

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 2 日現在

機関番号：14701

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23510007

研究課題名(和文)トンネルを使った大規模、長期排水実験による地下構造物が地下水に与える影響評価

研究課題名(英文)Influence of large scale tunnel digging and drainage on groundwater

研究代表者

井伊 博行 (Ii, Hiroyuki)

和歌山大学・システム工学部・教授

研究者番号：60283959

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円、(間接経費) 1,260,000円

研究成果の概要(和文)：松本城山トンネルでの長期的な排水による地下水への影響を調べた。24年間に1000万m³に達するトンネル湧水が排水された。そのトリチウム濃度は低く、酸素同位体比は変化しておらず、トンネル掘削時にすでに涵養されていた貯まり水が継続して排水されていると考えられた。排水された水量はトンネルレベルから地表部までの区間の地層の全間隙の22%しか達しておらず、すべての水が排出されるまでに、さらに80年かかることが解った。蒸発による同位体比の変化を室内実験で調べた。低湿度環境では同位体比の変化から蒸発率が推定できることが判った。鉾山排水が長期的に海岸に排水された場合に高濃度の亜鉛を含む海藻が見つかった。

研究成果の概要(英文)：Influence of long term drainage of tunnel seepage on groundwater system was studied at Matumoto-Shiroyama Tunnel. Although 10 million m³ tunnel seepage water has been drained for 24 years, ³H concentration has kept low and oxygen isotope values have been uniform. Therefore, recharged water before the tunnel construction was thought to be drained. The 10 million m³ tunnel seepage water was only 22% of all porosity in sediment between the tunnel level and surface. It needs more 80 years to perfect drain of all pore water in sediment. It has been clarified that evaporation rate can be estimated from oxygen isotope under low humid condition. At the surrounding of large scale digging, Namariyama mine area, high concentration of Zinc for seaweed was found. The drainage water from the plugged tunnel welled up at the coast and the drainage water derived from mine tunnel was high concentration of metal.

研究分野：環境学

科研費の分科・細目：環境解析学 環境動態解析

キーワード：地下水 地下水流動 酸素同位体比 排水 トンネル掘削 トリチウム 海藻 蒸発率

1. 研究開始当初の背景

原子力発電所から発生する使用済み燃料を再処理して得られる高レベル放射性廃棄物の安全な処分が問題となっている。地層処分場を建設するためには、地下を掘削する必要があり、その掘削による地下水の流れ場や周辺環境への影響を長期的に評価することは重要である。提案している松本城山トンネルでは、1990年の掘削当初より観測を継続して行っており、このような長期間観測した現場はない。

このような背景で、松本城山トンネルをフィールドとして調査を開始した。さらに、長期間の観測の重要な基礎研究として、水の酸素同位体比の蒸発に伴う同位体比変化、大規模空洞の代表として鉾山の排水に伴う周辺環境への調査も関連して行った。

2. 研究の目的

20 数年以上の長期的な河川流量、地下水水位（湧水の水涸れ）、トンネル湧水量、水質（溶存成分、酸素水素の安定同位体比、トリチウム濃度）などのパラメータの変化から、長期排水に伴う地下水流動のモデル化を行う。酸素・水素の安定同位体比は地下水涵養域の推定に有効であるが、台地上部にある池などの水源では、蒸発に伴い同位体比が大きくなる。その影響を把握するために酸素安定同位体比と蒸発率の関係を室内実験で調べた。また、大規模排水は松本城山トンネルのように道路トンネルだけでない。特に、鉾山ではさらに大規模な空洞を残し、その空洞内で酸化した酸性物質による排水の問題があり、鉾山排水による影響を発展課題として調査した。

