

2. 地殻変動

① 測地測量

地殻変動は、地殻活動の最も直接的な反映であり、その観測は地震予知研究の基本的データを提供する。国土地理院は、測地測量の繰り返し観測により広域的な水平歪と上下変動を明らかにしている。

東日本では、最近の15年間に三角点一次網の改測がそれぞれの地域で、次のように行われた。北海道地方では、1回目が1982～84年に、東北地方北部では、1回目が1981～82年、2回目が1988～91年に、東北地方南部では、1回目が1979～80年、2回目が1986年に実施されている。北海道ではこの期間に1973年根室半島沖地震 ($M=7.4$)、有珠山の噴火 (1977～1980年) が起きている。道東地方に見られる東西方向の伸長歪は1973年根室半島沖地震の断層運動による地殻変動で、地殻変動の反転 (rebound) があったことを示している。洞爺湖付近の大きな水平歪は有珠山の噴火によって有珠山三角点が動いたことを示している。宗谷地方にも伸長歪が見られるが、同地方では前の期間は圧縮歪が卓越していた。この地方ではこの20年間歪が反転するような大きな地震活動はなく、歪反転の原因は不明である。あるいは測量誤差の可能性も考えられる (図 I-2-1)。

東北地方の地殻歪分布は地質学的な構造帯「本荘-松島構造帯」を境にして北部と南部に分けられるが、近年地震活動からもこれとほぼ同じ位置に東北地方を二分する「男鹿-牡鹿構造帯」が指摘されている。この期間東北地方では1983年日本海中部地震 ($M=7.7$) が発生している。東北地方では北部の西半分の地域を除いて伸長歪が卓越していたが、今回この地域も伸長歪場になった。これは1983年日本海中部地震の断層運動による地殻変動で、地殻変動が反転したことを表している。太平洋沿岸で観測されている圧縮歪→伸長歪は、海洋プレートの日本列島下への沈み込みに伴う地殻変動→巨大地震発生のプロセスとされているが、東北日本の日本海側でも同じ現象が観測されたことは、今後日本海側地方の地震予知を考える上で極めて貴重な経験である (図 I-2-2, 3)。

水準測量は、北海道地方は1977～87年に改測され、前回1968～72年の結果と比較された (図 I-2-4)。太平洋プレートの沈み込みによる、釧路から根室にかけての10cm程度の沈降が見られる。苫小牧-えりも間に見られる10cmを越える隆起は1982年浦河沖地震によるものである。石狩低地帯に沿う地域では、沈降が継続している。渡島半島では、隆起が見られ、1993年北海道南西沖地震との関係が指摘されている。さらに、北海道北部には広範囲に数cmの沈降が見られ、日本海東縁部のテクトニクスと関連して、今後の動きを注意する必要がある。東北地方北部では、1983～87年に改測され、前回1978～81年の結果と比較された (図 I-2-5)。北海道同様、太平洋沿岸では、太平洋プレートの沈み込みによる沈降が見られる。盛岡を中心にした内陸部に大きな沈降が認められている。男鹿半島、能代北方の沈降は1983年日本海中部地震の影響である。東北地方南部では、1983～87年に改測され、前回1978～81年の結果と比較されたが、あまり大きな変動は認められない (図 I-2-6)。また、験潮場の結果によると、太平洋プレートの沈み込みに関連して太平洋沿岸は系統的に沈降を示すが、日本海側は小さいながらも隆起を示している (図 I-2-7)。

北海道・東北地方には8ヶ所の放射・菱形基線場があり、最近までの結果が示されているが、系統的な変化を見出すまでに至っていない(図I-2-8)。北海道大学では、えりも、弟子屈、根室に光波測量基線場を作り、年1回の測定を行ってきた(図I-2-9)。その結果、えりもでは東西圧縮、根室では南北圧縮の永年変動が観測されている。えりも地殻変動観測所で得られる連続観測の結果はこれと調和的である。弟子屈地域の1972年以降の辺長変化には、1973年根室半島沖地震の余効の伸びの変動が1978年まで見られ、その後圧縮に転じている。この地域では、1938年屈斜路地震の断層に沿う水準路線も作られており、1976年、1983年、1990年の3回水準測量を行っているが、屈斜路湖畔側の隆起がほぼ同じレートで続いている(図I-2-10)。

② 地殻変動連続観測

測地測量の時間的不連続性を補い、連続的な地殻変動を観測するために、坑道内における石英管伸縮計、水管傾斜計による観測が大学を中心に進められている(図I-2-11)。

東北大学では、1965年男鹿、仁別観測点、1967年三陸、宮古、姫神観測点での連続観測が開始されている。1980年北阿武隈観測点、1981~82年に地殻活動観測線の、五城目、西木、田沢湖、沢内、和賀、黒沢尻、大東、気仙沼観測点が設置されている。さらに、五城目、田沢湖、沢内、男鹿、仁別、本荘の観測点では、観測井の体積歪み計による観測も行っている。観測精度の点で、均質と考えられる1984年以降のデータが示されている(図I-2-12, 13, 14)。いくつかの観測点では、歪速度、傾斜速度の変化が見られる。特に、1991~92年にかけての変動が顕著である。観測点固有の問題もありうるが、水沢江刺や北海道の例を考えると、広域的な同時異常を捉えている可能性がある。

国立天文台水沢センターの江刺観測点は、降雨の影響の最も小さいS/Nのよい観測点である(図I-2-15)。1978年からの傾斜ベクトルの変化を見ると、1991年半ばにその方向を大きく変えている。その後、釧路沖地震が発生し、傾動速度が加速し北海道南西沖地震が発生している。地震後傾動速度は、鈍っている(図I-2-16)。

1992年7月の三陸沖地震の際に、宮古、江刺の観測点では明瞭なスローアースクエイクを記録した。今後とも、地震波から数日の帯域の変動には、高感度連続観測が適当であり、短期の地震前兆を観測するためにも、この種の観測は重要である。

北海道大学では、1971年えりも観測点で連続観測が開始された。1984~86年にかけて、地殻活動観測線の、三石、広尾、浦幌、根室、弟子屈、訓子府、愛別、苫前の8観測点が設置された。ここでは、1987年5月からのデータが示されている。それによると、1991~92年にかけて、多くの点で、歪速度が大きくなっている。先の東北のいくつかの観測点に見られたと同じ広域地殻変動を示すものと思われる(図I-2-17, 18, 19)。

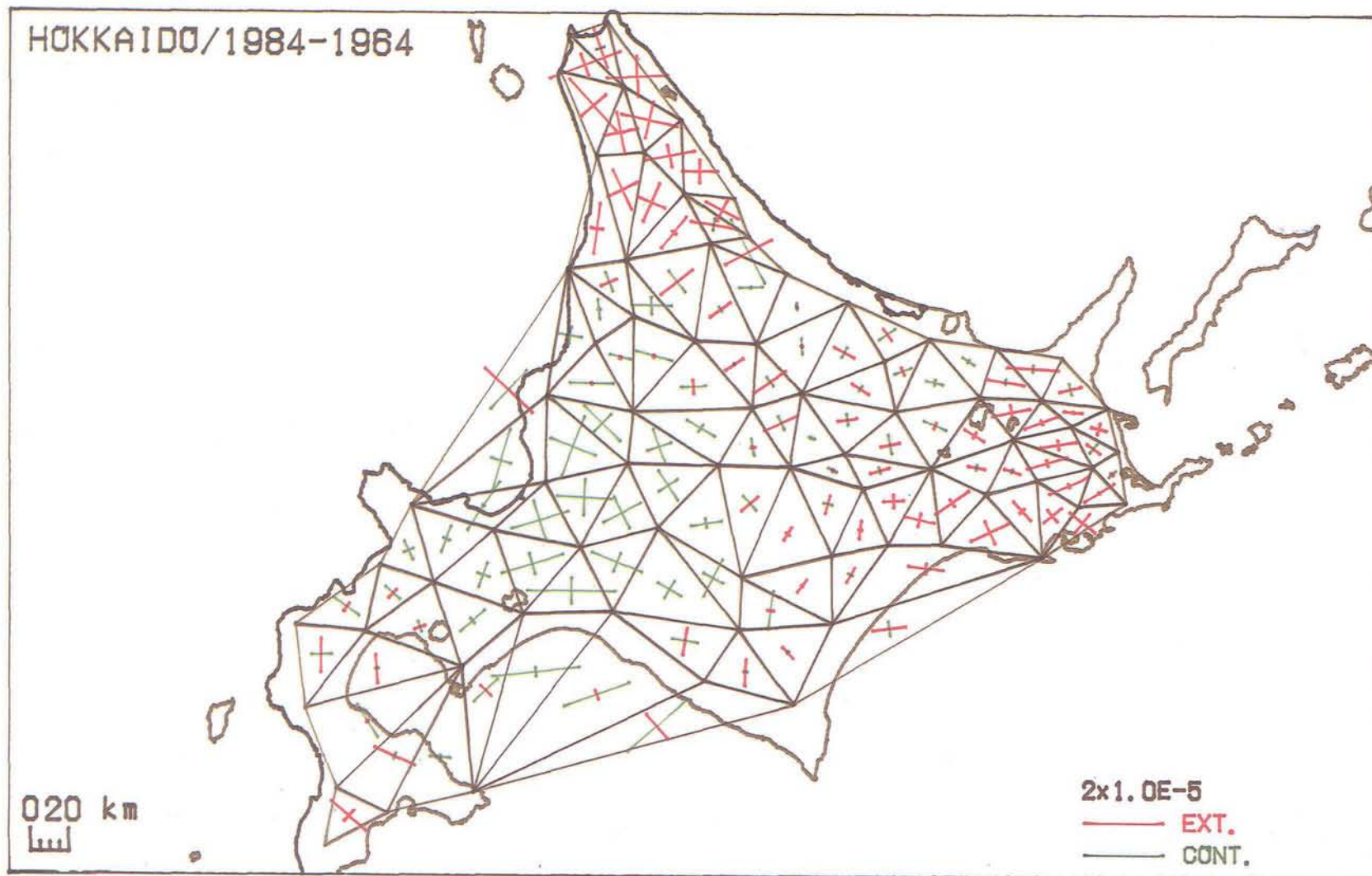
③ GPS

東北大学では、1987年にGPS定点連続観測システムを導入し、5点の観測を行っている。さらに、1991年には4点追加されている(図I-2-20)。観測当初は、GPS衛星の個数も少なく、繰り返し精度がよくなかったが、3年間の平均的な歪速度として0.1ppm/yが得られてお

り、測地測量と調和的である（図 I - 2 - 21, 22）。

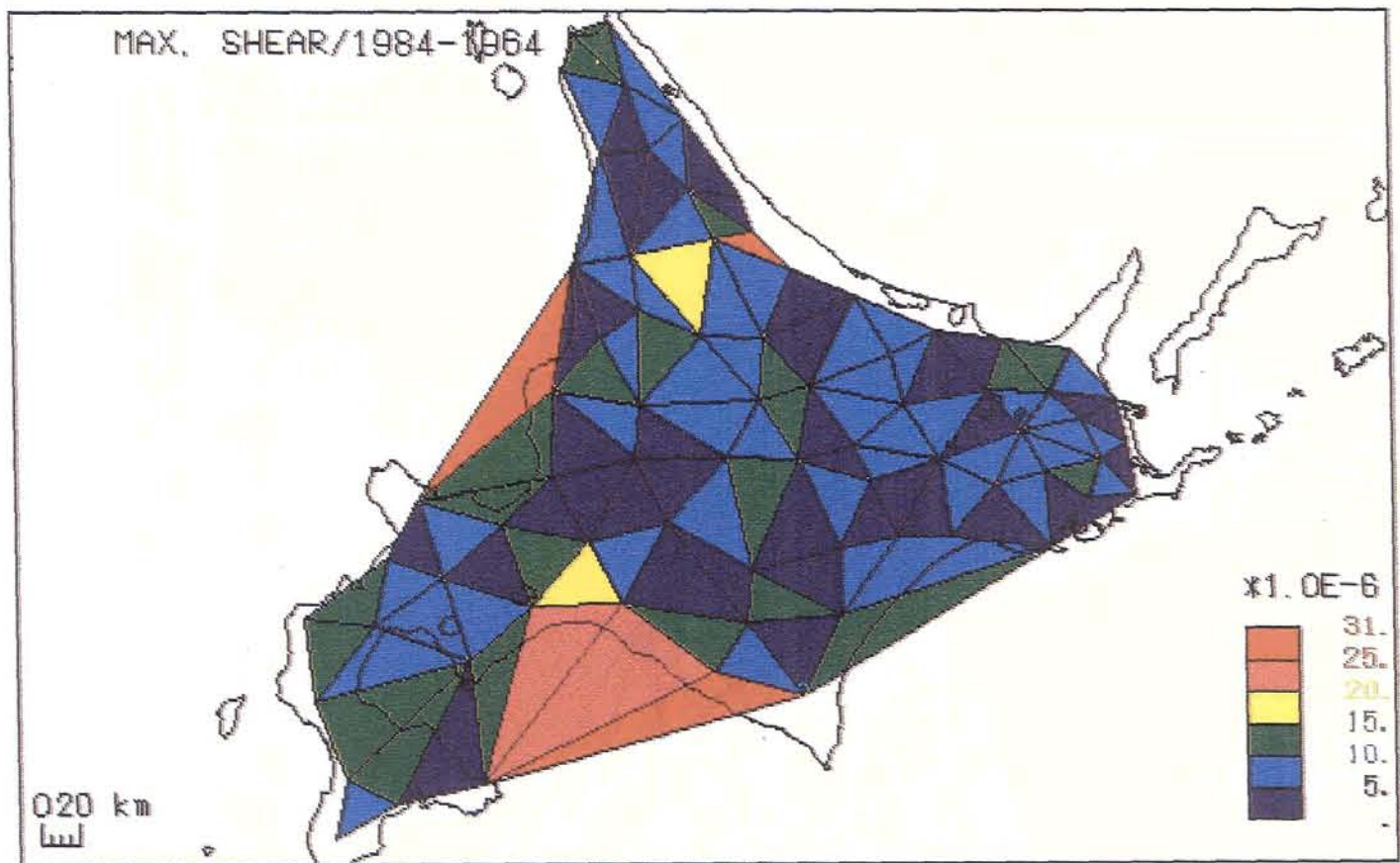
北海道大学では、6台の受信機で、道内9点と北東北の弘前、階上の2点を加えた、広域観測網を、年2～3回の観測を継続してきた（図 I - 2 - 23）。100km～400kmの基線長の変動を 1×10^{-7} 以下の精度で決定されている。東北同様、変動を議論するにはもう少しデータの蓄積が欲しい。しかしながら、1993年北海道南西沖地震に最も近い上ノ国の地震による変動は、直後に、230km離れた札幌との結合観測により、西北西に約20cm移動したことが判明した。これから、GPS観測は1日より長い帯域での広域地殻変動観測に威力を発揮するものと期待される。

[笠原 稔]

