

山地におけるトンネル湧水による自然由来ヒ素の流出特性

岐阜大学工学部	学生員 ○大久保雅徳
岐阜大学工学部	学生員 スリグルン
岐阜大学工学部	正会員 篠田成郎

1. 研究の背景と目的

近年、トンネル掘削時のズリ土およびトンネル湧水に含まれる重金属類の適正処理が必要になってきている。重金属類を含む湧水については希釈処理が一般的であり、希釈水量の確保が重要となる。このため、湧水として流出する物質負荷量の推定が欠かせない。こうした地中の物質移動現象は、一般に、飽和・不飽和浸透流解析と移流・分散解析によって取り扱われる^{1), 2)}が、土質・地質条件や物質溶出源に関する情報を詳細に与えることが必要であり、トンネル山体中の自然由来物質に適用することは容易ではない。

そこで、トンネル湧水に含まれる自然由来物質の起源としての存在量・箇所を推定することを最終目標として、本研究では、ヒ素負荷量に関する実測結果と簡易的な流出シミュレーションとの比較を通じて、自然由来ヒ素の流出現象に及ぼす溶出・移流・分散の特性を検討することを目的とする。

2. 簡易的な水分・物質移動モデルによる流出シミュレーション

岐阜県内のAトンネル(全長2,772m)ではヒ素を含むズリ土およびトンネル湧水が確認されており、本研究では、このAトンネルでの湧水量および湧水中含有ヒ素濃度に関するデータを例として検討する。Aトンネル山体上部の地表面はスギ人工林で覆われ、20~100cm程度の表層土壌(A層)が存在している。また、弾性波探査およびボーリング調査より、弾性波速度が3.0km/sより小さな地層に岩屑(B層)が分布し、その下方の基岩(C層)との境界面付近に地下水面を形成していると推定されている。一方、鉛直方向に断層(D1層)と貫入帯(D2層)が存在し、これらの層から大量のトンネル湧水とヒ素を含むズリ土が確認されている。そこで、トンネル山体中の水分・物質移動を図-1のように4種類の経路による1次元流れとして簡易的に表現する。

鉛直一次元飽和・不飽和浸透流方程式に基づく貯留関数モデル^{3), 4)}により各経路の水分移動量およびトンネル湧水流量を推定し、その結果を物質移動を物質負荷量収支式(式(1))および鉛直一次元移流分散方程式(式(2))にそれぞれ適用して求めた結果を実測値と併せて図-2に示す。なお、図-2の上段は実測されたトンネル湧水のヒ素濃度を表す。

$$L = CQ \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -\frac{\partial(cv_{ps})}{\partial s} + \frac{\partial}{\partial s} \left(D_s \frac{\partial c}{\partial s} \right) - \frac{Q_c}{\rho\theta} \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 L : ヒ素負荷量、 C : ヒ素濃度、 Q : トンネル湧水流量、 s : 物質移動方向、 c : ヒ素質量濃度、 v_{ps} : 間隙内流速、 D_s : 分散係数、 Q_c : ヒ素溶出量、 ρ : 水の密度である。図-2中のSim1⁴⁾が式(1)による推定結果であり、Sim2⁵⁾は式(2)の分散項を無視したときの推定結果を示す。この流量推定計算では、B層・C層→D層以外の側方水分移動を無視するとともに、蒸発散および冬季・春季の積雪・融雪を考慮していないため、推定精度が低下する期間が認められるが、全体的な流量変動は再現できている。次項では、図-2のヒ素負荷量に関する実測値と推定値との比較に基づき、山体中での物質移動メカニズムについて考察する。

3. 物質移動メカニズムの考察

式(2)の右辺第1項、第2項および第3項がそれぞれ

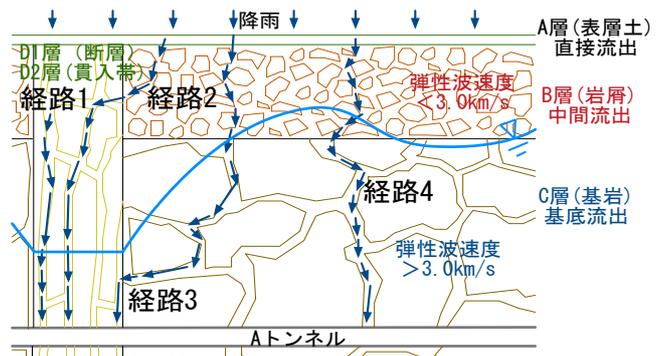


図-1 トンネル山体上部における水分・物質移動の模式図

れ移流項, 分散項および源泉項を表している. 前項で述べた物質移動シミュレーションでは, トンネル掘削時のズリ土に含まれるヒ素含有量に基づき, 図-1 に示す D 層に主なヒ素供給源を設定するとともに, C 層にもわずかなヒ素供給を設けている. 地中内の間隙流速は小さいものの, 地質形成年代は流出に要する時間に比べて極めて大きく, 長期に及ぶ物質分散により物質濃度の空間変化はほぼ平衡状態に達していると考えられる. このため, 図-2 下段の Sim2 では, 式(2)の分散項を無視している.

