

土壌圏から見た地球生命圏の温暖化・ オゾン層破壊・生物多様性

陽 捷行

木星は天球を十二年で一周する。今年は、この自転が動物の名前に託された十二支のうち辰年にあたる。古代中国の天文学が発祥と考えられる十二種の動物のうち、ただ一つ架空の動物である龍の年である。不幸にも龍の逆鱗に触れたのか、元旦早々、能登半島は激しい震災に見舞われた。被害を受けられた方々の健康と、被害地の早急な復興を心から願っている。ほぼ十三年前の「東日本大震災：3.11」の大惨事をも思い起こし、地球生命圏は絶えず変動を続けていることを認識せざるをえない。これらの事象は、地球生命圏が人間圏に与える影響である。

ここでは、それとは逆に、人間圏が地球生命圏に大きな変動を与えている温暖化・オゾン層破壊・生物多様性について、以下の項目にそったお話しをしたい。

- 1) いま、地球生命圏は、
- 2) 地球生命圏における土壌圏の役割、
- 3) 共生・共存の時代、
- 4) 温暖化・オゾン層破壊・生物多様性、
- 5) 適応・対策技術の例、
- 6) 明日を生きる。

なお必要な項目の二、三について、以下に若干の説明をしておく。

◆人間圏の誕生：

地球は、46億年前に誕生した。時間と空間と物質だけが存在するカオス（混沌）の世界であった。その後地球は徐々に冷え、物質は地殻圏・大気圏・水圏・土壌圏・生物圏へと分化した。ホモ・サピエンスは認知革命・農業革命・科学革命を通じて、これらの圏を活用し農業・牧畜・漁業・工業などをとおし、繁栄をつづけている。

その結果、新たな物質圏が分化した。人間圏（Anthroposphere）の誕生である。いまや人間圏は80億以上の人口に肥大し、ほかの圏、すなわち地殻圏・大気圏・水圏・土壌圏・生物圏を絶えず圧迫しつづけている。その現象は、地球全体と地球に生きるすべての生命体に大きな影響を及ぼしている。いわゆる地球環境問題である。

それは、大気汚染・酸性雨・水質汚染・土壌汚染・土壌侵食・オゾン層破壊・温暖化・海面上昇・凍土融解・生物多様性の減退・生態系の破壊など、枚挙にいとまがない。

◆さし迫った地球環境問題：

上記の問題のなかで早急に解決を必要とする事象は、温暖化と生物多様性とオゾン層破壊である。今回は許された時間のなかで、これらの現象や対応策などについて話をすめる。

◆地球環境問題は土壌問題：

地球の環境問題は、人口の増加すなわち人間圏の他圏への転轍に由来する。現在、世界の人口は 80 億人である。毎年 1 億人に近い増加傾向にある世界人口は、30 年後には 100 億人を超える。地球の環境容量の限界値は 100 億人だと、多くの識者が予測する。地球環境は、ますます人口圧に窮することになる。

結局、地球環境問題は人口問題にある。人口問題は食料問題で、食料問題は農業問題である。農業問題は土壌問題になる。人間圏による地球環境問題は、巡り巡って、土壌問題に帰結する。そのうえ、すでに 100 億人を養うだけの土壌は地球上に分布していない。

「汚れを運ぶ道」を科学する！

～浄化槽汚泥の収集・運搬の解析～

水環境担当 見島 伊織

1 はじめに

個別分散型の排水処理として浄化槽が広く用いられています。浄化槽は処理をしてきれいになった水を河川などに流す一方で、汚泥と呼ばれる固形の汚れはその槽の中に貯留します。貯留された浄化槽汚泥はバキューム車や汚泥濃縮車を用いて収集され、汚泥処理施設に運搬されます（図1）。汚泥処理施設は人口減少や老朽化に伴って統合や広域化が検討されており、これによりバキューム車等の走行距離・時間が従来よりも増大すると懸念されます。そのため収集・運搬の効率化は重要な課題となっています。

