

ノート

土木分野における地質・土壌汚染3次元モデルの取り組みと事例

The attempts and case studies of three-dimensional geological and soil contamination models in the civil engineering field

川浪聖志* 林 義隆* 太田英将*

Seishi Kawanami*, Yoshitaka Hayashi* and Hidemasa Ohta*

2017年9月11日受付.

2018年8月18日受理.

* 有限会社太田ジオリサーチ

Present address: Ohta Geo-Research Co., Ltd. Nishinomiya, Hyogo 651-1432, Japan

Corresponding author: S. Kawanami, kawanami@ohta-geo.co.jp

Abstract: In this paper, we introduce a method for visualizing three-dimensional (3D) models of civil engineering field cases, including the geological structures and hydrology at a large-scale landslide site and contamination modeling at the Fukushima nuclear power plant. In addition, we introduce a 3D model of benzene in contaminated soil at the new Toyosu market using a geostatistical method. These 3D models can be used to improve survey accuracy and develop remediation techniques. The models can also be used for more effective information sharing between stakeholders.

Keywords: three-dimensional model, geostatistics, geological structure, soil contamination, EVS

はじめに

昨今、国土交通省では、調査、設計、施工、維持管理の各段階で3次元モデルを活用し、一連の建設生産システムの業務効率化や高度化を図るCIM(Construction Information Modeling/Management)の取り組みが進められている。しかしながら、地盤調査の情報は、情報伝達技術が発展した現在でも2次元情報が主流となっており、地盤情報の3次元化が広く普及しているとは言い難い。元来3次元の広がりを持つ地質構造や土壌汚染などの地盤情報は、3次元で関係性を整理し、解析することが適切であると考えられる。本論では、著者らによる土木分野での3次元可視化への取り組みについて具体例を交えて紹介し、3次元可視化が斜面防災、土木工事、土壌汚染といった多岐にわたる分野において諸問題の本質を理解する上で有効であることを示す。なお、本論で紹介する3次元モデルは、C tech社のEarth Volumetric Studio(以下: EVS)を用いて作成した。

3次元可視化の取り組みと具体事例の紹介

著者らが土木建設業界において調査・設計に従事する中で3次元可視化に取り組むことになった背景には以下の2つの課題がある。

課題1. 露頭の少ない現場で、複雑な地質構成をボーリング調査情報から層序的な矛盾なく組み立てること。

課題2. 組み立てた地質モデルを、設計施工に反映させるため、設計技術者にも理解しやすい調査データに加工して伝達すること。

著者らは、これらの課題を解決するためのツールとして3次元可視化ソフトウェア(以下: ソフトウェア)を導入し、様々な事象について3次元モデルを作成し業務に活用してきた。以下にその概要・経緯について具体事例を交えて紹介する。

1. ソフトウェアの導入

著者らがソフトウェアの導入を検討した1990年代は、地下資源の開発を目的としたソフトウェアが既に開発されていたが高価であった。一方、比較的入手しやすい価格帯のソフトウェアは2次元地質断面図を補間し、3次元的に表示するもの(以下; 2次元補間法)が主流であった。この方法では、①3次元モデルを構築する前に必ず断面図を作成する必要があること、②断面図を補間し、3次元表示する段階でようやく層序的な矛盾に気が付くこと、③新しい柱状図が得られる度に、断面図を修正し、3次元モデルを再作成する必要があること、といった作業効率上の問題があった。そこで、著者らは3次元補間で、かつ300万円以下のソフトウェアを目安として情報を収集し、比較検討した。ソフトウェアの比較検討の結果、C tech社のソフトウェアであるEVSを選定した。同ソフトウェアを選定した理由は以下のとおりである。

①地質柱状図から層序を作成し、複数の柱状図を直接3次元的に補間できること。

②岩盤分類などの物理的性質と地質学的性状を兼ね備えた土木地質学的概念である岩盤等級のような離散値も同時に補間できること。

③空間的な広がりを持つ様々な物理化学データ群の3次元可視化に対応していること。

④モデルの視覚的理解を助けるためにCADやGISなどの地図データや航空写真などを背景画像として利用できること。

⑤汚染物質濃度等の3次元空間分布を時系列に沿って表現することもでき、空間情報に時間軸をプラスした4次元的な事象の取り扱いが可能であること。

⑥3次元補間結果をテキストファイルとして保存し、数値解析に利用でき、解析結果を再び3次元および時系列変

3次元化として表現できること。

⑦試験導入費が170万円程度であり、また商用に用いるために機能を拡張しても300万円程度までの費用で済むこと。

なお、同ソフトウェアを選定した最も大きな決め手は、2次元補間法のソフトウェアと違い、ある地点における地層境界といった多数の1次元情報を、2次元化を介さずに直接3次元モデルとして構築できることであった。このソフトウェアの導入により、新しく得られる地盤情報を追加・反映しながら複雑な地質構成を層序的に矛盾なく3次元モデル化することが可能となった。

