

# 豊洲新市場における土壌汚染解析

4 班：尾池 響平、河田 貴泰、寺見 明久、古谷 俊晃  
アドバイザー教員：羽田野 祐子

## 1. はじめに

現在東京都中央区にある築地市場は豊洲への移転が 2014 年に計画されている。移転の主な目的は現施設の老朽化や場内の狭あい化が主な原因である。だが、この計画は順調に進んでいるとはいえない。それは、移転先である豊洲の土壌に非常に深刻な汚染が発見されたためである。

## 2. 豊洲土壌汚染背景・研究目的

豊洲の土地は過去に東京ガスが 1956 年(昭 31 年)から 1988(昭 63 年)まで操業用土地として使用していた。図 1<sup>1)</sup>の第 6 街区に属している土地内に、1969 年頃に石炭ガス製造の際に発生したタールスラッジが直接土壌の表面に仮置きされており、仮置き場まで移動する間にも運搬時、混錬作業時などにも汚染対策のされていない箇所から土壌中へ浸透したなどの可能性がある<sup>2)</sup>。豊洲土壌における汚染の経緯を表 1 に示す。

土壌汚染状況調査報告書における土壌汚染の例をあげると、豊洲土壌において約 2000 点の土壌溶出試験分析試料の調査を行った結果、環境基準の 1500 倍を超えるベンゼンや同じく 490 倍を超えるシアン化合物などの検出が報告されている<sup>3)</sup>。

この後、東京ガス・東京都共に土壌汚染が完了したという報告書をまとめ移転を進行させようとしているが土壌が完全に浄化したという正式な結果が現在も出されていない。

本稿の目的は、豊洲の事例をモデルとし、調査を行い、土壌問題の基礎知識及び解析手法を身につけることとする。さらには、汚染マップの作製により汚染の漏出後数十年にわたる濃度の変化予測を行った。また、リスク解析により伴う不確実性も併せて

実施し、検証を試みた。

表 1 豊洲土壌汚染における経緯

1956 年：工場の操業開始
1988 年：工場の操業停止
2001 年 1 月：土壌汚染が発覚
2001 年 2 月：土壌汚染処理を開始
2002 年 10 月：施行された環境確保条例に基づき「土壌汚染状況調査報告書」を東京都環境局に提出
2002 年 11 月：「汚染拡散防止計画書」環境局に提出
2005 年 9 月：同計画書を環境局に提出
2006 年 3 月：5 街区における「汚染拡散防止措置完了届書」を環境局に提出し、5 街区については処理が完了したと記す

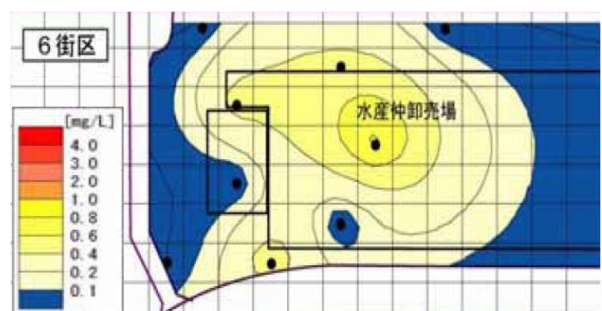


図 1 第 6 街区の汚染状況

## 3. シアン化合物の人体への健康被害

本研究ではシアン化合物における解析を行う。以下において、シアン化合物について述べる。

シアン化合物はシアン化合物イオンを持つ塩の総称である。シアン化合物は食事や水からの経口摂取、

シアン化水素がガス状になった場合には呼吸や皮膚から吸収され、呼吸酵素中の鉄や銅と結合することによって組織呼吸を抑制する働きをもつ。従って高濃度のシアン化合物を摂取した場合には短時間で死に至る強い毒性をもつ<sup>3)</sup>。

