長野市松代地域における炭酸ガスの湧出量と地殻変動

北陽建設株式会社 長野営業所* 清 水 直 哉
信州大学理学部物質循環学教室** 塚 原 弘 昭
気象庁精密地震観測室*** 古 舘 友 通
防災科学技術研究所**** 吉 田 則 夫

Discharge of Carbon Dioxide and Crustal Movement at the Matsushiro Area, Nagano City

Naoya SHIMIZU

Hokuyou Construction Co., Ltd., Nagano, Inaba 1993-1, Nagano 380-0912, Japan

Hiroaki TSUKAHARA

Department of Environmental Sciences, Faculty of Science, Shinshu University,
Asahi 3-1-1, Matsumoto 390-8621, Japan

Tomomichi FURUDATE

Matsushiro Seismological Observatory of Japan Meteorological Agency,
Nishijo 3511, Matsushiro-machi, Nagano 381-1232, Japan

Norio YOSHIDA

National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention,
Tennodai 3-1, Tsukuba 305-0006, Japan

(Received April 21, 1997; Accepted January 14, 1998)

Large amount of underground water with CO₂ gas bubbles had flowed out from many spots for the period of the Matsushiro Earthquake Swarm, 1965-1967. Some of the springs are still alive. We explored possibility for detecting crustal activity, such as crustal deformation and seismicity by observing CO₂ concentration in soil gas in the Matsushiro area. We measured CO₂ concentration in soil gas once a week for 6 months at many places in two areas: (1) a fault zone of the Matsushiro Earthquake Swarm, and (2) floor of the tunnel of Matsushiro Seismological Observatory which is about 2.5 km away from the fault zone. The measurement points are located at various geological conditions. Remarkable high concentration of CO₂ in soil gas was detected at measurement points in the fault zone. In particular, high concentration of CO₂ was observed at a point on a fault. In contrast, on tunnel floor, out of the fault zone, the concentration is relatively low. Temporal variation, records of CO₂ concentration of all measurement points, however, resemble one another in variation pattern. This suggests that the CO₂ discharge is controlled by some wide regional scale mechanism. The pattern of the concentration variation is compared with those of seismic data, crustal strain data and meteorological data observed at the observatory. Good correlation is found between temporal variation in CO₂ concentration and that in crustal strain observed with north-south orientation strainmeter, that is, CO₂ concentration increase with expansion of the NS70-100 component of strainmeter. We propose a model of the variation in CO₂ discharge in relation to crustal strain and fracture distribution. The strainmeter data shows that the crustal strain is largely influenced by rainfall at the Matsushiro area, for example, NS70-100 component of strainmeter expands after

* 〒380-0912 長野市大字稲葉 1993-1

** 〒390-8621 松本市旭 3-1-1

*** 〒381-1232 長野市松代町西条 3511

**** 〒305-0006 茨城県つくば市天王台 3-1

rainfall. Since many fractures having nearly the east-west direction are observed on the surface in this area, expansion in the north-south direction is expected after rainfall. Some pre-existing cracks will open with the expansion of neighboring cracks caused by water absorption. Since large amount of CO_2 gas presents under this area, CO_2 discharge rate increase with increase of width of passages. We can detect strain change of the fracture zone by CO_2 monitoring.

Key words: Soil gas, CO_2 discharge, Soil gas and crustal activity.

§1. はじめに

断層直上の土壌には、炭酸ガス・ヘリウム・ラドン・水素ガスが、一般の土壌に比べて多く含まれていることが知られている。長野市松代地域でも、群発地震時(1965~1967)に土壌ガス中の炭酸ガス濃度の探査が行

われ、断層帯外では0.3~0.6%であったものが、断層帯内では5~13%にまで上昇することが報告されている[永田・伊藤(1969)]. この地域では、地下深部起源の地下水の湧出に伴って気泡状の炭酸ガスが、群発地震の際多量に放出され、現在も何カ所かでそれが継続してい

Fig. 1. Gas sampling sites in the Matsushiro area (solid circles). Dotted area corresponds to the left-lateral fissures area which were formed by the Matsushiro earthquake [TSUNEISHI and NAKAMURA (1970)]. (Geographic map: from Geographical Survey Institute, 1/25000)

