

地殻ひずみの観測に及ぼす局所的日照変化の影響

- 花山と立山観測室のデータ比較 -

竹本修三*・和田安男・伊藤 潔・福田洋一*・森井 互・百瀬秀夫*・中村光邦*

* 京都大学大学院理学研究科

要 旨

浅い観測室で地殻ひずみの観測が行われている京大理学研究科の花山観測室（京都市）と防災研究所の立山観測室（富山県）との観測データを比較し、地殻ひずみの観測に及ぼす日照変化の影響を検討した。その結果、花山観測室のレーザー伸縮計と立山観測室の3成分のスーパーインヴァー棒伸縮計のうち、坑道入口に近いE1成分の伸縮計には、気温の日周変化の帯域で、ほぼ時間遅れなく、 1×10^{-6} 程度の“伸び”の変化が見られた。

キーワード: 地殻変動, 伸縮計, 地殻ひずみ, 地球潮汐, 日照変化

1. はじめに

地殻変動連続観測に及ぼす種々の擾乱要素のなかに、日照変化に伴う観測室周辺岩盤の熱ひずみの影響の問題がある。この日照変化の影響は、観測室が浅い場合にとくに顕著であり、伸縮計で得られた観測データから地球潮汐ひずみを精密に求める場合には、その影響を十分に検討しておく必要がある。そこで、浅い観測室で地殻ひずみの観測が行われている京都大学大学院理学研究科の花山観測室（京都市）と京都大学防災研究所の立山観測室（富山県）との観測データを比較して、地殻ひずみの観測に及ぼす日照変化の影響を検討した。

2. 花山観測室の場合

京都大学大学院理学研究科地球物理学教室の花山観測室は、京都市山科区北花山の京都大学大学院理学研究科附属天文台花山天文台敷地内に1999年に設けられた幅3m、奥行き10m、かぶりの厚さ約3mの浅い観測室である。観測室（北緯 $34^{\circ}59'23''$ 、東経 $135^{\circ}47'46''$ 、標高214m）は、花山天文台敷地内の西方に位置しており、天文台本館の敷地より約5m高い気象観測用露場の風化花崗岩層台地の一部にオープン・カッ

ト工法により掘り込まれたものである。Fig. 1に示すように、観測室は、奥行き3mの前室と7mの後室に分かれている。4.8mの光路差をもつマイケルソン型のレーザー伸縮計は、観測室の後室にほぼ東西方向に向けて、設置されている（竹本・他, 2004b）。

観測室前室には絶対重力測定用の基台が設けられており、FG-5型絶対重力計（#210）を用いた絶対重力測定が1999年以来、繰り返し実施されている。観測室後室にはレーザー伸縮計のほか、STS-2型広帯域地震計も設置されている。これらの計器を用いた地震・地殻ひずみの観測が1999年から行われている。

Fig. 2に示されている花山観測室のレーザー伸縮計システムは、波長安定化 He-Ne ガス・レーザー（HP5517A）を光源とするマイケルソン型干渉計方式を採用しており、この観測システムのひずみ分解能は、 $1.24\text{nm} / 4.8\text{m} = 2.6 \times 10^{-10}$ である（竹本・他, 2004b）。

花山観測室のレーザー伸縮計で得られた2001年12月29日から2002年12月30日までの367日間の見かけのひずみ変化が室温及び気圧変化とともにFig. 3に示されている。この図で室温の年周変化の曲線上に見られるパルス状の変化は、人間が入坑したことによる室温変化の影響を示す。Fig. 3から長周期のひずみ変化は室温の年周変化と強い相関があり、前者は後者に比べて5~10日程度位相が遅れていることがわかる。

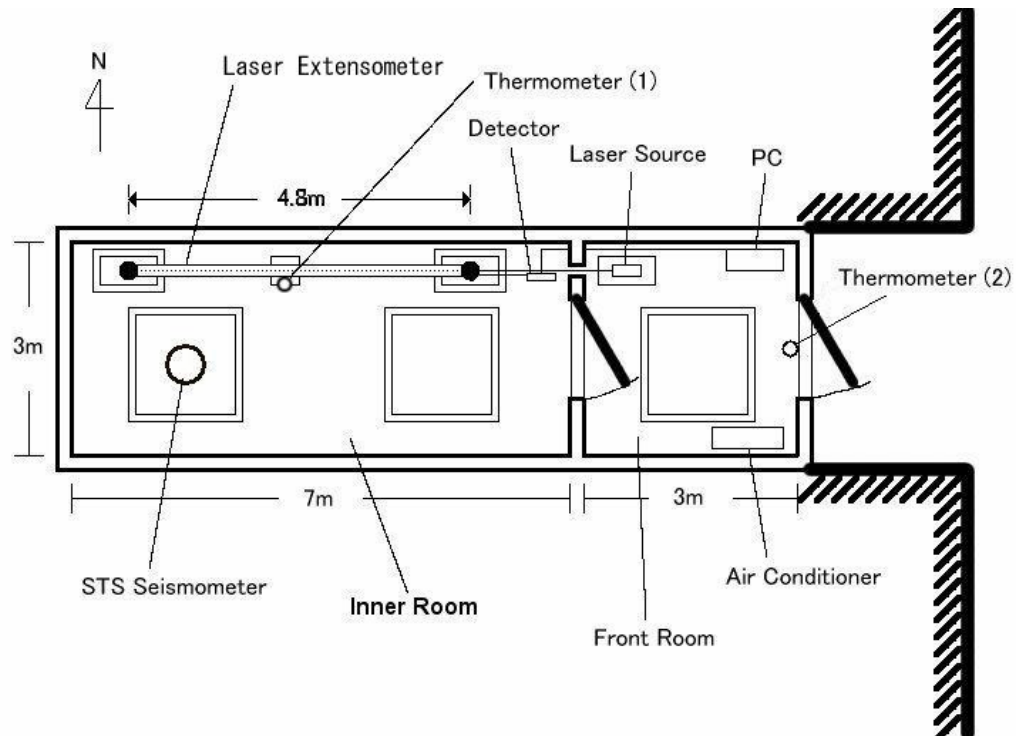


Fig. 1 Arrangement of the laser extensometer in Kwasan Station (seen from the top).

