

3次元空間解析による汚染地盤の調査数量と汚染量の信頼性について

キーワード：地盤汚染 Soil Contamination , 地盤統計学 Geostatistics , リスク分析 Risk Analysis

有限会社太田ジオリサーチ ○林 義隆
太田英将
國眼 定

要 旨

地下水・土壌汚染地区の汚染量を推定する場合、調査量と汚染量推定精度の間には一般にどのような関係があるかについて、3次元地盤環境評価システム (EVS) を用いて検討した。

検討方法は、

①対象地区をメッシュ状にボーリングした場合

②ボーリング位置を不確実性 (Uncertainty) という指標を用いて探索し、ボーリング結果ごとに調査位置を変えて効果的に実施した場合

を想定し、両者の A) 調査数量の違い B) 推定された汚染物質の量と対策費用の関係 についてどの程度異なるのか、比較検討した。

その結果 不確実性を用いた方法は、通常のメッシュボーリングの 60%の調査数量で汚染土壌範囲の推定が可能であった。また、汚染土壌に含まれる化学物質の総量では、メッシュボーリングは不確実性を用いた方法の 2 割程度しか推定できなかった。この理由は“汚染物質の濃度分布が log スケールで変化するため、高濃度の汚染域を効率的に探索できる手法を用いないと正確な推定ができない” ことによると考えられる。

今後、汚染地盤の調査では、不確実性を指標とした効率的な探索と 3次元空間解析による汚染物質賦存量の正確な把握が、調査費用および、浄化費用推定に大きく寄与するものと考えられる。

なお、今回の対象となる汚染地は海外の存在する汚染地をモデルとした。

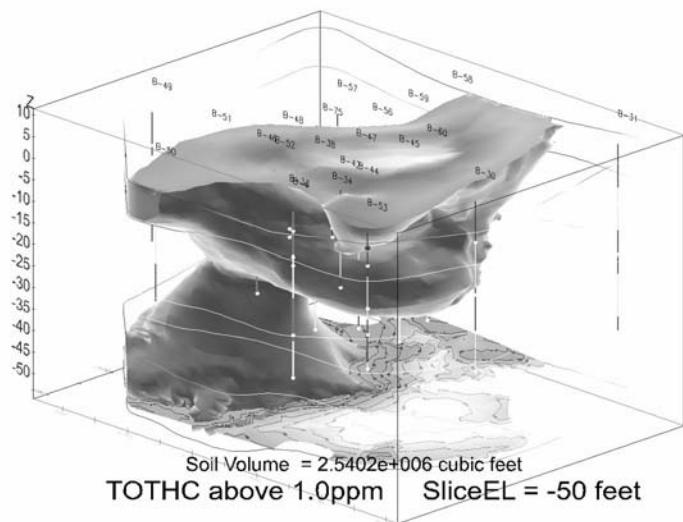
1. 汚染地盤の状況

汚染地は、鉄道ヤード (600×400feet) であり、最高 80,000ppm の汚染物質 (複合したハイドロカーボン) が検出されている。汚染地の地盤状況を図一 1 に示す。

汚染物質の推定 (データ補間) には、三次元クリギング (kriging) 手法を用いている。この方法は、アメリカ EPA が推奨している 2次元クリギングを 3次元的に拡張したものであり、汚染物質の総量推定には非常に有効であると考えられる。

汚染の調査は、24本のボーリングによって明らかになっており、これをもとにクリギング手法を用いて 3次元化したものが図一 1 である。

なお、地盤の 3次元化については、地質構成と地下水も合わせて推定できるようなモデルを構築した。



図一 1 汚染地の地盤状況

2. 研究の方法

右の図-2フローチャートに沿って説明する。

研究は、まず、図-1の汚染地盤モデルから、深さ方向に3～6feet*ごとに水平断面を作成し、これを用いて、任意の地点の汚染濃度を読み取れるようにした(図-3参照)。

次に、地下地盤の汚染状況がまったくわからないと仮定して、地表調査により判明した表層汚染のほぼ中心を基点に200フィートのメッシュで5本の初期メッシュボーリング(基礎調査)の計画をたて、ボーリング地点の深度ごとの汚染量を先の14の水平断面から読み取った(図-4. 初期メッシュボーリング)。

