

EVS を用いた土壌汚染 3 次元モデルの有効性
～ゼロリスクを目指した豊洲新市場を例にして～

有限会社太田ジオリサーチ ○川浪 聖志、林 義隆、太田 英将

1. はじめに

昨今、東京都が実施した豊洲新市場における土壌汚染対策に対する不安・不信が広がっている。豊洲新市場の土壌汚染調査・対策については、専門家会議が組織され、食の安全を守るために必要な土壌汚染対策が提言され、会議の内容や調査・対策結果がホームページ上で公開されている。著者らは、これらの公開情報を用いて地球統計学的手法により汚染プルームの 3 次元モデルを作成し、推定した汚染プルームの広がり と対策区画との比較を行った。

2. 豊洲新市場における調査・対策の概要

(1) 豊洲新市場の土壌汚染調査

豊洲新市場における土壌汚染調査は、主に以下のとおりである。

- ・概況調査：東京ガス工事操業時の地盤面-0.5mの土壌調査（表層土壌調査）
- ・地下水調査：帯水層の中間深度において地下水を採取・分析
- ・深度方向調査：表層・地下水調査で基準に適合しなかった区画におけるボーリング調査
通常、土壌汚染対策法に準じた調査では、まず、平面的な分布を把握するために表層土壌調査を実施し、表層に汚染が検出された区画において深度方向調査を行う。一方、豊洲新市場での調査は、表層土壌調査時に加えて地下水調査を実施し、表層または地下水のいずれかで汚染が検出された区画について深度方向調査を実施している点が特徴的であり、土壌汚染対策法より上乘せの調査を実施しているといえる。

(2) 豊洲新市場の土壌汚染対策

豊洲新市場では、土壌汚染対策として主に以下の対策が講じられている。対策工事の概要を図 1 に示す。

- ・盛土・舗装：AP+2.0m(東京ガス工場操業時の地盤面-2.0m)～AP+6.5m（新市場地盤面）までを健全土で盛土（報道等で問題となっているのは建屋下が地下ピットになっており盛土されていない点）
- ・封じ込め：各街区の外周に遮水壁を設置し、市場用地内からの地下水の流出と外部からの地下水侵入を防止
- ・土壌の掘削・オンサイト浄化・埋め戻し：AP+2.0m以深で 2（1）の調査で抽出した汚染区画について掘削、場内にて浄化し、浄化土で埋め戻し
- ・地下水浄化：地下水汚染が確認されている区画において、地下水をくみ上げ、浄化後下水に放水（建屋下：環境基準に適合、建屋外：排水基準に適合）
- ・液状化対策：AP+2.0m に砕石層を敷設し毛細管現象を防止

これらの調査・対策によって、土壌中の大部分の有害物質は除去されているものと考えられたが、地下水から基準を超過するベンゼンやヒ素が検出されたり、地下ピット空間から水銀が検出されるなど、有害物質が残存する可能性を示す事象が出現している。

3. 事例分析のシナリオ

土壌汚染対策法では、汚染の範囲を10m 区画を最小単位として把握・管理するが、実際の汚染プリュームは、10m 区画に限られるものではないと考える。そこで、著者らは地球統計学的アプローチにより汚染プリュームを推定し、現行の対策（メッシュ単位）と汚染プリュームの広がりとの比較し、汚染プリュームが残存する可能性について検討