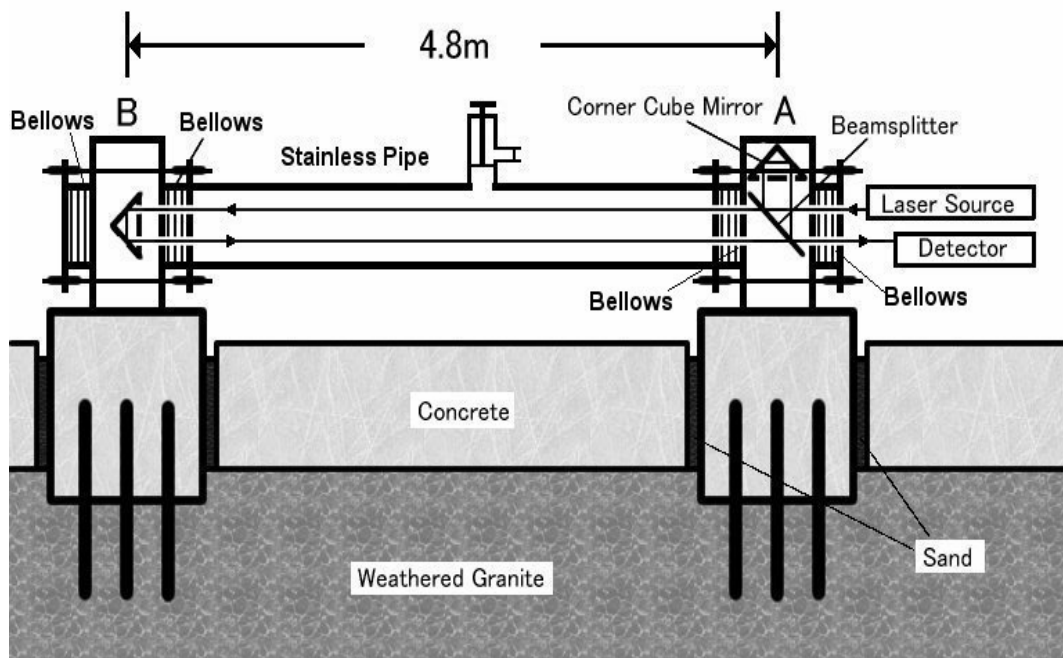


Fig. 2 Design of the laser extensometer (side view).

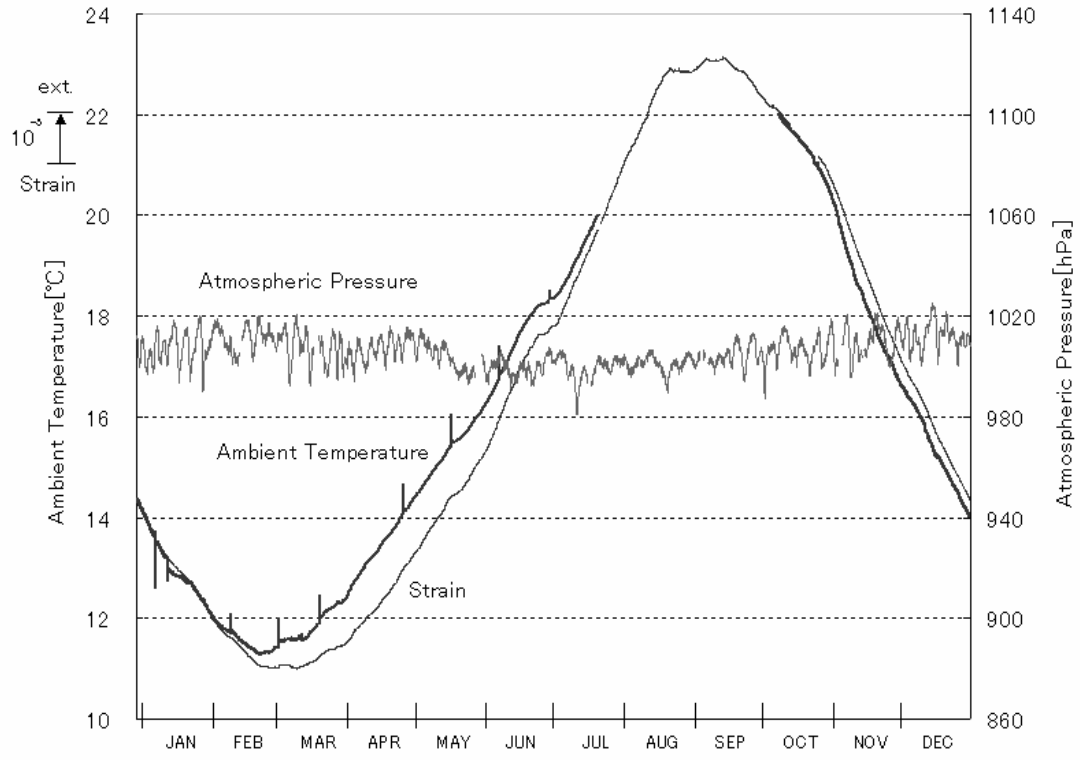


Fig. 3 Observational results of strain, ambient temperature and atmospheric pressure changes in the Kwasan Station during the period from December 29, 2001 to December 30, 2002.

