

クウェートの原油による土壌・地下水汚染と松本城山 トンネルにおけるトレーサー試験について

井伊博行

Oil Contamination of Soil and Groundwater in Kuwait and Tracer Tests in the Matsumoto Jyoyama Tunnel

Hiroyuki Ii

Faculty of Systems Engineering,
Wakayama University

Abstract

In Kuwait, as a lot of crude oil flowed out on the desert area, soil was contaminated by crude oil. As the rate of infiltration was very slow, groundwater was not directly contaminated by crude oil. However when rain water infiltrated into the contaminated soil, groundwater could bring oil into the aquifer. Therefore, the concentration of hydrocarbon in groundwater increased.

The tracer test using chemical compositions and isotopes in groundwater is useful for determining the origin and recharge time. The tracer test injecting tracer solution into an aquifer is useful for determining parameters in the aquifer. Therefore tracer tests will be used for analyzing oil contamination of soil and groundwater in Kuwait.

Key words : Tracer, Kuwait, oil contamination, isotope, migration

1. はじめに

ここでは、1995年9月にクウェートの原油による土壌・地下水汚染の実態を調査してきたので、その報告を行う。現在、クウェートでは原油による土壌・地下水汚染が大きな問題となっている。湾岸戦争で、多くの油田設備が破壊され、多量の原油が砂漠地帯に流れ出し、原油の池を形成した。これは、オイルレイクと呼ばれ、原油が地下に浸透し、土壌や地下水が油で汚染した。土壌や地下水の汚染状況を把握するためには、地下水がどこから供給されてきたか(涵養域)、また、どのくらいの速度で移動しているかを知ることは重要である。ここでは、トレーサー試験による地下水の起源、涵養時間、パラメータの推定を行った実施例を紹介する。

2. クウェートの土壌・地下水汚染

クウェートはアラビア湾に面する面積が18000 km²の平坦な王国である。平均降水量が年125 mmの乾燥地

(土の砂漠が主体)で、川はなく、飲料水は海水と地下水から脱塩して供給されている。

1) 原油汚染

図-1にクウェートの原油汚染の分布を示す。オイルレイクの面積が49 km²、汚染土壌の体積が4000万 m³に達する。今回、調査した地域は、クウェート市の南にある埋蔵量世界第2位のブルガン油田である。この地域の表層堆積物は細粒の礫層から粗粒の砂層で、石膏などの鉱物によってセメントされている。表-1にブルガン油田のオイルレイク No. 105の周辺の3地点での採取深度ごとの含水率、透水係数を示す。含水率は非常に低く、深さ1.5 mでも3から8%である。透水試験は、現地を乱した状態で、日本に送り、現地と同じ乾燥密度(約1.8 g/cm³)に締め固めて行った。その結果、透水係数は 1×10^{-2} cm/sec から 1×10^{-1} cm/secであった。この土壌とブルガンの原油を用いて、原油の浸透試験を行った。試験条件は、室温で土壌の含水比0%、乾燥密度は現地と同じ1.8 g/cm³であった。図-2に代表的な試験

給してくれる重要な水源である。図-3に第1帯水層の水源地域の地形を示す (Sulaimi *et al.* (1993))。クウェートの降水は少ないものの、雨期の短時間に集中している。その時に雨水は、わじに沿って窪地にあつまり、透水性のよい礫層を通して地下に浸透する。このような地表水があつまる地形が、図-1に示すようにAl-

RaudhatainとUmm Al Aishの2カ所にみられる。ここでは、地下水面までの厚さが他の地域に比べて薄く(20m前後)、浸透した直後の水が得られるので、塩濃度が低い。しかし、図-1に示すように両地域周辺の土壌は原油で汚染されている。そのため、雨水は原油に汚染した土壌中を浸透し、原油をわずかに溶かしこんで地下水

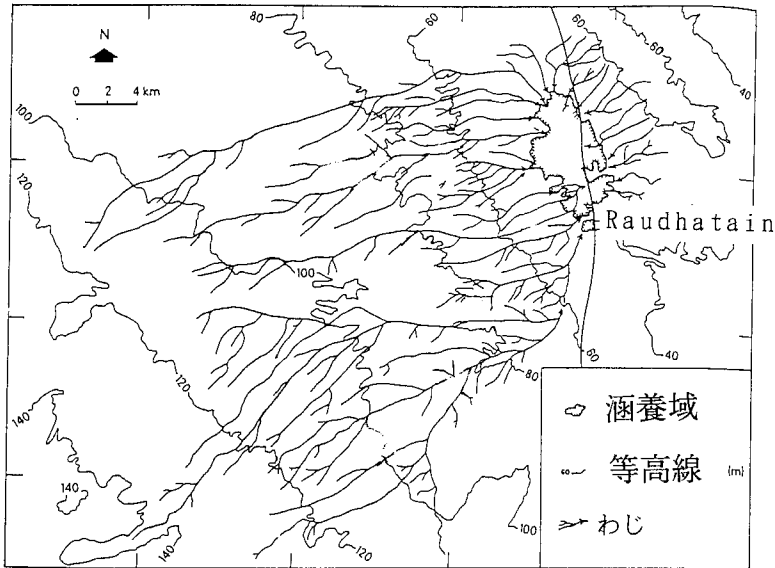


図-3 Al-Raudhatainの地形 (Sulaimi *et al.*, 1993)