2. EVSにおける3次元可視化手法

3次元可視化における補間手法は、データ取得箇所の3次元位置情報に基づいたクリギング法を用い、地質データはセルデータとして、汚染物質などの物理データはノードデータとして、岩盤区分などの離散値はボクセルデータとして取扱っている。アルゴリズムは、Deutsch and Journel (1998)、Clark (1979)ならびにEnglund and Sparks (1988)を基礎として改良・構築されている。EVSにおける3次元補間手法等の詳細については、Reed (2015)を参照されたい。以下、各3次元モデルの作成手法等の概略を述べる。

1) 3次元地質モデル 各地層境界面の標高をクリギングによって求め、地層累重の法則に沿って地層境界に優先順位をつけることにより、地層の上下関係、欠損(削剥・レンズ状分布)を反映した3次元地質モデルを作成する。なお、EVSでは、計測値を正確にモデルへ適用するためメッシュ区分に加えて、計測箇所にメッシュ交点を自動で作成する機能(adaptive gridding)を使用している。

2) 物理化学情報の3次元モデル 汚染物質濃度や騒音・振動、N値、土質試験結果、物理探査結果などの計測値と計測地点の3次元座標をもとに、計測値の空間的な分布をクリギングにより3次元補間し、モデルを作成する。汚染物質濃度は、地質情報との関連性が深く、例えば、沖積平野の土壤汚染を対象とする場合、砂層、粘土層等の地層ごとに汚染量についての情報を整理する必要が生じる。そこで、土壤汚染3次元モデルでは、3次元化した各地層と汚染濃度を関連付けて表示する地盤情報の統合化機能を使用している。

3) 推定データの信頼性に関する指標「不確実性」について クリギングにより補間した任意地点における計算結果の確実度の低さを数値化したものを「uncertainty (以下: 不確実性)」と定義する。例えば、ある任意地点の計算結果が高濃度で、かつ実際の計測点からの距離が遠い場合、その任意地点の不確実性の数値は高くなる(Reed, 2015)。

3. 複雑な地質・水文構造等の3次元可視化への取り組み

本節では、2000年代に行った大規模地すべりの地質解析、水文地質的課題の解決に活用した事例を紹介する。

1) 地質層序構成について 本節で紹介する地すべり地は、幅約1 km長さ約1.1 km、最大深さ70 mの岩盤地すべりであり、昭和30年代から地すべり対策事業を展開し、400本以上の調査ボーリング及び多くの貴重な調査資料が残っていた。しかし、現地には露岩が少なく、模式的な層序構成を技術者

が現地で確認することが出来なかった。また、当該地すべり地は新第三紀の火山岩および火山砕屑物から構成され、地質構造が複雑であった。このため、コア鑑定者によって地質学的な解釈が異なり、層序学的な整理がなされておらず、詳細な地すべり防止対策・工事計画や維持管理に地質学的な情報を利用しにくいという面が徐々に意識されるようになった。

これらの条件を整理し、層序構成を検討するツールとして、ソフトウェアを活用した。現地は傾斜地でかつ、火山岩地帯であるため、岩相および標高や深度表示、古地形を推定して、地層の対比を行う作業が必要であった。この作業を2次元補間法のように断面図をメッシュ状に配置して3次元モデルにする場合、断面間の層序的矛盾を修正する作業が常に生じ、多大な時間と労力が必要であったが、クリギングによる3次元補間を行うことにより視覚的な層序検討が3次元的に可能となり、矛盾のない層序と地質構造把握におけるメリットは多大なものであった(Fig. 1)¹⁾。

2) 水文地質構造 排水トンネル内から集水ボーリングを行い、地すべり土塊に賦存し、すべり面に対し間隙水圧として作用する地下水を排除する計画には、Fig. 2²⁾に示すような3次元モデルを用いた。すなわち、地すべりの排水トンネル周辺の地質状況をトンネル中心から等距離の断面で表示することにより、集水ボーリングが確実に地すべり土塊(Fig. 2の内、排水トンネルに沿った円筒形断面図の白色～淡灰色部分)に到達する箇所を明らかにした(林ほか, 2005)。この情報を元に、集水ボーリングの追加工事箇所や、ボーリング工の洗浄作業等メンテナンスの優先順位付けを計画することができた。

