

亀裂堆積岩の山体での雨水浸透とその水質

Rain Infiltration in a Fractured Sedimentary Rock Mountain and Its Water Quality

下島栄一*・上田裕一郎**・吉岡龍馬***

田中寅夫****・細 善信*****・小葉竹重機*****

By Eiichi SHIMOJIMA, Yuichiro UEDA, Ryuma YOSHIOKA

Torao TANAKA, Yoshinobu HOSO and Shigeki KOBATAKE

The discharge rate and electrical conductivity of seepage water into a mountain tunnel were monitored continuously for approximately five years in Yura, Wakayama. The chemical composition of that water was measured regularly. The mountain is composed of fractured sedimentary rocks. Based on the assumption about the presence of two infiltration components (fissure flow and matrix flow) in the rock base, variations in the water quality during heavy rainfall events and after an earthquake were analysed. Also, it was suggested that CO₂-gas in the rock base plays an important role in the water quality.

Keywords: rain-infiltration, seepage water, fractured rocks, water quality

1. はじめに

山体中の土壌水の水質には、例えば雨水が、どのような地質的特性を有する浸透経路を経て移動してきたかという情報が含まれている。従って、複雑な山体での雨水浸透の仕組みを究明する際、従来行われてきた様な浸透水の水量変化に着目するのみならず、その水質にも着目することは浸透現象を理解する上で有力な手段となることが期待される。

雨水の浸透過程を調べるためにポーラスカップを用いた水理的計測も行われているが、場が構造的に強い非均質性を有する場合、点的な測定では現象を正確に捉えることは難しく¹⁾、比較的広範囲な面積を対象とした測定が必要である。この様な場合、排水ライシメータの使用は、水質の測定を含め有効なものとなりうることが期待できる²⁾。

著者らは、亀裂堆積岩の山体での雨水浸透の仕組みを解明するため、浸透場に構造的な非一様性が存在す

-
- | | | | | |
|-------|------|----|-----------|-------------------------------------|
| * | 正会員 | 工博 | 大同工業大学教授 | 工学部建設工学科 (〒457 名古屋市南区白水町40) |
| ** | 学生会員 | | 大同工業大学大学院 | 工学研究科建設工学専攻修士課程 (同上) |
| *** | | 理博 | 富山県立大学教授 | 短期学部環境工学科 (〒939-03 富山県射水郡小杉町黒河5180) |
| **** | | 理博 | 京都大学教授 | 防災研究所地震予知研究センター (〒611 宇治市五ヶ庄) |
| ***** | | | 京都大学技官 | 防災研究所地震予知研究センター (同上) |
| ***** | 正会員 | 工博 | 群馬大学助教授 | 工学部建設工学科 (〒376 桐生市天神町1-5-1) |

るとの予想のもとに、山腹に掘られたトンネルへの比較的広範囲な湧水を集め、その水量と水質の観測を行っている³⁾。その結果、湧水には基底な流出成分と降雨直後に流量を増大させる速い流出成分が存在すること、また、これらの流出成分は、亀裂岩盤内で多数の小さな空隙部分よりなる浸透経路と少数の比較的大きな空隙部分の経路を流下するそれぞれ「matrix flow」及び「fissure flow」と呼ばれている浸透成分に対応していることも、浸透計算等の水理的検討を介して推測された³⁾。

雨水やその浸透が基盤の歪や傾斜の計測に大きなノイズとして作用するため、測地学の分野でもこのようなトンネル湧水の観測が行われているが⁴⁾、そこでは、浸透水を動的に扱うといった研究はなされていない。また、岩盤内の放射性廃棄物の埋設による処分と関係して、上記の二つの浸透成分の挙動も解析されているが⁵⁾、埋設場所が非常に深いため、降雨-浸透の応答に着目した研究はなされていない。

本論文は、上記したトンネル湧水の流量や水質、またトンネル内の炭酸ガス濃度の観測に基づき、湧水の水質変化と浸透場の構造特性との関係について検討したものである。

2. 観測の場所と方法

対象とした山体は和歌山県日高郡由良町にあり、砂岩、チャート等の亀裂堆積岩で構成されている。山腹斜面より水平にほぼ幅2 m、高さ2 mのトンネルがコの字型に掘られ、図-1でのハッチ部分以外は基岩が露出している。測点A（主として砂岩）の土被りは約10 mとなっている。山腹には種々の高さの雑木林が生えているが、表層土はさほど厚くはなく、特にB点付近（主としてチャートの岩質で、土被りは5 m程度）では、植生の細根が多数垂れた状態になっている。