Fig. 3 Topography in Al-Raudhatain (Sulaimi *et al.*, 1993)

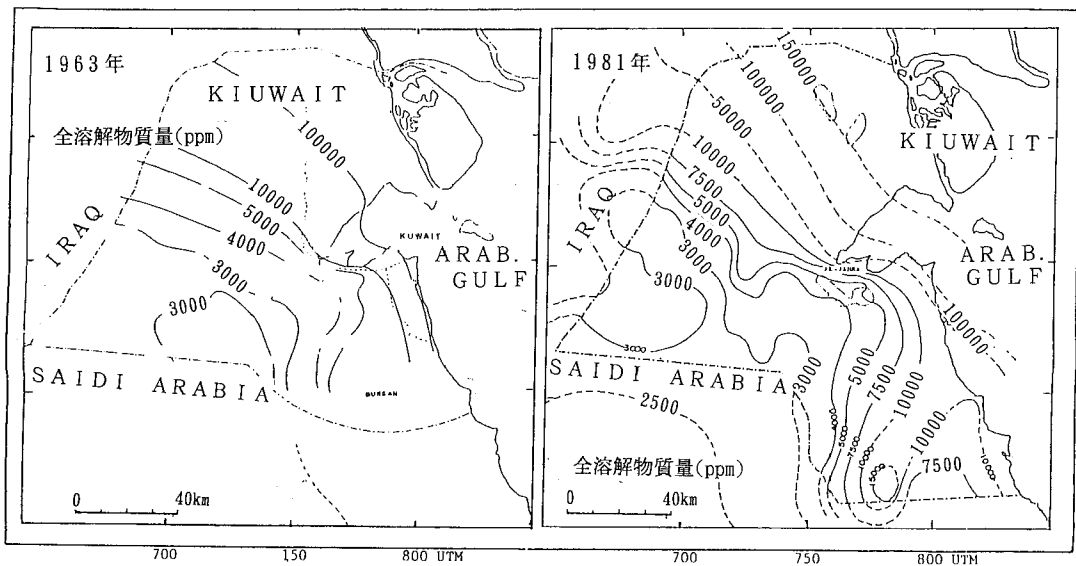


図-4 第3帯水層の1963年、1981年の全溶解物質量 (Siwek *et al.*, 1988)

Fig. 4 Total dissolved solid in the aquifer-3 in 1963 and 1981 (Siwek *et al.*, 1988)

面に達し、地下水が汚染されている。この汚染によって原油に多く含まれるバナジウム (最大 400 ppb), ニッケル (最大 100 ppb), 全炭化水素 (最大 200 ppb) が地下水中で増加した (Sulaimi *et al.* (1993))。

第2, 3帯水層 (Kuwait Group と Dammam Group) は 100 m 以深にあり, 汽水から海水よりも濃い塩水であり, 脱塩しないと使えないが, クウェート全域にみられる。図-4 のように第3帯水層の水の 1963年と1981年の全溶解物質質量 (Siwek *et al.* (1988)) をみると, 地下水の汲み上げが行われていない 1963年では, クウェートの南西部から北東部に向かって全溶解物質質量は大きくなっており, もともと地下水はこの方向で流れていると考えられる。また, 図-1 に示された Wafra (サウジアラビア

国境付近) での水の汲み上げにより, 1981年になるとその地域を中心に全溶解物質質量が異常に高くなっている。また, クウェート北部の全溶解物質質量が全体的に高くなっていることが判る。これは, 図-1 に示された Wafra や Al-Sulaibiya (クウェート市の近郊), Umm Gudair などの他の水源の汲み上げの影響と考えられる。

このように, クウェートでは第1帯水層の原油による地下水汚染, 第2, 3帯水層の地下水の汲み上げによる地下水の塩水化が問題になっている。これらの問題を解決するために, 次に, トレーサー試験を紹介する。

3. トレーサー試験 (井伊 (1993))