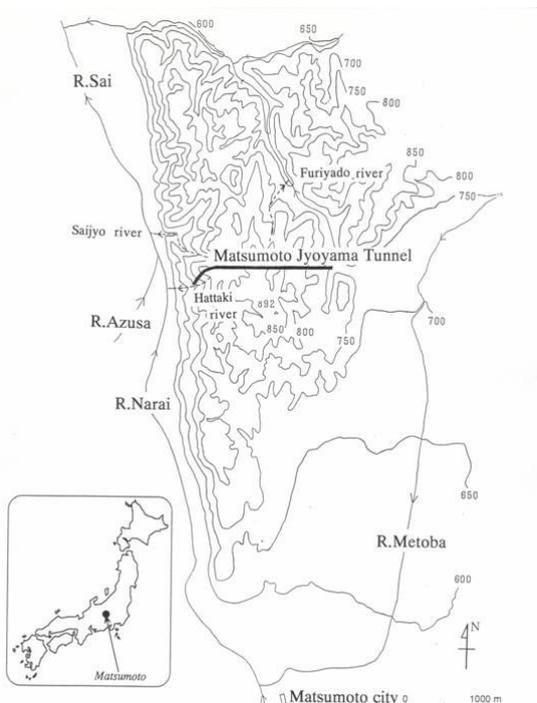


図 1 松本城山トンネル位置図

3. 研究の方法

図-1に示す長野県松本市にある松本城山トンネル地域で、環境調査を実施した。具体的には、現場での水質測定（pH、EC、ORP、水温）、トンネルからの湧水量の調査、簡易水道などの湧水地点の湧水量調査、河川流量の調査、滴定法およびイオンクロマトグラフィによる水の溶存成分調査、水素・炭酸ガス平衡法での水の酸素・水素安定同位体比測定（サーコン製）、トリチウム濃度の調査を実施した。

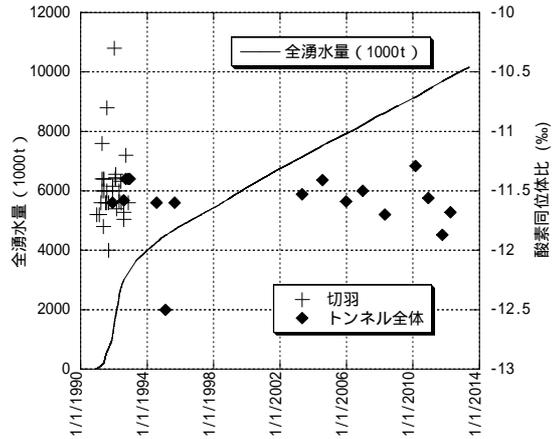


図 2 全湧水量と酸素同位体比

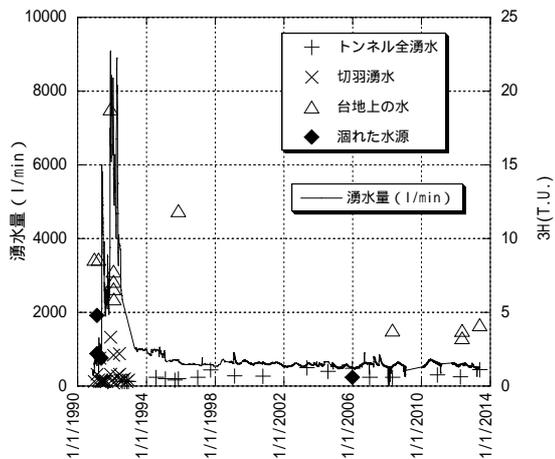


図 3 単位時間当たりの湧水量とトリチウム濃度

蒸発に伴う同位体比の変化に関する実験は、恒温室を使って、一定温度での水の重量変化と同位体比の変化から単位蒸発量当たりの同位体比の変化を調べた。鉾山排水については、和歌山県白浜町の鉾山排水が湧水となって海に流れている現場での海藻の重金属濃度を調べた。坑口は塞がれているが地下水は周辺の地層から湧き出し、汚染を起こしている。