トンネル湧水は天井のある特定の部分からのみ生起している。この水をA-1点、A-3点の場合、それぞれ集水面積2 m²及び3.74 m²のじょうごで集め、この流量を転倒升式雨量計で1988年より計測している。また、同雨量計から排水される水をチューブを通して小さな容器の底より流入させ、容器内に差し込んだ導電率計で湧水の導電率をA-3点では1989年、A-1点では1991年より測定している。定期的に（月1回程度）、またある台風来襲時の場合には集中的に、現地で湧水を採集し、Na⁺、K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、NH₄⁺-N、Cl⁻、HCO₃⁻、SO₄²⁻、SiO₂につき濃度分析を行っている。

測点A-1付近の天井近くの空気を、ビニールチューブを介し、吸引ポンプで赤外線散乱方式センサーに取り込み、炭酸ガス濃度の計測も1994年（8月）より行っている。

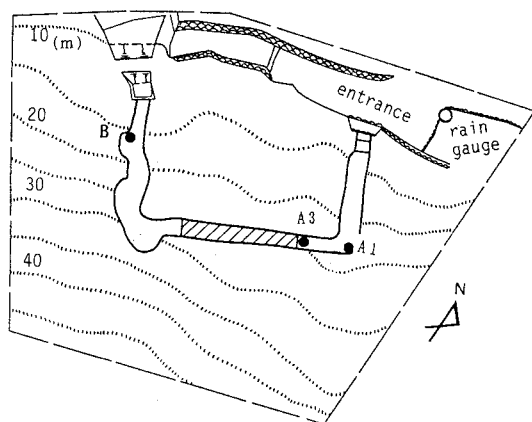


図-1 トンネル湧水の観測地

3. 観測結果とその検討

3. 1 地震による湧水の流量・水質の変化

(a) 湧水流出成分の分離

1994年5月8日（17時）、観測地近くの有田市（深さ10 km）でマグニチュード4.8の地震が起こり、湧水の流量（Q：雨量計の単位で、以下とも表示）と導電率（EC）が図-2のように変化した。流量は、地震発生とほぼ同時に増加を始め、約1日でピーク（ $Q_{max}=116 \text{ mm/h}$ ）に達した後、緩やかな減少を始め、同月11日の降雨生起時点で114 mm/h（地震時では $Q=103 \text{ mm/h}$ ）となった。導電率は地震発生のおよそ数時間後明確に増加を始め、Qとほぼ同時刻にピーク（ $378 \mu\text{S/cm}$ ）に達した。その後の減少はQに比し速く、約1日で元の値（ $372 \mu\text{S/cm}$ ）まで回復している。なお、A-1点でのQ、ECの変化はA-3点でのものに比べて小さいことが認められた。

湧水が、前記の通り、二つの流出成分 (matrix flow と fissure flow の浸透成分) により形成されると考えると、水及び化学成分の連続式はそれぞれ以下の通りである。

$$Q_m + Q_f = Q \tag{1}$$

$$C_m \cdot Q_m + C_f \cdot Q_f = C \cdot Q \tag{2}$$

ここに、Cは化学物質の濃度、添字“m”、“f”はそれぞれ matrix flow 及び fissure flow による流出成分を意味する。

式(1)、式(2)は以下のように書き換えられる。

$$\Delta Q_m = (1 - F) \cdot Q - Q_{m,0} \tag{3}$$

$$\Delta Q_f = F \cdot Q - Q_{f,0} \tag{4}$$

ここに、 $F = (C - C_m) / (C_f - C_m)$ 、 $Q_{j,0}$ ($j = m, f$)は地震時の Q_j 、 $\Delta Q_j = (Q_j - Q_{j,0})$ である。式(3)、(4)で C_j ($j = m, f$)の時間変化と初期流量 $Q_{j,0}$ が分かれば、変動量 ΔQ_j の時間変化が分かる。

地震発生時の流量状態は、

4月12日の総計61.5 mmの大きな降雨によって、Qは一旦大きく増大した後、次第に低減して、その変化割合も小さくなっていた。従って、地震時の湧水が主として matrix flow 成分によるものと考えられ、 $Q_{f,0} = 0$ 、 $Q_{m,0} = Q_0$ 、 $C_0 = C_{m,0}$ と近似できる。ここに、添字“0”は地震時での値を意味する。流量増加は岩盤空隙部の不飽和域に保持された水が地震の衝撃により動いた結果だとす