る。したがって、長野市松代地域で検出される炭酸ガスは、この地域の地殻変動や地震活動と関連して増減する可能性が高いと予想される。

以上のような見地から、松代地域で1995年6月～12月の6ヵ月間、土壌ガスを毎週一回サンプリングし、土壌ガス中の炭酸ガス濃度の変動を調べた。得られた測定結果を降雨、気温・気圧変化などの気象変動及び松代の気象庁地震観測室大坑道内に設置されている石英管伸縮計により得られる地殻変動記録と比較しながら考察したい。

§2. 測定地域

2.1 測定地域の概要

1965年に開始した松代地域及びその周辺直下を震源とした松代群発地震の際、地震断層が皆神山（みなかみやま）北東部を中心に東西走向に近い割れ目からなる主として北西・南東走向、一部北東・南西走向の地割れ群となって現れた[Tsuneishi and Nakamura (1970)]. 今回、土壌ガスの採取を行った地点は、Fig. 1に示すように、そのような地割れ群の直上あるいはその延長上に位置する点と、松代の気象庁地震観測室大坑道内（地割れ群からは約2.5 km 離れている）である。測定点の詳細を以下に述べる。

Fig. 2. Gas sampling sites in tunnel (solid circles with numbers from 0 to 28). A: Silica tube strainmeters and water tube tiltmeters. (geological map after NAGUMO *et al.*, 1967)

2.2 測定点

(1) 気象庁の地震観測室大坑道内

Fig. 2に示すように、坑道内はひん岩と黒色頁岩から構成されており、境界付近には、部分的に薄い凝灰岩の層がある[南雲・他(1967)]. 観測ポイント0, 4, 8, 9, -9, 12, 14, 22, 26は、ひん岩の岩盤上にあり、24, 28は黒色頁岩、27は凝灰岩の上にある。坑道内は何枚かのドアで外気と隔離されており外気の影響を受けにくいため、ガスの採取深度はとくに深くはせず、10 cmである。ただし、採取深度の違いによるガス成分・濃度の違いを見るために設けた地点番号-9は、深さ35 cmである。

(2) 玉依比売命神社（たまよりひめのみことじんじゃ）

玉依比売命神社付近は、基盤は泥岩とそれを貫くひん岩で、その上を表土が薄くおっている[松田(1967)]. 観測ポイントは、薄い土壌におおわれた山の斜面にあり、松代群発地震時に地震断層直上に生じた地割れの延長上にあたる。ガス採取は、採取深度の違いによる成分・濃度の違いを見るために、20 cm, 60 cmの2種類の深さで行った。以降、それぞれ測定点名を神社浅部、神社深部と記す。

(3) 牧内地区

牧内付近は、主に沖積層より成る[森本・他(1966)]. 観測ポイントは畑の中にあり、断層直上での炭酸ガス濃度の違いを確かめるために、群発地震時の地表地震断層の変位の認められる地点（石垣の並びが約10 cm くい違っている）と、そこから約10 m 離れた地点で、同じ深さ（40 cm）からガス採取を行った。以降それぞれ、牧内1, 牧内2と記す。

§3. ガスの採取方法及び測定法

3.1 採取法

(1) 気象庁地震観測室大坑道内および玉依比売命神社

気象庁地震観測室大坑道内および玉依比売命神社には、Fig. 3(a)のようなガスの採取装置を設置した。この装置では、地下から湧出てきたガスはプラスチック製のじょうご（直径12 cm）内に集まる。ビニールパイプ上端は折り曲げられ、ビニールテープでゆるめに巻かれており、新たにガスが地下から供給されたときには、ビニールパイプ内のガスは、ビニールパイプを介して空気中に放出され、新しいガスとの置換が円滑に行われるようにしている。

このような装置から、シリンジ（注射器）を用いてビニールパイプからガスを12 ml 採取する。そのガスをあらかじめ真空にしておいたゴム栓付き試験管（容量8 ml）内にゴム栓からシリンジで圧入し、実験室に持ち帰

Fig. 3. Soil gas sampling methods.
(a): for measurement points in tunnel and at Tamayorihimenomikotojinja; (b): for measurement points at Makiuti.