一方, 式(1)は対象層内での平均濃度と流量から負荷量を算定する式となっている. 具体的には, C 層内と D 層内のヒ素溶存濃度をそれぞれ一定値として与え, これを経路に沿って質量収支を満足させつつ移動させることでヒ素負荷量を算出している.

図-2 のヒ素負荷量推定結果は, 式(2)で分散を無視した Sim2 よりも式(1)による Sim1 の方が良好となっている. 式(1)では, 層内のヒ素濃度は一様としていることに相当するため, Sim2 と同様に, 分散を無視したことになっている. このため, 図-2 における Sim1 と Sim2 の結果の相違は式(2)での源泉項に相当するヒ素供給源でのヒ素溶出状況の評価方法に依存していると考えられる.

ヒ素溶出現象は, Fick の法則に基づき, ヒ素供給源(ヒ素を含有する岩石)での溶出濃度とその周囲媒質での溶存濃度から決まる. ヒ素供給源での溶出可能ヒ素含有量が大きいほどヒ素溶出濃度は大きく, ヒ素溶出の進行とともに溶出可能ヒ素含有量は減少する. しかし, ヒ素溶存濃度が経時的に減少する傾向は現れておらず, 溶出可能ヒ素含有量の低下は無視できるほど小さいと判断できる. このため, Sim2 では, 式(2)の源泉項(単位時間当たりのヒ素供給量, すなわちヒ素溶出負荷量)を時間的に一定として与えて計算したが, 結果的には Sim1 の方が推定精度が高くなった. このことより, ヒ素供給源での溶出負荷量は長期的には一定であるものの, 短期的な時間変動は存在する方が妥当と考えられる. すなわち, ヒ素供給源の周囲媒質において移流・分散により時々刻々と変動する溶存量に応じて, 溶出ヒ素が Fick の法則に従って媒質に供給されていると扱う必要がある. Sim1 では, ヒ素供給源でのヒ素濃度を一定として扱っているが, 流量との積により, ヒ素溶出負荷量を流量とともに変動させていたために, ヒ素溶出負荷量を一定とした

Sim2 よりも推定結果が良好になったと考察できる.

このように, 式(1)では, ヒ素供給源の周囲における移流・分散によるヒ素溶出量の時間変動をダルシー流速に伴う移流の結果として評価していると思わせるが, 実際には, 間隙流速による移流効果として評価することが必要と考えられる. また, 上記の検討では無視した分散効果もヒ素供給源周辺では無視できない可能性もある. このため, ヒ素供給源近傍での移流・分散効果を考慮して式(2)における源泉項を与えた解析より, 自然由来ヒ素の移動現象における溶出・移流・分散それぞれの効果を評価することが必要と考えられる.

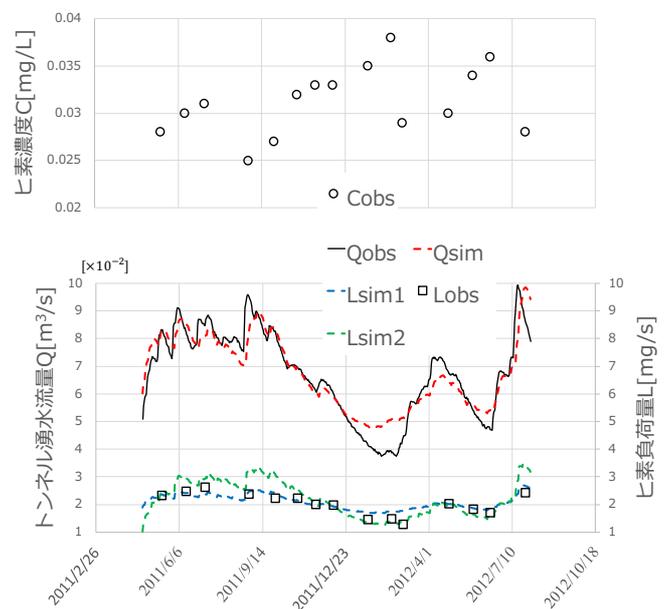


図-2 トンネル湧水中の実測ヒ素濃度 C ならびにトンネル湧水量 Q およびトンネル湧水中ヒ素負荷量 L に関する実測値と推定値との比較

謝辞

本研究では, 岐阜県からデータを提供いただいております. ここに記し深謝する.

参考文献

- 1)西垣誠:有限要素法による飽和不飽和浸透流解析-AC-UNSAF2D-プログラム解説およびユーザーマニュアル, 岡山地下水研究会, 2005.
- 2)D.Rassam, J.Simunek, M.Th.van Genuchten: HYDRUS-2D による土中の不飽和流れの計算, 農業土木学会土壌物理研究部会, 2004.
- 3)井倉洋二:貯留関数型モデルによる土壌および基岩からの流出成分の分離, 九大演報, 70, 13-14, 1994.
- 4)熊谷光:山地におけるトンネル湧水・ヒ素流出のモデル化と予測, 平成 28 年度岐阜大学卒業論文, 2017.
- 5)森亮希:山地におけるトンネル湧水によるヒ素流出に関する簡易モデルの検討, 平成 29 年度岐阜大学卒業論文, 2018.