

4.3 天竜船明観測点における観測の結果

4.3.1 天竜船明観測点

レーザー伸縮計の設置位置を Fig. 4.3.1 に△印で示す。この地点は、東海地震の想定震源域西部で東海長期的 SSE の発生領域に隣接し、短期的 SSE や深部低周波微動の発生領域にも近く、これらに関連する地殻歪を観測するのに適した位置にあたる。以下ではこの観測点を天竜船明(ふなぎら)観測点と呼称する。天竜船明観測点は、静岡県浜松市天竜区にあるトンネル内に設けた。このトンネルは、昭和42年（1967年）から建設が進められたものの国鉄再建・民営化のために工事が途中で打ち切られた国鉄佐久間線の一部で、昭和46年（1971年）に竣工し船明トンネルと呼ばれている。船明トンネルは、国鉄清算事業団の管理を経て天竜市（合併により浜松市）に移管され、現在に至っている。Fig. 4.3.2 にトンネル位置とその周辺の詳細を、トンネル横断面を Fig. 4.3.3 に示す。トンネルは、船明集落の北側にある山をほぼ南北方向に一直線で貫き、船明ダム湖畔の山腹に抜ける。全長は 918m で約 0.6% の北上がりの勾配をもつ。直上の地表面からトンネルまでの深さは、トンネル中央部で 160m ある。

当初、トンネルの出入り口は鉄柵のみで仕切られていて、風が吹き抜けの状態であった。トンネル内温度を安定させるため、2005 年 3 月に鉄柵に仕切り板を取り付けた。温度影響評価の項で後述するように、これだけでは温度安定化が不十分だったため、2008 年 12 月には仕切り板周囲のコーティングを施すとともに内側 50m のところに遮蔽幕を取り付けて二重化した。

レーザー伸縮計は、南側の坑口から 98.5m の地点にレーザー発振器等を、498.5m の地点に反射鏡を設置してマイケルソン型干渉計を構成し、2009 年 3 月に完成した。本節では、2007 年 12 月に 98.5m から 298.5m までの基線長 200m 区間の設置が完了してから約 1 年間行った試験観測で得られたデータを解析して、レーザー伸縮計の各種応答特性について調査し性能評価を行った結果を述べる。なお、簡単のため、トンネル内の位置を示すときには、南側の坑口から 98.5m 地点のことを丸めて 100m 地点等と呼ぶ。

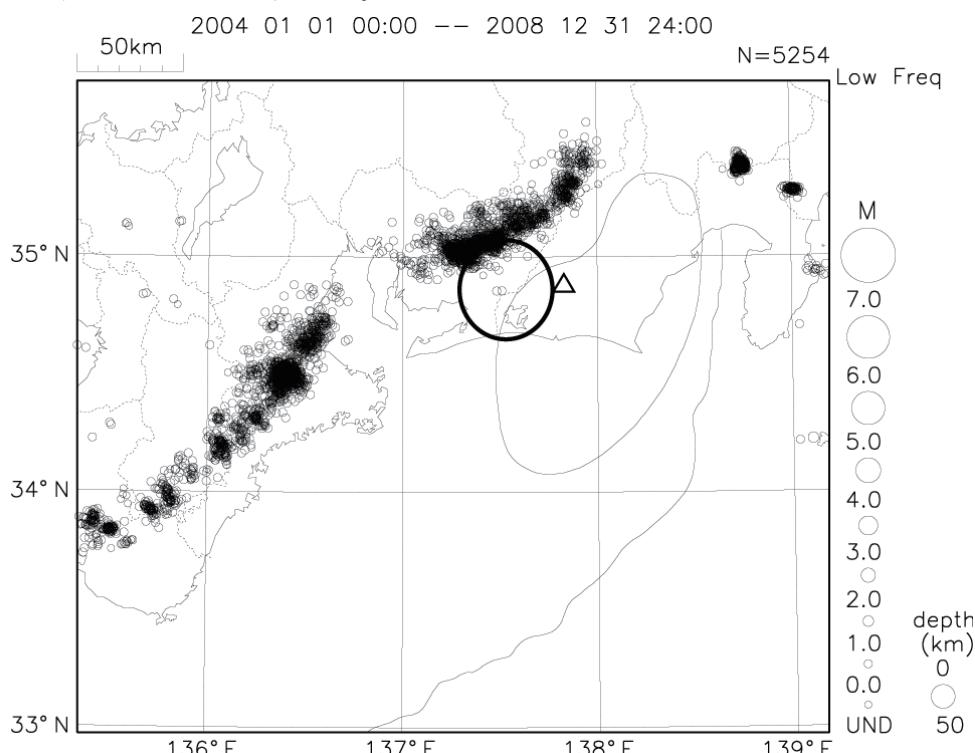


Fig. 4.3.1. Location of the Funagira tunnel (triangle), source area of the long-term Tokai SSE (large circle), and low-frequency earthquake distribution (small circles). The source area of the expected Tokai earthquake is indicated by the thin solid curve.

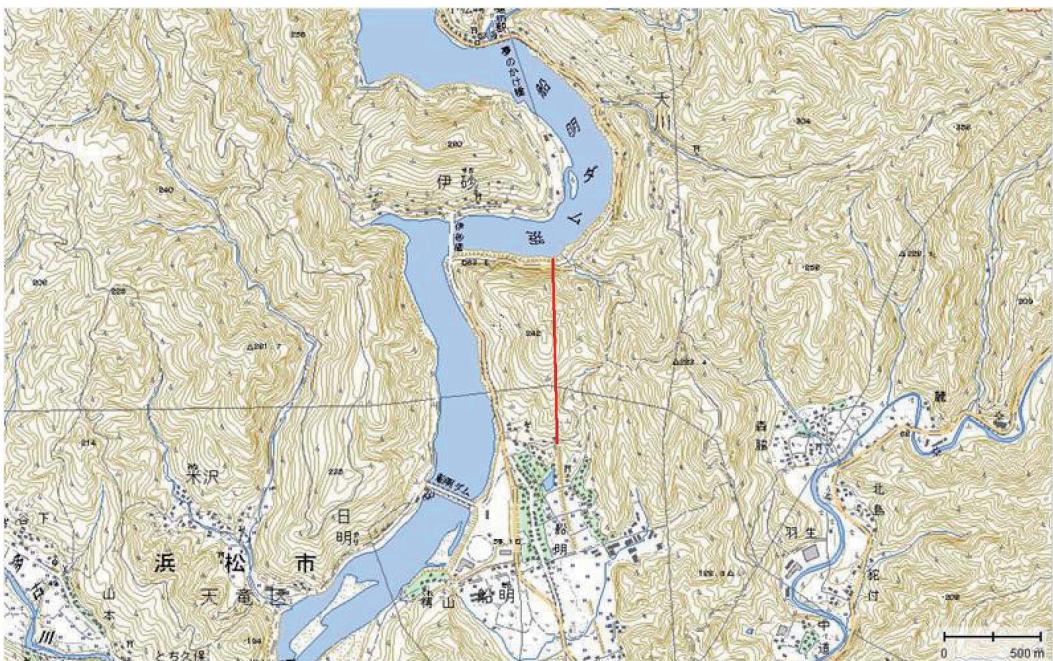


Fig. 4.3.2. Location of the Funagira tunnel (red line segment) where the laser extensometer was installed.

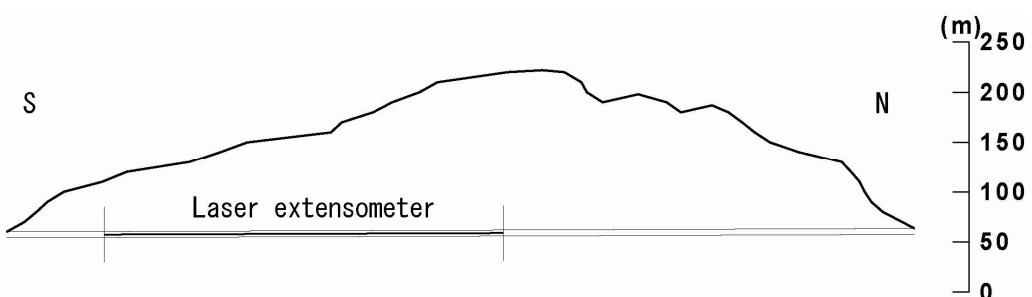


Fig. 4.3.3. Cross section of the installation site. The vertical and horizontal scales are the same. The scale on the right denotes elevation above mean sea level.

4.3.2 データ

4.2節で述べたように、レーザー伸縮計から直接取得されるデータは干渉した光の強度をフォトディテクターで変換した電圧値で、この値はA/D変換されて1kHzサンプリングされている。一定時間にわたって取得された光強度から0.1秒間隔で歪データが計算される。この歪データをカットオフ周期が1分のローパスフィルターに通した後、1分間隔でリサンプリングしたデータセットを作成した。100m地点では、地面から約1mの高さの気温と気圧、レーザー発振器等を収納したケース内の温度、そして、トンネル床面から約5cmの深さの温度を測定しており、300m地点のトンネル床面付近でも温度を測定している。気圧と温度のデータはもともと1分間隔で記録されている。観測は、2007年12月に200m区間の設置が完了した後、開始した。2008年2月に観測室設置のために観測を中断し、3月に再開したが干渉光強度が弱く位相変化検出できなかつたため歪観測としては欠測となった。5月に再調整を行った後は連続して干渉光を正常に検出することができ、歪データを取得することができた。12月には400mへの延長工事に備えて観測を中断した。したがって、解析に使用可能なデータ期間は、2007年12月13日から2008年2月6日まで(56日間, 1344時間)、および2008年5月10日から2008年12月16日まで(221日間, 5304時間)である。以後必要なときは、前者を観測期間①、後者を観測期間②と呼ぶ。

4.3.3 潮汐応答と気圧応答

Fig. 4.3.4 は、レーザー伸縮計で観測された歪変化、および潮汐解析プログラム BAYTAP-G (Tamura *et al.*, 1991) を使用して潮汐解析を行ってトレンド成分、潮汐成分、気圧応答成分、不規則成分に分けた結果の一例として、2008年1月の1ヶ月間の変化を示す。歪データには、前項で作成した1分値データをさらに1時間値にリサンプリングしたデータを使用した。並行観測データとして気圧データを使用し、気圧データには1分観測値を1時間値にリサンプリングしたデータセットを使用した。

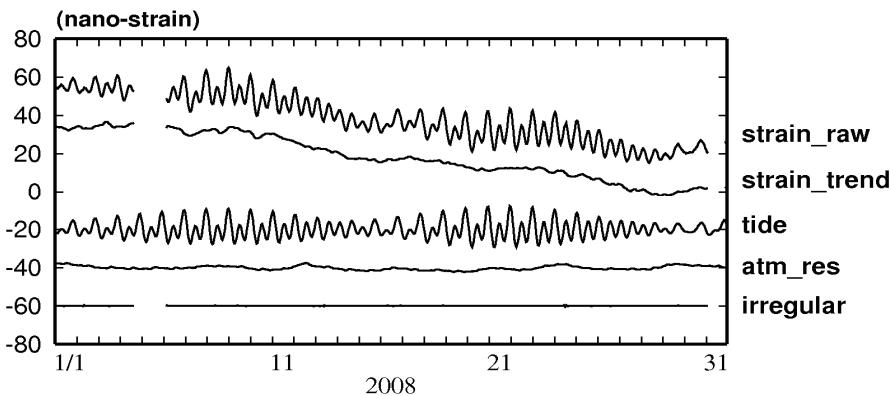


Fig. 4.3.4. Example of raw data observed by the Tenryu-Funagira laser extensometer in January 2008. Trend, tidal strain, atmospheric pressure response, and irregular component are also indicated.

