

天ヶ瀬地殻変動観測室における坑内温度の精密観測

竹 本 修 三

PRECISE MEASUREMENTS OF TEMPERATURE VARIATION IN THE TUNNEL AT AMAGASE CRUSTAL MOVEMENT OBSERVATORY

By *Shuzo* TAKEMOTO

Synopsis

First, the thermal profile along the tunnel at Amagase crustal movement observatory has been observed with a portable thermometer of the thermistor type. The tunnel has a horse-shoe shape with a cross section of 6 m×6 m and its total length is about 1830 m. Three partition walls exist at positions of 5 m, 400 m and 500 m, from the entrance of the tunnel, respectively. Temperature distribution in the tunnel is different from 15.2°C to 16.8°C in proportion to the depth from the surface.

Secondly, temperature changes at several positions in the tunnel have been continuously observed with quartz thermometers having a resolving power of 1/1000°C. Annual change of the order of 0.2°C is observed at the position of 370 m from the entrance of the tunnel. At positions deeper than the second partition wall existing at 400 m, annual changes of temperature are smaller than 0.1°C.

It is found that there is a direct correlation between short period variation of atmospheric pressure and temperature observed in the tunnel.

1. は じ め に

伸縮計・傾斜計を用いた地殻変動連続観測は、気象的擾乱、なかでも気温変化の影響を避けるために地下の観測坑道内で行われている。観測坑道が比較的浅い場合、例えば岩倉観測室においては、坑道入口から約30 m 奥、地表からの深さが約15 m のところに観測計器が設置されているが、ここでの坑内温度の年周変化は約0.5°C程度である¹⁾。また、柳沢²⁾、山田等³⁾の鋸山観測所における精密温度測定の結果によれば、地表からの深さが9~26 m の範囲で同観測室の坑内温度の年周変化は0.5~0.2°C程度と報告されている。これに対して、天ヶ瀬地殻変動観測室は全長1830 m、高さ・幅共に約6 m の旧発電所用導水トンネルを改修したものであり、入口から400~500 m の間を仕切った観測室は、地表からの深さが約140 m あることから、同観測室内の温度変化は上記の岩倉、鋸山等の場合と比較して、当然小さいと考えられる。しかし同観測室において高精度の地殻変動観測を行うためには、擾乱要素の一つである坑内温度変化の特徴を明らかにしておく必要がある。そこで坑内温度の空間分布と時間的変化を詳しく調べた。

2. 坑内温度の空間的分布

まず最初に天ヶ瀬観測室における坑内温度の空間的分布の特徴について述べる。全長1830 m の坑道断面の地形を Fig. 1(a) に示してあるが、同図(b)はこの坑道に沿って100 m 毎に、サーミスター温度計(宝工

業 KK, D 611) を用いて測定した坑道床面より約 1.5 m 上の壁面温度分布を示したものである。この図から坑内温度分布は、入口から 400~500 m の間の観測室内(O)を除くと、地表面から坑道面までのかぶりの深さにはほぼ比例していることがわかる。即ち、殆んどかぶりのない入口付近では 15.2°C 程度であるのに対して、かぶりが約 270 m の 1000 m 奥付近では 16.8°C 、またかぶりが約 30 m の坑道最奥部付近では 16.0°C となっている。なお、この測定は1984年2月に行ったものであり、後に示すように坑道入口付近では $0.4\sim 0.5^{\circ}\text{C}$ 程度の年周変化があることから、入口付近の年平均温度はもう少し高く、 15.4°C 程度であると考えられる。

観測室として使用している 100 m の区間 (Fig. 1(a), (O)) の気温分布をさらに詳しく測定した結果を Fig. 1(c) に、また、この間の計器の配置を同図(d)に示してある。馬蹄形をした観測坑道の中央部の高さは約 6 m であり、床面と天井の間の温度差は、入口付近で 0.5°C 、奥側のブロック壁付近では 0.1°C である。