4. 研究成果

(1) 松本トンネル

流量変化：トンネル湧水量、水涸れ

図 2 に松本城山トンネルの全区間の湧

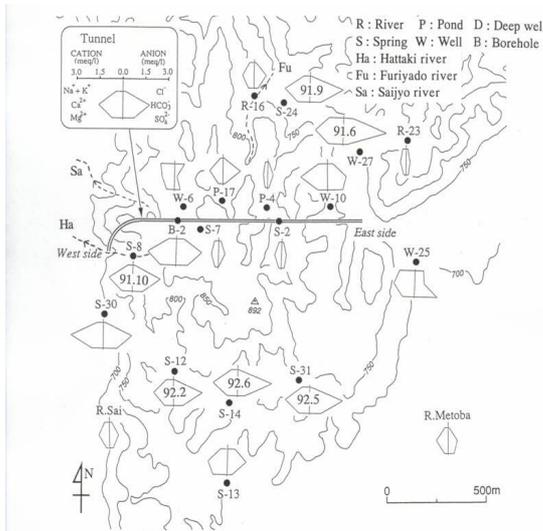


図 4 水涸れ状況図

水量の変化と酸素同位体比の変化を、図 3 に単位時間当たりの湧水量とトリチウム濃度の変化を示す。湧水量は 1990 年 10 月の掘削直後から増加し、一時的に 9000l/min にも達しているが、掘削終了時の 1992 年 8 月に 2300l/min、1993 年 4 月には 1000l/min まで減少し、1995 年から 600 l/min に落ち、その後は多少の変動があるが微減して、現在は 500 l/min である。つまり、1995 年から約 20 年以上も流量はほぼ一定である。また、その全区間の湧水量は掘削中の 2 年間で 300 万 m³ に達していたが、その後は 20 年以上経て 1000 万 m³ を超えた。つまり、掘削中は切羽から一時的に大湧水が見られたが、掘削終了後はほぼ一定の流量が、長期にわたり安定して排水されている。

図 - 4 にトンネル掘削時の湧水の水涸れ状況を示す。トンネル周辺には多くの井戸や簡易水道水源（湧水）があったが、トンネル掘削に伴い涸れてしまった。図中の数字は涸れた日時で、1992 年 6 月に最南端の水源 S - 14 が涸れた。しかしながら、その南 500 m にある水源 S - 13 は現在まで全く涸れていない。したがって、トンネルとつながっている地下水水位は、S - 13 と S - 14 の間にあるものと考えられる。流量が 600l/min に安定した 2005 年に S - 14 では、湧水の復活？が見られた。その流量は測定不

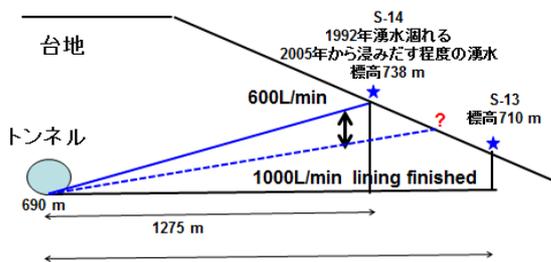


図 5 S - 14 の地下水変化の模式図

能なほど小さく、現時点でも浸みだす程度である。したがって、現時点の地下水は、S - 14 の地点と考えられる。そのことから、図 5 に示すような地下水位の変化が読み取れる。つまり、S - 14 が涸れた時点（地下水水位は S - 14 よりも低い）では、トンネルからの排水量が 1000l/min で、これが流量減少によって、排水量が 600l/min まで下がることで、水位が S - 14 地点まで回復したと考えられる。付近の S - 12 は回復していない。S - 31 は井戸で所在不明である。

河川流量はサイジョ沢(Sa)では、0.4 から 25l/sec、フリヤド沢(Fu)では、0.4 から 5l/sec で、ほぼ掘削当時の流量であった。

このように、トンネル湧水量、地下水位、流量に関しては、掘削時には変化が見られたが、貫通後数年へてから、ここ 20 年間以上大きな変化は、一部の水位の上昇を除いて見られない。

酸素同位体比

図 - 2 に水の酸素同位体比の変化から切羽の同位体比は湧水地点によって -10.5 から -12.0‰まで変動しているが、貫通後のトンネル全区間の湧水の同位体比は約 -11.5‰で、長期的に安定した値で、変化は見られない。図 6 に同位体比の分布を示す。黒色のマークの河川、青色の井戸、湧水、赤色のボーリング孔（深い 100m 以上）をみると、トンネルのある台地ではほぼトンネル湧水と同じ同位体比の水がみられる。トンネル上にあるボーリング孔は、トンネル掘削のための調査孔で、約 100m の深さがあり、トンネル湧水と一致している。トンネル北方のボーリング孔は、台地の麓から深さ 100m、700m に掘られたもので、同位体比は周辺よりも低い。また、台地よりも同位体比が低い沢水は標高が台地よりも高い東部でみられる。以上のことからトンネル湧水は台地周辺から供給された水で、東部に分布する標高の高い場所からの涵養水の影響はないことがわかる。なお、台地周辺で同位体比が高い水は、麓の井戸、池（蒸発で高くなった）などで、トンネル部よりも標高が低い水であり、トンネル湧水の起源がトンネルよりも高い場所の台地上の涵養水であることを支持している。