Fig. 4.3.5 は、期間が長く潮汐成分の P1 と S1K1, S2 と K2 が分離できる観測期間②について潮汐解析の結果得られた潮汐振幅と位相を白丸で示す。M1, J1, OO1 以外の分潮のエラーバーは図中の白丸よりも小さい。海洋潮汐荷重予測プログラム GOTIC2 (Matsumoto *et al.*, 2001) を使用して計算した天竜船明観測点の位置における理論潮汐の振幅と位相を黒四角で示す。振幅の小さい分潮を除いて位相は理論値と観測値でほぼ一致しているが、潮汐振幅はいずれの分潮においても理論値に比べて観測値は半分程度である。

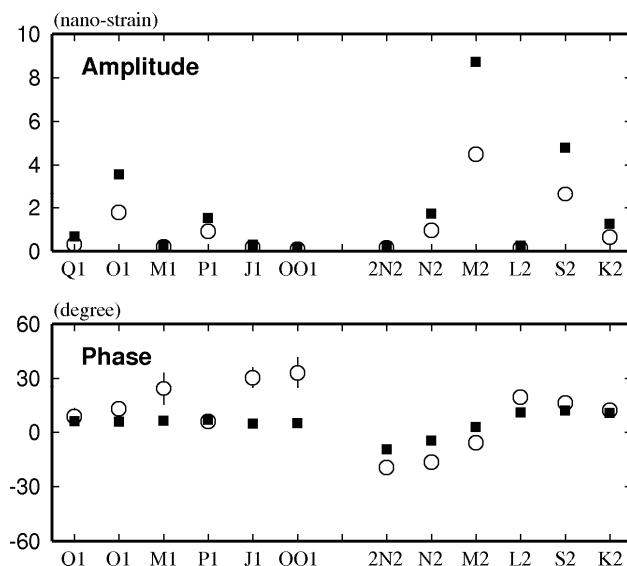


Fig. 4.3.5. Amplitude and phase lag of the tidal strain observed by the Tenryu-Funagira laser extensometer. The circles denote observed value, and solid squares denote theoretically predicted values.

Fig. 4.3.6 は、レーザー伸縮計のほか、東海地域に設置されている気象庁（一部は静岡県）の体積歪計および多成分歪計、並びに長野市松代に設置されている石英管伸縮計（柏原・他、1987）の気圧係数を示す。天竜船明観測点レーザー伸縮計の気圧係数は -1.8×10^{-10} strain/hPa と求められた。この値は体積歪計について得られている値と比べて 1 桁小さく、多成分歪計について得られている値と同程度の大きさである。

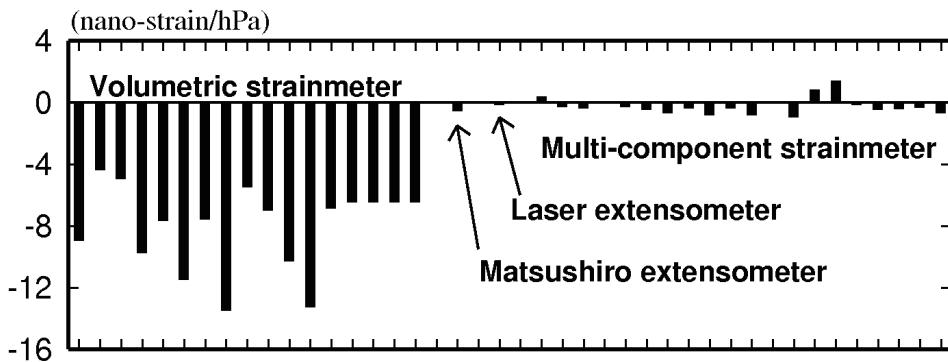


Fig. 4.3.6. Factor of atmospheric pressure of the volumetric strainmeter, the multi-component strainmeter, and the laser extensometer in the Tokai district. The factor of the silica tube extensometer at Matsushiro is also depicted.

4.3.4 経年変化と年周変化

Fig. 4.3.7 は、潮汐解析の結果出力のうち、試験観測全期間（2007 年 12 月～2008 年 12 月）の歪トレンド成分を示す。2008 年 2 月から 5 月までの欠測期間の前後の変化は接続できないので不明である。全体として縮みの傾向にある。全期間の平均歪変化速度と欠測前後の変化量の二つを未知数として、それらを最小二乗法で求めた。求められた平均歪変化速度は -4.2×10^{-7} strain／年である。同期間の周辺の GPS 変位データから歪速度を計算すると、 -5×10^{-8} strain／年である。縮みの歪であることは合っているが、レーザー伸縮計で観測された歪変化速度の方が 8 倍大きい。

Fig. 4.3.8 は、平均歪変化速度を引き去り、欠測前後の変化量を調整した歪変化を示す。両振幅がおよそ 6×10^{-8} strain の年周期的な変化が見られる。欠測のため詳細は不明だが、春季に伸び、8 月に縮みの極値をとる。Fig. 4.3.9 は、トンネル内の気圧変化と温度変化、天竜アメダス観測点における日平均気温変化と日降水量を示す。いずれの気象変化も年周変化を示し、トンネル内温度(300m 地点)は 4 月と 9 月、天竜アメダス観測点気温は 2 月と 8 月に極値をとる。しかし、それらの気象変化と歪の年周的変化の様相の間に明瞭な相関は見出せない。現時点では 1 年間のデータしかないので、年周的な歪変化は何と相関が高いか不明である。

4.3.5 トンネル内の温度変化の特徴と歪観測への温度の影響

年周期的な歪変化と温度変化との関係については明瞭ではないが、短周期帶で歪変化と温度変化との間に相関が見られる。歪変化と温度変化の関係について述べる前に、天竜船明観測トンネル内の温度分布の特徴について述べる。トンネル内では、南坑口から 100m, 300m, 500m, 700m の各地点で気温を 2005 年 9 月末から観測しているが、欠測が多い。Fig. 4.3.10(a) は、4ヶ所のデータが比較的揃っている観測開始後約 1 年間のトンネル内気温の変化を示す。年周変化に加えて冬季に数日程度の短周期で大きな振幅の変化が見られる。Fig. 4.3.10(b) は、2006 年 1 月の 1 ヶ月間のトンネル内気温の変化を示す。年周変化、短周期変化とも振幅は 300m 地点で最も小さく、そこから南北の坑口に近づくほど大きくなる。Fig. 4.3.10(b) に示すように、短周期の変化はその様相が 300m, 500m, 700m で似ていて振幅がその順で大きいのに対し、100m の様相は 300～700m の様相と似ていない。100m 地点で温度低下が見られる時期に 300～700m 地点で温度低下が見られない相補的な関係があるように見える。Fig. 4.3.10(b) にアメダスの天竜観測点における風向を合わせて示す。1 時間ごとに風向が北寄りの時は 700m の温度グラフの上に、風向が南寄りの時は 100m の温

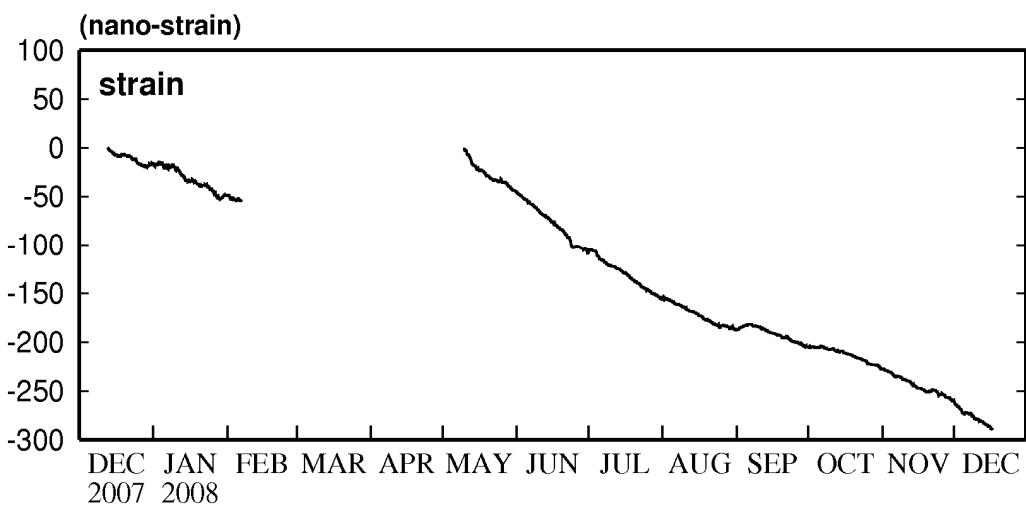


Fig. 4.3.7. Strain change observed by the Tenryu-Funagira laser extensometer throughout the experimental observation from December 2007 to December 2008.

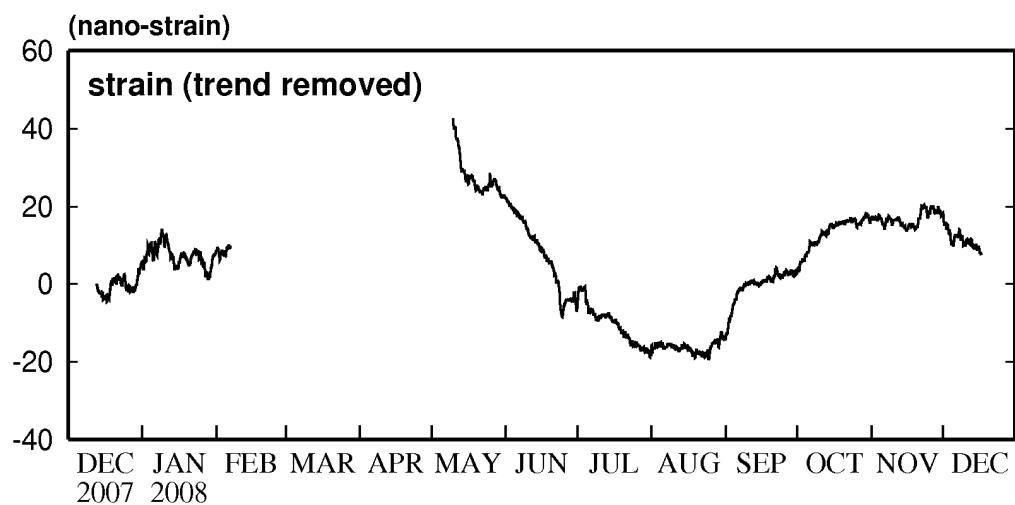


Fig. 4.3.8. Strain change observed by the Tenryu-Funagira laser extensometer throughout the experimental observation from December 2007 to December 2008. The linear secular change of -4.2×10^{-7} strain/year is removed.

