

(S1-12) 潜在的汚染サイトにおけるサイト概念モデルの構築（ISO 21365）について

○古川靖英¹・中島 誠¹・保賀康史¹・ISO/TC190 検討部会¹

¹ 土壌環境センター

1. 背景および目的

サイト概念モデル（Conceptual Site Model：以下、CSM）は調査の計画時、リスク評価実施時、浄化工事の実施時、その後のモニタリング等の計画時に適用することのできるツールである。ISO/TC190 地盤環境におけるISO 21365¹⁾（以下、本規格）は、これらのエンジニアリングにおける様々なフェーズにおいて、CSMの概略的な説明、使用方法を提供する規格である。これにより、CSMとは何か、何のために使用されるか、その構成要素が何であるかを示している。併せて、CSMを構築する際の反復的なアプローチの必要性を強調している。

本規格は、CSMの構築に関わる全ての関係者、すなわち規制当局、土地所有者、開発者、住民（およびその他の関連当事者）に使用されることが意図されている。理想的には、予備的な評価や詳細調査、ヒトの健康や環境リスク評価から、その後の建設やエンジニアリングに関わる調査と改良のプロセスにおける全フェーズの代表者が含まれる。近年、日本国内においても土壌汚染対策におけるリスク評価の重要性が高まっていることもあり、本稿では、本規格で規定されているCSMの構成や考え方、構築の手順を中心に示すとともに、国内での本規格の適用性やリスク評価との関係性を示す。併せて、今後の可能性について考察した結果を報告する。

2. 本規格の構成

2.1 CSMの基礎

CSMとは潜在的に汚染されたサイト、または汚染されていることが既知のサイトに関わる全ての情報の統合である。CSMはこれらを解釈し、不確実性を把握することに資する。情報には、主に以下が含まれる。

- ・過去と現在の土地の使用用途（ISO18400-202²⁾に記載）
- ・既知の既存の構造や将来の建物、インフラが含まれる場合には想定される将来の使用用途
- ・敷地および周辺地域の地質学的／地形学的／地層学的／水文学的な状況および水文環境、土壌、底質、空気（屋内空気および大気）
- ・潜在的な汚染物質の性質
- ・潜在的な受容体（レセプター）、修復や浄化に伴う新たな受容体の可能性
- ・新たな曝露経路（可能性のある経路）
- ・予測可能な洪水や地下水上昇、極端な気象変化の可能性

2.2 CSMの目的

多くのケースで、CSMを使用する目的は、以下のように設定される。

- ・サイトの特徴を紹介する。
- ・サイトに関する不確実性とデータの違いを特定する。
- ・さらなる調査と評価をデザインするための基礎とする。
- ・浄化計画や濃度低減を予測するための基礎情報を提供する。
- ・曝露経路をとりまとめることにより、リスクが発生する可能性のある場所を系統的にレビューする。
- ・コミュニケーションツールとして、サイトの全体的な管理を促進する。関係者が相互にコミュニケーションをとることを促進する。

これらの目的を踏まえると、CSMは調査の段階から、できるだけ早期に開始されるべきである。もちろんCSMを最初に構築するタイミングでは修復後の現場の将来的な用途がわかっているとは限らないが、より多くの情報が利用可能になるにつれて、不確実性が認識され、その不確実性を低減する改良プロセスを踏むことになる。

Conceptual site models for potentially contaminated sites (ISO 21365)

Yasuhide Furukawa¹, Makoto Nakashima¹, Yasushi Hoga¹ and Study group on ISO/TC 190¹ (1GEPC)

連絡先：〒102-0083 東京都千代田区麹町 4-5 KS ビル 3F (一社) 土壌環境センター

TEL 03-5215-5955 FAX 03-5215-5954 E-mail: info@gepc.or.jp

2.3 本規格の構成

本規格の目次を図1に示す。CSMには以下を含むことが記されている。

- ・ 有害物質の潜在的な汚染源
- ・ 各媒体中の様々な輸送メカニズムとその特徴を含む潜在的な移動経路
- ・ 既存あるいは将来の受容体

本規格では5章で、汚染されたサイトにおいて現実的なCSMを構築する手順が述べられている（本報3.にて詳述）。また、付属文書AではCSMの具体的な適用例が記載されている。