る。これを通常一週間に一回実施した。なお、運搬中に試験管内への外気の流入がないよう、栓に用いているシリコン栓の上部、側部にビニールテープで補強を行った。

(2) 牧内地区

牧内では、Fig. 3(b)のような装置を設置した。この装置は、設置予定地面にまずステンレスパイプを打ち込み、できた孔に塩ビパイプ（内径 2 cm、側面に数カ所穴があいている）を差し込んだもので、孔と塩ビパイプとの隙間を粘土などでふさいでいる。

設置直後、塩ビ管の中をより早く土壌ガスで置換させるために、塩ビパイプ上端をゴム栓でふたをした後、塩ビ管に残っている空気をシリンジで吸い出した。なお、ガスの置換時間を考慮し、試料ガス採取はこの装置の設置一週間後から行った。

3.2 測定法

採取したガスは、採取の当日または翌日に、固定相にシリカゲル、移動相に酸素ガスを用いた TCD 型ガスクロマトグラフ（大倉ガスクロマトグラフ Model-802T）により分析を行った。このガスクロマトグラフで、 N_2 、 CO_2 、 CH_4 はクリアに分離されており、各気体の濃度は、標準ガスから検量線を作成し、それにより決定した。

§ 4. 観測結果及び考察

4.1 観測結果の概要

N_2 、 CH_4 には、 CO_2 と比べて目立った時間変動がない。また、前述のように、この地域は、炭酸ガスの湧出が地殻変動・地震活動と関係が強いと予想されるので、以下

Fig. 4. Temporal variation in CO_2 concentration of soil gas from the observation points in tunnel.

では、炭酸ガス濃度の観測データについてのみ議論する。

Fig. 4 に、地震観測室大坑道内の全採取ポイントの炭酸ガス濃度の時間変動を示す。27 と 28 が他の測定点と比べて多少異なった濃度を示すが、すべてのデータが、数 100 ppm から 1300 ppm の間におさまっており、経時変化もほとんど同じパターンを示している。採取ポイントは地震観測室大坑道内のほぼ全域にわたっているので、坑道内での地下からの炭酸ガスの放出は、何らかの広域の変動に支配されて変動しているのではないかと推定される。

次に、地震観測室大坑道内のデータと他の地点のデータとを比較してみる。Fig. 5 に、地震観測室大坑道内、玉依比売命神社、牧内地区における炭酸ガス濃度の変動

を示す。なお、地震観測室大坑道内では、Fig. 4 のように、全採取ポイント間で濃度・成分の変動に大きな違いは見られないので、この図では 12 ある採取ポイントの平均値を示す。Fig. 5 の 3 枚のグラフの縦軸の数値の違いから、観測場所毎に濃度の絶対量に大きな違いのあることが分かる。すなわち、坑道内では数 100 ppm ~ 1300 ppm であるが、神社では数%にまでなっている。また各観測点での採取ポイント間の炭酸ガス濃度を比較してみると、玉依比売命神社では、深所ほど炭酸ガス濃度が高いことや、牧内地区では、断層線上と推定されるポイント（牧内 1）の方が、炭酸ガス濃度が高いことが示されている。

さらに、Fig. 5 から、炭酸ガス濃度はいずれの場所でも観測期間を通じて時間と共に大きく変動していること

Fig. 5. Temporal variation in CO₂ concentration of soil gas. The top shows average concentration observed at 12 points in the tunnel.

も分かる。この濃度の変動パターンには、類似性が見られる。とくに、地震観測室大坑道内と玉依比売命神社の濃度の変動パターンはよく似ており、夏季に高く、冬季に低い傾向や、7月5日前後から始まる急激な濃度増加も確認できる。これは、地震観測室大坑道内、玉依比売命神社という採取条件が明らかに異なる互いに離れた（距離約2.5 km）2地点の炭酸ガス濃度の変動が同じ要因によって引き起こされていることを示唆している。

そこで、この要因を気象変化や地殻変動に求め、降雨や気温・気圧変化や、歪み変化との関連を調べてみる。なお、測定期間が1年に満たないので、測定データは短期的変動についてのみ考察する。

4.2 気温・気圧との関係

すでに述べたように、地震観測室大坑道内と玉依比売命神社における炭酸ガス濃度は、夏季に高く、冬季に低い傾向が見られる。そのため、この炭酸ガスは、夏季の地表面の蒸発散の活発化あるいは生物活動の活発化により湧出してくるような比較的浅部を起源とするものである可能性もある。しかし、この年の気温は、7月よりも8月の方が高いにもかかわらず、今回観測された炭酸ガス濃度は8月になって下がっており、牧内地区においては、10月半ばから12月にかけて、気温変化のような単調な濃度低下が認められない。また、坑道内が生物活動の活発な地表から遠く離れており、測定点の温度も年間を通じてほぼ一定（変動幅は1℃以内）であることを考慮すると、土壤ガス中の炭酸ガス濃度の変動は、気温の上下動が主要な原因ではないと考えられる。

