

(80) ストリパ鉱山における、坑壁からの蒸発量の測定

埼玉大学 工学部	渡 辺 邦 夫
動力炉核燃料開発事業団	柳 沢 孝 一
東京計測 (株)	神 田 信 之
埼玉大学 工学部	山 本 肇

In situ measurement of the evaporation from the rock wall in the Stripa Mine, Sweden

Kunio WATANABE	Saitama University
Koichi YANAGIZAWA	Chubu Office, PNC
Nobuyuki KANDA	Tokyo Keisoku Co., Ltd
Hajime YAMAMOTO	Saitama University

Abstract

Groundwater coming from rock wall of an under ground drift may be mostly evaporated into the air if the seepage rate of the groundwater was low. The in situ measurement of the evaporation over the rock wall and/or along every fracture must be indispensable to clarify the flow condition of the groundwater near the drift that is excavated in a low permeable rock mass. The authors made a new equipment for measuring the evaporation rate. This equipment is based on the fact that the evaporation rate is essentially identical to the rate of the vapor transportation in air in the normal direction to the rock wall. As the major agent that transport the vapor is the molecular diffusion in the laminar boundary layer formed closely near the wall, so the transportation rate can be calculated from the absolute humidity gradient in the layer. The spatial distributions of the evaporation rate along two fractures was successfully measured in the 3-D migration test drift of the Stripa Mine.

はじめに

いま、低透水岩盤中の放射性廃棄物の貯蔵・処分の問題を考える。この時、対象とする岩盤中の地下水の流れの状態をまず明かにし、核種移行に対する安全性を確認しておかねばならない。地下水流れの状態を調べるための最も重要で基礎的な調査の一つは、対象区域に掘られたトンネル中への湧水の分布や、坑壁近傍の流れの状態を詳細に把握することである。しかしながら、放射性廃棄物の貯蔵・処分の対象となる岩盤中の透水性は極めて小さく、湧水量を精度良く計ることは、困難であった。さらに、トンネル内は換気されており、湧水量が小さい場合、速やかに蒸発し、換気空気と共に坑外に運ばれる。実際問題として、このような岩盤からの湧水量の測定には、蒸発量を計測することが大変重要である。筆者らは、従来から、地表からの蒸発量の測定法の開発を進めてきた^{1), 2), 3), 4)}。今回の研究は、その基礎に立って、トンネル坑壁からの蒸発量測定法を新しく考案し、スウェーデン、ストリパ鉱山で実際の測定を行ったものである。

測定の結果、この方法の有用性が極めて高いことが明らかとなったので報告する。

1. 測定法の原理

換気されているとはいえ、トンネル内の空気流速は、換気口近傍を除いてかなり小さい。この時、坑壁に接して薄い層流境界層が形成される。図-1は、境界層内の平均風速とその層厚との関係を実験的に見たものである。一般的に言って、トンネルではこの厚さはほぼ1 cm程度である。

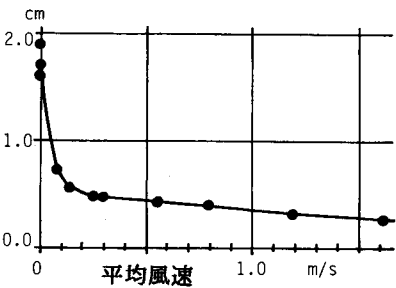


図-1 境界層厚さと平均風速の関係

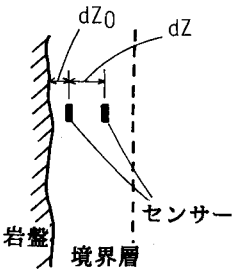


図-2 測定法の概念

坑壁から蒸発によって空気中に供給された水分は、まずこの層を通して、坑壁に対して直交方向に運ばれる。流れが層流であれば、この水分移動は分子拡散によって行われる。そのため、蒸発量と空気中の水分移動量が等しい定常状態では、蒸発量 E_v は、以下の式で算定しうる。

$$E_v = D_m \cdot \frac{\partial \theta}{\partial n} \quad (1)$$

ここに、 θ は絶対湿度、 n は坑壁直交方向座標、 D_m は分子拡散係数である。風速が大きい場合は、さらに、乱流拡散係数を考えねばならない²⁾。上式が成立する層流境界層内では、分子拡散係数はわかっているから、図-2に示すように、壁面からの高さの異なる2点で絶対湿度を測定することによって蒸発量が求まることになる。