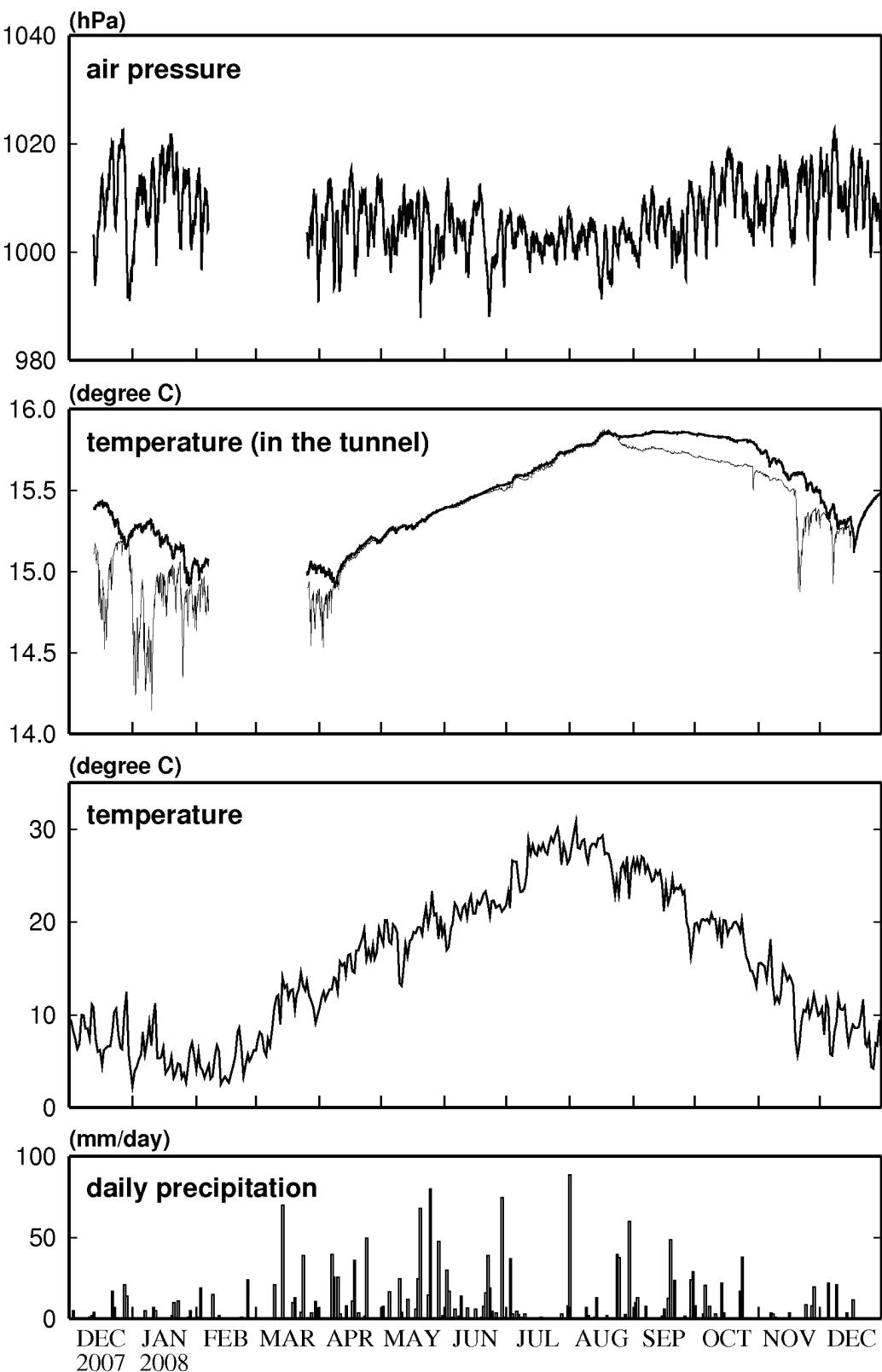


Fig. 4.3.9. The upper two panels indicate atmospheric pressure change and temperature changes observed in the Tenryu-Funagira tunnel. The thin line denotes temperature observed 100m from the south entrance of the tunnel, and the thick line denotes that observed 300m from south entrance of the tunnel. The two lower panels indicate temperature change and daily precipitation observed at the Tenryu AMeDAS station.

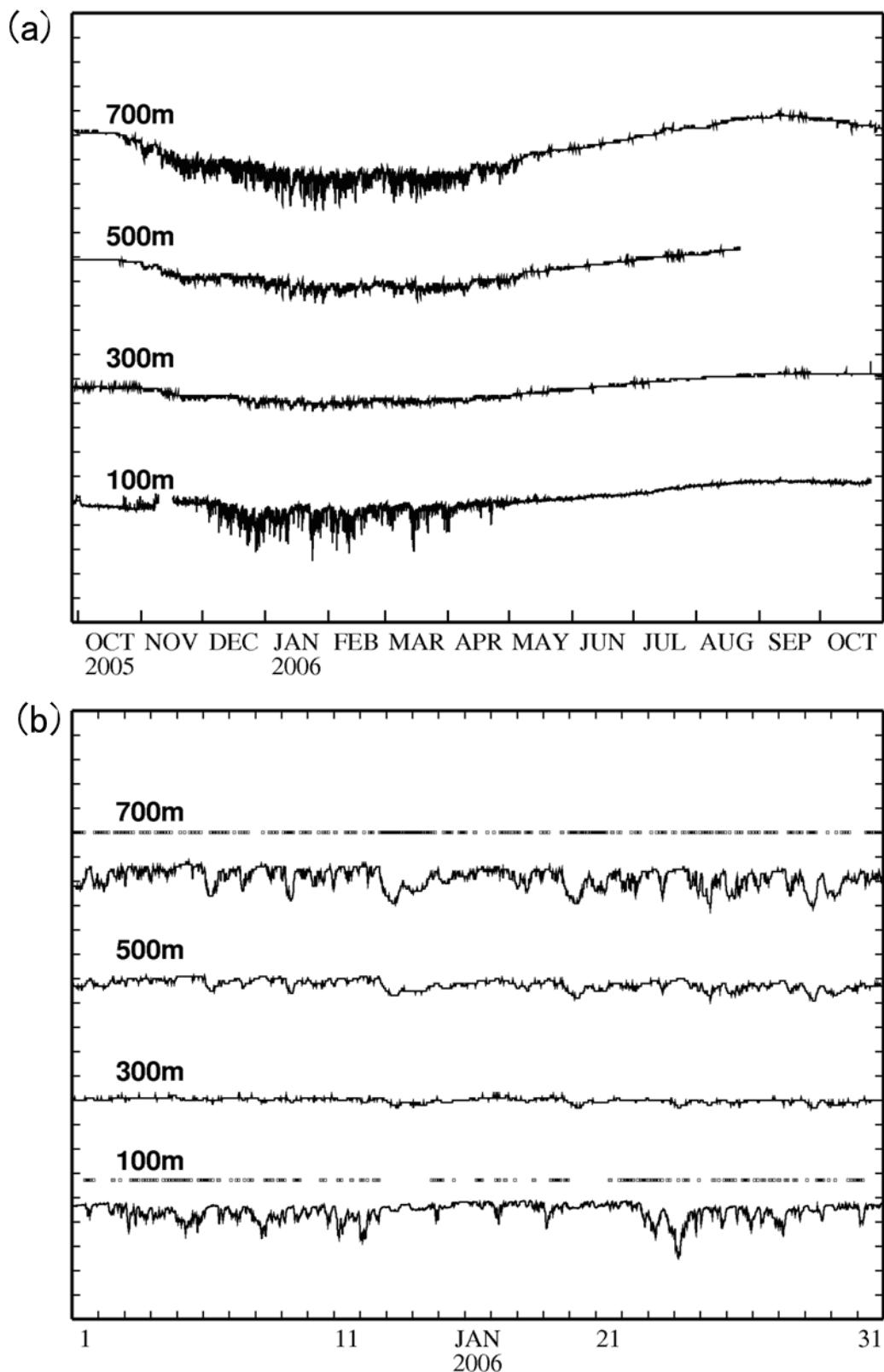


Fig. 4.3.10. Temperature changes in the Tenryu-Funagira tunnel. The numerals denote distances from the south entrance of the tunnel. (a) Changes from October 2005 to October 2006. (b) Changes in January 2006. The dots on 700m indicate that the wind direction is north, and those on 100m indicate that the wind direction is south.

度グラフの上にそれぞれ点を描いて示している。たとえば、1月13日から14日にかけて北寄りの風が続いている時期があるが、その時期には300~700mで温度の低下が見られる一方、100mの温度変化はその直前までの変化に比べて落ちている。このように、おおまかな傾向として、北寄りの風の日に300~700m地点で、南寄りの風の日に100m地点で温度の低下が見られる。試験観測期間を含む2008年12月まではトンネル坑口が完全に塞がれているわけではなく、すき間がある状態であった。そのため、トンネル外との空気の流通があり、冬季にトンネル内より温度の低い外気が坑口から吹き込むことによってトンネル内の温度変化が引き起こされていたと考えられる。また、300m地点より南側を境にして、北側が北口から吹き込む外気の、南側が南口から吹き込む外気の影響下にあると考えられる。

このような冬季の外気の吹き込みによる温度変化が歪変化に影響を及ぼしている例を次に示す。Fig. 4.3.11は、観測期間①における歪変化と100m地点(tem_100)および300m地点(tem_300)の地表付近温度変化を示す。tem_300については、5~6日程度の周期をもつ変動の山谷が歪変化の山谷と一致しているように見える。tem_100については、その変動が大きい2007年12月31日から2008年1月9日までの期間に、歪変化にも1日から数日周期の変動がやや大きく現れている。いずれの影響も温度の上昇に対し伸びの歪である。

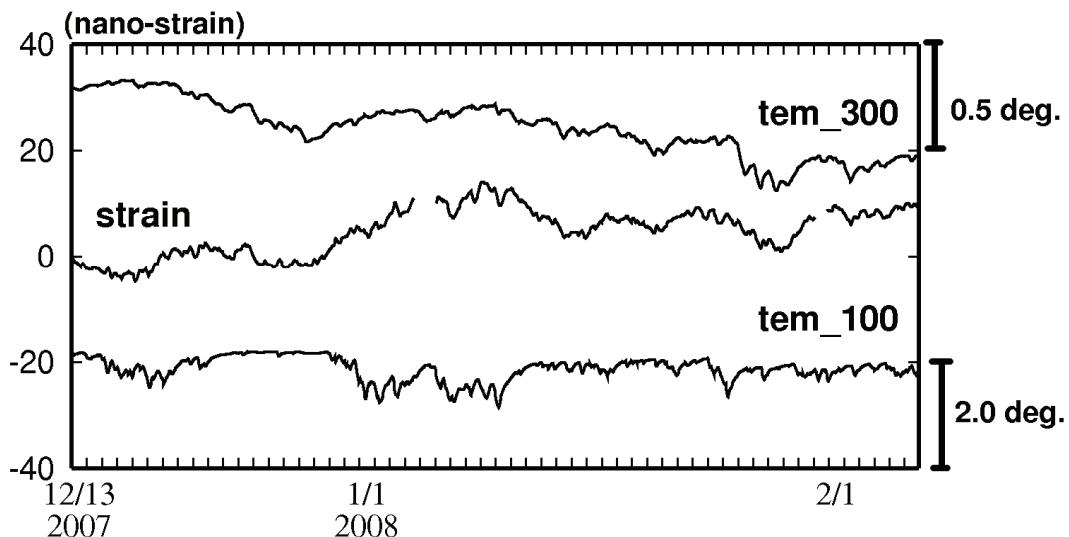


Fig. 4.3.11. Strain and temperature changes in the Tenryu-Funagira observation tunnel from December 13, 2007 to February 6, 2008. Here, tem_100 indicates the temperature 100m from the south entrance of the tunnel, and tem_300 indicates the temperature 300m from the south entrance of the tunnel.

これらの温度と歪の関係について、応答係数を求める。Fig. 4.3.11に示した観測期間①の気圧応答成分を除去した歪データについて、並行観測データとしてtem_100およびtem_300のデータを用いる。BAYTAP-Gによる潮汐解析において、並行観測データの最大ラグ数を0から1ずつ24まで増やしながら順次解析し、求められたラグごとの係数が誤差を超える大きさの値をもち、かつABICに有意な減少が見られる範囲として必要最小限のラグ数を求め、それを最適なものとした。tem_100に対する歪の応答について、ラグ数は10となった。tem_300に対する歪の応答について、ラグ数は3となった。Fig. 4.3.12は、tem_100, tem_300それぞれについて求められたラグごとの係数を示す。この係数を使って計算した温度応答歪と元データから引き去った残差をFig. 4.3.13(a)に示す。相関のある変化は完全には補正しきれていないようであるが、概ね小さくなっている。また、2008年11月から12月のデータに適用した結果をFig. 4.3.13(b)に示す。(b)についても歪変化に見られる5~6日程度の周期の変動の山谷は概ね補正できており、求められた係数は妥当なものと考えられる。

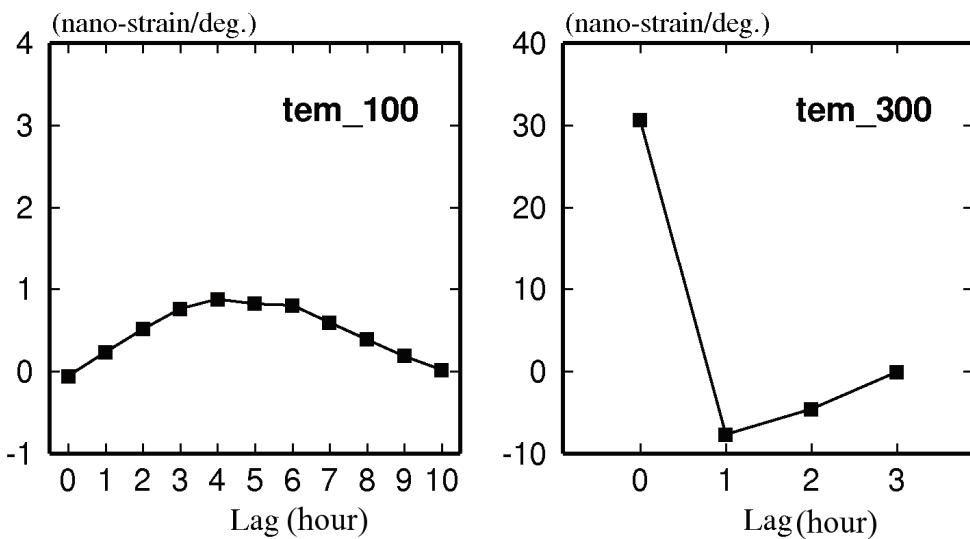


Fig. 4.3.12. Correlation factors between strain and temperatures. Here, tem_100 indicates the temperature 100m from the south entrance of the tunnel, and tem_300 indicates the temperature 300m from the south entrance of the tunnel.

