

表層土壌の地球化学情報データベースの公開と活用

原 淳子¹⁾・川辺 能成¹⁾・駒井 武¹⁾

1. はじめに

地圏環境を構成する土壌・岩石に関する地球化学情報は、近年、その整備が国内外で盛んに進められている。岩石に関する地球化学情報は地質学的な観点から岩石の成因、地殻変動、変成作用、地熱活動などの履歴を示す有効な解析手法として、古くより議論されてきた。

一方、現在環境分野で注目されている地球化学情報は、母岩由来もしくは過去の採鉱活動や河川の氾濫などによって表層堆積物にもたらされた自然起源の重金属類の情報、および土木工事等によって岩盤を掘削した場合に搬出される砕石中の重金属類情報である。前者は土壌の母材をなす岩石由来の重金属類と2次的に付加された重金属類の両情報を含んでおり、後者は岩層そのものの重金属類情報である。

我々は環境分野で注目されている自然由来の重金属類情報のうち、前者にあたる重金属類情報を表層土壌評価基本図として整備を進めている。ここで、今井ほか(2004)によって整備された「日本の地球化学図」は河川堆積物を対象とし、丸茂ほか(2003, 2006)で整備された「土壌・地質汚染評価基本図」は先の後者にあたる地質単元(岩層)を対象としたものであり、各々調査対象としているものが異なることを補足しておく。いずれの地球化学情報もその活用手段は多様で、地質・環境分野で有益な情報である。

我々が注目した表層土壌中の重金属類濃度については、2003年にわが国で施行された土壌汚染対策法(土対法)により、法で定められた評価手法、基準値に基づいて有害物質濃度に関する調査、対策が行われている。土対法では自然由来の重金属類は法の規制対象外と定められているが、実際には自然由来と人為由来の判断は難しい場合が多く、その対処法は

未だ明確な提示がなされていない。また、表層土壌中の重金属類情報は、生活環境、農業などに与える影響も大きく、ある地点で高濃度の有害重金属類を含む土壌が検出された場合、動植物がここから飛散した土壌を直接的に摂取したり、土壌間隙水へと移行した後に農作物や地下水を介して間接的に摂取することにより、生態系に影響を与える可能性も示唆される。

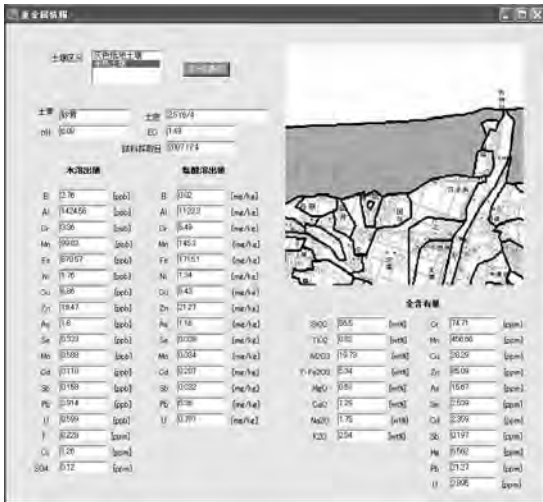
しかし、これまで行われてきた土壌に関する情報整備は、多くが耕作地を対象にしており、農地としての生産性向上を目的に調査された事例が殆どである。自然由来の重金属類を対象として研究された例は少ない。そこで、ここではこれまで整備した宮城県と鳥取県のデータベースの一例を示すと共に、土壌成分と母岩の分布関係、土壌中有害成分のリスク解析例の一部を活用例として紹介する。これらが本評価図の今後の活用の一助になることを願う。

2. 表層土壌化学データ

表層土壌の調査では、5万分の1土地分類基本調査図(国土交通省)の土壌種区分および主要河川の分水界に基づき、調査地域の主要な土壌種について採取、解析を行った。さらに、土壌採取密度を5kmメッシュ区分中に1試料以上と設定することで空間的に情報が疎となる部分がないようにつとめた。採取の際、表層の腐葉土層、植生および大礫は除去して深度50cm程までの土壌を掘削採取した。また、本調査では大気からの影響をできるだけ除去するため、表層5cmの部分は採取対象外とした。採取した土壌は十分に風乾させた後、礫や植物片を取り除いて団粒、土塊を潰し、非金属製の2mmメッシュのふるいを通して、前処理検体とした。

