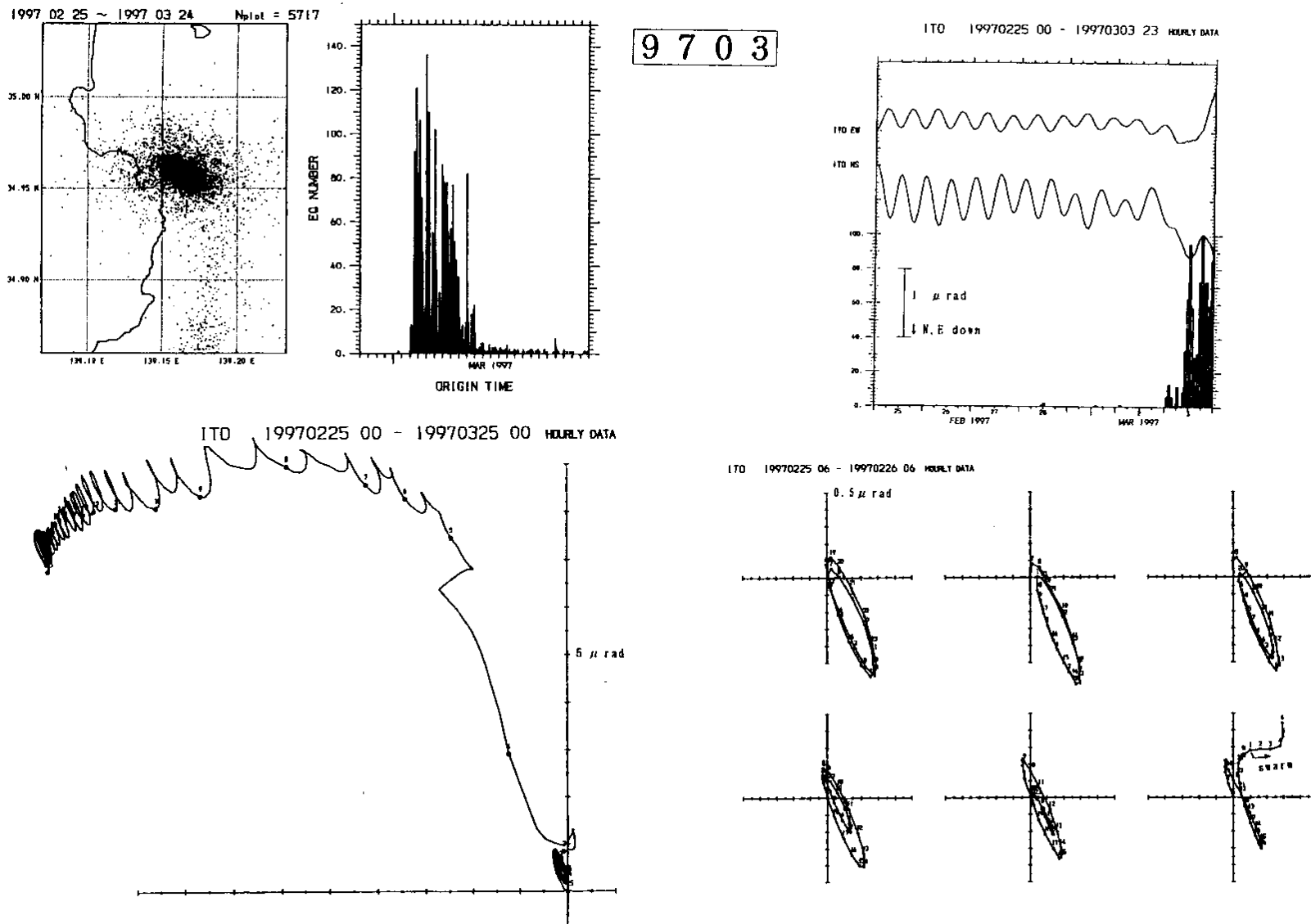


第7図 (a)伊東沖群発地震活動のエポック 9804 に対する全体像と群発地震開始前後の様子。  
 (左) 1ヶ月間の震央分布，毎時地震回数，および伊東観測点におけるベクトル傾動図。  
 (右) 群発開始前1週間の傾斜変化，毎時地震回数，及び6日間の24時間毎のベクトル傾動図。

Fig.7 (a) Total image for swarm event, 9804, and the details around the start of the swarm.

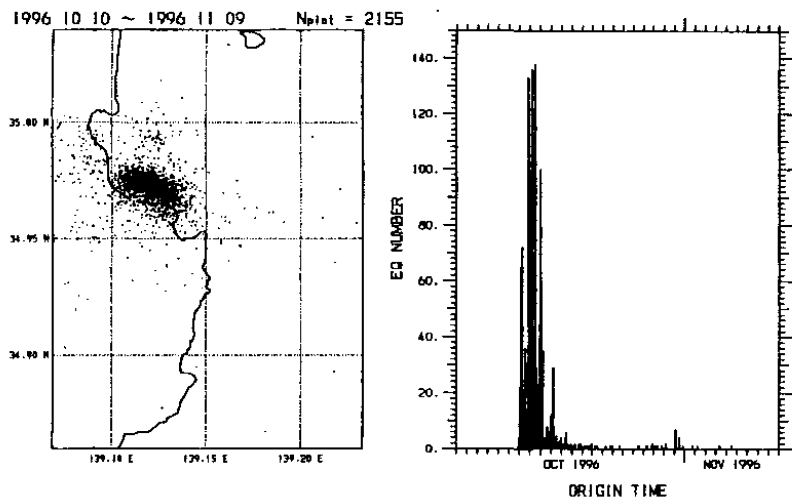
Left : Epicentral distribution and hourly earthquake numbers in a month including the swarm, together with total tilt down vecor diagram at ITO station. (A part of seismic data are remained unprocessed)

Right : Tilt change at ITO station and hourly earthquake numbers in a week preceding to the start of the swarm, together with tilt down diagrams for each 24 hours in 6 days.