序文、イントロダクション

1. 目的
 2. 規範となるリファレンス
 3. 用語と定義
 4. 基本
 5. CSMの構築
 6. サイト調査機関におけるCSMの構築
 7. 浄化及び緩和策のためのサイト概念モデル
 8. 建設工事のためのサイト概念モデル
 9. データ収集と品質保証
- 付録A～D
参考文献

図1 ISO21365の構成¹⁾

3. CSMの構築手順

CSMはリスク評価のプロセスを通じ、6つのステップを検討することによって改良を重ねながら構築される。変更等は利用可能になった追加情報に基づいて行われる。不確実性が大きすぎて現実的なリスク評価を行うことができない場合、さらなる調査を検討すべきである。本規格に記載されている以下6つのステップを概要と併せて図2に示す。以下、各ステップの目的を中心に記す。

- ・ STEP1 全体的な目標を設定し、空間および時間の観点からの境界を設定する。
- ・ STEP2 既知および潜在的な汚染物質を識別し、発生源をキャラクタライズ（特性化）する。
- ・ STEP3 既知および潜在的な各汚染の媒体を設定し、特定する。
- ・ STEP4 潜在的な移動経路を設定する。
- ・ STEP5 可能性のある受容体、曝露経路及び曝露点を特定する。
- ・ STEP6 可能性のある将来のイベントを特定する。

STEP		概要
1	全体的な目標を設定し、空間及び時間の観点からの境界を設定	
2	既知および潜在的な汚染物質を識別し、汚染源をキャラクタライズ（特性化）	
3	既知および潜在的な各汚染の媒体を設定し、特定	
4	潜在的な移動経路を設定	
5	可能性のある受容体、曝露経路及び曝露点を特定	
6	可能性のある将来のイベントを特定	

図2 CSMを構築するための6つのステップの概要¹⁾

3.1 ステップ1 全体的な目的および境界(空間的および時間的)条件の定義

最初に、CSMの全体的な目的を設定する。次に、空間的境界と時間的境界について関係者間で合意し、CSMを介して明確に伝えられる必要がある。すべての基礎となるモデルや仮定は、CSMを活用する時間枠内で有効でなければならない。例えば、土地利用の変化、浸食による変化、海面水位の変化など、対象期間中に起こりそうな変化は予測されるべきである。変化が生じる可能性がある場合には、時間の経過と共に変化する条件に対応するために、CSMの異なるバージョンが必要とされる。また、汚染状況の経時的な変化を考慮することが重要である。これにより、汚染物質レベルが過去に増加したか、減少したか、そしてそれらが将来増加するか減少するかの予想についての情報が得られる。

定義された空間境界は、最初に考慮されているサイトの領域(例えば、サイトの構内、設置境界等)に対応しなければならない。例えば、サイトから広がる汚染物質によって影響される全ての下流領域を含むように、より広い領域を包含する場合もある。CSMは、汚染物質の分配および利用可能性を取り扱うための生物地球化学モデルや移動経路モデル、食物連鎖物質移動やヒト曝露のモデルを取り扱う場合があり、これらのサブモデルは、CSM全体に統合される。

3.2 ステップ2 既知の汚染物質と潜在的な汚染物質の特定と汚染源の特徴付け

このステップでは、サイトやその周囲に存在する汚染物質と潜在的な汚染物質を特定することが含まれる。まず作成された予備的調査(机上調査および現場踏査)から組み立てられた情報(ISO 18400-202²⁾参照)に基づき汚染物質の特定を行う。その後、汚染物質の存在を確認するための調査を行う。そして、確認された汚染物質は、それぞれ汚染源特定の検討を行わなければならない。この際、一次汚染源(漏出物質)と二次汚染源(土壌吸着態、地下水溶解態、土壌ガス態、大気ガス態)は区別される必要があり、可能な限り、各汚染源の特性は次のように整理する。