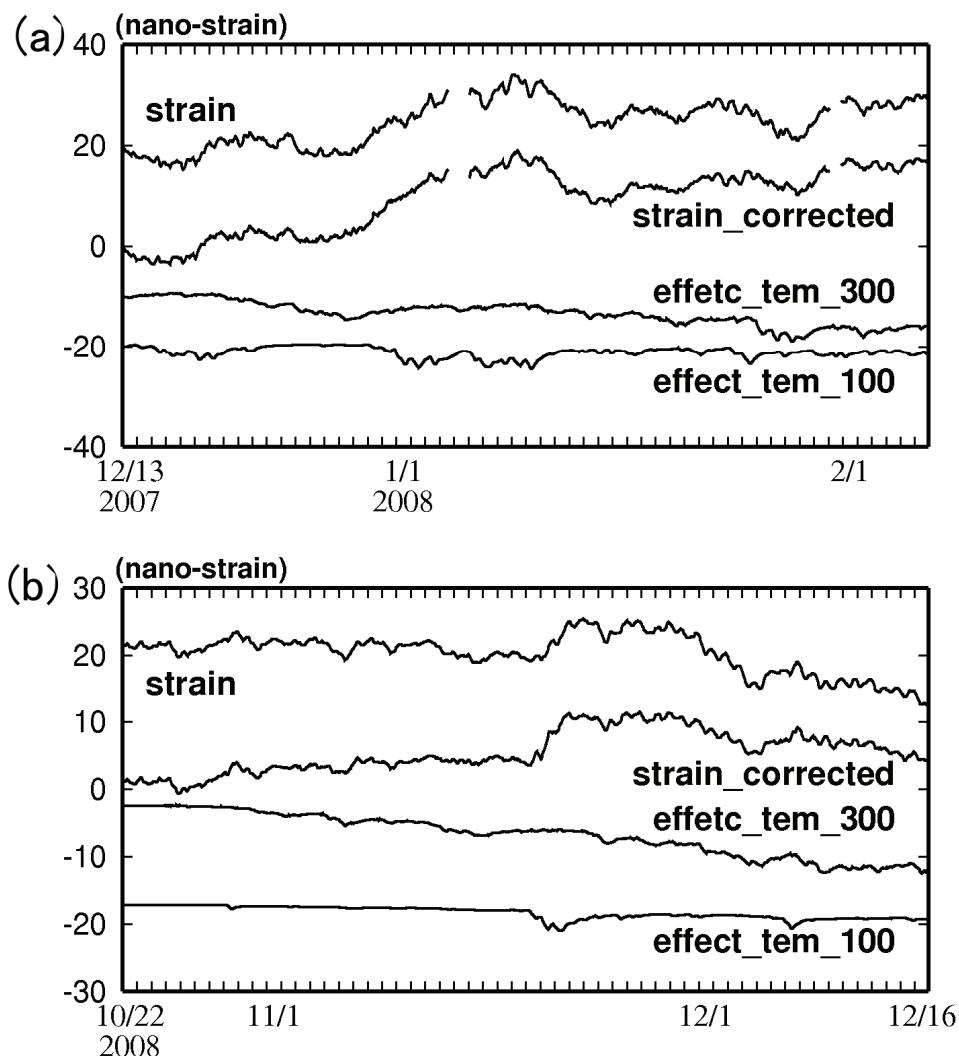


Fig. 4.3.13. Strain changes, temperature effect of strain, and corrected strain changes (a) from December 13, 2007 to February 6, 2008, and (b) from October 22 to December 16, 2008.

この温度補正により、別の温度影響がある可能性が明確になった。Fig. 4.3.13(a)に示す歪変化には12月30日から1月2日にかけて他の時期には見られない大きな伸びの変化がある。同時に100m地点の温度(tem_100)は大きな低下を示している。同様に、Fig. 4.3.13(b)では11月19日から21日にかけて大きな伸びの変化と100m地点の温度低下が見られる。上で調べた温度上昇に対する伸びの歪とは逆の関係であるが、温度補正量(effect_tem_100)との比較からわかるように、これは温度補正によって生じた見かけの変化ではない。

ここで、温度影響ではないが、坑口からの外気の吹き込みが歪観測に影響を及ぼしている別の現象について触れる。Fig. 4.3.14(a)に2007年12月16日12時20分から12時50分まで、Fig. 4.3.14(b)に0時00分から0時30分までの、0.1秒値の歪元データとカットオフ周期60秒のローパスフィルターを通したデータとを示す。ローパスフィルターを通したデータはFig. 4.3.14(b)では滑らかに変化しているのに対し、Fig. 4.3.14(a)には数分程度の周期的変化が見える。Fig. 4.3.15(a)およびFig. 4.3.15(b)にFig. 4.3.14に示したのと同じ2007年12月16日1日間の歪および気圧変化を示す。歪変化には半日周が卓越した両振幅 10^{-8} strainの潮汐変化の上に10時から15時台にかけて微小な変動が重畠しているのが見える。同時期の気圧変化にも同じような短周期な変動がわずかに認められ、両者の間に関係があるように思われる。両者の関係をさらに長期間にわたって調べるため、まずこの分オーダー周期の変動を抽出するフィルターの通過帯域を決定する。Fig. 4.3.16(a)およびFig. 4.3.16(b)に歪および気圧変化のパワースペクトルを示す。太線が変動時間帯、細線が静穏時間帯のパワースペクトルである。歪のパワースペクトルに見える周期0.5秒と5秒付近にピークをもつ常時微動は変動時間帯、静穏時間帯で同じレベルである。気圧、歪とも 10^2 Hz付近のパワースペクトルに違いが見られ、変動時間帯に上昇している。そこで、気圧データは300秒のハイパスフィルター、歪データは60~300秒のバンドパスフィルターを通すこととした。Fig. 4.3.17(a)およびFig. 4.3.17(b)に2007年12月13日から2008年2月6までの歪および気圧データをそれぞれのフィルターに通した結果を示す。2つのグラフを比較すると、変動の大きな時間帯は歪変化と気圧変化との間で概ね一致している。変動の大きな時間帯は毎日同じ時間帯に現われるわけではなく、昼の時間帯に現わることが多いが夜の時間帯に現われることもある。また平日・休日との関係も見いだせない。したがって、この変動は人間活動に起因するものではないと考えられる。Fig. 4.3.11に示す100m地点の温度変化(tem_100)と比較すると、振幅が大きい時間帯は100m地点の温度が低下している時間帯と概ね一致する。このことから、 10^2 Hz付近の変動もまたトンネル内への外気の吹き込みが原因ではないかと考えられる。4.2節で述べたように、レーザー伸縮計の真空容器には容器外の気圧変化による変形を避けるためのバランス機構を備えている。この機構はゆっくりとした気圧変化には対応できるが、急な気圧変化には対応しきれないのかもしれない。そのため、 10^2 Hz付近の周期帯に限ってレーザー伸縮計の真空容器に動圧がかかり、それが固定されている基台を変形させているのではないかと推測される。

このように、トンネル内外の空気の流通が予想以上に歪観測に影響を及ぼしていることが判明した。センサー部の小さいボアホール歪計に比べ、レーザー伸縮計の場合には温度影響を受ける機構が複雑で、温度を正確に観測したとしても歪を補正することは難しい。そこで温度変化をより小さく抑えるため、本節冒頭で記したように、試験観測終了後の2008年12月に新たに遮蔽幕を取り付けるなどの処置を施した。Fig. 4.3.18にその前後の温度変化を示す。図中Aで示す処置後、トンネル内の温度は冬季特有の大きな低下を示すことなくゆっくりと上昇した。図中Bで示す2009年1月下旬から2月上旬にかけての期間は、レーザー伸縮計の基線長を200mから400mに伸ばす工事の間、南坑口から強制送風してトンネル内換気を行ったために100m地点での温度に低下が著しい。工事終了後は再度温度がゆっくりと上昇した。遮蔽幕を取り付けるなどの処置の結果、トンネル内の温度は前年同期と比較して冬季にも拘わらず安定し、tem_100とtem_300の差も小さくなった。遮蔽幕に挟まれたトンネル内部の温度環境が安定し、かつ一様均質になったことを示している。このような温度環境であれば、観測される歪への温度影響はほぼ年周変化だけに限られると思われる。

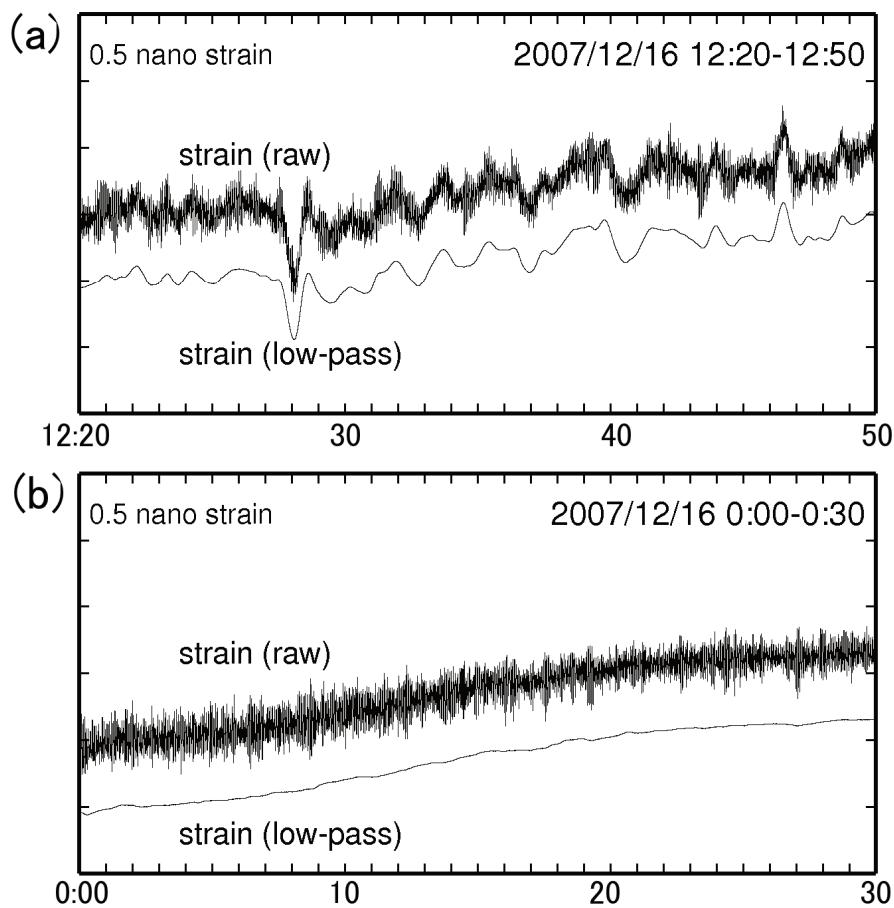


Fig. 4.3.14. 10Hz sampling (raw) data of strain changes and output of the low-pass filter with a cut-off time of one minute. (a) During a period when fluctuation of several minute cycle was observed. (b) During a period without such fluctuation.