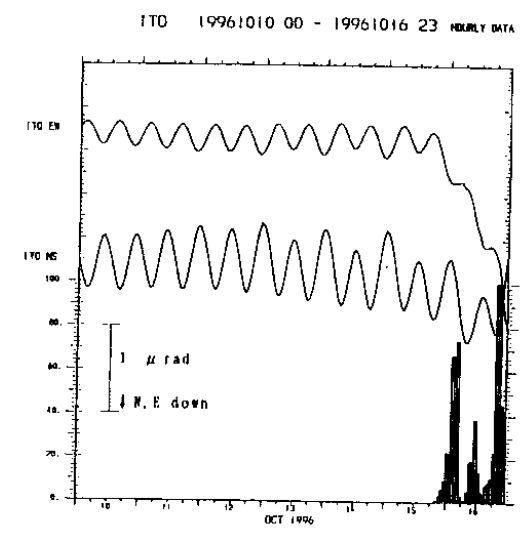


第7図 (b)伊東沖群発地震活動のエポック 9703 に対する全体像と群発地震開始前後の様子。

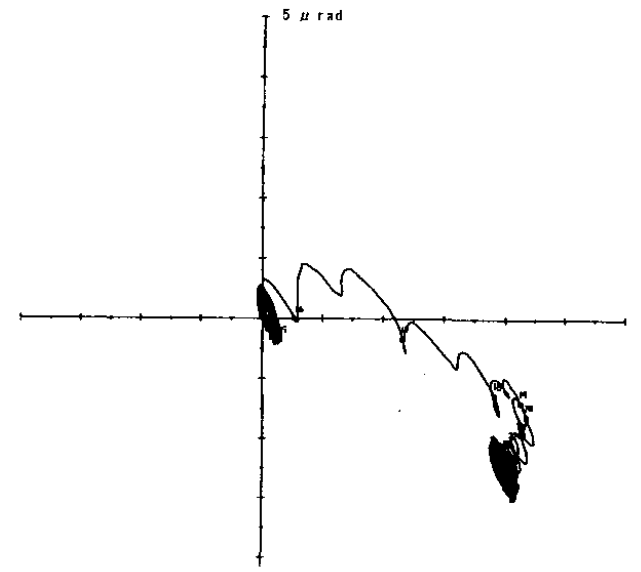
Fig.7 (b) Total image for swarm event, 9703, and the details around the start of the swarm.



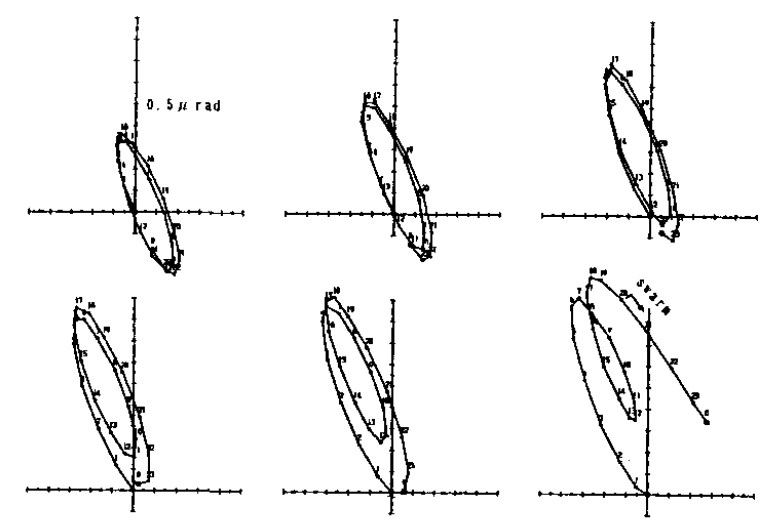
9610



ITD 19961010 00 - 19961110 00 HOURLY DATA

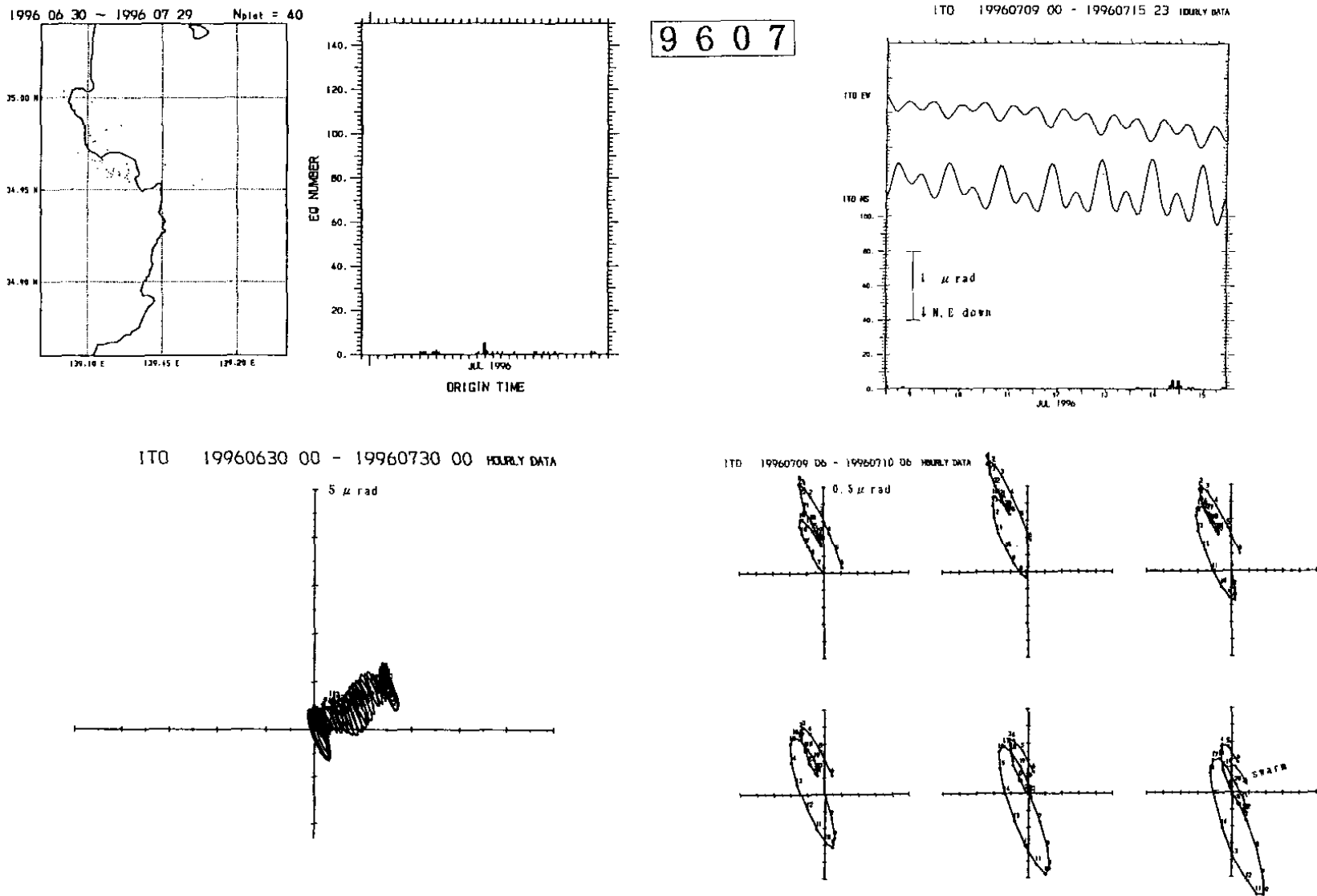


ITD 19961010 00 - 19961011 00 HOURLY DATA



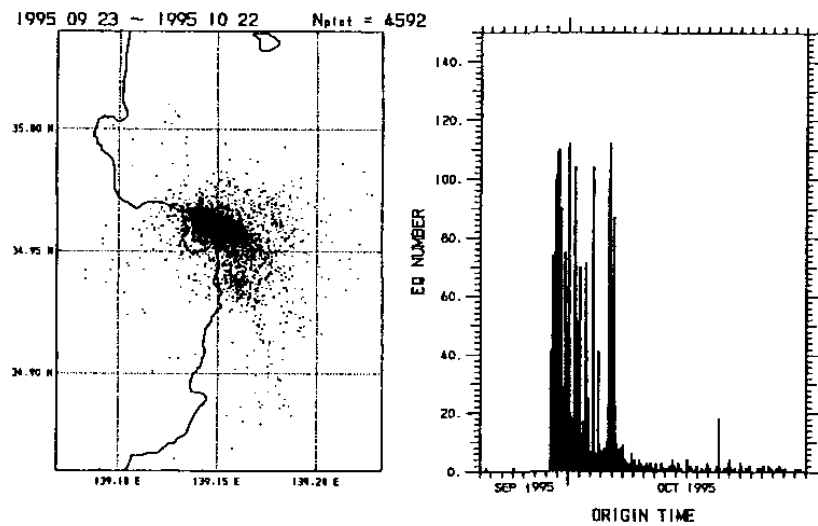
第7図 (c)伊東沖群発地震活動のエポック 9610 に対する全体像と群発地震開始前後の様子。

Fig.7 (c) Total image for swarm event, 9610, and the details around the start of the swarm.