#### 4. 土壌対策汚染法と改正案

土壌対策汚染法<sup>4)</sup>（以下：土対法）は平成 14 年に制定され、翌年平成 15 年から施行が開始される。土対法の目的は、土壌汚染対策の実施に伴う国民の健康の保護である。内容は大きく分別すると、2 つあり、1 つは、汚染の未然防止のための有害物質の地下浸透、廃棄物の埋め立て方法の規制である。2 つめは、既に発生している汚染の浄化である。これに対し、環境基準の制定、地方公共団体の行政指導などが組み込まれている。

現行の土対法は平成 22 年 4 月に改正された<sup>5)</sup>。それは、改正前の内容では法が対象としている範囲が狭く、様々な汚染に対する詳細な対策がない土壌汚染の適正処理の記述がないなどの問題点が挙げられたためである。特に、今回我々が取り上げた築地の豊洲移転問題において最大の問題とされているのが、附則 3 条に掲載されている条文である。この条文では施行前に使用が廃止されていた有害物質特定施設にかかわる工場の跡地は法の対象にならない。そのため、この条文により豊洲は土壌汚染が存在しながらも土壌汚染を行う義務がない。以上のように土対法は具体的内容がないままに施行が開始されたため、今現在になって多くの問題が発生している。

#### 5. 豊洲における土壌汚染対策

汚染されている土壌への対策として、汚染を取り除き安全な土壌とするために浄化作業が行われる。本章では、豊洲で行われている対策方法について説明する。

汚染物質を取り除くために、汚染が発見されている土壌の土を入れ替え、地下水を汲み上げ浄化し、汚染物質のある土壌を採掘し新たな汚染のされてい

ない土と入れ替えることで対策としている。

#### 6. 解析方法

今回解析手法については、本研究では 2 つの解析ソフトを用いる。1 つは、「MODFLOW」という汚染物質移動シミュレーションソフトである。MODFLOW では、様々な条件で汚染物質の移行を分析し、図 1 における実測データと照らし合わせることで、汚染に関する条件を推定し、現状の汚染状況を明らかにする。条件の 1 つとして透水係数があげられる。透水係数とは土壌の水の流れやすさを示すもので、値が大きいほど水が流れやすいことを示す<sup>6)</sup>。透水係数の変動範囲は目安として、粘土で  $10^{-11}$  ~  $10^{-9}$ 、シルト・砂などで  $10^{-9}$  ~  $10^{-5}$  程度とされている<sup>7)</sup>。しかし、この透水係数は地中の構成物質により上記にあげた文献値は存在するが、実際の土壌は様々な物質が混在しているため不確実なことが多い。そこで、もう 1 つの解析ソフトである「@RISK」を使用し、解析を行う。@RISK では、透水係数の不確実性が汚染濃度に与える影響を分析する。以下にそれぞれの解析について説明する。

##### 6.1 汚染物質移動シミュレーション

MODFLOW では、第 6 街区におけるシアン化合物についてシミュレーションを行った。シミュレーションにおける条件は以下に示すとおりである<sup>2)</sup>。

- ・ 解析を行うフィールドは第 6 街区とする
- ・ 第 6 街区の土壌構成は砂であるとし、透水係数は  $10^{-5}$ [cm/s]とする
- ・ 境界条件は無限度で濃度 0 とする

以上の条件で汚染開始年、汚染終了年、漏出濃度を様々な数値に変えて、シミュレーションを行う。2002 年の時点で図 1 の実測データを用いて、それらの条件を明らかにし、さらに今年（2010 年）、10 年後（2020 年）の土壌汚染状況の予測を行う。