汚泥濃縮車は浄化槽内の中間水に含まれる汚泥を凝集処理によって回収し、その分離液を水張りに活用できるため、引き抜きをした浄化槽に水張りのために戻る必要がないという画期的な特徴があります。このため汚泥濃縮車の導入は浄化槽汚泥の収集・運搬の効率化に貢献できると期待されています。本研究全体では、公益財団法人日本環境整備教育センターおよび東北大学と共同で、汚泥濃縮車の活用を軸として、濃縮車導入の情報収集および調査、濃縮汚泥に適した資源化システムの開発、汚泥濃縮車導入による環境負荷の評価を行っています。特に CESS では、対象地域の浄化槽汚泥の収集・運搬ルートを解析して総走行距離算定することで、既存のバキューム車の代替として濃縮車を活用した際の有用性を評価しています。このような、浄化槽の「汚れを運ぶ道」を科学した結果を中心にご紹介いたします。

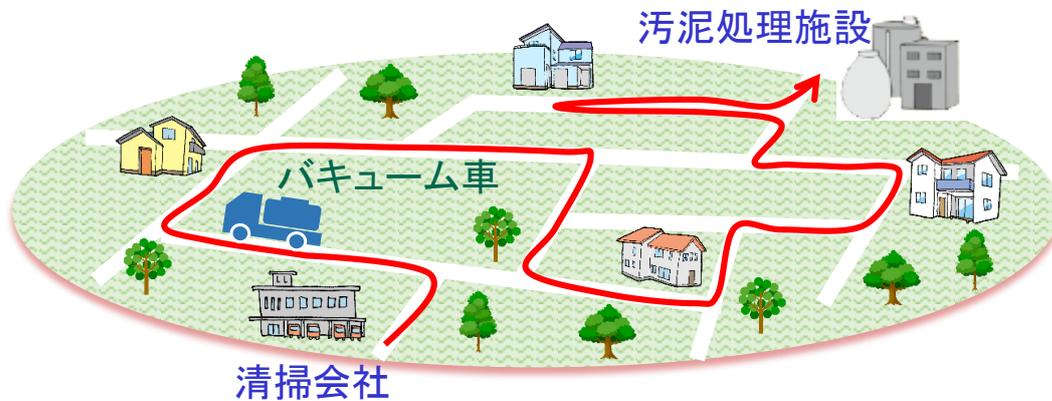


図1 浄化槽汚泥の収集・運搬のイメージ

2 浄化槽を取り巻く諸事情

浄化槽には大きく分けて2つのタイプがあることはご存じでしょうか。単独処理浄化槽と合併処理浄化槽です。単独処理浄化槽はトイレからの排水のみを処理しますが、合併処理浄化槽はトイレの排水に加えて、キッチン、洗濯機、お風呂などから排水のすべてを処理できます。合併処理浄化槽は生活排水全体をきれいにでき環境への影響を大きく減らすことができるため、新設する浄化槽は合併処理浄化槽に限られています。埼玉県には40万基以上の浄化槽がありますが、約半数は単独処理浄化槽です。この既設の単独処理浄化槽から合併処理浄化槽への転換も課題のひとつとなっています。

3 汚れを運ぶ道を科学するアプローチ

埼玉県内の中規模の人口を有する市を対象地域に設定しました。この市の浄化槽設置基数は3万基程度であり、その内合併処理浄化槽は約60%、単独処理浄化槽は約40%です。市の全域は、4つのゾーン（A、B、C、D）に分けられており、現状は3つのし尿処理施設（処理場X、Y、Z）に浄化槽汚泥が運搬されています（図2）。将来においてはし尿処理施設が処理場Yに統合され、市全体の浄化槽汚泥が処理場Yに運搬される予定です。関係する行政機関から対象とする市の浄化槽データを得ました。GISのソフトウェアに浄化槽やし尿処理施設の位置を入力して、浄化槽汚泥の収集・運搬にはどのようなルートになるかを調べました。バキューム車使用時は汚泥収集後の水張りが必須となるため、し尿処理施設で汚泥の投入を行った後に同様の浄化槽を訪問することとし、濃縮車使用時は再度浄化槽を訪問せず直接清掃業者に移動する条件としました。単独処理浄化槽と合併処理浄化槽の違いも考慮しながら、浄化槽すべてを回りきる条件で解析をし、走行距離の合計を算定しました。