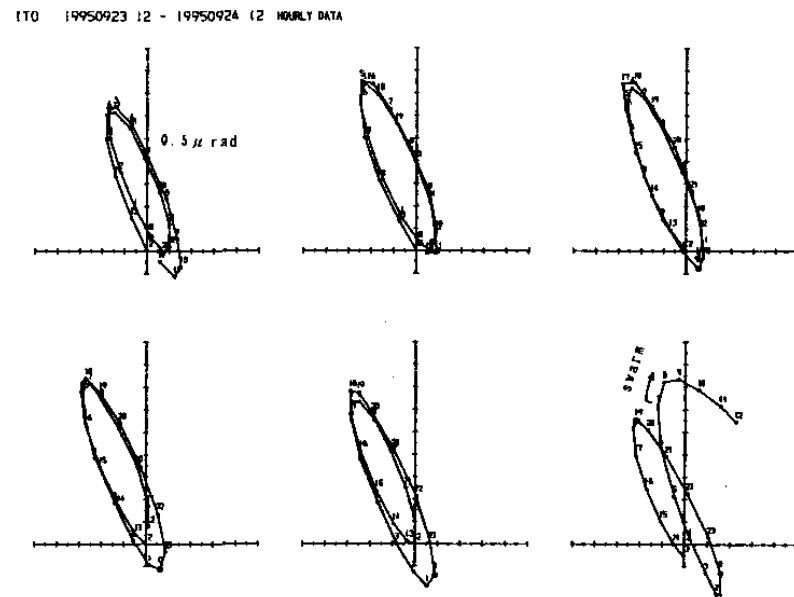
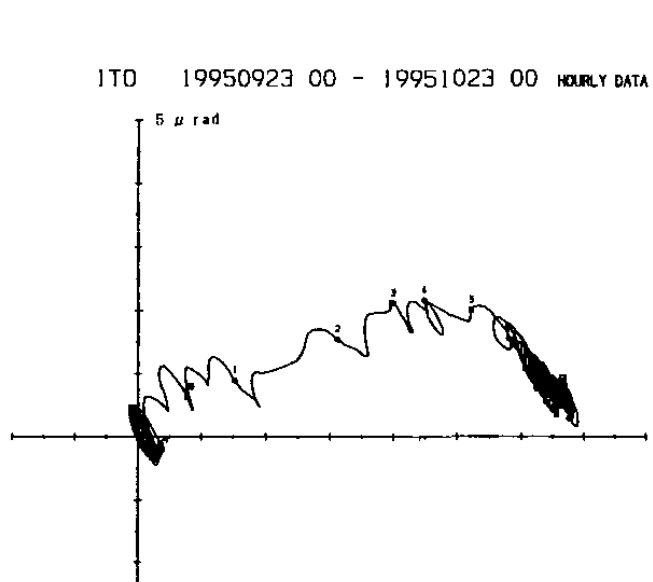
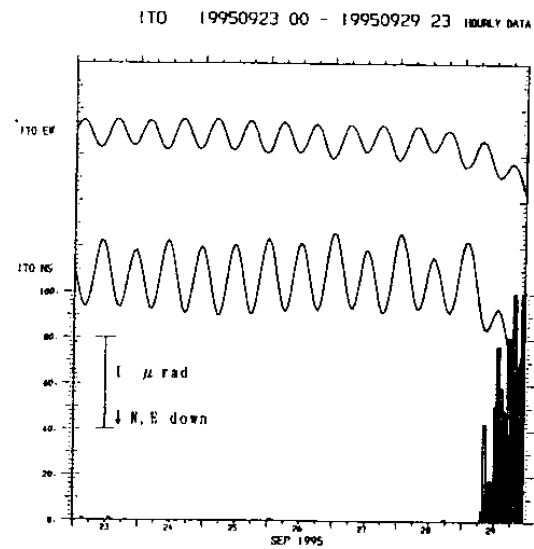


第7図 (d)伊東沖群発地震活動のエポック 9607 に対する全体像と群発地震開始前後の様子。

Fig.7 (d) Total image for swarm event, 9607, and the details around the start of the swarm.