さらに、メッシュ法による調査では、メッシュ間隔を100feetに狭めて合計11本を追加し、汚染量を算出した(図-5 2次メッシュボーリング)。

一方、不確実性*を指標にしたボーリング位置の探索は、5本の初期メッシュボーリングを基点とし、11回行い、同様に汚染量を算出して比較検討した(図-6～図-7)。

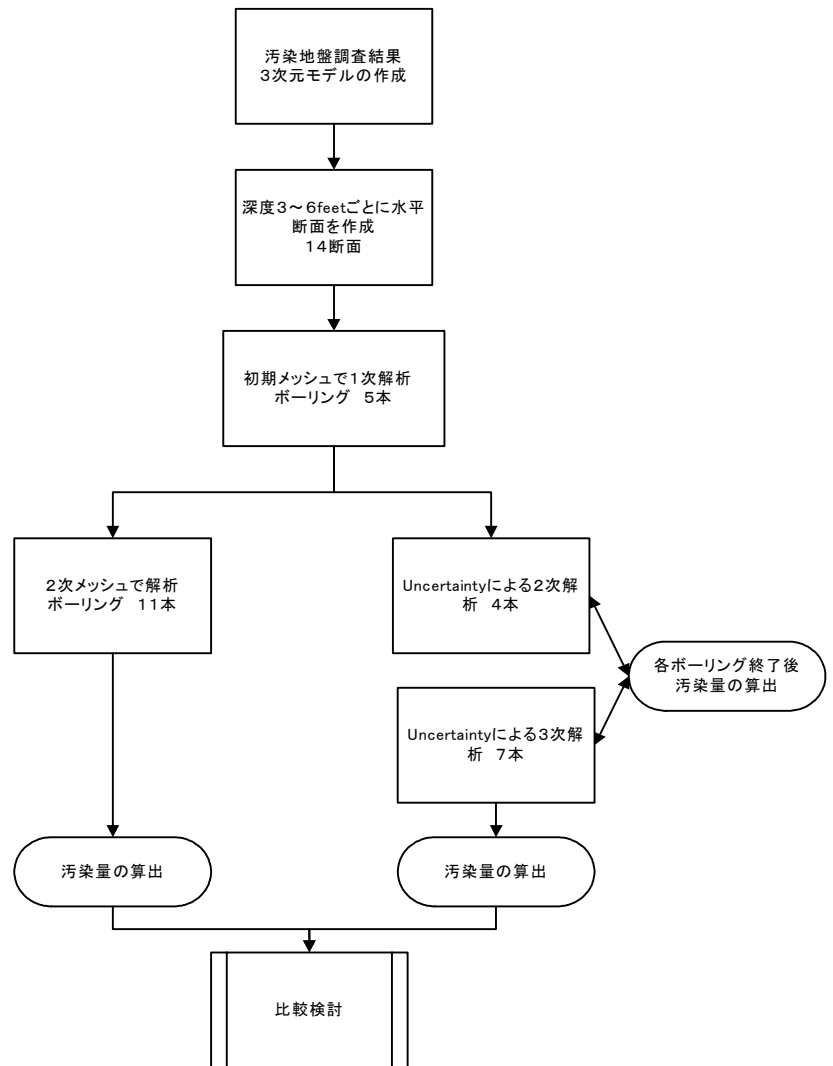


図-2 フローチャート

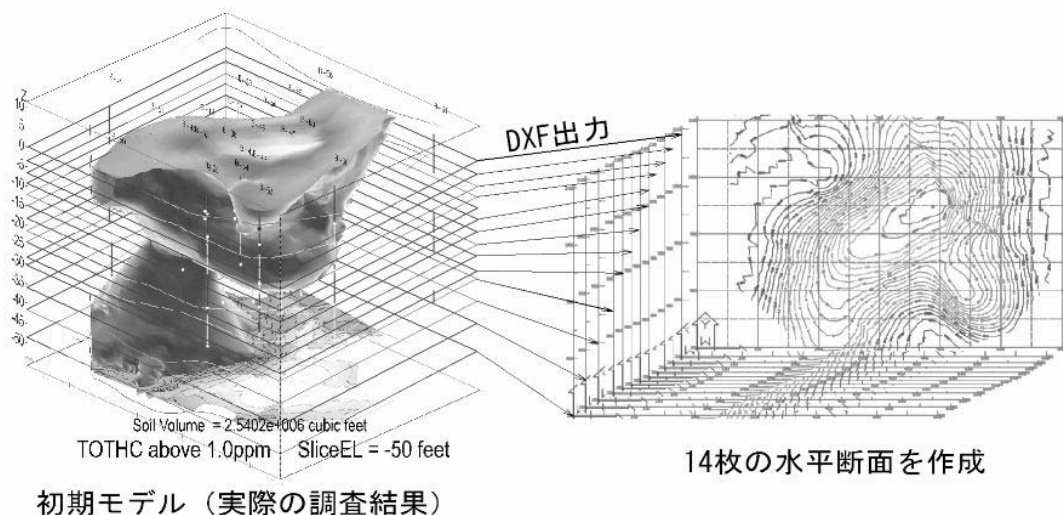
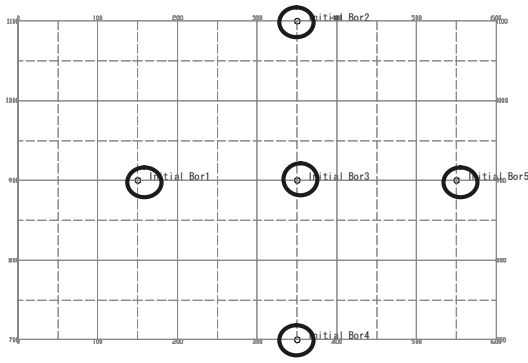