1) 産総研 地圏資源環境研究部門

キーワード: 表層土壌, 地球化学情報, 有害重金属類, データベース, 活用事例



第1図 表層土壌評価基本図における土壌化学情報の表示例。

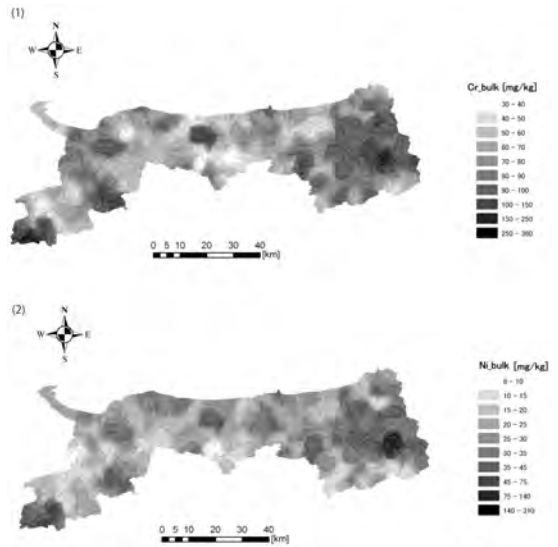
この前処理後の検体を用いて、土壌の化学特性 (pH, EC, りん酸吸収係数, 全有機炭素量), 蛍光エックス線を用いた土壌構成成分の全含有量分析, 公定法 (環境告示18号, 環境省告示19号) に準ずる手法による溶出試験 (水溶出試験), 含有量試験 (0.1M 塩酸溶出試験) を行い, データベースを作成した。これら試験手順の詳細に関しては表層土壌評価基本図～宮城県地域～ (原ほか, 2007a) および表層土壌評価基本図～鳥取県地域～ (原ほか, 2008a) を参照されたい。溶出試験値に関しては, B, Al, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, As, Se, Cd, Sb, Pb, U, F, Cl, SO₄, PO₄ の18成分, 土壌構成成分の全含有量値に関しては, SiO₂, Al₂O₃, TiO₂, T-Fe₂O₃, MgO, CaO, Na₂O, K₂O, Cr, Mn, Ni, Cu, Zn, As, Se, Cd, Pb, Sb, U の19成分のデータを掲載している。

評価基本図にはこのようにして採取・分析した表層土壌試料の化学情報が第1図のようにまとめられている。採取地点を含む採取土壌種の領域および土壌化学データが提示されており, これらの土壌化学データはこの地域の土壌化学バックグラウンドデータの一例として参照できる。