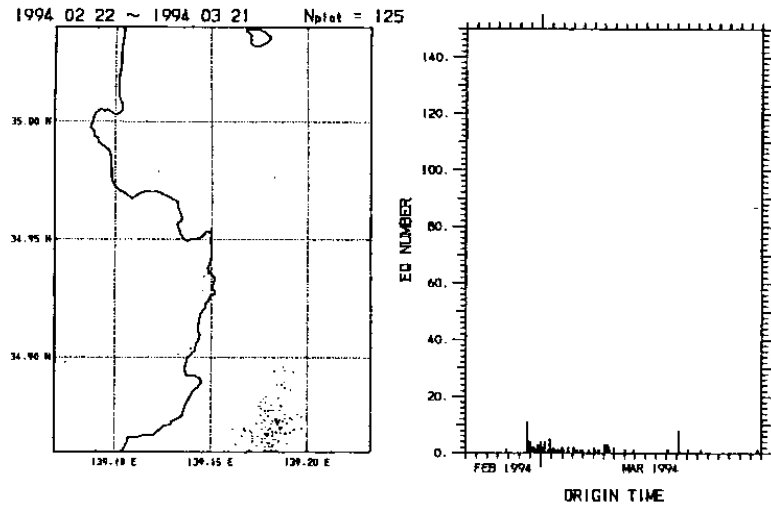


9509

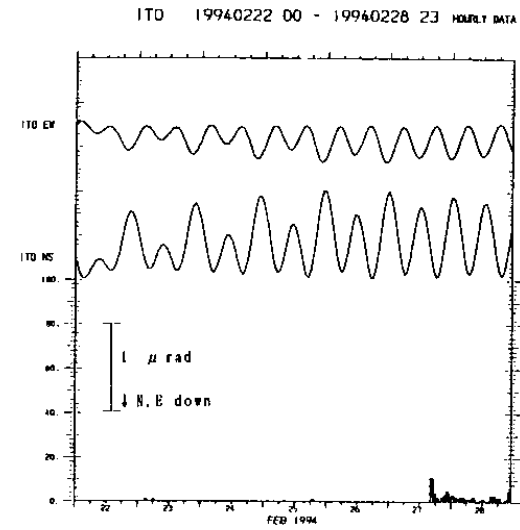


第7図 (e)伊東沖群発地震活動のエポック 9509 に対する全体像と群発地震開始前後の様子。

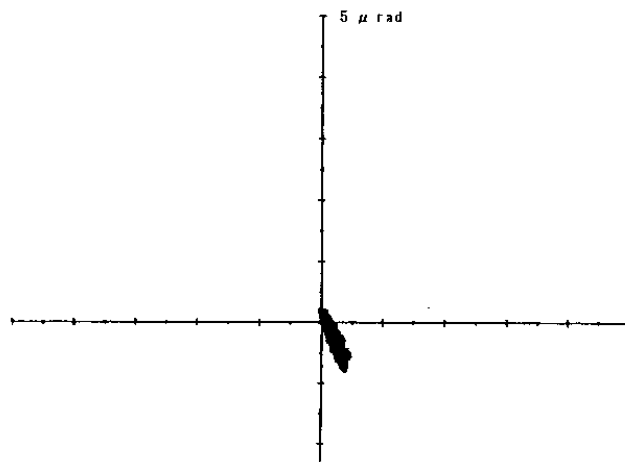
Fig.7 (e) Total image for swarm event, 9509, and the details around the start of the swarm.



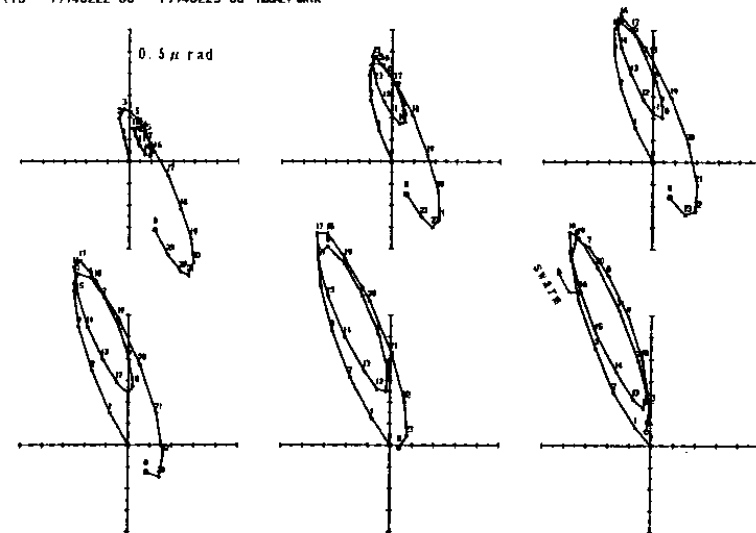
9 4 0 2



ITD 19940222 00 - 19940322 00 HOURLY DATA

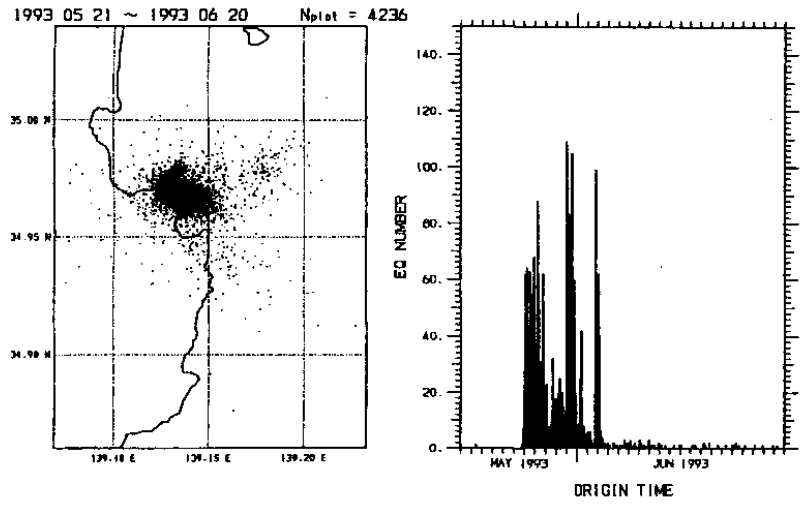


ITD 19940222 00 - 19940223 00 HOURLY DATA

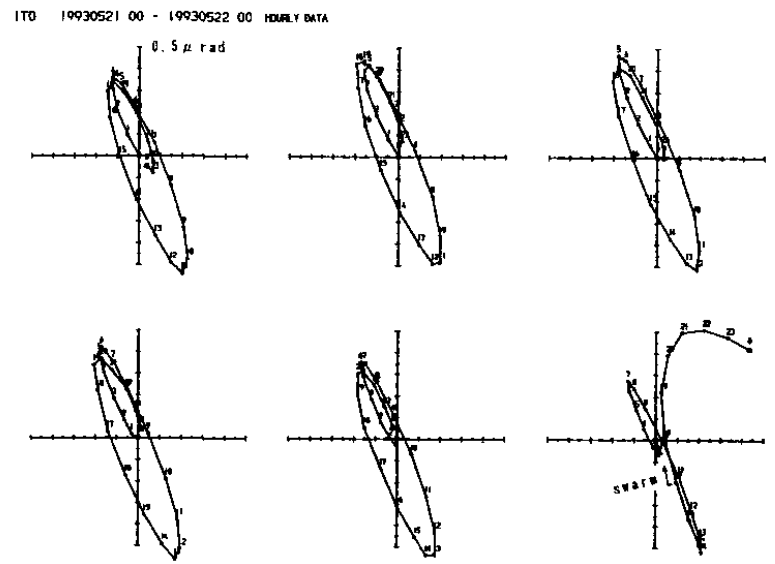
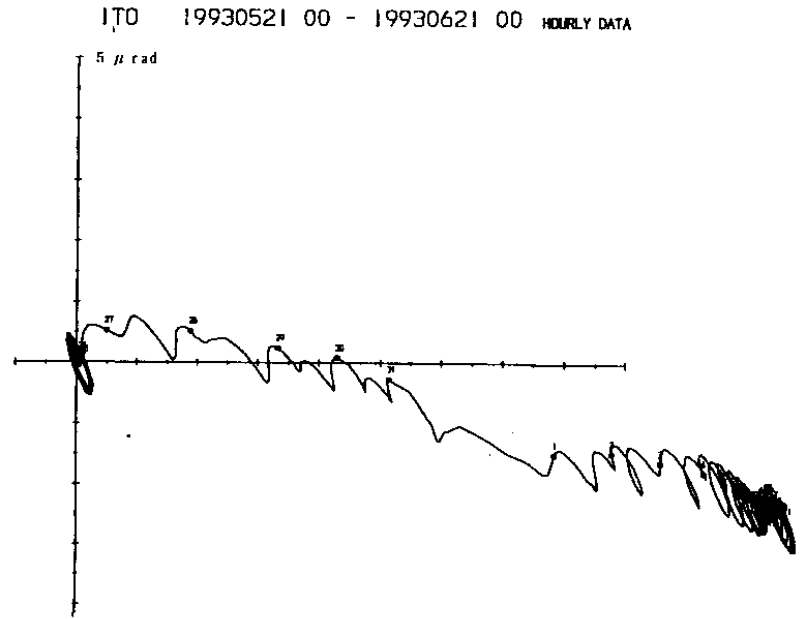
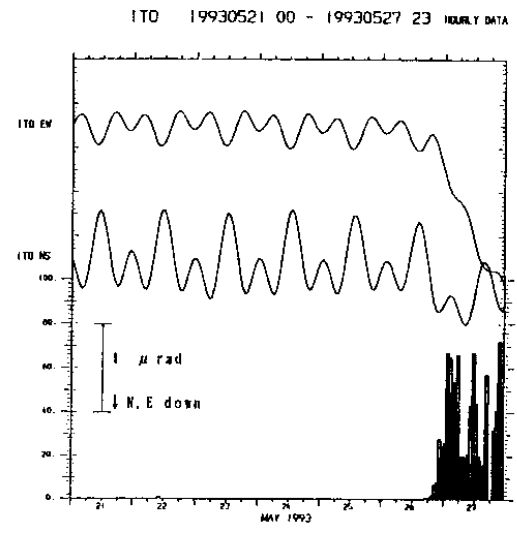