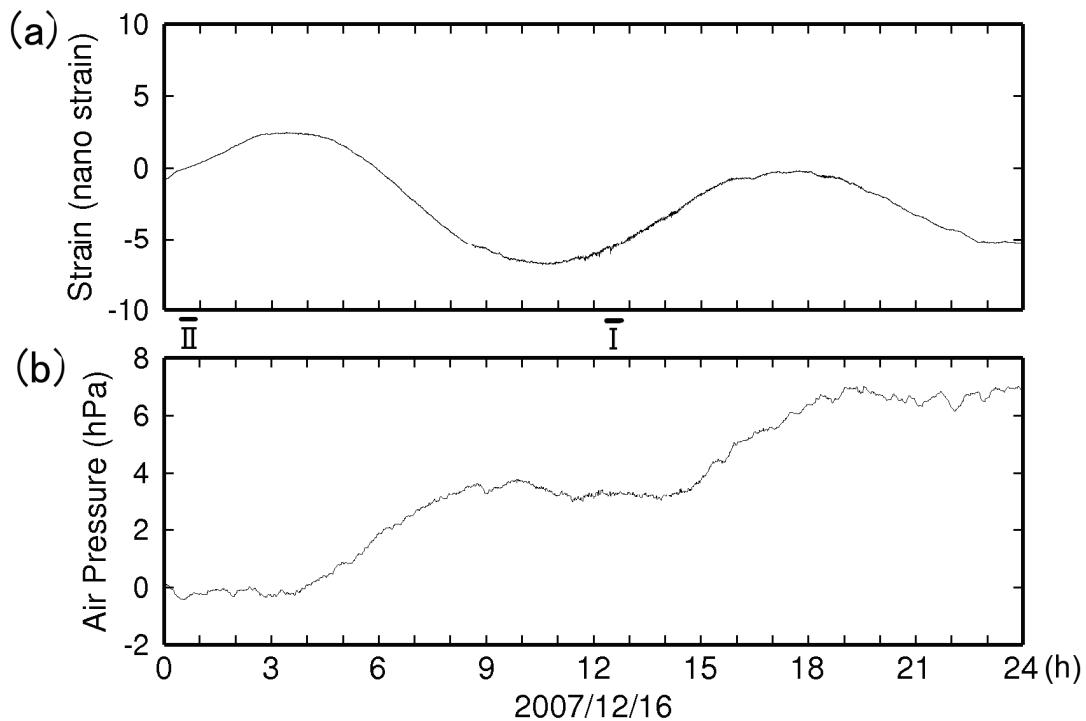


Fig. 4.3.15. Strain change and air pressure change on December 16, 2007. Strain change in a period indicated by I is presented in Fig. 4.3.14 (a) and that indicated by II in (b).

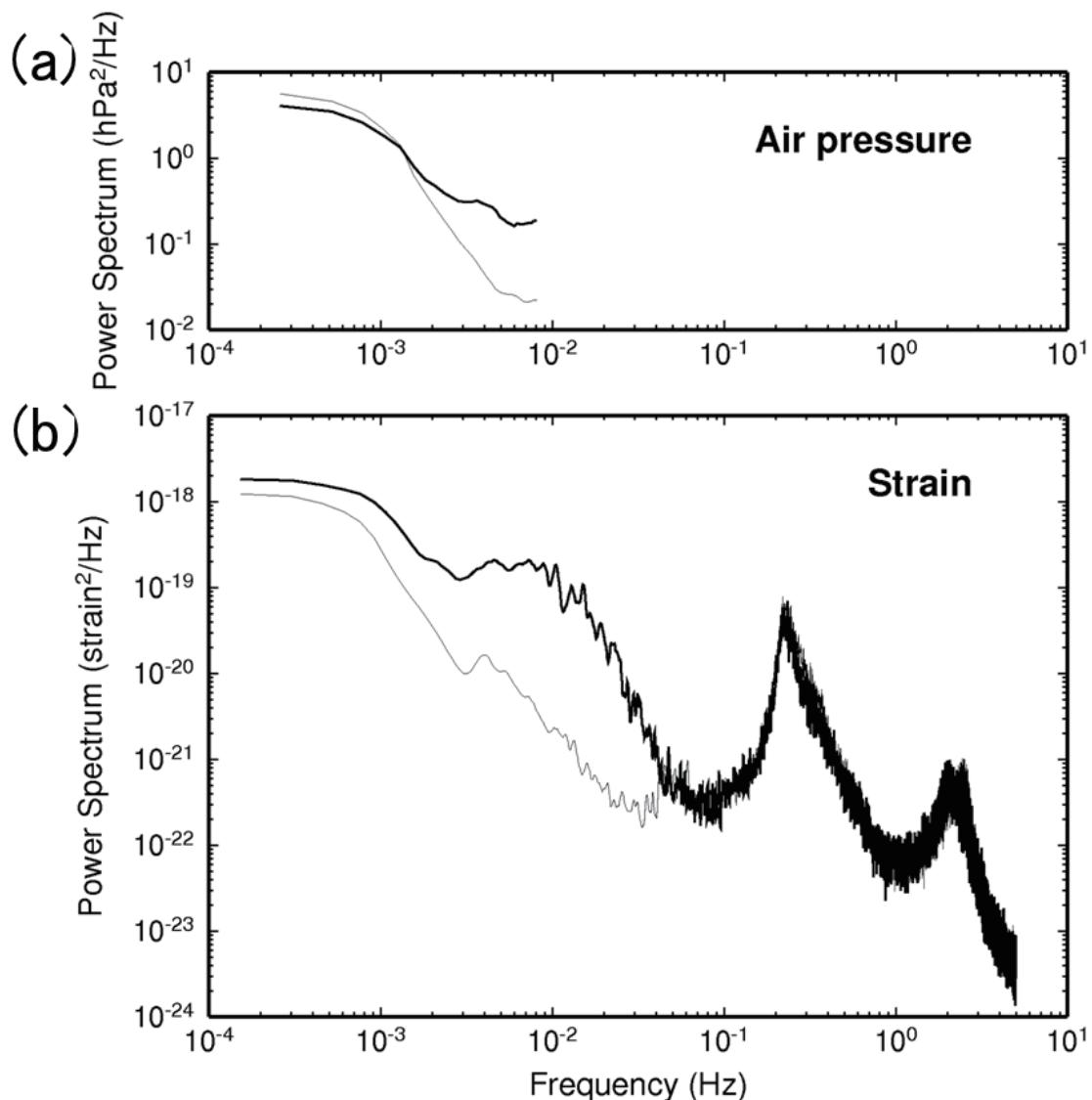


Fig. 4.3.16. Power spectrum density functions of air pressure and strain observed at Tenryu-Funagira on December 16, 2007. Thick and thin lines denote the power spectrum density calculated from 11:00 to 15:00 and others.

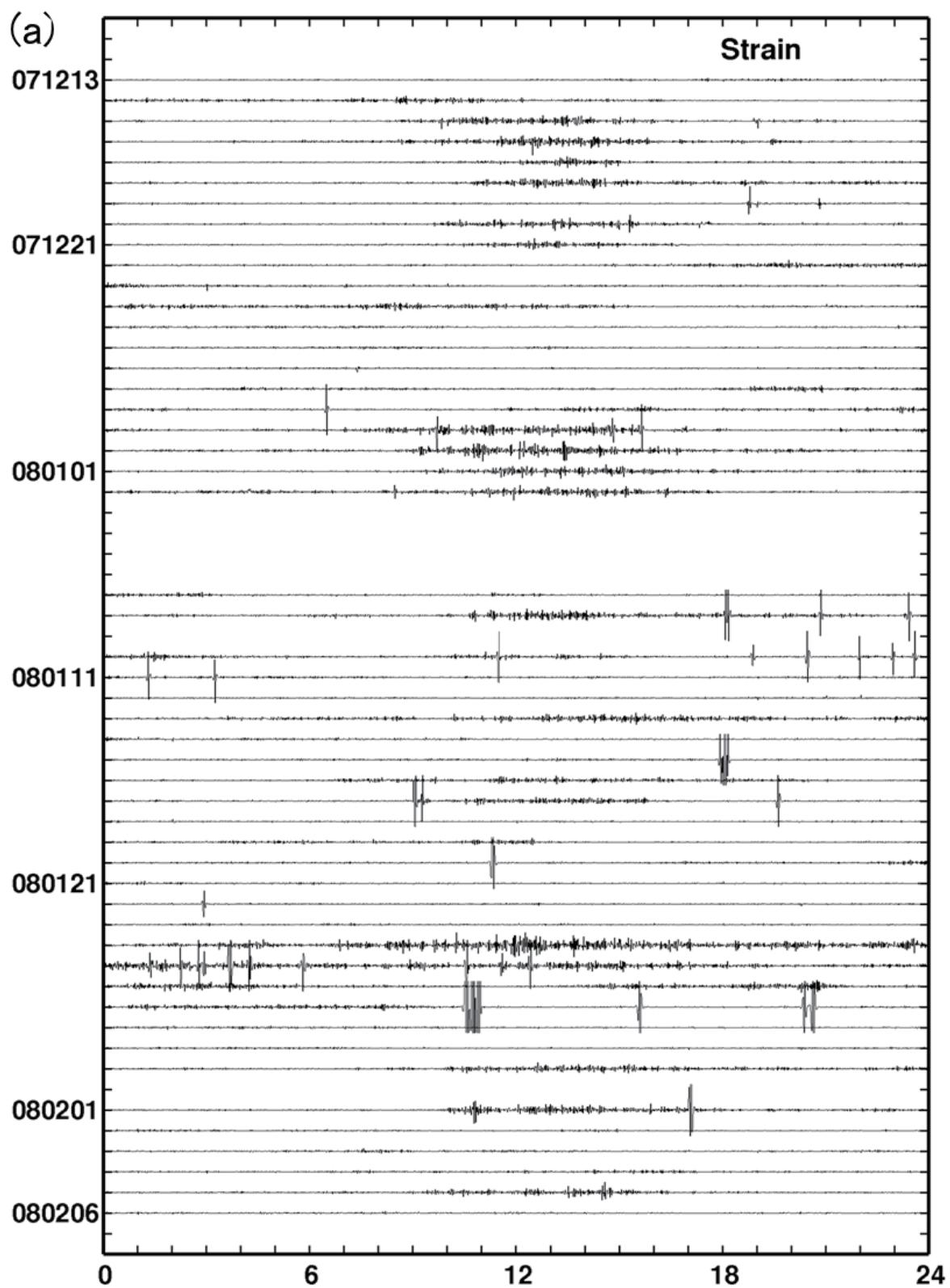


Fig. 4.3.17. (a) Band-pass-filtered strain data in a range of 60-300seconds from December 16, 2007 to February 6, 2008. (b) Air pressure data of the same pass-band.