3. 表層土壌を対象とした地球化学情報の活用

3.1 土壌成分分布と母岩成分

表層土壌評価基本図には得られた土壌化学成分



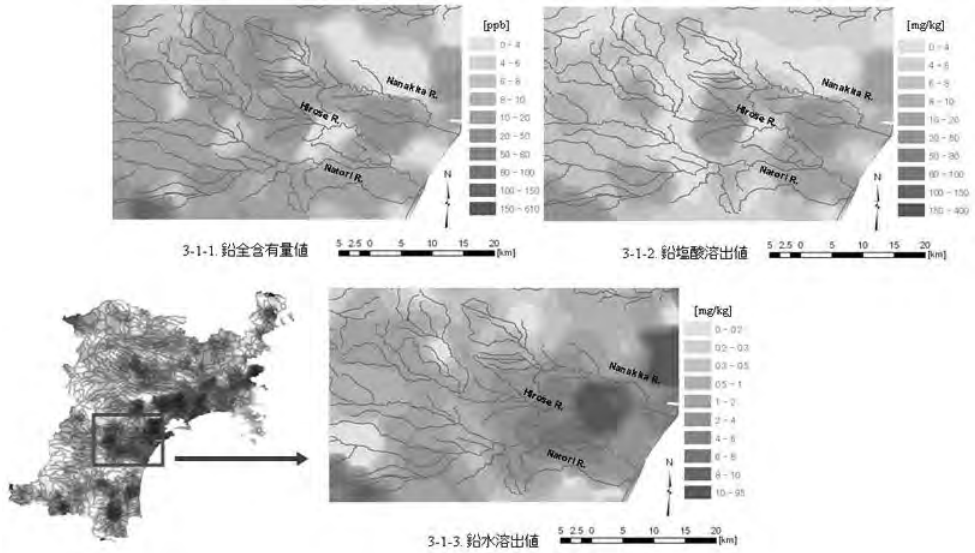
第2図 鳥取県におけるクロム, ニッケル濃度分布図。

- (1) クロムの含有量濃度分布図
- (2) ニッケルの含有量濃度分布図

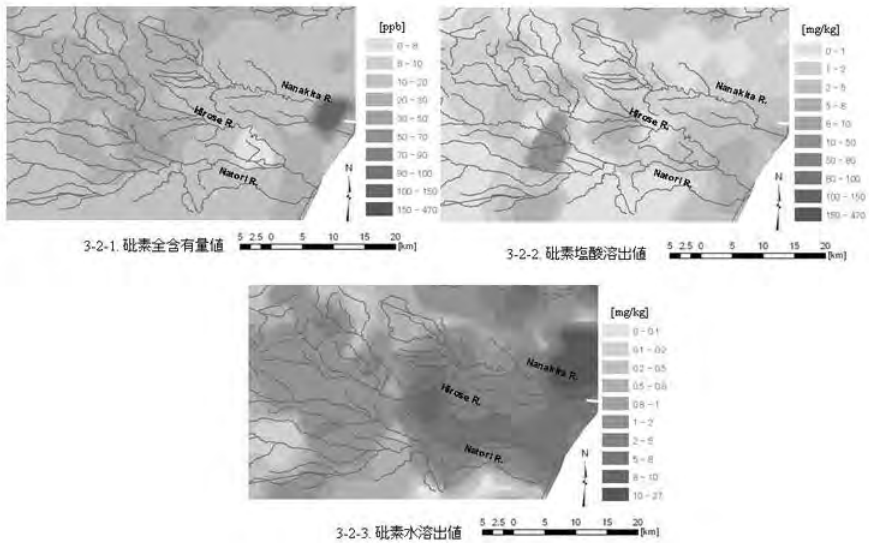
データを用いて作成された各成分の濃度分布図が示されている。この図は, 採取ポイント間の濃度を Inverse Distance Weighting 解析 (Phillip and Watson, 1982; Watson and Phillip, 1985) によって予測値を求め, 作成した空間分布図である。

調査した土壌化学データは採取地点における土壌データであり, 局所的な領域を解析するには隣接するデータを用いてポイント間の濃度分布を予想しても意味をなさない場合もある。しかし, 広域的な濃度分布の特徴を把握するにはこのような空間分布図がデータ解析の際に一助となる。ここでは, 有害重金属類の中で特徴的な分布を示した鳥取県地域のクロム, ニッケル, および宮城県仙台平野地域の鉛, 砒素を例として示す。

第2図に鳥取県におけるクロム, ニッケルの濃度分布を示した。鳥取県地域にはクロム鉱床周辺でクロム含有量が高い表層土壌の分布が得られており, 地質図と比較すると斑レイ岩, 蛇紋岩の分布する地帯と一致することが確認されている。この地域ではニッケルがクロムとよく類似した分布を示しており, ニッケル, クロムといった深成岩に富む元素がこれらを母材とする表層土壌にも多く含まれていた。同様の傾向は河川堆積物を対象に調査した地球化学図でも報告されており (今井, 2005), これらの元素に関しては表



(1) 鉛の濃度分布図



(2) 砒素の濃度分布図

第3図 宮城県仙台平野に分布する河川流域における鉛および砒素の濃度分布図.