第7図 (f)伊東沖群発地震活動のエポック 9402 に対する全体像と群発地震開始前後の様子。

Fig.7 (f) Total image for swarm event, 9402, and the details around the start of the swarm.

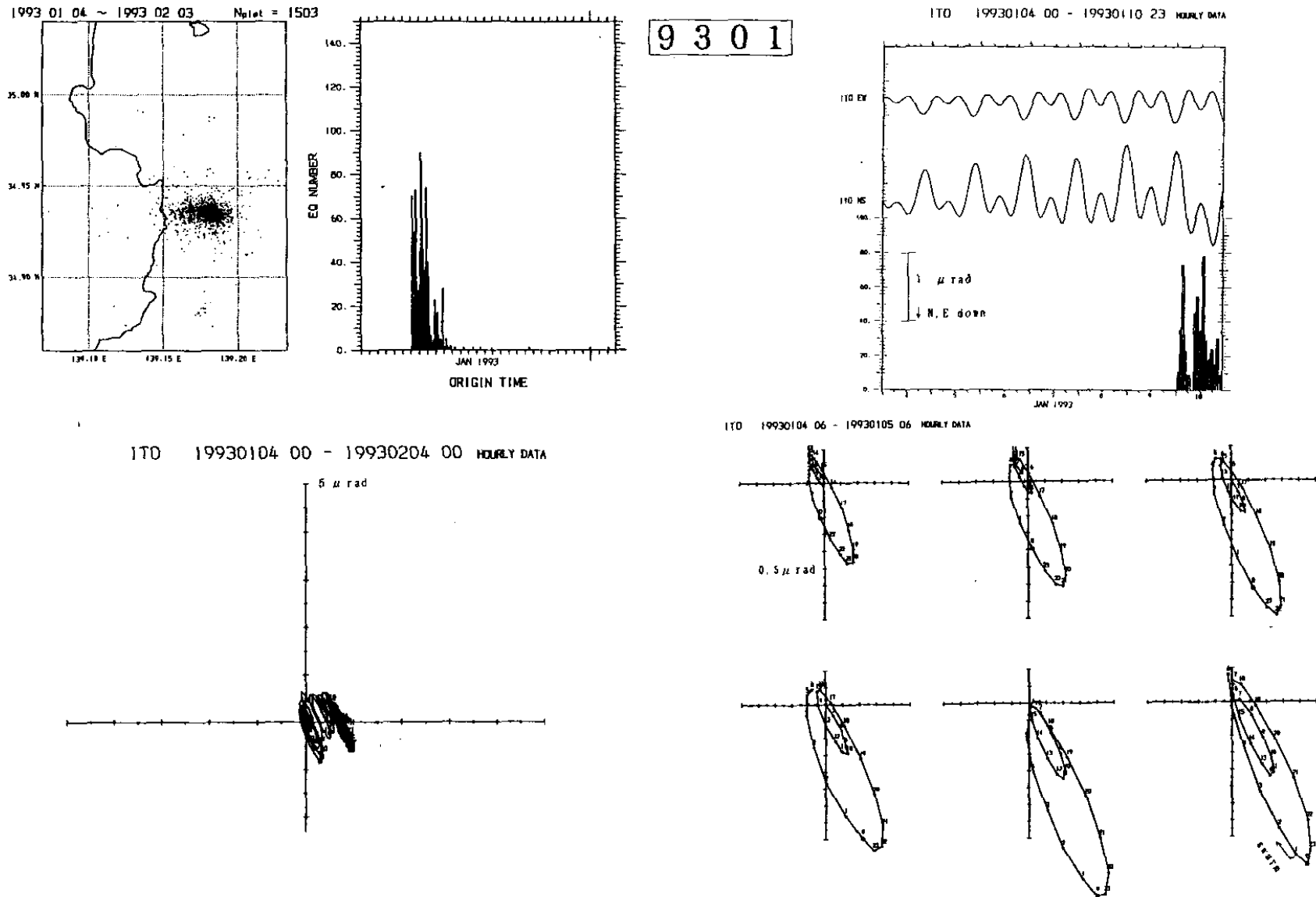


9305



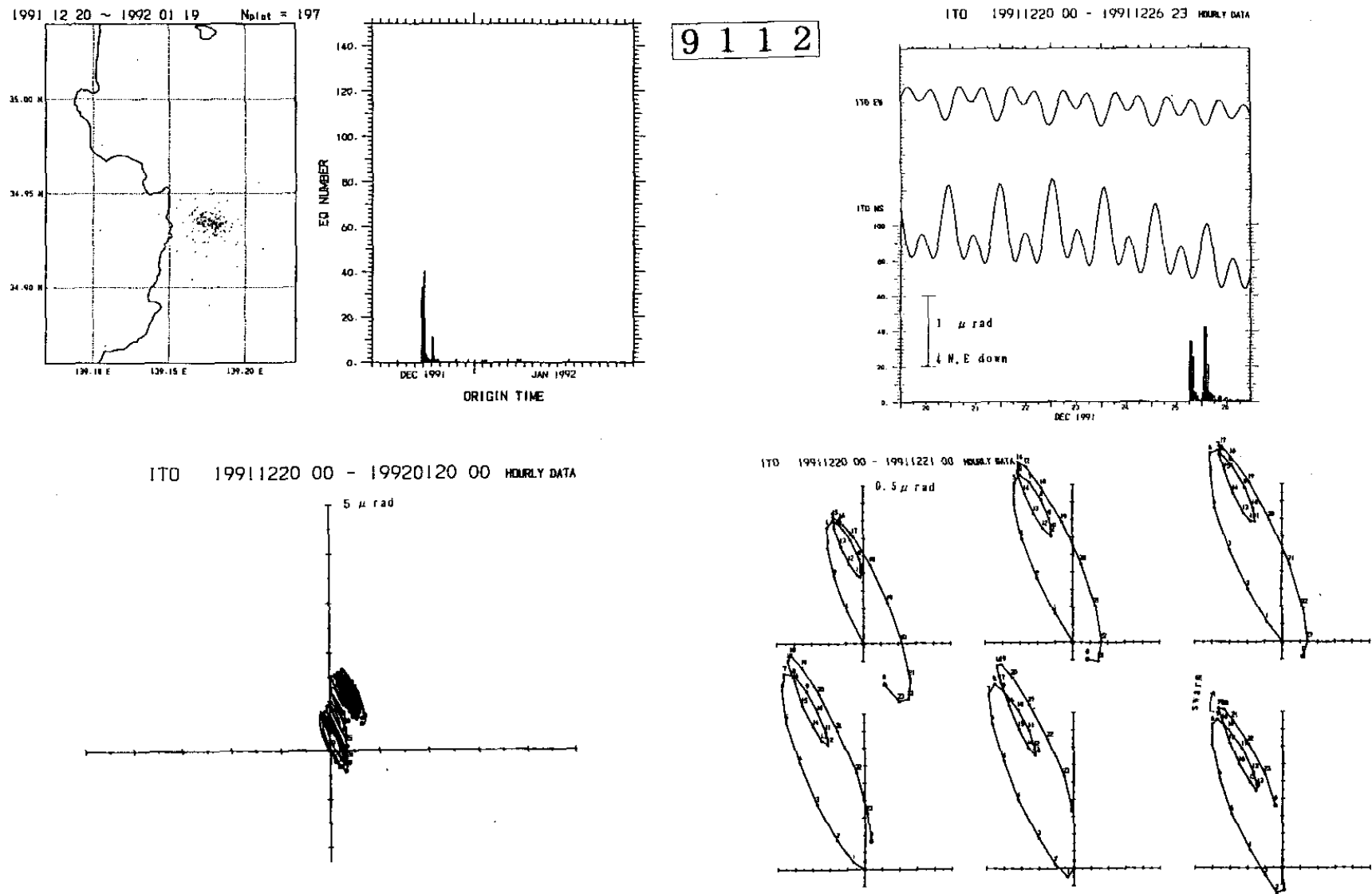
第7図 (g)伊東沖群発地震活動のエポック 9305 に対する全体像と群発地震開始前後の様子。  
 Fig.7 (g) Total image for swarm event, 9305, and the details around the start of the swarm.