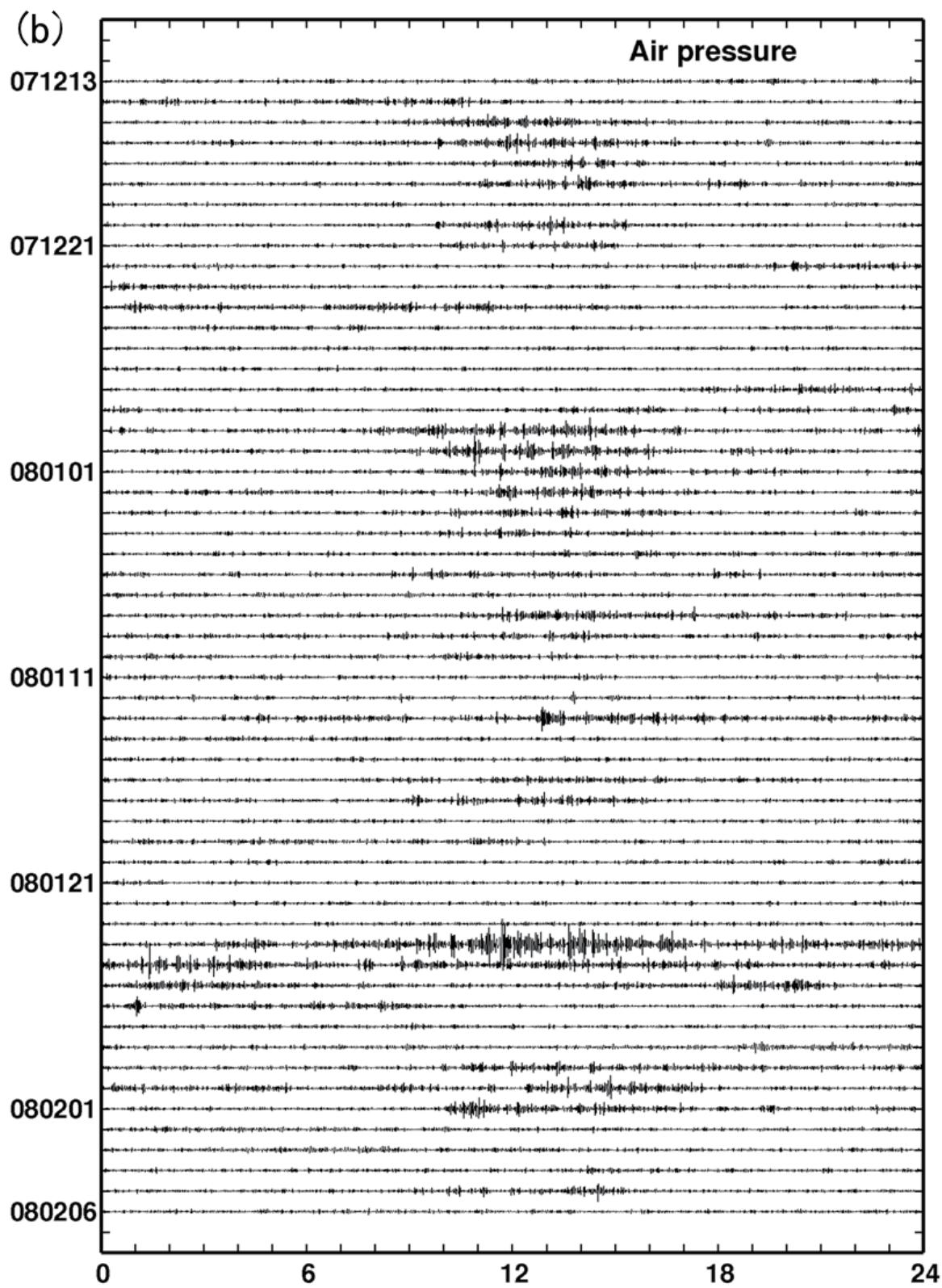


Fig. 4.3.17. (continued)

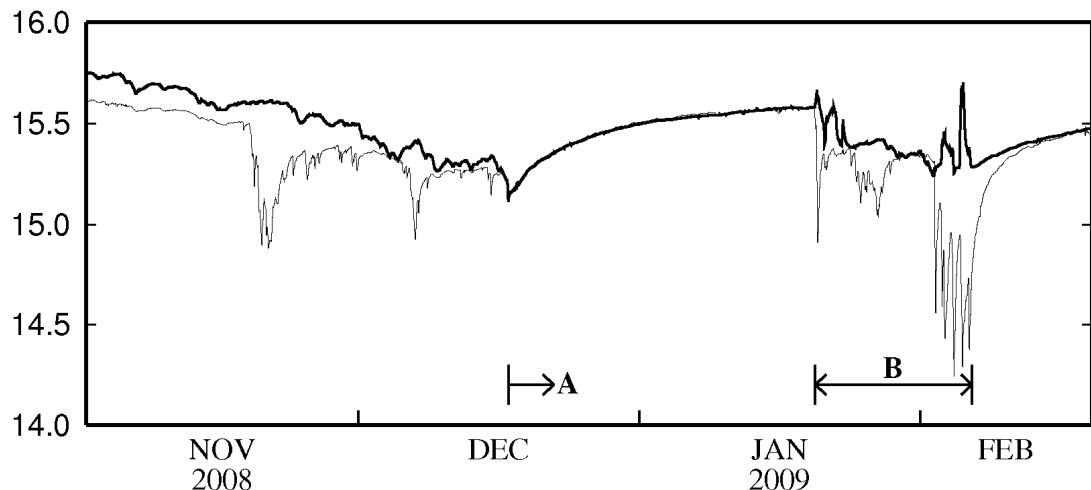


Fig. 4.3.18. Temperature changes in the tunnel from November 2008 to February 2009. Thin and thick lines denote temperature observed at 100m and 300m from the south entrance of the tunnel. The temperature in period A (from December 16) was stable. The temperature in period B (from January 16 to February 6) was disturbed due to construction work.

4.3.6 降水の影響

Fig. 4.3.19 は、Fig. 4.3.8 に示した歪変化、Fig. 4.3.9 に示したアメダスの天竜観測点における日降水量を再掲するとともに、累積降水量から直線トレンドを引き去った偏差を示す。直線トレンドは 2007 年 12 月 1 日と 2008 年 12 月 1 日との間で定めた。累積降水量偏差は、11 月から 3 月にかけての冬季には相対的に雨が少ないため減少し、3 月から 6 月、特に 5 月から 6 月にかけて増加、7 月から 10 月までは高位安定している。年周的な歪変化と比較すると、冬季の降水量偏差減少に対して伸びの歪、夏季の降水量偏差増加に対して縮みの歪という対応が見られ、両者の間に関係があるかもしれないことを示すが、降水量偏差が減少から増加に転じる 2008 年 3 月前後の歪変化が欠測のためわからない。

Fig. 4.3.20 は、夏季の 2 つの期間について、歪変化と累積降水量変化を拡大して示す。Fig. 4.3.20(a) は、2008 年 6 月 17 日から 7 月 6 日までの 20 日間である。この間に 3 回の降雨があるが、それに対応して歪変化には 1×10^{-8} strain 程度の縮みとゆっくりとした回復が見られる。この対応関係から、歪変化は降水の影響を受けていると推測される。Fig. 4.3.20(b) は、2008 年 8 月 17 日から 9 月 5 日までの 20 日間である。6 月と同じ程度の降水量があるにもかかわらず対応するとみられる歪変化はほとんど認められない。これ以外の時期にも 6 月と同じ程度の降水が見られるが、対応する歪変化は見られない。すなわち、降水量と歪変化との間の関係は時間的に一定ではない。

トンネル内では常時湧水しているわけではないが、南口から 600~700m の区間ではトンネル壁面に所々湿っている箇所がある。それ以外の箇所でも時期は限られるが湧水の痕跡が認められることがある。1 年のうち限られた時期にだけ歪変化に降雨の影響が見られるのは、レーザー伸縮計が設置されているのが南口から 100~300m の区間で、多雨期にのみ影響が及ぶためではないかと考えられる。この推測が正しければ、400m に延長された場合、降水の影響をより大きく受ける恐れがある。

今回は、観測点近傍にある船明ダム湖 (Fig. 4.3.2) の水位変化の影響については調べなかった。ダム湖の水位は 1 年を通じて安定しているものの、降雨時にはダム湖への流入量とダムからの流出量の関係により普段より大きな歪変化が起きる可能性がある。

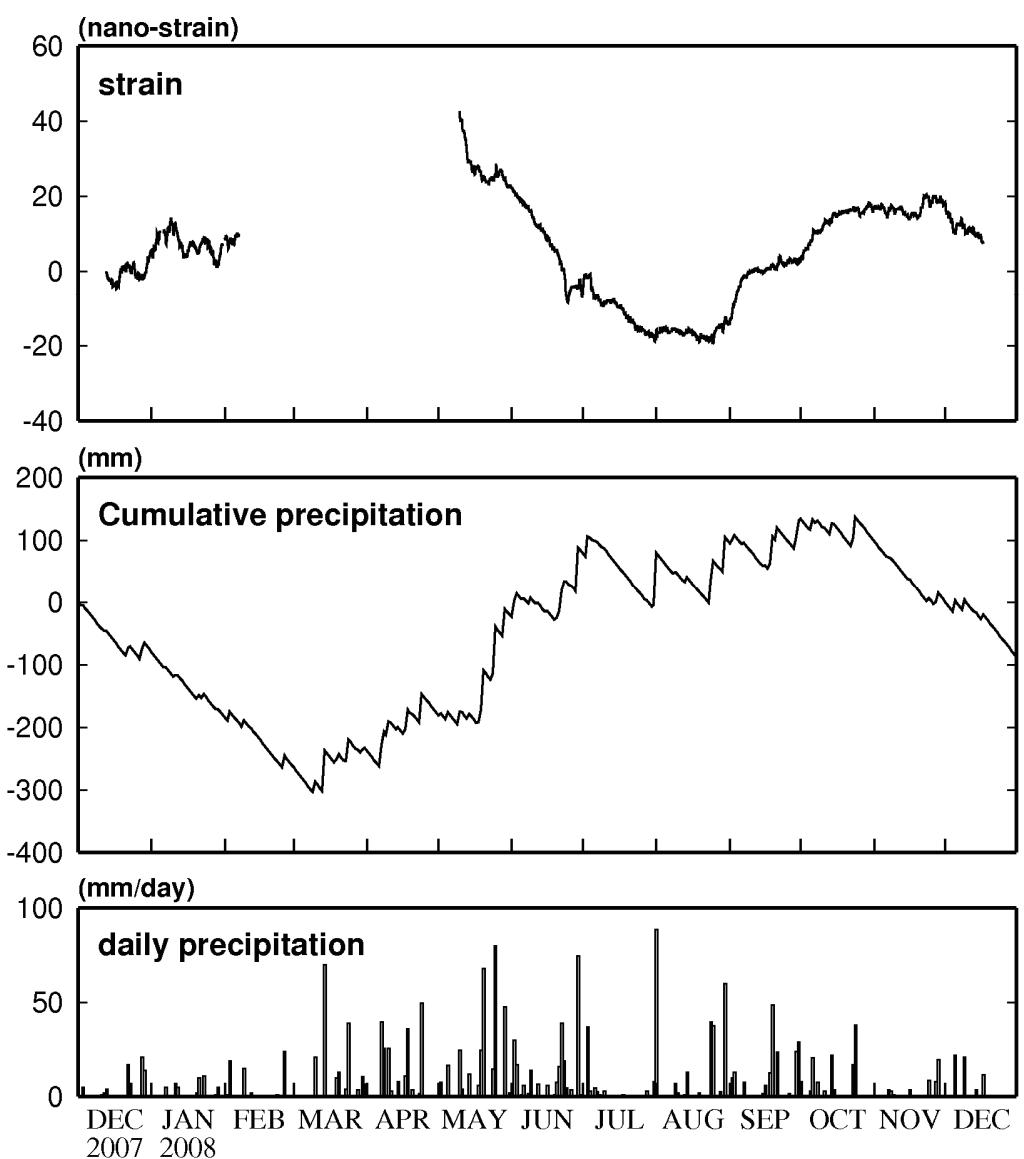


Fig. 4.3.19. Strain change observed by the Tenryu-Funagira laser extensometer, cumulative precipitation deviation, and daily precipitation observed at the Tenryu AMeDAS station from December 2007 to December 2008.