そこで、次に、気圧との関係を調べた。気圧の日変化幅は大きいので、移動平均をとって炭酸ガス濃度と比較した。それをFig. 6に示す。気圧変化には、炭酸ガス濃

度変化と無関係に見えるピークが多く見られ、7月に最大となるピークを持つ濃度変化との相関は明確ではない。

気圧変化が、炭酸ガスの湧出量に影響を与える原因として考えられる機構は、気圧変化による地中の亀裂の開閉に伴う湧出量の増減、地下水中の炭酸ガスの溶解度の変化に伴う湧出量の増減、地中の気圧と大気圧の差に伴う気体の上下移動による湧出量の増減が挙げられる。これらの現象では、いずれも気圧が低い時に湧出量が増加すると考えられる。そこで、気圧が低くなるピーク時の炭酸ガス濃度に注目してみた。濃度が最高となる7月19日のピーク時に気圧が低下していることが分かる。しかし、このような関係は他のピーク時にはほとんど見られない。また、逆に気圧が高くなるピーク時に濃度が低くなっているわけでもない。したがって、炭酸ガス濃度の増減が気圧変化によるものであるとは考えにくい。なお、玉依比売命神社、牧内地区における炭酸ガス濃度変化と気圧変化も比較してみたが、はっきりした関係は見られなかった。

4.3 降雨との関係

降雨が地中に浸透することにより、地下水位が上昇して炭酸ガス主成分の地中ガスが追い出され、炭酸ガス濃度が上昇することがある。実際、測定データと降雨とを比較すると、降雨の多い時期に炭酸ガス濃度のピークがある。しかし、次の事実、炭酸ガス濃度の増加の主な原因は、降雨の浸透のための地下水位上昇による地中ガスの放出ではないことを示していると考えられる。

炭酸ガス濃度の測定点は、Fig. 2のように坑道内に広く分布している。その中には降雨がなくとも湿った状態の所や降雨時直後だけ水が浸出してくる所もある。例え

Fig. 6. Temporal variation in atmospheric pressure (5 days moving average) and CO₂ concentration (solid lines) observed in tunnel.

ば、測定点 26 近くの難透水性の岩盤中に掘削されているボーリング孔の観測期間中の地下水位（気象庁地震観測室記録）は、非常に緩慢でなめらかな変化曲線を描いて 4 月から 8 月下旬まで単調に上昇しており、降雨による直接的変動は見られない。4 月から水位の高い 8 月末～10 月半ばまでの水位変化は約 1.4 m である。このように降雨による地下水位の変化は、坑道内でも場所によって大きく異なっている可能性がある。

そのような状態の違いに関わらず、Fig. 4 に示されるように、炭酸ガス濃度は全測点で類似した変動をしており、濃度の絶対値もほぼ等しい。これは、坑道内の炭酸ガス濃度の変動の主要な原因が降水の浸透による地下水位の上昇ではないことを示している。

4.4 石英管伸縮計の記録との関係

地震観測室大坑道内には、全長 100 m の石英管伸縮計が南北方向と東西方向にそれぞれ設置されており、石英管の端（0 m 地点）を固定点として、石英管上の 30 m, 70 m, 100 m 地点で石英管を基準として岩盤の伸縮の測定が行われている。Fig. 7 に、石英管伸縮計より得られた 1995 年 4 月 17 日～12 月 17 日の南北成分と東西成分の各区間すなわち、0 m～30 m 間、30 m～70 m 間、70 m～100 m 間の歪み変化を示す。また歪みに大きな影響を及ぼすとされる日積算雨量についても同図に示す。Fig. 7 において、NS0-30 は、0 m～30 m の歪み（以後 STNS0-30 と表す）、NS30-70 は、南北成分の 30 m 地点と 70 m 地点の間の長さ 40 m の区間の歪み（STNS30-70）を示している。また、EW0-30 など同様の表現である（STEW0-30）。なお、東西成分の 100 m 地点での測定値 EW100 は、測定機器の故障により正確な値が得られていないため、EW70-100 は除いてある。