ここで考えておかねばならないことは、岩盤中の流れが割れ目内を主要に通過することである。そのため、蒸発量も割れ目の上で大きくなることになる。このように、蒸発量に場所的な差があると、水分は単に坑壁直交方向にのみ移動せず、3次元的で複雑な移動となる。蒸発量の測定ではこのことを十分考慮しておかねばならない。ここで、割れ目からの水分の移動を図-3(a)に示すように単純化して考える。図は割れ目の伸び方向に直交する断面を表しており、割れ目以外からの蒸発は無視しうるものと仮定している。ここに見られるように、割れ目付近では1次元的な水分移動と2次元的な放射状の移動が組合さっていると考えている。図-3(b)中、 w はセンサーの感知部幅、 dZ_0 、 dZ は、それぞれ下部のセンサーの壁面からの高さ及び、2つのセンサーの間隔である。割れ目直上部以外では同心円的な湿度分布となるため、(b)図中に示すように2つのセンサーを移動させた時、割れ目から離れるに伴って壁面直交方向の湿度勾配が小さくなり、測定される蒸発値は小さくなる。この水分移動モデルの妥当性を室内実験により検証した。図-4に実験装置の模式図を示す。実験装置は、平面的な土槽の上に2枚のガラス板を乗せたものである。

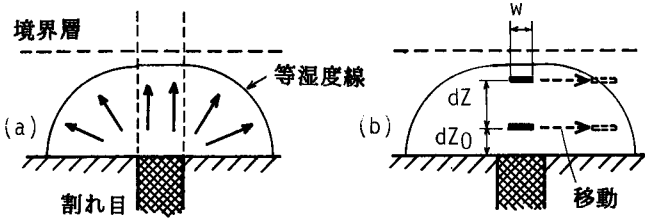


図-3 割れ目上の水分移動モデルと蒸発量測定

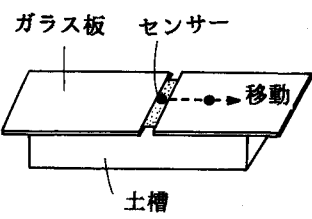


図-4 モデルの検証実験

各々のガラス板の間には、任意の幅のすきまがあり、これが割れ目部を模擬している。実験では、図中に示すようにセンサーを移動し、それに伴う測定蒸発量の変化を調べ、前述のモデルに基づいた理論値と比較した。その比較例を図-5に示す。用いたセンサーの感知部幅 $w=3\text{mm}$ で、 $dZ_0=3\text{mm}$ 、 $dZ=7\text{mm}$ であった。横軸は、図-4の割れ目モデル中央からの距離を表している。縦軸は鉛直方向の湿度勾配から求めた蒸発量 ($\text{mg}/\text{m}^2/\text{s}$) である。この例では、割れ目部幅 6mm の場合を示している。理論値は、実験で得られた値と極めて良く一致しており、風速が小さい場合、前述の水分移動モデルの妥当性がほぼ確かめられたと言って良い。そのモデルを用いれば、割れ目中央で測定された蒸発量値から、図-3に示されたすべての方向に向かう総蒸発量が計算できる。例えば、今回用いたセンサーの諸元を用いて、割れ目幅が感知部幅 w より大きければ、

$$E_t = (0.0193 + Wf) E_{v0} \quad (2)$$

となる。ここに、 E_t は割れ目単位長さあたりの総蒸発量 (単位 $\text{mg}/\text{m}^2/\text{s}$)、 Wf は割れ目幅、 E_{v0} は割れ目中央で測定された蒸発量 (単位 $\text{mg}/\text{m}^2/\text{s}$) である。図-5からさらに、実際には割れ目部のみからしか蒸発していないに関わらず、放射状の水分移動のため、見かけ上、かなり広範囲から蒸発しているかのような測定が得られることがわかる。この点、測定値の解釈にあたって十分考慮しなければならない。

2. ストリバ鉱山3-Dサイトにおける蒸発量測定とその意義

測定は、1988年8月10日から8月13日にかけて、スエーデン、ストリバ鉱山内の3-Dサイトで行った。測定場所の平面図を図-6に示す。測定場所は地表から340mの深さにあり、カコウ岩より成っている。今回、図中 P-1、P-2、P-3の3地点で得られた蒸発量測定結果について報告する。このうち、P-1とP-3にはほぼ水平に伸びた割れ目が認められたが、P-2 地点では明瞭な割れ目は観察されなかった。8月10日、換気はされておらず、またそれ以前2月ほどにわたって換気はなく、当日の坑内湿度は95%以上であった。またトンネル壁面は濡れた状態になっており、下底面にはところどころ水溜りがあった。