##### 6.2 不確実性解析

透水係数の不確実性が評価結果である汚染濃度に

どの程度の影響を及ぼすのかを解析ソフト「@RISK」を用いて分析する。分析を行う前に、透水係数の取りうる値の範囲を決定する必要がある。

透水係数の範囲は高橋ら(2005)<sup>9)</sup>の研究を踏襲する。高橋らは9つの砂サンプルから分散係数を算出した。この分散係数から透水係数は式(1)で求められる。

$$\begin{aligned} D &= \alpha_L \times u \\ u &= K \times I \\ \therefore K &= \frac{D}{\alpha_L I} \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、D:分散係数[m<sup>2</sup>/year]、 $\alpha_L$ :縦分散長[m]、u:流速[m/year]、K:透水係数[m/year]、I:動水勾配である。 $\alpha_L=40$ 、 $I=0.5$ とし、9つの砂サンプルから得られた透水係数の値は0.657~7.94[m/year]であった。透水係数は対数正規分布に従うものとする<sup>9)</sup>。基準(平均値)はMODFLOWに使用した $10^{-5}$ [cm/s]=3.15[m/year]の対数である0.499[m/year]とし、標準偏差は得られた透水係数の値を用いて0.346とした。

@RISKを用いて、分布関数を平均値 $\mu=0.499$ 、標準偏差 $\sigma=0.346$ の対数正規分布とし、モンテカルロ法により反復施行1000回のシミュレーションを1000回行い、1000個の乱数(log(K))を選出し透水係数を算出する。

本研究ではMODFLOWにより推定される汚染開始年から汚染終了年まで汚染源に汚染物質が流出され続けていると仮定している。この仮定において、汚染濃度はOGATAら(1961)<sup>10)</sup>の導出した式を用いて、式(2)により、シミュレーションで得られた透水係数の値を使用し推計する。

$$\begin{aligned} \frac{C}{C_0} &= \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{1-\xi}{2\sqrt{\xi\eta}} \right) \\ \left[ \begin{array}{l} \xi = \frac{ut}{x} \\ \eta = \frac{D}{ux} \end{array} \right] \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、C:評価年の汚染濃度[ppm]、 $C_0$ :汚染源に流出し続けている濃度[ppm]、t:汚染開始年から評価年までの年数[year]、x:汚染源から評価地点までの距離[m]である。