歪みと降雨との関連性が非常に高いことがこの図から分かるが、降雨については 4.5 節で述べることにし、ここでは歪み変化と炭酸ガス濃度変化との関連についてみていくことにする。Fig. 7 を見ると、南北成分では、歪み変動の大きな時期は 3 区間とも同期しているように見えるが、その変動の向きや量は異なっている。一方、

東西成分についてはそのような違いは見えない。

そこで、どの区間の歪み変化と炭酸ガス濃度とが最も関連が深いのかを調べるために、地震観測室大坑道内、玉依比売命神社、牧内地区における炭酸ガス濃度と各区間の歪みとの相関係数を求め、Table 1 に示す。歪みを測定しているのは坑道内であるので、まず坑道内の炭酸

Fig. 7. Temporal variation in crustal strain and daily precipitation. NS0-30, NS30-70, and NS70-100: crustal strain between 0 m and 30 m, 30 m and 70 m, and 70 m and 100 m along NS strainmeter, respectively. EW0-30 and EW30-70: crustal strain between 0 m and 30 m, and 30 m and 70 m along EW strainmeter, respectively. Solid lines: daily precipitation. (Data from Matsu-shiro Seismological Observatory of Japan Meteorological Agency.)

Table 1. Correlation coefficients between strain variation and CO_2 concentration variation with time for the period from June, 1995 to December, 1995.

	in Tunnel	Jinja sinbu	Jinja senbu	Makiuti 1	Makiuti 2
NS0-30	-0.36	-0.51	-0.40	-0.72	-0.70
NS30-70	-0.76	-0.68	-0.83	-0.39	-0.45
NS70-100	0.67	0.54	0.61	0.45	0.73
EW0-30	0.16	0.13	0.08	-0.20	-0.35
EW30-70	0.72	0.71	0.70	0.40	0.77

ガス濃度変化との相関を見ても、測定値は、坑道内 12 測点の平均値を用いた。Table 1 から、南北成分では 30 m-70 m 間と 70 m-100 m 間、東西成分では 30 m-70 m 間の歪みとの相関の高いことが分かる。その中で STEW30-70 は、炭酸ガス濃度変化の特徴を示す 7 月の大きな変化に対応するピークが見られない。

相関が高く、7 月に特徴的な変動をした南北成分の 30 m-70 m 間と 70 m-100 m 間の歪み変化と炭酸ガス濃度について検討してみる。物理的因果関係のあるのがどちらかについては、相関係数の値だけでは優劣がつけられないので、それぞれのデータの特徴のある変動をもう少し詳しく見てみる。Fig. 8(a)・(b) は、炭酸ガス濃度変化と歪み変化との間に時間差があるかどうかを比べたグラフである。最大のピーク時期を比べると、Fig. 8(a) から、STNS30-70 の歪み変化のピークの方が炭酸ガス濃

度のピークより遅れていることが分かる。一方、Fig. 8 (b) からは、逆に、STNS70-100 の歪み変化のピークの方が先行していることが分かる。歪み変化と炭酸ガス濃度の間に因果関係があるとしたら、歪み変化が原因で炭酸ガス濃度が変化するのであって、決してその逆ではない。また共通の原因で歪み変化と炭酸ガスの湧出とが制御されているとすれば、物質の移動現象である炭酸ガスの湧出には遅れが伴う。いずれにしても、歪み変化が先行するはずである。このことを考慮に入れると、物理的因果関係から意味のあるのは、歪み変化が炭酸ガス濃度変化に先行した STNS70-100 の歪み変化である。つまり南北方向に地殻が伸張して、その後炭酸ガス濃度が増加するというものである。一方、坑道内以外の測定点で得られた炭酸ガス濃度変化は、Fig. 5 に示されるように坑道内で測定された濃度変化と非常によく似た変動

Fig. 8. Temporal variation in crustal strain and CO₂ concentration (solid lines) observed in tunnel. (a) STNS30-70 (square). (b) STNS70-100 (diamond).