地下水の流速, 流向, 流量, 起源, 涵養時間, 地層の

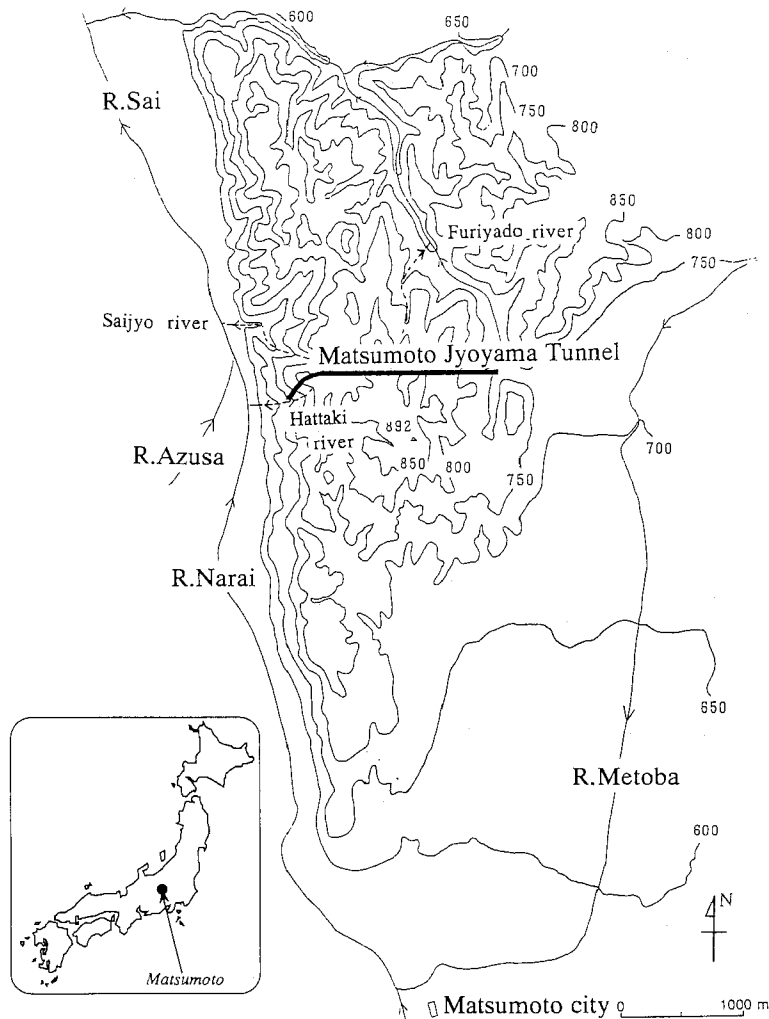


図-5 松本城山トンネル周辺の地形

Fig. 5 Topography surrounding the Matsumoto-Jyoyama tunnel

透水性に関するパラメータ（透水性，有効間隙率，分散係数）などを推定するために，種々の物質が地下水の流れを追跡するトレーサーとして利用されている。トレーサー手法としては，①追跡子法（人為的にトレーサー物質を地層に投入する方法）②水質法（地下水に溶存する天然物質を利用する方法）がある。

追跡子法は，希釈の効果によって適用範囲は狭く，最大でも数100mまでであるが，トレーサーの投入量や他の試験条件を制御できるため，目的のパラメータを推定しやすい。水質法は天然物質を使っているため，試験条件を人為的に制御できないので，必ずしも目的とするパラメータを推定できないが，広範囲（数km），長期間に渡って適用できるなどの利点がある。特に，地下水の年代や起源を調べるために同位体がよく使われる。

同位体とは，同じ元素でも重さが異なるものを言う。同位体元素は化学的現象には差はないが，重さが異なるため物理的な現象は少し異なる。一般に重い元素ほど蒸発しにくいので，海水の重水素の割合は河川や降水よりも高くなっている。また，地球規模で，降水の重水素の割合は変化し，赤道から高緯度に向かうほど重水素の割合は小さくなる。これは，一般に降水時の温度に比例し，同一地点では過去の温度の推定にも利用される。また，降水地点によって重水素の含まれる割合が異なることを利用して地下水の涵養域を推定する方法がある（Fritz

and Fontes (1983))。同位体元素には， ^3H のように自然に崩壊していく放射性同位体元素がある。 ^3H は半減期が約12年，核実験前は主に宇宙線によって大気中で生成されてきた。そのため，降水にはほぼ一定濃度の ^3H が含まれ，地下に浸透すると崩壊によって減少するので， ^3H の濃度から浸透時間を推定することができる。

4. 松本城山トンネルでの実施例

図-5に示すように松本城山トンネルは松本市の北方にある周囲を河川に囲まれた台地にあり，トンネル湧水の起源はすべて台地上の降水が起源である。台地は第3紀の堆積岩から構成され，トレーサー試験は施工中（1990年10月から1992年月11）のトンネルを用いて行った。

1) 水質からの地化学的考察 (Ii and Misawa (1994))