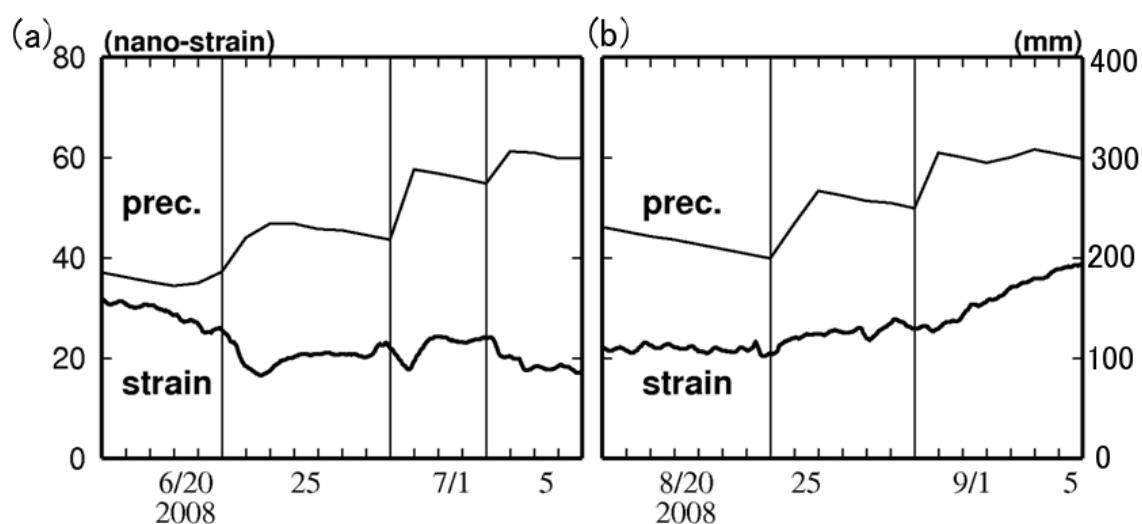


Fig. 4.3.20. Cumulative precipitation deviations calculated from daily precipitation observed at the Tenryu AMeDAS station and strain changes observed by the Tenryu-Funagira laser extensometer (a) from June 17 to July 6, and (b) from August 17 to September 5.

4.3.7 短期的スロースリップイベントによる歪変化

観測期間中、東海地域に設置された多成分歪計によって短期的スロースリップイベントによる歪変化が観測された事例は、(a)2008年1月1日～10日、(b)5月15日～19日、(c)8月25日から9月5日の3回である。Fig. 4.3.21は、それぞれの期間を含む30日間のレーザー伸縮計による歪変化を示す。いずれも温度影響は除去しておらず、それぞれ適切な直線トレンドを差し引いて示している。図中には低周波地震の活動期間を横線で示している。(a)の2008年1月には、温度影響の項で触れたように温度変化による歪変化が見られるが、低周波地震の活動期間に対応する傾向変化は認められない。(b)の2008年5月は、レーザー伸縮計の調整を行って観測を再開した直後であり、傾向変化ははつきりわからない。いずれの期間も 10^{-8} に達するような変化は観測されていないと思われる。(c)では、活動期間に対応する 2×10^{-8} の伸びの歪が見られ、伸びは前半緩やかで後半大きい。

Fig. 4.3.22は、2008年8月から11月までの間の低周波地震の震央と天竜船明観測点および多成分歪計の観測点(掛川、浜北、佐久間、春野、本川根)の位置を示す。Fig. 4.3.23は、それらの観測点における歪変化と低周波地震の日回数、天竜における日降水量を示す。多成分歪計については、レーザー伸縮計と同じ南北方向に近い成分だけを取り出した。Fig. 4.3.23に示す低周波地震回数から、2008年8月から9月にかけての低周波地震の活動は、Fig. 4.3.22に(I)で示す長野県南部・愛知県東部領域で始まり、その後(II)で示す愛知県の領域で活発化したことがわかる。レーザー伸縮計の伸び歪が前半緩やかで後半大きいのは、この活動領域の違いと活動度の違いを反映していると考えられる。2008年1月の活動領域は領域(I)、2008年5月の活動領域は領域(III)であった。天竜船明観測点のレーザー伸縮計では、領域(II)での活動が観測されやすいと思われる。この期間全体の各観測点の歪変化の極性と量は、プレート境界におけるすべりを仮定すると、ほぼ整合的に説明できる。

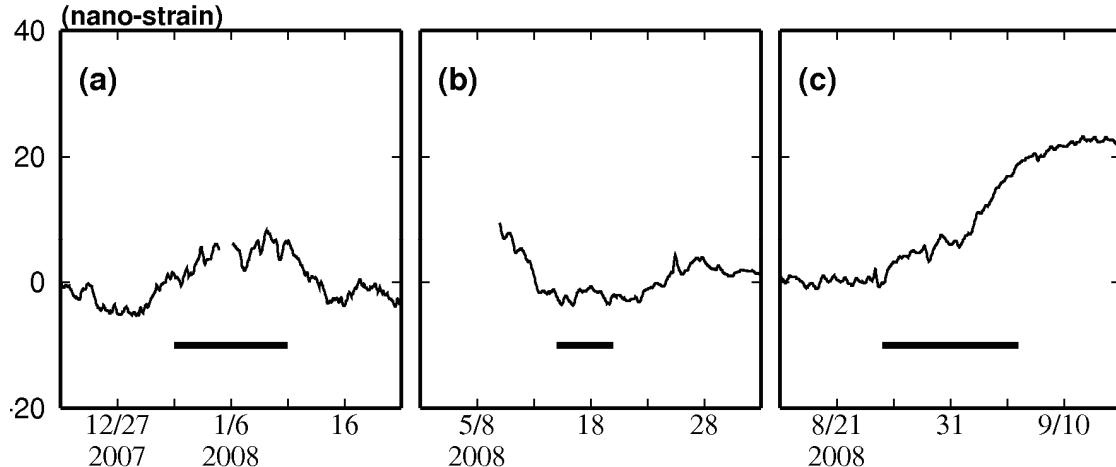


Fig. 4.3.21. Strain changes observed at Tenryu-Funagira. The thick horizontal lines denote the period when low-frequency earthquake was active. (a) December 22, 2007 to January 20, 2008. (b) May 3 to June 1, 2008. (c) August 16 to September 14, 2008.

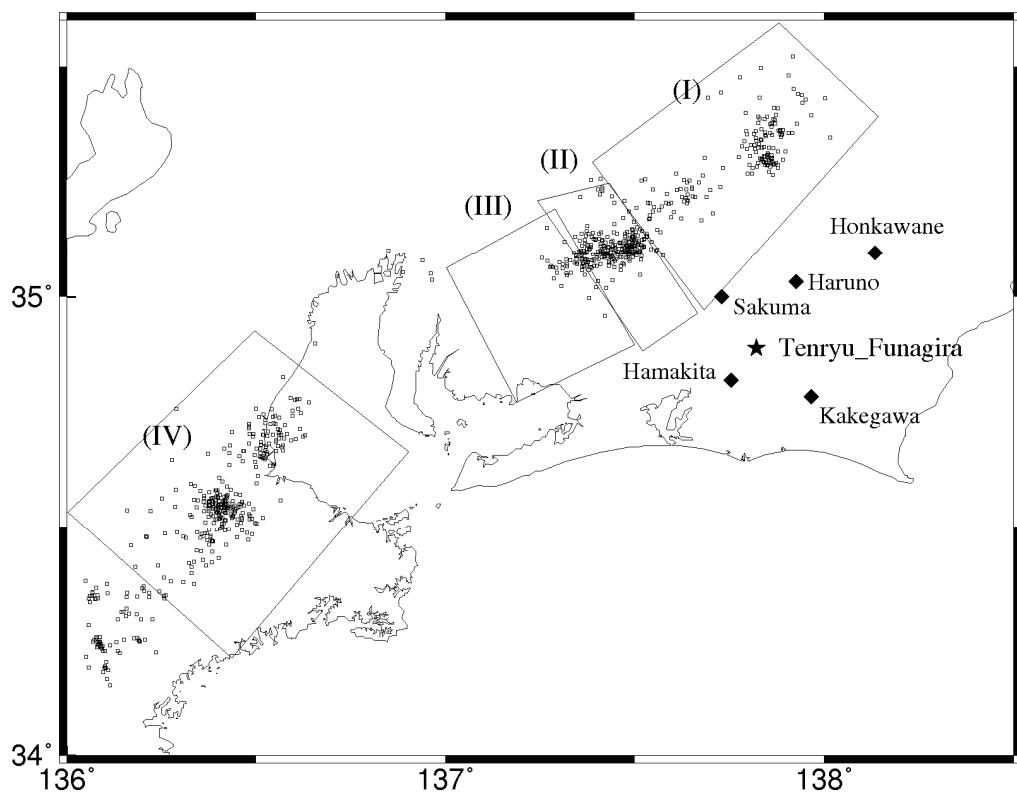


Fig. 4.3.22. Location map of crustal deformation observation stations (\star : Tenryu-Funagira laser extensometer, \blacklozenge : Multi-component strainmeter) and distribution of low-frequency earthquakes (LFEs) (circles) in and around the Tokai district. Rectangular areas (I), (II), (III), and (IV) denote clusters of LFE.

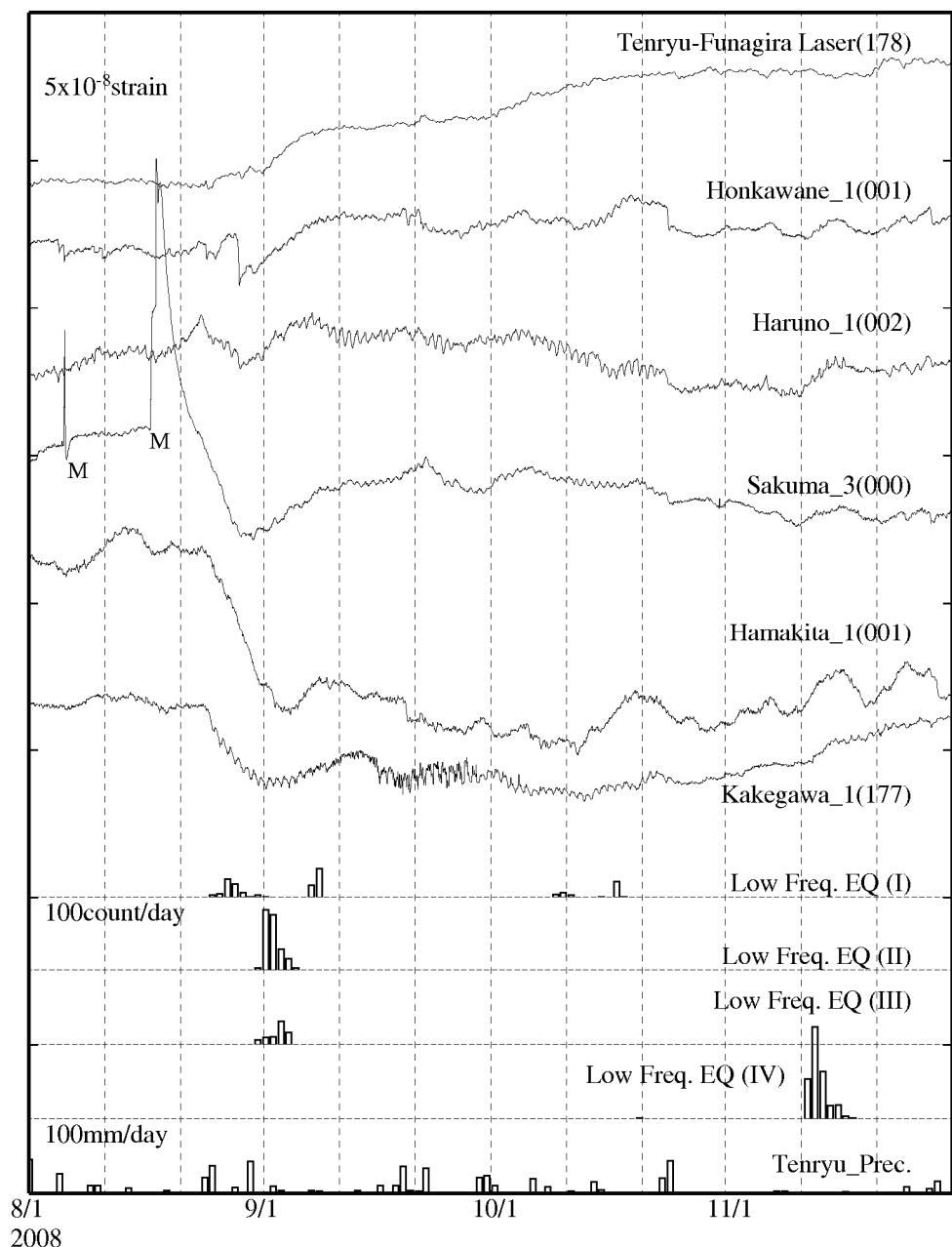


Fig. 4.3.23. Linear strain changes of the Tenryu-Funagira laser extensometer and the north-south component of multi-component strainmeters, the number of low-frequency earthquakes in each area depicted in Fig. 4.3.22, and daily precipitation at Tenryu from August to November 2008. Numerals in brackets attached to the station names denote the azimuth of the strain sensor. In the graph, M denotes maintenance of the strainmeter.