(1) 鉛の濃度分布図

(2) 砒素の濃度分布図

層土壌と河川堆積物で類似した傾向を示すことがわかる。また、クロム、ニッケルの土壌成分空間分布は深成岩分布域を中心として河川下流域の土壌へと低濃度域が広がる分布を示している。土壌データは常に流水にさらされる河川堆積物と異なり、一度蓄積された元素をより長く保持・記録している傾向が見られ

る。

一方、第3図には、宮城県の仙台平野中心部を流れる3河川（七北田川、広瀬川、名取川）の中流～下流域を対象に解析した、表層土壌化学データの鉛および砒素の濃度分布図を示す。鉛の濃度分布は全含有量、水溶出値、塩酸溶出値ともに類似した分布傾

第1表 宮城県仙台平野の主要河川流域に分布する主要土壌種の平均重金属類全含有量および水溶値。
Bulk : 全含有量値, C_{water} : 水溶出値

土壌種	As		Pb		Cu		Zn	
	bulk [mg/kg]	C _{water} [mg/kg]	bulk [mg/kg]	C _{water} [mg/kg]	bulk [mg/kg]	C _{water} [mg/kg]	bulk [mg/kg]	C _{water} [mg/kg]
グライ土壌	18.7	0.043	11.2	0.023	37.6	0.090	133	0.151
灰色低地土壌	19.6	0.038	12.6	0.033	41.8	0.226	181	0.527
褐色森林土壌	16.4	0.025	9.49	0.022	42.2	0.082	103	0.233
黒ボク土壌	23.4	0.026	17.8	0.016	49.8	0.076	214	0.200
赤黄色土壌	18.6	0.056	20.7	0.079	61.3	0.308	151	0.439
泥炭土壌	24.4	0.029	5.73	0.009	30.6	0.084	125	0.180

第2表 計算に必要な生活様式因子。

	暴露年数 [year]	体重 [kg]	土壌摂取量 [mg/day]	地下水摂取量 [L]	呼吸量 [m ³ /day]	屋内活動時間 [hour]		屋外活動時間 [hour]	
						平日・休日	平日・休日	平日・休日	平日・休日
子供	6	15	200	1	6.1	22	19	2	5
大人	64	50	100	2	15	23	20	1	4

向を示し、鮮新世の泥岩・亜炭層およびその周辺の段丘堆積物を母材とする土壌で高濃度の分布を示した。これに対し、砒素は全含有量と溶出値の分布が各々異なる傾向を示した。全含有量として高い値を示したのは下流に位置する現世の河床堆積物を母材とする土壌であるが、水溶出値のやや高い土壌は河川中～下流域にかけて広範囲に分布している。このように水溶出値のみ高い値を示す土壌には、河川を媒体として砒素が2次的に土壌へと付加された可能性が考えられ、河川流域の特性が土壌中重金属の濃度情報に現れていることを示している。一方、塩酸溶出値の比較的高い土壌は名取川中流域の鮮新世の段丘堆積物を母材とする地帯で検出されており、これも水溶出値の分布とは異なる傾向を示している。相対的に高い水溶出値を示した河川中流から下流域の地帯では土壌からの鉄溶出量も高いのに対し、塩酸溶出値の高い土壌では鉄溶出量が少なく、砒素の溶出を緩和する鉄成分の欠落が酸性環境下での砒素の溶出を助長している可能性が考えられた。