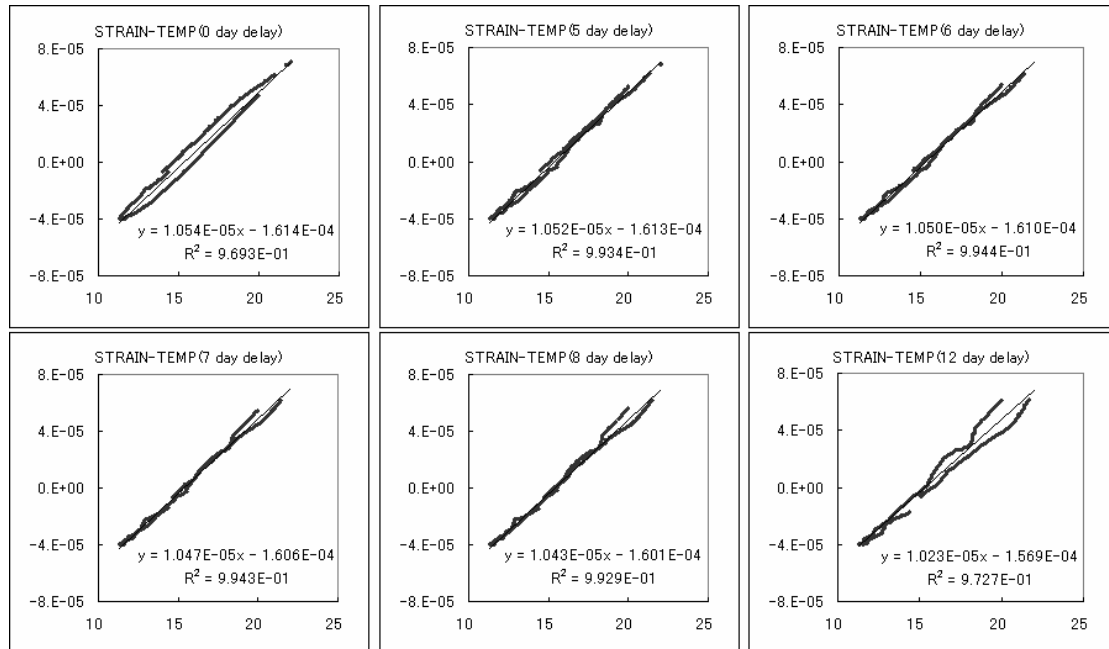


Fig. 4 Correlation between strain changes (ordinates) and ambient temperature changes (abscissas) in the Kwasan Station during the period from December 29, 2001 to December 30, 2002.

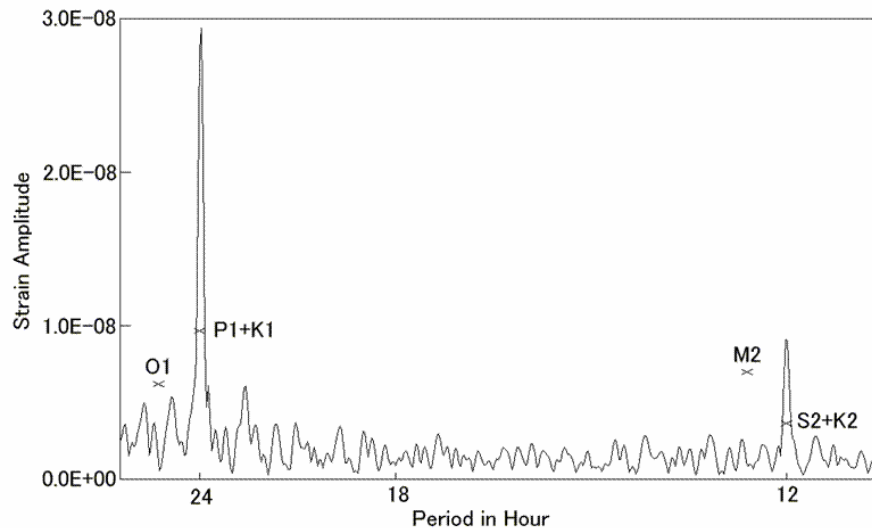


Fig. 5 Result of Fourier analysis of strain data in Kwasan during the period from December 29, 2001 to December 30, 2002, together with theoretically expected amplitudes (×) of major tidal constituents obtained from calculations using the GOTIC2 program.

この関係をさらにはっきりさせるために、室温変化に対してひずみ変化を0～12日の間ずらせて、両者の相関を調べた結果が、Fig. 4に示されている。室温変化に対してひずみ変化を6日遅らせた場合が最も直線性がよくなり、この傾きから室温1の上昇あたりのひずみ変化を求めると、 1.05×10^{-5} の“伸び”の値が得られた。この値は、花崗岩の一般的な線膨張率($0.4 \sim 1.0$) $\times 10^{-5}/$ に調和的である。観測室後室の室温変化は、外気の温度変化に比べて約20日の遅れを示し、さらにひずみ変化は室温変化よりも約6日遅れている。このことから、伸縮計設置場所の基岩の平均的な温度変化は室温の変化に比べて6日の遅れを示し、この基岩の熱膨張が見かけのひずみ変化をひきおこしていると考えられる。

前述の367日間のひずみ観測データにFFTプログラムを適用し、スペクトル解析を行った結果がFig. 5に示されている。また、同図にはGOTIC2プログラム(Matsumoto *et al.*, 2001)から計算された日周潮帯のO1, P1+K1分潮、及び半日周潮帯のM2, S2+K2分潮の理論的振幅値が(×)印で示されている。この図からわかるように、花山観測室のひずみデータは、主に気温変化の影響に起因すると考えられる24時間及び12時間周期の変動が大きすぎて、オリジナルなひずみデータから地球潮汐ひずみの分潮の振幅と位相を精度よく求めることが困難である。

367日間のひずみ観測データと、並行観測データとして同期間の室温、気圧データを用いて、潮汐解析プログラムBAYTAP-G(Tamura *et al.*, 1991)による解析を行ってみたが、スペクトル解析による結果と同様

に、日周潮帯のP1+S1+K1成分及び半日周潮帯のS2+K2成分の振幅が理論的な予測値の2倍以上であるのに対して、主要分潮のO1及びM2については、観測から得られた振幅が理論的な予測値の1/3以下であった。

このことは、花山観測室においては、地球潮汐の周波数帯でさらに考慮しなければならない擾乱源が存在することを示唆している。観測条件の一つ一つを検討し、考えられる擾乱源をいろいろ調べた結果、観測室の立地条件と密接に関連する局所的な日照変化の影響が残った。