MODFLOWで推定される汚染終了年を評価年とし、 $x=100$ [m]の地点における濃度を推計する。

## 7. 結果・考察

本章ではMODFLOW、@RISKによって得られた結果、及びその考察について述べる。

### 7.1 汚染物質移動シミュレーション

MODFLOWによって得られた汚染状況の図を次ページに示す。

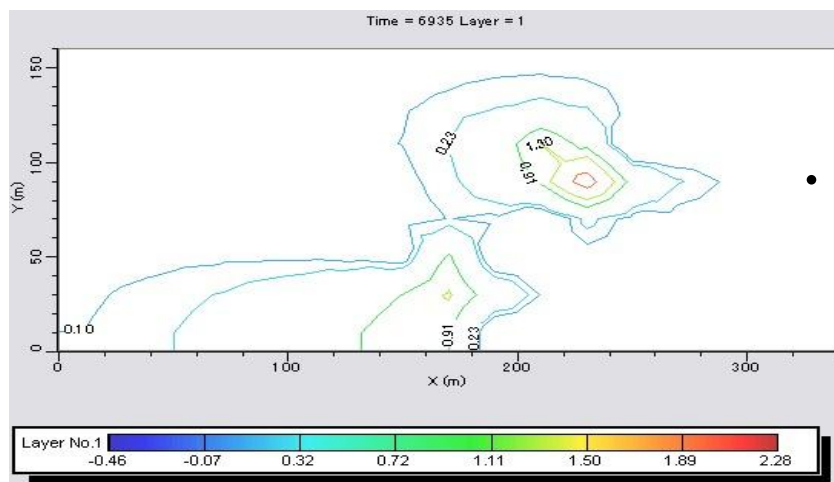


図 2 1988 年 (漏出停止した年) の汚染状況

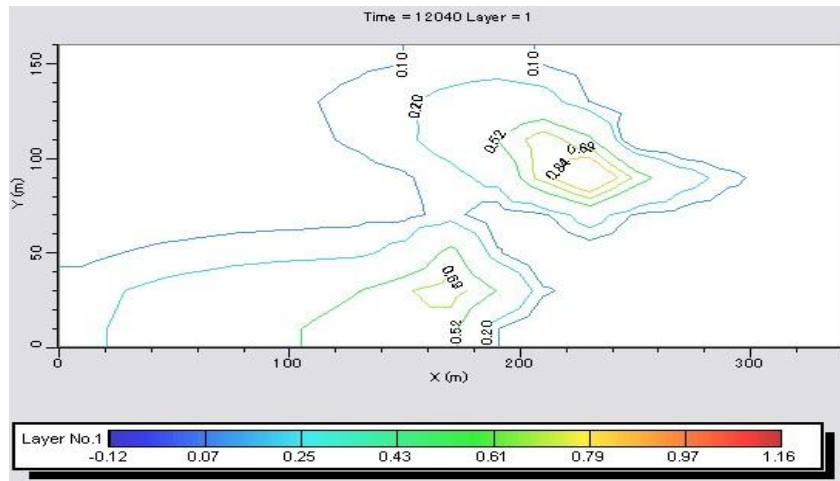


図 3 2002 年 (図 1 と同じ年) の汚染状況

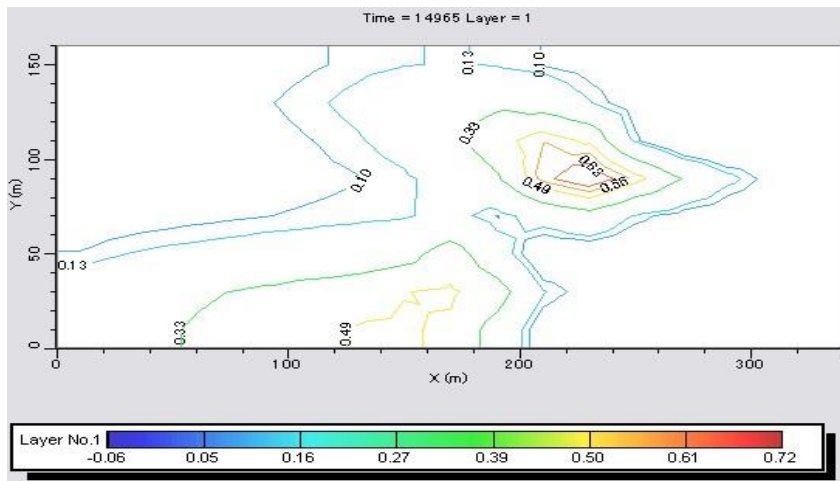


図 4 2010 年 (現在) の汚染状況

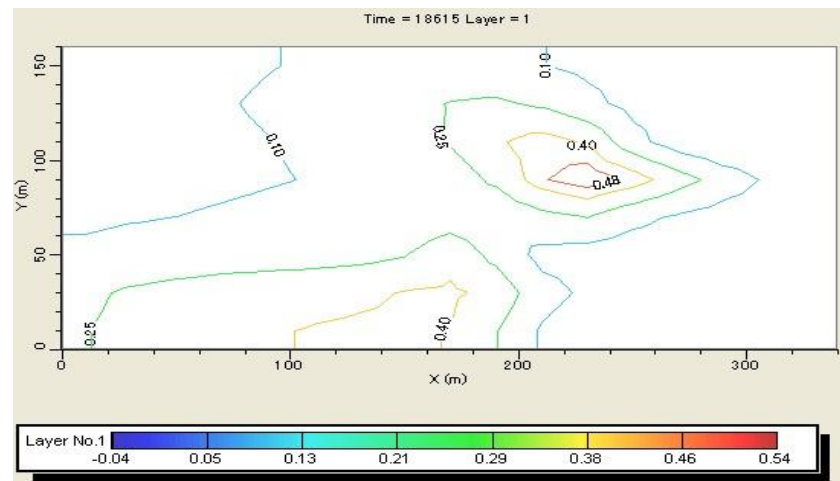


図 5 2020 年 (現在から 10 年後) の汚染状況

6章1節で述べた条件のもとでシミュレーションを行うと、2002年の実測値(図1)と近い濃度を与えるのは汚染開始年が1969年、汚染終了年が1988年、漏出濃度が1[ppm]の場合であった。そのため、これらの条件を採用した。