4. 社会問題に関する3次元モデル活用の試み

2010年代には3次元モデル化をさらに推し進め、福島原発事故、豊洲問題などについて、3次元的手法と時間軸を組み合わせた検討などを行い、分野の異なる専門家や技術者、一般市民にも問題の本質が理解できるようなモデル作りを目指した。本節では、福島第一原発の事例を紹介する。Fig. 3は、放射性物質トリチウム濃度(Bq/L)の分布状況の3次元モデルである。同図より建屋周辺の陸上・地中・取水口付近のシルトフェンス等で隔離された水域・港湾汚染における汚染状況の概要を視覚的・直観的に理解することができる。このように3次元モデルは、広範な対策分野の利害関係者の理解を深めることに寄与するものといえる。また、その一方で、モデルの妥当さに対する検証も必要であり、著者らは不確実性を用いて検討した。Fig. 4に福島第一原発のトリチウムの分布状況に対するモデルの不確実性の例を示す。モデル表面の色相が不確実性の度合いを表現しており、青色からオレンジ色になるにつれて不確実性が高い領域を示している。不確実性を表現することで、調査が不足し信頼性が低い領域を示すことができ、追加調査の必要性を説明することもできる。

土壤汚染3次元モデルの事例

土壤汚染3次元モデルの事例として豊洲新市場における

¹⁾ <https://sketchfab.com/models/cde2f365c238430a8a528616441acd8c>

²⁾ <https://sketchfab.com/models/7b7fa17738114d62ab8076c6f89aa4be>

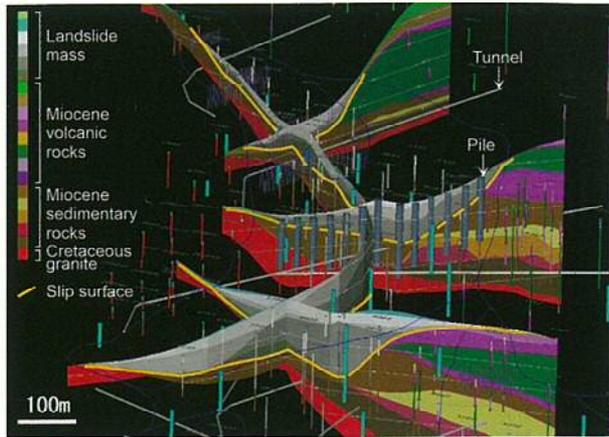


Fig. 1. 3D geological sections, determined using geostatistics (Hayashi, 2004), depicting 22 geologic layers, 590 boreholes, and landslide remediation methods (i.e., piles and tunnels).

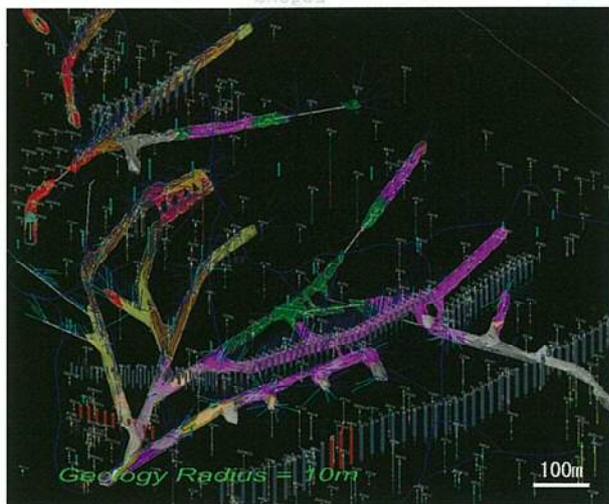


Fig. 2. 3D circular geological sections of drainage tunnels (radii of 10 m; Hayashi et al., 2005). These sections indicate the most effective plan for draining the aquifer (gray strata). Geological engineering can design the most effective length, direction, and drilling point for the drainage tunnels.

ベンゼンの土壌汚染プルームモデルを紹介する。豊洲新市場における土壌汚染に関する調査結果(調査地点、地質構造、深度方向の有害物質濃度などのデータ)は、すべて東京都中央卸売市場のホームページ上に公開[URL1]されており、本節で紹介する3次元モデルはこれらの公開データを用いて作成した。

1. 汚染プルームの分布と対策区画の比較

通常、土壌汚染対策法施行規則では、調査範囲を10m区画を最小単位として、1地点/10m区画の頻度で土壌汚染調査を行い全体の汚染の分布を把握・管理する。しかしながら、実際の汚染分布は、10m区画で区切られるものではなく、地表部から鉛直・水平方向あるいは両者の合成ベクトル方向へ3次元的な広がりをもって分布する。そこで、著者らは豊洲新市場における対策前のベンゼンの汚染プルーム