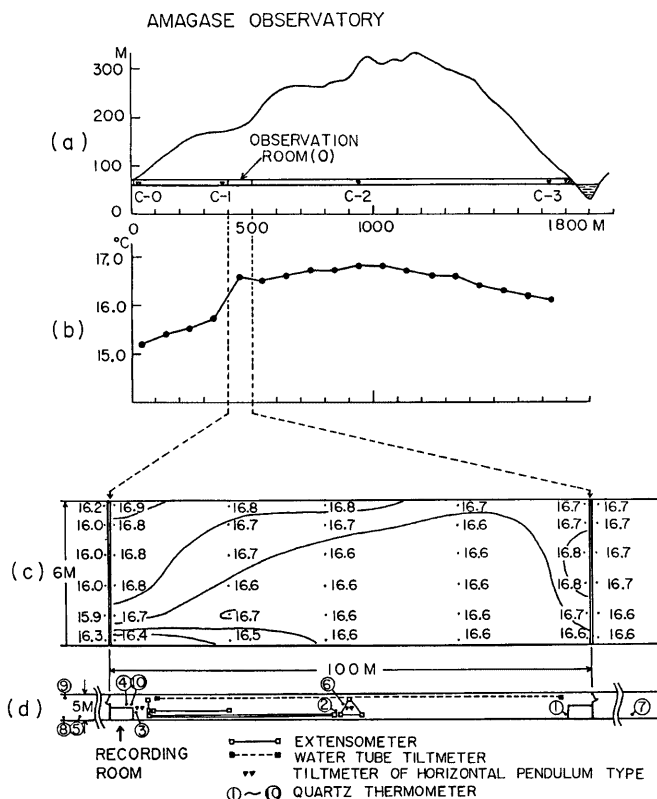


Fig. 1 (a): Topographic map around Amagase observatory
 (b): Thermal profile along the tunnel
 (c): Temperature distribution in the observation room
 (d): Arrangement of instruments

この差は観測室内の計器の配置が入口に近い左半分に集中していることに起因すると考えられる。また、観測室入口のブロック壁の内と外では 0.8°C に達する温度差があるが、奥側の壁の両側では温度差が殆んど見られない。このことから、観測室内では計器からの発熱により、坑内温度が少なくとも 0.8°C 程度持ち上げられている可能性が考えられる。逆に言えば、温度上昇がこの程度で済んでいるのは坑道が大きいことと、坑内床面を流れる地下水によって熱の一部が外に運び出されているためと考えられる。なお、Fig. 1(d) の左下隅に示した坑内記録室には一部の増幅器、記録計等が置かれており、ここでの室温は約 24°C である。

以上が天ヶ瀬観測室の坑内温度の空間的分布の特徴であるが、次にその時間的変化を報告する。

3. 坑内温度の時間的変化

3.1 坑道内光波測量の際の温度読取値に見られる年周変化

天ヶ瀬観測室では伸縮計・傾斜計による連続観測に加えて1970年以来 Geodimeter 6型を用いた光波測量を実施している。この測量を行う際には坑内4カ所の基点においてアスマン通風温度計による気温の測定を行っている。この温度読取値に年周変化が見られるかどうかを調べた。基点の位置は Fig. 1(a) に C-0, 1, 2, 3 で示されている。C-0 は Geodimeter 本体用の基点であり、坑道の入口より5m奥にあるブロック壁からさらに15mはいったところにある。C-1～3は反射鏡用基点であり、C-0 から測った距離はそれぞれ378m, 915m, 1711mである。これ等の基点における1978年から1985年までの温度読取値を重ねて Fig. 2 に示してある。個々の読取値は $0.2\sim 0.5^{\circ}\text{C}$ 程度のばらつきがあるものの全体として見ると C-0 には $0.4\sim 0.5^{\circ}\text{C}$ 程度の年周変化が見てとれる。これに対して C-1, 2, 3 には年周変化は認められない。

坑道入口より20m奥の C-0 に見られる年周変化は先に述べた岩倉、鋸山等の浅い観測室の場合の温度測

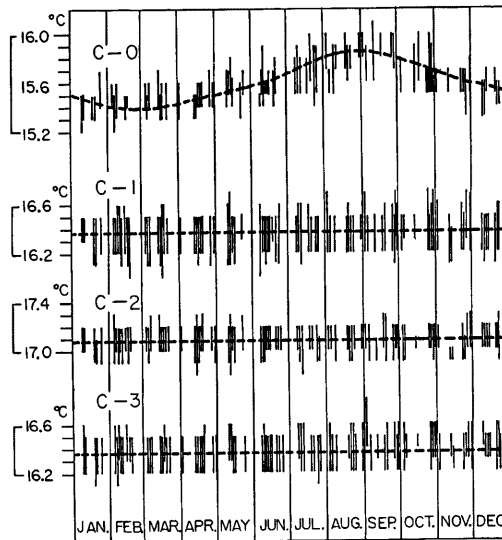


Fig. 2 Annual changes of temperature observed with the Assmann thermometers at four station-marks for electro-optical distance measurements.