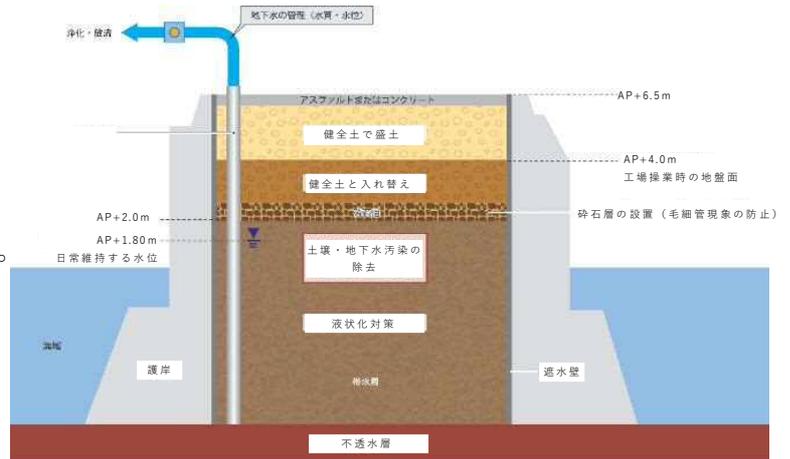


図1 豊洲新市場における土壌汚染対策の概念図

した。なお、本論では、土壌中のベンゼン（豊洲新市場予定地の土壌汚染対策工事に関する技術会議説明資料より抜粋）を対象としてモデルを作成した。3次元化には、環境に特化した可視化システムであるEVS（Enviromental Visualization Sysytem: C tech社開発）を用いた。

(1) 3次元モデルの作成に用いたデータ

豊洲新市場における汚染プリュームの3次元化モデルに用いたデータの一覧を表1に示す。

表1 汚染プリュームのモデル化に用いたデータ一覧

モデル作成に用いた公開データ			各調査内容の概要	用途
地質調査データ	地質調査結果	調査地点位置図	8地点（+6地点*1）	地質モデル
		ボーリング柱状図	豊洲新市場建設予定地における地質調査	
		地盤に関する考察	・8か所におけるボーリング調査	
専門家会議における調査データ	土壌・地下水の詳細調査	調査位置座標	4122地点：1地点/10m区画	調査地点座標 地表面標高 旧地盤面標高 難透水層出現標高 表層土壌溶出量
		地下水及び土壌の試料採取地点	・土壌調査：工場操業時の地盤面-0.5mの土壌試料の分析	
		土壌調査結果（溶出量）	・地下水調査：帯水層の中間深度で地下水を採取	
		地下水分析結果一覧表		
	絞込調査	調査位置座標	441地点で実施（内、216地点でベンゼン分析）	深度方向の 土壌溶出量
		土壌の試料採取地点	詳細調査の結果、旧地盤面下-0.5mで土壌溶出量基準に適合しなかった区画ならびに排水基準に適合しなかった区画における深度方向調査	
		土壌調査結果（溶出量）		
	土壌ボーリング調査結果	調査地点位置図*2	200地点で実施（内、65地点でベンゼン分析）	深度方向の 土壌溶出量
		調査地点別調査数量一覧表	対策量を想定するためのデータ収集、把握を目的とした環境確保条例第117条に基づく深度方向調査。詳細調査で地下水基準に超過しなかった区画の内200箇所を実施	
		土壌分析結果一覧表		
環境確保条例第117条に基づく調査等	調査地点位置図*2	981地点で実施（内、282地点でベンゼン分析）	深度方向の 土壌溶出量	
	調査地点別調査数量一覧表	詳細調査で地下水基準に超過しなかった区画における深度方向調査（上記200箇所を除く）		
	土壌分析結果一覧表			
地下水・土壌の追加調査	調査位置座標	56地点で地下水位を測定	地下水位	
	地下水位（定期観測）			
豊洲市場土壌汚染対策工事の各種調査結果	底面管理調査結果	平成24年2月都データ受理	469地点で実施 不透水層付近まで汚染が達している区画について、不透水層以下について深度方向で2m続けて汚染がないことを確認するための調査	深度方向の 土壌溶出量
		平成24年9月都データ受理		
		平成25年5月都データ受理		
		平成25年10月都データ受理		
		平成26年3月都データ受理		
	帯水層底面調査結果	平成24年2月都データ受理	226地点で実施	
		平成24年9月都データ受理	土壌汚染対策法に基づき実施する帯水層底面の土壌調査。	
		平成25年5月都データ受理	汚染が確認された場合は、引き続き底面管理調査を実施。	