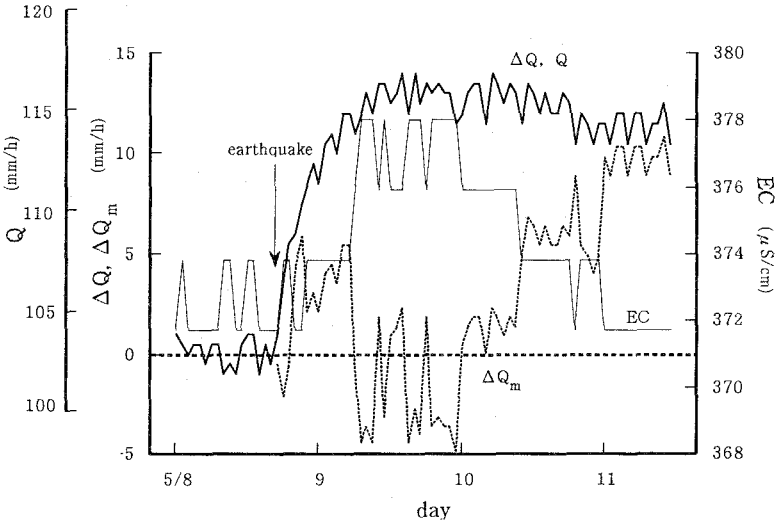


図-2 地震によるQ、ΔQ、EC（実測値）及びΔQ_m（計算値）の変化（A-3点の場合）

ると、空隙の小さい部分に保持された水は大きな空隙部分でのものに比し移動が容易でないと考えられるので、流量増加の初期段階での流出成分は主として fissure flow によるものとみなせる。さらに、流量増加に寄与する各々の浸透成分の化学成分濃度はほぼ一定($C_j = \text{const.}$)とみなせる。

式(3)、式(4)の濃度(C)を実測の導電率(EC)で置き換えて、同式を計算した地震後の ΔQ_m の変化が図-2に示されている。ここに、 $\Delta Q = Q - Q_0$ であり(Q_0 は地震時のQ値)、また $\Delta Q_f = \Delta Q - \Delta Q_m$ である。計算では、 $C_m = 372 \mu S/cm$ 、 $C_f = 420 \mu S/cm$ としたが、 C_f 値はQがピーク値を示す時点で $\Delta Q_m = 0$ として決定した。なお、 $C_m < C_f$ の関係にあるが³⁾、これは、以下のように考えられる。即ち、fissure flow の生起は特定の降雨によりもたらされるが、それ以外の場合には亀裂面が空気にさらされることが多く、風化が進行するはずである。従って、浸透成分の流量にも関係するが、結果的に、岩の相対的な溶出割合が matrix flow の場に比し fissure flow のものの方が卓越することに因ると考えられる。

図-2より、地震発生以降の流量の増加段階では、地震直後を除外して、濃度の高い fissure flow 成分の急増が起り、また流量ピーク後の低減段階では、同成分の寄与の急な減退と濃度の低い matrix flow 成分の増加が見られる。なお、上記したように、地震発生直後には観測流量の増加は認められたが、導電率の増加はほとんどなかったという事実を考慮すると、図-2で、地震直後で $\Delta Q_m > 0$ を示す計算結果は、matrix flow 生起場に形成されている飽和域(トンネル天井上部)が地盤振動で脱水を起こし、上方に位置する不飽

和域から飽和域への排水に先行したことに因るとも考えられるが、この点については今後詳細な検討が必要である。

上記の11日の降雨事象までの地震によるA-3点の流量増加量は、単位面積当たり6.2mmと計算された。この比較的大きな水量、及び前述の通り11日では流量が地震発生時の値に回復していないという状況より推測される matrix flow の生起場の飽和域の発達（計算による地震発生時よりの水面上昇高は、約40cm）は、トンネル上方の不飽和域からの排水によってもたらされるので、上方の不飽和域はある程度脱水が進んだ状態になっていることが予想される。事実、11日の降雨（38.5mm）、15日の降雨（22.5mm）では流量の増加が起らず、26日の降雨（65.5mm）で始めて流量の増加が観測された。