このように、土壌化学組成は周辺河川の影響や母材となった岩石の化学情報を反映しており、濃度分布図を作成することでよりその特性が判断しやすくなる。

一方、今回のデータベース整備では、土壌区分(土壌種)と河川流域を参考にデータの採取位置を決定

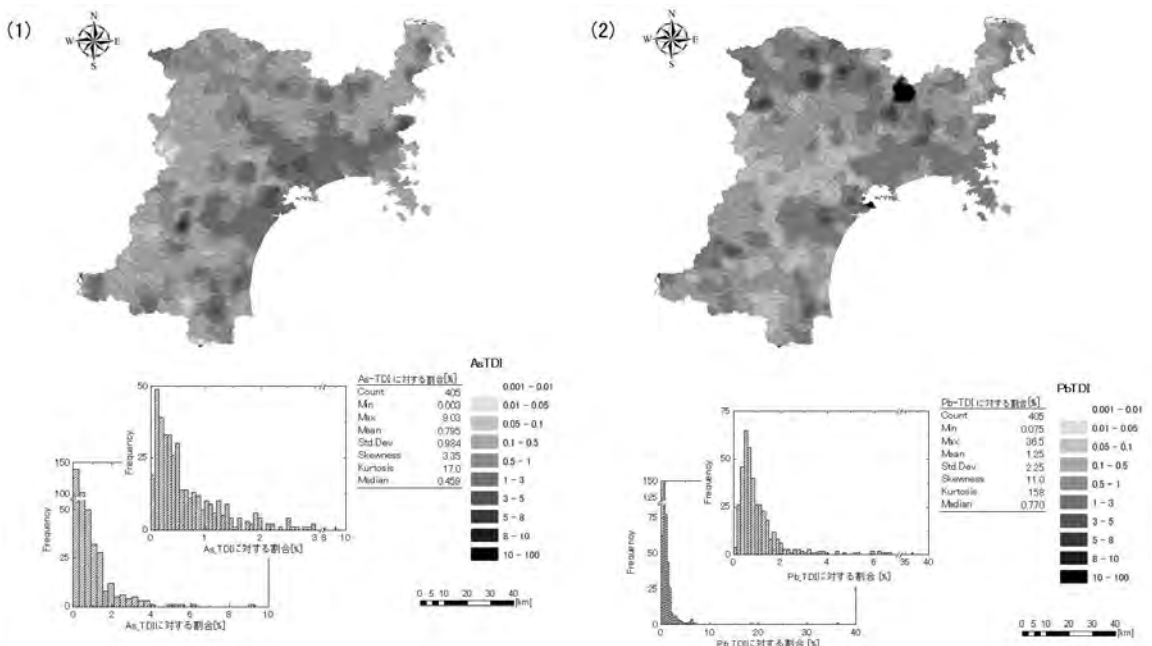
している。土壌種の区分は土壌の生成環境条件を反映しており、同じ流域の土壌でも土壌種によって重金属類の含有量に特徴が現れている。

第1表に第3図に示した流域に分布する主要土壌種の重金属類平均全含有量および平均水溶出値を示した。砒素は黒ボク土壌、泥炭土壌といった土壌中有機物や炭質成分の多い土壌に多く含有されているが、その水溶出値は河川流域周辺に顕著に分布するグライ土壌や灰色低地土壌で高い。一方、鉛と銅は赤黄色土壌での平均含有量が高く、これらの土壌からの水溶出値も高い傾向を示した。また、この流域では亜鉛が灰色低地土壌および赤黄色土壌から溶出しやすい傾向にあった。このように重金属類の含有量および水溶出値は土壌種ごとに特徴を有し、どの土壌種で特定の重金属類を保持もしくは再溶出させやすいか傾向を示している。しかし、土壌中重金属レベルを比較する際には、あくまでも特定の流域を対象にした場合の解析例であることに注意したい。

3.2 有害重金属類のリスク評価

評価基本図には、その解析事例の一つとして有害性を有する12成分の有害物質のリスク評価図が含まれている。これらは以下の仮定に基づいて算出した人体に対する健康リスク評価結果を示している。

土壌中の有害重金属類を人体が摂取する主な暴



第4図 宮城県における砒素および鉛のリスク評価図。

露経路としては、大気中に飛散した土壌の経気摂取および経口摂取、間隙水を介して生態濃縮した農作物の摂取、地下水の摂取、揮発性物質の皮膚からの吸収を想定した。ここでのリスク計算には、データベース化した採取土壌の重金属類溶出特性データ、土壌化学特性データを用い、計算に必要な生活様式因子を第2表のように設定して算出した。