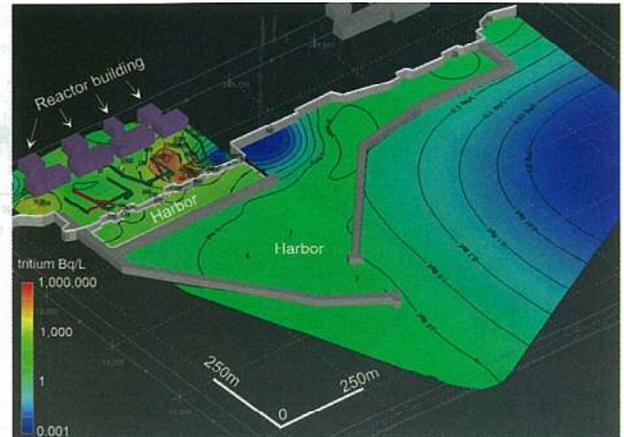


Fig. 3. 3D model showing the distribution of tritium at the Fukushima nuclear disaster site (Reed and Hayashi, 2013). Data sourced from the Nuclear Regulation Authority (NRA, 2013). The maximum tritium concentration is approximately 100,000 Bq/L (shown in pale red).

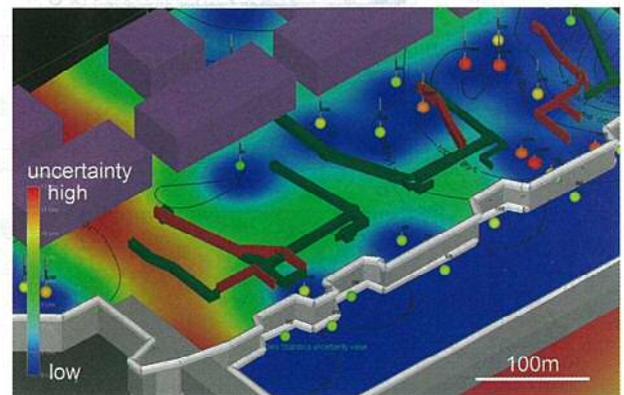


Fig. 4. Example of geostatistical uncertainty values at the Fukushima nuclear disaster site (Reed and Hayashi, 2013). Shading shows uncertainty of predicted radiation at the site, and colored spheres show the magnitude of radiation measurements. Uncertainty is high where concentrations are predicted to be relatively high, but the confidence in the predictions is low.

(以下：汚染プルーム)を推定、3次元可視化し、現行の対策区画と汚染プルームの広がりと比較した。

Fig. 5には、推定される汚染プルームに豊洲新市場の主要な建屋と地下空間を重ねた。汚染プルームの3次元モデルの俯瞰図(Fig. 5a, b)および南東方向から見たモデルの側面図(Fig. 5c)によれば、東京都が実施した封じ込めや土壌入れ替え、掘削除去等の土壌汚染対策前の汚染プルームは、主に6街区の水産仲卸売場棟の西側とその周辺および5街区の青果棟の西側と建屋部分の東～北側に分布しており、また側面図をみると、汚染プルームの大部分が建屋の地下空間の下端深度であるA.P.(荒川工事基準面)+2.0m以深に広がっていたことが分かる。豊洲新市場を真上から見た汚染プルームの広がりをFig. 5dに示す。同図には土壌の浄化が完了した区画(以下：対策区画)を重ねた。対策区画は、ベンゼン以外の特定有害物質も対象としているためベンゼンによる