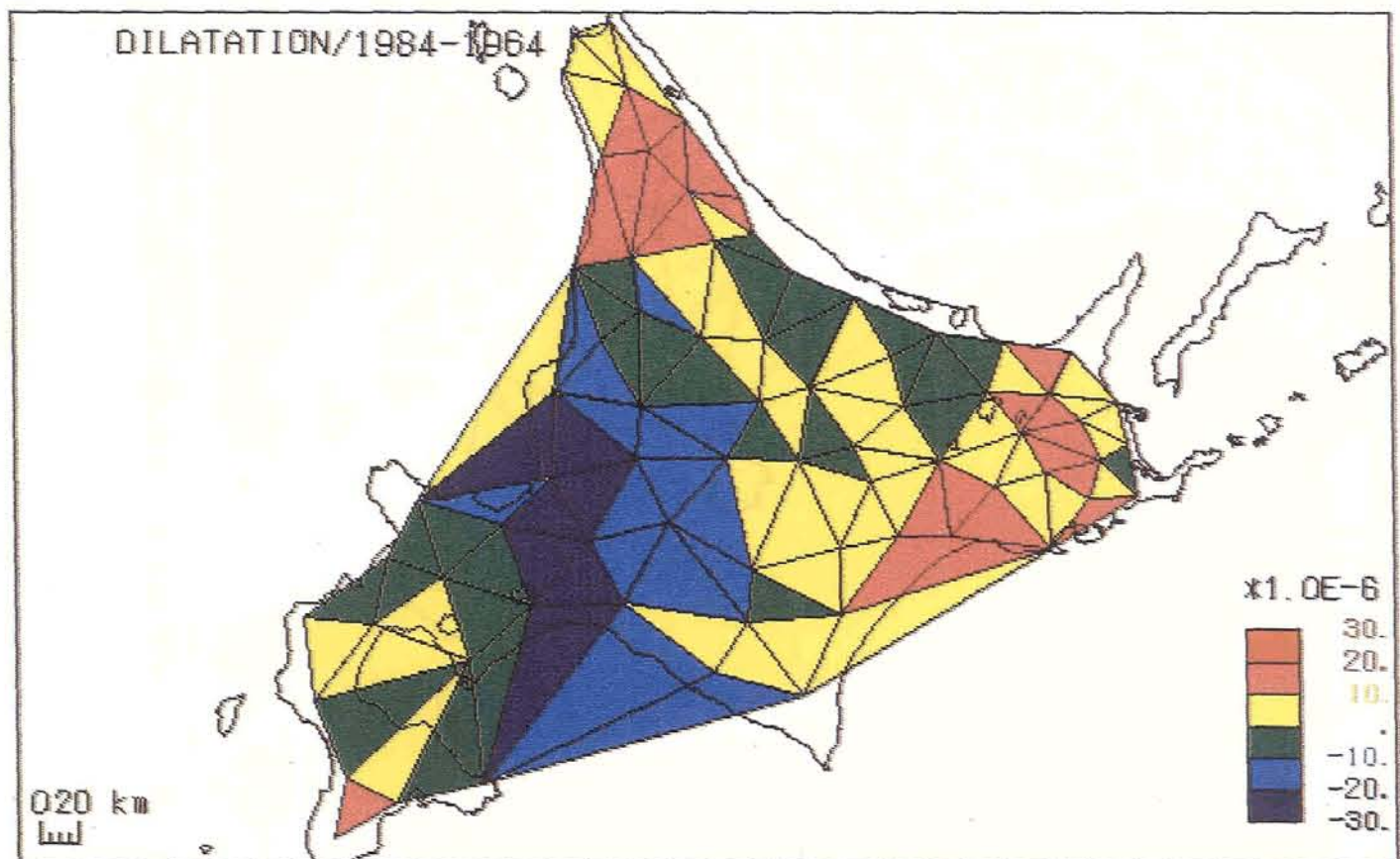


(a) 1964~'67年（昭和）と'82~'84年（一次網）との比較による水平歪主軸

図 1 - 2 - 1 北海道の水平歪（国土地理院による）

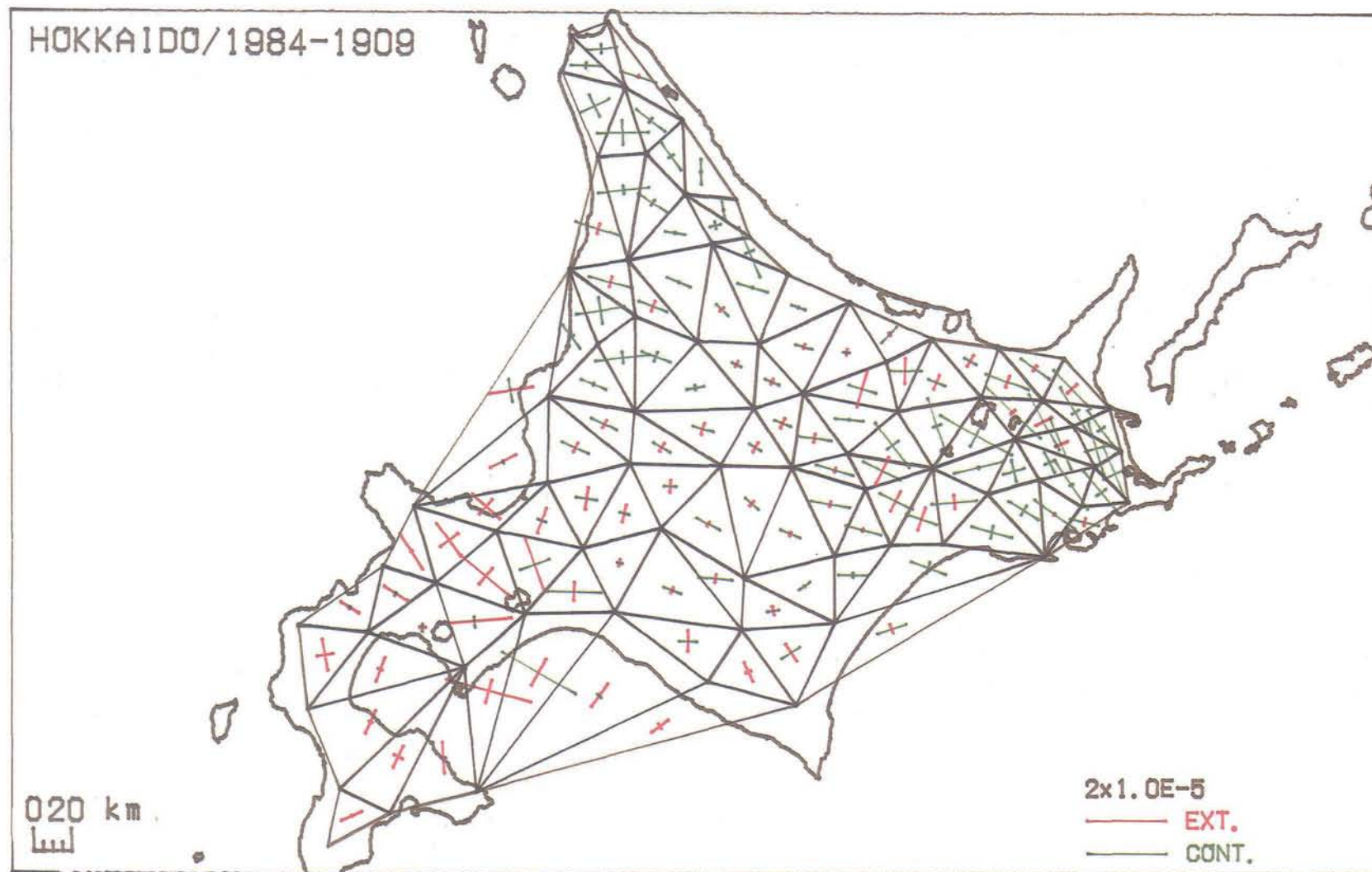


(b) 同期間の最大せん断歪の分布



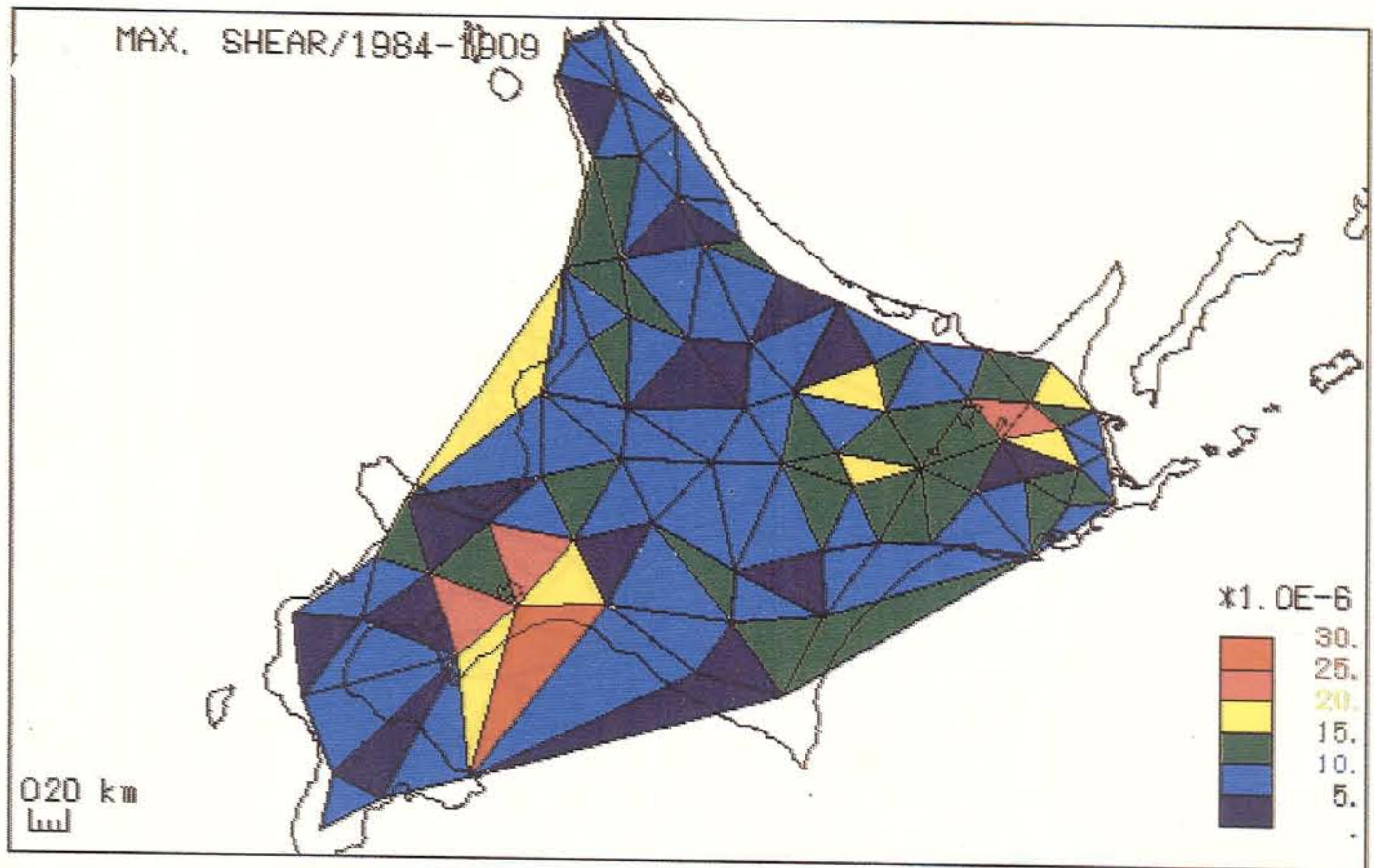
(c) 同期間の面積歪の分布

図1-2-1 つづき

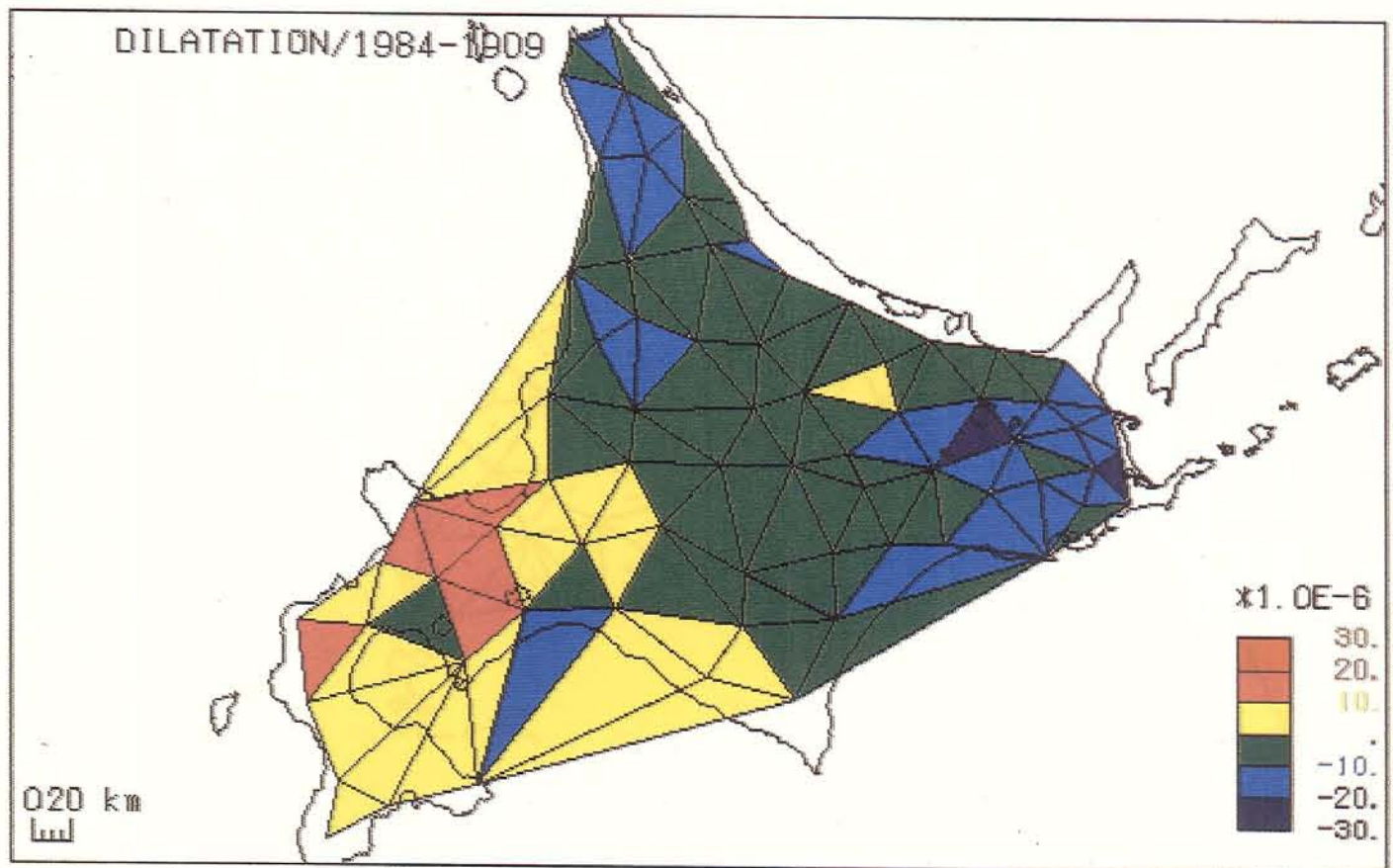


(d) 1909~'18年（明治・大正）と'82~84年（一次網）との比較による水平歪主軸

図 I - 2 - 1 つづき

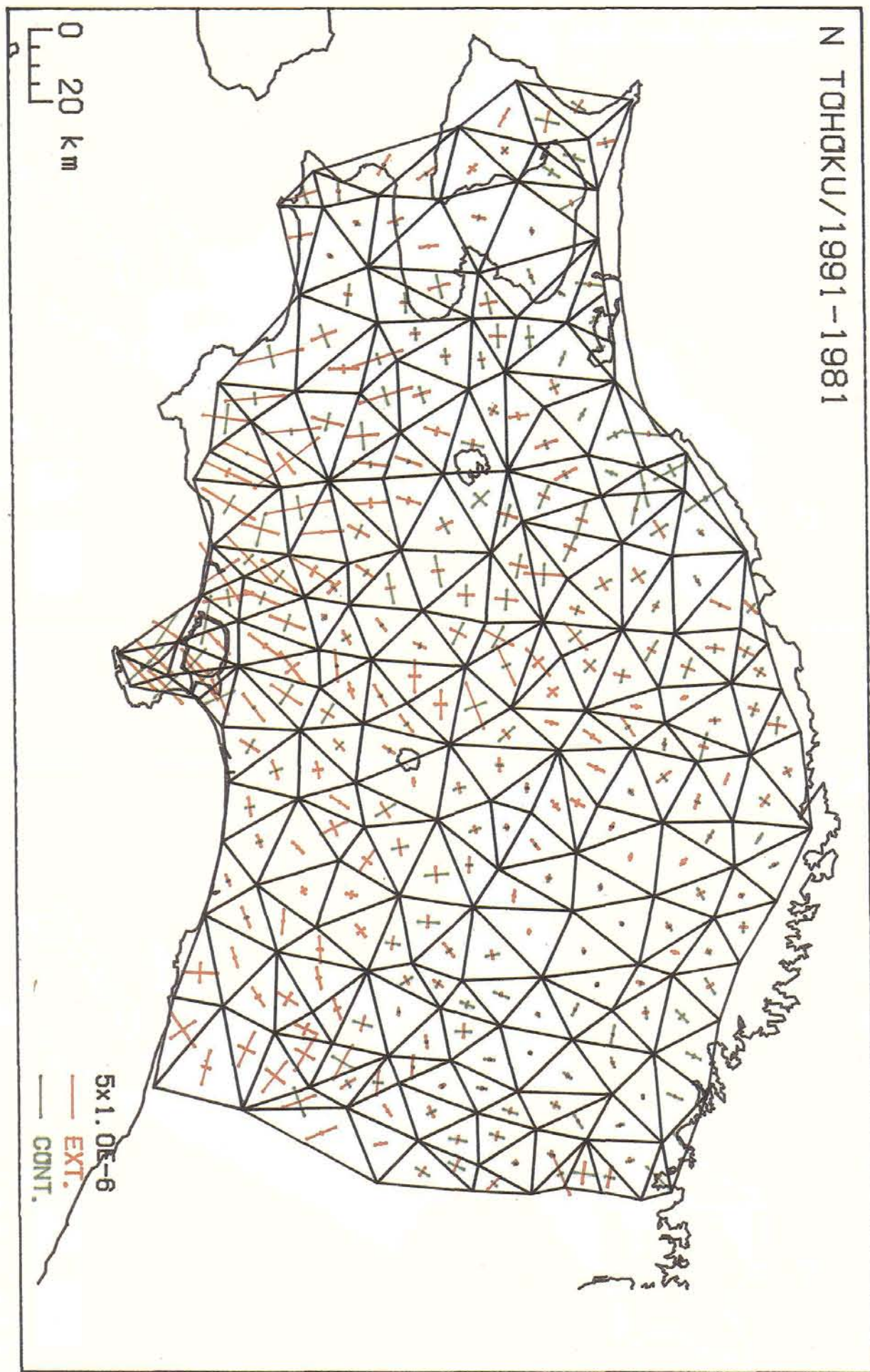


(e) 同期間の最大せん断歪の分布



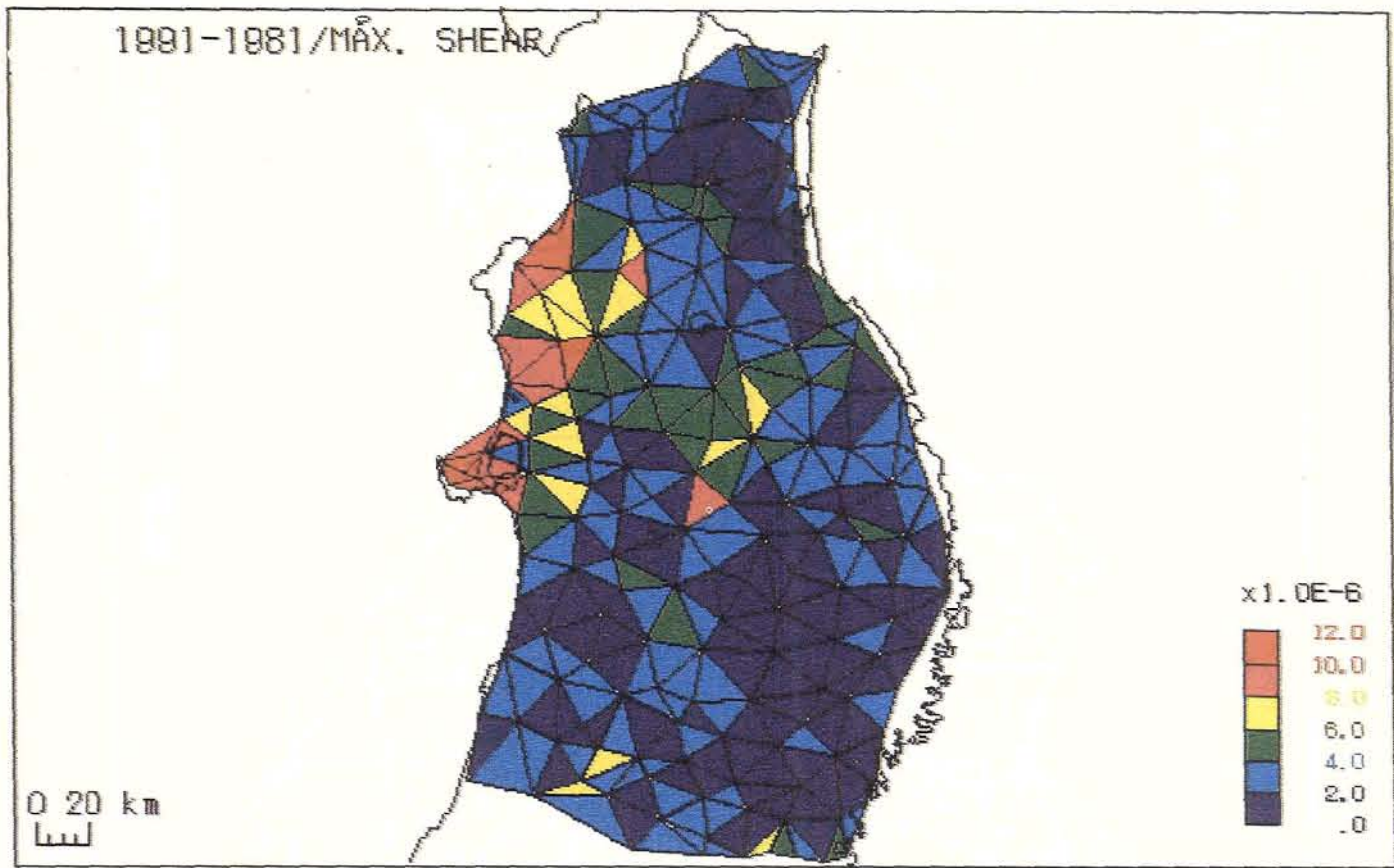
(f) 同期間の面積歪の分布

図 I - 2 - 1 つづき

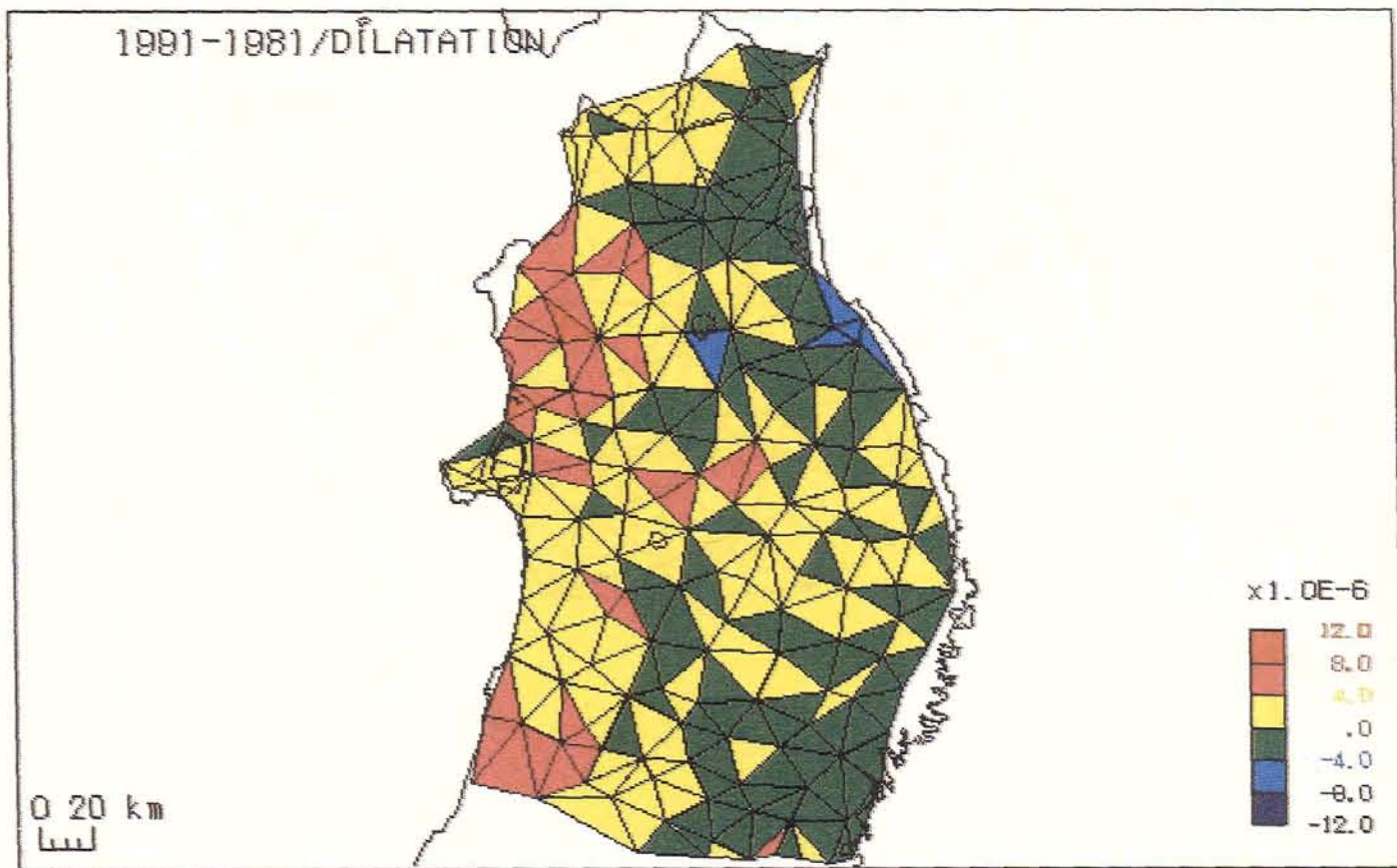


(a) 1981~'82年（一次網1回目）と'88~'91年（一次網2回目）との比較による水平歪主軸

図 I - 2 - 2 東北地方北部の水平歪（国土地理院による）

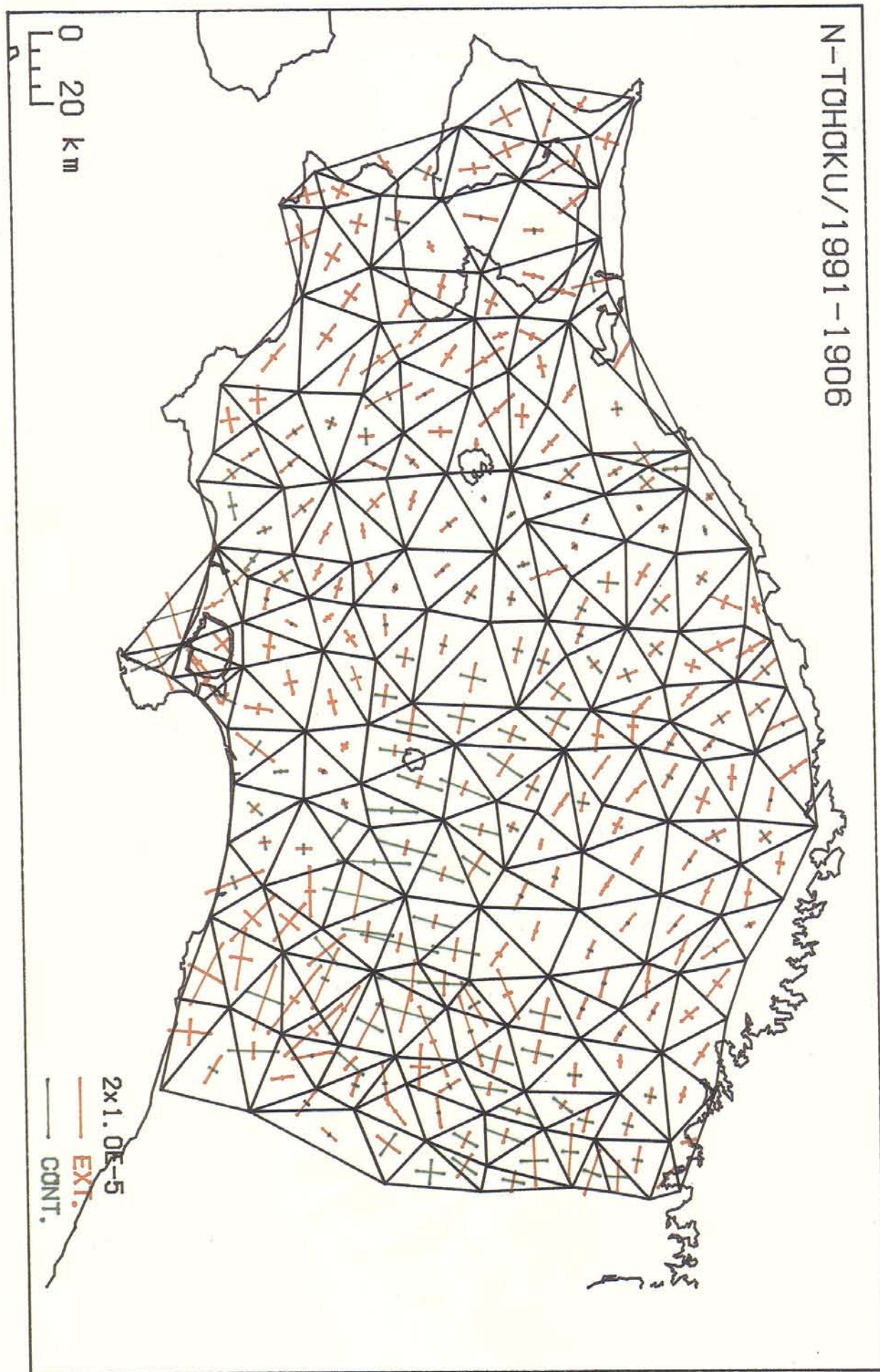


(b) 同期間の最大せん断歪の分布



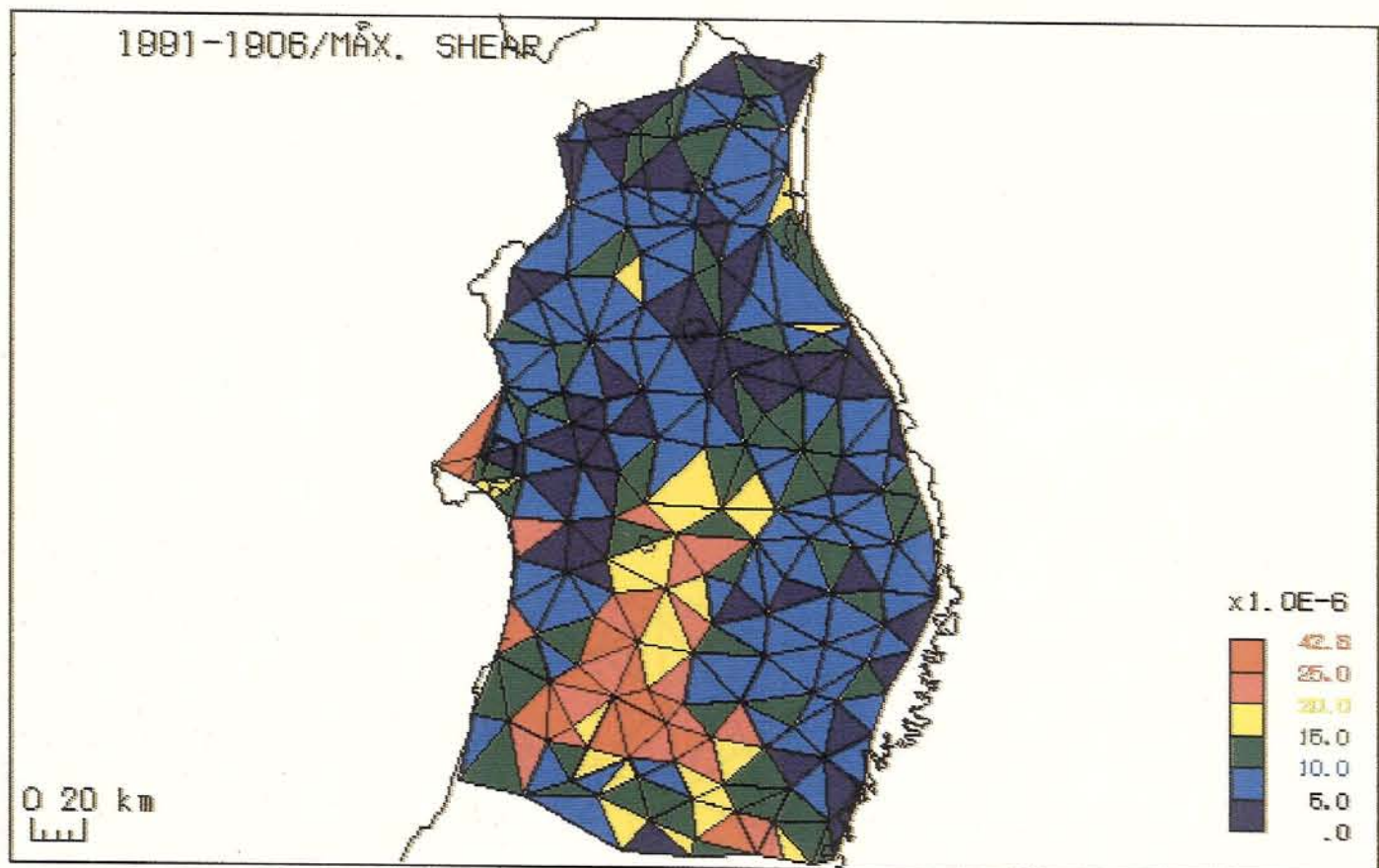
(c) 同期間の面積歪の分布

図 I - 2 - 2 つづき

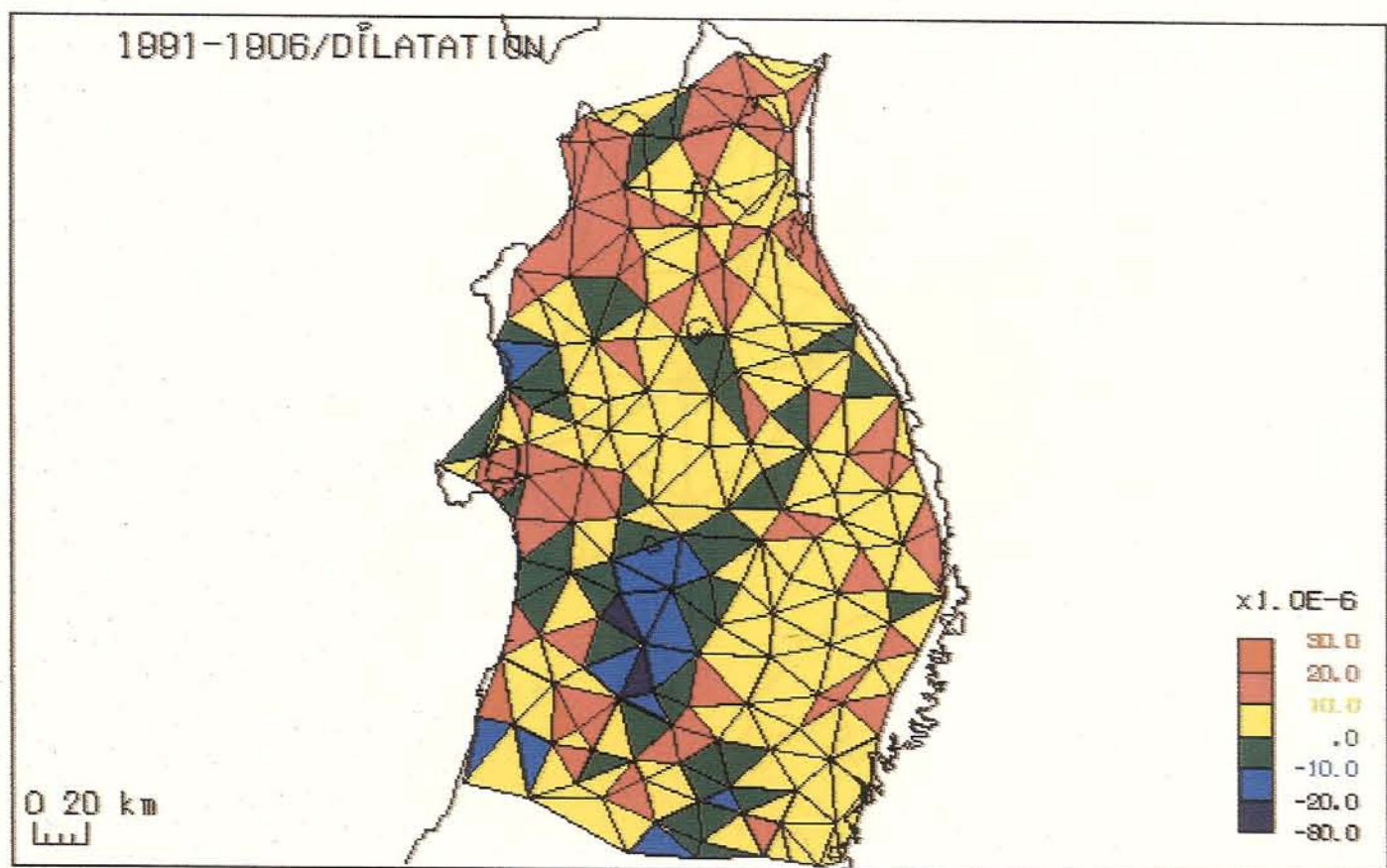


(d) 1906～'10年（明治）と'88～'91年（一次網2回目）との比較による水平歪主軸

図 I - 2 - 2 つづき