を示すため相関係数は高いが、ピーク時間は必ずしも一致しておらず、場所により数日の時間差があることが分かる。

4.5 歪みと雨量

炭酸ガス濃度変化も歪み変化も7月前後に大きな変化を示している。この時期は降雨の多かった時期である。そこで、石英管伸縮計の南北成分の各区間の降雨時の動きに注目してみる。

西前・涌井(1996)は、松代の地震観測室大坑道内の歪みデータと降雨との関係について次のように述べている。松代ではある程度以上の量の降雨があると、その影響が南北歪みの伸縮変化に現れる。まず、縮み変化が現れて数日後にピークを持ち、その後、降雨期間中の積算雨量に比例した伸び変化が現れてくる。西前・涌井(1996)のこの記述は、全長100mの石英管伸縮計の伸縮と降雨について述べたものである。100mを3区分し、それぞれの区間の伸縮と降雨量をグラフにしたものがFig.7であるが、これを見ると、STNS0-30とSTNS30-70はSTNS70-100と逆の動きをする傾向のあることが分かる。すなわち、STNS0-30とSTNS30-70が降雨後にまず縮み変化を示すのに対し、STNS70-100は伸び変化を示している。降雨量の少ない時に、必ずしも同様の変化が現れるとは限らないが、7月だけでなく9月中旬の40mm/dayを越える降雨時にも、STNS0-30とSTNS30-70の縮み変化に対して、STNS70-100の伸び変化が確認できる。

これらの観測事実は次のように理解できる。70m-100m間は、降雨量の多い時に水を蓄えて伸張する区間であるため、周辺を圧迫して、0m-30m間及び30m-70m間を収縮させる。0m-30m間、30m-70m、70m-100mの地質はいずれも同時代のひん岩で構成されている(Fig.2)ことから、70m-100m間には0m-30m間と30m-70m間に比べ早期に水を吸収しやすい比較的大きな割れ目群が存在しており、この割れ目群が降雨時に水を吸収して、70m-100m間が南北方向に伸張するのであろう。

松代地域のひん岩中には、ひん岩貫入後の中新世後期～鮮新世前期に形成されたと考えられる節理を主体とした東西走向に近い割れ目系が顕著に発達している[村井(1967)]。歪み計のNS成分の70m-100m間の地下に、そのような走向の割れ目群のうち、降雨により膨張しやすいものが存在していたのではないかと考えられる。なお、小さな伸縮変化は降雨時以外にも認められるが、その原因は不明である。

4.6 土壌ガス中の炭酸ガス濃度の変化機構

以上のことを踏まえ、岩盤の歪み変化に伴って高濃度

の炭酸ガスを含む地下深部のガス湧出量に変化が生じる機構を以下に提案する。なお、歪み測定が行われていなかった玉依比売命神社と牧内地区において、地震観測室大坑道内の南北歪みの変化による湧出機構がそのまま適用できるかどうかは不明であるが、同様の機構による可能性は高いと思われる。

松代地域には、炭酸ガスを気泡として含む深層起源と思われる湧水[中村(1971)]が、群発地震時に発生し、今なお多くの場所で見られることから、地下に炭酸ガス源が存在すると考えられる。したがって、歪みとの関連を考えると、歪み変化によって炭酸ガスが新たに生成されるとか間隙に少量存在していたものが絞り出されるなどのメカニズムではなく、常時地下から放出されているガスが、歪み変化による割れ目の開閉によって放出が容易になったり困難になったりすることが主要な要因であると考えるのが妥当である。

今回、南北伸張の歪み変化により炭酸ガスの湧出量が増加するモデルが必要とされる。すなわちFig.9に示すように、観測点付近に南北伸張(圧縮)により開口(閉口)するような東西走向に近い割れ目群が存在していたとするモデルである。つまり、水を吸収しやすい比較的大きな割れ目がほぼ東西に多数走っており(Fig.9のB地域)、降雨時に水を蓄え地面が南北方向に伸張するのである。この時、均質に割れ目があり、かつ同量だけ水

Fig. 9. Schematic drawing of a model. Region B expands with water saturation of pre-existing cracks after rainfall. Some dry closed cracks in the region B are expected to open accompanying with the expansion. CO₂ gas discharge increases due to the dry open cracks in the region B.