定結果とはほぼ合っている。また C—1~3 の結果から、坑道入口より 400 m 奥の観測室及びその奥側では 0.1 °C を越える気温の年周変化は無いものと考えられる。そこで次に 1/1000°C の桁の分解能を有する水晶温度計を用いて観測室周辺の気温及び水温の精密測定を行った。

3.2 水晶温度計を用いた坑内温度の精密測定

本来、水晶発振器は安定した周波数の発生源として基準周波数の発生装置等に使用するものであるが水晶の結晶をカットするアングルによって発振周波数が温度に大きく依存するものがある。この性質を利用した高分解能の水晶温度計がヒューレット・パッカード社から市販されている (HP 2804A)。また島村⁴⁾は同様の原理に基づく水晶温度計を独自に開発し、深いボーリング孔中の地下水温度の精密測定を行っている。

今回、我々は島村の方法を参考にして、電光 KK 社製 Y カット水晶温度センサーを用いた温度計をつくった。使用した温度センサーの発振周波数は約 10.6 MHz であるが、温度変化にほぼ比例して周波数が変化する。0~50°C の範囲で周波数変化の温度係数は 860~870 Hz/°C である。回路のブロック・ダイアグラムを Fig. 3 に示すが、図で左側が温度測定地点に置くセンサー部であり、13.5 V の直流を受けて水晶温度センサーと CMOS (MC 14521) とで発振及び分周 ($1/2^{24}$) を行う。また図の右側は記録室内の計数回路であり、センサー部とは 5~120 m の長さの信号ケーブルで結ばれている。計数回路ではセンサー部からの出力をさらに $1/2^4$ に分周して約 25 秒のゲートをつくと共に、温度償償型水晶発振器 (キンセキ KK, OCXO-048) を用いて 1 MHz の基準信号をつくる。ゲート間隔はセンサー設置地点の温度変化に比例して変化するから、このゲートに入る基準信号のパルス数を数えることにより、温度変化の測定ができる。1°C の温度変化に対してゲート内のパルス数は約 2075 の変化を示すから、上位の桁は読みとばし、下位の桁を 12 ビットのカウンタで数える。従って、このシステムのダイナミック・レンジは 4096/2075~1.98°C に相当し、1 ビットの分解能は 0.5×10^{-3} °C となる。これを 12 ビットの DA コンバーターでアナログ信号に変換し、打点式記録計に記録している。天ヶ瀬観測室では現在この方式で 9 成分の観測を行っている。温度センサーの設置場所は Fig. 1(d) に示してあるが、8 成分 (QT—1~3, 5~9) は坑内の気温、1 成分 (QT—4) は坑内を流れる地下水温度の測定に使用している。また、これ等の温度計の絶対値検定用に購入した市販の水晶温度計 (電光 KK 製 QTD-412A) を同じ坑内に設置して比較観測を行っている (QT—10)。

これ等の温度計のうち初期に設置された 6 成分 (QT—1~6) について 1985 年 1 月から 12 月までの 1 年間の観測結果を、坑外の気温、気圧、降雨量と共に、Fig. 4 に示す。図は各成分について毎日 0 時の値を読取ったものである。坑外の気温は坑道入口近くの地震計記録室の建物内にあるバイメタル自記温度計で測定したものであるが、1 月末が最低、8 月末が最高で、その間の差は 30°C 近くにも達する。これに対して坑内の温度変化は入口より約 370 m 奥に設置された QT—5 のみに 0.2°C 程度の年周変化が見られるが、入口より 400~500 m の観測室内では気温 (QT—1~3, 6)、水温 (QT—4) 共に年周変化は見られない。QT—5 に見られる年周変化は外気温度より約 2 カ月の位相の遅れを示している。QT—1~3, 6 に見られる坑内気温の非周期的ノイズは 0.1°C に近いが、これは観測計器からの発熱によるものと考えられる。QT—4 の水温変化は 6 月 25 日に 0.5°C を越える急激な水温低下が見られるが、それ以外の時期の変化は気温に比べて 1 桁以上小