地中の水を採水する方法として，井戸やボーリング孔を用いる方法があるが，様々な深さの水が混合する可能性があり，ある深さの水のみを得るのに施工中のトンネル湧水を用いるのは有効である。このようにして採水した水から地下水の水質の進化を推定した。その結果が図-6に示されるように，台地上に降った水は地下に浸透し，台地深くへと浸透する。 ^3H の測定結果はトンネル内で採水した水の濃度が0.3から0.5 T.U.であるから，地

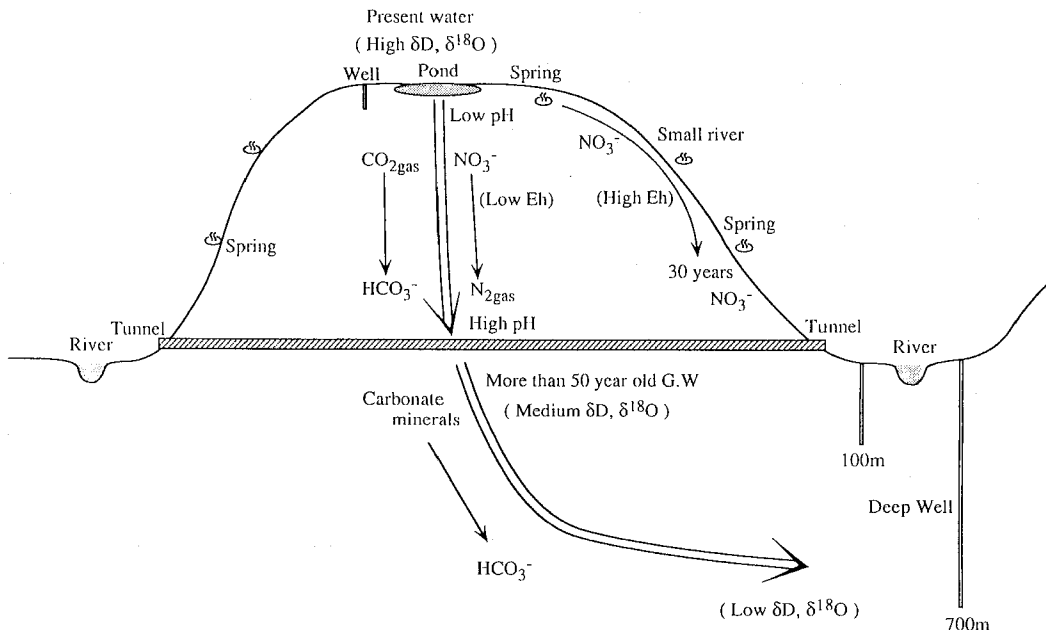


図-6 台地地下水の水質変化 (Ii and Misawa, 1994)

Fig. 6 Groundwater chemistry changes within the plateau (Ii and Misawa, 1994)

上から50年以上経過していることを示している(降水で約10 T.U.)。農薬や表層の有機物が分解して生成する硝酸イオンは地下に浸透するにつれて、還元環境になると微生物により分解される。この地域では、地下水の酸化還元電位 ORP が 200 mmV 以下になると、硝酸イオンが検出されなくなる。また、酸化状態でアンモニアから硝酸イオンが生成される際に H^+ が、還元状態で硝酸イオンが脱窒する際に OH^- が生成される (Yanagita (1990))。この地域の地下水の pH と硝酸イオンの関係は、pH が大きくなるにつれて、硝酸イオンが減少していく傾向がみられる。このようなことから、地下水が地中を流れている際に微生物により硝酸イオンの生成と分解が起きたことが示された。

一般に、炭素の同位体比 $\delta^{13}C$ ($^{13}C/^{12}C$) は陸上植物で小さく (-20‰)、炭酸塩鉱物は大きい (Nordstrom *et al.* (1985))。この地域の表層からトンネル部までの $\delta^{13}C$ は陸上植物の値 (-20‰) とほぼ一致する。しかし、台地の麓にある深井戸では、 $\delta^{13}C$ は大きく (-5‰) なっ

ている。

25°C の地下水の重炭酸イオン (HCO_3^-)、溶存している炭酸ガス圧 (PCO_2)、pH との関係は以下のように表される。

$$\log PCO_2 = \log [HCO_3^-] - pH + 7.8 \dots\dots\dots(2)$$

図-7 の地下水の溶存炭酸ガス圧は、(2) から求められる。この結果、溶存炭酸ガス圧は地表付近で大きく、トンネル部付近で小さく、さらに麓の深井戸で増加している。このようなことから、地表付近では、腐食土から供給された生物起源の $^{13}C/^{12}C$ が小さい炭酸ガスが地下水に溶け、地下に浸透するにつれて溶存炭酸ガスから重炭酸イオンに変化し、さらに浸透していく過程で鉱物から $^{13}C/^{12}C$ が大きい炭酸が地下水に供給されたと理解される。また、地表からトンネル内部までの溶存ガス圧の変化は、長石(岩石に含まれる)が風化で分解される際に、溶存炭酸ガスを消費して重炭酸イオンが生成されることから、風化が関与していると考えられる。