*1：地盤情報ナビで公開されている豊洲市場周辺の柱状図等の情報も参考にし、地質モデルを作成した

*2：環境確保条例第117条に関する調査位置は、座標が公開されていなかったため、詳細調査で公開されている調査位置座標を採用した。

データの引用元：http://www.shijou.metro.tokyo.jp/toyosu/siryou/tyousa_siryou/#tyousa01

(2) 浄化前の汚染プルームの分布と対策区画の比較

地球科学的手法により推定したベンゼンの汚染プルームを図2に示す。同図の内、青色が土壌溶出量基準に適合しないプルームを、赤色が第二溶出量基準に適合しないプルームを示し、豊洲新市場の主要な建屋（地下空間）を重ねた。対策前のベンゼンの汚染プルームは、主に6街区の水産仲卸売場棟の西側とその周辺、5街区の青果棟の西側と建屋部分の東～北側に分布し、深度方向にみると大部分がAP-2.0m（建屋の地下空間の下端）以深に広がっていることが分かる。

次に、豊洲新市場を真上から見た汚染プルームの広がりを図3に示す。同図にはAP-2.0m以深において土壌の浄化が完了した区画（赤色区画）を重ねた。対策済みの区画と汚染プルームの分布に着目すると、第二溶出量を超える高濃度汚染部は、ほとんど除去されているが、土壌溶出量基準に適合しない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。