4.3.8 レーザー伸縮計の観測精度と変動検出能力

Fig. 4.3.24(a)は、天竜船明レーザー伸縮計で観測された歪変化のノイズスペクトルを示す。 10^{-3} Hzより高周波側はFig. 4.3.16に示した静穏期のノイズスペクトルと同じものであり、低周波側は観測期間②の1時間値から計算したものである。同図(b)は、Crescentini *et al.*(1997)がPinon Flat(PFO), Poorman Mine (PM), Queensbury Tunnel (QT), およびGran Sasso (GS)のレーザー伸縮計(4.1節参照)のノイズスペクトルを取りまとめたものにTakemoto *et al.*(2004)が神岡レーザー伸縮計のノイズスペクトルを加えたものである。両図を比較すると、天竜船明は神岡よりも 2×10^{-3} Hzより高周波側でノイズスペクトルが高い。これは神岡が地下1kmに設置されているのに対し、天竜船明は地表に近く気象影響をより受けやすいことが効いていると思われる。それ以外のレーザー伸縮計と比較すると天竜船明はPFO, PMとほぼ同等か少し高く、QT, GSよりも低い。基線長は、4.1節で紹介したように、前2者が500~720m、後2者が100m未満であり天竜船明は200mである。ノイズスペクトルが両者の中間に位置するのは基線長に依存している部分があるのかもしれない。

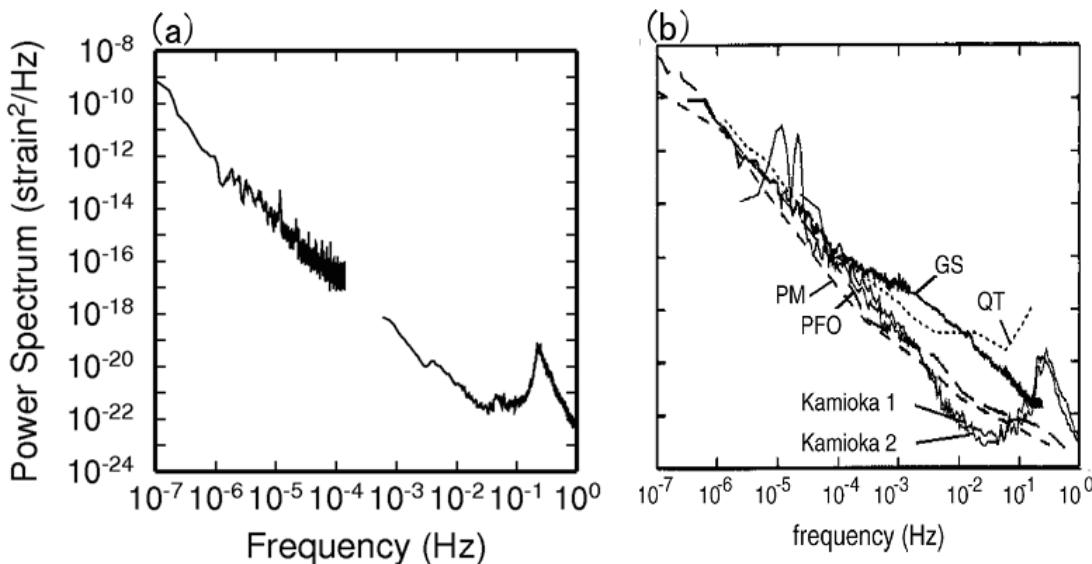


Fig. 4.3.24. Power spectrum density (PSD) function of the laser extensometers. The left panel denotes the PSD of the Tenryu-Funagira laser extensometer. The right panel denotes the PSDs at Kamioka, Pinon Flat (PFO), Poorman Mine (PM), Gran Sasso (GS), and Queensbury Tunnel (QT) compiled by Takemoto *et al.* (2004).

Fig. 4.3.25(a)は、4.1節で記述した手法に基づいて評価した天竜船明レーザー伸縮計の変動検出レベルを、Fig. 4.1.3やFig. 4.1.8(c)に示したAgnew and Wyatt(2003)によるCaliforniaのレーザー伸縮計の変動検出レベルと比較して示す。両者は、時間間隔によって多少の差が見られるものの、絶対レベル、時間間隔依存性とも良く一致している。Fig. 4.3.25(b)は、Fig. 4.1.8で示した東海地域の多成分歪計の平均変動検出レベル、および短期的、長期的SSEによる歪速度と天竜船明レーザー伸縮計の変動検出レベルとの比較である。Fig. 4.3.25(c)は、Fig. 4.1.8(a)に示したGPS変位の変動検出レベルを再掲している。

GPS変位の変動検出レベル(3倍、以下同様)と長期的SSEによる変位速度との交点は 1.7×10^7 秒(6.5ヶ月)であり、複数観測点の効果でこれより早期の変動検出が可能である。レーザー伸縮計の変動検出レベルと長期的SSEによる歪速度との交点は 6×10^6 秒(約2ヶ月)となり、多成分歪計の 7.0×10^7 秒(2.2年)よりもずっと早く、1観測点でも複数観測点のGPS変位と並びうことになる。これらのことから、天竜船明レーザー伸縮計は当初期待し目標とした精度性能を達成できていると考えられる。

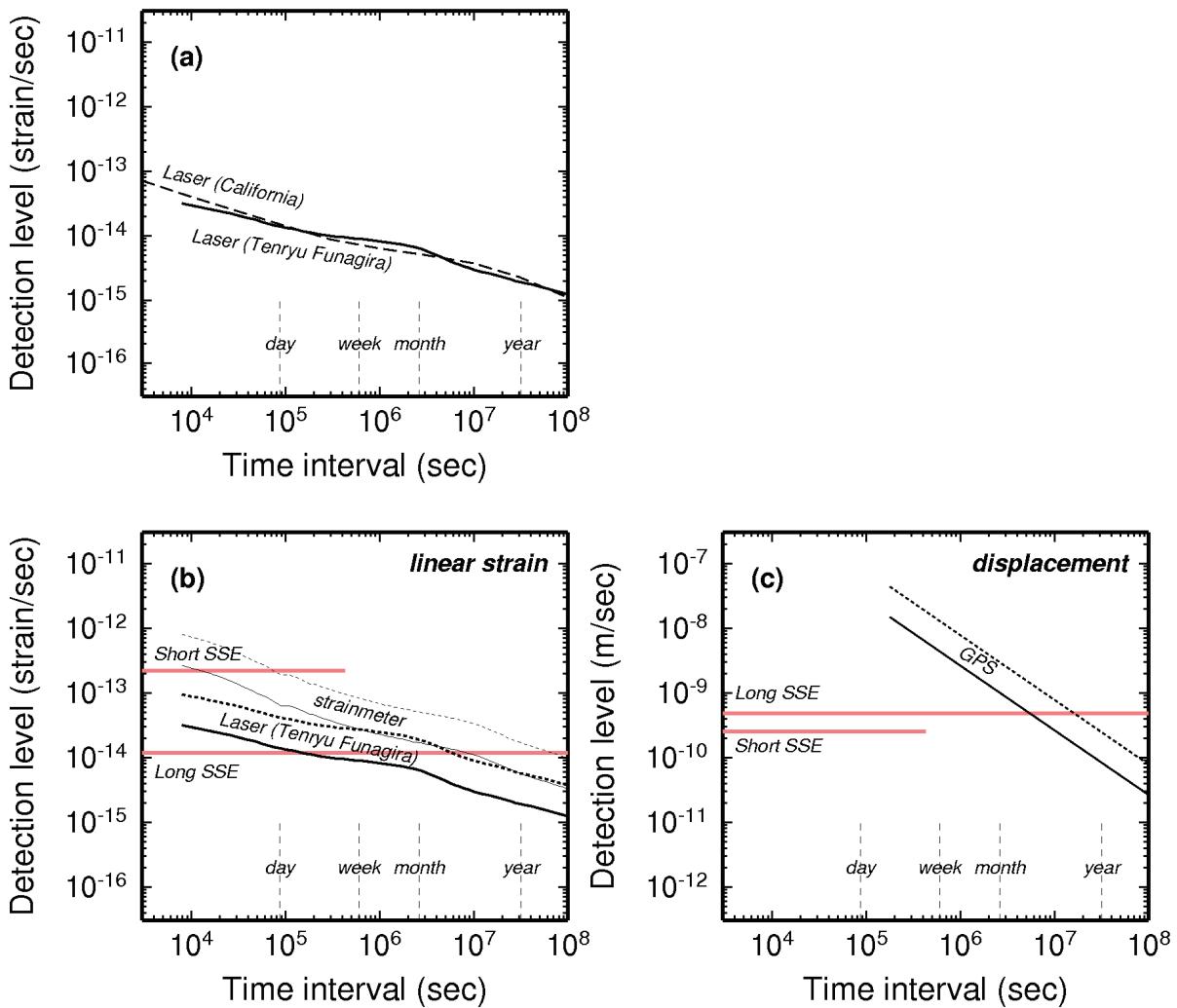


Fig. 4.3.25. (a) Evaluated detection levels of the laser extensometer installed at Tenryu-Funagira. The broken curves denote the detection level of the laser extensometer evaluated by Agnew and Wyatt (2003). (b) Detection levels of the laser extensometer (thick curve) and the multi-component strainmeter (thin curves), and linear strains induced by short-term and long-term SSEs (red lines). (c) Detection level of the GPS coordinate (thick curve) and displacement induced by short-term and long-term SSEs (pink lines). The dotted curves denote three times the evaluated detection level.

(山本剛靖)

謝辞

本調査では、国土地理院、北海道大学、弘前大学、東北大学、東京大学、名古屋大学、京都大学、高知大学、九州大学、鹿児島大学、防災科学技術研究所、産業技術総合研究所、海洋研究開発機構、青森県、東京都、静岡県、神奈川県温泉地学研究所、横浜市及び気象庁のデータに基づく震源情報を用いています。Fig.4.3.2では国土地理院発行の2万5千分の1地形図、二俣を使用しています。

参考文献

- Agnew, D. C. and F. K. Wyatt, 2003: Long-base laser strainmeters: A review, *Scripps Institution of Oceanography Tech. Rep.*, 54p.
- Crescentini, L., A. Amoruso, G. Fiocco, and G. Visconti, 1997: Installation of a high-sensitivity laser strainmeter in a tunnel in central Italy, *Rev. Sci. Instrum.*, **68**, 3206-3210.
- 柏原 静雄・永井 章・三上 直也, 1987: 松代における地殻変動の連続観測（VII）－石英管伸縮計データに対する気圧、気温の補正について－, 気象庁地震観測所技術報告, **8**, 29-37.
- Matsumoto, K., T. Sato, T. Takanezawa, and M. Ooe, 2001: GOTIC2: A program for computation of Oceanic tidal loading effect, *J. Geod. Soc. Japan*, **47**, 243-248.
- Takemoto, S., A. Araya, J. Akamatsu, W. Morii, H. Momose, M. Ohashi, I. Kawasaki, T. Higashi, Y. Fukuda, S. Miyoki, T. Uchiyama, D. Tastumi, H. Hanada, I. Naito, S. Telada, N. Ichikawa, K. Onoue, and Y. Wada, 2004: A 100m laser strainmeter system installed in a 1km deep tunnel at Kamioka, Gifu, Japan, *Jour. Geodyn.*, **38**, 477-488.
- Tamura, Y., T. Sato, M. Ooe, and M. Ishiguro, 1991: A procedure for tidal analysis with a Bayesian information criterion, *Geophys. J. Int.*, **104**, 507-516.