長期的な変化を調べるために、トンネル、簡易水道水源の湧水 S - 7, 8, 12, 13, 14 の同位体比の変化を図 7 に示す。多くの湧水は、-11 から -12‰でトンネル湧水とほぼ同じ同位体比を示しており、その傾向は、長期的に継続している。特に、S - 14 は一度完全に涸れたが、2005 年以降に染み出す程度の湧水の復活が見られ、その値は涸れる前と同じであった。したがって、トンネルおよびトンネル周辺の同位体比は掘削および掘削後の長期期間後も変化は見られない。

トリチウム
図 3 により切羽からのトリチウム濃度

はバラツキが大きく、一方、同じトンネル湧水でもトンネル全区間の湧水のトリチウム濃度は低く、この傾向は20年以上の現在でも継続し、0.6から1.0T.U.である。松本城山トンネルの東側10kmにある三才山トンネル(1972年着工、延長8500m)では、トリチウム濃度が4.17T.U.で地表の値と一致している。この地域のトリチウム濃度は地表水から類推して、掘削当時は、10から20T.U.あったが、現在の地表水は約4T.U.で、トリチウムの半減期は12.3年であるから、半減期分だけ地表水(降水)も減少している(現在4T.U.は1990年時点では約16T.U.、2012年時点では約8T.U.あった)。したがって、松本城山トンネルのトリチウム濃度が1.0T.U.以下であることから、少なくともトンネル掘削時よりも古い水(それ以前に涵養された)が排水されていることが判る。つまり、20年以上前の掘削時にすでに地下にあった水のみが排水されている。一方、付近にある三才山トンネルでは、ほぼ現在の水が、過去に涵養され半減期の変化に沿って古くなった水(この付近では1990年当時の降水のは10から20T.U.含まれていたと考えられるので、この水が涵養されれば、現在の地表の値と一致する、)が起源と考えられる。

一方、切羽のトリチウム濃度にバラつきがあったので、図8に切羽のトリチウム濃度、切羽位置、地表水の影響を見るために硝酸イオン、塩素イオン濃度を示す。トンネルの全長は2kmあり、西側からの距離が700mの付近にトリチウム濃度が地表付近と同等に高く、地表の生活排水に含まれる塩素、硝酸イオンも高いことから地表をつながっていると考えられる湧水が見られえた。その他にも400m、1200m付近にもトリチウム、塩素