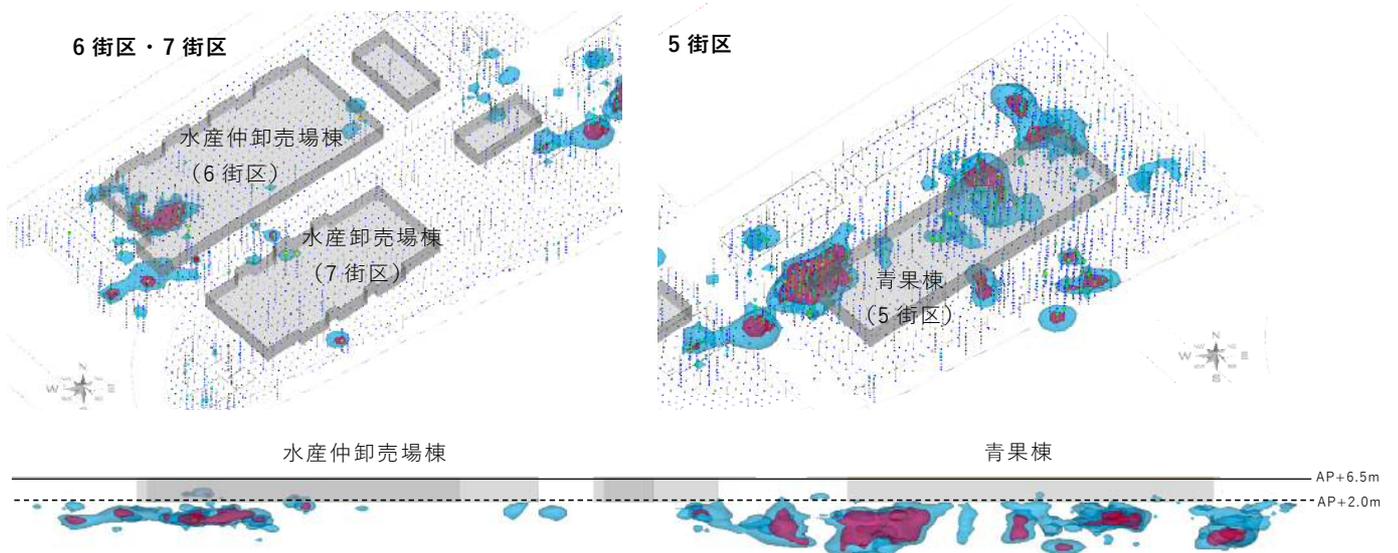


図2 各街区における対策前の汚染プルームの分布と断面

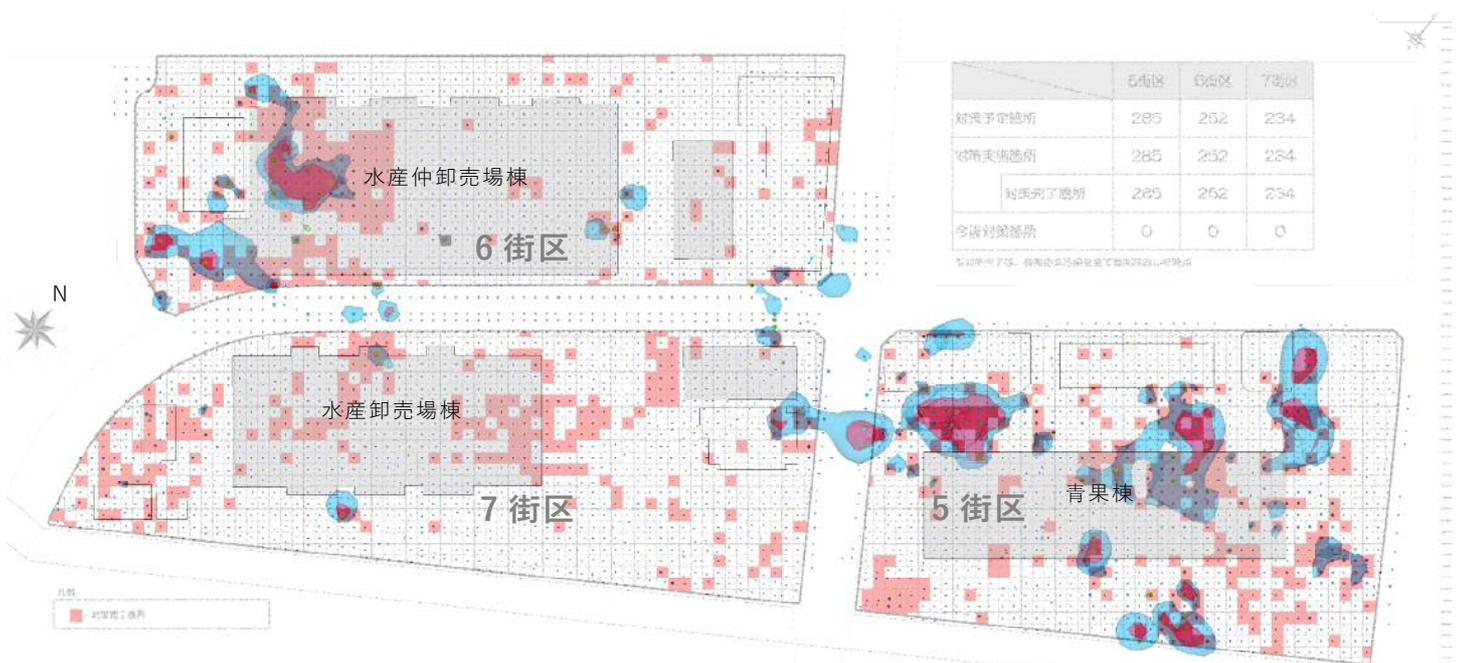


図3 対策前の汚染プルームの分布と対策区画の比較

豊洲新市場の土壤汚染調査では、表層土壤あるいは地下水が基準に適合した区画は汚染ナシであると判断し、深度方向の土壤分析は実施していない。今回推定したプリュームも未分析区画については近傍地点の分析値と距離から地球統計学的に演算して濃度を描いている。そこで、未分析の区画（表層と地下水で基準に適合した地点）に汚染が残存する可能性について検討するために、表層土壤調査でベンゼンの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壤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、地下水位以深の土壤において溶出量基準に適合しない深度が認められることが明らかとなった(表 2)。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、表層および地下水で基準に適合していても、必ずし深度方向の土壤が基準に適合していると言い難く、未調査の地点においても土壤溶出量基準を超える汚染が残存する可能性は否定できない。