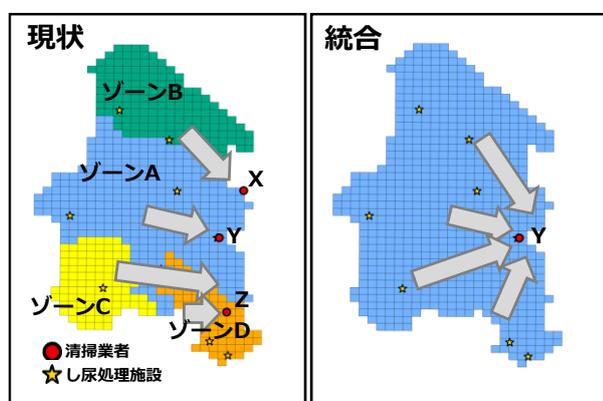


図2 解析対象とした地域の状況

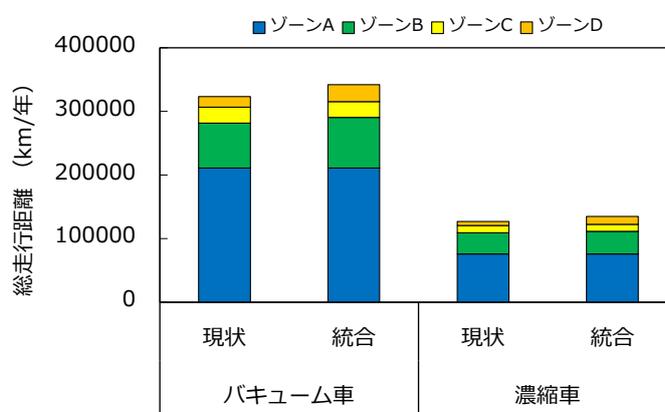


図3 総走行距離の比較

4 浄化槽を活用した水環境管理へ

バキューム車、濃縮車を用いた場合に分けて総走行距離を図3に示しました。浄化槽の設置基数が多いゾーンAで最も総走行距離が多くなりました。濃縮車使用時は、すべてのゾーンで総走行距離が大幅に減少しました。バキューム車から濃縮車へ変更することにより、概ね40%程度に総走行距離を削減できることが試算されました。図3には現状と統合の条件での浄化槽汚泥の収集・運搬に要する総走行距離も示していますが、バキューム車、濃縮車使用のいずれの条件においもし尿処理施設が統合された場合でも、総走行距離はほとんど変化しないことが示唆されました。このように、濃縮車導入やし尿処理施設の統合の際の浄化槽汚泥の収集・運搬に必要な走行距離を定量的に科学しました。研究の枠組み全体で、収集・運搬および汚泥処理・資源化におけるCO2削減量を算定できており、濃縮車の導入により大きなCO2削減効果を見込んでいます。今回使用した手法を用いることで、浄化槽を活用したよりよい水環境管理へ貢献していきたいと思っております。

謝辞

本研究は、(独)環境再生保全機構の環境研究総合推進費(JPMEERF20211005)により実施した。関係する行政機関から浄化槽に関するデータ提供を受けました。ここに記して謝意を表します。

「ゴミの終活」を科学する！

～最終処分場の新たな管理への挑戦～

資源循環・廃棄物担当 磯部 友護

1 はじめに

ゴミの最終処分場と聞いてどんな場所をイメージされるでしょうか。

家庭から出たゴミや産業廃棄物を山奥でひっそりと埋めている怪しい場所？臭いがしてハエやカラスが飛び回っている危険な場所？もちろん、そんなことはありません。日本の最終処分場は周辺の環境に影響が出ないように高度な技術で設計されており、自治体や民間企業などの運営団体によって日々安全に維持管理がされています。

また、ゴミリサイクルへの意識の高まりやリサイクル技術の向上によって、排出されるゴミの量だけでなく、最終処分に埋め立てられるゴミの量も漸減しており、最終処分場を長期間にわたって使用できるようになってきています。しかしこのことは、施設の老朽化やトラブルへの対応が増えるだけでなく、最終処分場を廃止するまでの期間も延びてしまうことにもなります。埋め立てが終了した最終処分場は長期間にわたって環境モニタリングなどの維持管理を行い、法律に定められた基準（廃止基準といいます）に合致すると、廃止することができるようになります。この廃止期間を予測することは非常に難しく、最終処分場の維持管理に携わる実務者や設置団体にとっては、非常に重要な課題となっています。