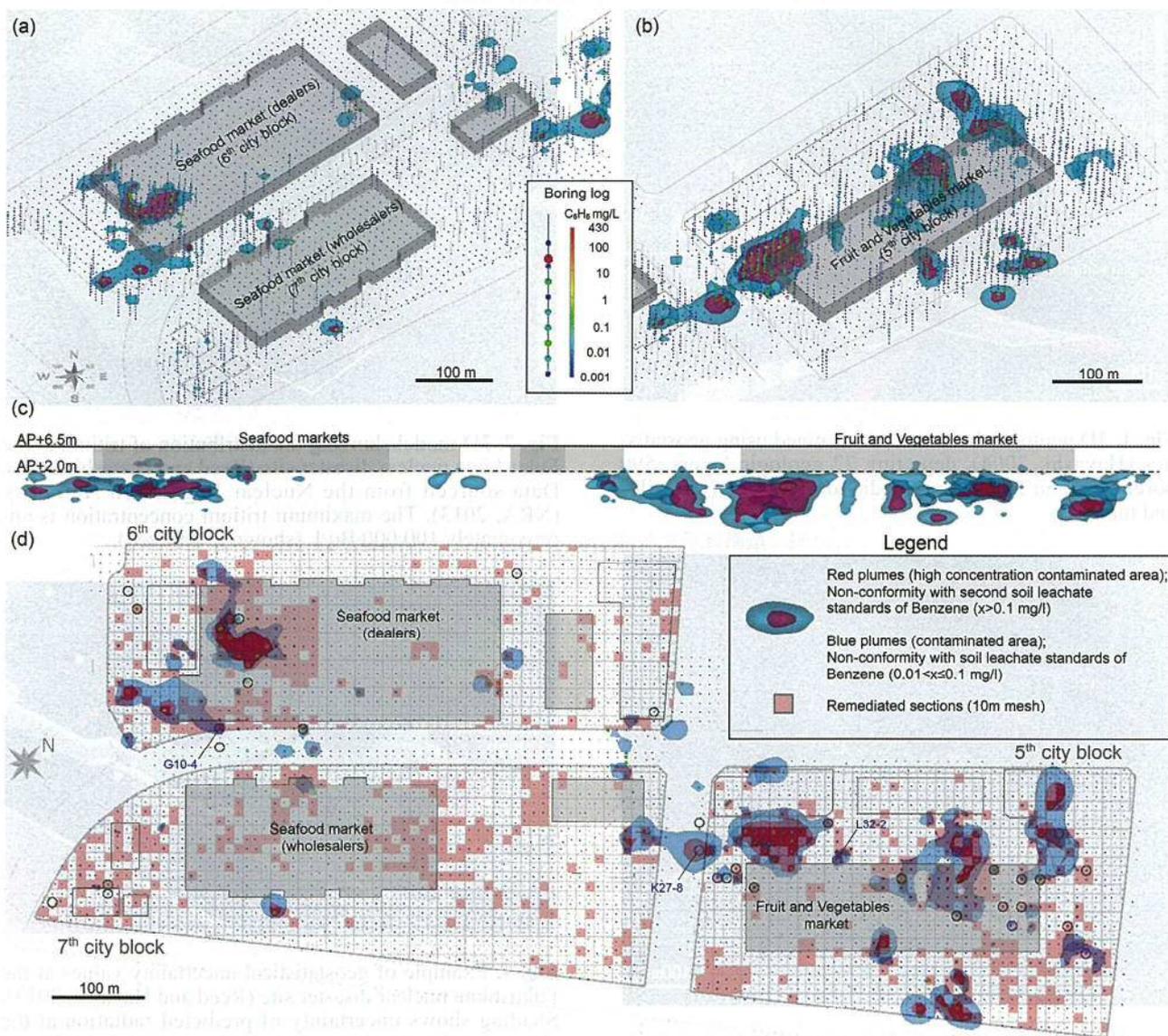


Fig. 5. Distribution maps of benzene-contaminated plumes before remediation at the new Toyosu market: (a) Aerial view of the 6th and 7th city blocks; (b) Aerial view of the 5th city block; (c) Lateral view from the southeast; (d) Plan view of the whole study area. Blue circles show where groundwater concentration conforms to the relevant standards, but the soil leachate benzene does not conform to the standards. Black circles indicate sites where benzene was detected during the top-soil investigation.

汚染プルームの分布とは必ずしも一致していないが、対策区画と汚染プルームの分布に着目すると、第二溶出量基準(土壌溶出量基準の3倍から30倍の溶出量をもって定められている基準で、汚染の除去等の措置を実施する際に、措置の適用可否を判断する上での指標となっている)に適合しない高濃度汚染プルーム(Fig. 5: 赤色プルーム)の大部分は除去されているが、土壌溶出量基準に適合しない汚染プルーム(Fig. 5: 青色プルーム)は対策区画外にも広がっている可能性があることが分かる。

豊洲新市場における東京都による土壌汚染調査では、表層土壌および地下水が環境基準に適合した区画は土壌汚染が存在しない範囲であると判断し、深度方向の土壌分析は実施していない(以下: 未分析区画)。そこで、未分析区画において、汚染が残存する可能性について検討するために、表層土

壌調査でベンゼンの土壌溶出量基準に適合しなかった35地点について、地下水ベンゼン濃度と土壌溶出量の関係について比較した。その結果、35地点の内7地点においてベンゼンの地下水濃度が基準に適合するものの、地下水位以深の土壌において溶出量基準に適合しない深度が認められた(Table 1)。特にK27-8, L32-2ならびにG10-4地点では、第二溶出量基準に適合しない深度が見られ、また連続的に深度方向に基準に適合しないにも関わらず、地下水からベンゼンは検出されていない。このような分析結果の存在を踏まえると、表層土壌および地下水で基準に適合していても、必ずしも深度方向の土壌が基準に適合していると言い難く、未分析区画においても土壌溶出量基準に適合しない土壌が残存する可能性は否定できない。

また、東京都が実施した第9回地下水モニタリングの分

Table 1. List of groundwater concentrations and soil leachate benzene measurements.