酸素、水素の同位体比 ($^{18}O/^{16}O$, $^2H/H$) は、古い水(地

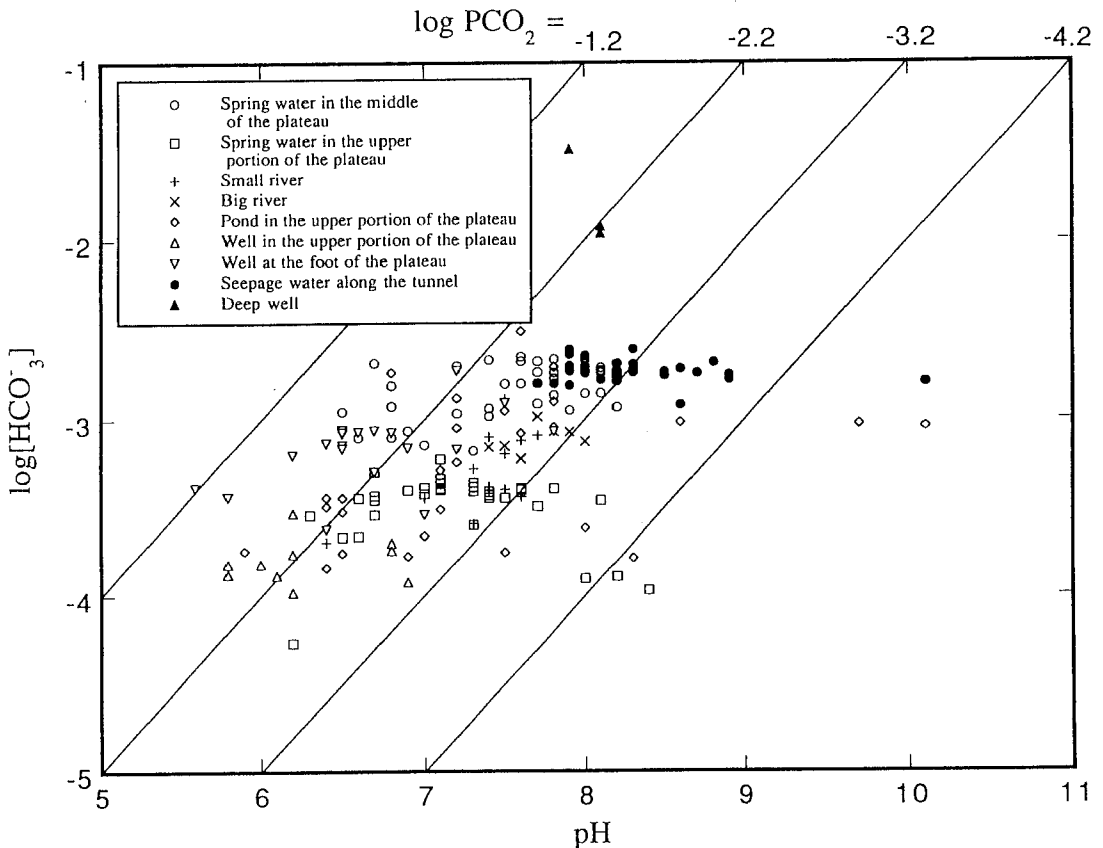


図-7 pH と $\log [HCO_3^-]$ の関係 (Ii and Misawa, 1994)

Fig. 7 Relationship between pH and $\log [HCO_3^-]$ (Ii and Misawa, 1994)

下深くなるほど)ほど小さく、この値を気温に換算すると、約1℃ほど気温が上昇したことを示し、過去数十年の気温の上昇と一致する (IAEA (1983))。

2) ³Hを用いたトレーサー試験 (Ii et al. (1996))

台地周辺の地下水の³Hの濃度分布を用いて、台地全体のパラメータを推定した。降水の³H濃度を10 T.U.と仮定し、これが時間と共に減少し、トンネル部で、0.3から0.5 T.U.になったと考え、地層のパラメータを変数にして、解析した結果と実測値が合うパラメータを推定した。解析は3次元FEMの物質移行解析コード (Kawamura (1987))を用いた。図-8に解析モデルを示す。