そこで、環境科学国際センターでは（国研）国立環境研究所との共同研究で、最終処分場の廃止期間を予測するための調査研究を実施するとともに、埼玉県内の一般廃棄物最終処分場を管理する実務者や設置団体が、維持管理や廃止に関する情報共有・意見交換を行うための場を構築してきました。本講演会では、この成果についてご紹介します。

2 最終処分場の廃止予測に向けて

私たちは、最終処分場の廃止期間を予測するために、まず、埋め立てられた廃棄物の状況や雨水が内部をどのように通っていくかについて調査を行いました。実際最終処分場に注水し、比抵抗探査という手法を用いて最終処分場内部の水分分布状況を調査したところ、測定された比抵抗値は不均

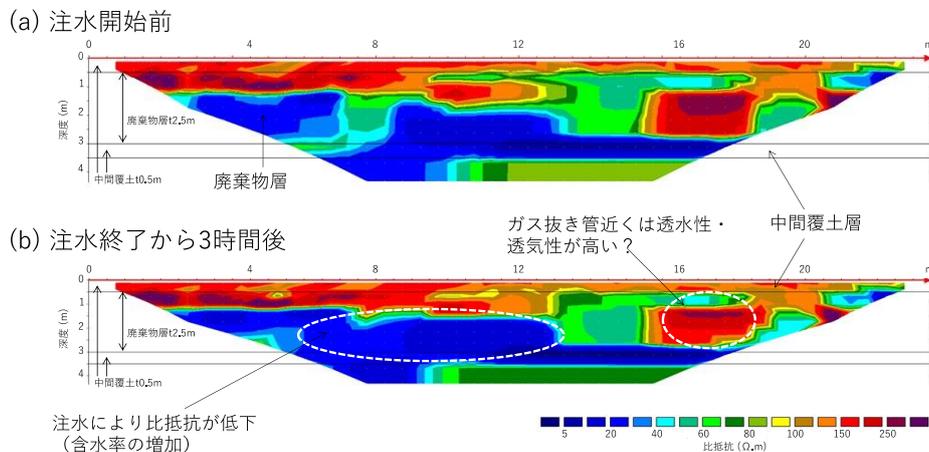


図1 比抵抗探査による最終処分場内部の水みち探索

質に変化しており、水分は均一に地下方向へ移動していないことが明らかとなりました（図 1）。さらに、最終処分場内部の廃棄物を掘削採取し X 線 CT 分析を行うことにより、埋立廃棄物の密度分布や金属類の存在などを可視化することができました。これらの結果から、処分場内部では不均質な間隙構造に起因する水みちが存在しており、この水みちが水分の重要な移動経路になっていることが示唆されました。

この水みちを通じて最終処分場の中を移動する水分は、浸出水として最終処分場外に排出されますが、最終処分場の廃止期間を予測するためには、コンピューターシミュレーションによって浸出水に含まれる化学物質濃度が時間経過に伴って、どのように低減していくことを予測するためのモデルの構築が不可欠となります。これまでに開発されてきた予測モデルの多くは、計算負荷が高く専門家しか扱うことができないという制約がありました。この課題を解決するため、私たちは先述した水みち探索に関する研究成果や、日本各地の最終処分場から収集した浸出水濃度や処分場構造などの実測データを活用した新たな予測モデルを開発しました。これを Web 上で作動させることにより、実務者と研究者の相互利用による予測システムの改良を進めています（図 2）。