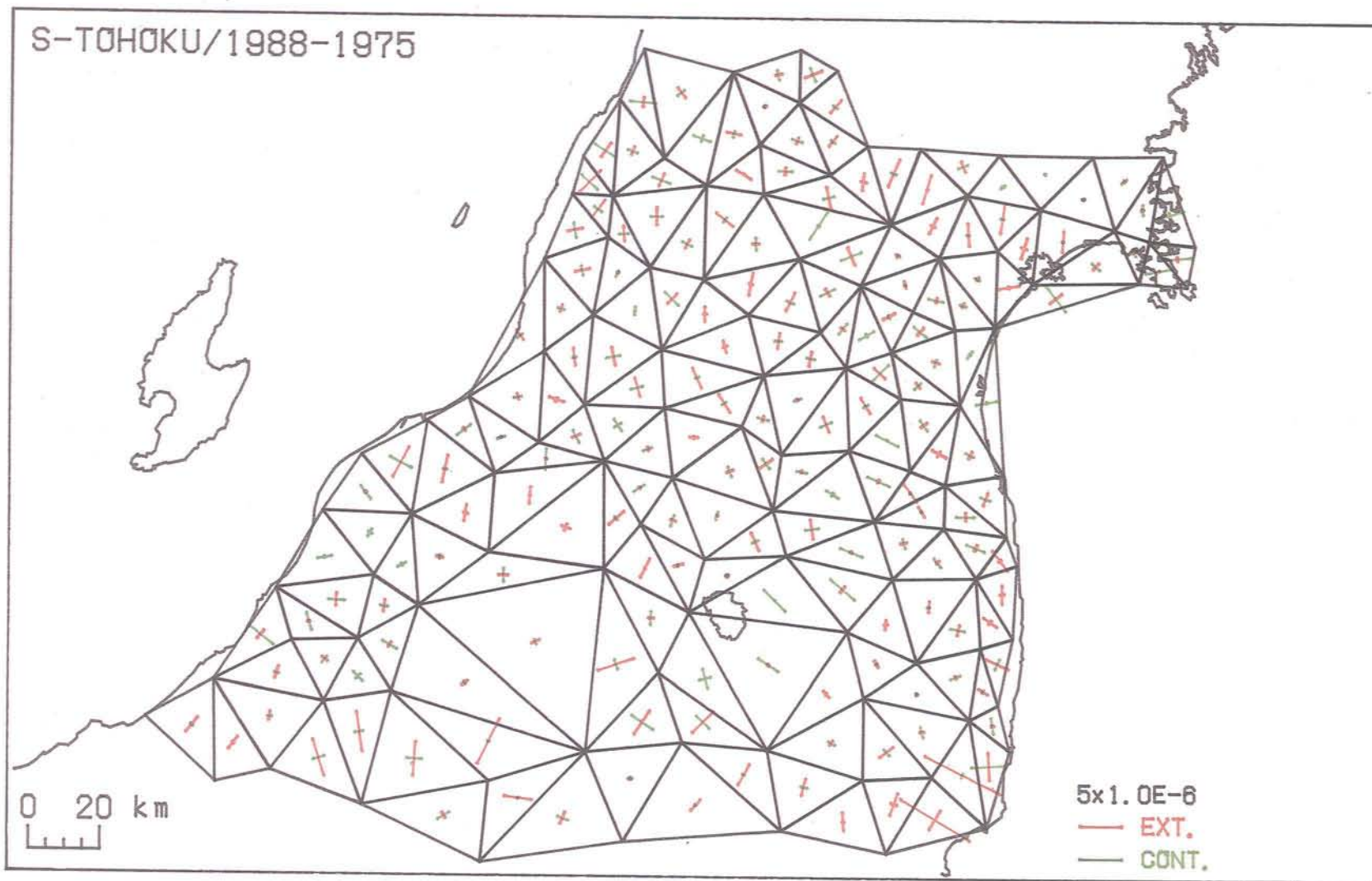


(e) 同期間の最大せん断歪の分布



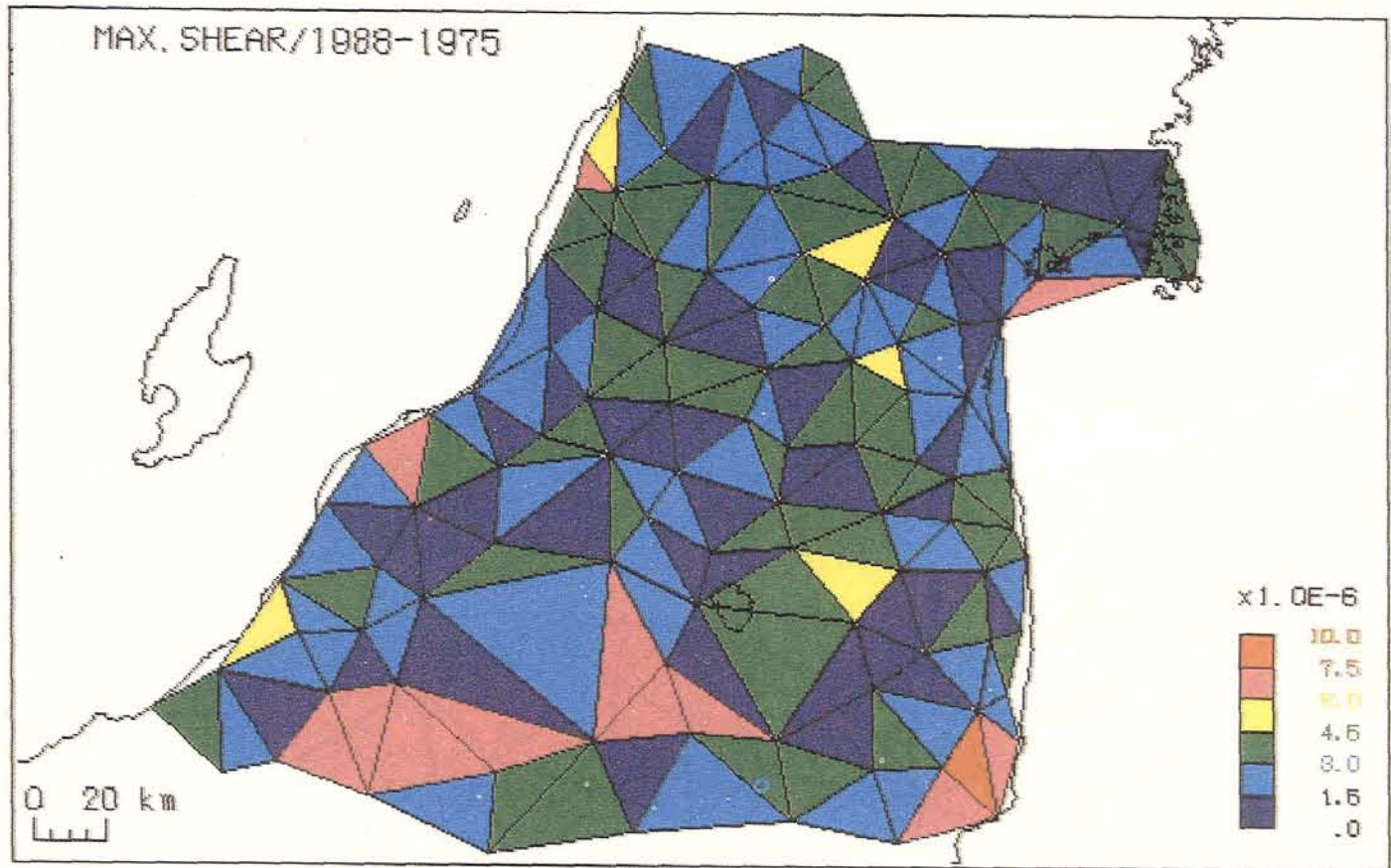
(f) 同期間の面積歪の分布

図 I - 2 - 2 つづき

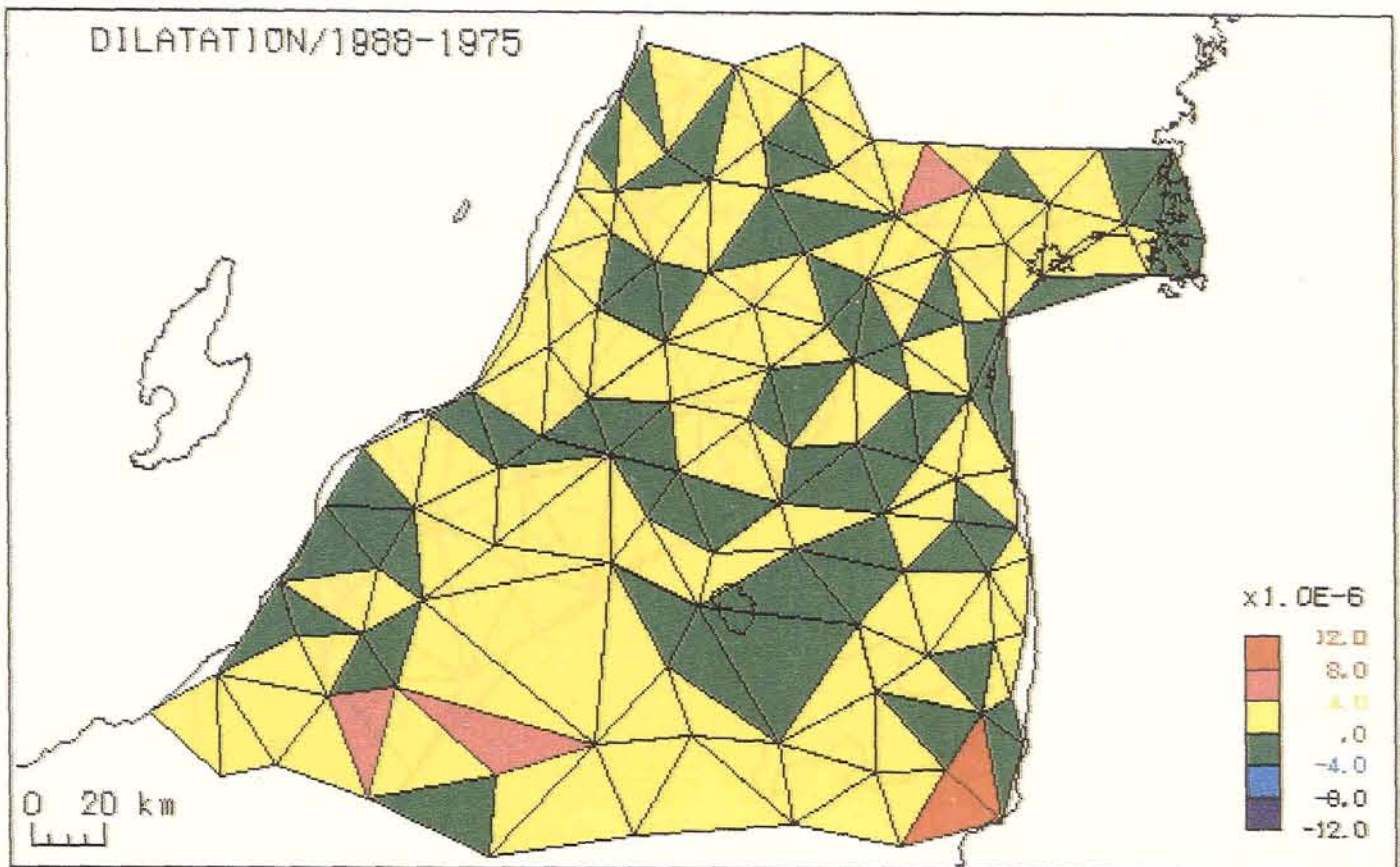


(a) 1975~'80年（一次網1回目）と'88~'91年（一次網2回目）との比較による水平歪主軸

図 I - 2 - 3 東北地方南部の水平歪（国土地理院による）

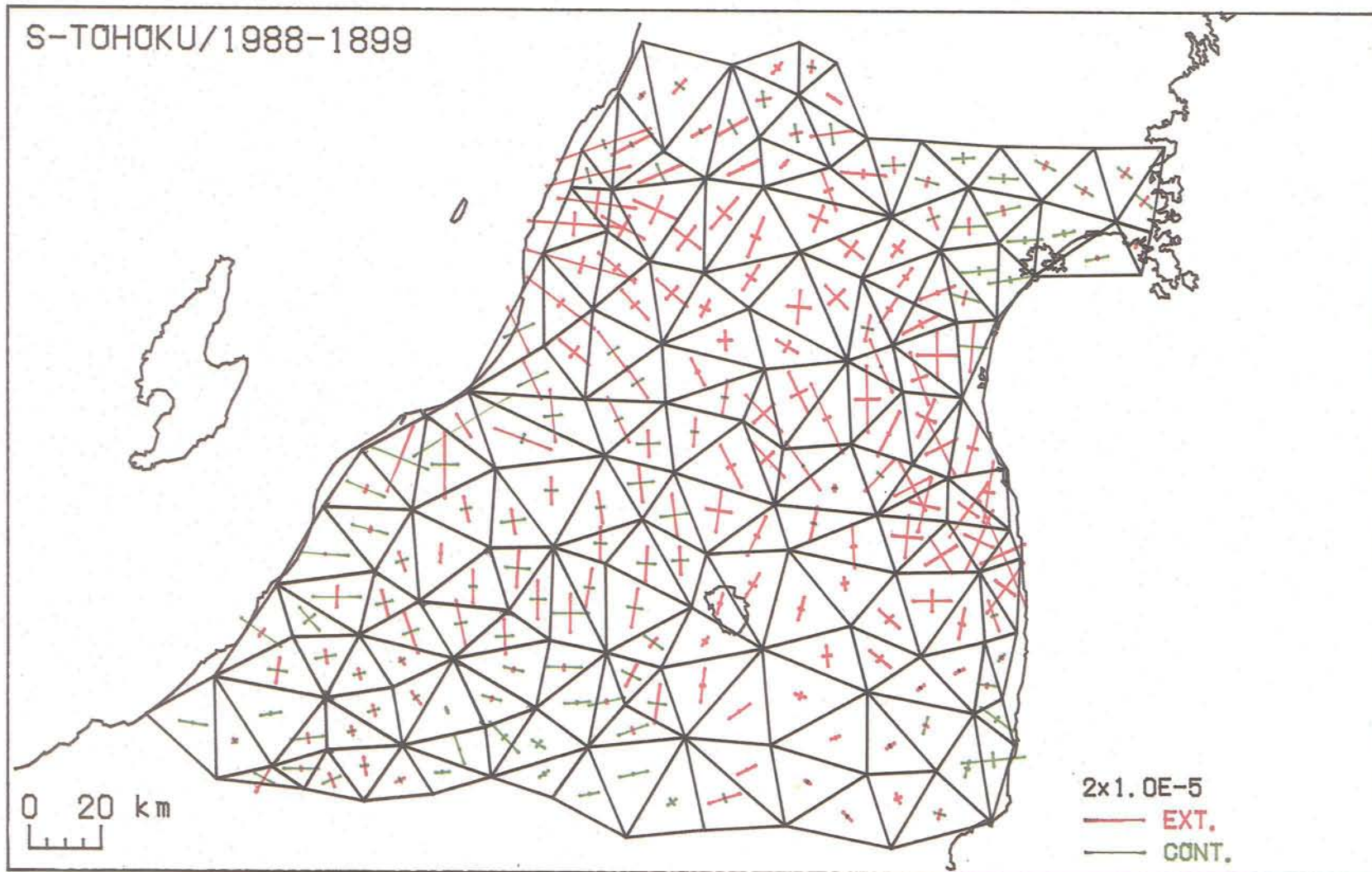


(b) 同期間の最大せん断歪の分布



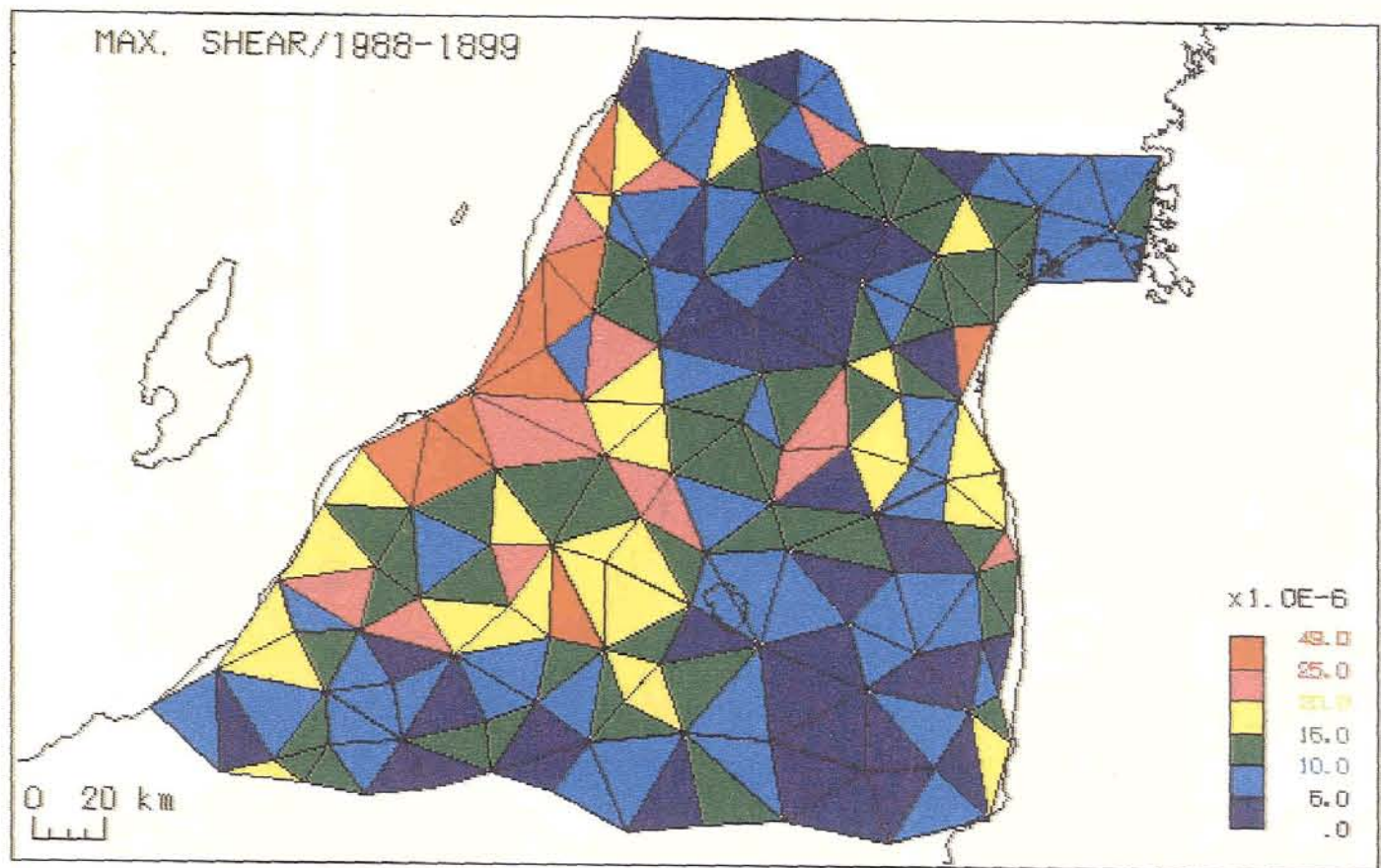
(c) 同期間の面積歪の分布

図 I - 2 - 3 つづき

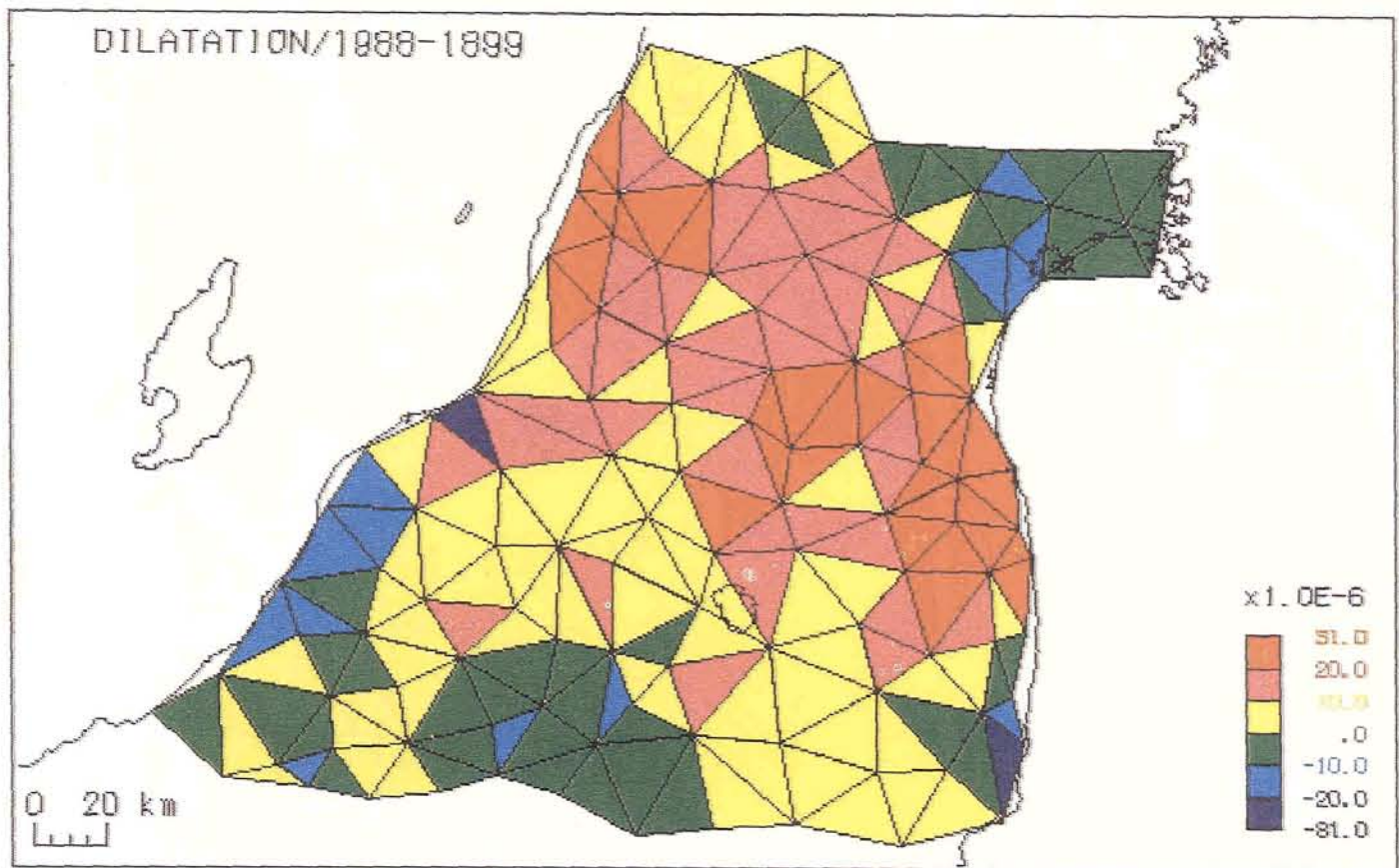


(d) 1899~1910年（明治）と'88~'91年（一次網2回目）との比較による水平歪主軸

図1-2-3 つづき



(e) 同期間の最大せん断歪の分布



(f) 同期間の面積歪の分布

図 I - 2 - 3 つづき

1983.5~87.5 — 1978.9~81.12

単位 cm

◎ 仮不動点
 (日本水準原点)
 (付17 柏崎)
 (固定点 鼠ヶ関)
 (9400 内浦)

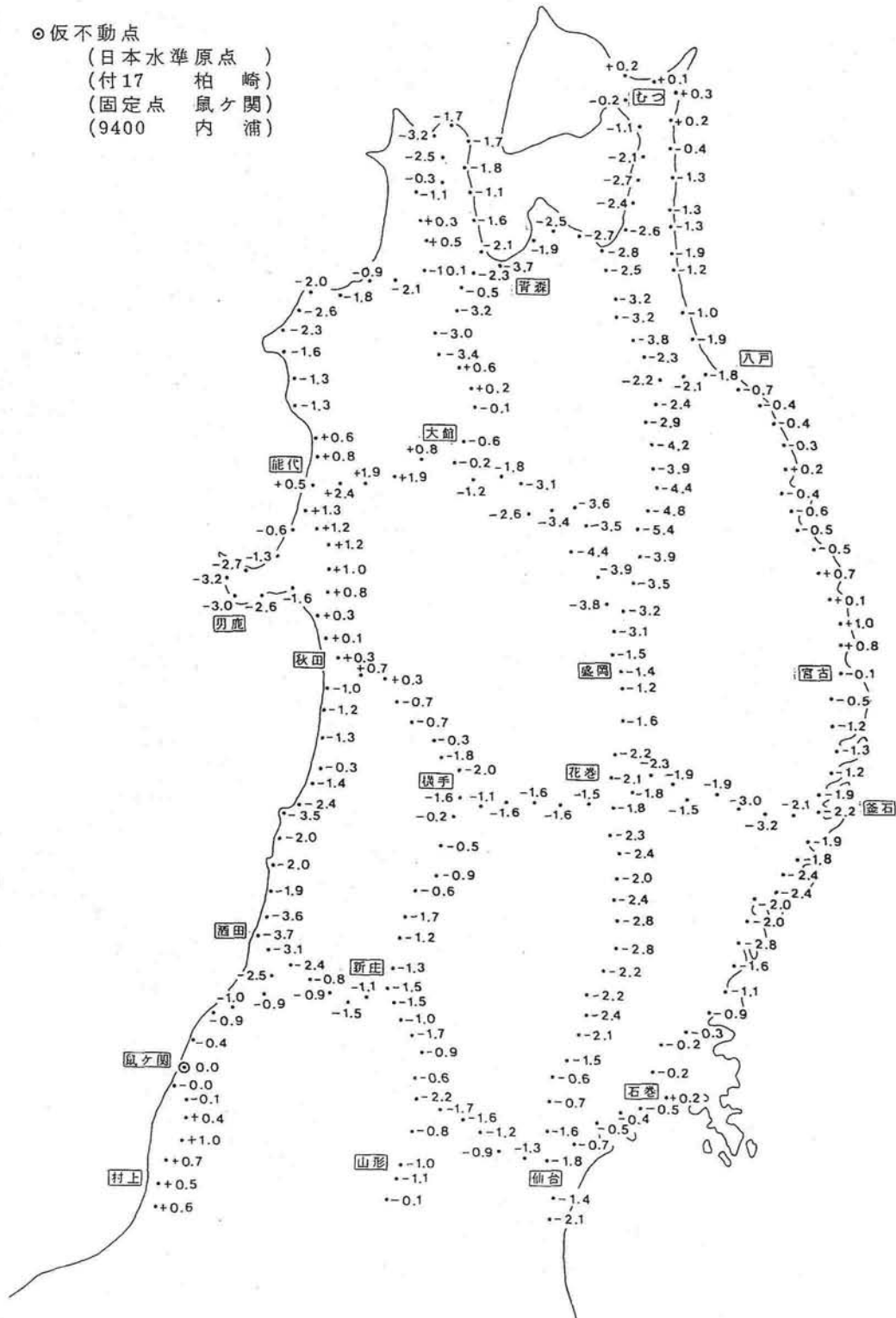


図 I - 2 - 5 東北地方北部の上下変動('83~'87の観測, '78~'81との比較)(国土地理院による)

1983.5~87.5 ——— 1978.9~81.12

単位 cm

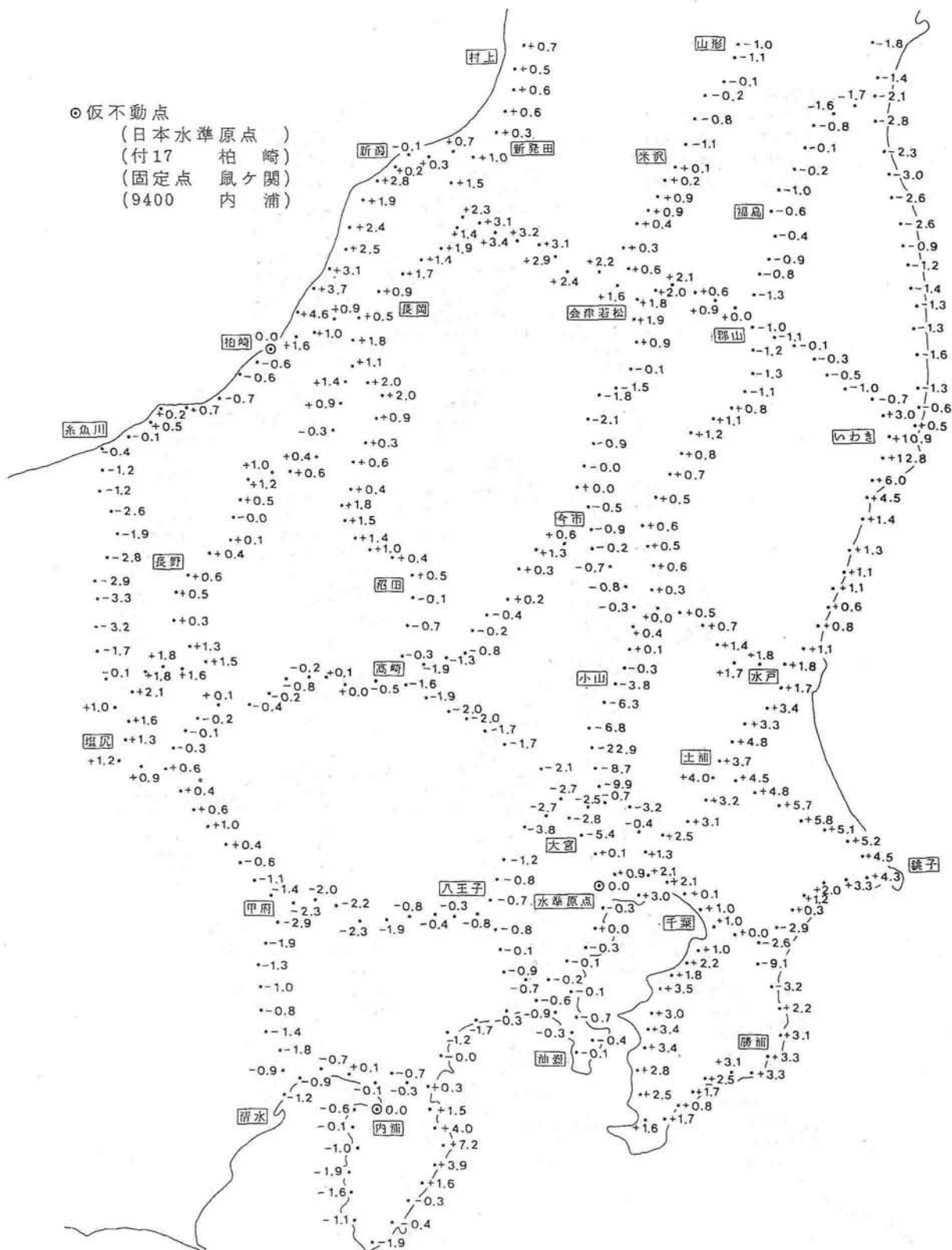


図 I - 2 - 6 東北地方南部の上下変動('83~'87の観測, '78~'81との比較)(国土地理院による)