表 2 地下水ベンゼン濃度と土壤溶出量の比較の抜粋

街区	地点	地下水調査				深度方向調査		街区	地点	地下水調査				深度方向調査			
		ストレーナー管 (A.P.m)		地下水位 (A.P.m)	採取深度 (A.P.m)	ベンゼン地下水濃度 (mg/L)	採取深度 (A.P.m)			ベンゼン土壤溶出量 (mg/L)	ストレーナー管 (A.P.m)		地下水位 (A.P.m)	採取深度 (A.P.m)	ベンゼン地下水濃度 (mg/L)	採取深度 (A.P.m)	ベンゼン土壤溶出量 (mg/L)
		上端	下端								上端	下端					
5街区	K27-8	3.64	-2.19	4.32	0.6	nd	4.31	0.043	5街区	N38-6	4.12	-0.88	4.11	1.6	0.004	3.92	nd
							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	nd
							-0.99	0.12								-1.08	nd
							-1.99	4.4								-1.99	0.003
	K36-9	4.31	-1.19	4.80	1.6	0.003	4.91	nd		041-5	4.31	-1.20	4.90	1.6	nd	4.91	0.011
							3.41	0.013								2.01	0.015
							3.16	nd								1.01	0.003
							2.16	nd								0.01	0.033
							1.16	0.066								-0.99	0.001
							0.16	0.009								-1.99	0.003
							4.14	nd								4.5	nd
L28-7	3.94	-2.06	4.60	0.9	0.001	3.64	0.011	6街区	G10-4	4.00	-4.80	3.70	-0.55	nd	3.5	430	
						2.64	0.042								3	0.003	
						1.64	0.003								2	0.075	
						0.64	nd								1	nd	
						-0.36	nd								0	0.022	
						2.79	0.01								-1	0.054	
						2.59	0.028								-2	0.38	
L32-2	3.59	-2.91	4.99	0.3	nd	1.29	0.009		*黄着色深度は、表層土壤調査を示す。また、赤色は、基準不適合、水色は基準適合を意味する。	1.29	0.009	-3	0.024	0.29	0.049		
						0.29	0.049			-4	0.001						
						-0.71	0.17										
						-1.71	0.13										
						-2.71	0.028										

(3) 地質と汚染プリュームの関係

豊洲新市場における地質調査（平成 18 年報告書）によると、豊洲の浅部の地質は、大きく埋土層（Hg：礫質土主体、Hs：砂質土主体、Hc：粘性土主体）と有楽町層（Yc：沖積の粘土層）に区別されている。図 4 は、既往調査結果から推定した地質モデルである（平成 18 年の地質断面図に整合）。

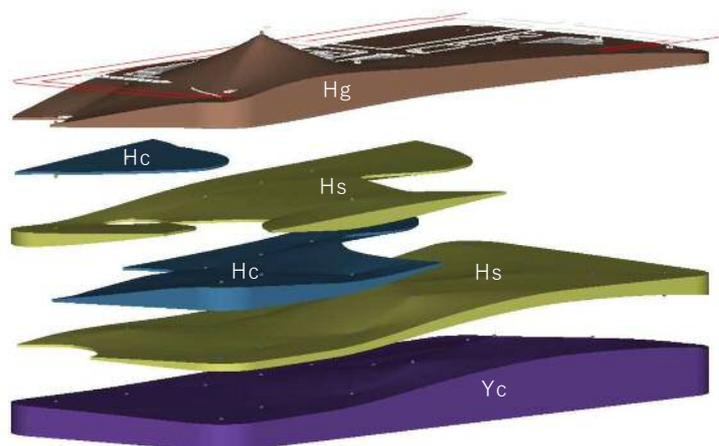


図 4 豊洲新市場の地質モデル

粘性土を主体とする Hc 層とベンゼンの汚染プルームの関係に着目してみると（図 5）、6 街区の水産仲卸売市場の下部には、Hc 層が分布しており、有楽町層（Yc 層）に達する汚染の広がりはわずかであることが分かる。一方で、5 街区の青果市場には Hc 層が分布しておらず、6 街区に比べて深部まで汚染が広がっている。豊洲新市場全体の埋土層の下部には、難透水層として十分な層厚を持つ有楽町層が分布しているが、5 街区の汚染は有楽町層内まで広がっている。このような汚染プルームの分布は、ベンゼンを含むタールを主体とする NAPL の挙動を表しているのかもしれない。