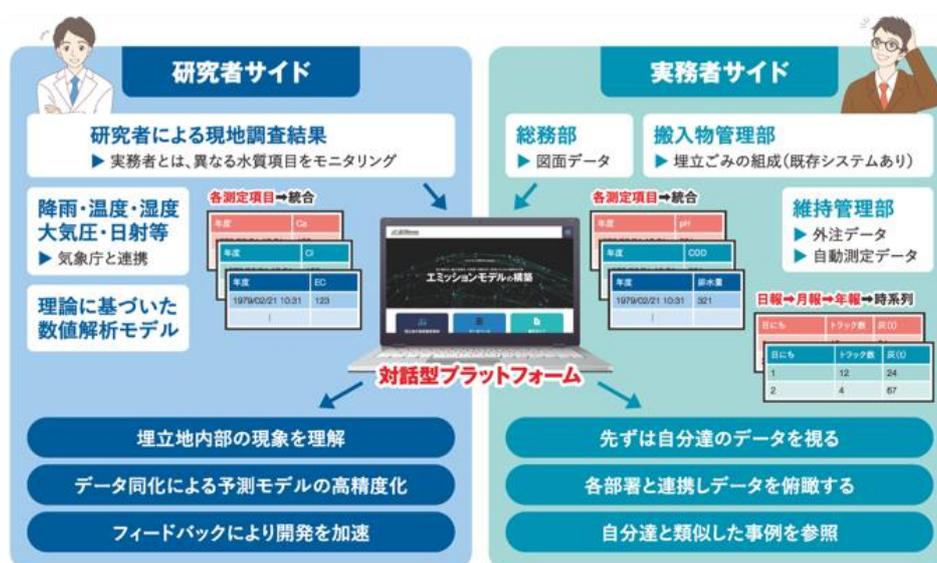


図 2 実測データを活用した予測モデルを用いた最終処分場の廃止予測システムのイメージ

3 県内最終処分場設置団体連携会議の設立

前節で述べたような調査研究結果を最終処分場の実務者の方々に活用してもらうためには、実務者と研究者が意見交換や情報共有できる場があることが重要となります。実際に、私たちが県内の最終処分場設置団体に行ったアンケート調査の結果から、最終処分場の運営における課題解決や廃止に関する情報共有のため団体間による連携への要望が高いことが明らかとなっています。そこで、環境科学国際センターや環境整備センターが中心となり「県内最終処分場設置団体連携会議」という連携の場（以下、連携会議と省略します）を 2021 年度に設置しました。これまでに 5 回の連携会議を開催し、廃棄物研究の最前線で活躍する研究者による最新情報の提供や、参加団体からの維持管理に関する実例報告、参加団体同士でのグループディスカッションなどに加え、最終処分場の視察や廃止のための調査方法のデモンストレーションといった、様々な取り組みを通じ、参加団体間での交流と知識の向上を図っています。さらに、前節で紹介した最終処分場の廃止予測システムを参加団体の実務

者の方に実際に使用してもらい、その使い勝手や実務への実装に向けた課題などの意見交換を通じたフィードバックをもとに改良を進めています（図3）。

このような、実務者と研究者が同じ目線で双方向でナレッジ共有ができる対話型プラットフォームの構築は、廃棄物管理の分野においては全国初であり、他県や専門家からも高い注目を集めています。



図3 最終処分場設置団体連携会議

4 まとめ

最終処分場は、その管理責任を有する市町村などの管理団体による不断の努力によって管理されていますが、今回、私たちが設立した連携会議を契機として、団体間での連携による課題共有や情報交換が始まり、交流関係の醸成も進んでいます。さらに、私たちの

調査研究によって開発が進められている最終処分場の廃止予測システムが、科学的な根拠に基づいた最終処分場の維持管理や運営のための強力なツールとなるとともに、今後の最終処分場における新たな管理手法となるべく連携会議の開催とともに調査研究を続けています。

紹介したプラットフォームに関する文献

最終処分場の実用的な将来予測手法とそのための対話プラットフォームの構築、石森洋行、磯部友護、石垣智基、山田正人、都市清掃、363（74）、pp.14-21（2021）

謝辞

本研究は環境研究総合推進費「先が読めない廃止期間を、半物理・半統計的に評価するための最終処分場エミッションモデルの構築」（課題番号3-2103）によって行われました。