(b) fissure flow による飽和域へのかん養強度の変化

Q_f の増加は、トンネルの天井上部に形成されている飽和域への fissure flow のかん養によってなされ、その領域が発達することにより起こる。飽和域での浸透水の運動はダルシー則に従うとすると³⁾、同式、連続式及びGreen・Amptのモデルより、以下の関係式を得る。

$$q_f - Q_f = -(\gamma_f \cdot \Psi_f / K_f) \cdot dQ_f / dt \tag{5}$$

ここに、 q_f はかん養強度、 γ_f は飽和域上部に接続する不飽和域の有効空隙率、 Ψ_f は飽和域上端でのマトリックポテンシャル（水頭単位）、 K_f は飽和透水係数、 t は時間であり、また地震発生後の fissure flow による流出量（例えば、ピーク値）と K_f のオーダー³⁾ を考慮して、 $Q_f \ll K_f$ の条件が設定されている。

地震後の fissure flow による流量増加の様子は、おおよそ以下の関数で表すことができる。

$$\Delta Q_f = \Delta Q - \Delta Q_m = -a \cdot (t - T_{q,max})^2 + b \tag{6}$$

ここに、 $T_{q,max}$ ($= 21$ h) は Q がピークとなる地震生起時からの経過時間、 $b = Q_{max} - Q_0$ ($= 13$ mm/h)、 $a = b / T_{q,max}^2$ ($= 0.029$ mm/h³) である。

$\Delta Q_f = Q_f$ を考慮し、式(5)に式(6)の関係をを用いると、以下の式を得る。

$$q_f = -a \cdot \{t - T_{q,max} - \gamma_f \cdot \Psi_f / K_f\}^2 + b + a \cdot (\gamma_f \cdot \Psi_f / K_f)^2 \tag{7}$$

式(7)より、fissure flow によるかん養は地震直後にステップ的に始まり、その強度は2次関数的に変化すること、またピーク強度の生起時間 ($T_{q,max}$) は次式で与えられることが分かる。

$$T_{q,max} - T_{q,max} = \gamma_f \cdot \Psi_f / K_f \tag{8}$$

$- \{K_f / (\gamma_f \cdot \Psi_f)\}$ の推定値³⁾ の 0.08 h⁻¹ を式(8)に用いると、かん養強度のピークは流量ピークより約12時間前に現れたと推測される。

3. 2 降雨による流量・導電率変化の類似性

台風9019号、台風9021号の来襲により、二山のハイトグラフが観測され、湧水のハイドログラフも二山の類似な形状を呈した³⁾。なお、前者の場合、9月17日と20日にそれぞれ128mm及び103.5mmが、後者の場合、10月6日と8日にそれぞれ46.5mm及び90mmの降雨量があった。湧水の採水は、いずれの場合も、ハイドログラフで、最初のピークが現れた直後より約2時間間隔で約4日間行った。A-3点の場合、流量が増大する直前の値は、 $Q_{19} = 82$ mm/h、 $Q_{21} = 122$ mm/hであった。ここに添