3次元の定常状態の地下水流の基礎方程式は以下のようである。

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \dots\dots\dots(3)$$

ϕ : ピエゾ水頭, x, y, z : 座標

3次元の移流拡散の基礎方程式は以下のようである。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (D \frac{\partial C}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (D \frac{\partial C}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (D \frac{\partial C}{\partial z}) - \frac{\partial}{\partial x} (V_x C) - \frac{\partial}{\partial y} (V_y C) - \frac{\partial}{\partial z} (V_z C) + \frac{F}{\epsilon} - \lambda C \dots\dots\dots(4)$$

$$V_x = vx/\epsilon, V_y = vy/\epsilon, V_z = Vz/\epsilon$$

$$D = \alpha |V|, V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2}$$

ϵ : 有効間隙率, C : 濃度, D : 分散係数, α : 分散長, F : フラックス, V_x, V_y, V_z : x, y, z 方向の実流速

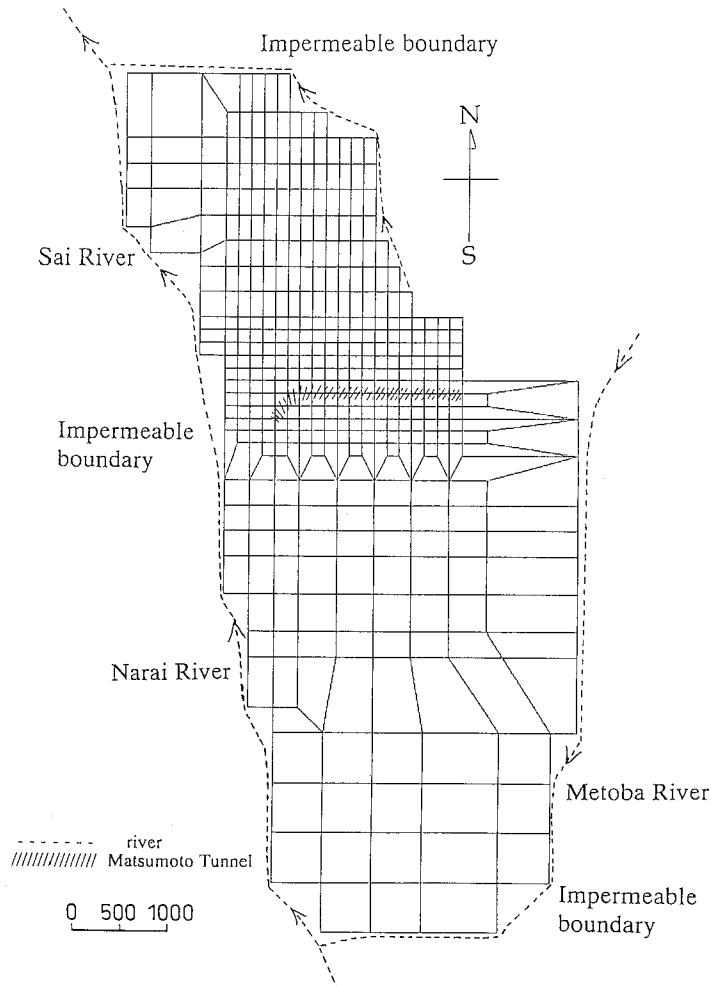


図-8 地下水流, 物質移行解析モデル

Fig. 8 Seepage and migration analysis model at the horizontal section

u_x, u_y, u_z : x, y, z 方向の見かけの流速, λ : 崩壊定数

図-9 に示す解析結果のようにトンネル部の ^3H 濃度が0.5T.U.になるような地層のパラメータは透水係数が $5.6 \times 10^{-6} \text{ cm/sec}$, 有効間隙率が10%, 分散長が1から100 mであった。地層の間隙率は供試体から約10%で, 有効間隙率と一致している。

4. 追跡子法によるトレーサー試験 (Ii *et al.*(1994), Ii(1995))

水質法では, 台地全体(数 km)の地層のパラメータを推定したが, 追跡子法では, 100 から 200 m の範囲のパラメータを推定した。特に, 掘削によるトンネル周囲の基盤がゆるんだ条件やトンネル湧水を強制的に排水した条件での水の流れを調べた。図-10 に示すようにトンネルの掘削は, 東西2方向から進められた。中央部には, 地上からの施工前に掘られた調査用のボーリング孔がある。ボーリング孔から西側の切羽が130 m, 東側の切羽が330 mの時に, ボーリング孔に臭化ナトリウム30 kgをトンネル湧水80lに溶かした溶液を注入した。この臭素イオンのトレーサーをトンネル湧水を採水し, 濃度を測定することで追跡した。図-11 は130 m離れた西側のトンネル切羽の湧水の濃度変化である。この濃度変化を

もちいて, ^3H を用いたトレーサー試験と同様に3次元FEMの物質移行解析コードを用いて解析を行い, ボーリング孔とトンネル部までの地層のパラメータを推定した。図-11の曲線が実測値と合う解析結果である。透水係数は, 広域の ^3H を用いた時に比べて大きい $2.4 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$ で, 実測値と一致し, トンネル掘削によって周辺の地盤がゆるみ, 水みちが開いたために透水係数が大きくなったと考えられる。また, 流速も広域の ^3H の $1 \times 10^{-5} \text{ cm/sec}$ に比べて非常に速い $1.8 \times 10^{-2} \text{ cm/sec}$ であった。これもゆるみと排水に伴う強制的な水流れが原因と考えられる。地層の間隙率, 広域の ^3H の有効間隙率も10%であるが, このように, 水の流れが速い場合は, 水みちの割合を示す有効間隙率は, 0.5%と小さくなっていた。これは, 開口したクラックを優先的に水が流れているためと考えられる。