「自然由来の土壤汚染」を科学する！

～縄文時代から地中に眠り続ける土壤汚染の種～

土壤・地下水・地盤担当 石山 高

1 はじめに

近年、土壤汚染は大きな環境問題の一つとなっています。環境省の調べでは、令和3年度までに全国で約 50,000 件の土壤汚染調査が行われており、そのうちの半数に相当する約 25,000 件で汚染が見つかっています¹⁾。土壤汚染には、人間の社会・経済活動により発生する人為的な汚染のほか、自然的原因により発生する汚染が存在します。自然由来の土壤汚染は人為汚染と違って地域一帯に汚染土壤が広がっているため、処理しなければならない汚染土壤量が膨大となることで土地所有者等に過大な経済的コスト負担を強いることが問題となっています。

自然由来の土壤汚染としては、土壤微粒子の生成による鉛や砒素の環境基準超過事例などが知られていますが、本講演では自然由来汚染土壤の代表である海成堆積物について科学してみます。具体的には、①土壤汚染の発生メカニズム、②埼玉県内における海成堆積物の分布状況、③海成堆積物に起因する環境汚染リスクと汚染リスクの地域特性などについて説明します。

2 海成堆積物による土壤汚染の発生メカニズムと汚染リスク

海成堆積物は、土地開発などで地中から掘り起こされた後、大気中の酸素や雨水と接触することで徐々に土壤の酸性化が進み、鉛 (Pb) やカドミウム (Cd) などが溶出し始めます (図1)。海成堆積物には、黄鉄鉱 (FeS₂) と呼ばれる硫黄鉱物が含まれていることが知られており、この黄鉄鉱が土壤微生物である硫黄酸化細菌により分解されることで硫酸を生成します²⁾ (図1)。我々の実験データからも、土壤 pH の低下とともに硫酸が生成することや、硫酸イオン濃度 (SO₄²⁻) の増加と共に硫黄酸化細菌が増殖することが科学的に実証できています (図2)。掘り起こした直後の海成堆積物からは、砒素 (As)、フッ素 (F)、セレン (Se) などの溶出も報告されています。海成堆積物では、掘り起こした直後に生ずる砒素やフッ素の溶出 (短期汚染リスク)、しばらく時間が経過してから発生する土壤の酸性化 (長期汚染リスク) という2つの環境汚染リスクが存在します。