- ・ 起源、位置、深さ、範囲、土地境界との関係、およびサイトマップその他の図面(スケールと方向の指標を含む)に正確に示されていること
- ・ 汚染物質の量、汚染された媒体の体積、汚染源からの汚染物質の放出が開始した時期や持続した期間
- ・ 汚染源中に存在する汚染物質の化学的、生物学的、物理的、毒物学的性質及び環境媒体中の濃度
- ・ 汚染された媒体間(例えば、土壌、地下水、土壌ガス、原液相、表層水、底質、生物相および空気間)での汚染物質の分配

このステップでは、モデルにより、汚染物質が汚染源からどのように、また、なぜ放出されたかについての仮説を提案しなければならない。汚染物質が見つからない場合には、汚染物質が存在しないと考えられる理由を文書化して、続けてCSMを構築しなければならない。サイトで発見されたすべての汚染物質について、現地や地域の規模でのバックグラウンド値を求めなくてはならない。モデルには、検討中の汚染源に起因する汚染を、自然汚染源または近くの人為起源(例えば、汚染の拡散)の汚染と区別するのに十分な情報を含めなくてはならない。

3.3 ステップ3 既知および潜在的に汚染されている各媒体の特定及び特徴づけ

このステップでは、既知の汚染された媒体または汚染が疑われる媒体、すなわち、ステップ2で特定された汚染源からの放出によって汚染されるすべての環境媒体または人工物を特定する。汚染物質は、例えば、土壌や底質、地下水、表層水、土壌ガス、空気、および生物相中に存在し得る。汚染されている可能性のある媒体は、予備的調査(机上試験および現場踏査)中に収集された情報に基づいて特定されるべきである(ISO 18400-202²⁾参照)。異なる媒体中の汚染物質の存在に関する測定が利用可能になった時は、モデルを再検討しなくてはならない。

CSMを構築するためには、関連する全ての媒体を考慮すべきであり、汚染物質の挙動に影響を及ぼし得る媒体の特性を決定しなくてはならない。例えば、pHや酸化還元電位、透水性は、汚染物質の形態や物質移動、毒性に影響を及ぼし得る。一方、モデルに含まれていない媒体は、含まれていないことを明確に示すとともに、CSMから省略した理由を示さなくてはならない。

3.4 ステップ4 潜在的な移動経路の特定

特定された各汚染媒体について、汚染物質移動経路を特定し、CSMに記載する。その目的は、ヒトまたは環境に対して曝露する可能性のある場所を特定し、それによって汚染物質による受容体を特定できるようにすることである。CSMを構築する場合、移動経路に関して、以下の記述が考えられる(表1の例を参照)。

- ・ 一次汚染源または二次汚染源からの汚染物質放出のメカニズムと物質移動プロセスの種類
- ・ 汚染物質が物質移動する媒体(関連する環境受容体が汚染源の場所でない場合)
- ・ 汚染された媒体中で生じる物質移動プロセスと、物質移動速度を決定する重要な要因

モデルを構築する際に、移動経路の特徴を明らかにすることが必要な場合がある。汚染物質の移動モデルを検討した結果の信頼性は、概念モデルを構築し、数値モデルを構築して精緻化するために使用するデータに依存する。データが不十分である場合、モデルの結果は信頼できないものとなる。使用されるデータは、サイトから得たものであるべきであり、モデル化するサイトやその区域の特性を示すものでなければならない。例えば、最終モデルは、現在および将来の曝露シナリオの構築を支えるのに十分な情報が含まれる。