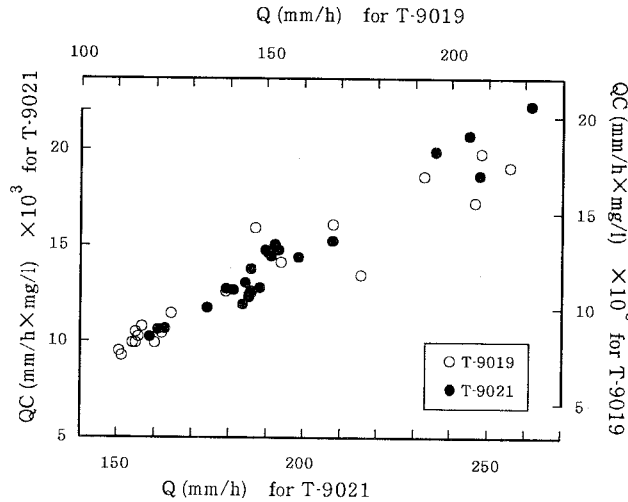


図-3 二つの台風時のQとSO₄²⁻フラックスの比較

字は台風の号数を意味する。流量が増加するまで、かなりの期間低減が続いていたので、流量増加開始時の湧水には matrix flow の流出成分が支配的であると考えられる。また、流量が増加している段階での導電率変化は硫化鉄や石膏に起源する⁶⁾ SO_4^{2-} の濃度変化にはほぼ対応していること³⁾、また matrix flow が支配的な段階(Q が小)での湧水の SO_4^{2-} 濃度はほぼ一定($C_m = 36 \text{ mg/l}$)となっている事実³⁾を考慮し、二つの台風時の流量と SO_4^{2-} フラックスの関係を比較したものが図-3 である。ここに、両台風のデータのプロットに際し、横軸は両台風時の初期流量の差 $\delta Q_m (= 40 \text{ mm/h})$ 、縦軸は初期の SO_4^{2-} フラックスの差 $\delta Q_m \times C_m (\text{mm/h} \times \text{mg/l})$ だけ移動させている。主たる流量増加は fissure flow 成分による。図で、二つの台風時のデータがほぼ一致している。この結果は、式(1)、(2)を考慮すると、fissure flow 成分の湧水流量と SO_4^{2-} 濃度の間には1対1の関係があることを示唆する。

A-1 の場合、流量増加時には HCO_3^- の変化が顕著であるが³⁾ (下図-4 参照)、このイオンに着目して図-3 と同様な比較を行った結果、両データは良く合致することが認められた。

3. 3 水質の形成

(a) HCO_3^- と pH との関係

図-4 は、A-1 点の湧水の HCO_3^- のモル濃度と pH の関係を示す。ここに、▲印は平時 (Q が小)、また●印と○印はそれぞれ台風 9019 号、9021 号 (図-3 ; Q が大) のものである。

気相中の炭酸ガスと水溶液中の炭酸ガスが平衡にある場合、以下の式が成立する⁷⁾。

$$\log(P_{\text{CO}_2}) = \log[\text{HCO}_3^-] - \text{pH} + 7.8 \tag{9}$$

ここに、 P_{CO_2} は溶存炭酸ガス分圧(atm)、[] はモル濃度を示す。図中の破線はこの分圧をパラメータにとった式(9)の計算値である。図より、式(9)に従えば、台風時の炭酸ガス分圧は平時のものに比し約1 オーダ大きくなっており、また $[\text{HCO}_3^-]$ も台風時の方が高くなっていることが分かる。後者の特性は A-3 点では成立せず、逆の傾向を示すことが認められた⁶⁾。 HCO_3^- 濃度は火成岩地域より2-3 倍高い値となっている⁸⁾。

(b) 炭酸ガス濃度と EC の変化の関係

図-5 は、1994 年9月の A-1、A-3 点での導電率(EC)と炭酸ガス濃度(C_{CO_2})の時間変化を示す。図で、EC と C_{CO_2} にはある程度の変化が現れており、A-1 点では両者には良い対応が認められるが、A-3 点での対応は余り良くない。両点の流量(Q)にはほとんど変化が現れなかったが、これは同年6月以降の少雨によって例年になくQが低下し、降雨によるQの応答は非常に悪い状態となっていたためであり、湧水には matrix flow の流出成分が卓越した状況にあると予想できる。A-1 点の EC が C_{CO_2} の変化に良く応答している事実は、ガス濃度が増加/減少することにより、亀裂岩盤内の浸透水へのからの CO_2 ガスの溶解/逃散が起こり、浸透水中の HCO_3^- 濃度を増加/減少させたものと考えられる (式(9)と図-4 参照)。この過程で、カルサイトや珪酸塩鉱物を含む岩の溶出も同時に起こっているのである⁶⁾。なお、図で、例えば9月7日~14 日間の C_{CO_2} と EC の変動値(正符号)、 $\text{EC} \sim [\text{HCO}_3^-]$ の関係式(実測)を式(9)に用いて同期間の pH の変化量を計算すると 0.4 程度減少する結果となったが、この変化は起こり得るものである