また、これらの解析結果は、実際の観測濃度分布と近いと言えるが、不十分な点がある。それは図の左下、第2の汚染源が置かれた付近の濃度が実際の観測結果より低い値となったことである。このことは第2汚染源付近の漏出濃度をより高く設定することにより、現実に近い値を得ることが可能と考えられる。また、透水係数も、今回は砂の物性値を用いていたが、実際はシルト混入の砂地であることも考えられる。以上の条件を変更することにより、予測結果を改善する事ができると予想される。

2010年現在(図4)、2020年(図5)と1988年当時(図2)を見比べると、数メートルずつ拡大していることが明らかとなった。

## 7.2 不確実性解析

@RISKによる1回のシミュレーション結果を図6に、選出した1000個の乱数を図7に示す。

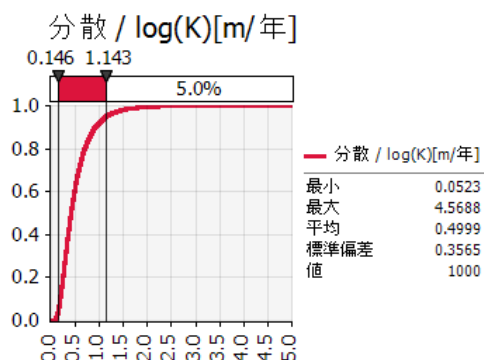


図6 1回のシミュレーション結果

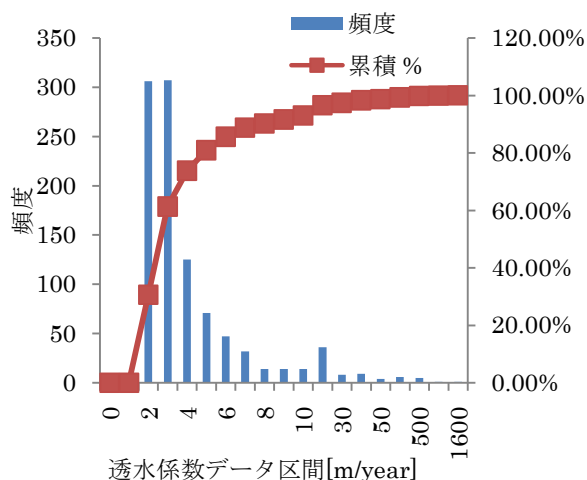


図7 透水係数の度数分布と累積曲線

透水係数は2[m/year]以上3[m/year]未満の幅で最も多くとられ、全体の30.7%を占めている。また全体の0.1%で1503[m/year]以上1504[m/year]未満において最大値をとり、透水係数の幅は1.12~1503.6[m/year]となった。汚染濃度の推計結果を図8に示す。