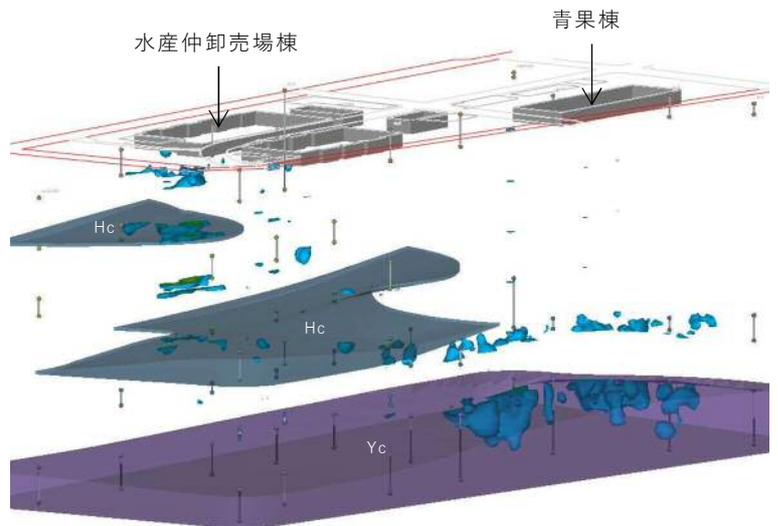


図 5 粘性土層と汚染プルームの関係

(4) 低濃度ベンゼンプルームの分布

ベンゼンの汚染プルームに、低濃度のプルーム（ $0.001 \text{ mg/L} < X < 0.01 \text{ mg/L}$: 黄色）を重ねると（図 6）、6 街区では水産中卸売場棟の西側から 7 街区の水産卸売場を挟む道路部分に、5 街区では青果棟の西側から 6～7 街区にかかる道路部分および東側に低濃度の汚染プルームが分布することが分かる。5 街区において地下水中のベンゼンやヒ素が基準を超過することが報道されたが（図 6 の赤丸地点：ベンゼン基準不適合）、本検討における低濃度汚染プルームも含めた土壌汚染の分布を見る限り、地下水から基準を超過する有害物質が検出されても不思議ではない。