ひずみ観測データを詳細に調べると、午前8時前後に急峻な変化が見られる場合が多い。このような変化は、坑内気温及び気圧データには見られない。この変化の原因について検討した結果、観測室の立地条件に依存する日照変化の影響が浮かび上がってきた。すなわち、観測室入口は東を向いており、朝日が当たると入口側の台地東斜面が熱せられ、観測室入口付近の岩石が急激に熱膨張した結果がひずみ観測データに反映されている可能性が考えられる。そこで、観測室前後の入口扉内側の1.5mの高さにサーミスタ温度計を設置し、日照変化の影響について調べた。ひずみの長期的なトレンドが小さい時期の記録の1例として、2002年9月1日から2002年9月15日までの15日間のひずみ成分、観測室後室の気温変化及び観測室前室の入口扉内側気温変化をFig. 6に示す。この図で入口扉内側の気温変化には、午前6～8時頃に急激に立ち上がる特徴的なピークが見られる。この変化は、観測室前面の東側斜面に朝日が当たることによるきわめて局所的な日照変化の影響によるものであると考えられる。

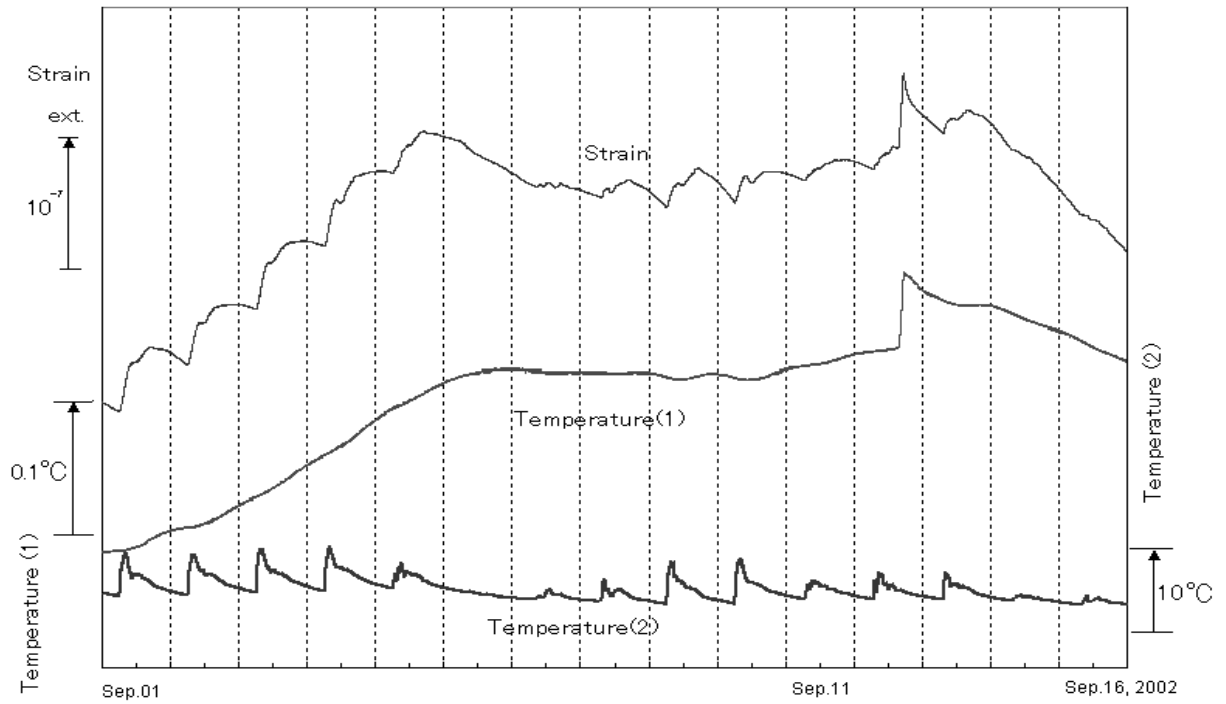


Fig. 6 Observational results of strain, ground temperature in the inner observation room (Temperature 1) and room temperature inside of the front door of the front room (Temperature 2) during the period from September 1, 2002 to September 15, 2002.

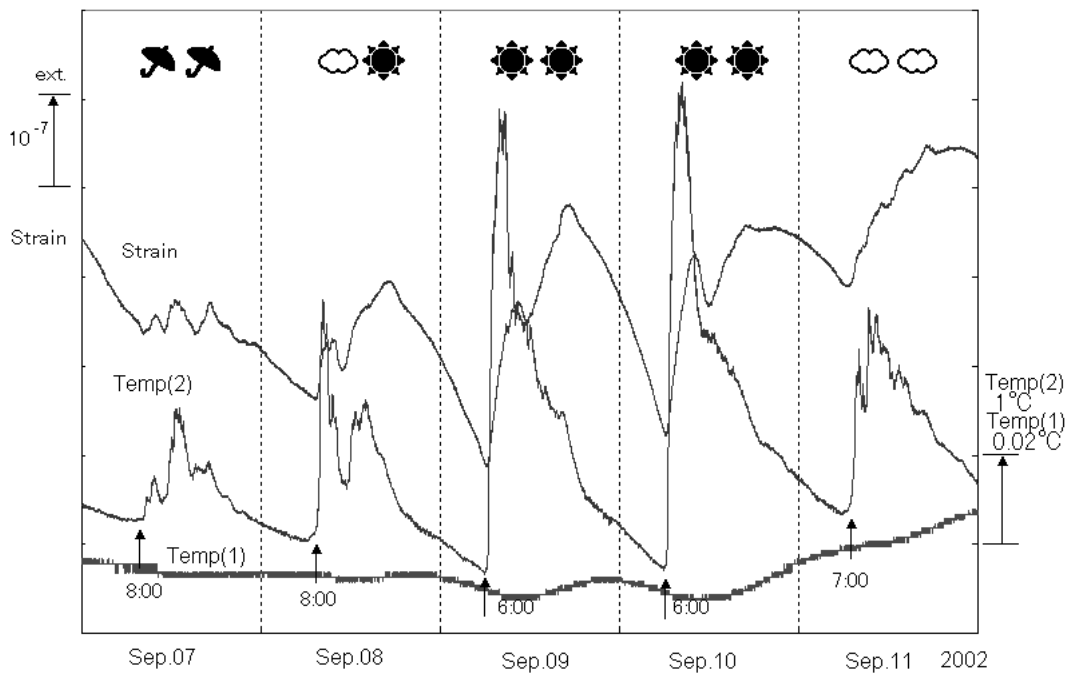


Fig. 7 Weather change and observed strain and temperature changes during the period from September 7, 2002 to September 11, 2002. Temp1: Ground temperature change Temp(2): room temperature change inside of the front door of the front room.