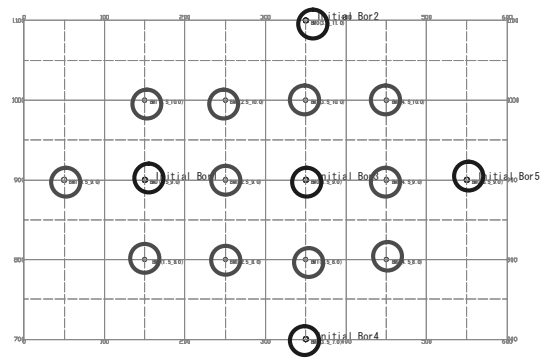
図-3 水平断面図の作成概念

* 1feet=0.3048m

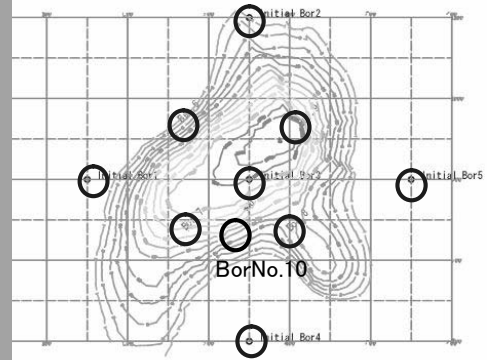
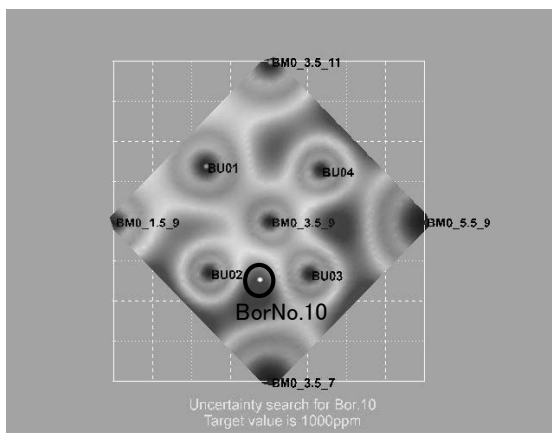
* 不確実性 (uncertainty) : クリギング手法によって推定された汚染地盤の濃度が高くかつ、既存調査点から離れており、データの信頼度が低いことを数値化したもの。数値が高いと不確実性が高い (信頼性が低い)