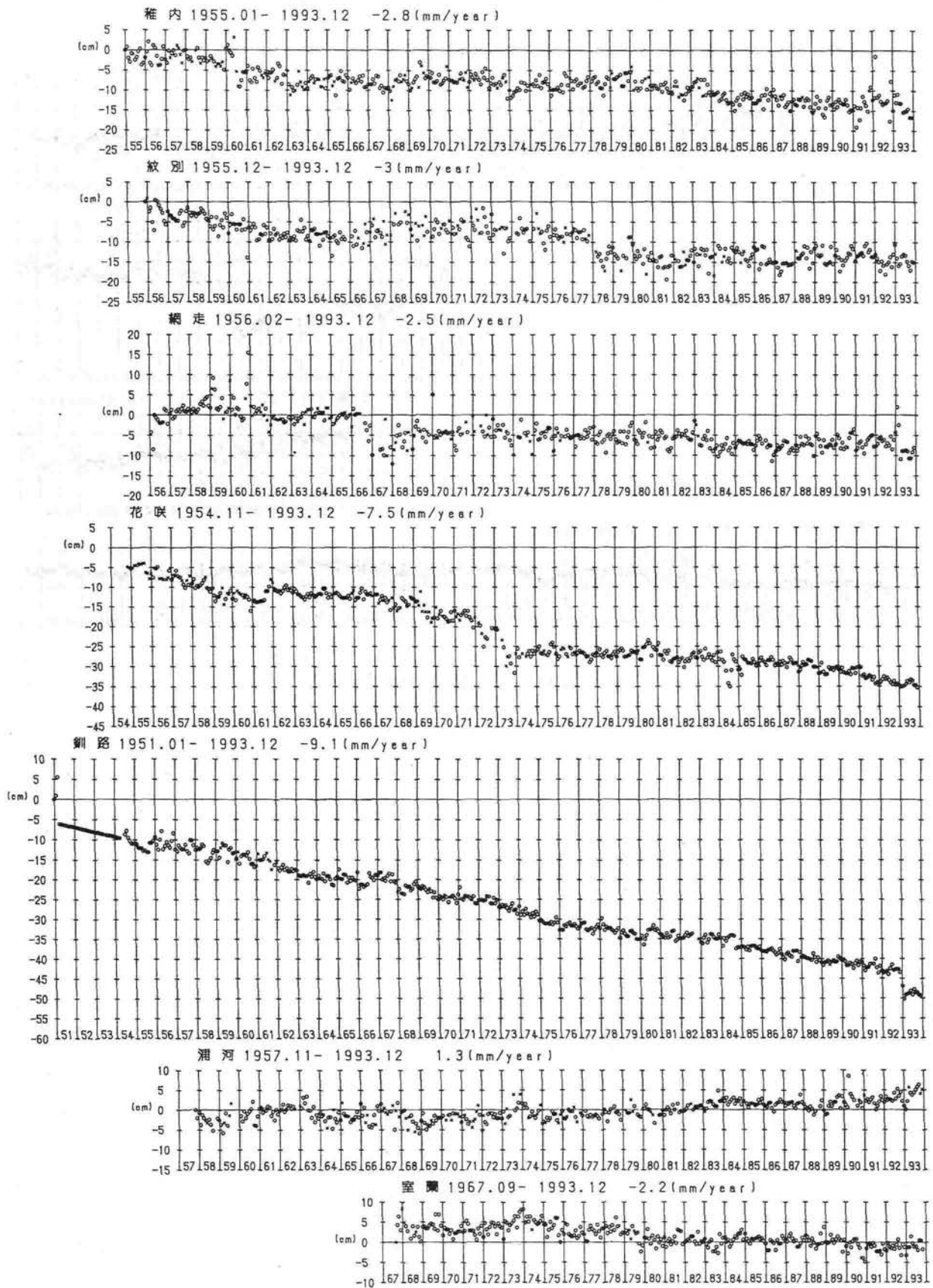


図 I - 2 - 7 加藤・津村の方法による北海道・東北地方の験潮場の上下変動(国土地理院による) データは海岸昇降検知センター「潮位年報」による。

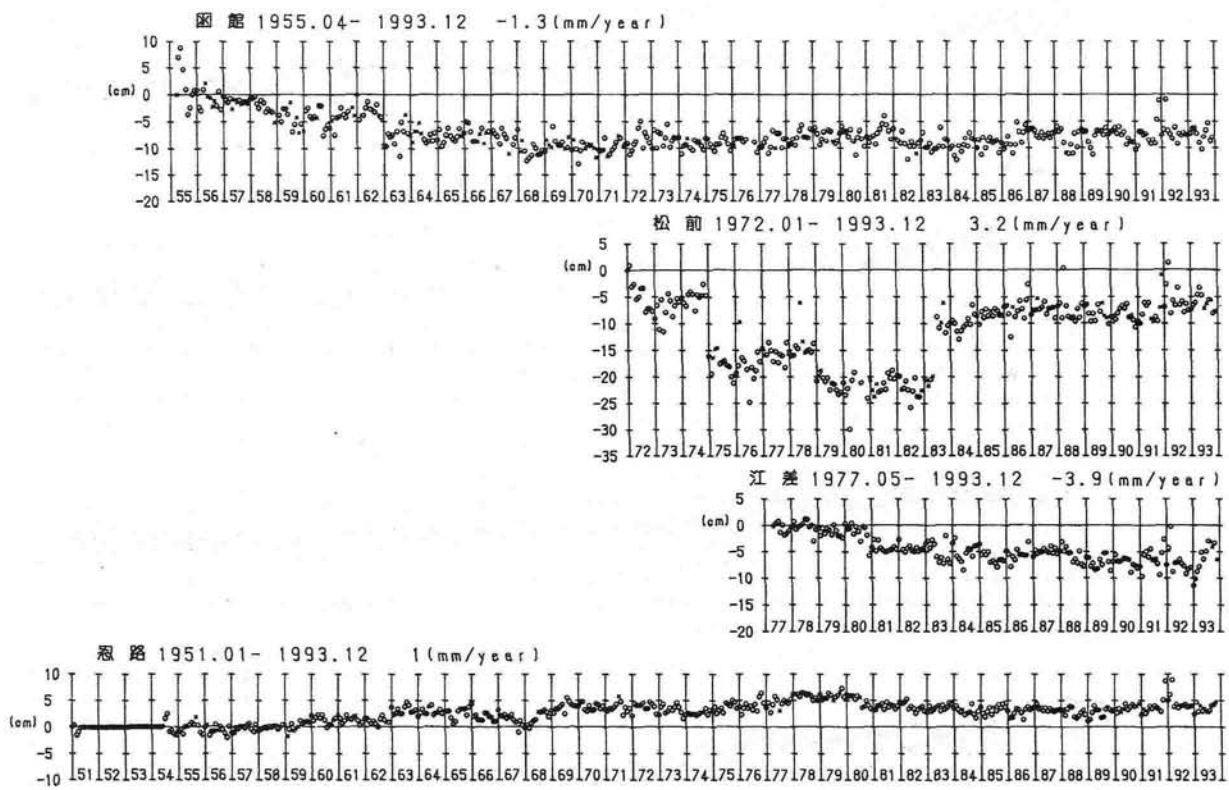


図 I - 2 - 7 つづき

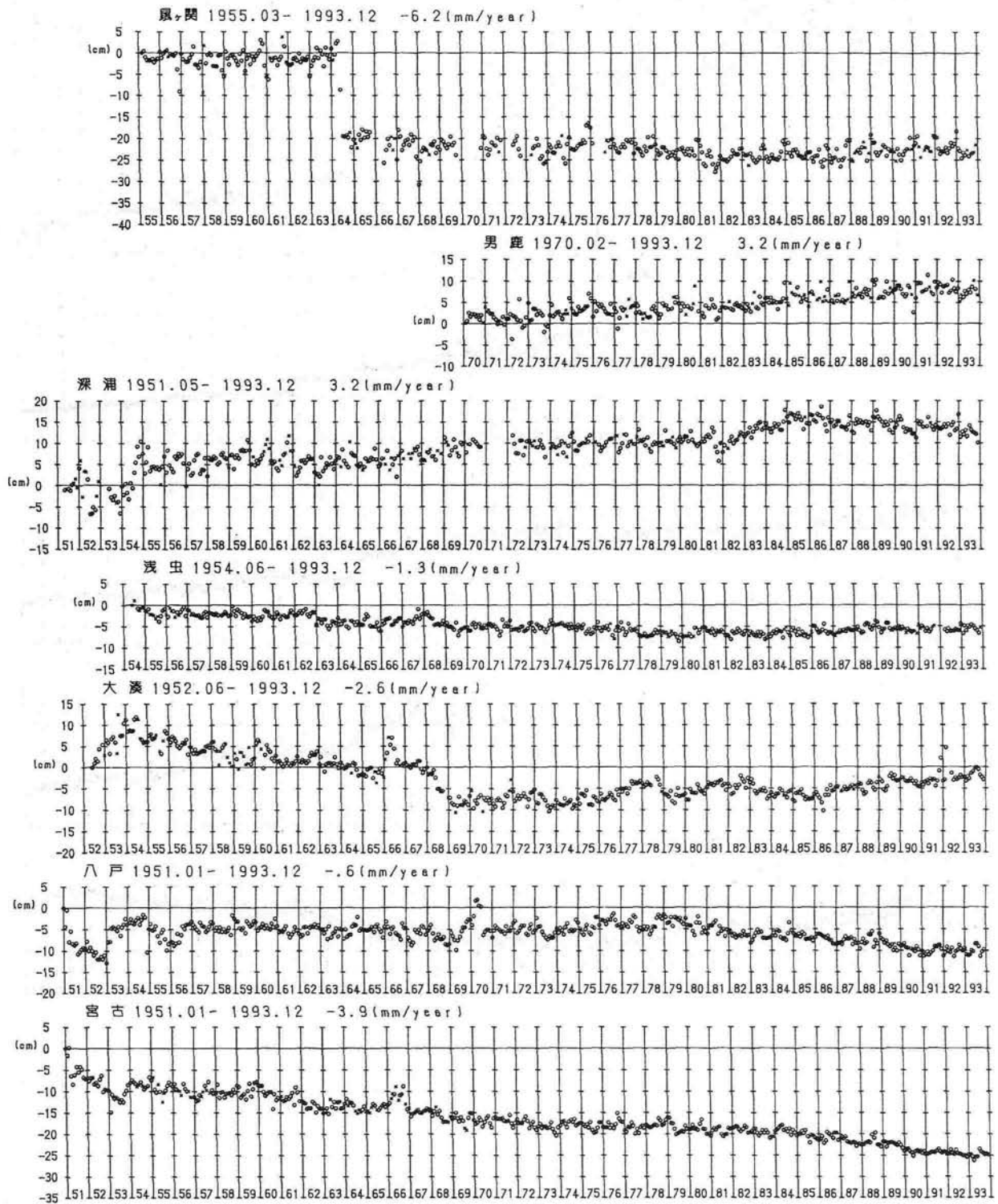


図 I - 2 - 7 つづき

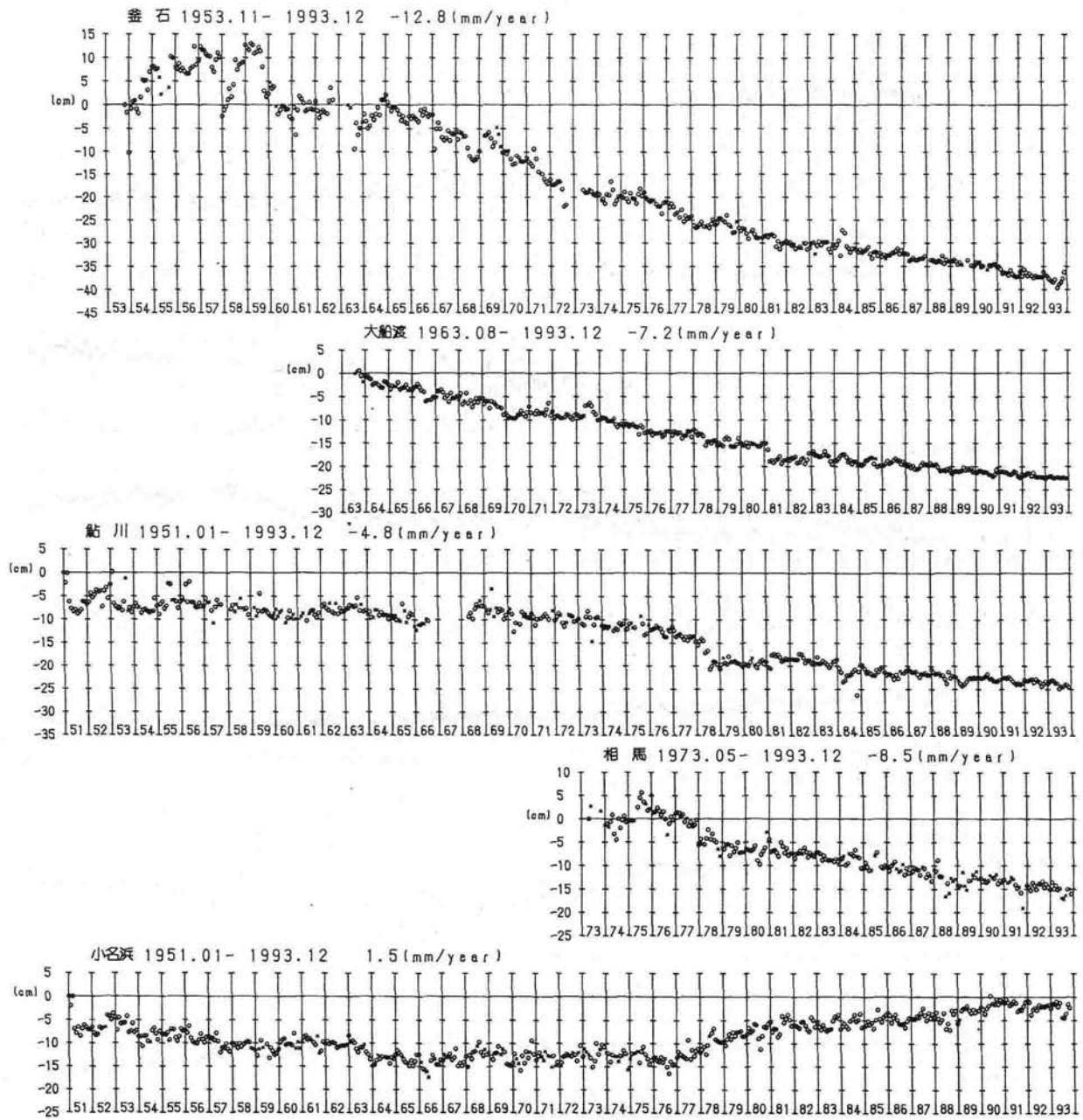


図 1-2-7 つづき

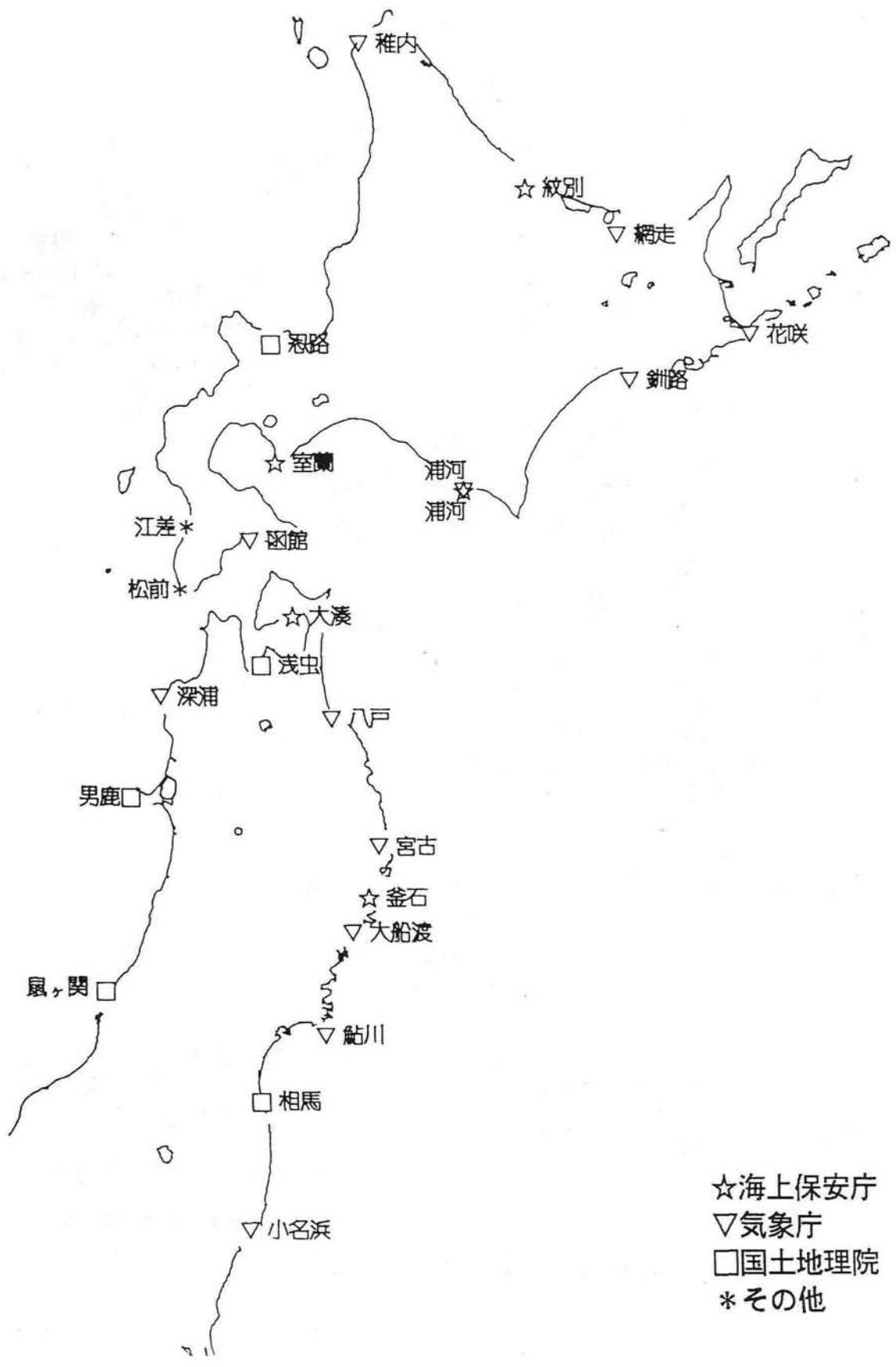


図 I - 2 - 7 つづき (験潮場位置図)

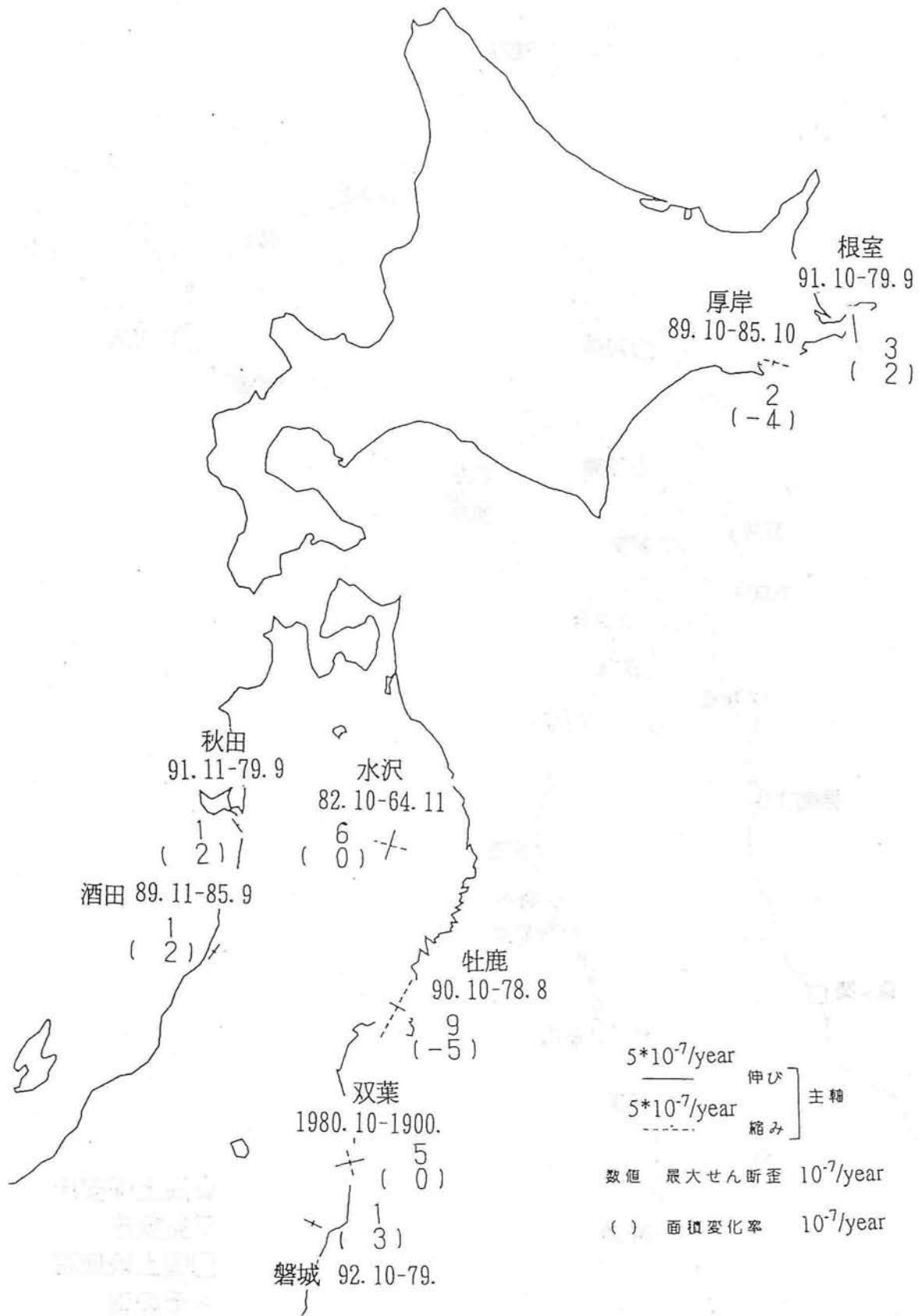


図 I - 2 - 8 放射・菱形基線観測結果一覧，根室，厚岸，秋田，酒田，水沢，牡鹿，磐城，双葉（国土地理院による）

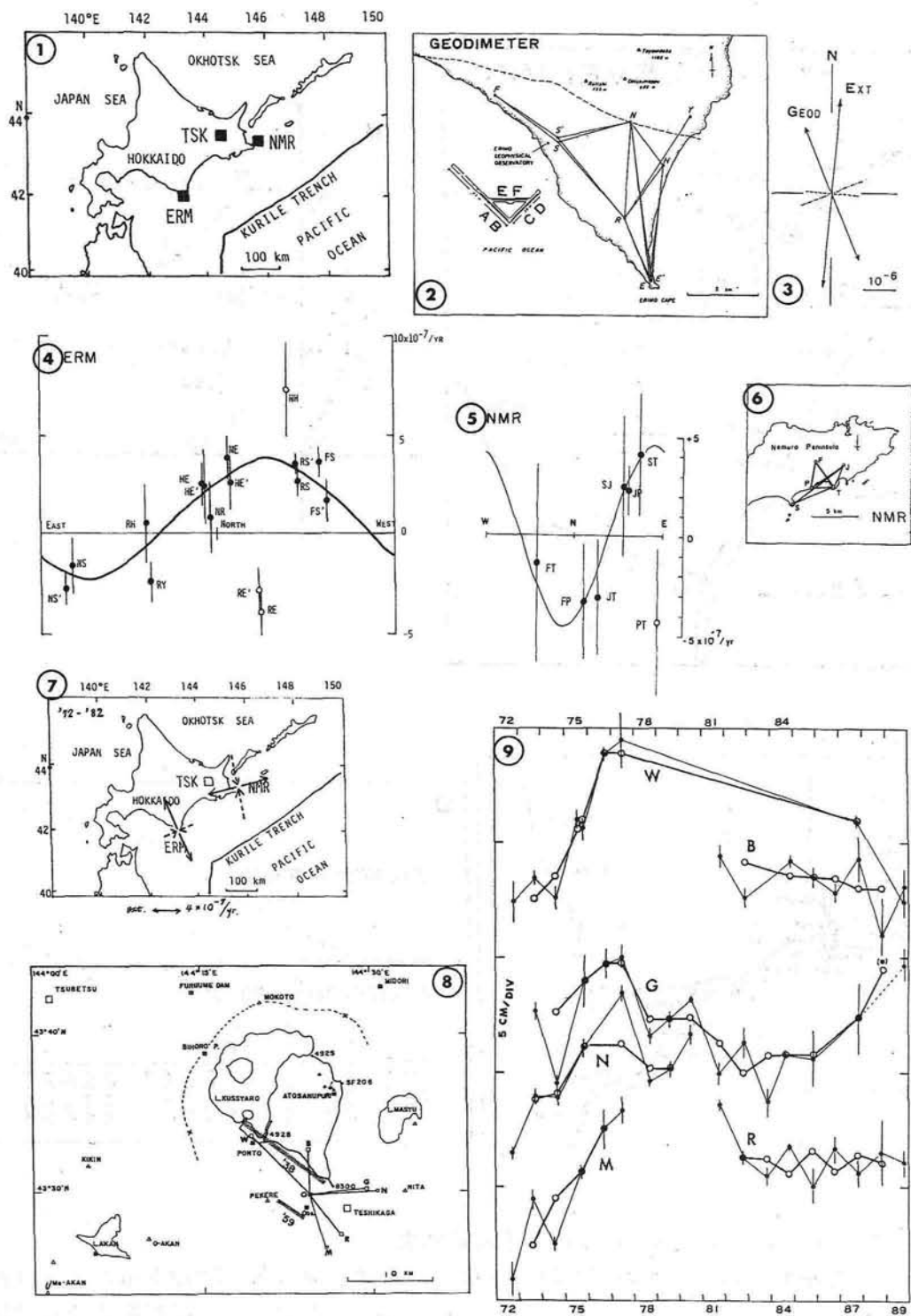


図 1-2-9 根室、弟子屈、えりもにおける光波測量。

① 観測網位置図。ERM (えりも), TSK (弟子屈), NMR (根室)。② えりもネットとえりも地殻変動観測所位置および坑道形状。③ 1972年から1982年までの観測坑道の伸縮計による積算主歪 (EXT) と光波測量による結果 (Geod)。④ えりもネットの各測線の歪変化率と方位の関係。⑤ 根室ネットの各測線の歪変化率と方位の関係。⑥ 根室ネット。⑦ えりもと根室の1972年から1982年までの積算主歪。⑧ 弟子屈ネット。⑨ 弟子屈ネットの各測線の長さの変化, '72年以降'77年まで全体に伸びていた。これは, 1973年根室半島沖地震の余効変動のように見える。その後全体に縮みに転じている。