さらにこの15日間のうち、長周期の温度変化が安定している2002年9月7日から2002年9月11日までの5日間の期間について、観測室・観測室前室の入口扉内側の気温とひずみの変化をグラフで表したものが Fig. 7 である。この図からひずみ変化と観測室前室の入口扉内側の温度変化との間に強い相関があることが明らかとなった。とくにピークの立ち上がり時間、変化の振幅及び継続時間は、晴天日(9月9日, 10日), 曇天日(9月11日), 降雨日(9月7日)によって異なることがわかる。観測室内の気温の日周変化がひずみ観測へ及ぼす影響は 10^{-6} / オーダーであるのに対して、早朝の2~3時間に見られる急激な日照変化の影響は、約 10^{-7} / である。このように、花山観測室においては、ほぼ24時間の周期で繰り返す非 sine 型の日照変化による極めて局所的な擾乱が地殻ひずみの観測に複雑な影響を及ぼしている。このため、花山観測室の伸縮計データから地球潮汐ひずみの解析を精密に行うためには、観測室周辺に多成分の温度計を設置して観測室内の気温分布及び地中温度勾配を詳細に調べ、日照変化に伴う基岩の熱的ひずみの影響を取り除く必要がある。

3. 立山観測室の場合

京都大学防災研究所上宝観測所の立山観測室(北緯

36°35'09", 東経 137°29'32", 標高 785m) は、富山県立山町芦峯寺雑穀谷にある花崗閃緑岩の約 40m の切り立った断崖絶壁の底部の岩壁と直交する方向に 19m の深さまで掘りすめられたのち、左右(Y 字形)にさらに 7m ずつ掘削された(加藤・他, 1988)。同観測室においては、3 成分のスーパーインヴァー棒伸縮計と 2 成分の水管傾斜計を用いた地殻変動連続観測が、1988 年以来続けられている。

立山観測室で得られた伸縮計の記録には、観測室正面の断崖に日が当たることによる坑道入口付近の鋸歯状温度変化に対応した顕著なひずみ変化が観測されている(京都大学防災研究所上宝地殻変動観測所, 1989)。そこで、前章で述べた花山観測室におけるのと同様な日照変化の影響を立山観測室においても検討する必要がある。

立山観測室は、Y 字形をした坑道内に 3 成分のスーパーインヴァー棒伸縮計が設置されている(Fig. 8)。それぞれの伸縮計には 2 成分の差動トランス型センサーが取り付けられているが、このうち、坑道入口に近い E1, E2 成分(方位: N27°W, 長さ: 7.4m)には、顕著な日照変化の影響があらわれている。それに対して、坑道奥の E3, E4 (方位: N33°E, 長さ: 4m) 及び E5, E6 成分(N87°W, 長さ: 4m)は日照変化の影響がそれほど顕著でないことが知られている。

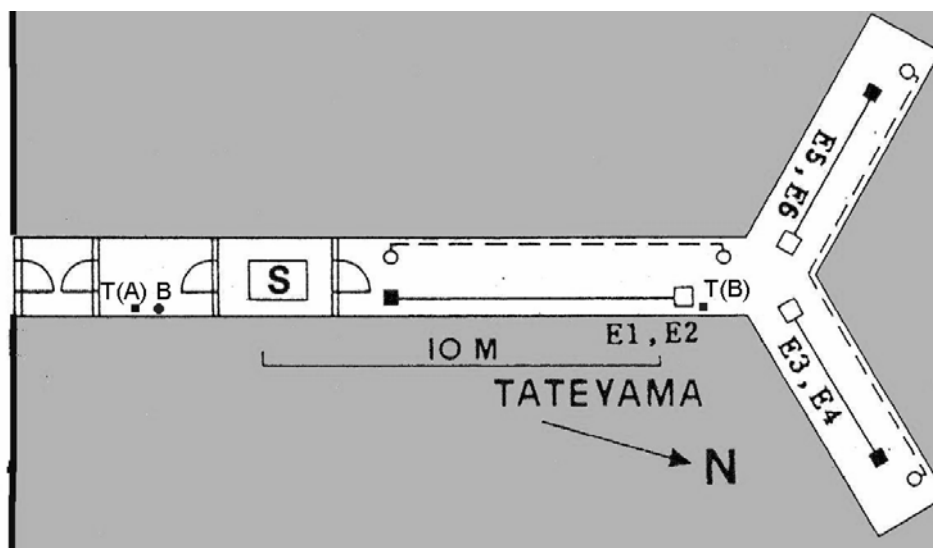


Fig. 8 Arrangement of extensometers and thermometers in Tateyama Station.