図一4 初期メッシュ (200feet) の形状

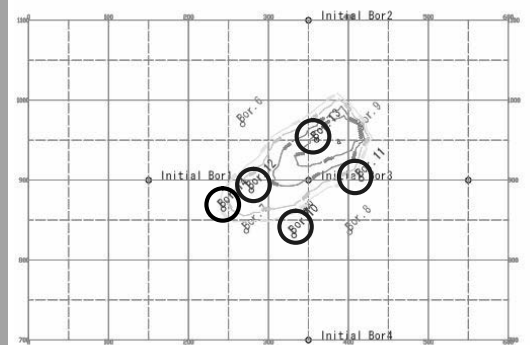
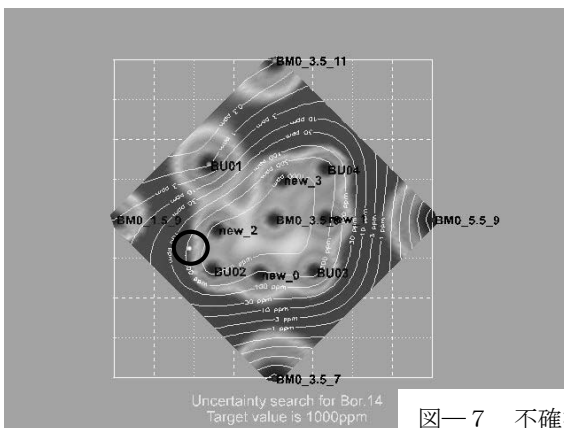


図一5 2次メッシュ (100feet) の形状
11本の追加 合計16本のボーリング



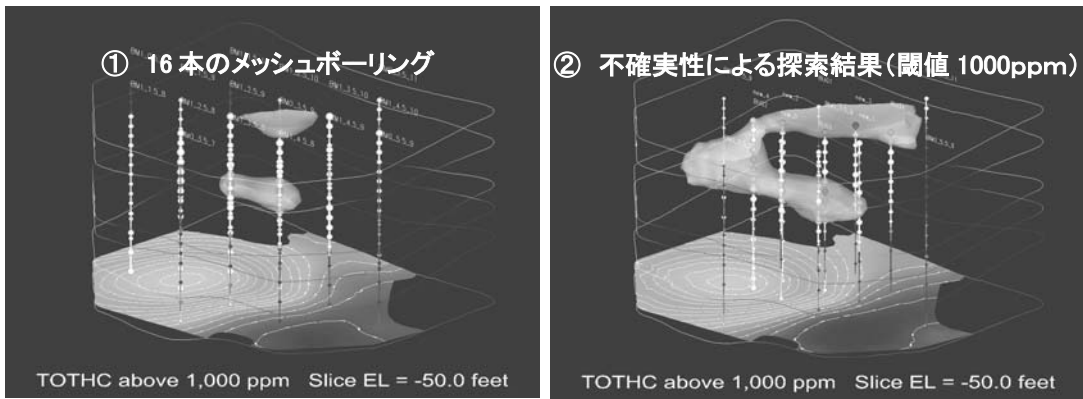
図一6 不確実性 (Uncertainty) を指標としたボーリング地点の2次探索

図一6は、初期メッシュ5本+4本の探索状況 文字はボーリング地点 (不確実性が低い箇所) で、その間の暗色部分が不確実性の高い部分。次のボーリング地点 (Bor.10) は、左図中の黒円の中の点。右図は実際のボーリング位置と濃度の関係 (水平断面) これで、1 ppm の範囲がほぼ確定された。



図一7 不確実性による3次探索

図一7は、高濃度の汚染範囲を確定させるため、探索の閾値を 1000ppm としてボーリング地点を探索した結果である。高濃度の部分は、汚染量全体を支配的に規定するので、この作業が重要であることがわかった。