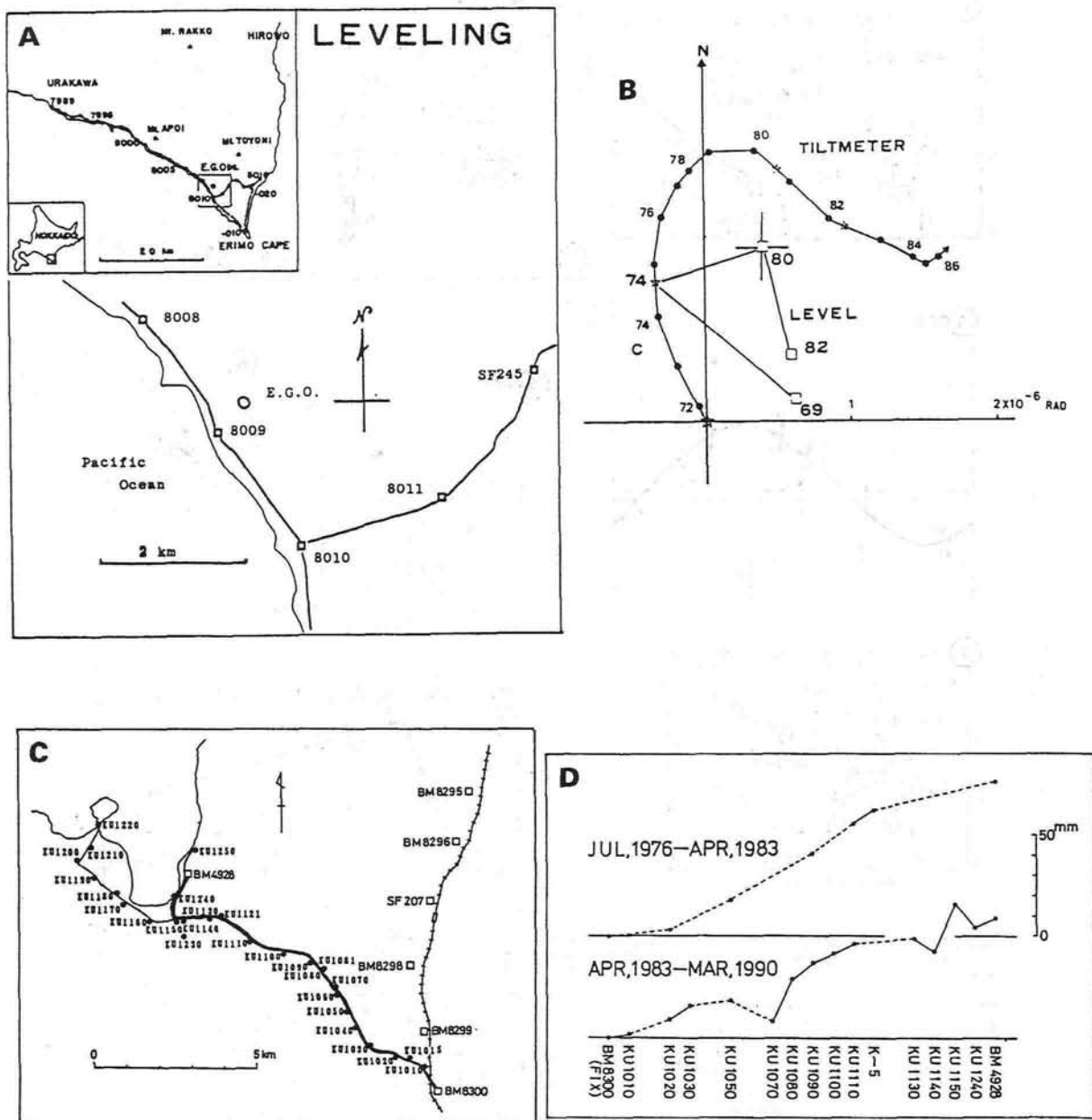


図 1-2-10 弟子屈, えりもにおける水準測量結果。

(A) えりも地殻変動観測所周辺の国土地理院の水準点分布図。8010を頂点にほぼ直交する4鎖部を'69, '74, '80, '82年に測定してある。(B) 水準測量と, 観測坑道の水管傾斜計による傾動ベクトルの比較。先の歪と同様坑道内の連続観測と測地測量の結果がよくあっている。(C) 弟子屈の水準点分布図。□が国土地理院の水準点。●が北海道大学理学部によるもの。太い線の路線が'76, '83, '90年に測定されている。(D) その結果, 屈斜路湖畔が約1 cm/年でBM8300に対して隆起を続けている。

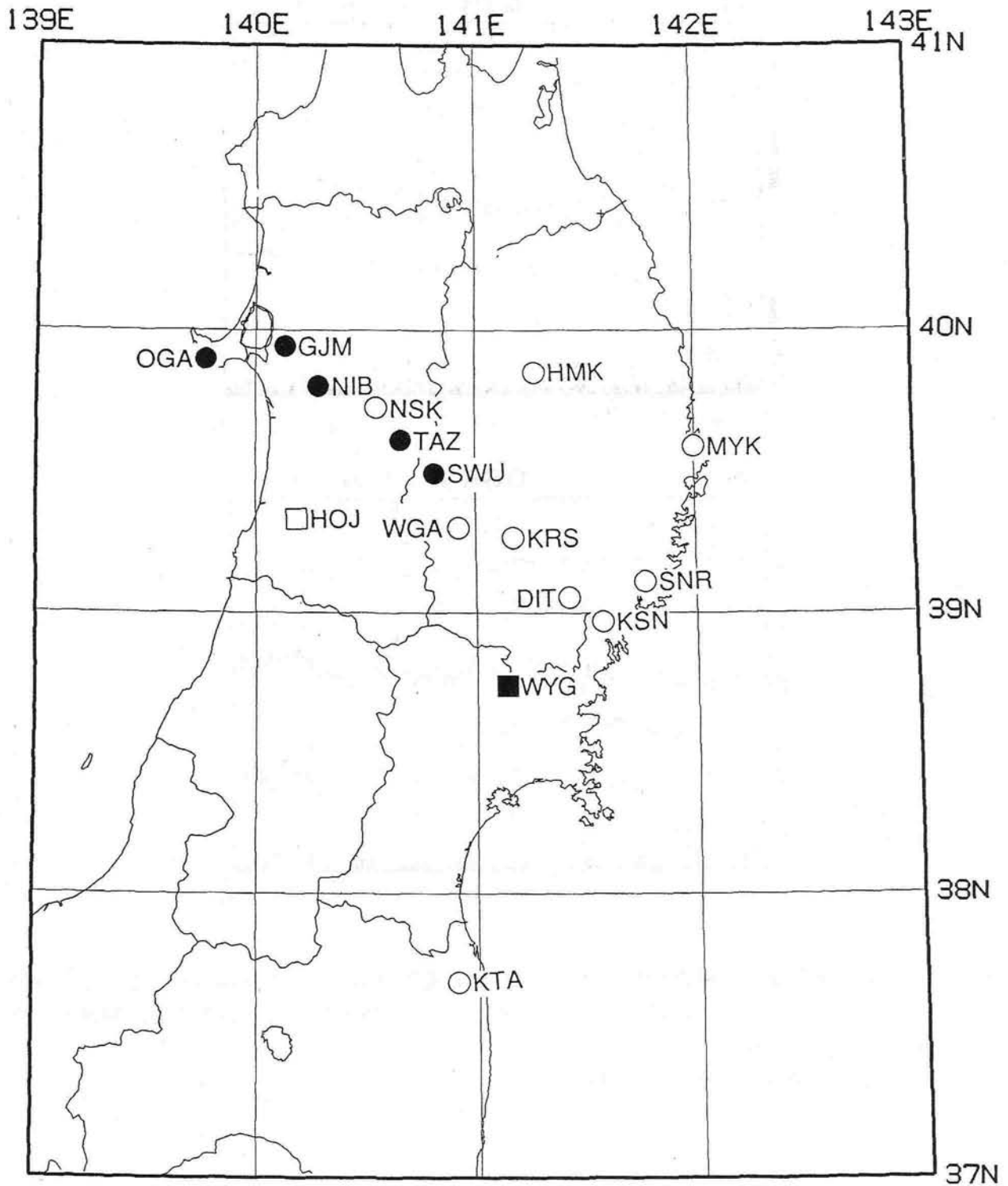


図 I - 2 - 11 東北地方の地殻変動観測点配置図。

●は横坑内の伸縮計、水管傾斜計および体積歪計による歪・傾斜観測を行っている観測点、○は横坑内の伸縮計、水管傾斜計による歪・傾斜観測を行っている観測点、□は体積歪計による歪観測を行っている観測点、■は体積歪計および孔井式傾斜計による歪・傾斜観測を行っている観測点をそれぞれ示す。

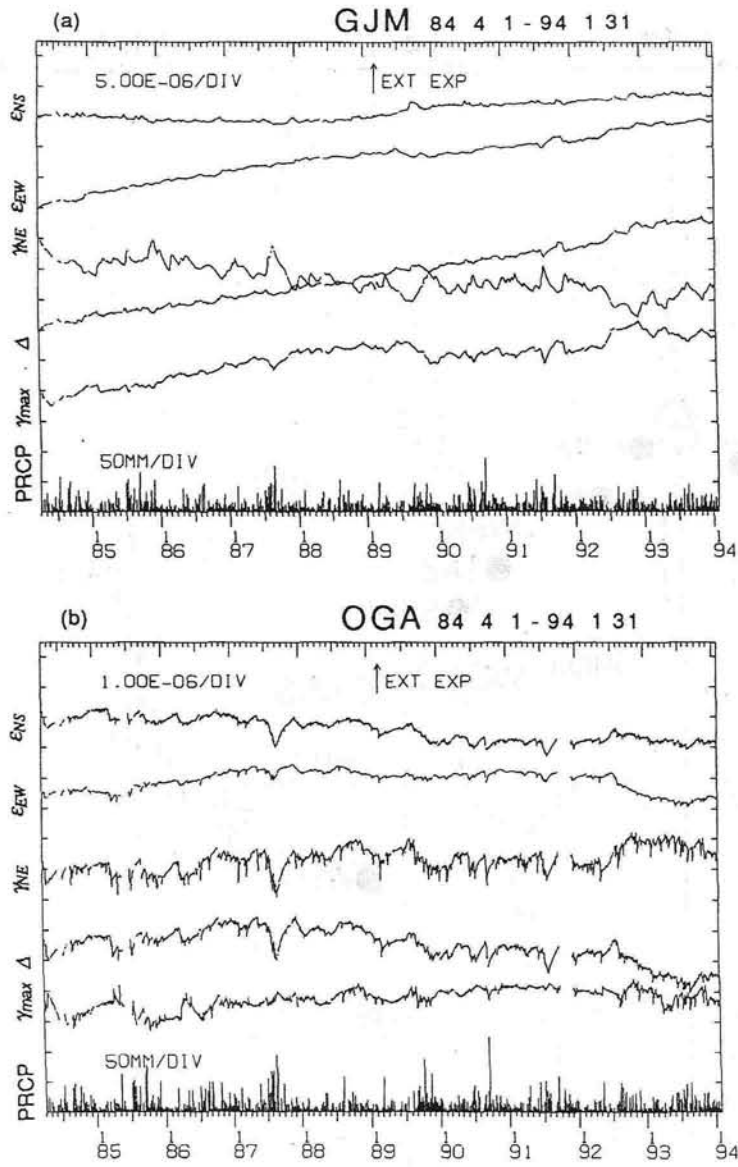


図 1 - 2 - 12 東北地方の地殻変動観測点における石英管伸縮計により観測された歪変化（1984年4月～1994年1月）。各成分ともこの期間における年周変動の平年値を求め、観測データから差し引いてある。
 (a) 五城目 (GJM), (b) 男鹿 (OGA)

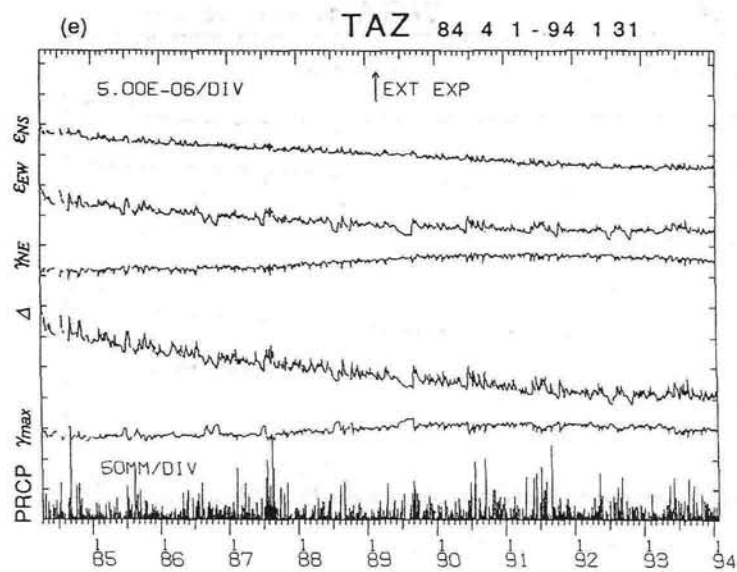
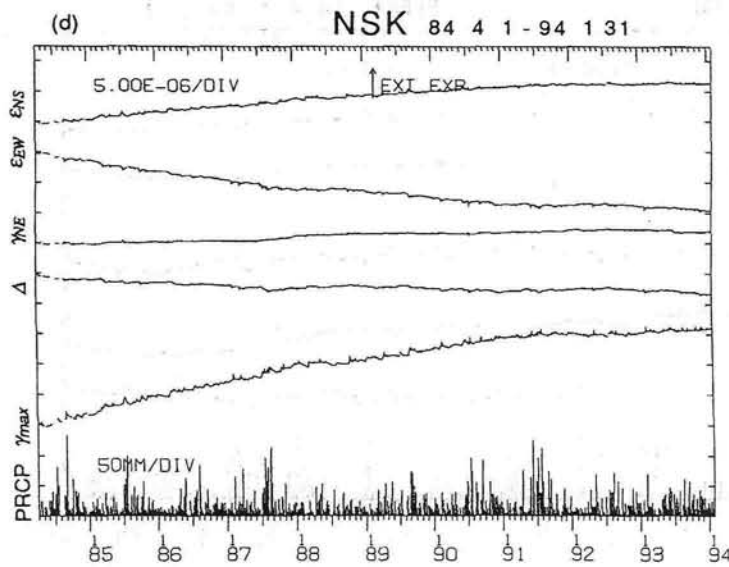
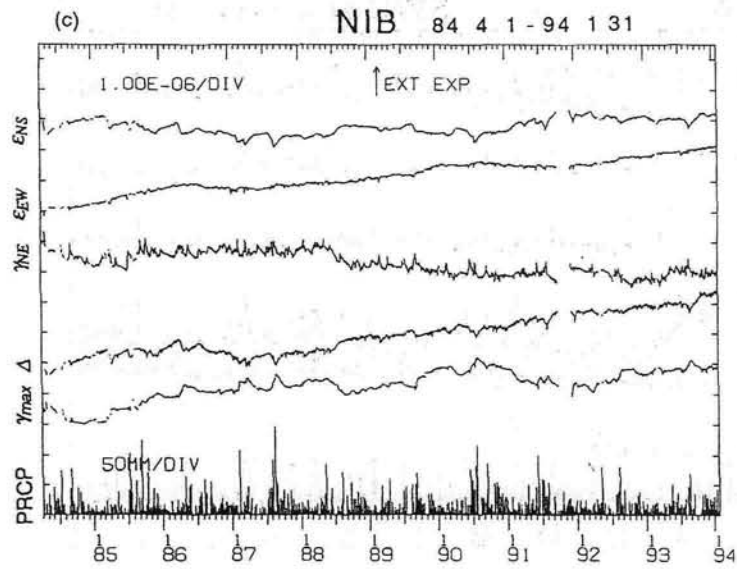


図 I - 2 - 12 つづき (c) 仁別 (NIB), (d) 西木 (NSK), (e) 田沢湖 (TAZ)

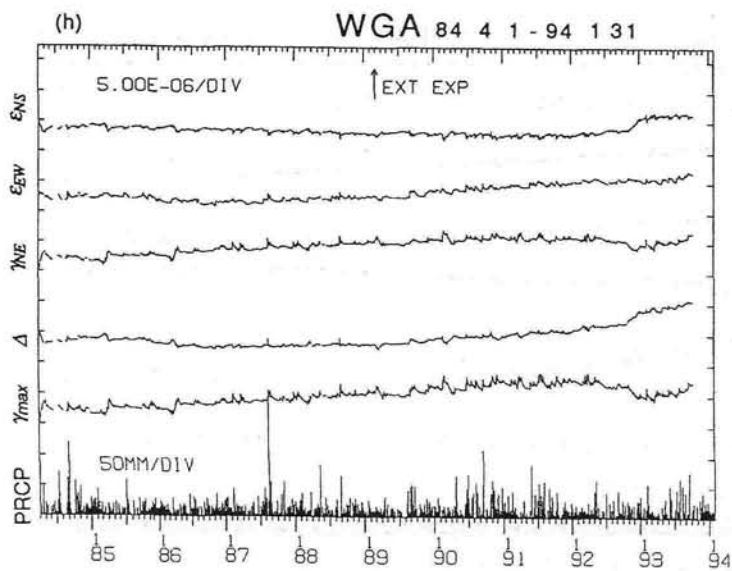
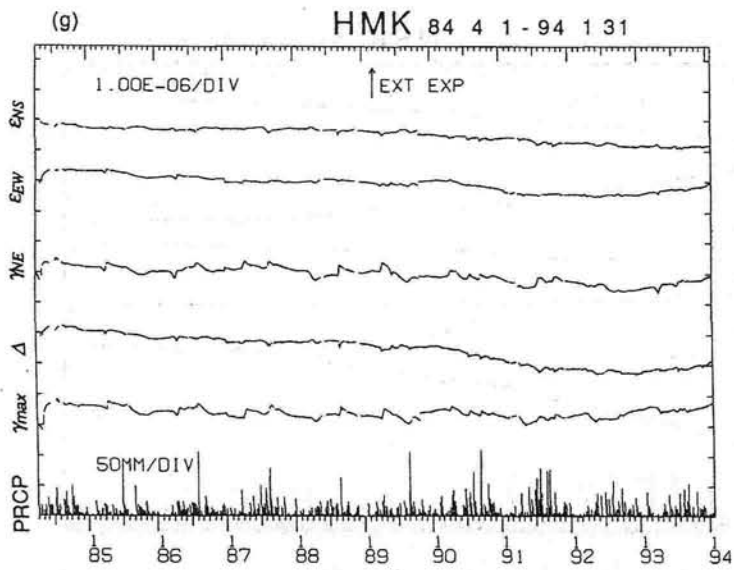
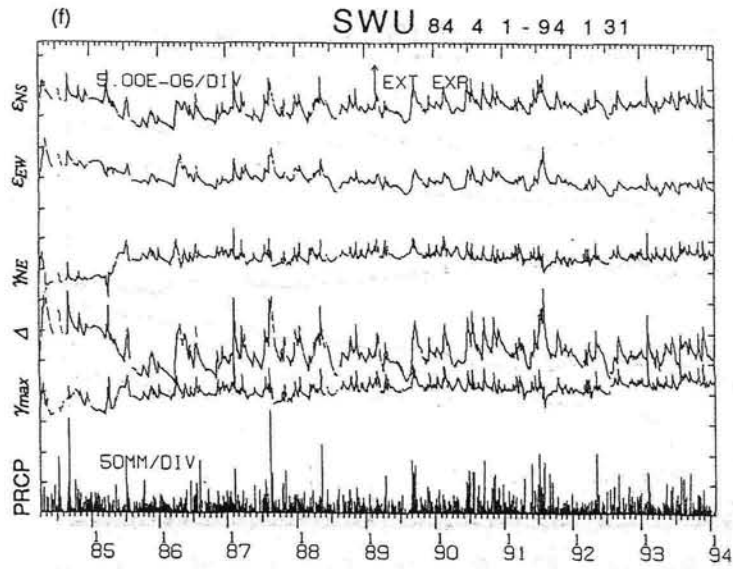


図 1 - 2 - 12 つづき (f) 沢内 (SWU), (g) 姫神 (HMK), (h) 和賀 (WGA)

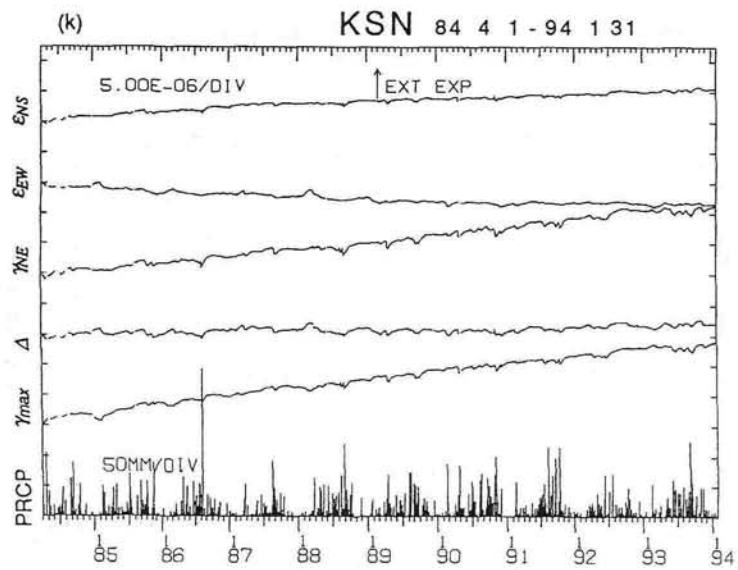
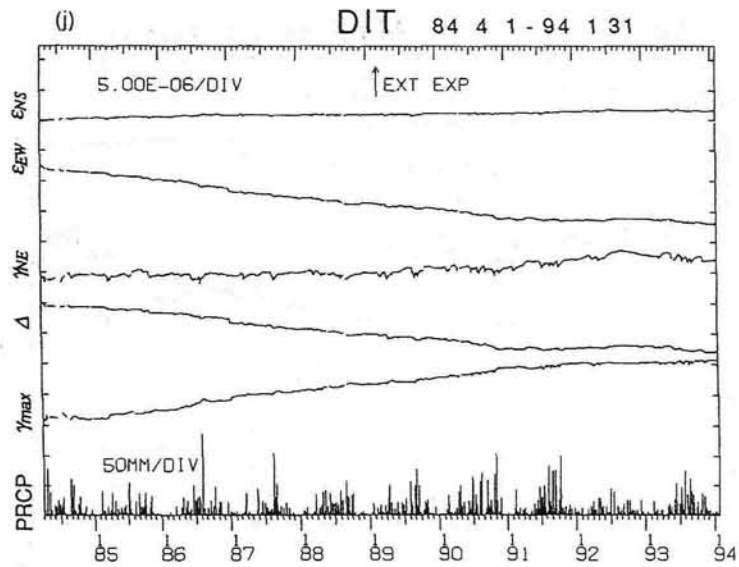
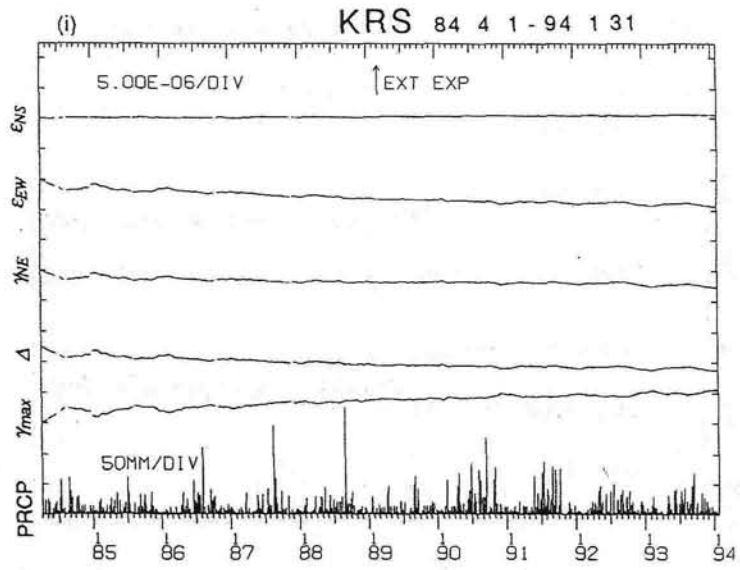


図 I - 2 - 12 つづき (i) 黒沢尻 (KRS), (j) 大東 (DIT), (k) 気仙沼 (KSN)