が浸透すれば、岩盤自体としては均等に膨張するはずである。しかし、実際の岩盤は割れ目の分布は不均質で、透水性も一様ではなく、降雨を受ける地形にも凹凸があるので、水の浸透による膨張現象は岩盤中で三次元的に不均等に進行する。そのため、水が浸入していない岩盤も変形を受け、既存亀裂があれば開（閉）口するものもでてくる。Fig. 9 の B 地域のような伸張地域では、水の浸透がなければ開口するものが増えると考えられる。炭酸ガスは、この開口された割れ目を通して地表に湧出してきたのではないだろうか。なお、降雨が続けば、これらの開口割れ目の中には水で満たされるものもでてくるが、同時に、歪みがさらに進行して別の開口割れ目が出現することも考えられる。また坑道内での炭酸ガス濃度が、観測点（最大約 300 m 離れている）によらずほぼ一定であることから、濃度変化をコントロールしている亀裂は比較的深いところにあると推定される。

このモデルによれば、歪み計の 0 m–30 m 間、30 m–70 m 間に対応する区域 (Fig. 9 中の A 地域) では、炭酸ガス濃度も逆の変化をしなければならない。しかし、炭酸ガス濃度測定点の中でそのようなところはなく、全ての測定値は STNS70–100 の伸張に伴って増加しており、減少している測定点はない。これについては、そのような場所にガスの採取点がなかったと解釈するしかないが、今後の課題である。

炭酸ガス濃度変化と STNS70–100 との間に最も高い正の相関が観測されたのは測定点 27 のデータである。相関係数は 0.73 であった (なお、タイムラグを考慮してピーク時を合わせると 0.76 となる)。測定点 27 のデータと歪みデータとをグラフにしたのが Fig. 10 である。直線は最小二乗法による回帰直線であり、 $y = 15x + 480$ である。ここで y は、測定点 27 の CO_2 濃度 (単位 ppm) で、 x は STNS70–100 (単位 10^{-8}) である。

Fig. 10. Correlation between STNS70–100 and CO_2 concentration at the measurement point of No. 27.

§ 5. ま と め

地中ガスの挙動と地殻変動との関係を見るために、土壌ガス中の炭酸ガス濃度の変動を観測してきた。今回の観測で、従来言われてきたように、断層直上付近で炭酸ガス濃度が大気中に比べ高いことが確認されたと同時に、炭酸ガス濃度は、長野市松代地域の広い範囲にわたって地震観測室大坑道内で観測されていた局所的な南北歪みに対応して変化する傾向のあることが分かった。

地震観測室大坑道内の 12 測点における炭酸ガス濃度変動を説明する一つのモデルを提案した。長野市松代地域の地下には豊富な炭酸ガス源があり、常時ガスは放出されているとする考えのもとで、坑道内の地下に存在していた降雨により膨張しやすい東西走向に近い割れ目群の膨張が、周囲の割れ目を開口させることで、炭酸ガスの湧出量が増加していたとするモデルである。なお、歪み変化の計測データがないため、玉依比売神社と牧内地区における炭酸ガスの湧出機構が坑道内と同じものかどうかは確定できない。

謝 辞

この研究にあたり、気象庁地震観測室の職員の方々にご協力を頂いた。また、竹内益美氏は、観測装置を設置する土地を快く貸して下さった。当時信州大学理学部地質学科大学院生奥沢 保氏、四回生新井崇史氏、海野真秀氏には野外における調査を手伝って頂いた。匿名の方から頂いた査読コメントはデータを解釈する上で非常に役立った。以上の方々に、厚く感謝の意を表します。

文 献

- 松田時彦, 1967, 松代地震断層の地質学的性質, 地震研彙報, **45**, 537–550.
- 森本良平・村井 勇・松田時彦・中村一明・恒石幸正・吉田鎮男, 1966, 松代群発地震地域とその周辺地方の地質, 地震研彙報, **44**, 423–445.
- 村井 勇, 1967, 松代群発地震地域のわれめ系解析, 地震研彙報, **45**, 505–536.
- 永田松三・伊藤司郎, 1969, 松代地震地域における地化学探査 (続報), 防災科学技術総合研究報告, **18**, 29–39.
- 南雲昭三郎・高橋 博・長谷川 淳, 1967, 気象庁地震観測所坑内における弾性波速度測定, 防災科学技術総合研究速報, **5**, 49–55.
- 中村一明, 1971, 松代地震から学んだこと, 科学朝日, 1971 年 10 月号, 127–133.
- 西前裕司・涌井仙一郎, 1996, 松代における伸縮計および水管傾斜計に現れた降雨の影響とそのシミュレーション, 気象庁精密地震観測室技術報告, **13**, 17–27.
- TSUNEISHI, Y. and K. NAKAMURA, 1970, Faulting associated with the Matsushiro swarm earthquakes, Bull. Earthq. Res. Inst., **48**, 29–51.