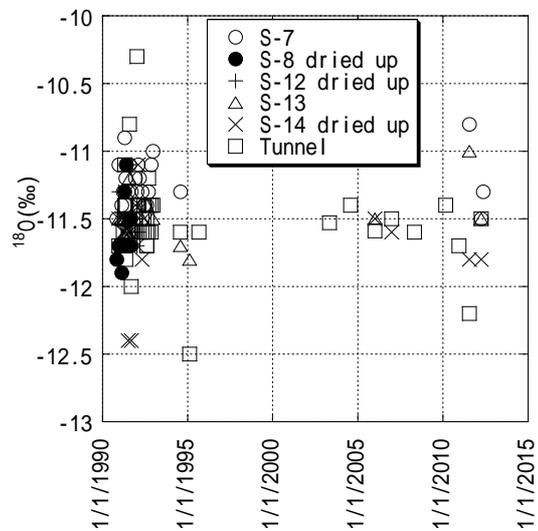


図7 酸素同位体比の経時変化

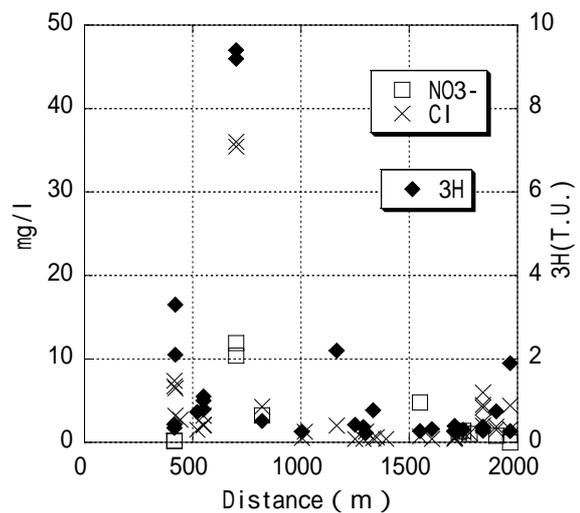


図8 切羽の塩素、硝酸イオン、トリチウム濃度

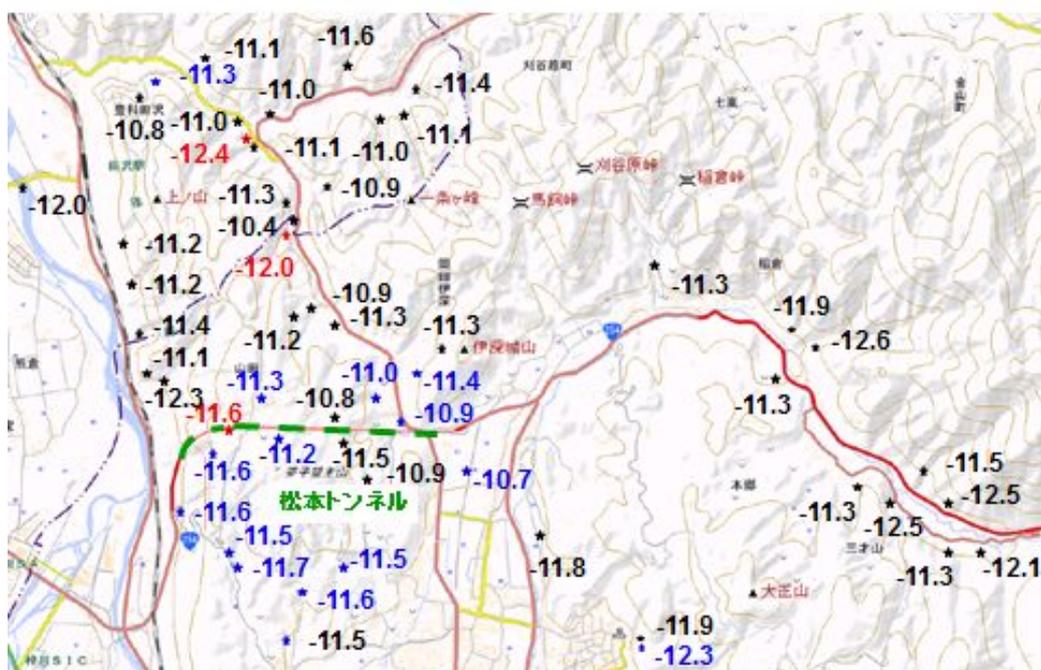


図6 酸素同位体比分布図

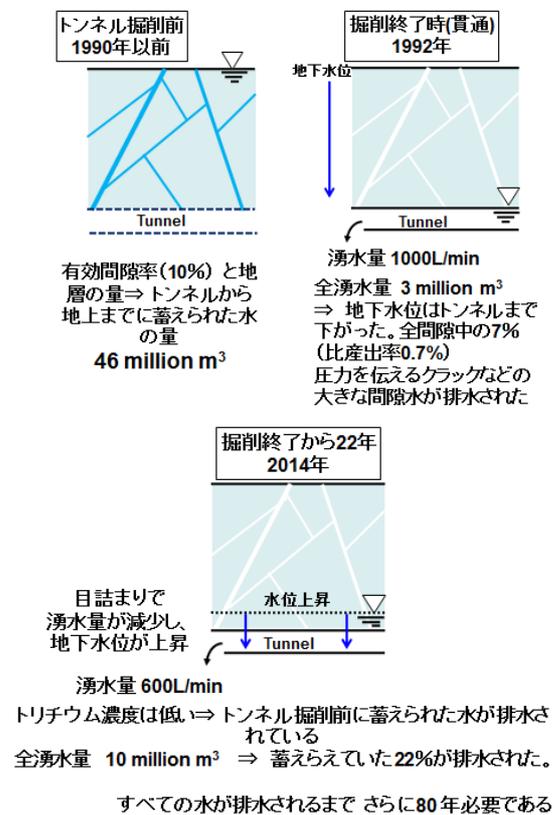


図 9 長期地下水排水による地下水流動のモデル

イオン濃度が高く、複数の箇所、地表付近の水が湧水として供給されていることが推定される。しかしながら、トンネル全区間の湧水のトリチウム濃度は、0.3 から 1.0T.U. で極めて低い。したがって、一部、地表部とつながっている場所もあるが、トンネル全体の湧水に対しての割合は小さく、24 年以上も変化していない。