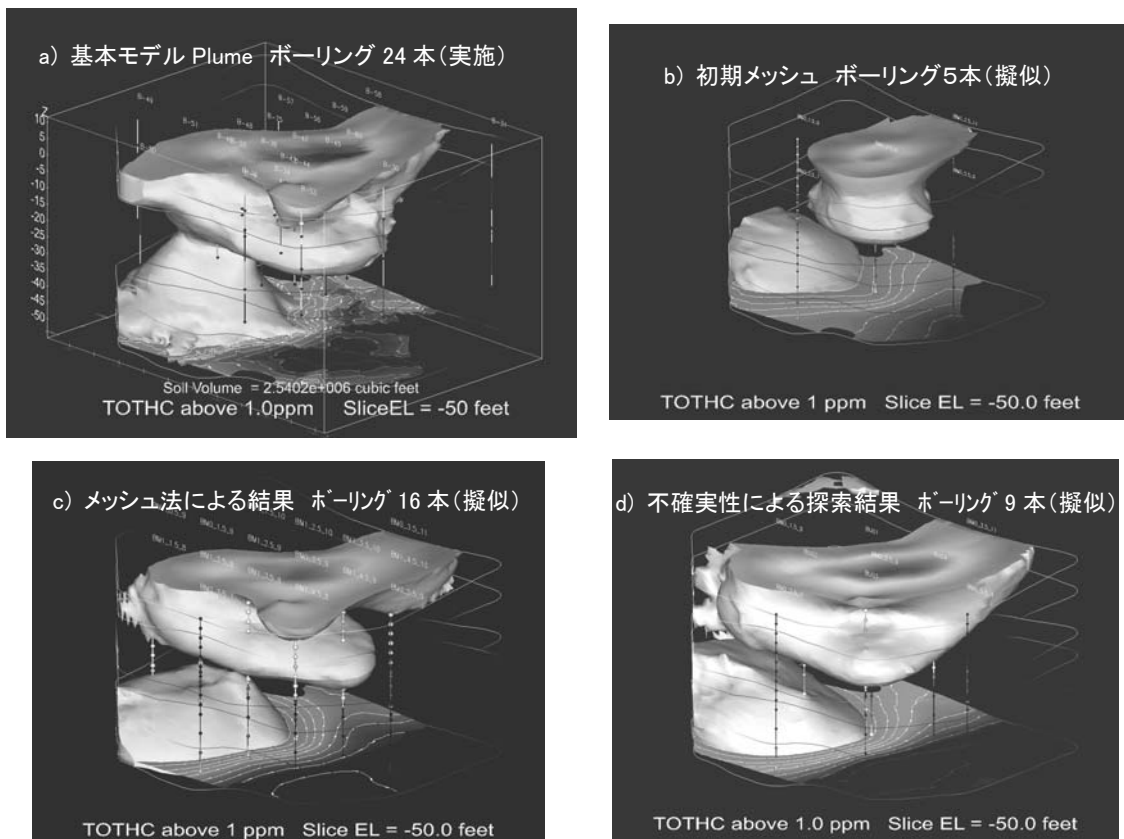
図一八 濃度 1000ppm 以上の Plume の比較

図一八は、①16本のメッシュボーリングと②不確実性を指標として探索した16本のボーリングで推定した高濃度(1000ppm以上)のプルーム(plume)の3次元クリギング結果である。②では、3次探索の閾値を1000ppmとしたので、高濃度の汚染範囲を比較的良く捕らえることができた。①②とも同じ1000ppm以上の範囲であるが、調査地点の違いでこれだけの差が生じている。

図一九は、濃度1ppm以上のPlumeの比較である。a)は実際に24本のボーリング調査を行って推定した基本モデルである。これに対してb)は図一二のフローに従って作成した初期メッシュの5本(擬似ボーリング)で解析した結果 c)は2次メッシュの16本 d)は不確実性を指標とした9本の結果である。

メッシュボーリングでは、初期のメッシュは汚染状況を正確に把握できないが、2次メッシュではほぼ形状を把握できている。しかし、Plume中央部の汚染物質の濃度が基本モデルに比較して薄くなっているのがわかる。これは、図一八で説明した高濃度の汚染範囲が正確に把握できていないことを示している。さらに、メッシュ法では、初期メッシュ→2次メッシュへと、不連続的に結果が算出されるという特徴がある。

一方、不確実性による探索では、9本目で1ppm以上のPlume範囲をほぼ推定している。また、Plume中心部の濃度も基本モデルに近づいており、効率的な調査が行われていると考えられる。