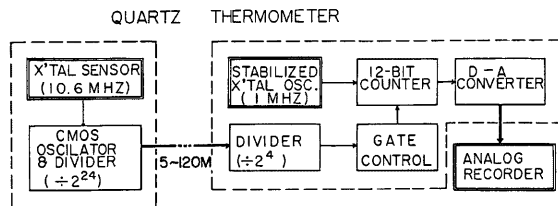


Fig. 3 Block diagram of the quartz thermometer.

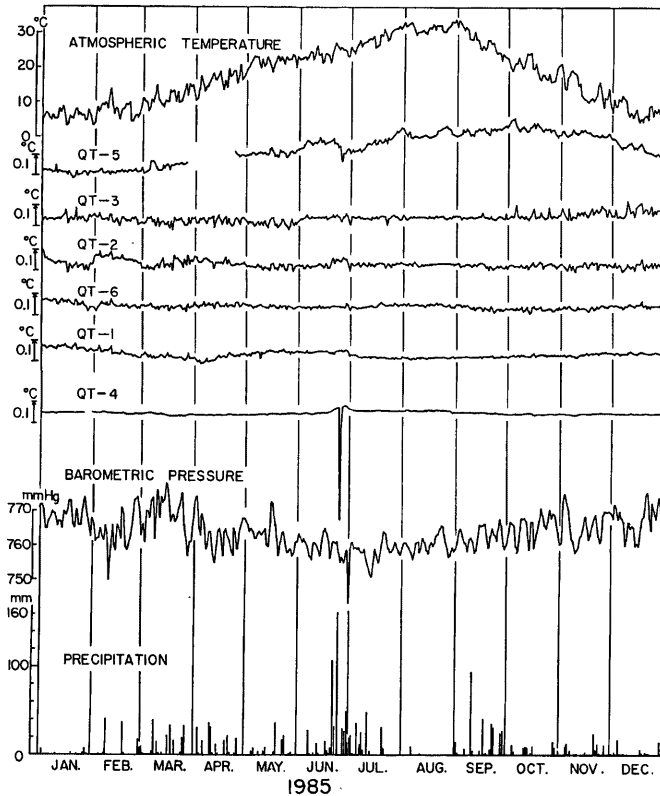


Fig. 4 Daily plots of free-air temperature, air temperature in the tunnel (QT-1~3, 5~6), ground-water temperature (QT-4), barometric pressure and precipitation observed at Amagase observatory for the period from January to December of 1985.

さく、 0.01°C 以下であり、年周変化も見られない。

次に6月25日前後の水温、気温及び伸縮変化の様子をもう少し詳しく見てみる。**Fig. 4**に示すようにこの年の6月下旬に集中豪雨があり、6月22日には107 mm、6月25日には162 mmの降雨があった。また6月18日から6月25日までの8日間の総雨量は327.5 mmにも達している。この間の温度計及び伸縮計の観測記録を見ると、6月25日の22時から1時間の間に水温が 0.5°C 下がり、その後2時間程でほぼ元のレベルに回復している。また、この前後に坑道の軸と直交する方向(N17.5°E)の伸縮計には 2.5×10^{-7} の大きな“縮み”の変化が認められた。しかし坑道に沿う方向(N72.5°W)の伸縮計にはこれに対応する変化は認められなかった。6月25日12時から6月26日19時までの水晶温度計、気圧計及びレーザー伸縮計の観測記録をまとめて**Fig. 5**に示してある。図でQT-1~10は水晶温度計記録であり、QT-4のみが水温、他は気温である。また、L-1は坑道に沿う方向、L-2は坑道と直交方向のレーザー伸縮計⁵⁾の記録であり、LS-1はこ