8月11日より換気が開始された。まず、P-2 地点で、換気に伴って蒸発量が非定常的に変化する様子を調べた。この地点の高さは、トンネル下底面より測って約1.5mであった。また、この地点に近いトンネル中央部で、空気湿度の変化を測定した。図-7に結果を示す。図から、換気の開始に伴って、空気湿度が6%ほど低下したことがわかる。一方、蒸発量は、換気開始後約10分間で急速に増加し、ほぼピーク値に達した。この高い値は約10分間続き、その後低下に転じている。約1時間たっても、ゆっくりとはあられ、低下傾向が続いている。蒸発量がほぼ定常に達するには、少なくとも、半日程度必要であった。前述したように、この地点では割れ目は肉眼的に認められなかった。したがって、この図に示さ

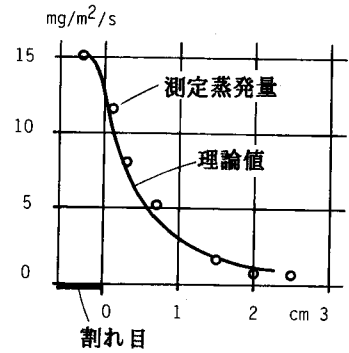


図-5 蒸発量分布による検証結果例

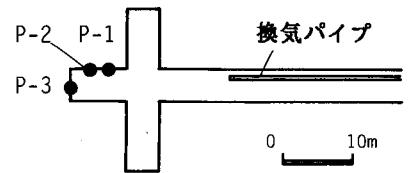


図-6 測定場所平面図

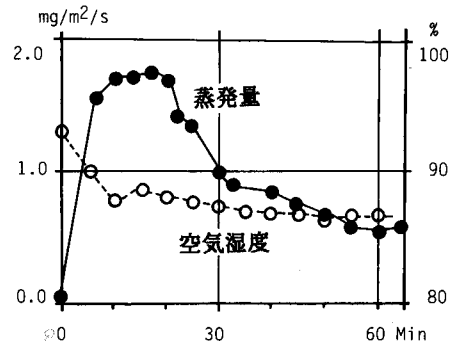


図-7 換気に伴う蒸発量変化

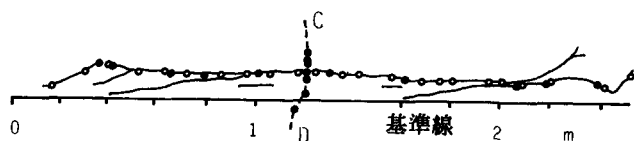


図-8 P-1地点の割れ目と測定点

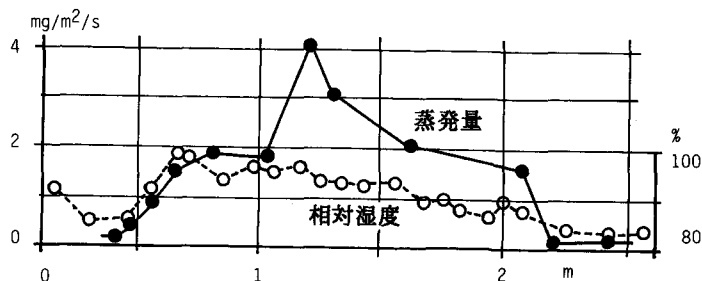


図-9 割れ目に沿う相対湿度と蒸発量の分布

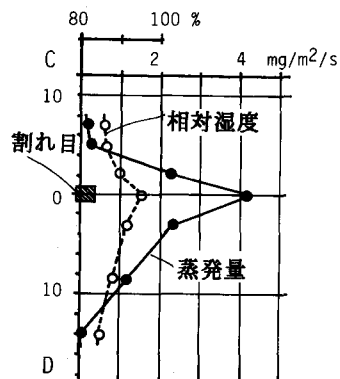


図-10 割れ目直交方向の相対湿度と蒸発量の分布 (C-D線)