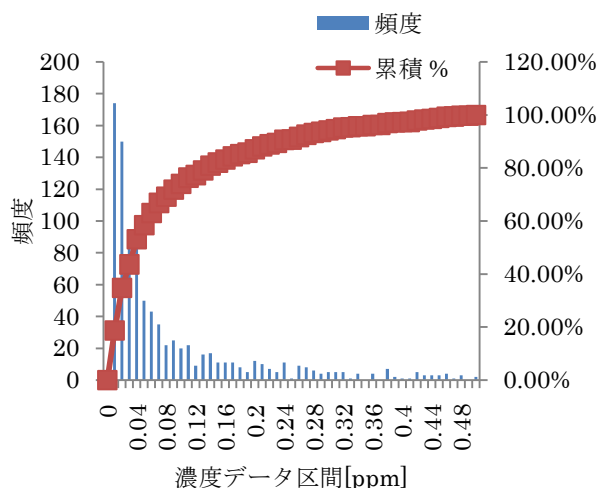


図8 汚染濃度の度数分布と累積曲線

汚染濃度は0.01[ppm]以上0.02[ppm]未満の幅で最も多くとられ、全体の18.7%を占めるという結果となった。また全体の0.21%で

0.49[ppm]以上 0.50[ppm]未満の幅で最大値をとる。汚染濃度が取り得る値は 0.001～0.499[ppm]未満であり、約 500 倍の開きがある。透水係数に与えた不確実性である 1.12～1503.6[m/year]と比較すると、濃度の値の不確実性は小さいといえるが、現実の社会問題として 500 倍の濃度値の開きは大きいと考えざるを得ない。

このように、不確実性解析を行うことにより透水係数の範囲の同定は重要なタスクであると考えられる。

## 8. まとめ

本研究では、土壌汚染による法則性、対策方法について築地市場の移転問題をモデルとして調査、解析を行った。物質移動シミュレーションソフト MODFLOW を用いて、漏出濃度や漏出の開始及び終了時期を変えてシミュレーションを行い、それぞれ 1[ppm]、1969 年、1988 年であることが推定された。それらをもとにパラメータの不確実性解析を @RISK を用いて行った。透水係数に対数正規型の不確実性を与えたところ、透水係数の 1.12～1503.6[m/year]の開きに対し、濃度は 0.001～0.499[ppm]という範囲となった。また、図 2 においてプロットしてある地点 (x=100[m]) での濃度は MODFLOW により 0[ppm]と推定されたが、不確実性解析により、それ以上の値を取り得ることが明らかとなった。

以上の結果より本解析条件では透水係数が物質の移動に関して大きな影響を与えることが言える。本研究により、環境汚染のリスクアセスメントを行う際はパラメータの不確実性が大きく結果を左右することが明らかとなった。

## 参考文献

- 1) 既往調査結果 (東京ガス (株) 実施)  
<[http://www.shijou.metro.tokyo.jp/senmonkakaigi1/08/houkokushoan\\_02-2.pdf#search](http://www.shijou.metro.tokyo.jp/senmonkakaigi1/08/houkokushoan_02-2.pdf#search)>
- 2) 東京ガス株式会社豊洲工場の土地利用について  
<<http://www.shijou.metro.tokyo.jp/senmonkakaigi1/kaigi05.html>>
- 3) ベンゼン・シアン健康被害の概要  
<<http://www.shijou.metro.tokyo.jp/senmonkakaigi1/09/kaitou/hosoku.pdf>>
- 4) 土壌汚染対策法改正前概要  
<<http://www.env.go.jp/water/dojo/law.htm>>
- 5) 大塚路子、調査と情報、調査と情報 (637), 1-11, 巻頭 1p, 2009-03-12 国立国会図書館調査及び立法考査局
- 6) 藤縄克之、汚染される地下水、共立出版、1990
- 7) 地下水問題研究会、地下水汚染論、共立出版、1991
- 8) 高橋直樹、中田雅夫、山本陽一(2005) : 土の分散特性および吸着特性の評価に関する基礎的研究, 三井住友建設技術研究所報告, 第 3 号, ROMBUNNO.6
- 9) 斉藤雅彦(2007) : 地下水汚染問題における濃度分布の確率的評価手法に関する基礎的研究, 水工学論文集, 第 51 巻, pp.499-504
- 10) Akio Ogata, R. B. Banks(1961) : A solution of the differential equation of longitudinal dispersion in porous media, Fluid movement in earth materials, Geological Survey professional paper 411-A