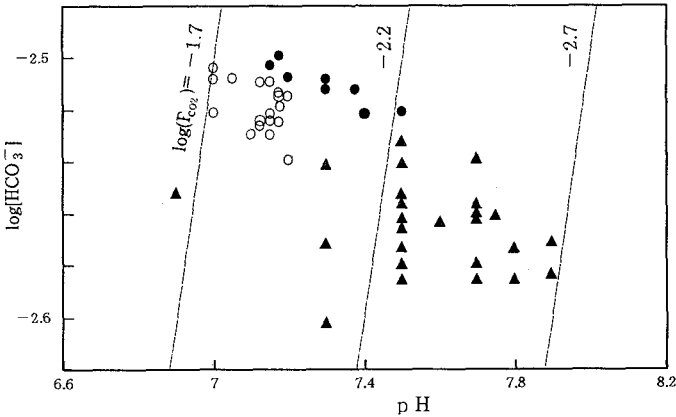


図-4 HCO_3^- 濃度と pH との関係

(図-4 参照)。

4. おわりに

測点 A-1 と A-3 はさほど離れていないが、そこでの水質特性に認められた明確な相違は、亀裂岩盤の地質的複雑さを示すものであり、またこの結果は、浸透解析には、ある程度広範囲な面積を対象にした観測が必要であることを示す。観測された湧水の種々の水質変化は、亀裂堆積岩盤に雨水の浸透経路が二つ存在するという前提を介して

説明できることが分かったが、この結果は、逆に言えば、浸透

場に二つの浸透成分が存在するという前提の妥当性を保証するものである。また、水質変化は、岩盤中の炭酸ガスと密接な関係にあることも分かったが、高濃度(～1000ppm)のガスのソースが植生の根等の腐食によるものか、また現地には(仏像)構造線が走っているので、下方からの供給によるものかは不明である。今後、浸透水の水質の形成過程を詳細に究明して、雨水の浸透経路や浸透機構を明確にしていきたい。

本研究は、平成6年度文部省科学研究費一般研究(C)(課題番号 06650574、代表者 下島栄一)の補助を受けた。

〔参考文献〕

- 1) Rasmuson, A. and Neretnieks, I.: Radionuclide transport in fast channels in crystalline rocks, Water Resour. Res., 22, 1247-1256, 1986.
- 2) Shimojima, E. and Sharma, M.L.: In situ sampling of soil water for measurement of water quality, Proc. Australian Soil Sci. Soc., Workshop on Soil Sci. and Environment, W.A.(Perth), 187-197, 1991.
- 3) Shimojima, E., Yoshioka, R., Tanaka, T. and Hoso, Y.: Seepage into a mountain tunnel and rain infiltration, J. Hydrol., Elsevier Sci. Pub., 121-151, 1993.
- 4) 例えば, Tanaka, T. and Hoso, Y.: Effect of rainfall on a continuous observation of ground tilts, Royal Soc. New Zealand, 19-28, 1986.
- 5) Peters, R.R. and Klavetter, E.A.: A continuous model for water movement in an unsaturated fractured rock mass, Water Resour. Res., 24, 416-430, 1988
- 6) 下島栄一・吉岡龍馬・田中寅夫・細 善信: 山体トンネル湧水の水質変化について, 水文・水資源学会研究発表会要旨集, 132-133, 1993.
- 7) 吉岡龍馬・金井忠一: 地すべり地地下水の炭酸ガス分圧について, 京大防災研究所年報, 18-B, 271-283, 1975.
- 8) Yoshioka, R.: Geochemical study of weathering through chemical composition in natural waters, J. Earth Sci., Nagoya Univ., 35(2), 417-444, 1987.

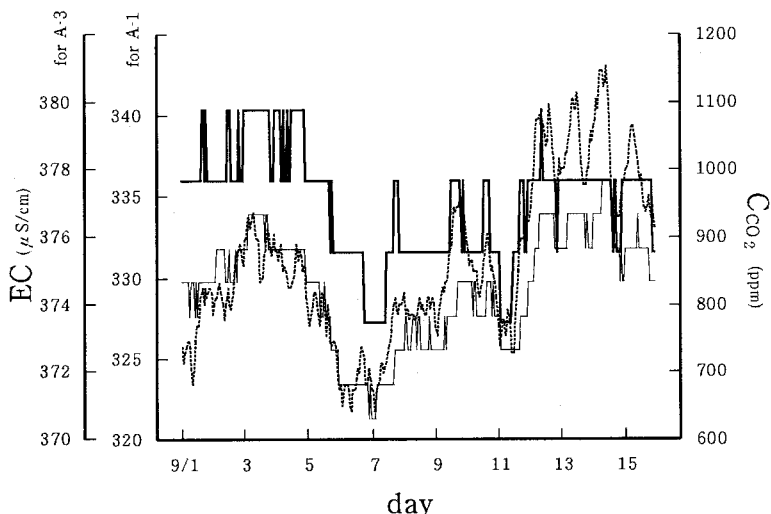


図-5 A-1 点の EC (細線)、A-3 点の EC (太線) と C_{CO_2} (点線) の時間変化