れた蒸発量、とくに、換気直後に見られた大きな値は、おそらく壁面を濡らしていた水の蒸発に起因するもので、岩盤からの浸透流とは直接的な関係は小さいと思われる。

図-8は、P-1地点に見られたほぼ水平に伸びた割れ目を示している。この割れ目に沿って、図中黒丸で示す所で蒸発量を測定した。また白丸位置は、壁面直上の相対湿度を測定した場所である。もし層流境界層厚さが一定であり、この境界層外部の乱流拡散係数が大きいならば、この相対湿度は蒸発量の良いめやすになるはずである。さらに、図中C-Dで示す、この割れ目にほぼ直交する方向の測線でも、蒸発量と相対湿度の分布を調べた。C-D線が横切る所で、割れ目の破砕幅は、約2cmであった。まず、割れ目に沿った方向の蒸発量と相対湿度の分布を図-9に示す。蒸発量は、割れ目中心部の値(式(2)中の E_v0)である。横軸は、図-8中の基準線を表している。図から、蒸発量にはかなりの場所的な差があることがわかる。図-10は、C-D線上の分布である。蒸発が割れ目上部に限らず、割れ目両側のかなり広い範囲で起こっているように見える。とくに割れ目の下方でこの範囲は大きくなっている。この範囲は、割れ目の上下共に、前述した放射的な水分移動によるみかけの幅に比べて広い。下方については、割れ目から浸透してきた水が壁面を伝うことによるものであろう。一方、上方にもある程度広い範囲を持つことについては、割れ目近傍では全体的に岩が破砕

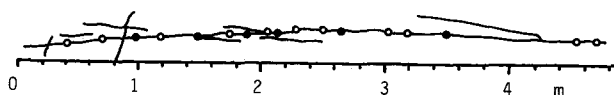


図-11 P-3地点の割れ目と測定点

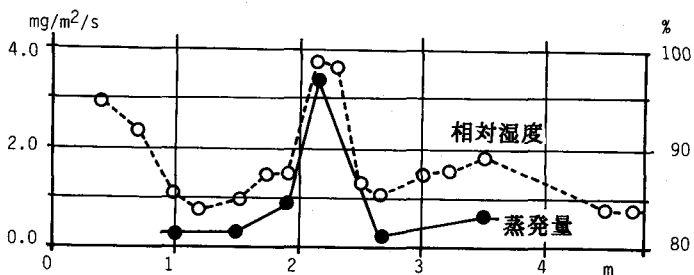


図-12 割れ目に沿う相対湿度と蒸発量の分布

され、水の通り易いゾーンを形成していることも考えられる。

図-11は、P-3 地点に見られたほぼ水平な割れ目である。図中の黒・白の丸で示す位置で、P-1 地点と同様に蒸発量と相対湿度の分布を調べた。その結果を図-12に示す。図から、局所的に蒸発量の大きい所が認められる。この性質および図-9に表された場所的な蒸発量の差は、一つの理由として、チャンネリング流れによるものと考えられる。

3. 考察と今後の問題

今回ストリパ鉱山3-Dサイトにおいて、新しく作製した蒸発量測定装置により、トンネル壁面からの蒸発量分布を調べた。その結果、この方法がうまく使いうことが明かとなった。また、この測定により、チャンネリング流れや割れ目近傍の流れなど、岩盤浸透流の基礎的な性質がある程度把握しうることが明かとなった。このことは、蒸発量の測定が、低透水岩盤中に掘削されたトンネル周辺の浸透流の性質を把握する上でかなり有効であることを示している。しかしながら、トンネル壁面近傍の流れは一部不飽和な流れに移行するなど複雑である。そのため、今後測定データを増やし、蒸発量測定の意義をさらに深く検討してゆくことが必要である。

参考文献

- 1) Watanabe, K., Tamaki, H., Matsushima, H., A new technique for measuring evaporation from the ground surface., 2nd Int. Symp. Field Meas. Geomech., pp. 1027-1036, 1987.
- 2) 小野誠、渡辺邦夫、神田信之、地表直上の温度・湿度分布を用いた蒸発量測定法の開発、第43回土木学会年講、2、pp. 202-203, 1988.
- 3) 藍沢稔幸、渡辺邦夫、小野誠、地表近傍の気象要素計測による蒸発量測定法の野外計測への適用、第43回土木学会年講、2、pp. 204-205, 1988.
- 4) Watanabe, K., Kanda, N., Tamaki, H., Two new methods for measuring the evaporation rate from the ground surface, Joint Sino-Japanese Seminar on the Implication of Natural Analogue, 1988.