Point	Groundwater survey					Boring survey		Point	Groundwater survey					Boring survey	
	Strainer zone (A.P. m)		Ground-water level (A.P. m)	Sampling depth (A.P. m)	Benzene concentration (mg/l)	Soil sampling depth (A.P. m)	Benzene soil leachate (mg/l)		Strainer zone (A.P. m)		Ground-water level (A.P. m)	Sampling depth (A.P. m)	Benzene concentration (mg/l)	Soil sampling depth (A.P. m)	Benzene soil leachate (mg/l)
	upper	bottom							upper	bottom					
K27-8*	3.64	-2.19	4.32	0.6	n.d.	4.31	0.043	N38-6*	4.12	-0.88	4.11	1.6	0.004	3.92	n.d.
						2.41	0.063							3.12	0.035
						2.01	0.041							1.92	0.046
						1.01	0.099							0.92	0.002
						0.01	0.014							-0.08	n.d.
						-0.99	0.12							-1.08	n.d.
K36-9*	4.31	-1.19	4.80	1.6	0.003	4.91	n.d.	O41-5*	4.31	-1.20	4.90	1.6	n.d.	3.51	n.d.
						3.41	0.013							2.81	0.011
						3.16	n.d.							2.01	0.015
						2.16	n.d.							1.01	0.003
						1.16	0.066							0.01	0.033
						0.16	0.009							-0.99	0.001
L28-7*	3.94	-2.06	4.60	0.9	0.001	4.14	n.d.	G10-4**	4.00	-4.80	3.70	-0.55	n.d.	4.50	n.d.
						3.64	0.011							3.50	0.430
						2.64	0.042							3.00	0.003
						1.64	0.003							2.00	0.075
						0.64	n.d.							1.00	n.d.
						-0.36	n.d.							0.00	0.022
L32-2*	3.59	-2.91	4.99	0.3	n.d.	2.79	0.01	* : 5 th city block, ** : 6 th city block, n.d : non-detected						-1.00	0.054
						2.59	0.028							-2.00	0.38
						1.29	0.009							-3.00	0.024
						0.29	0.049							-4.00	0.001
						-0.71	0.17								
						-1.71	0.13								
	0.028														

*: 5th city block, **: 6th city block, n.d : non-detected
colored: non-conformity with soil leachate standards of benzene

析結果[URL2]を、汚染プルームモデルに重ねると(5街区)、汚染プルームが残存する可能性がある範囲の近傍の観測井戸で汚染(赤丸印：ベンゼン基準不適合)が確認されていることが分かる(Fig. 6)³⁾。これは、地下水管理システムによる地下水揚水が本格稼働し、対策区画の近傍に残存していた有害物質が地下水の流れによって移流・拡散し、モニタリング井戸で検出された結果であると考えられる。

本論で紹介した汚染プルームの広がりや土壌汚染対策法施行規則に準拠して決定された汚染区画(対策区画)の相違は、法に準じた検討だけでは汚染範囲を3次元的に把握することが困難となる場合があることを示唆している。特に汚染除去を目的とした対策を講ずる場合には、汚染プルームを3次元的に表現することで汚染の取り残しや浄化期間が長期化するといった問題が発生するリスクを低減できるものと考えられる。

2. 豊洲市場の地質構成と汚染プルームの分布

豊洲新市場における地質調査結果[URL1]によると、豊洲の浅部の地質は、埋土層と沖積の粘土層である有楽町層(Yc層)に区分されている。埋土層は、埋土材の土質区分から礫質土を主体とするHg層、砂質土を主体とするHs層、粘性土を主体とするHc層に区分されている。地質構成と汚染プルームの分布に着目すると、6街区の水産仲卸売市場の下部には、Hc層がHs層を挟み上下に分布し汚染プルームをトラップしており、汚染はYc層まで達していないのに対して、5街区の青果市場付近の埋土層はHs層を主体とし、汚染プルームは下位のYc層内部まで広がっていることが分かる(Fig. 7)。

Yc層は難透水層として十分な層厚を持つ粘性土層であり、また、ベンゼンは水より比重が軽く、LNAPL(Light Non-Aqueous Phase Liquid; 水より軽い難水溶性液体)として挙動するため、地下水面付近で水平方向に拡散し、鉛直方向へ