表1 移動経路の例¹⁾

汚染された媒体	考えられる移動経路と汚染物質の放出機構
土壌	植物による取り込み 地下水への浸透による浸出 粉じんの飛散 表層流出による粒子の移動
地下水	不飽和帯から飽和帯への浸透 帯水層内での拡散、移流、分散、毛管移動による地下水の物質移動 トレンチ(水道用、下水道用、電力用など)を通じた地下水の物質移動 土壌ガスへの揮発 原液相から地下水への汚染物質の溶解
地表水	暴風雨流出による暴風雨排水システム中への溶存汚染物質および粒子状汚染物質の移動 河川や湖沼の流水による溶存汚染物質や懸濁汚染物質の移動 懸濁粒子に伴う汚染物質の沈殿 生物相/水生植物による取り込みまたは水生植物への収着による粒子の摂取
底質	掃流、底質輸送 粒子の再懸濁 底質から水への汚染物質の脱着 底質から植物への取り込み 動物による底質摂取
空気	土壌ガスによる地表面への気相物質の移動 建物基礎を通して土壌ガスから室内空気への物質移動 トレンチ(水道用、下水道用、電力用など)等の構造物を通しての土壌ガスの移動 風による粉じんや蒸気による物質移動
原液相の汚染物質	重力による土壌や岩石内への物質移動 地下水への溶解・地下水中の物質移動 気化とそれに続く土壌ガス中の物質移動
生物物質移動	植物による汚染物質の取り込み 植物や動物の体表への汚染物質の収着 水や間隙水からの動物による汚染物質の取り込み 食物摂取の結果としての動物による汚染物質の取り込み 汚染された土壌または底質の直接摂取の結果としての動物による汚染物質の取り込み

ここで、土壌は媒体とみなされるべきであり、ヒトまたは環境受容体が汚染土壌と直接的または間接的に接触する可能性があるため、移動経路となる可能性がある。土壌深度が異なるごとに、ヒト、環境受容体および他の受容体の曝露を考慮すべきである。一方、地下水は、潜在的に汚染された媒体であるばかりでなく、特定された汚染物質が地下水と既に接触しているか、または接触する可能性がある場合には、移動経路となる可能性がある。地下水中の物質移動を考慮する場合、不飽和帯内の移動と飽和帯内の移動を考慮すべきである。帯水層での物質移動は重要であり、地下水流向流側の湧水や井戸(灌漑や飲料水)の存在を考慮すべきである。加えて、洞穴や割れ目、その他の選択流の存在は、可能性のある移動経路として考慮されるべきである。自噴するための条件が揃っているかどうかを理解していることも重要である。

水域(河川、湖、排水溝など)が汚染源や汚染地域と直接接触しているか、または汚染されている場合、地表水および底質は、媒体および可能性のある移動経路とみなすべきである。汚染地下水から表層水に汚染物質が排出される場合がある。また、地表流出または暴風雨水により、汚染物質が陸地から地表水に物質移動することがある。さらに、乾燥条件下では、一時的な排水により、汚染物質が下流の曝露地点まで運ばれることがある。汚染物質が、気体または粒子状物質を空気に放出することができる媒体(例えば、表層土壌、表層下土壌、表層水)中にある場合、空気は、媒体および可能性のある移動経路と考えられるべきである。汚染された空気が見つかる場所として、土壌間隙や建築物の排水管や水道管などの人工構造物、室内空間、屋外などがある。これらの異なる区画の間の空気の物質移動は、重要な移動経路であると考えられ、例えば土壌ガスが建物へ侵入する場合などである。

汚染物質の物質移動は生物相への取り込み、例えば、土壌から植物への取り込み、および水生植物や動物による水や底質からの取り込みが続いても起こり得る。草食動物や肉食動物を介した食物連鎖の中で、最上位の消費者へのさらなる物質移動が起こりうる。また、植物や畜産物、魚類の消費によってヒトが曝露されることもある。土壌または底質中に見出される多くの有機性で親油性の汚染物質は、プランクトンや線虫類、または草食動物などの生体内に生物蓄積や生物濃縮され、食物連鎖全体にわたって生物濃縮され、肉食魚や哺乳動物、または鳥などの生体内に高濃度の汚染物質をもたらす可能性がある。汚染された生物相の移動に伴い、汚染も移動すると考えられる。