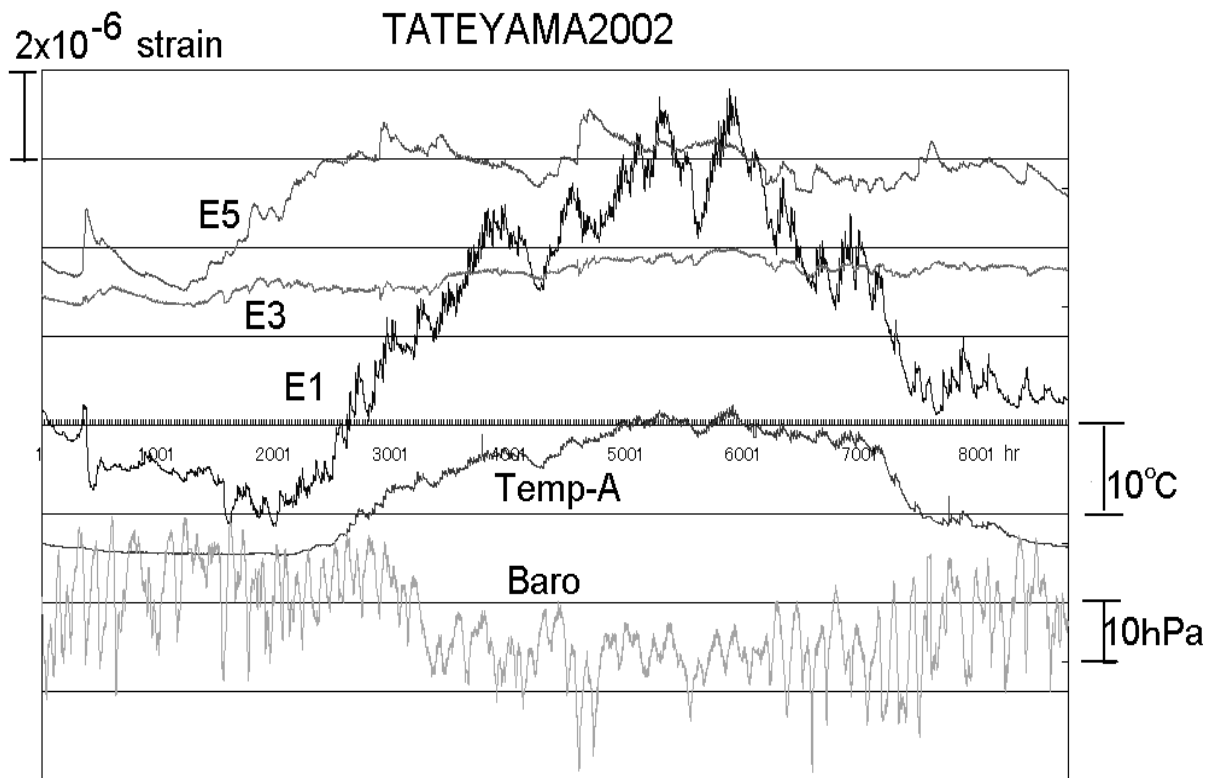


Fig. 9 Observational results of strain, temperature and atmospheric pressure changes during the period from December 29, 2001 to December 30, 2002.

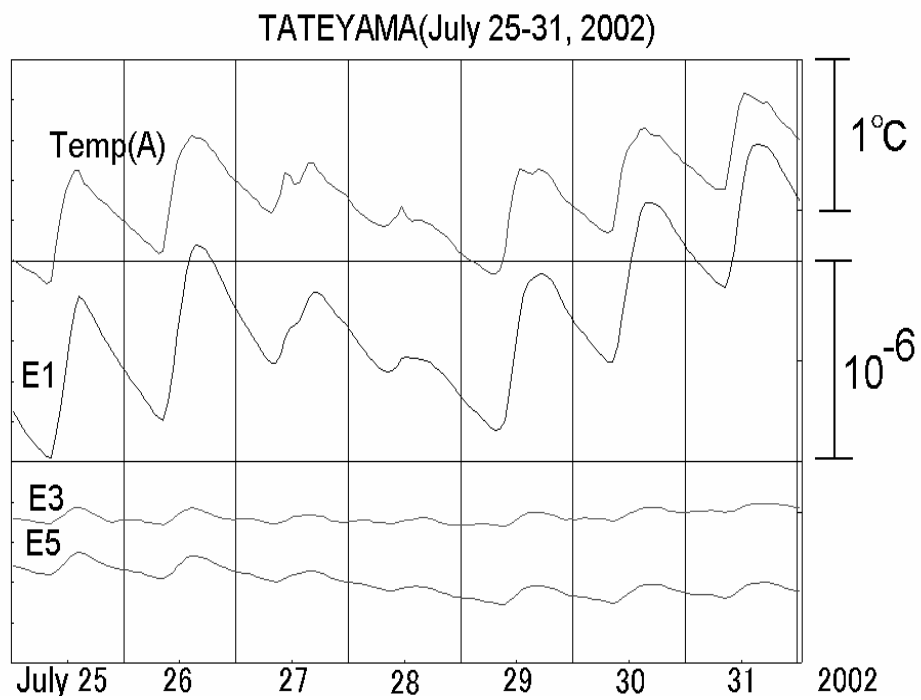


Fig. 10 Strain and ambient temperature changes in Tateyama Station.

Fig. 9 は、立山観測室の地殻ひずみ観測に及ぼす季節的な気温変化の影響を見るために、2002 年 1 年間の E1, E3 及び E5 の 3 成分の伸縮計記録と、同観測室の入口付近の IC 温度計 (T(A)) 及び気圧計 (B) 記録とを比較して示したものである (温度計と気圧計の設置位置については Fig. 8 参照)。

Fig. 9 から明らかなように、観測室入口付近の温度計 T(A) は、年間 10 以上の変化を示すが、観測室付近が積雪に覆われる 12 月から 4 月上旬までの温度変化は小さく、2 以下であることが特徴的である。また、図には示されていないが、T(A) より約 15m 奥に設置されている温度計 T(B) の年周変化は、T(A) に比べてその変化量が 1 桁以上小さい。

このような坑内温度の変化に伴い、3 成分の伸縮計のうち、入口に近い E1 成分には坑内の気温変化の影響と考えられる約 10^{-5} のひずみの年周変化が現れている。奥側の E3 及び E5 成分は、E1 成分に比べると、坑内気温変化の影響が小さい。

Fig. 10 は、ひずみ変化と気温変化の関係を日周変化の帯域で比較するために、2002 年 7 月 25 日 ~ 7 月 31 日の 1 週間の温度計 T(A) と伸縮計 (E1, E3 及び E5) のデータを並べて示したものである。図から明らかなように、立山観測室の前面に日が当たる午前 8 時頃から午後 2 時頃まで、坑内温度は急速に上昇する。それに伴い E1 成分の伸縮計は、ほぼ時間遅れなく、 1×10^{-6} 程度の “伸び” の変化が見られる。日周変化の

帯域で、この E1 成分に見られる坑内温度変化の影響は、花山観測室のレーザー伸縮計の場合とほぼ同オーダーである。E3 及び E5 成分の伸縮計は、E1 成分ほど顕著でないが、坑内温度の上昇に伴って $0.1 \sim 0.2 \times 10^{-6}$ 程度の “伸び” の変化が見れる。