図一九 濃度 1ppm 以上の Plume の比較

3. 汚染物質の推定

メッシュ法による汚染量推定結果と不確実性を指標とした探索による汚染量推定結果を下図に示した。

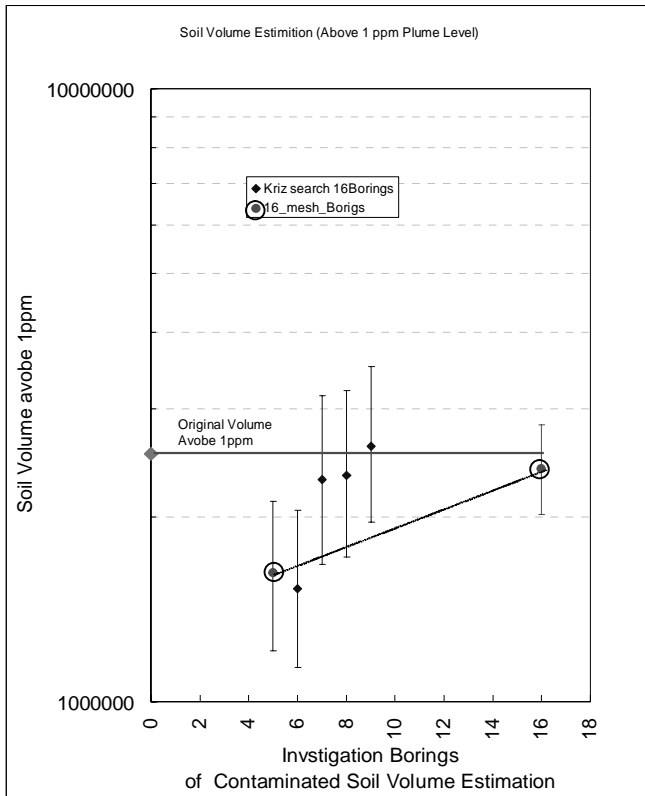


図-10 推定汚染土量とボーリング本数

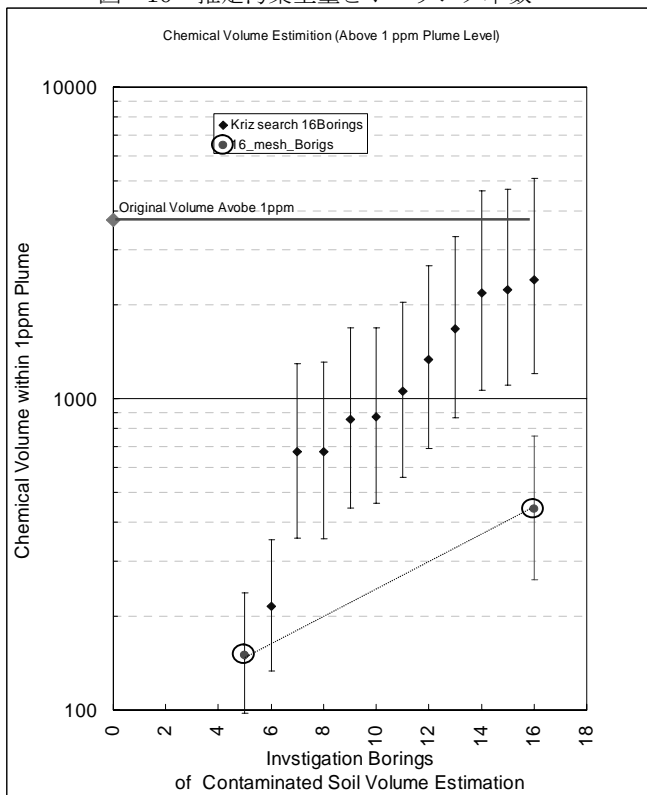


図-11 推定汚染物質質量とボーリング本数

3-1 汚染範囲とその土量の推定

左図（縦軸は log スケール）は、1 ppm 以上の汚染地盤の土量（Soil Volume）を算出した結果である。16本のメッシュボーリングで、ほぼ土量を推定できている。