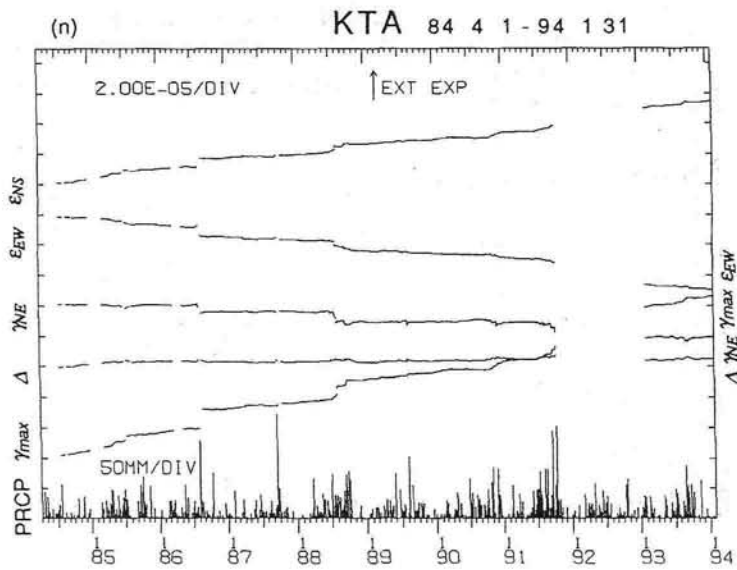
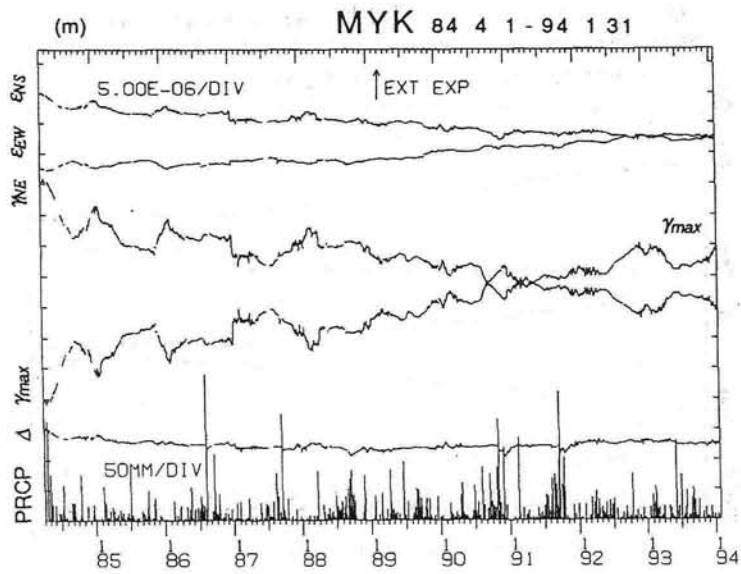
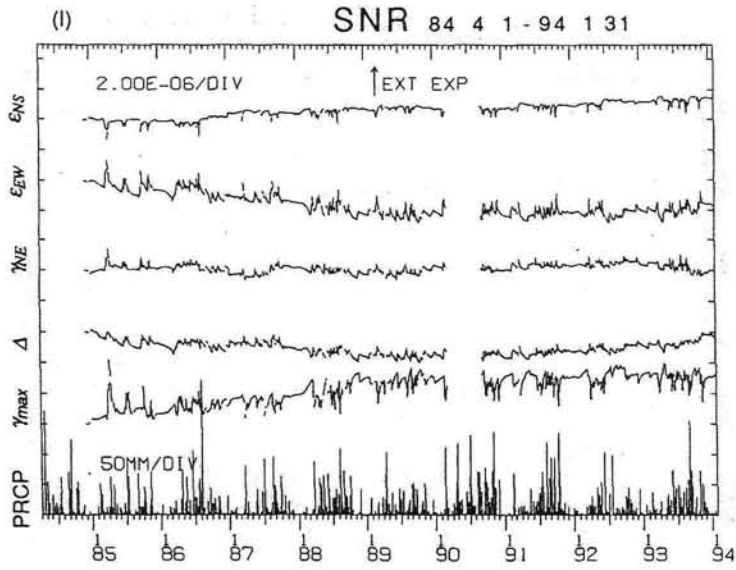


図 I - 2 - 12 つづき (l) 三陸 (SNR), (m) 宮古 (MYK), (n) 北阿武隈 (KTA)

VOL. STRAIN 8801-9401

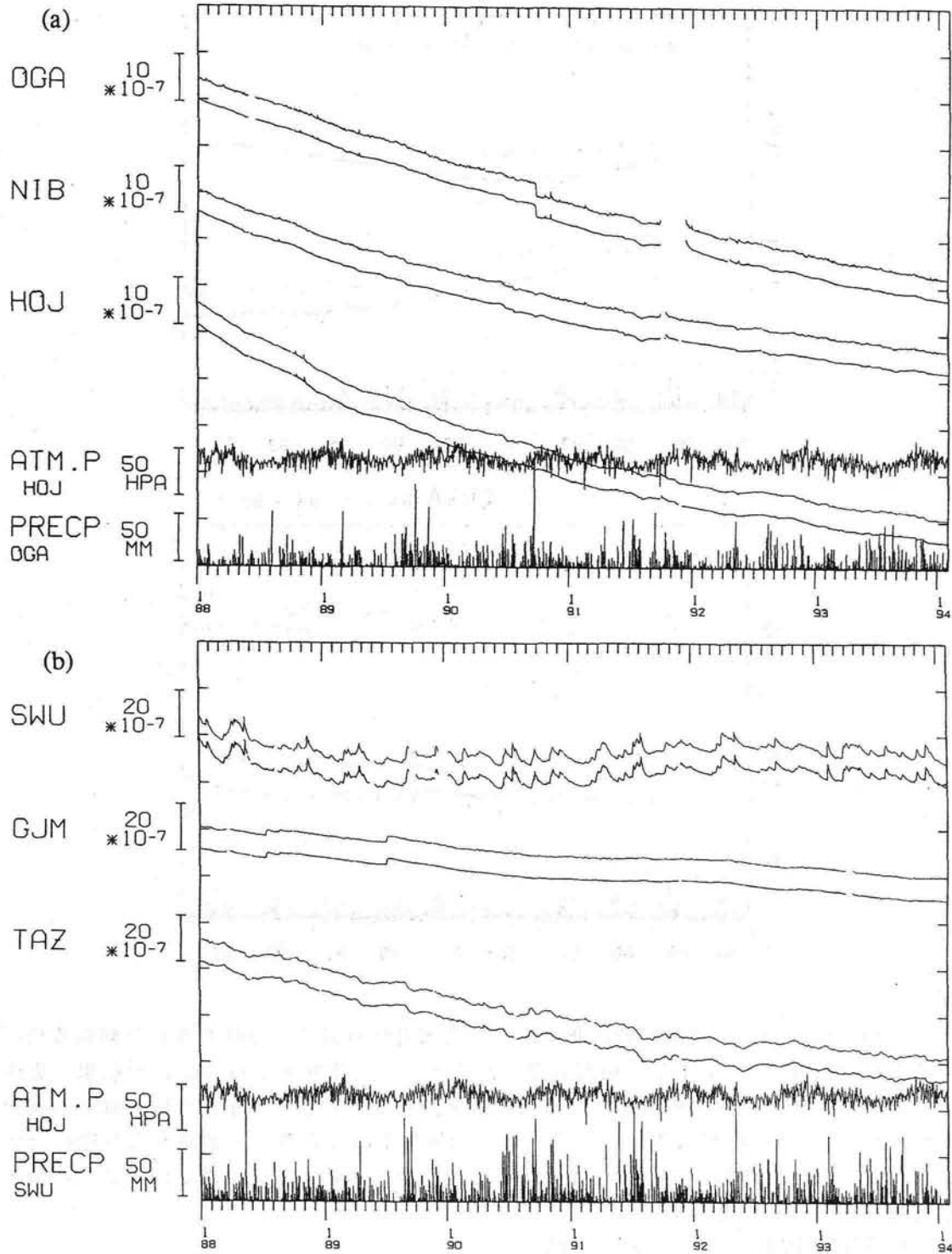


図 I - 2 - 13 東北地方の地殻変動観測点における体積歪計により観測された歪変化（1988年1月～1994年1月）。(a) 男鹿(OGA), 仁別(NIB), 本荘(HOJ), 本荘における気圧(ATM. P HOJ), 男鹿における日別降水量(PRECP OGA), (b) 沢内(SWU), 五城目(GJM), 田沢湖(TAZ), 本荘における気圧(ATM. P HOJ), 沢内における日別降水量(PRECP SWU)。各観測点の体積歪計のデータは、気圧未補正(上)と気圧補正を施した結果(下)を示してある。計器の設置深度は、(a)の3ヶ所が約200m, (b)の3ヶ所が約100mである。

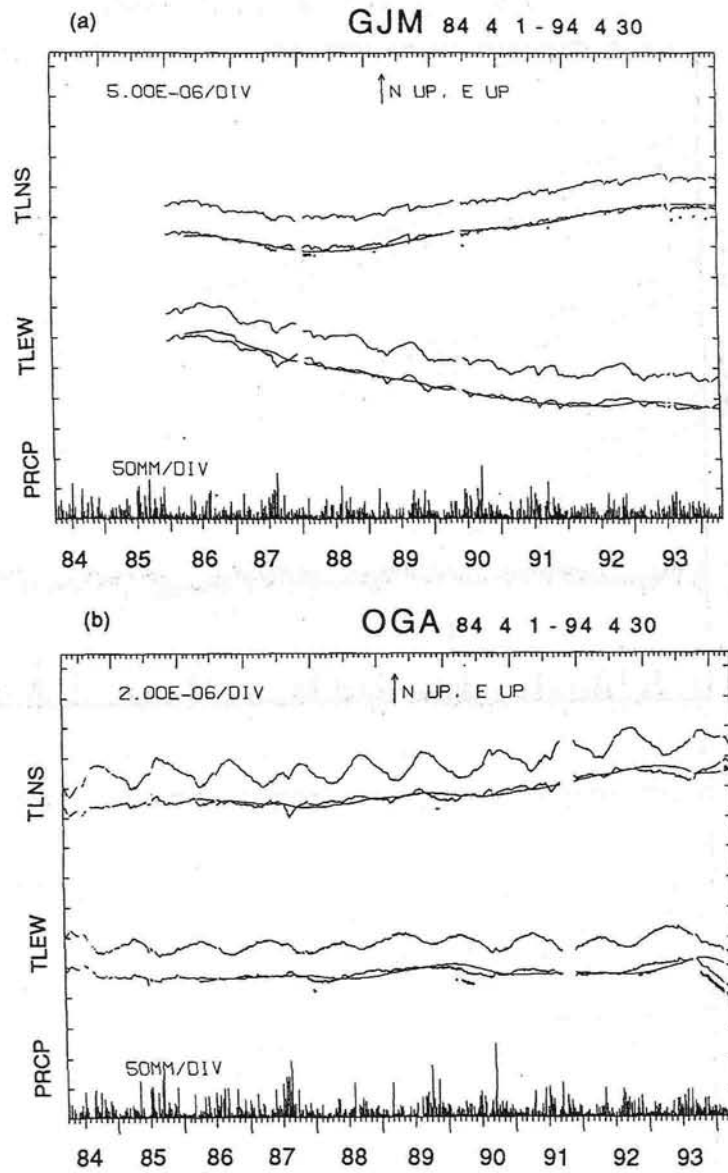


図 1 - 2 - 14 東北地方の地殻変動観測点における水管傾斜計により観測された傾斜変化（1984年4月～1994年4月）。上から南北成分の観測データ，平年値を取り除いた結果，東西成分の観測データ，平年値を取り除いた結果，日別降水量を示す。平年値を取り除いた結果には730日分のデータの回帰直線から外挿した予測値を重ねてある。平年値を取り除いた成分の下側にマークが付されている部分は予測値と観測値との差が平年値推定の際の標準偏差の2倍を超えていることを示す。

(a) 五城目 (GJM), (b) 男鹿 (OGA)

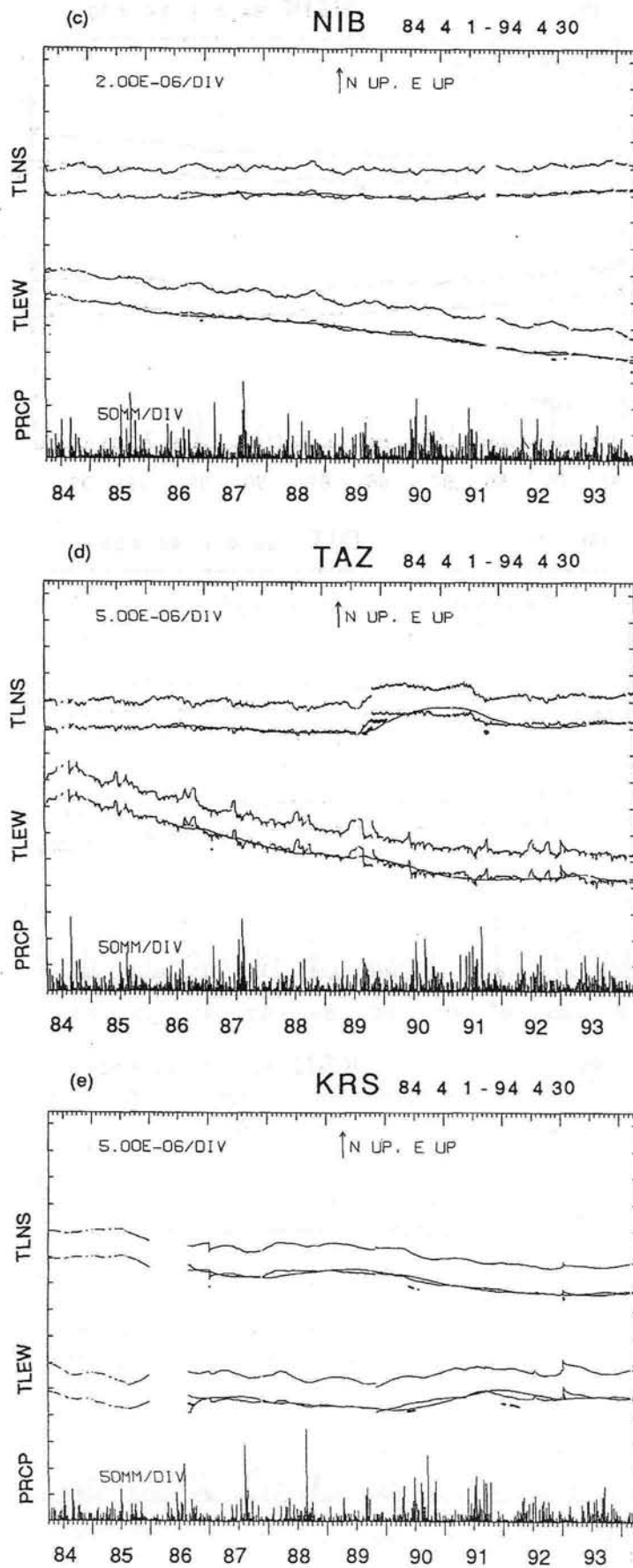


図 I - 2 - 14 つづき (c) 仁別 (NIB), (d) 田沢湖 (TAZ), (e) 黒沢尻 (KRS)

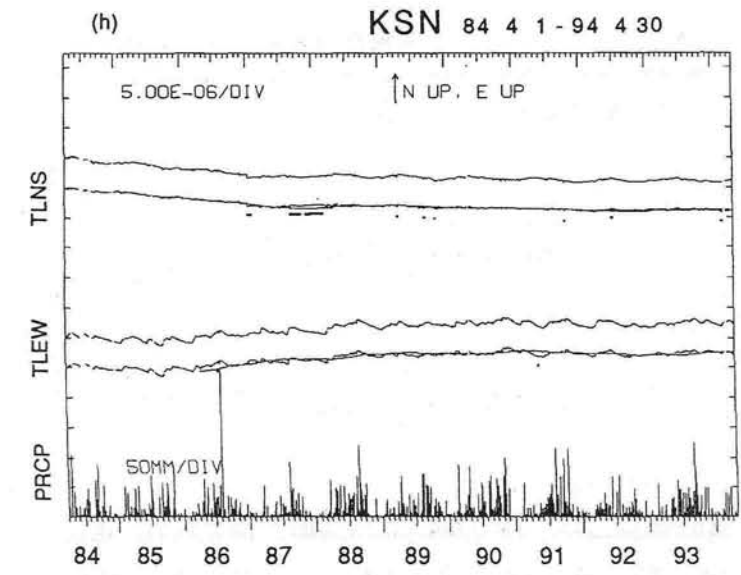
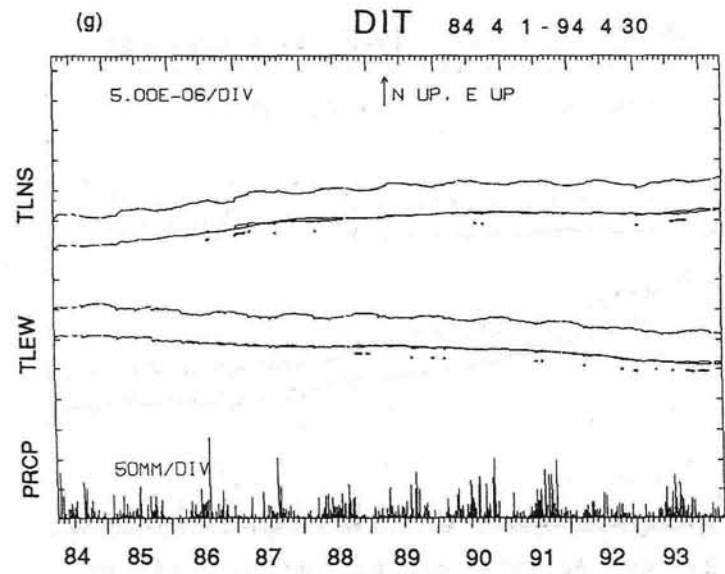
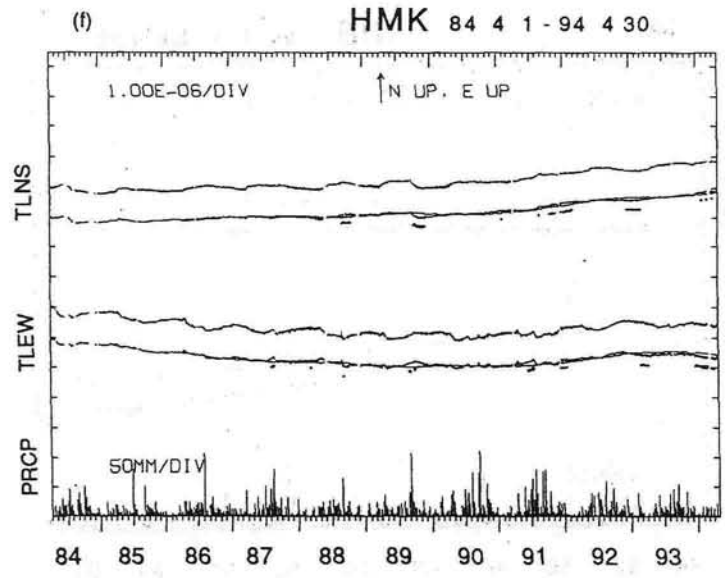


図 I - 2 - 14 つづき (f) 姫神 (HMK), (g) 大東 (DIT), (h) 気仙沼 (KSN)

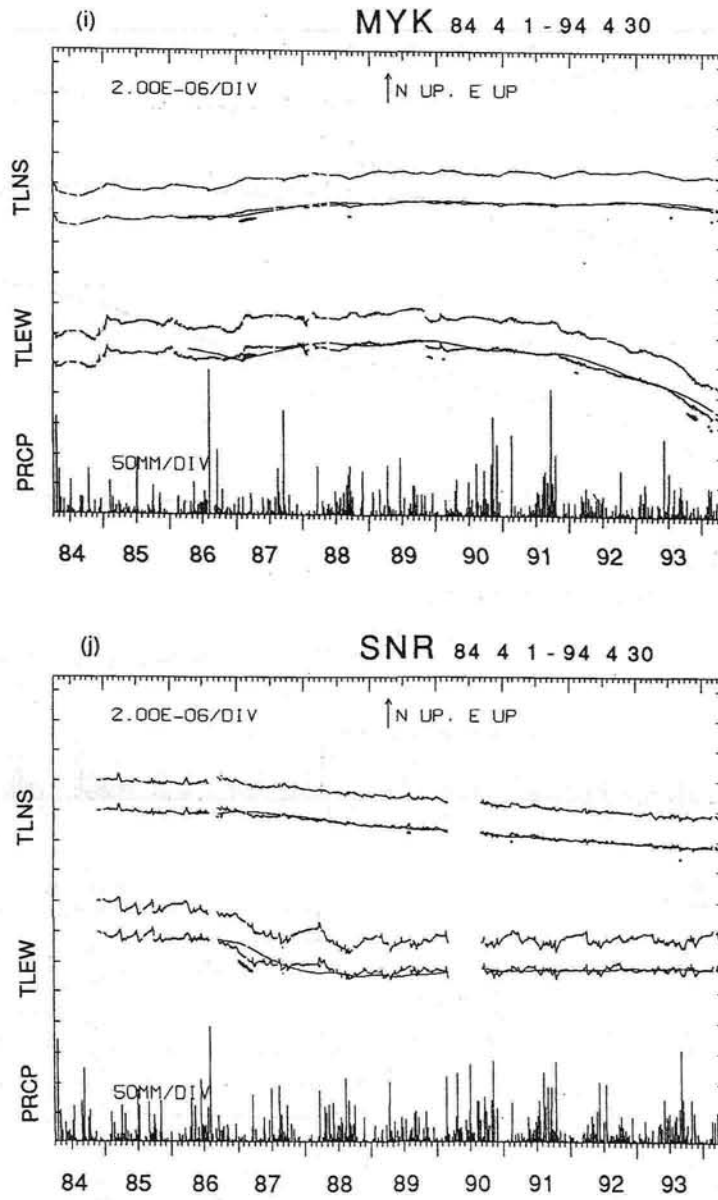


図 I - 2 - 14 つづき (i) 宮古 (MYK), (j) 三陸 (SNR)

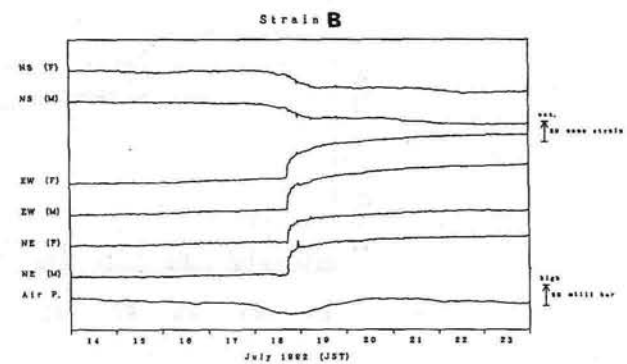
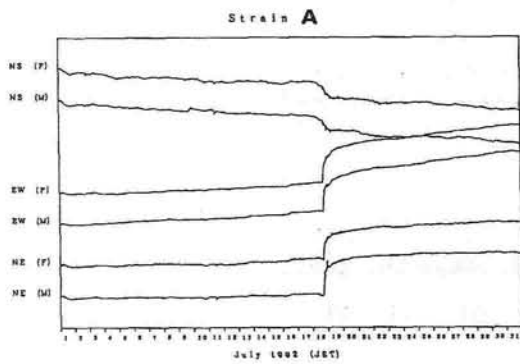
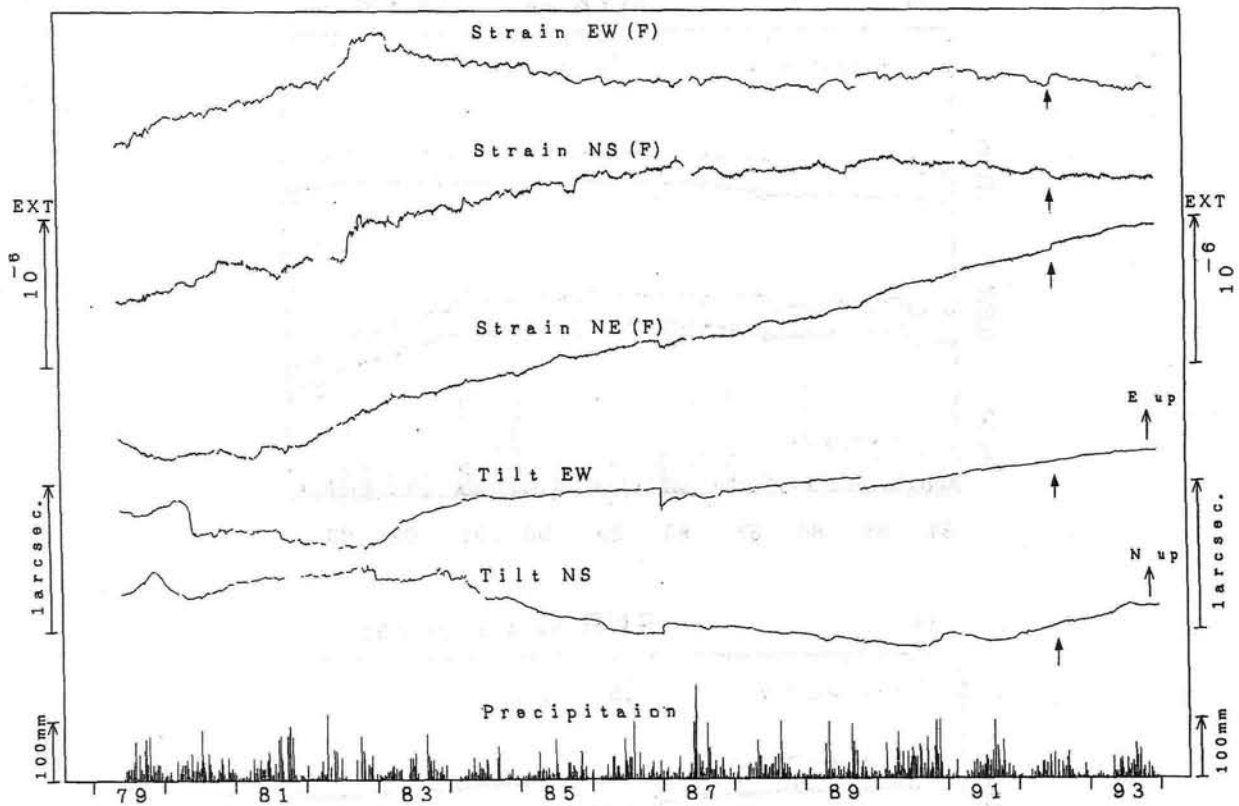


図 1-2-15 (上段) 国立天文台水沢センター江刺地球潮汐観測施設による、開設(1979年6月)以降の、石英管伸縮計、東西、南北、北東-南西成分および水管傾斜計、東西、南北成分の日平均値と降雨量の変化を示す。観測坑道は北上山地の花崗岩体に掘削されており、降雨の影響をほとんど受けず、安定した記録が得られている。矢印は、1992年7月18日の三陸沖地震(M6.9)の発生時である。

(下段A) この地震前後の歪変化。原記録から、潮汐成分と気圧変化による応答成分を除いてある。地震発生後、約1日の時定数を持つ歪変化が読み取れる。伸縮計各成分は自由端(F)と中間点(M)に検出器があり、両者の変化を示してある。これらが一致していることから機械的なものでなく、地震後の現象(スローアースクエイク)を正しく反映していると考えられる(下段B)。A図の時間軸を拡大し、気圧変化を加えた。地震の際には東北地方を低気圧が通過中で風雨が強かったが江刺観測点は降雨の影響がほとんどなく、気圧変化に対する伸縮計の応答も十分に補正できている。