の広がりは生じにくい。5街区にみられるこのような粘性土内における鉛直方向への汚染拡散のメカニズムとしては、例えば、ベンゼンを含むタールの比重によってはDNAPL(Dense Non-Aqueous Phase Liquid; 水より重い難水溶性液体)として挙動した可能性、Hc層とYc層における粘性土の液性・塑性限界などの土質性状の違い、5街区と6街区では汚染機構が異なる可能性、調査時におけるボーリング孔が鉛直方向への拡散経路となった可能性等が考えられる。

本論では、豊洲新市場における汚染機構について推定するには至っていないが、地質構成や土質性状などの物性値と汚染プルームを合わせて3次元的に表示することは、汚染経路の推定や汚染機構の解明等の検討を行う上で有効なツールとなるものと考えられる。

おわりに

平面図と断面図等の2次元情報を組み合わせ3次元的に地質構造や汚染プルームの分布を理解・把握するには、高度な技能と経験が必要である。しかし、本論で紹介したように地盤情報や汚染情報を3次元モデルとして可視化すると、問題の本質が見えやすくなり、原因究明などの機構解析や、次に必要な調査、対策に対する議論や検討を深めることができる。また、3次元モデルは、調査者、設計者、施工者、発注者が共通した情報・認識を相互に共有、交換するリスクコミュニケーションの場においても非常に有効である。

著者らは、建設コンサルタントとして、「[種々の調査によって得られた地盤情報を整理し、問題の本質を理解し、いかに第三者に分かりやすく伝えるか]という観点から3次元モデルを活用してきた。3次元モデルの閲覧方法は、当初は専用のソフトウェアが必要であったが、現在では、Acrobat Reader(Adobe社製)で3次元PDFとして閲覧可能である。また、昨今では、sketchfabなどのWeb上で3次元モデル

³⁾ <https://sketchfab.com/models/c05fe28ff4b4d32bd2c924971d750fd>

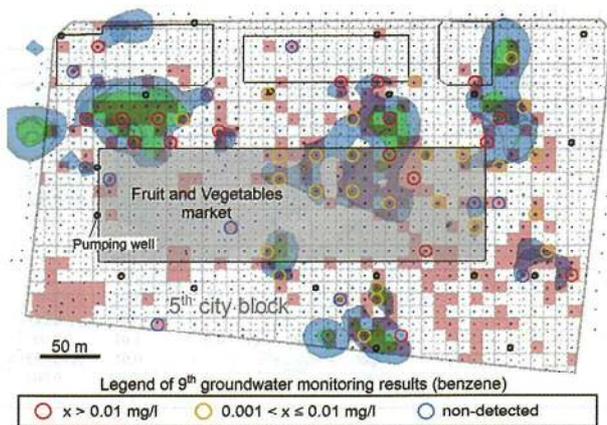


Fig. 6. Relationships between benzene-contaminated plumes and the results of benzene analysis by the 9th groundwater monitoring program (MCWM, 2017) in the 5th city block of the new Toyosu market. Green plumes: $x > 0.1$ mg/l; blue plumes: $0.01 < x \leq 0.1$ mg/l; x : Analysis value.

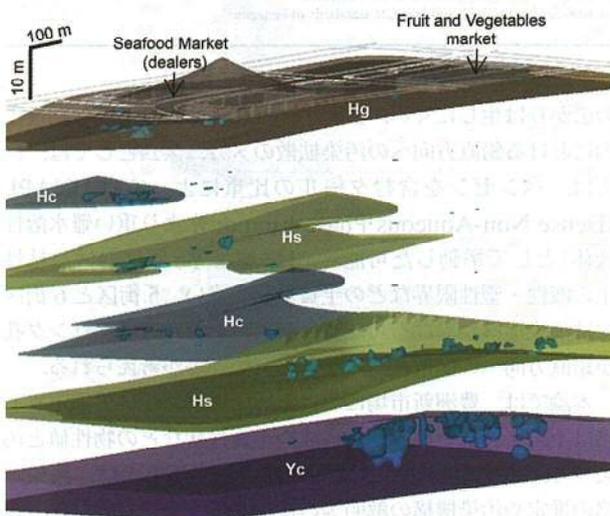


Fig. 7. Relationships between benzene-contaminated plumes and stratigraphic units at the new Toyosu market. To depict the distribution of contamination plumes in each stratigraphic unit, the units are shown separately. Blue plumes: $x > 0.01$ mg/l; x : Analysis value; Hg: gravel layer; Hs: sand layer; Hc: clay layer; Yc: clay of the Yurakucho Formation.