次に、立山観測室で得られた 2002 年 1 年間の観測データに潮汐解析プログラム BAYTAP-G を適応して得られた主要 8 分潮 (Q1, O1, P1, K1, N2, M2, S2 及び K2) の振幅を理論潮汐計算プログラム GOTIC2 で得られた理論的な予測値と比較した。その結果が Fig. 11 ~ Fig. 13 に示されている。

Fig. 11 に示されている坑道入口に近い E1 成分の解析結果には、周期 24 時間付近の P1 及び K1 分潮と周期 12 時間の S2 分潮に明らかに日照変化の影響と考えられる大きな擾乱が見られ、観測から求められた P1, K1 及び S2 分潮の振幅は、理論的な予測値よりも 1 桁近く大きい。しかし、主要分潮のうち日周潮帯の O1 分潮及び半日周潮帯の M2 分潮については、観測値が理論的な予測値と同オーダーである。

一方、Fig. 12 及び Fig. 13 に示されている E3 及び E5 成分については、P1, K1 及び S2 分潮を含めて観測結果が理論的な予測値と同オーダーであり、日照変化の影響は予想以上に小さかった。

このように立山観測室で得られる伸縮計データは E1 成分を含めて、潮汐解析に耐えうるものであることが明らかになった。

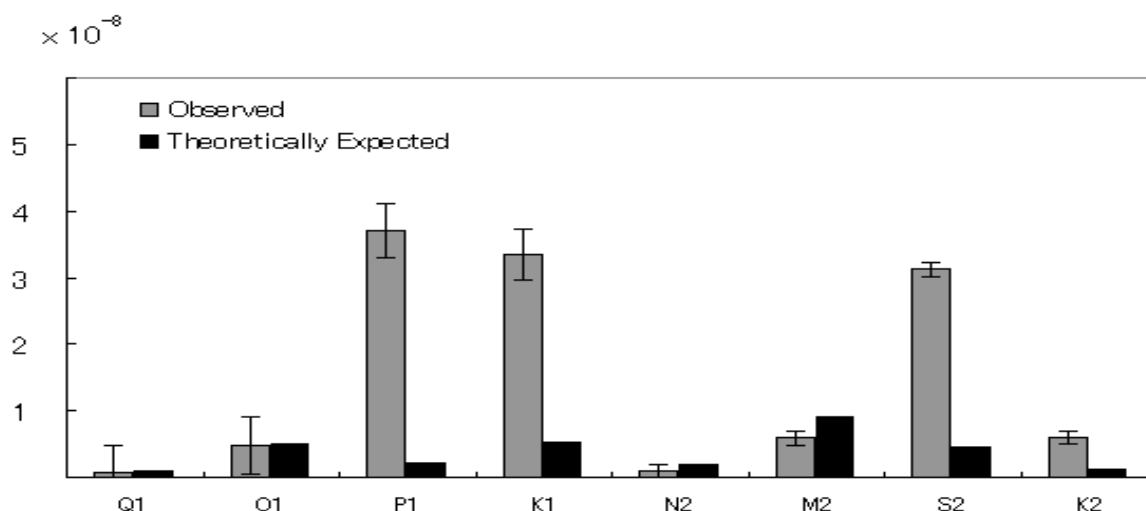


Fig. 11 Comparison of observed and theoretically expected tidal constituents (E1).

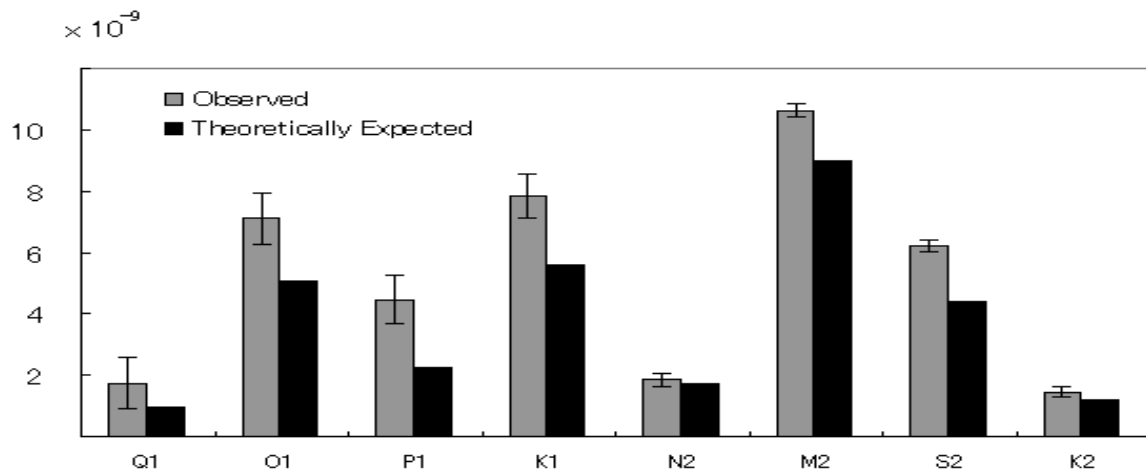


Fig12 Comparison of observed and theoretically expected tidal constituents (E3).