5. まとめ

クウェートでは, 湾岸戦争によって多量の原油が流出し, 周辺の土壌を汚染した。また, 降水が汚染土壌中を浸透することによって, 帯水層も原油で汚染した。

国内において, 水質法, 追跡子法による研究によって地下水の流れが詳細に解明された事例を紹介した。水質

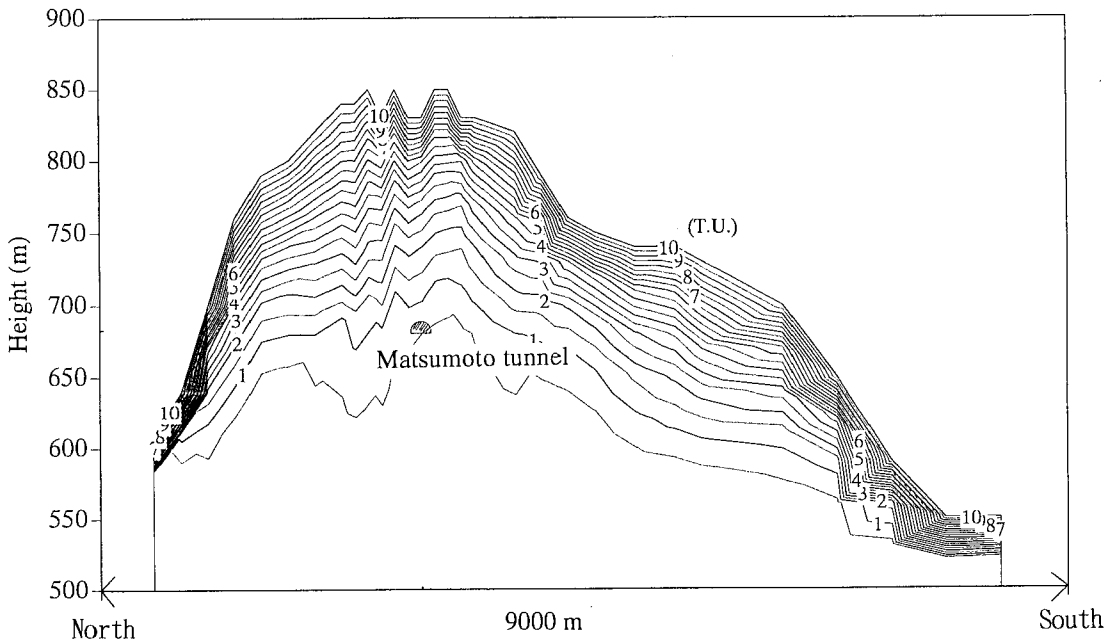


図-9 解析された ^3H 濃度分布 (南北断面図, 透水係数: $5.6 \times 10^{-6} \text{ cm/sec}$, 有効間隙率:10%, 分散長:12m, Ii *et al.*, 1996)

Fig. 9 Analyzed ^3H concentration distribution (sectional plan, hydraulic conductivity : $5.6 \times 10^{-6} \text{ cm/sec}$, effective porosity : 10%, longitudinal dispersivity : 12m, Ii *et al.*, 1996)

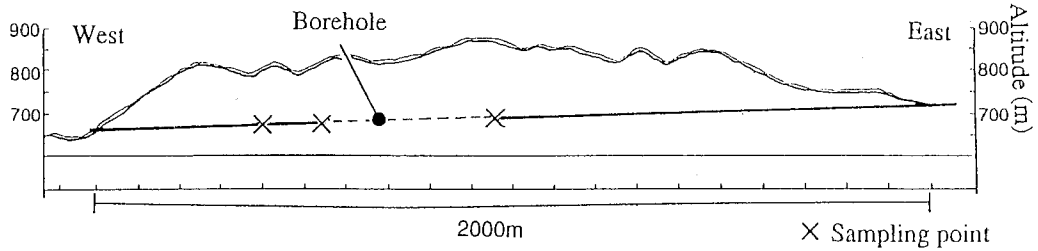
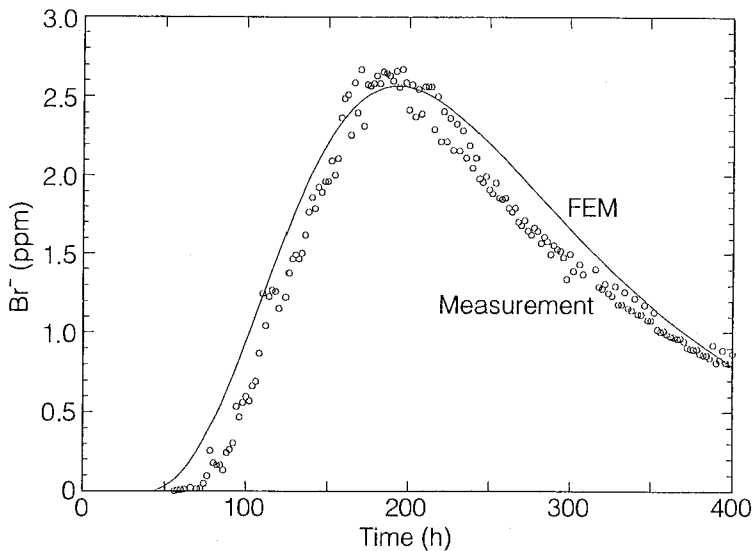