一方、不確実性を指標とした方法では、合計9本（初期メッシュ+4本の探索）で同様の結果が得られている。

このように、どちらの方法でも、ある一定以上の汚染濃度の範囲を特定することは可能であるが、調査数量、調査期間、調査解析の煩雑さを考えると、メッシュ法よりも探索によって順次汚染範囲を特定していった方が、全体の汚染状態をより早く、かつ安価に推定できる可能性がある*。

以前は、汚染状況をまとめるのに調査結果→水平断面図→体積の算出という煩雑で時間のかかる取りまとめをしていたが、3次元クリギングを行えば、数分でその結果が得られる。すなわち、調査→汚染量の推定→次の調査地点の決定がすばやく行えるため、汚染濃度分析のみがクリティカルなファクターであり、上記のような不確実性による探索のメリットを生かせる条件が整ってきたものと考えられる。

なお、最近はより効率的な汚染地盤調査が可能となっている（協同組合関西土質研究センター、2003など）。

3-2 汚染物質の総量の推定

左図は、3-1で推定された土量の中にどの程度の汚染物質（今回は複合 hidrocarbon）が賦存しているかを算出したものである。

これによると、16本のメッシュ調査では、基本モデルの約12%しか推定できていない（図は log スケールであることに注意）。

一方不確実性による探索では、メッシュと同じ合計16本で、64%の推定ができています。さらに、3次元システムの標準偏差を用いて解析すれば、ほぼ基本モデルの汚染物質質量を把握することができた（図の縦棒が標準偏差を利用した最大最小の範囲を示す）。

土壌汚染は、大気汚染とは違い、拡散が比較的少なく、小規模な範囲に高濃度の物質が滞留し、3次元空間で log スケールで濃度が増加する。このような場合は、メッシュ法では汚染量把握に限界があるものと思われる。すなわち、不確実性の概念を用いて、次々と高濃度の可能性のある地点を調査していくことが必要である。

これは、探鉱と類似している。鉱山会社が、最終的に必要なのは、埋蔵範囲だけではなく、埋蔵量であり、採算性である。そのためには、地質屋が地表踏査・物理探査の結果を総合して、ボーリング地点を選定し、鉱脈の分布とその品位を正確に把握する。メッシュ法によるボーリングの

みでは、偶然、高品位の鉱脈を掘り当てる以外に、その可能性はない。

* 3次元表示解析ソフトの初期購入コストが必要であるが、たとえば、断面位置を指定するだけで、任意の方向の汚染濃度コンターを DXF 出力できるので、断面作成の手間は飛躍的に向上する。

4. 汚染量探索結果の比較検討とリスク分析

次に、この結果をリスク分析という観点から考察する。下図は、擬似ボーリングによって推定された 1 ppm 以上の汚染物質の賦存量と基本モデルの 1 ppm 以上の汚染物質質量との差分についてまとめたものである。図の横軸は、擬似ボーリングによる推定汚染量、縦軸は、基本モデルとの差である。