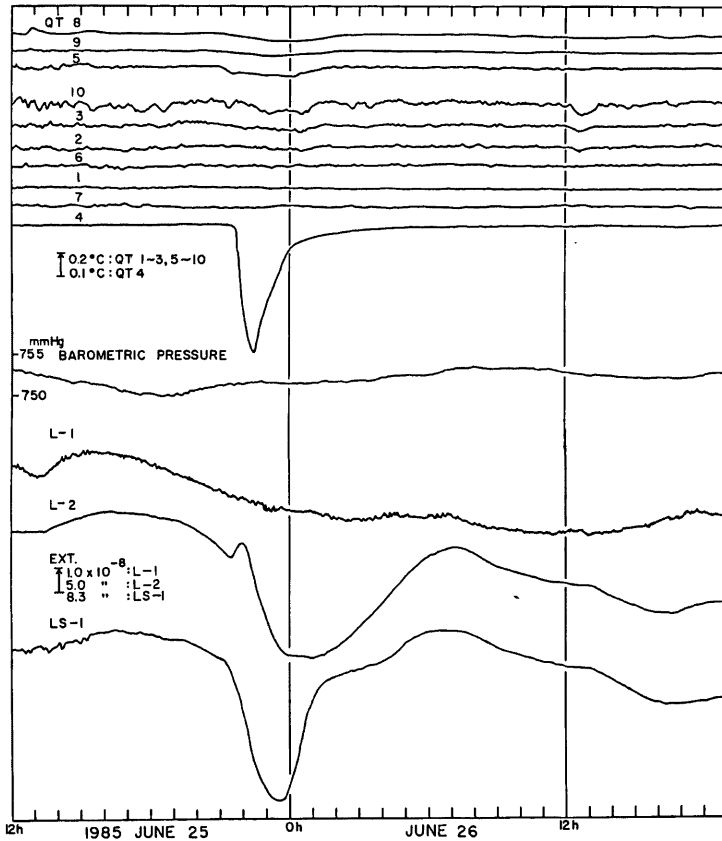


Fig. 5 Records of quartz thermometers (QT 1~10), a barometer and laser extensometers (L-1, L-2, LS-1) at the moment when sudden change of ground-water temperature was observed.

れ等直交2軸のひずみの差を検出する方式のレーザー伸縮計⁶⁾の記録である。

急激な水温変化の原因としては2つの可能性が考えられる。即ち、1つは坑道壁面の一部から突然地下水が吹き出したという可能性であり、もう1つは排水能力を越えた豪雨のために入口付近に溜った水が、1/1300のゆるい勾配の坑道内を奥へ向って逆流して来たという可能性である。しかし、先に述べたように天ヶ瀬観測室では計器設置地点の地表からの深さが140 mもあることから、降雨直後に計器設置地点近くの坑道壁面から地下水が直接吹き出したとする最初の可能性は少ない。従ってQT-4に見られる水温変化は坑道入口より逆流して来た水によってもたらされたと考えられる。その根拠の1つはQT-4よりも40~80 m入口近くに設置されているQT-8, 9, 5の温度計が水温変化の始まりよりおよそ30分前から、水温がほぼ元に戻った後までの約5時間にわたって0.03℃程度の気温低下を示していることによる。これ等の温度計は坑道入