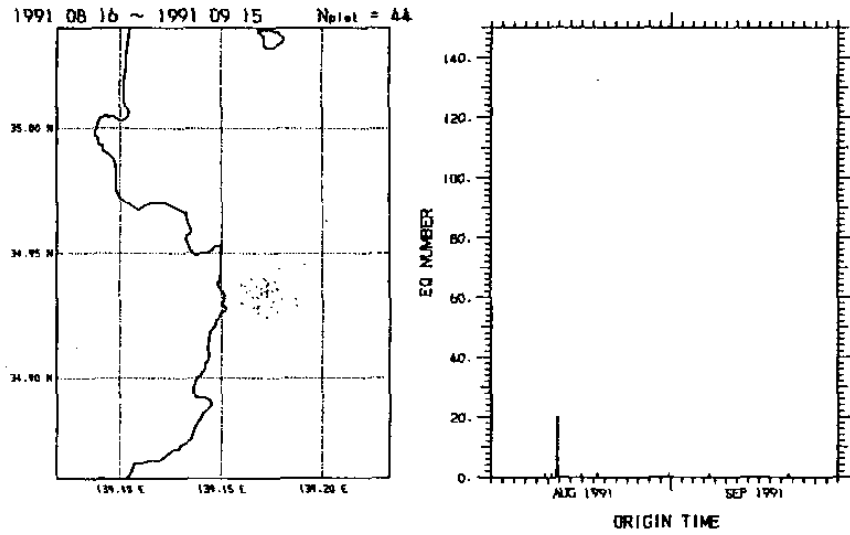
第7図 (h)伊東沖群発地震活動のエポック 9301 に対する全体像と群発地震開始前後の様子。

Fig.7 (h) Total image for swarm event, 9301, and the details around the start of the swarm.

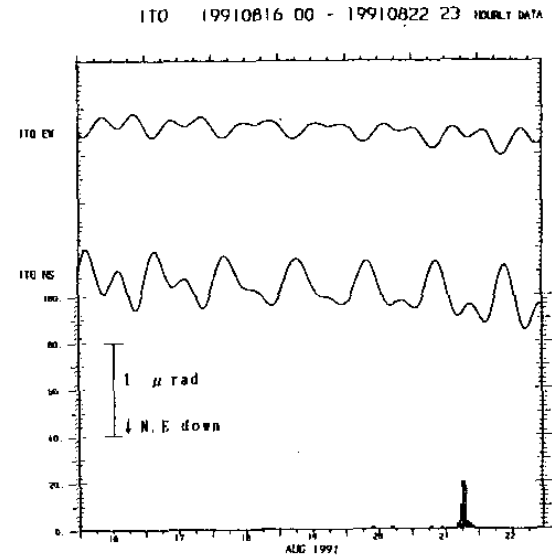


第7図 (i)伊東沖群発地震活動のエポック 9112 に対する全体像と群発地震開始前後の様子。

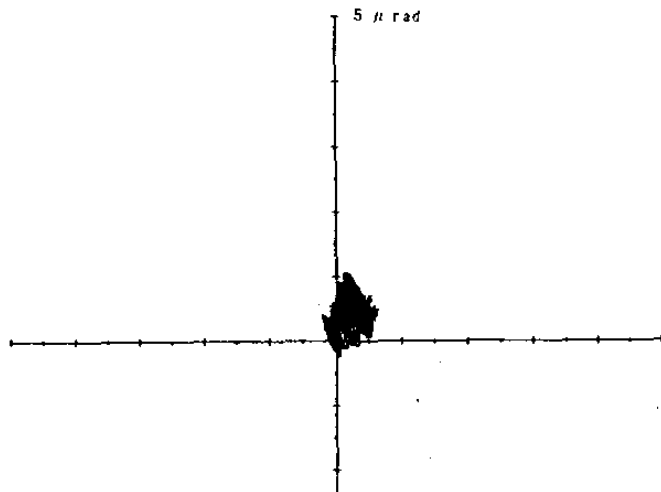
Fig.7 (i) Total image for swarm event, 9112, and the details around the start of the swarm.