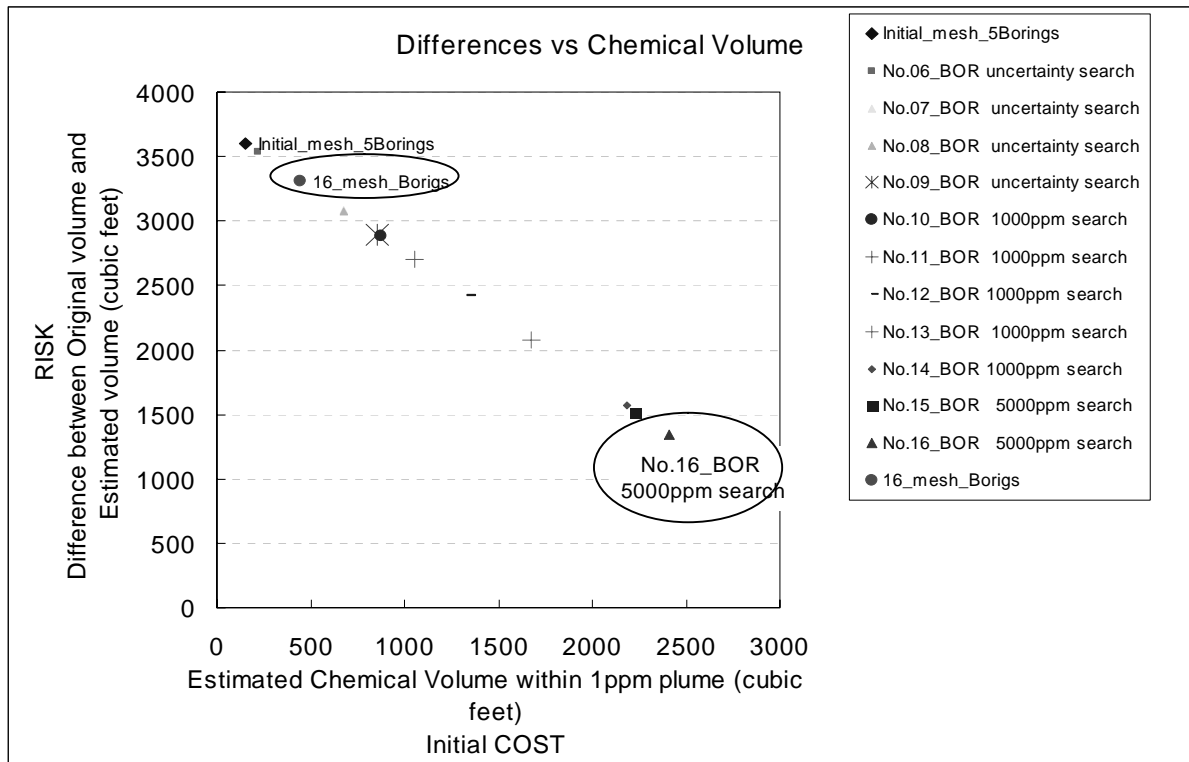


図-12 基本モデルとの差異と推定汚染物質質量の関係

この図の意味するところは、大津（2003）のリスクー期待値平面に相当するものである。横軸は汚染物質を浄化するために期待される初期投資コストに相当し、縦軸はそのときの実際の処理量との違い（リスク）に相当する。

これをみれば、同じ調査費用を投資しても、メッシュ法と不確実性を指標とした探索とでは、初期投資コストとリスクの関係がまったく逆転していることが読み取れる。すなわち、メッシュ法はローコストーハイリスク、後者はハイコストーローリスクとなる。

今後汚染地盤浄化をする上で、調査方法の違いは浄化方法によっては、非常なリスクを負う可能性があると思われる。すなわち、いくら浄化しても汚染物質がなくならず、費用と除去期間が当初の数倍に上るということも考えられる。

5. まとめと今後の課題

不確実性を用いた方法は、メッシュボーリングの 60%の調査数量で汚染土壌範囲の推定が終了した。また、汚染土壌に含まれる化学物質の総量では、メッシュボーリングは不確実性を用いた方法の 2 割程度しか推定できなかった。この理由は汚染物質の濃度分布が log スケールで変化するため、高濃度の汚染域を効率的に探索できる手法を用いないと正確な推定ができないことによる。

今後、汚染地盤の調査では、不確実性を指標とした効率的な探索と 3次元空間解析による汚染物質賦存量の正確な把握が、調査費用および、浄化費用推定に大きく寄与するものと考えられる。今後は、ケーススタディを増やすとともに、実際の汚染調査費用・除去費用・対策方法とその工期や変更などの変動ファクターを加味した検討を行う予定である。

6. 謝辞

米国 CTech 社 Reed D. Copsy 氏には、三次元解析手法について多くの有益な示唆を戴くとともに、基本モデルとなる汚染地盤の情報の提供を戴いた。また、京都大学大津先生には、リスク分析という概念についてご教示いただいた。ここに御礼申し上げます。

引用文献

- 協同組合関西土質研究センター，2003；土壌・地下水汚染状況の迅速なサイト調査システム及び評価方法の確立並びに 3D 表示システムの開発。平成 14 年度中小企業経営革新支援対策費当補助事業報告書，89 p.
- 大津宏康，2003；地盤工学におけるリスクマネジメント。リスク工学の基礎理論と実務への応用に関する講習会，地盤工学会，pp13-22.