3.5 ステップ5 潜在的な受容体と曝露経路及び曝露点の特定

このステップの目的は、ヒトやその他の受容体が曝露されている、または曝露される可能性のある各媒体を特定し、その曝露ポイントを特定することである。潜在的な受容体には、汚染源と直接接触しているか、または移動経路に沿って存在する媒体やヒト、他の生物、人工物が含まれる。受容体は、汚染源から直接、または媒体を通しての汚染物質の移動に続いて、汚染物質に曝露されると予測される。したがって、このステップで、ヒトおよび環境を汚染物質に直接的または間接的に曝露する可能性のある環境媒体のすべての用途を探索することとなる。

地下水と表層水により、水資源は構成されていると考えられ、それ自体が受容体である。土壌や底質、水も生物が生息する場であり、環境への影響に関して受容体と考えるべきである。ヒトへの曝露される可能性が高い場合、考えられる曝露経路には、土壌摂取、飲用摂取、畜産物の摂取、野菜摂取/植物摂取、粉塵吸入、蒸気吸入、皮膚接触が含まれる(さらなるガイダンスについては ISO 15800³⁾を参照)。ヒトが受容体である場合、曝露が直接的である場合がある。すなわち、汚染された媒体中で遊ぶ子供の場合のように汚染物質を摂取する場合である。また、曝露が間接的である場合がある。例えば、汚染された環境から取れた場合や汚染された水を与えられた場合の水や果物、野菜、肉を消費することによる汚染物質を摂取する場合である。

最終的な CSM は、環境受容体およびヒト受容体が、汚染源または移動経路に潜在的にまたは現在曝露されている領域の物理的境界を示すマップまたは図を用いて例示することができる。特定の汚染物質や汚染物質のグループを示すために、別々のマップまたは図を用意することができる。一旦、関連する曝露媒体が、それらの使用および可能な移動経路と共に列挙されると、潜在的受容体および特定の曝露点を特定することができる。このようにして、CSM は、悪影響が発生する確率を表すようにできる。受容体への移動や曝露経路に沿った汚染物質の現在および将来の放出と移動の可能性を決定する必要がある。

3.6 ステップ6 予測可能な事象の特定

このステップでは汚染物質に影響を及ぼす可能性のある、あるいは新たな曝露経路を作り出す可能性のある事象を特定する。この事象には、洪水(河川、海、地下水)、地下水位や海面の上昇、極端な気象条件、および土地利用の変化などが含まれる。場合によっては(例えば、洪水)、特定の期間内で発生するイベントに確率を付加することができる場合がある。この汚染物質の挙動に及ぼす可能性のある予測可能な影響を特定するために、サイトについての詳細な知識が必要とされることが考えられる。例を以下に記す。

- 地下水位の上昇により、これまで不飽和帯にあった汚染物質と接触するようになる場合や、以前は乾燥していた生分解性物質が濡れた状態になる場合がある。地下水位の上昇は、自然現象(例えば、降雨量の変化)や飲用または工業用の井戸の揚水量の減少からも生じる可能性がある。地下水に達する深さの構造物の建設は、局地的に地下水流況に影響を及ぼす可能性がある。
- 浄化対策の一環としての地盤支持能力の向上や被覆層を改善するため、ある種の土木的な工事を行うことで、地盤沈下が生じ、これまでは不飽和帯にあった汚染物質を地下水にもたらす可能性やこれまで乾燥していた生分解性物質が湿潤状態になる場合もある。
- 短期的には土地利用変更のための確固たる計画はないかもしれないが、長期的な土地利用の計画が存在するかもしれないし、近隣の土地の変更に基づいて変更の予測が可能な場合がある。

4. CSM の品質保証

品質保証は文書化や従うべき手順、データの品質保証の設定や報告に関して、調査の結果が「目的に適合する」ことを保証するために取られたすべての措置が含まれる。データを収集し、CSM を構築する際には品質保証が重要であり、本規格では以下の2点が主に記載されている。