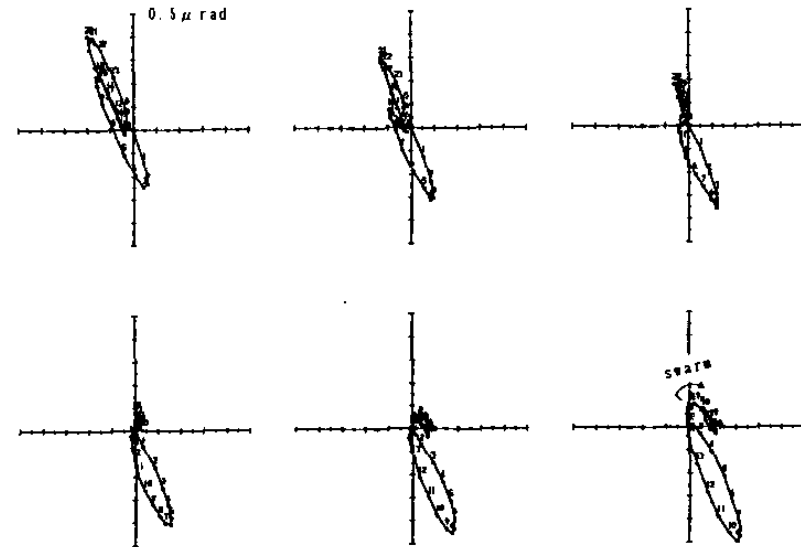
9108



ITO 19910816 00 - 19910916 00 HOURLY DATA

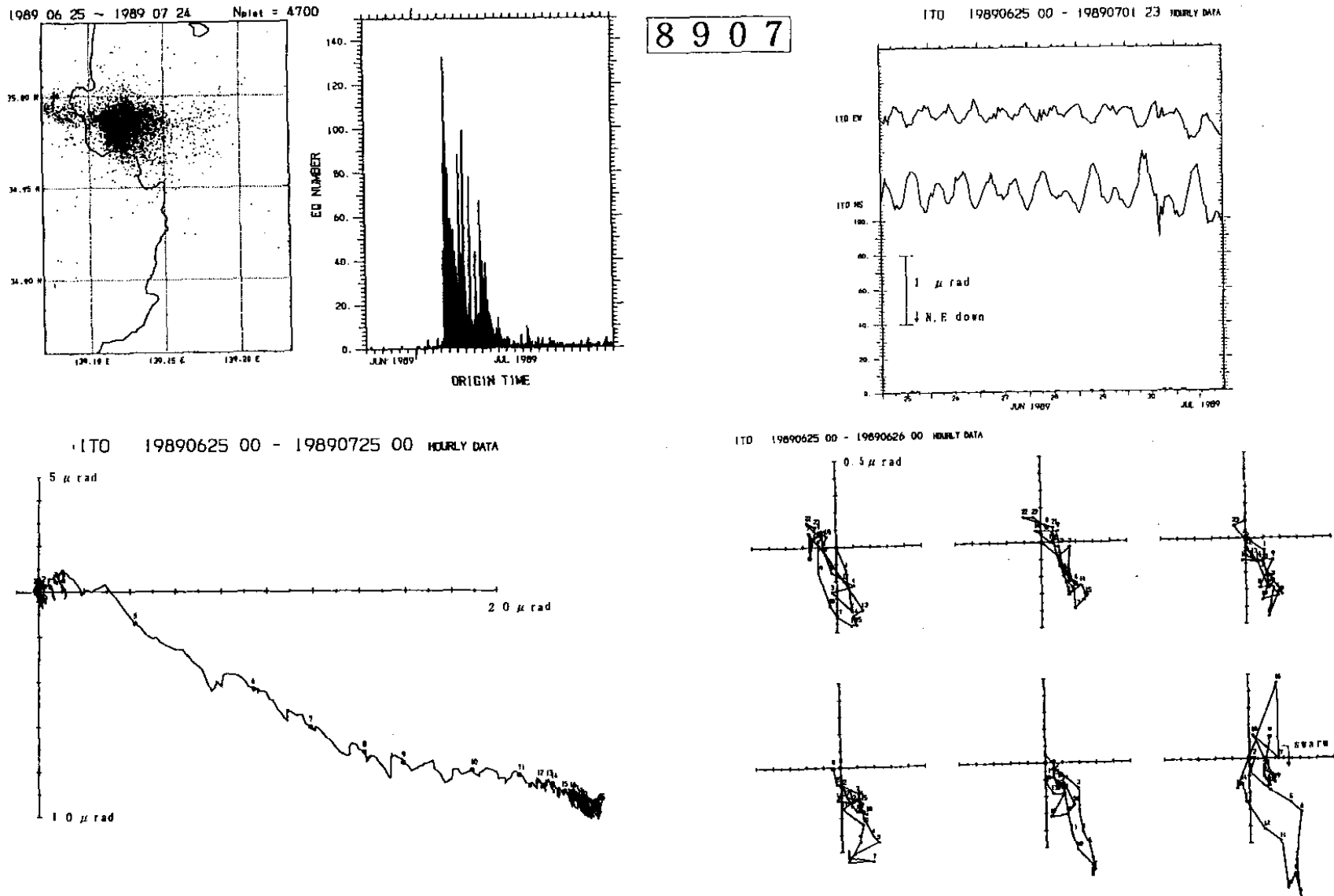


ITO 19910816 00 - 19910817 00 HOURLY DATA



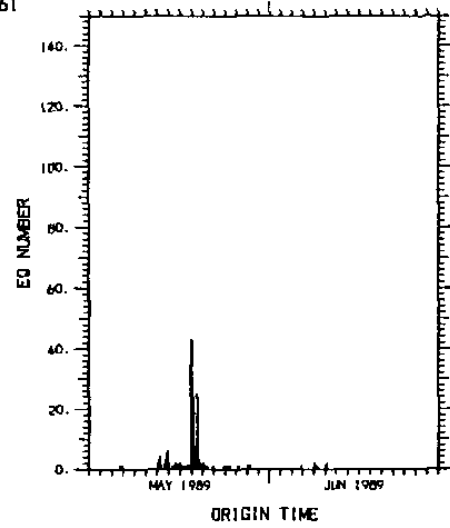
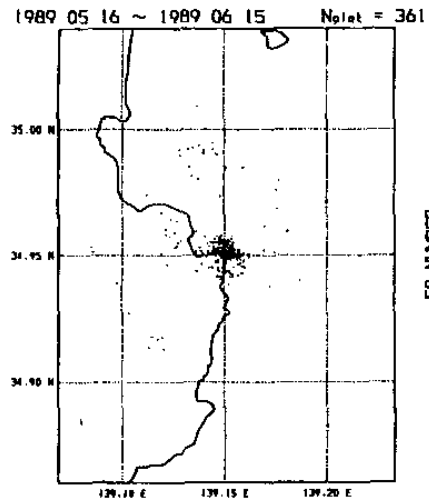
第7図 (j)伊東沖群発地震活動のエポック 9108 に対する全体像と群発地震開始前後の様子。

Fig.7 (j) Total image for swarm event, 9108, and the details around the start of the swarm.