水収支のまとめ

から までの結果から、図 9 にトンネル区間から地表部までの水の動きをモデル化した図を示す。

<トンネル掘削前から掘削終了まで>

1990 年以前のトンネル掘削前は、地下水は飽和状態にある。トンネルレベルから地表部までに貯蔵された水は有効間隙率を 10% とした場合に 46 百万 m³ である。有効間隙率は、供試体での実験結果、トリチウムをトレーサとした解析結果から推定された値である。1992 年の貫通時（トンネル掘削終了時）までに全湧水量は 3 百万 m³ に達した。その水量は全間隙中の 7%（比産出率 0.7%）しかない。したがって、一部の水が排水されることで、水位はトンネルレベルまで下がった。この割合は、掘削中に行ったトレーサ試験から推定された有効間隙率 0.47% にほぼ一致する。これらのことから、クラックなどの速く流すことができる間隙の割合が全間隙の 7% くらいで、その水が掘削中に排出されたと

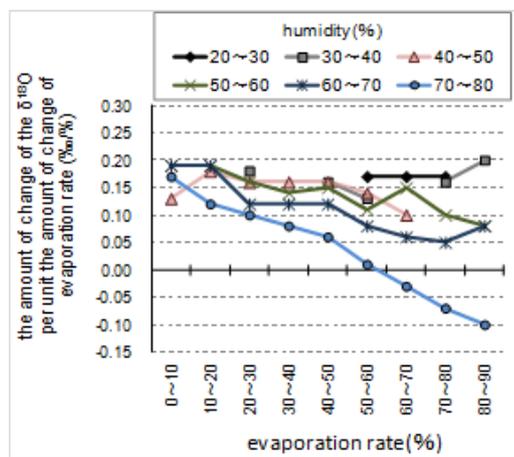


図 10 蒸発率と酸素同位体比変化

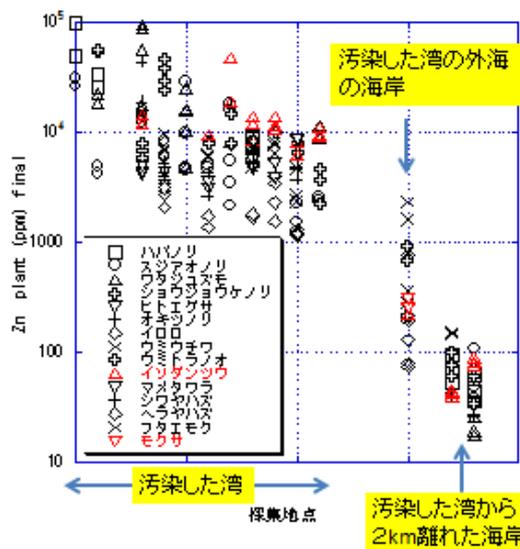


図 11 海藻中の重金属濃度

考えられる。このクラックの水は圧力を伝搬していたので、クラックの水が排水されると水位も下がったと解釈される。その時の湧水量は 1000l/min であった。

<貫通後の長期変化>

湧水量は次第に減少し、600l/min で安定している。その間に一部の水源地で湧水が回復した。したがって、目詰まりにより排水量が減少したことで、水位が上昇し一部の地点の水源地が回復したと考えられる。しかし、多くの涸れた水源地は回復していない。また、回復した水源地でも染み出す程度で、回復したかどうか判断が難しい。現時点で総排水量が 10 百万 m³ に達しているが、トリチウム濃度は低く、掘削以前にもともと地層に蓄えられた水が排出されている。その量は、蓄えられた水のまだ 22% で、今後 80 年以上経過しないと完全に排出されないことが示された。つまり、全間隙の水を排水するのに非常に長い時間がかかることが判った。

台地を構成する岩石は中新世の火山性堆積岩（火山砕屑物を含む泥岩、砂岩の互層）で、日本に多くみられる岩石である。したがって、この知見から堆積岩ではクラックに伴

う水の流れや圧力伝搬は速いが、クラック以外の粒子間の水の排水には時間がかかることが判った。この地層の透水係数は 10^{-5} から 10^{-3} cm/sec であり、一般的な値であり、クラック等の流れの速さと粒子間に貯まった水の入れ替わりにかかる速さとに非常に大きな差があることが分かった。これは、クラック等を通して広い範囲の汚染を広げることができる一方、汚染した水を入れ替えるのに非常に時間がかかることを示している。