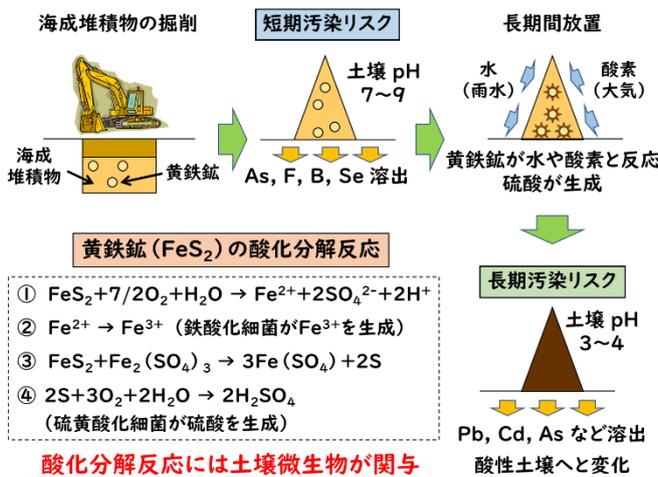


図1 海成堆積物の汚染メカニズム

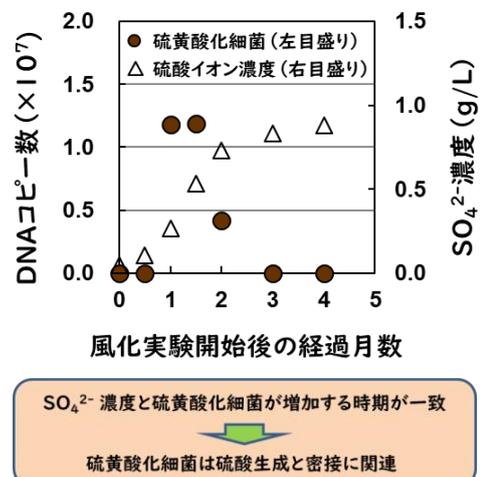


図2 SO₄²⁻ 濃度と硫黄酸化細菌の関係

3 県内における海成堆積物の分布状況

県内から入手した地質試料（約 60 地点）に含まれる硫黄含有量を分析することで、県内における海成堆積物の分布を調べてみることにしました。その結果、県内3地域（中川低地、荒川低地南部、大宮台地南部の谷底低地）に海成堆積物（硫黄含有量 0.4%以上）が分布していることが分かりました（図3）。これらの海成堆積物は、今から 6000 年前の縄文海進時^{注1)}に堆積したものです。この時代は地球規模での温暖化が進行し、これにより極地の氷山や氷河が溶けることで海水面が今よりも2~3 m 高い状態にありました。大宮台地南部の谷底低地では深度 4m 付近から、荒川低地南部や中川低地では深度 10m 前後から海成堆積物が認められ始めています。

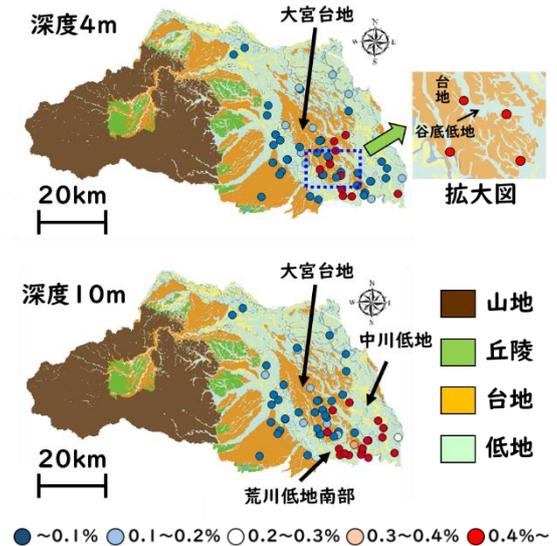


図3 硫黄含有量の分析結果
(硫黄含有量 0.4%以上の地[●]に海成堆積物が分

4 県内における海成堆積物の分布状況

県内3地域に分布する海成堆積物の汚染リスクを比較したところ、中川低地の海成堆積物は短期汚染リスクが顕著であったが（図4上）、谷底低地の海成堆積物は長期汚染リスクが深刻であることが分かりました（図4下）。谷底低地の海成堆積物では直上に腐植土層が厚く堆積していたことから、この地域の海成堆積物は強い還元環境下で堆積したものと考えられます。還元環境は黄鉄鉱の生成を促すことから、大量の硫酸が生成して土壌の酸性化が著しく進行します。一方、中川低地では海成堆積物の直上に砂層が存在していたことから、酸化的环境下で海成堆積物が堆積したものと考えられます。本地域の海成堆積物は、貝化石を大量に含み、掘り起こした直後は強いアルカリ性を示すため、砒素やフッ素の溶出を促進します。このように、両地域での堆積環境が海成堆積物の汚染リスクに大きな影響を及ぼしているのです。

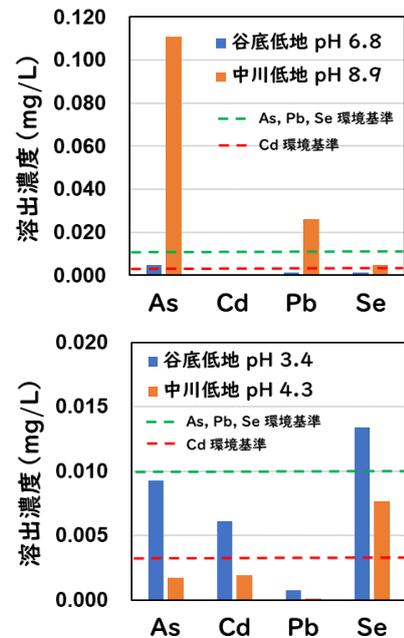


図4 短期・長期汚染リスクの比較

用語解説

注1) 縄文海進：縄文時代におこった気温と海水面の上昇により、関東内陸の奥深まで海水が侵入した現象

文献

- 1) 建設工事における自然由来重金属等含有土砂への対応マニュアル検討委員会（2010）建設工事における自然由来重金属等含有岩石・土壌への対応マニュアル
- 2) V. P. Evangelou and Y. L. Zhang (1995) A Review: Pyrite oxidation mechanisms and acid mine drainage prevention, *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 25, 141-199.