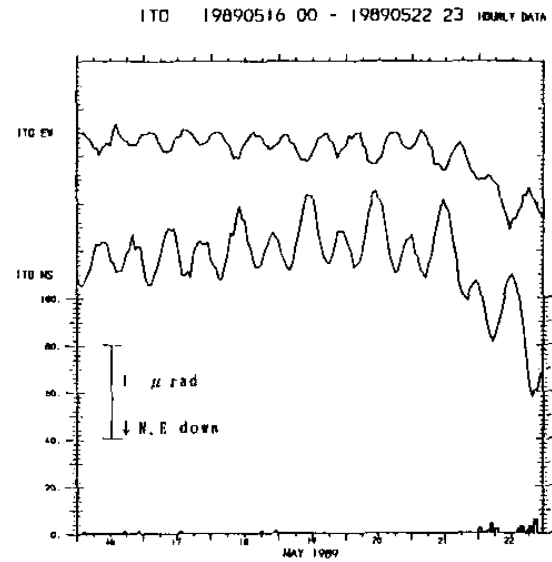


第7図 (k)伊東沖群発地震活動のエポック 8907 に対する全体像と群発地震開始前後の様子。

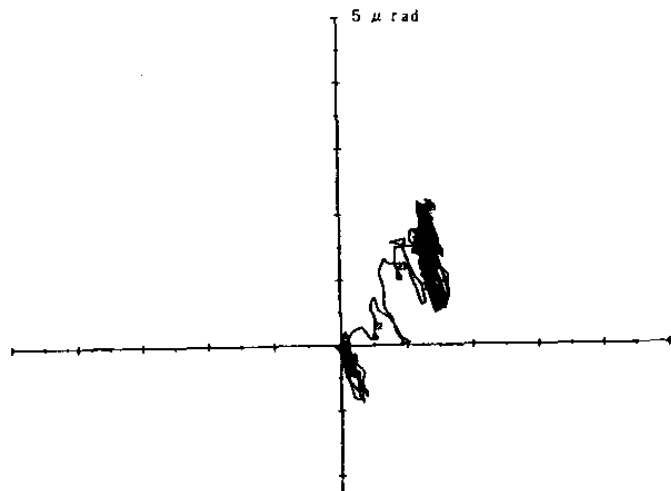
Fig.7 (k) Total image for swarm event, 8907, and the details around the start of the swarm.



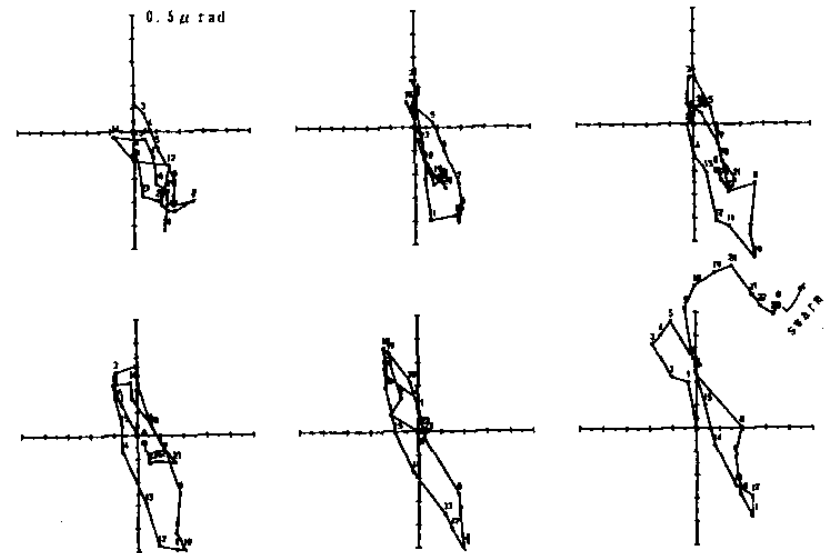
8905



ITD 19890516 00 - 19890616 00 HOURLY DATA

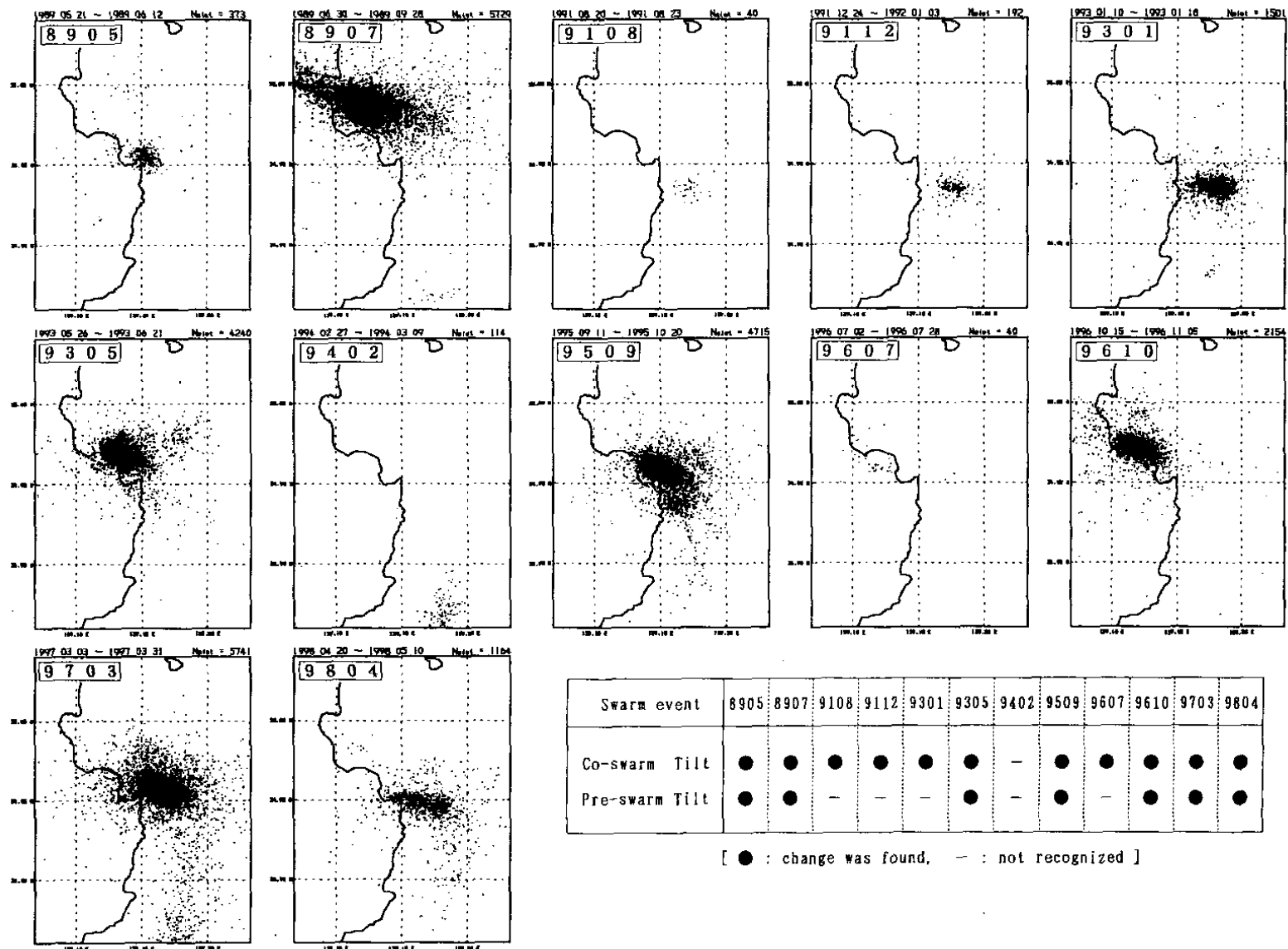


ITD 19890516 00 - 19890517 00 HOURLY DATA



第7図 (I)伊東沖群発地震活動のエポック 8905 に対する全体像と群発地震開始前後の様子。

Fig.7 (I) Total image for swarm event, 8905, and the details around the start of the swarm.



第 8 図 1989 年以降の伊東沖群発地震イベントの震央分布図と、伊東観測点において検出された傾斜変化のまとめ

Fig.8 Epicentral distributions for each swarm events off Ito since 1989 and a resume of tilt records detected at ITO station.