図-10 松本城山トンネル断面図

Fig. 10 Sectional plan at the Matsumoto-Jyoyama tunnel

図-11 トレーサーの濃度変化と3次元FEM解析結果 (透水係数: 2.4×10^{-3} cm/sec, 有効間隙率: 0.5%, 分散長: 12m, Ii, 1995)Fig. 11 Relationship between elapsed time and concentration of tracer. (hydraulic conductivity: 2.4×10^{-3} cm/sec, effective porosity: 0.5%, longitudinal dispersivity: 12m, Ii, 1995)

法では地下水の起源、涵養時間を、追跡子法では地層のパラメーターの推定に有効であった。クウェートでの同位体による研究は、Siwekら(1988)によると、第2, 3帯水層の酸素と水素の同位体比は2つの帯水層は混合し、炭素の同位体による年代測定結果は第3帯水層は40000年、第2帯水層は20000年前に涵養したことが示されている。しかしながら、測定地点、分析数が少なく、水質法による研究は十分でない。それ故、今後、追跡子法による地層のパラメーターの推定などを含めたトレーサー法を用いた原油の地下水汚染の解析は有効であると考えられる。特に、クウェート北部地域における原油による地下水汚染は、現在も進行中で、その汚染した地下水の浸透速度、汚染範囲などの解明にトレーサー試験が役立つ

と考えられる。

参考文献

- Al-Sulaimi, J., Viswanathan, M.N. and Szekely, F. (1993): Effects of oil pollution on fresh groundwater in Kuwait. *J. Environmental Geology*. **22** pp 246~256.
- Fritz, P. and Fontes, J.Ch. (1980): *Handbook of environmental isotope geochemistry*, 2. Elsevier.
- Ii, H. and Misawa, S. (1994): The groundwater chemistry within a plateau neighboring Matsumoto city, Japan. *J. Environmental Geology*. **24** pp 166~175.

- Ii, H. (1995) : Effective porosity and longitudinal dispersivity of sedimentary rocks determined by laboratory and field tracer tests. *J. Environmental Geology*. **25** pp 71~85.
- Ii, H., Ohtsuka, Y., Mori, N., Inagaki, T. and Misawa, S. (1996) : Effective porosity and specific yield of a sedimentary rock determined by a field tracing test using tritium as a tracer. *J. Environmental Geology*. **27** pp 170~177.
- 井伊博行 (1993) : 地下水脈の水の流れ. *沙漠研究* **3**. 163~168.
- International Atomic Energy Agency (1983) : Isotope techniques in the hydrogeological assessment of potential sites for the disposal of high-level radioactive waste. IAEA, Vienna : Technical Reports Series. No. 228, 151 pp.
- Kawamura, R. (1987) : Three - Dimensional Groundwater Flow and Advection Diffusion Code for Treating Decay Chain of Radioactive Materials by Finite Element Method. *J. Nuclear. Sci. Tech.* **24**. 11 : 937~950.
- 樫根 勇 (1980) : 自然地理学講座 3, 水文学, 大明堂.
- Nordstrom, D.K., Andrews, J.N. Carlsson, L., Pontes J. C., Fritz P., Moser H. and Olsson T. (1985) : Hydrogeological and hydrogeochemical investigations in boreholes - final report of the phase I geochemical investigations of the Stripa groundwaters. Stockholm Sweden : STRIPA Project TR 85~06.
- Siwek, Z., Hamdan, L. and Amer, A. (1988) : An overview of groundwater development in Kuwait. Kuwait Institute for Scientific Research, Kuwait. Report No. KISR 2931.
- Yanagita, T. (1990) : National microbial communities. Ecological and physiological features. Tokyo : Japan Scientific Societies Press and Springer-Verlag.

受稿日:平成8年2月1日
受理日:平成8年3月22日