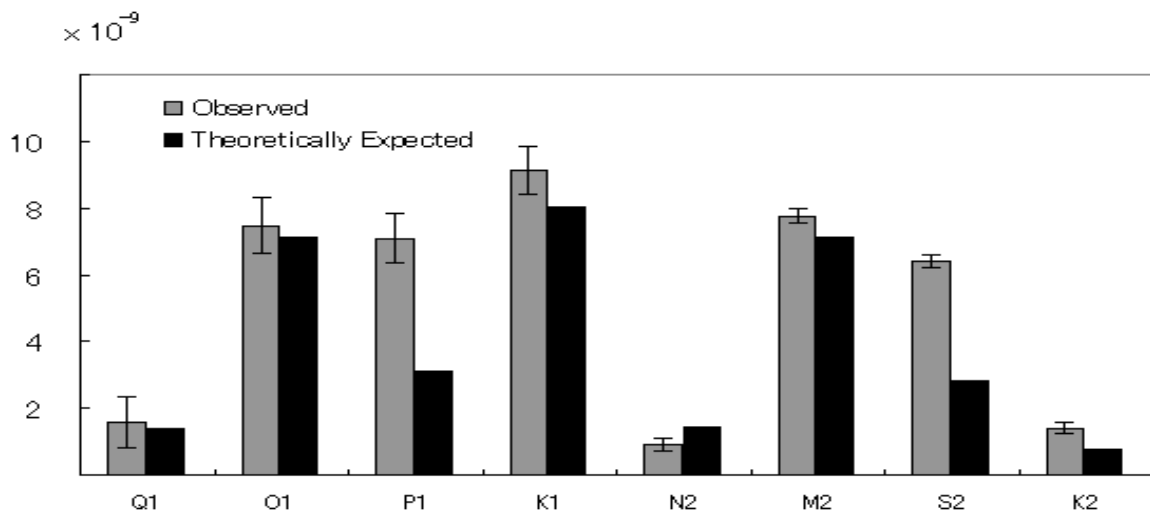


Fig13 Comparison of observed and theoretically expected tidal constituents (E5).

4. まとめ

浅い観測坑道内に設置された伸縮計データから地球潮汐ひずみの解析を行う場合、日照変化に伴う地表付近の岩石の熱ひずみ変化の影響を取り除く必要がある。そのために、浅い観測室で地殻ひずみの観測が行われている京都大学大学院理学研究科の花山観測室（京都市）と京都大学防災研究所の立山観測室（富山県）との観測データを比較して、地殻ひずみの観測に及ぼす日照変化の影響を検討した。

花山観測室においては、約1年間のレーザー伸縮計のひずみデータをスペクトル解析することにより得られた日周潮帯及び半日周潮帯の潮汐成分の振幅が期待される理論的な予測値の2倍以上であるのに対し、主要分潮のO1及びM2の周期帯に明瞭なピークを認める

ことができなかった。花山観測室では朝日が射し込む際に急峻な非 sine 型のひずみ変化が生ずるため、その補正なしには、地球潮汐の各分潮の振幅と位相を決定することが難しい。そこで、同観測室に多成分の温度計を用いて観測室内の気温分布及び地中温度勾配を詳細に調べる準備をすすめている。これらのデータの蓄積を待って、日照変化に伴う岩石の熱ひずみ変化をモデル化したうえ、再度、潮汐解析を行いたい。

一方、立山観測室においても花山観測室と同様な日照変化が見られ、とくに坑道入口に近いE1成分(N27°W方向)の伸縮計には、気温の日周変化の帯域で、ほぼ時間遅れなく、 1×10^{-6} 程度の“伸び”の変化を示すことが明らかになった。しかし、立山観測室における日照変化の影響は、花山観測室に比べると比較的単純であるため、得られた伸縮計の観測データから地球潮汐ひずみM2及びO1分潮の振幅を理論的な予測値

と同オーダーで求めることができた。観測値と理論的な予測値との差は、地形影響等の Local Effects を考慮することより、説明可能であると考えられる。

現在われわれは神岡鉱山（岐阜県）の地表下 1km の坑道内に 100m レーザー伸縮計観測システムを構築中である（竹本・他，2004a）。ここでの地殻ひずみ観測に及ぼす気象影響は、今回の花山観測室や立山観測室の場合に比べてはるかに小さいことが予想される。神岡鉱山の長スパン・レーザー伸縮計で得られる記録から、流体核共鳴効果の検証のほか、理論的には予測されているが、観測面からはまだ十分に解明されていないコアモードや地球自由振動の常時励起などに関する研究が飛躍的に進展すると期待される。

謝 辞

花山観測室における観測は藤森邦夫博士及び東敏博博士にお世話になった。また、立山観測室における観測は細善信技官及び和田博夫技官にお世話になった。ここに厚く御礼を申し上げる。

本研究の一部は平成14～15年度防災研究所一般共同研究「跡津川断層帯におけるクリープ活動の検証」（14-G）（代表者：福田洋一）、及び平成14～17年度文部科学省科学研究費補助金特定領域研究(2)「重力波の新展開」計画研究「地球物理への応用」（14047213）（代表者：竹本修三）を用いて行った。

参考文献

- 加藤正明・土居光・和田安男・津嶋吉男・三雲健(1988): 宝立・立山・須坂観測室の地殻変動観測テレメータ・システム 京都大学防災研究所年報 **31**, B-1, 47-58.
- 京都大学防災研究所上宝地殻変動観測所(1989): 立山における地殻変動観測(1989年9月～1989年1月), 地震予知連絡会会報, **42**, 355-358.
- 竹本修三・新谷昌人・赤松純平・森井互・東敏博・福田洋一・尾上謙介・市川信夫・川崎一朗・大橋正健・寺田聡一・百瀬秀夫(2004a): 神岡鉱山における100メートルレーザー伸縮計について, 京都大学防災研究所年報, 第**46B**, 749-755.
- 竹本 修三・百瀬 秀夫・藤森 邦夫・東 敏博 (2004b): 浅い観測坑におけるレーザー伸縮計を用いた地殻ひずみの観測, 測地学会誌 **49**, 215-225.
- 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.
- 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.

Effect of Local Sunshine Changes upon Crustal Strain Observations - Comparison of Strain Data Obtained at Kwasan and Tateyama Stations -

Shuzo TAKEMOTO*, Yasuo WADA, Kiyoshi ITO, Yoichi FUKUDA*, Wataru MORII, Hideo MOMOSE*,
and Mitsukuni NAKAMURA*

* Graduate School of Science, Kyoto University

Synopsis

In order to estimate the effect of local sunshine changes upon crustal strain observations, we compared strain changes and ambient temperature changes observed in shallow tunnels in Kwasan (Kyoto) and Tateyama (Toyama) stations. As a result, strain changes about 1×10^{-6} were observed with both the laser extensometer in the Kwasan station and the E-1 super-invar bar extensometer in the Tateyama station according to daily temperature changes without time delay. It has been revealed that the effect of local sunshine changes is a serious problem for precise tidal analysis using extensometer data obtained in shallow tunnels.

Keywords: crustal movement, extensometer, crustal strain, earth tides, sunshine change