を共有できるサービスも普及しており、3次元モデルを容易に閲覧できる環境が整っている。本論で紹介した3次元モデルの一部は、注釈1), 2), 3)に記したURLから閲覧できるので参考とされたい。モデルを閲覧するためのパスワードは、「chishitsu」である。本論が様々な地下情報を3次元化するための一助になれば幸いである。

謝 辞

本論は、査読者の稲垣秀輝氏(株式会社環境地質)、匿名査読者ならびに担当編集委員の高野修氏(石油資源開発株式会社)のご意見により大幅に改善した。また、美馬健二氏、安

達みず穂氏(有限会社太田ジオリサーチ)には、3次元モデル作成にあたり多大なるご尽力を賜った。長谷川武氏(有限会社エコルネサンスエンテック)には土壌汚染分野における3次元モデル活用の有効性について有益な議論を賜った。記して心より御礼を申し上げます。

文 献

- Clark, I., 1979, *Practical Geostatistics*. Elsevier Science & Technology, 141p.
- Deutsch, C. V. and Journel, A. G., 1998, *Geostatistical Software Library and User's Guide, Second Edition*. Oxford Univ. Press, 369p.
- Englund, E. J. and Sparks, A.R., 1988, *GEO-EAS 1.2.1 Geostatistical Environmental Assessment Software User's Guide*. U.S. EPA. EPA/600/4-88/033, 184p.
- 林 義隆, 2004, GISの先にあるもの—管理型GISから活用型GISへ—。平成16年度電算活用講習会, 25-46。[Hayashi, Y., 2004, The future of GIS—From managed type GIS to utilization type GIS—. *Computer Aided Workshop in 2004*, 25-46.]*
- 林 義隆・國眼 定・太田英将・北方 泰, 2005, 空間情報技術による地すべりの可視化と解析。日本地すべり学会誌, 42, 44-50。[Hayashi, Y., Kokugan, S., Ohta, H. and Kitakata, Y., 2005, Three-dimensional visualization based on spatial information technology. *J. Japan Landslide Soc.*, 42, 44-50.]
- 特定原子力施設監視・評価検討会, 2013, 平成25年9月30日第7回汚染水対策検討ワーキンググループ会議資料2, http://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/8382005/www.nsr.go.jp/committee/yuushikisya/tokutei_kanshi_wg/data/0007_02.pdf[Nuclear Regulation Authority, 2013, The 7th meeting materials for Working Group Meetings of Contaminated Groundwater, No.2, September 30th, 2013]*
- Reed, D. C., 2015, *C Tech Help System for EVS & MVS 9.88*. Ctech development, https://az664890.vo.msecnd.net/customerfiles/CTechHelp_9.11.pdf
- Reed, D. C.・林 義隆, 2013, 汚染修復に関する地球統計学的手法によるサイトアセスメントと4D可視化ソフトウェアEVSの提供。技術研究組合国際廃炉研究開発機構, 平成25年9月応募公開資料, <http://irid.or.jp/cw/public/410.pdf> [Reed, D. C. and Hayashi, Y., 2013, *Geostatistically Guided Site Assessment and 4D Visualization Software System to Direct Nuclear Contaminated Field Remediation*. International Research Institute for Nuclear Decommissioning, Application Open Materials 410, September, 2013]
- [URL1] 東京都中央卸売市場, 豊洲市場に関する会議資料, 各種調査結果, http://www.shijou.metro.tokyo.jp/toyosu/siryou/tyousa_siryou/#tyousa01 [Tokyo Metropolitan Central Wholesale Market, Conference Materials of Toyosu Market, Results of Various Surveys]*
- [URL2] 東京都中央卸売市場, 平成29年1月14日第4回豊洲市場における土壌汚染対策等に関する専門家会議資料, http://www.shijou.metro.tokyo.jp/toyosu/pdf/expert/04/2_tsuika.pdf [Metropolitan Central Wholesale Market, The 4th meeting materials for Expert Meeting on Soil Contamination Countermeasures at the Toyosu Market, January 14th, 2017]*

*English translation from the original written in Japanese.

(著者の貢献)

川浪聖志 筆頭執筆者として、論文全体の構成を立案・構築・推敲するとともに、主に論文後半の「土壌汚染3次元モデルの事例」他を担当・執筆した。

林 義隆 共著者として、主に論文前半の「3次元可視化の取り組みと具体事例の紹介」を担当・執筆した。

太田英将 共著者として、林とともに論文前半の「3次元可視化の取り組みと具体事例の紹介」を担当・加筆した。