- 品質基準を明確にして、データ品質に考慮した計画を立てること
- 先ず収集されたデータと情報の品質を評価し、それが特定された基準を満たしていることを確認すること

CSMに関連する不確実性は明確に特定する必要があり、これにより不確実性を許容可能なレベルまで低減することができる。初期のCSMは通常限定された情報、あるいは不完全な情報に基づいているため、対処すべき不確実性を特定し、そこに重点を置くことができる。

5. 我が国における本規格の適用性

5.1 従来の考え方と使われ方

CSMはリスクコミュニケーションを円滑にするための進め方をわかりやすく示すものである。CSMの多くの図は地層の断面図や地下水位、水位勾配などと併せて説明することで、コミュニケーションを取りやすくする目的で使われる。CSMはサイトの状況を概念的に示すもので、調査段階では、仮説を基に構築した初期のCSMの不確実な部分を中心にデータを取得し、その精度を高めて汚染機構を解明する。一方、対策時の使われ方としては、Aという対策と、Bという対策の効果の比較をリスク評価と併せて視覚化するという場面が想定される。このような取り組みは土壌汚染対策法が施行される以前の1990年代半ばにも行われていた。筆者らの経験では、特に2000年ころから行われるようになった土壌・地下水汚染におけるリスクコミュニケーションにおいて、ステークホルダーと、サイトの土壌地下水汚染の状況やそれによるリスクについての相互理解を円滑に進めるために有効に機能していた。

5.2 CSMの存在しない調査や対策

2003年に土壌汚染対策法が施行され、誰が実施しても同じ調査結果が得られるよう、画一的な調査方法が事細かに規定され、仮説検証型で調査が行われることが少なくなってきたことや、リスク受容体の存在に関わらず土壌汚染の除去が行われる割合が多かったことにより、CSMを構築せずに調査や対策が行われるケースも見られるようになった。このため、我が国ではCSMが調査や対策を行うためのツールではなく、リスクコミュニケーションを円滑に進めるためのツールとしてだけ認識されるようになりつつあったのが現状であると考えられる。

5.3 本規格の意義

本規格ではCSM作成に関わる基本的な進め方をとりまとめているが、6段階のステップに併せて、汚染源、移行経路、レセプターをわかりやすく示すということが、本規格の主題である。調査を行って構築されたCSMはサイトの水文地質構造、地下水の流動状況、汚染物質の分布と移動、想定されるリスク受容体などを説明することで、適切な対策方法の選定を支援し、関係者間でのコミュニケーションを取りやすくする。

リスク評価においてもCSMは重要であり、汚染源からの汚染物質の移動経路に基づいて、汚染物質の曝露シナリオを構築し、CSMでモデル化された水文地質構造や地下水流動状況をもとにサイトの条件を示すパラメータを設定し、顕在化したまたは潜在するリスクの評価を行って、リスクベースの対策につなげることになる。CSMが適用される主な場面は、経路ごとあるいは対策ごとのリスク評価と平行で示されるため、リスク評価とCSM(CSMにより作成される図表)は、双子の関係であるともいえる。

土壌汚染対策法においては、2017年の改正にて、目標地下水濃度および目標土壌溶出量の考え方が取り入れられ、汚染源からリスク受容体まで、地下水中を汚染物質が移動する場合の濃度減衰の計算の考え方が取り入れられるなど、リスクベースの考え方がより多く取り入れられ、その前提となるCSMの重要性が増えてきている。このような我が国の状況を考えると、本規格の内容は、リスク評価のエキスパートにとっては知っていて当たり前の内容とはいえ、適用性の高いものであると思われる。

参考文献

- 1) International Organization for Standardization (2019) : ISO 21365:2019 Soil quality - Conceptual site models for potentially contaminated sites
- 2) International Organization for Standardization (2018) : ISO 18400-202:2018 Soil quality- Sampling - Part 202: Preliminary investigations
- 3) International Organization for Standardization (2019) : ISO 15800:2019 Soil quality - Characterization of soil with respect to human exposure