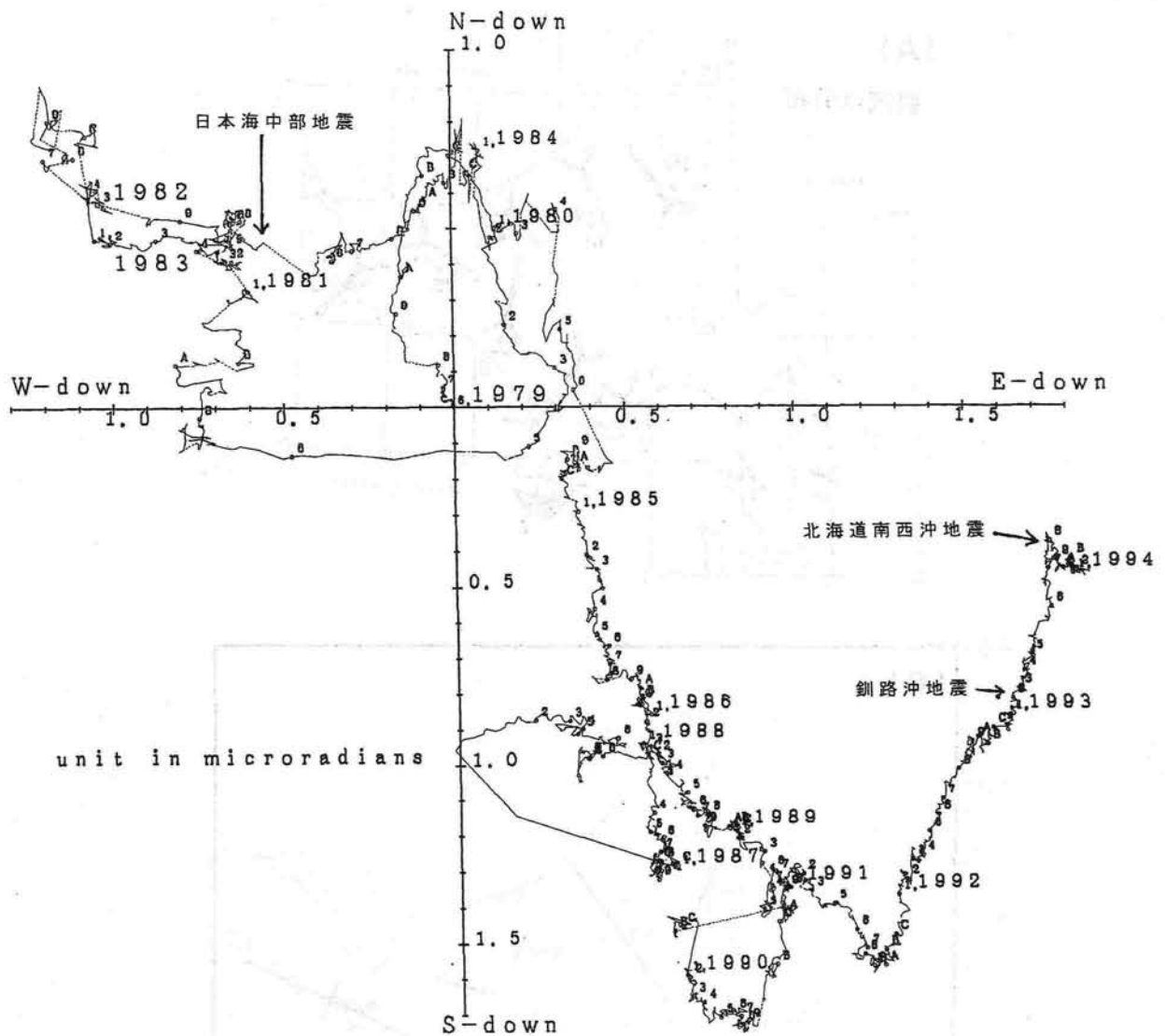


図 I - 2 - 16 国立天文台水沢センター江刺地球潮汐観測施設における水管傾斜計により得られた傾動ベクトル図。1984年後半から例外的な跳びを除いて非常に安定しており、1991年を境に傾動の向きが変わっている。その後、1993年釧路沖地震と1993年北海道南西沖地震が発生している。傾動ベクトルの向きが地震前に変化したのは、1983年日本海中部地震の際にもみられており興味深い。

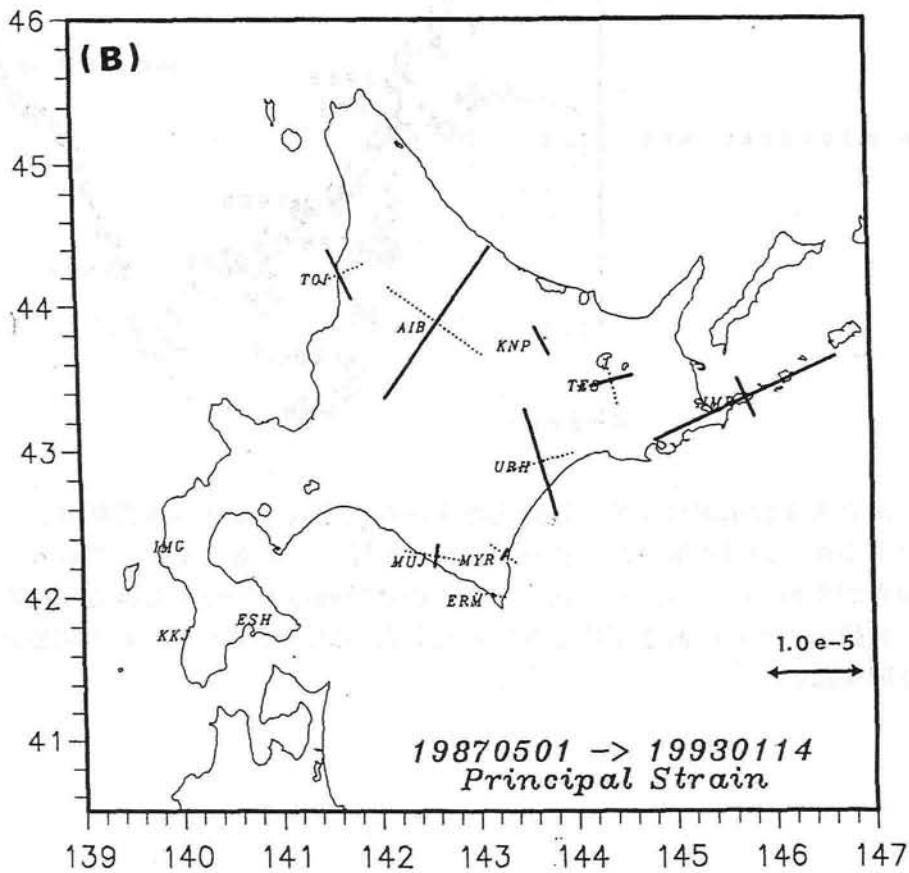
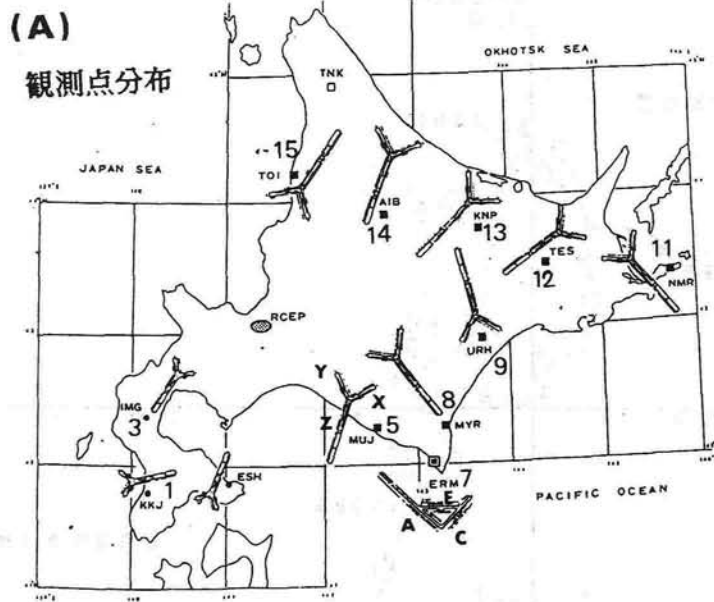


図 1-2-17 (A) 北海道地方の地殻変動連続観測点分布。えりも (ERM, 7) 観測点は30m長の伸縮計, 三石 (MUJ, 5), 広尾 (MYR, 8), 浦幌 (URH, 9), 根室 (NMR, 11), 弟子屈 (TES, 12), 訓子府 (KNP, 13), 愛別 (AIB, 14), 苫前 (TOI, 15) 観測点は10m長の伸縮計が設置されている。成分は進入方向をZ, 右をX, 左をYとしている。(B) 各観測点で得られた永年変動から求めた1987年5月から1993年釧路沖地震までの積算主歪。実線は伸び, 点線は縮みを示す。URH, NMR, AIBを除くと測地測量の数倍以下の変動率である。

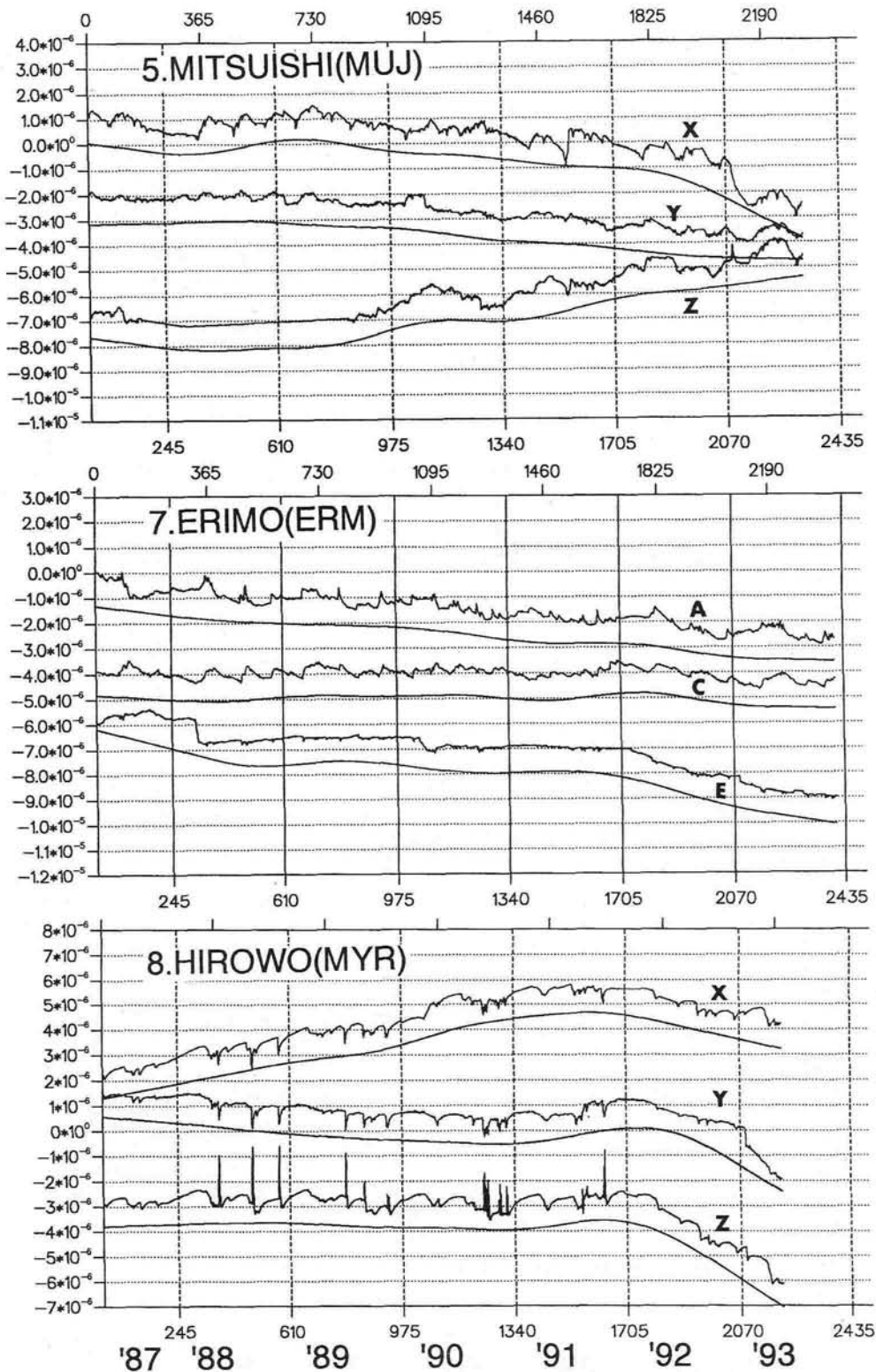


図 I - 2 - 18 北海道地方の地殻変動連続観測点における石英管伸縮計により観測された歪変化 (1987年5月~1993年11月)。各成分とも原記録と年周変動以下を除去するために365日の移動平均値を示してある。全ての観測点において縦軸の1目盛りが1マイクロストレイン (10^{-6}) を示している。

5. 三石 (MUJ), 7. えりも (ERM), 8. 広尾 (MYR) 観測点の記録

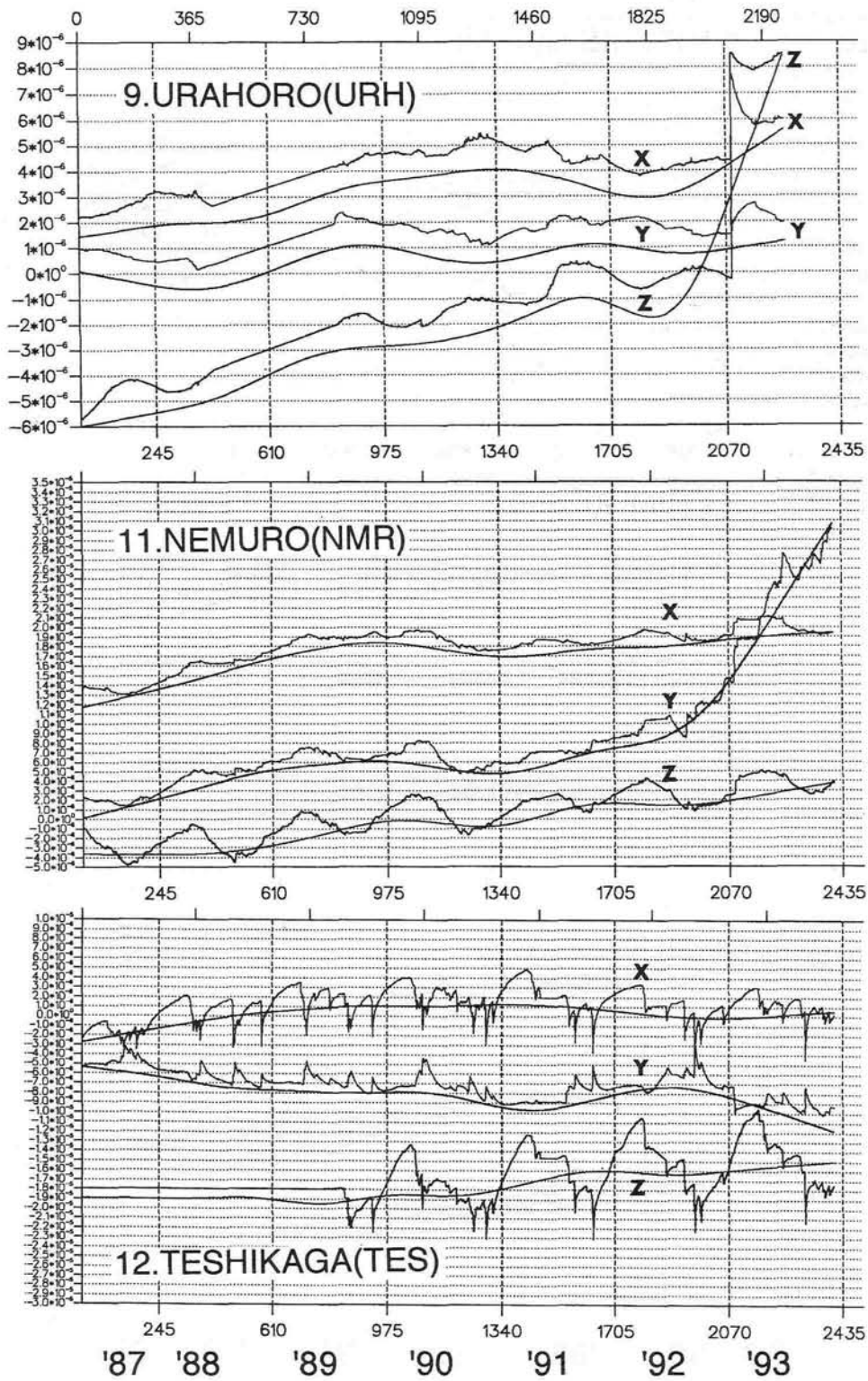


図 I - 2 - 18 つづき

9. 浦幌 (URH), 11. 根室 (NMR), 12. 弟子屈 (TES) 観測点の記録

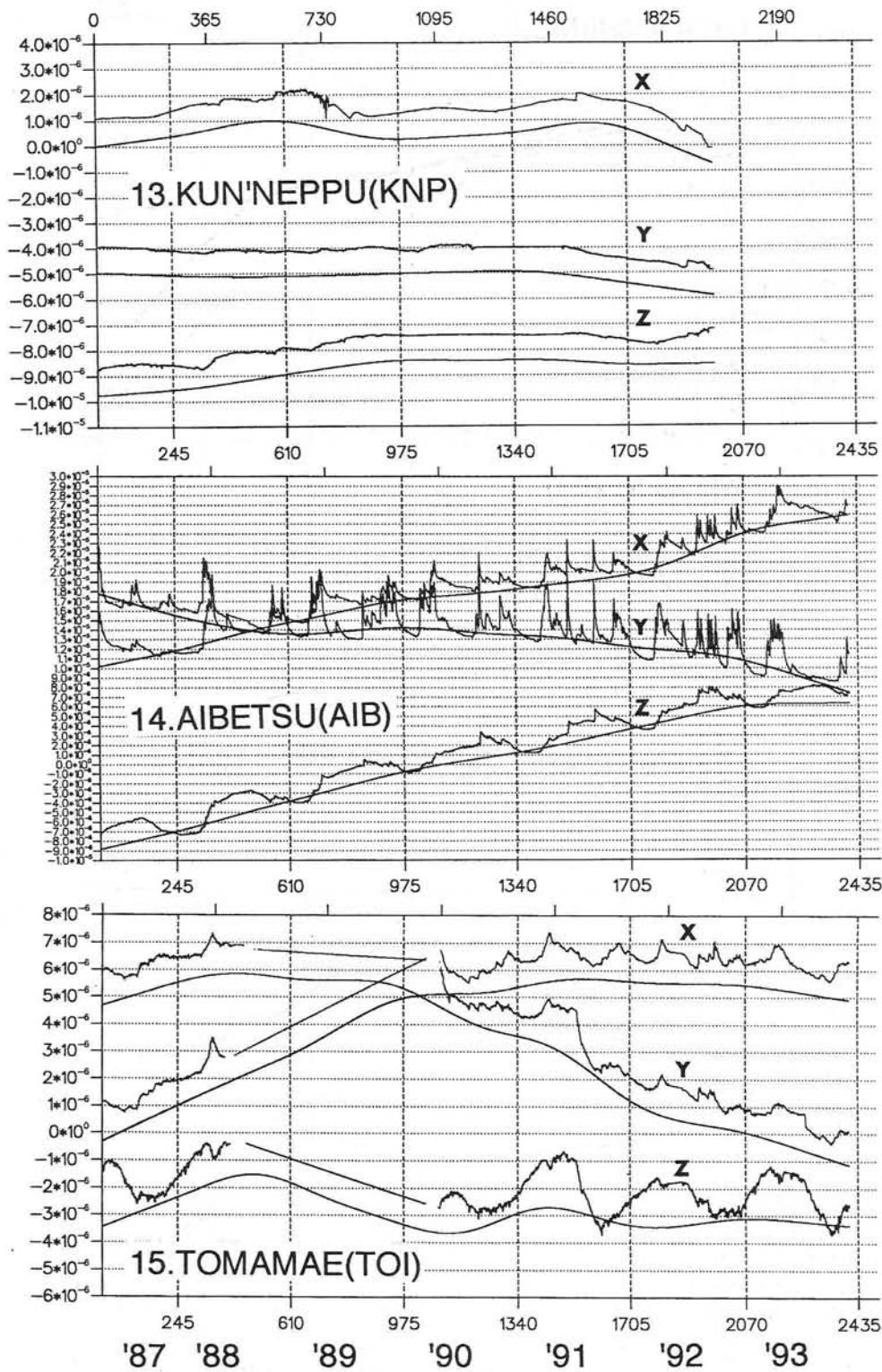


図 I - 2 - 18 つづき

13. 訓子府 (KNP), 14. 愛別 (AIB), 15. 苫前 (TOI) 観測点の記録

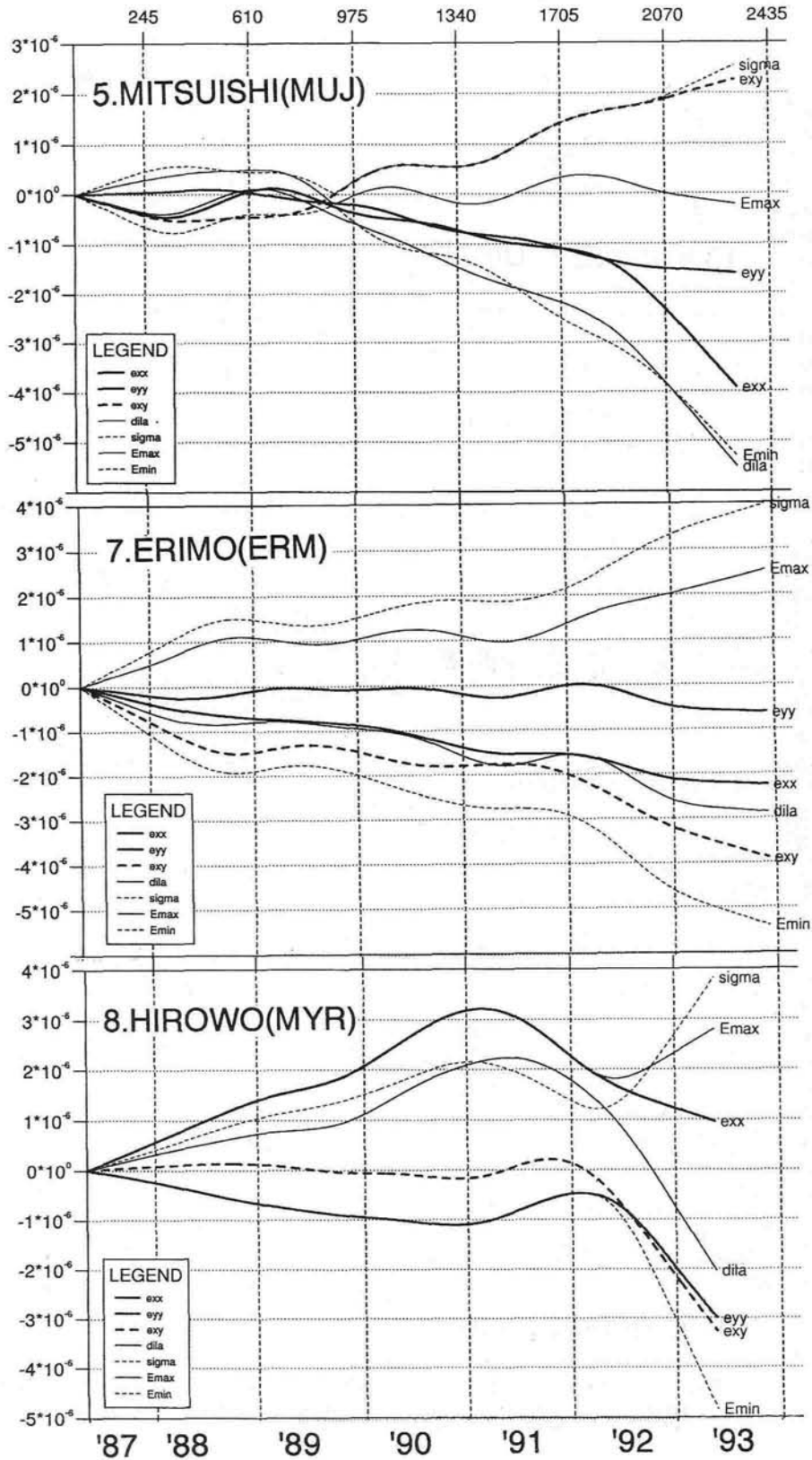


図 I - 2 - 19 北海道地方の地殻変動連続観測点における石英管伸縮計により観測された永年の積算歪変化(1987年5月~1993年11月)より求めた平面歪みの各成分。全ての観測点において縦軸の1目盛りが1マイクロストレイン(10^{-6})を示している。
 5. 三石 (MUJ), 7. えりも (ERM), 8. 広尾 (MYR) 観測点の記録

