# 統合型地圏水循環モデルによる水汚染解析

人間活動による水環境汚染(河川、湖沼、地下水汚染、土壌汚染)は、発展途上国のみならず先進諸国においても共通の大きな問題で、一般に継続的対策が必要なものです。

水の汚染物質はきわめて多様ですが、汚染のタイプは大きく以下のように分けられます。

## ①水溶性物質による河川・湖沼・地下水汚染

- ・自然由来の汚染(砒素を含む地下水利用による健康被害など)、工場、鉱山などからの酸性地下水、重金属イ オンなどによる汚染
- ・生活排水、農業・畜産等における肥料中の栄養塩による河川・湖沼の富栄養化
- ・沿岸部地下水利用による地下水塩水化
- ②非水相液体 (NAPL)による土壌・地下水汚染

水と混じりにくい液体は総称して非水相液体 (Non-Aqueous-Phase Liquids, NAPL)と呼ばれ、水より軽いもの (Light NAPL, LNAPL), 重いもの (Dense NAPL, DNAPL)に分けられます。

- ・軽いNAPL:石油系炭化水素である原油、灯油、ガソリン、重油など、ベンゼン、トルエンなどの有機溶剤
- ・重いNAPL:トリクロロエチレンなど有機塩素系溶剤(半導体の洗浄、ドライクリーニングなどに利用される)

### ③放射性物質による環境汚染

- ・2011年3月の東日本大震災時の福島第一原発から放出されたCs137を主とした広域放射能汚染
- ・放射性廃棄物地下処分における長寿命核種の地下水による移行

統合型地圏水循環シミュレーションシステムGETFLOWSは、上記の水汚染の時空間的な動態推定に利用できます。 解析により、汚染源の位置・量や汚染濃度分布の推定、浄化対策立案、長期的影響予測などの客観的情報を提供 します。ここでは、上記の汚染タイプの取り扱いと事例などを紹介します。

# ①水溶性物質による流域河川・地下水・湖沼汚染

#### GETFLOWSでの取り扱い

溶解物質(溶質)の濃度の変化を追跡するためには、基本的に①河川の流れ、②地下水の流れ、③流れにおける分散効果、④吸着・脱離、を扱います。希薄濃度の溶質の場合は、まず流れ場を解いて、多種の溶質の動きは それに乗った移動として分離して解くことができます。沿岸地下水利用時の塩水侵入のように濃度が高く密度差 のある場合には、流れ場と濃度を連成して解きます。

# 霞ケ浦流域における硝酸態窒素の 動態追跡

霞ケ浦は栄養塩の流入により 1970年代から富栄養化が進み、流 域における総合的な水質保全対策 が進められてきています。

図-1は霞ケ浦全流域を含む大域 モデルから、段階的に部分領域を 細かく離散化した局所精細モデル を示しています。

栄養塩は下水が放流されていた 河川から速やかに湖沼に到達した ものや、自然由来、周辺畜産や農 業によるものがあげられています。

解析によると、湖岸・湖底から 入り込む地下水は周辺からの栄養 塩を含み、それが供給され続ける ことで湖沼水の清浄化がおくれる 原因となっていることが明らかと なりました。

地上・地下を一体化した陸域水 循環システムの数理モデリングは, このような問題の解明に威力を発 揮します。



図-1. 霞ケ浦全流域から部分領域までの階層的モデリング1)





# ② NAPLによる土壌・地下水汚染対策

#### NAPLによる汚染プロセス

図-3の石油タンクからの汚染(軽いNAPL)、揮発性有機 化合物(重いNAPL)の汚染は揮発・溶解・吸着、地下水流 に乗った動き、分子拡散・機械的分散、更に微生物の影 響を考慮する必要があります。

軽いNAPLは地下水面に到達すると、その付近に浮かん だようになり、揮発しながら地下水によって移動します。 重いNAPLは地下水面より下方に移動し、低浸透率の地層 の上に溜まり、さらにそこを通り抜け下方に移動します。 水へわずかに溶解し長い間地下水を汚すことが考えられ ます。

このような汚染は、一般的に工場敷地内、貯蔵施設、 これらを利用する施設など比較的限定された範囲の汚染 (土壌汚染)になりますが、地下水の動きや側溝などを 通して汚染範囲が拡大することが考えられます。

#### GETFLOWSによるNAPL動態の追跡手法

GETFLOWSでは不飽和帯・飽和帯でのNAPL移動を気相・水相・NAPL相の3相系として定式化し、図2の現象をすべて反映した解析・評価を行うことができます。

また、浄化対策として、エアースパージング(空気を井 戸から注入し強制的に揮発させ浄化する方法)の効果を評 価することもできます。

図-4は工場地下の石油類の漏えいを模擬した解析結果 (溶存濃度分布)を表しています。

# ③ 放射性物質の動態追跡

#### 降下放射性物質の移動プロセス

地表付近の降下放射性セシウムについては次のようなプ ロセスを考える必要があります。

- ・樹葉・下草への付着と降水による洗い出し
- ・地表浅部土壌粒子への吸着・脱離

・降雨時の地表流が運ぶ土砂粒子に吸着して河川まで移動 し、河川水中に溶存したり、浮遊砂・掃流砂に吸着して運 搬される現象(図-5)

#### 地下深部の放射性物質移動プロセス

放射性物質の地下処分(浅・中深度処分、地層処分) においては、様々なシナリオの下で安全評価を行うこと が求められます。

- ・廃棄体容器の腐食・ガスの発生、人工バリア中の吸着 や拡散、天然バリア(周辺の岩盤)での地下水流れ
- に乗った移動中の吸着・脱離、分散、核種崩壊など。
- ・長期間における水文地質環境の変動に伴う 流れ場の変化
- ・水理場の不確実性による流動系の変化、他

図-6は福島第一から飛来・降下したCs137の地表から10cm までと、深度10cm-40cmまでの溶存態濃度分布を降雨浸透 や吸着を考慮して計算したものです。一般に、地下の極 めて浅い部分でCs137が捉えられ地下深くまで浸透しにく かったことが計測からも知られています。



図-3. 軽いNAPLと重いNAPLの浸透の概念図<sup>2)</sup>



図-4. 工場地下のNAPL汚染の広がりの計算例









#### 出典:

1) Koji Mori, Yasuhiro Tawara, Aurelien Hazart, Kazuhiro Tada and Hiroyuki Tosaka, 2015. Simulating nitrogen long-term fate and transport processes at a regional scale with a surface and subsurface fully-coupled watershed model, the 21st International Congress on Modelling and Simulation (MODSIM2015) 2) 新六精機株式会社HP(shinrokuseiki.co.jp)より引用

3)IAEA/UNESCO Technical Meeting on Groundwater Contamination following the Fukushima Nuclear Accident, 2014. Multi-scale watershed modeling for Fukushima-derived radionuclide redistribution, Technical meeting on surface water and groundwater contamination following the acident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant (F3-TM-49278) 8-10 September 2014 (M0E27), IAEA Headquarters, Vienna, 8-10 September 2014, Available at: http://www-naweb.iaea.org/napc/ih/documents/FDNPP%20presentations/14Mori.pdf (accessed 11/1/2016)

お問合せ:企画営業部(奥村、峯岸) 03-5297-3811 ホームページ:http://www.getc.co.jp

💽 株式会社 地圏環境テクノロジー

Geosphere Environmental Technology Corp.