(2) 関連研究の成果

図 - 10 に室内実験から求めた蒸発率と単位蒸発率当たりの同位体比の変化を示す。単位蒸発率当たりの同位体比の変化量が一定であれば、その同位体比の変化から蒸発率が判る。図 10 では湿度が低い場合は、この値が 0.15 から 0.2 であるが、湿度が高い場合は蒸発が進行するにつれて同位体比の変化が変化する。これは、室内実験のため、恒温室の気体の同位体比の影響を受けているものと考えられる。したがって、気体中の分子が少ない低湿度環境では同位体比の変化から蒸発率が推定できることが判った。

図 11 に鉛山湾および周辺の海藻中の重金属(亜鉛)濃度を示す。この湾では海藻の亜鉛濃度異常に高く、ほかの海岸との比較で亜鉛に耐性のある海藻が分布していることが判った。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計3件)

1) 宮原啓、井伊博行、Peter Dahlhaus: 酸素同位体比を利用した低湿度環境における表層水の蒸発率測定法の提案、査読有、2013、土木学会、水工学論文集、CDROM。

2) Satoshi Miyahara, Hiroyuki Ii, Peter Dahlhaus: Proposal of simple measurement method for evaporation rate by using oxygen isotopic ratio, International Journal of GEOMATE, 査読有、2012, Volume 3, No.1-2, 318-324

3) Hiroyuki Ii, Ataru Sato, Masanobu Taniguchi, et al.: Groundwater contamination due to Irrigation of treated sewage effluent in the Werrabee delta, International Journal of GEOMATE, 査読有、2012, Volume 3, No.1-2, 332-338

[学会発表](計10件)

1) Hiroyuki Ii: Cu Zn and As contamination of seaweed beside the Shizuki mine in Hagi city western Japan, Geomate 2014, 2014年11月確定、豪州。

2) Hiroyuki Ii, Hiroshi Kanabara, Yohei Kawabata: Importance of snow on ridge area as recharge water in heavy snowfall region,

Toyohira catchment in Hokkaido, north of Japan, International Association of Hydrogeologist, 2014年9月確定、モロッコ。

3) Hiroyuki Ii, Shota Kumano, Akio Nishida: Cu Zn and As pollution of river insect, plant and water along the metal mine tailing in Waidani area, Okayama prefecture, Japan, The 2014 International Conference of Marine and freshwater Environments, 2014年8月確定、カナダ。

4) Hiroyuki Ii: Heavy Fe and Zn contaminated seaweed in the Kanayama Bay in Kii peninsula central Japan, International Marine conservation Congress, 2014年8月確定、英国。

5) Hiroyuki Ii, et al.: Trace elements and main soluble substances for groundwater, river water and recycled water in the Werribee River, International Association of Hydrogeologist, 2013年9月16日、豪州。

6) Satoshi Miyahara, Hiroyuki Ii, Peter Dahlhaus: Proposal on measurement method for evaporation rate for surface water using oxygen isotope in dry and humid area, International Association of Hydrogeologist, 2013年9月19日、豪州。

7) Hiroyuki Ii: Characteristic of groundwater migration clarified by 21 years drainage process at the Matsumoto tunnel in the Central Japan, International Association of Hydrogeologist, 2012年9月21日、カナダ。

8) Hiroyuki Ii: Influence of Zn and Fe sulfide mine effluent water on sea life along seashore in the Kii Peninsula, Central Japan, International Association of Hydrogeologist, 2012年9月21日、カナダ。

9) Hiroyuki Ii: Influence of mine effluent with high concentration of Fe and Zn on sea life along seashore in the Kii Peninsula, 34th International Geological Congress, 2012年8月8日、豪州

10) 井伊博行: トンネル掘削による台地地下水の長期排水実験、地下水学会秋季大会、2011年10月21日、和歌山。

[図書](計2件)

1) 井伊博行(2011): 世界の水 世界の水環境 近畿建設協会 季刊誌

2) 井伊博行、分担執筆(2013): 全世界の河川辞典 丸善出版 1040

6. 研究組織

(1) 研究代表者

井伊 博行 (Hiroyuki Ii)

和歌山大学・システム工学部・教授

研究者番号: 60283959