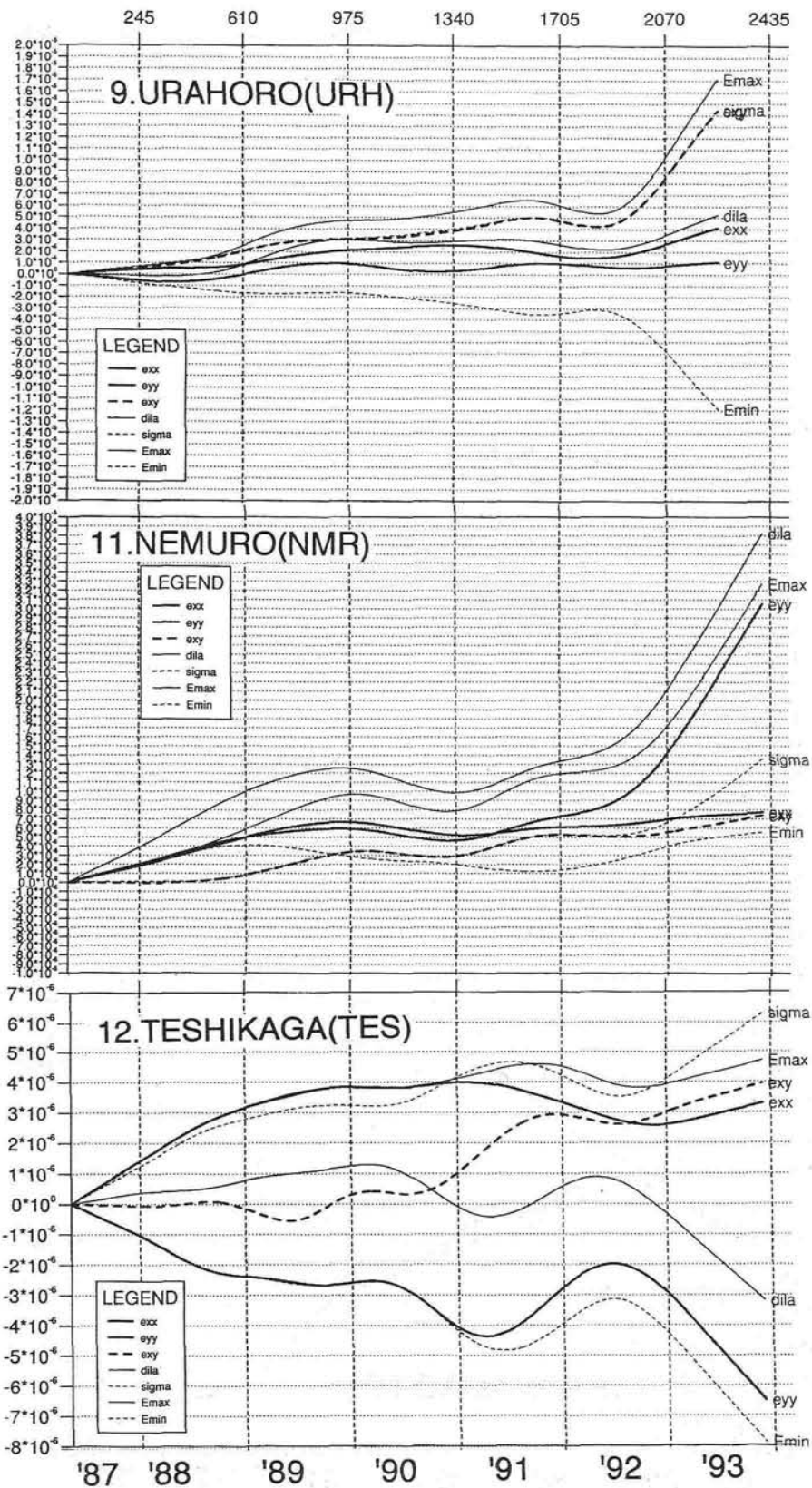


図 I - 2 - 19 つづき

9. 浦幌 (URH), 11. 根室 (NMR), 12. 弟子屈 (TES) 観測点の記録

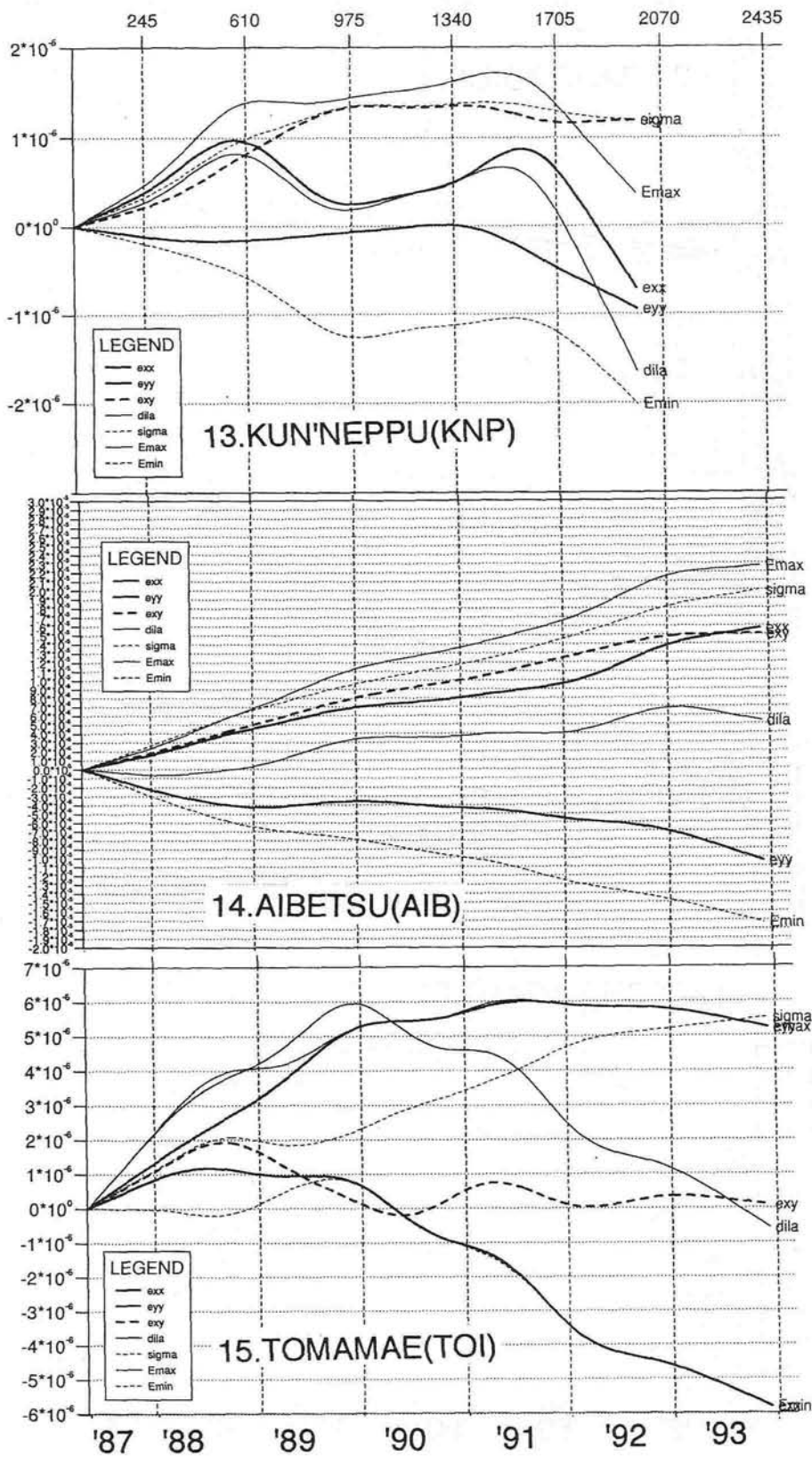


図 I - 2 - 19 つづき

13. 訓子府 (KNP), 14. 愛別 (AIB), 15. 苫前 (TOI) 観測点の記録

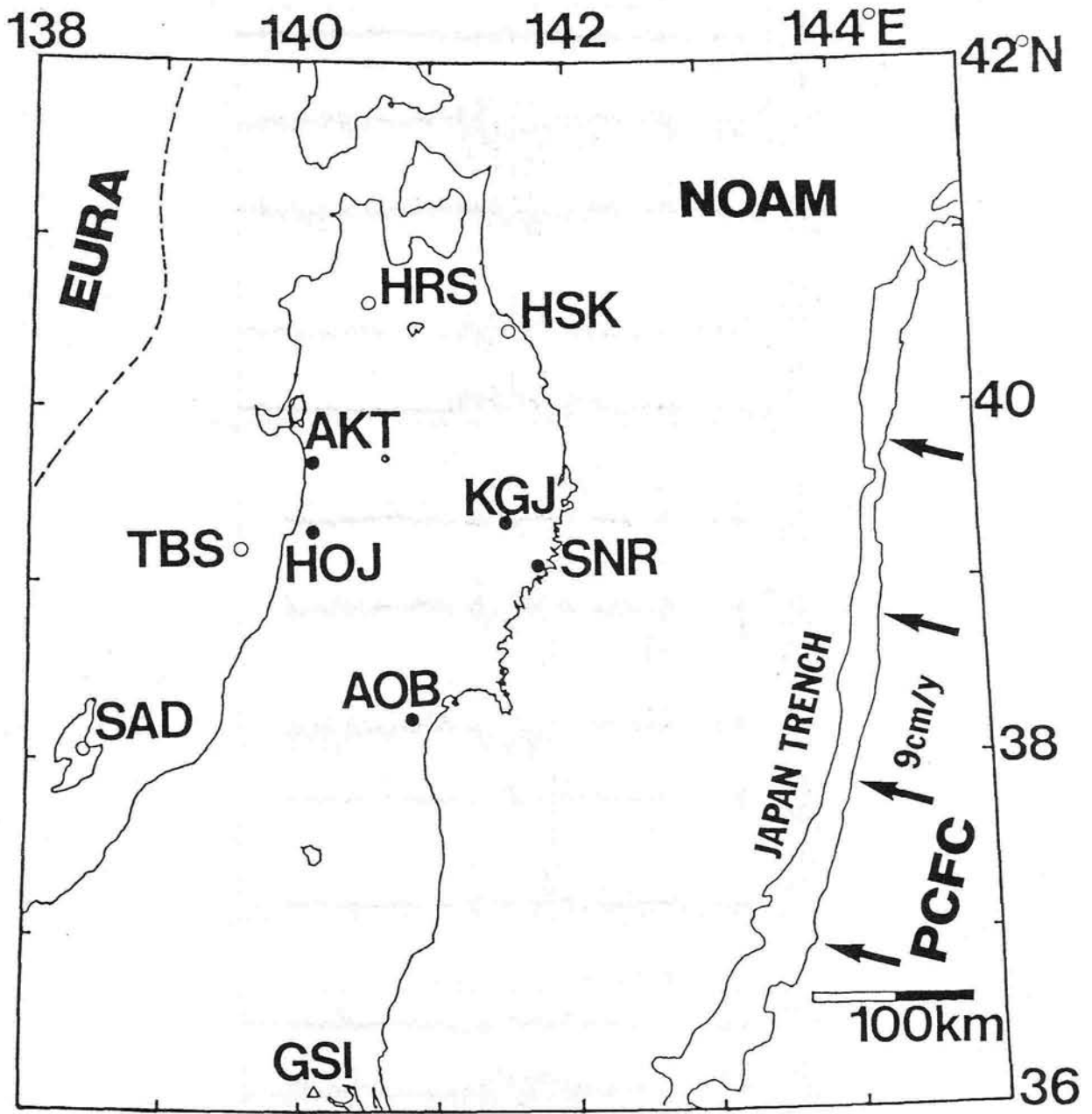


図 I - 2 - 20 東北地方およびその周辺におけるGPS観測点配置図。●は定点連続観測点，○は年に数回の観測を行う観測点，△は基準点に用いた国土地理院のVLBI観測点を示す。

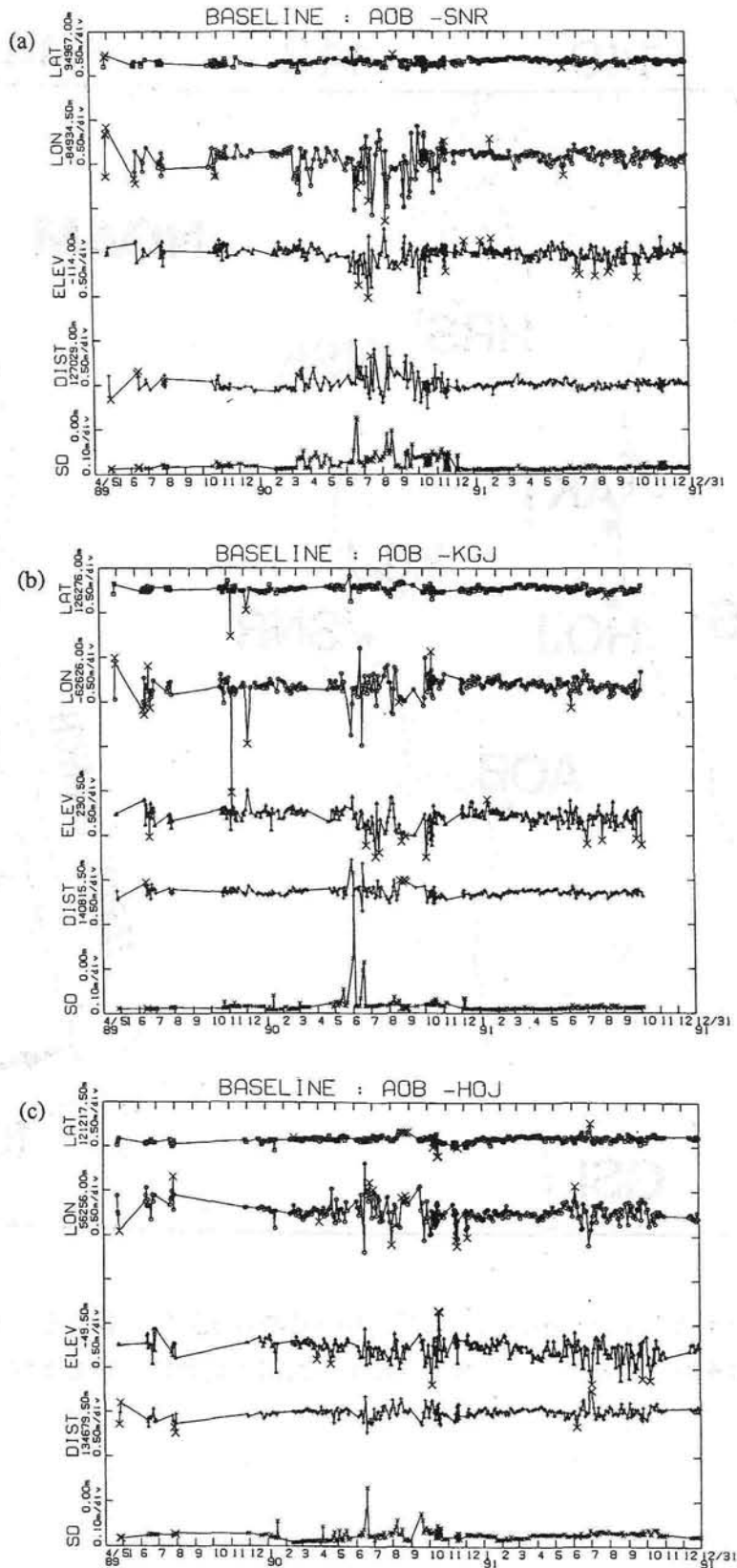


図 1 - 2 - 21 定点連続観測点間の各基線において得られた基線ベクトル各成分の時間変化。期間は1989年4月から1991年12月まで。上から緯度成分 (LAT), 経度成分 (LON), 標高成分 (ELEV), 基線長成分 (DIST), および基線長成分の標準偏差 (SD) を示す。
 (a) 仙台-三陸(AOB-SNR), (b) 仙台-遠野(AOB-KGJ), (c) 仙台-本荘(AOB-HOJ)

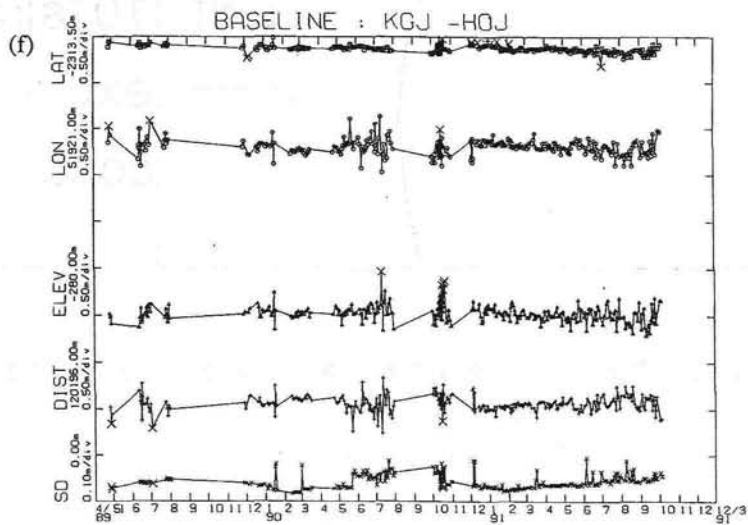
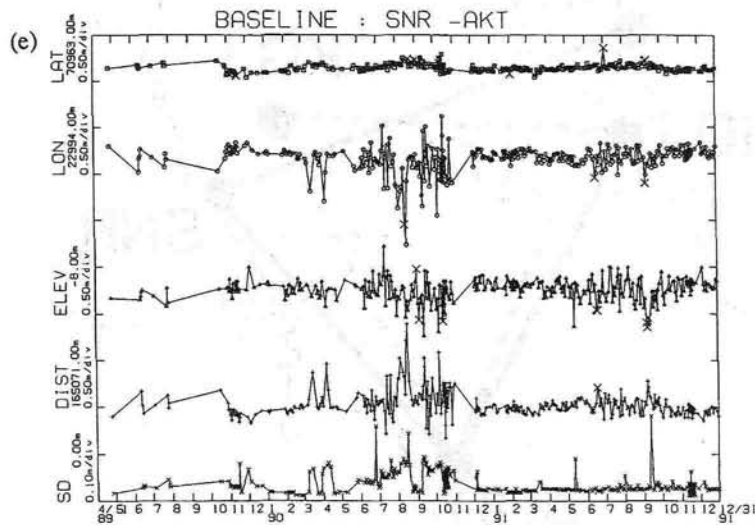
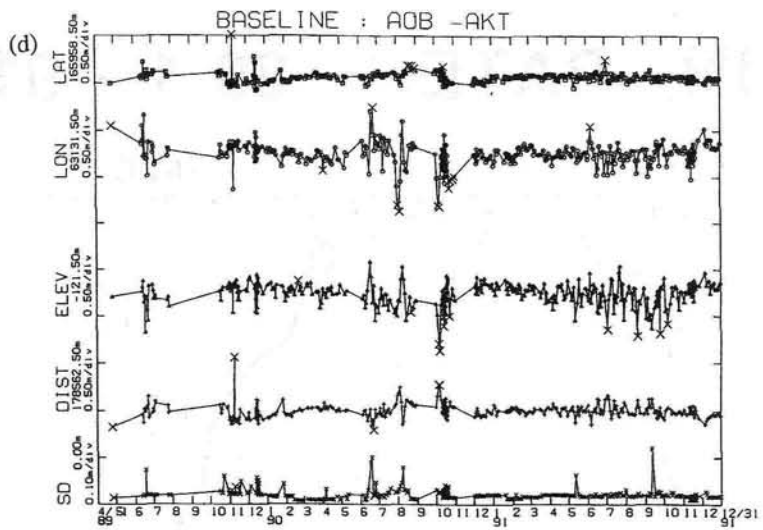


図 I - 2 - 21 つづき

(d) 仙台-秋田(AOB-AKT), (e) 三陸-秋田(SNR-AKT), (f) 遠野-本荘(KGJ-HOJ)

STRAIN RATE 89.4 - 91.12

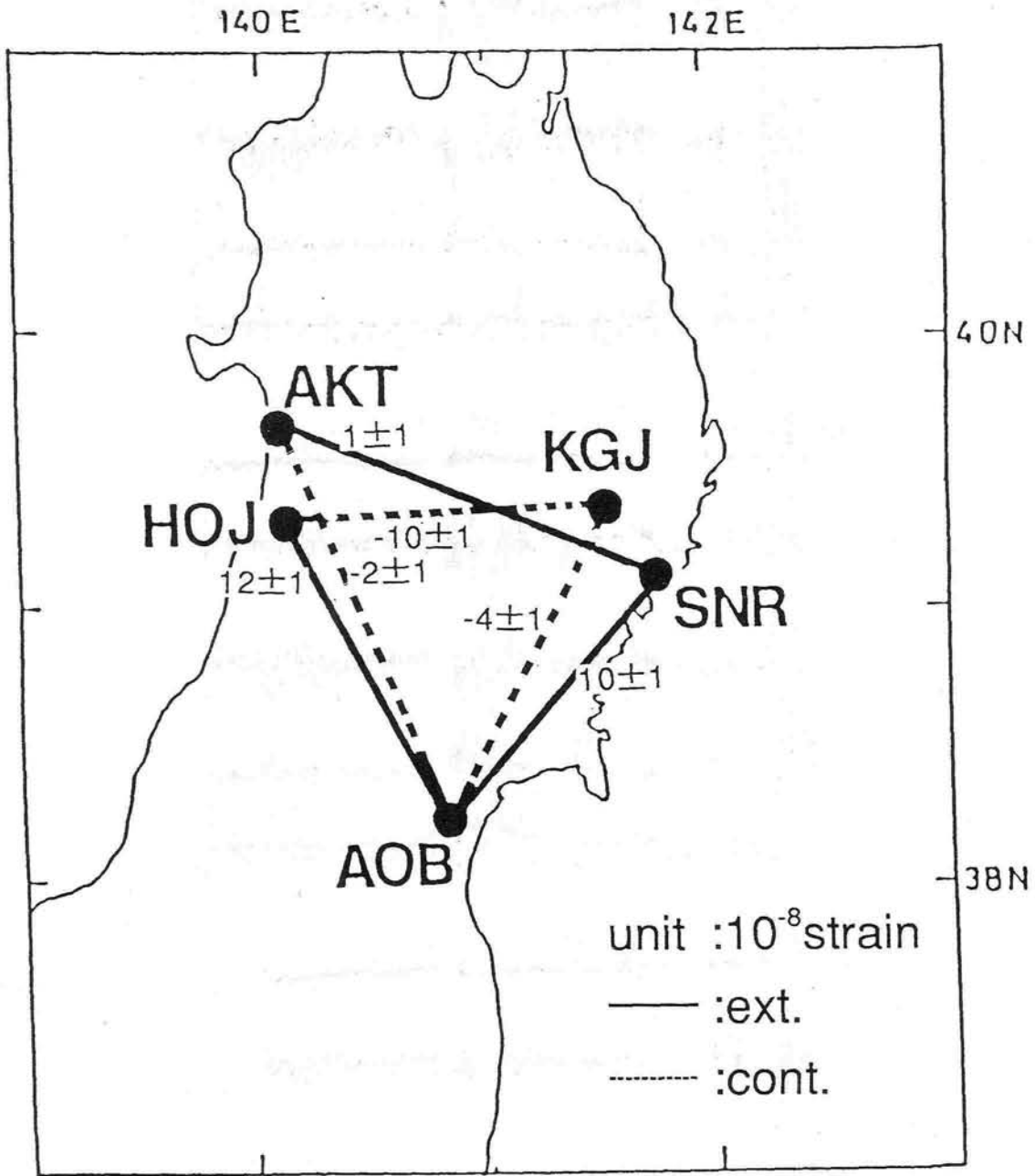


図 I - 2 - 22 100km超の基線について推定された基線長変化率。実線は伸長，破線は収縮を示す。

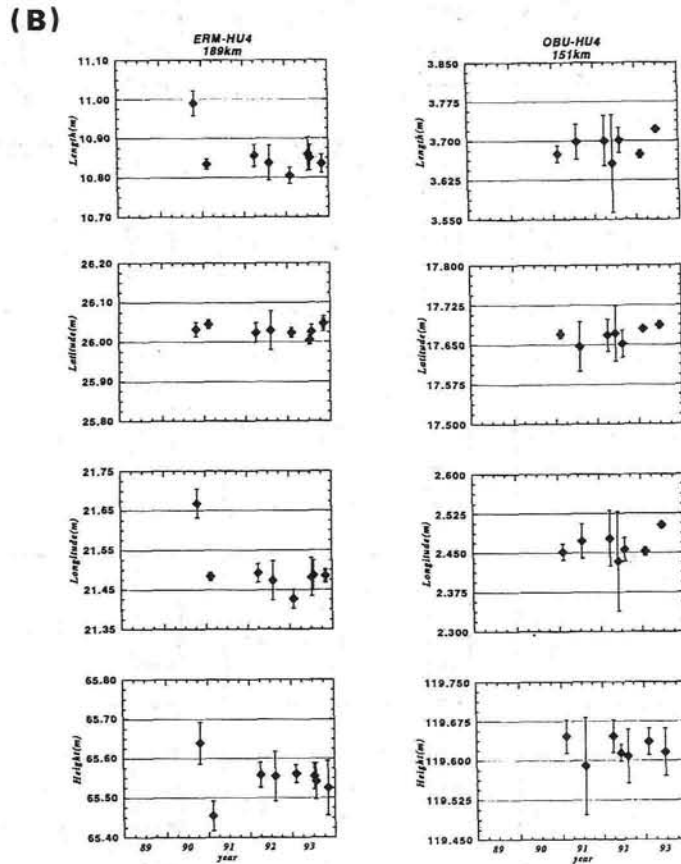
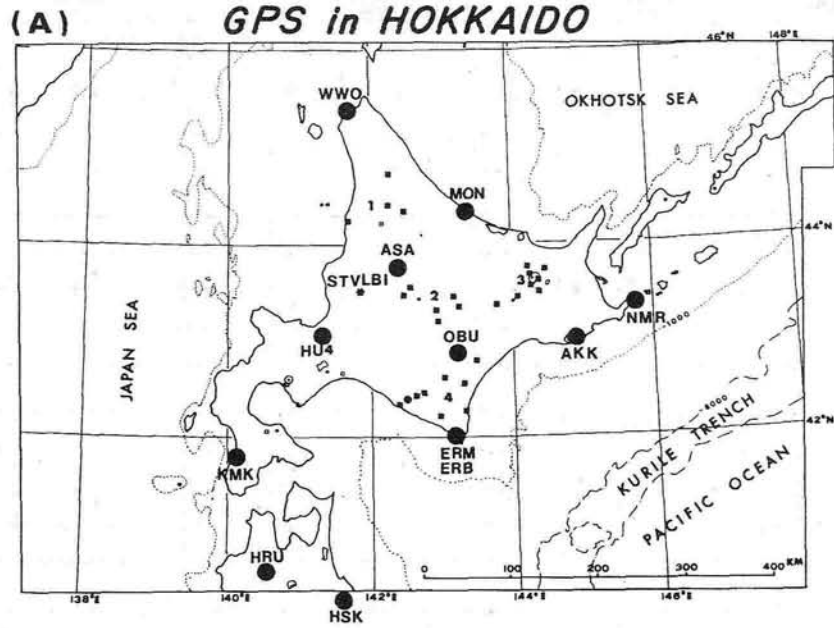


図 1-2-23 (A) 北海道地方およびその周辺における GPS 観測点配置図。大●は、広域地殻変動観測点。小■は地域ネット (1: 道北, 2: 十勝北部, 3: 弟子屈, 4: 日高)。各点の観測を年 1~5 回繰り返し観測を行っている。

(B) 最も頻繁に観測を行った、札幌 (HU4)-えりも (ERM) と札幌-帯広 (OBU) の結果。上より、基線長、緯度成分、経度成分、高さ成分の変化を示す。

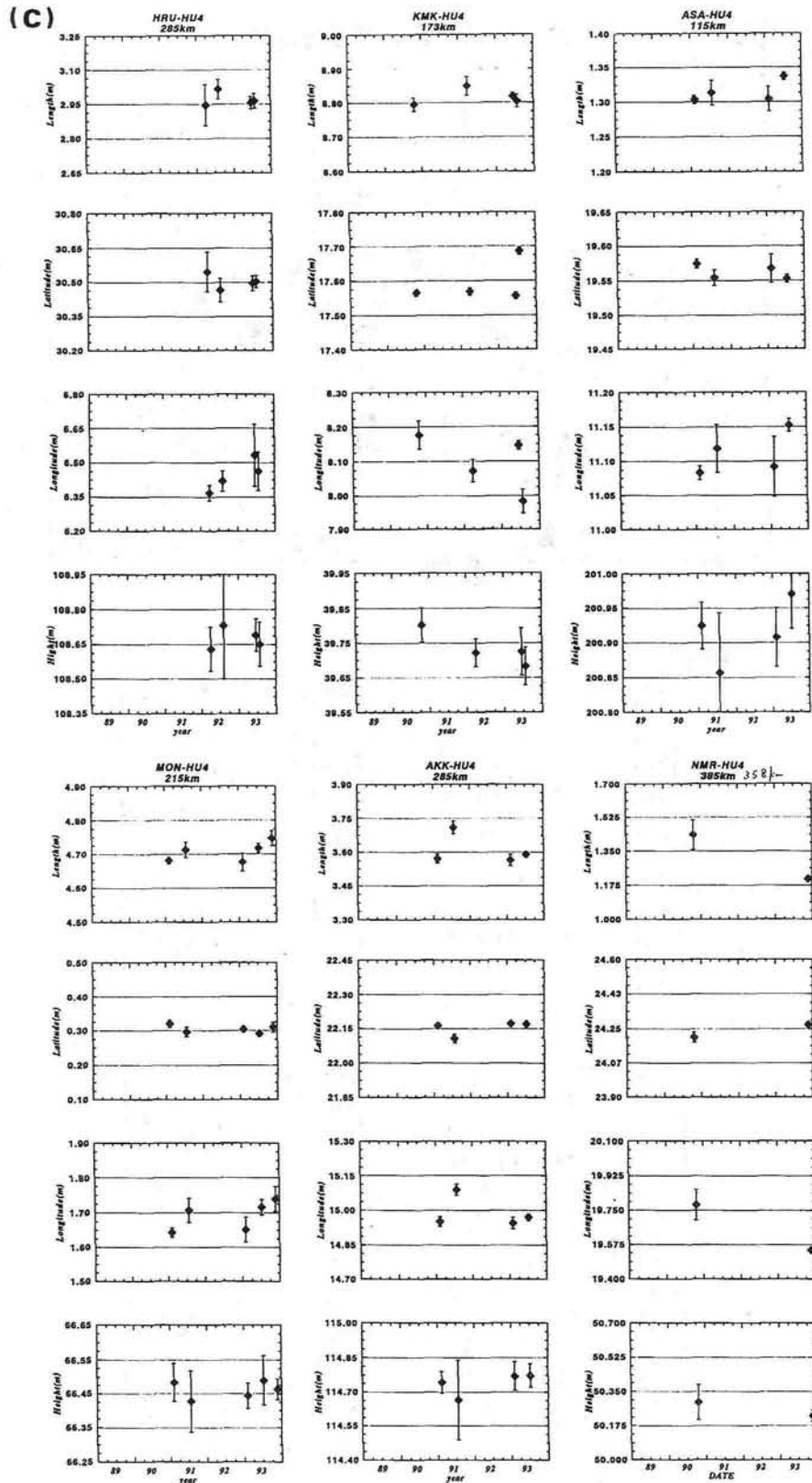


図 I - 2 - 23 つづき (C) 広域観測点の札幌基準に対する変動。左上：弘前 (HRU)，上中：上ノ国 (KMK)，右上：旭川 (ASA)，左下：紋別 (MON)，下中：厚岸 (AKK)，右下：根室 (NMR) の結果を示す。上ノ国の最後の結果は、1993年北海道南西沖地震に伴う西北西方向への約20cmの変位を含んでいる。