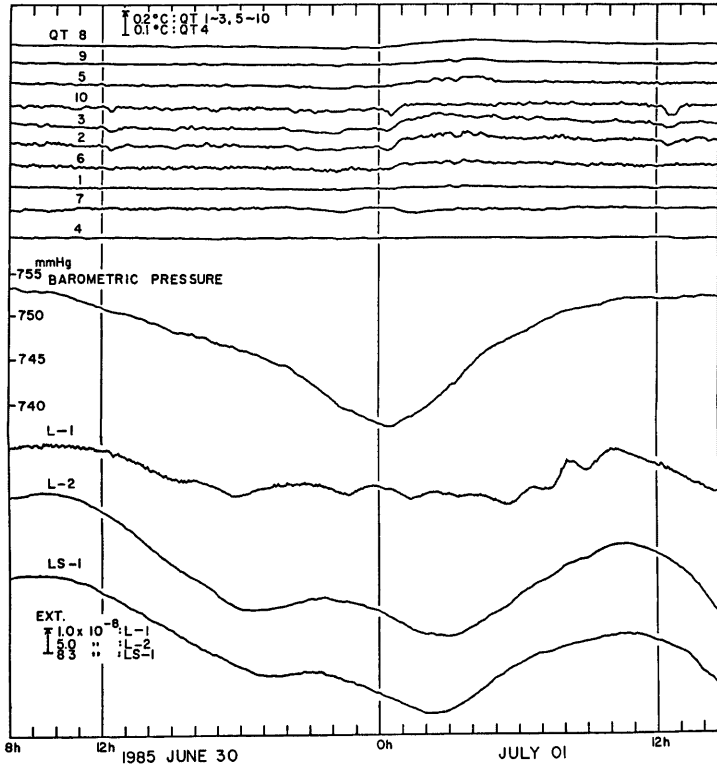


Fig. 6 An example of records at the moment when the typhoon passed through the Kinki district. Long term variation of barometric pressure does not affect air and ground-water temperature in the tunnel.

口より 400 m 奥にある観測室仕切りのブロック壁の手前側に設置されたものであり、ブロック壁の奥側に設置されている温度計 (QT-10, 3, 2, 6, 1, 7) にはこの際気温低下は認められなかった。

次に気圧変化と温度変化の関係を述べる。Fig. 6 は台風通過に伴う長周期の気圧変動の場合の例であり、Fig. 7 は前線通過に伴う短周期の気圧変動の場合の例である。なお、QT-10, 3, 2 には 0 時と 12 時付近に 0.1°C 近くの気温低下が認められるが、これ等は同観測室で行われている光学記録方式による伸縮計・傾斜計の印画紙記録にタイム・マークを入れるために 0 時と 12 時に 30 分間づつ光源ランプの電源を切ることによって引き起されるものである。なお、0 時と 12 時の他、6 時と 18 時にも 15 分間づつタイム・マークを入れているがこの場合の温度変化は殆んど認められなかった。

Fig. 6 と Fig. 7 を比較すると、台風通過の場合のように長周期の気圧変化は絶対値が 20 mmHg 近く変化しても気温変化への影響は極めて小さい。これに対して数分～数 10 分の周期の短周期気圧変化の場合は、1～2 mmHg 程度の変化であっても 0.1°C 程度の温度変化を生ずる。この関係は Walferdange⁷⁾、逢坂山⁸⁾、上宝⁹⁾ 等の観測所で得られた観測結果と同じである。長周期の気圧変化の場合は坑内温度分布の平衡状態が

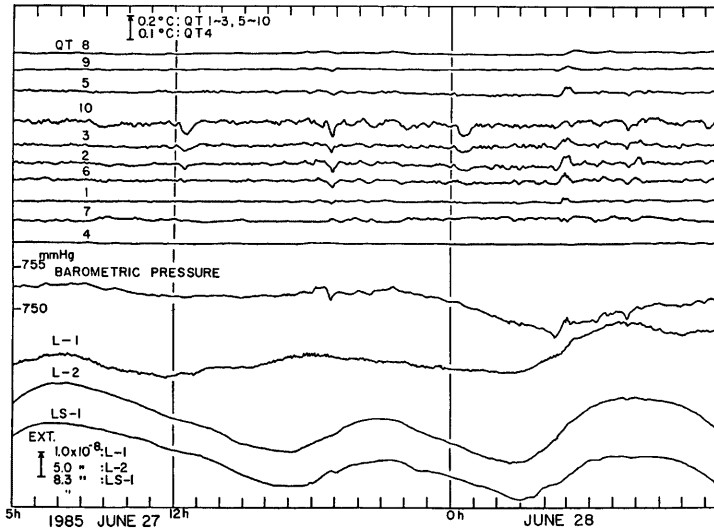


Fig. 7 An example of records showing a direct correlation between short period variation of pressure and temperature.

乱されにくいに対して、短周期の気圧変化の場合は坑道内の空気が攪拌されてこのような温度変化が生ずるものと考えられる。

4. ま と め

天ヶ瀬観測室の坑内温度の空間的分布と時間的変化を詳しく調べた。その結果、全長 1830 m の直線状観測坑道内の気温分布は坑道入口付近で 15.2~15.6℃、かぶりが約 270 m の 1000 m 奥付近で最も高く 16.8℃、それより奥では再び気温が低くなり最奥部では 16.0℃であった。坑内温度分布は地表からの深さにほぼ比例していると言えるが、入口から 400~500 m の間の観測室の内部では計器等からの発熱により、本来その場所での坑内温度より 0.8℃ 程度持上げられている。

