

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。

霞ヶ浦流域における硝酸態窒素の動態追跡

霞ヶ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は霞ヶ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。

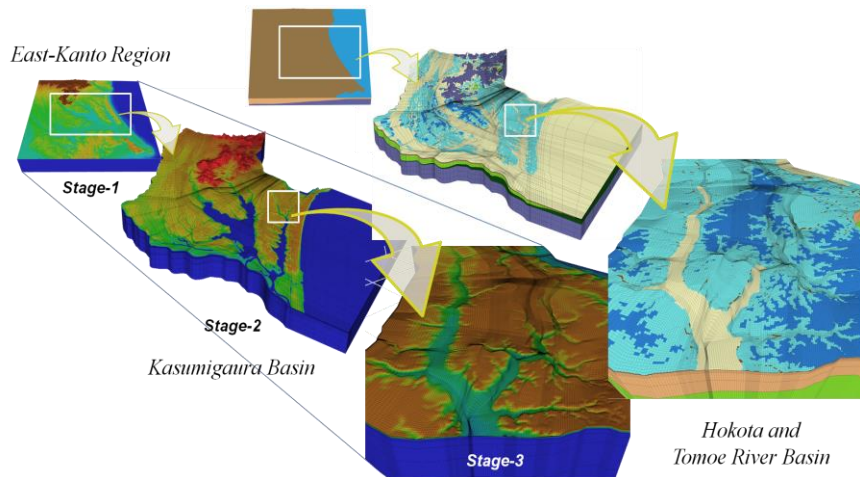


図-1. 霞ヶ浦全流域から部分領域までの階層的モデリング¹⁾

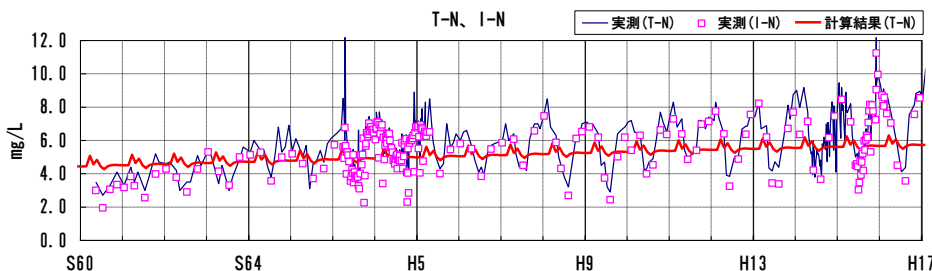


図-2. 観測値と解析値の比較（全窒素T-N、無機態窒素I-N）¹⁾

裏面に続く

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。

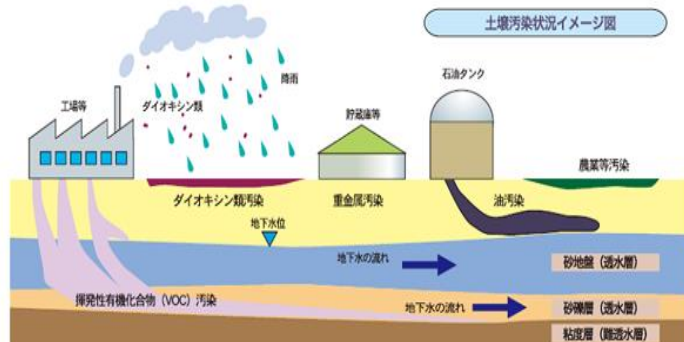


図-3. 軽いNAPLと重いNAPLの浸透の概念図²⁾

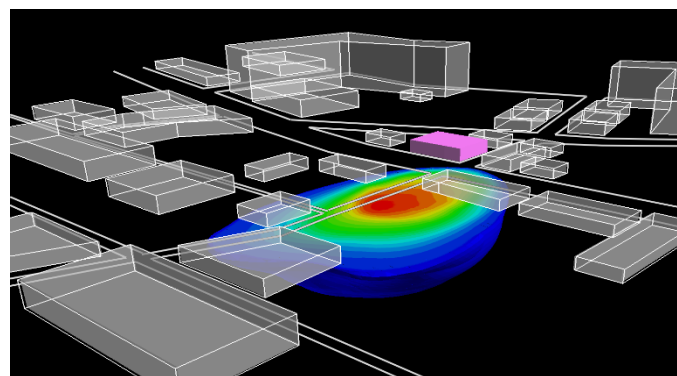


図-4. 工場地下のNAPL汚染の広がり計算例

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。

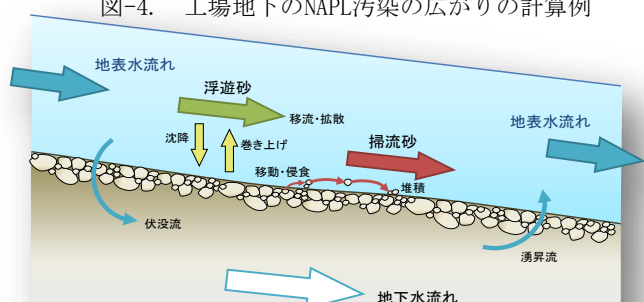


図-5 地表に降下した放射性物質は固相に吸着されたり、水中に溶存して運ばれる

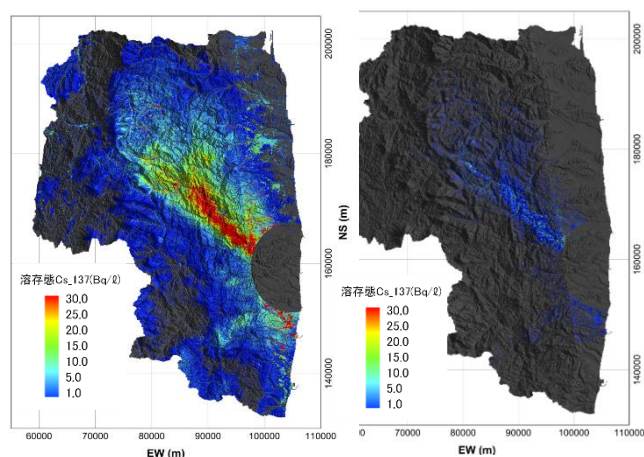


図-6. 地表に降下したCs-137溶存態濃度の深度分布の解析結果²⁾ (円形の中心付近に福島第一原発)、3)を改変)

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 accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant (F3-TM-49278) 8-10 September 2014 (MOE27), 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