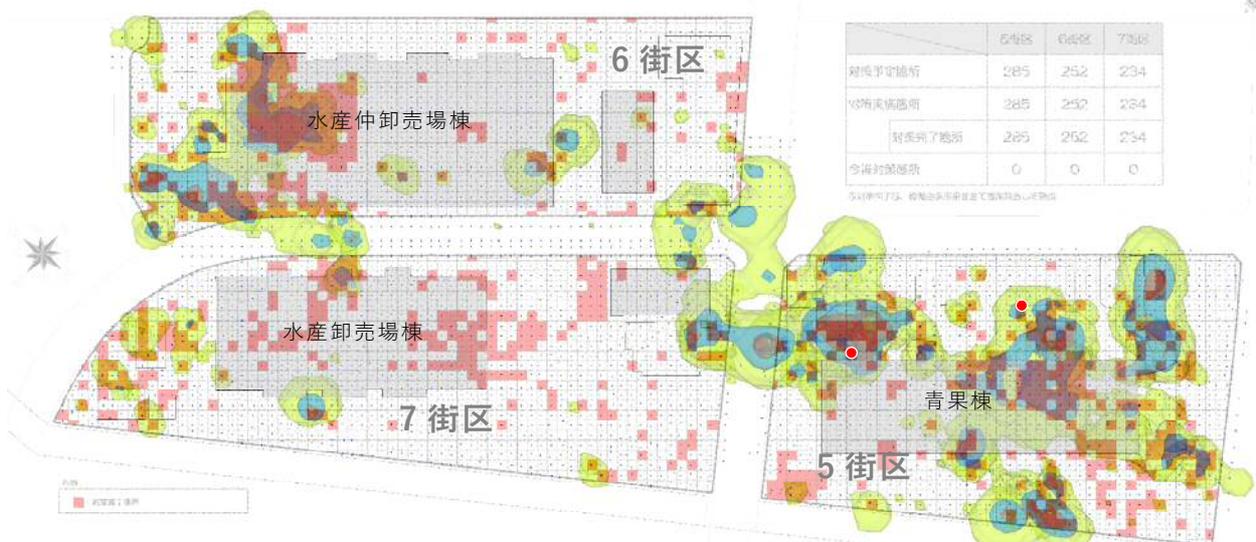


図 6 低濃度プルームの分布

4. マネジメントの効果（リスクの計量化）

(1) 調査方法による汚染プルームの違い

土壌汚染対策法に準拠して表層土壌調査結果により深度方向調査を実施した場合に把握できた汚染プルームと、豊洲新市場で実施した表層土壌調査と地下水調査の結果によっ

て深度方向調査を実施した場合に把握できた汚染プルームの比較結果を表 3 および図 7 に示す。現状の調査結果での汚染プルームを 100%とすると、法に準拠した場合の汚染プルームは約 50%であった。また、第二溶出量に適合しない高濃度汚染プルームは 21%しか把握できない結果となった。

表 3 調査方法による汚染プルームの違い

調査方法		基準不適合	溶出量 基準不適合	第二溶出量 基準不適合
土壌汚染対策法 (表層検出箇所でのボーリング)	体積A	52280 m ³	48534 m ³	3746 m ³
	A/B*100	49.7 %	55.6 %	21.0 %
豊洲の土壌汚染調査 (表層or地下水検出箇所でのボーリング)		体積B	87336 m ³	17834 m ³

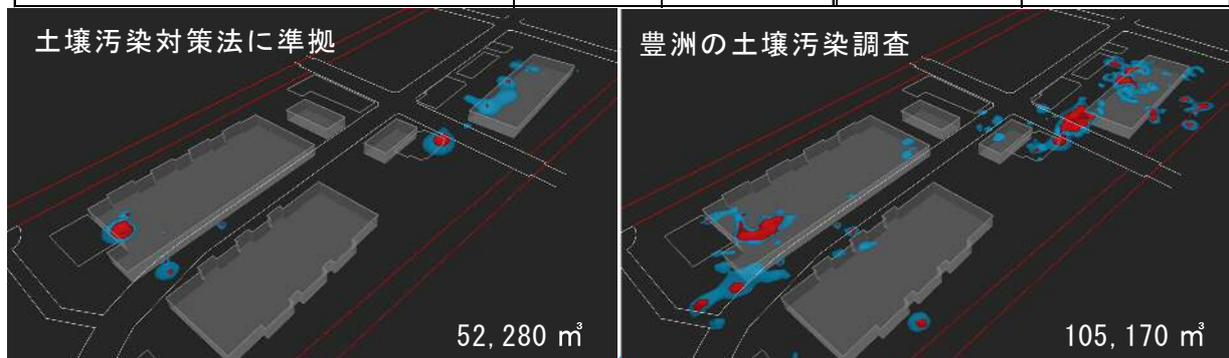


図 7 調査方法による汚染プルームの形状の違い

(2) リスクコミュニケーションにおける 3次元モデルの有効性

平面図と断面図を基に 3 次的に汚染の分布を把握するには、高度な技能と経験が必要である。しかし、本検討のように汚染プルームとして 3次元モデルにして可視化すると、調査者、設計者、施工者、発注者が共通した認識を容易に共有することができる。このように、土壌汚染調査・対策において汚染プルームを 3 次的に可視化することは、次に必要な調査や汚染の機構解析に対する議論や検討を深めるばかりでなく、ステークホルダー（調査者、設計者、施工者、発注者、行政機関、地域社会などの利害関係者）間のリスクコミュニケーションを図る上で非常に有効である。

5. おわりに

専門家会議が提言した対策は、市場用地内の汚染が見つかった区画において汚染土壌を除去し、外周を遮水壁で封じ込めた上に厚さ 4.5m の健全土で盛土するといった、暴露経路を遮断する対策と有害物質を除去する 2 重の対策を求めたものであり、万が一にも食の安全を脅かすことがないようにゼロリスクを目指した提言であるように思える。これは、現行の調査手法では有害物質の汚染分布を正確に把握することが困難であり、汚染除去の不確実性に配慮した上での結論だったのかもしれない。

本論で検討した地球統計学的手法を用いた汚染プルームの広がり、法による汚染区画のズレは、汚染除去を目的とした対策を講ずる場合に、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可能性のリスクヘッジに寄与するものと考えられる。