次に坑内温度の時間的変化については坑道入口より 5 m 奥の最初の仕切りよりさらに 15 m 奥で 0.4~0.5℃、また 370 m 奥で 0.2℃の年周変化が見られた。外気温度に比べてこれ等の変化の位相の遅れは比較的小さく、後者の場合でも約 2 カ月の遅れであった。しかし、坑道入口より 370 m 奥で 0.2℃に達する年周変化が存在することは、予想していたよりもはるかに大きかった。なお、坑道入口よりも 400 m 奥にある 2 番目の仕切り壁より内側では 0.1℃のノイズレベルを越える年周変化は見られなかった。水温変化については、1984年に水晶温度計を設置して以来、1度だけ 0.5℃を越える大きな変化があったが、これは日雨量が 162 mm に達する豪雨の際に坑道入口から奥に向って水が逆流して来たことによってひき起されたと考えられる。それ以外の時期の水温変化は極めて小さく、通常のレイズレベルは 0.01℃以下であった。

気圧変化と坑内気温変化との関係は、台風通過の場合のように 1 日あるいはそれ以上の長周期の気圧変化は温度変化への影響が殆んど認められないが、数分~数10分の短周期の気圧変化の場合は 1~2 mmHg 程度の変化であっても 0.1℃程度の温度変化を伴うことがあった。この理由として、現在次のように考えている。

即ち、主な計器が設置されている観測室は坑道入口より 400~500 m 奥にあるが、計器等からの発熱により観測室の天井と床面の温度差は場所により 0.5℃ に達するところもある。また、水平方向についても 0.1℃ の桁の温度差があるが、通常はこの温度分布で平衡状態が保たれている。長周期の気圧変化があっても近接する 2 点間の相対的な気圧差が小さいから空気の流れは小さく、温度の平衡状態は乱されにくい。これに対して短周期の気圧変化の場合は相対的な気圧差が大きいため観測室内部で空気の流れが生じ、温度の平衡状態が乱される。従って場所によっては 0.1℃ の桁の温度変化を生じ得ると考えられる。

以上が天ヶ瀬観測室における坑内温度変化の特徴である。この結果を生かして同観測室に設置されている伸縮計・傾斜計による地殻変動観測、特に潮汐ひずみ変化の観測に及ぼす気象影響の高次の補正を行う予定である。

おわりに数多くの御助言をいただいた高田理夫教授、古澤 保助教授に感謝すると共に観測にご協力いただいた山田 勝技官に御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 高田理夫・古沢 保・竹本修三・山田 勝：京都岩倉における地殻変動観測(IV)，京都大学防災研究所年報，第17号 B，1974，pp. 57-62.
- 2) 柳沢道夫：鋸山地殻変動観測所における坑内温度の年変化の計測，測地学会誌，第19巻，第4号，1973，pp. 225-232.
- 3) 山田重平・柳沢道夫・島津 孝：地殻変動観測坑の温度分布，地震研究所研究速報，第13号，1974，pp. 33-42.
- 4) Shimamura, H.: Precision Quartz Thermometers for Borehole Observations, Jour. Phys. Earth, Vol. 28, No. 3, 1980, pp. 243-260.
- 5) Takemoto, S.: Laser Interferometer Systems for Precise Measurements of Ground-Strains, Bull. Disast. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., Vol. 29, Part 2, 1979, pp. 65-81.
- 6) 竹本修三・小林年夫：Simple Laser Source を用いたレーザー伸縮計について，京都大学防災研究所年報，第25号，B-1，1982，pp. 31-39.
- 7) Rasson, J. and M. van Ruymbeke : Underground Meteorology at the Underground Laboratory of Geodynamics at Walferdange, Proceedings 8th International Symposium on Earth Tides, 1977, pp. 399-408.
- 8) 橋田匡邦・重富国宏：材質の異なる基準尺を用いた伸縮計の比較観測，測地学会誌，第30巻，第4号 1984，pp. 264-273.
- 9) 土居 光・和田安男・加藤正明・和田博夫・細 善信：上宝における最近の地殻変動（1984年12月まで），京都大学防災研究所年報，第28号，B-1，pp. 79-90.