各暴露経路に使用した具体的なデータ値は以下のとおりである。大気を介しての土壌粒子吸引による暴露計算には、土壌そのものを肺から吸引することから土壌中の全含有量値を用い、含有量濃度と大気中の浮遊粒子濃度、浮遊粒子中の土壌密度、平均呼吸量、平均暴露時間、肺中遅延係数、体内吸収率の積で算出した。一方、土壌の直接経口摂取については、塩酸溶出値を用い、溶出濃度と土壌平均摂取量、体内吸収率の積で計算した。

土壌から間隙水への溶出率は水溶出値を用いて算出し、農作物への吸収濃度は間隙水濃度と各農作物の生態濃縮係数の積および土壌沈着濃度で求め、作物摂取量、汚染率、体内吸収率および耕作密度の積で人体への吸収量を求めた。また、地下水からの暴露量は間隙水濃度、希釈率、井戸水の摂取量、体内吸収率の積で求めた。これらの吸収量の和を1日に人

体が摂取してよい許容摂取量 (TDI値もしくはRfd値) (USEPA, 1989 : WHO, 1996)と比較し、リスク評価の指標とした。第4図にその一例として宮城県における砒素と鉛のリスク評価図を示す。この図は、TDI値に対する割合でリスクの大小を示している。

環境調査では、有害重金属類の含有量値は低いが水溶出試験値が環境基準を超過してしまうという事例をよく耳にする。宮城県の調査においてもこのような事例にいくつか遭遇している。そこで、環境基準値を超過するような場所では、環境調査にとどまらず、実際にこの溶出値が人体に対してどのくらい健康リスクをおよぼすものなのか、長期的な評価を行っていく必要がある。

今回の計算手法で宮城県におけるリスク計算を行ったところ、環境基準値を超える土壌はいくつか検出されたものの、バックグラウンドレベルの有害重金属類が人体に影響をおよぼす地域は検出されなかった。この結果は、現在、宮城県地域では自然由来の元素が人体におよぼすリスクは許容される範囲であることを明示している。しかし、解析結果は今後の環境変動や土木工事等によって変化していくことも述べておきたい。先に述べたように自然由来の重金属類は土対法では対象外とされているが、広範囲に賦存する天

然の有害元素については適切な土地利用、管理を行って、生態系におよぼすリスクを軽減していかなくてはならない。また、今後新たな人為的汚染拡散が生じないよう土壌・地質特性を生かした策定が必要である。

ここで示したように、調査地点における土壌化学データは、環境基準値と直接比較することで調査対象地域の土壌中濃度レベルの高低が判断でき、さらにこの結果をリスク解析へと展開させることで、リスク管理の基礎資料として土地利用の策定・管理へと活用できる。

また、第4図には一般的な生活環境条件における人体リスク評価を示したが、表層土壌のデータベースを応用して、さらに既存の地理情報(土地利用図、水系分布図、耕作農作物、鉱床位置)等の空間情報を併せた解析を進めることで、対象地域の土地用途状況や環境条件に応じた解析が可能となる。このような解析手法を用いて、原ほか(2007b)では農作物(植物体)を対象とした自然由来重金属類の吸収リスク評価を、原ほか(2008b)では鉱床からの重金属流出リスク評価を行い、表層土壌データの活用例を示している。

4. おわりに

本報では、表層土壌中の土壌化学データベースの概要とこれらの活用事例を中心に紹介してきた。土壌は岩石を母材とする風化生成物であるが、そこには植生や地下生物、気候、河川など様々な因子が複雑に関わって生成されており、生成過程での構成成分の溶脱・付加作用を評価するのは困難である。しかし、表層土壌化学データを体系的にまとめることで、土壌化学組成はこれまで作成されてきた岩石や河川堆積物の地球化学情報と密接な関係を示し、土壌中重金属類の移行を支配する共存イオン種や構成鉱物種、有機物質との関係も少しずつ明らかになってきた。

また、土壌化学データは公定法に準ずる手法で土壌の採取・分析を行っているため、現場で行われる土壌環境調査のデータと比較検討が可能である。表層土壌中の有害重金属類のバックグラウンドレベル

を空間データとして明示したことで、人為由来の汚染が生じた場合に汚染の由来の判断に活用され、さらには汚染の絞りこみにも有用な役割を果たしていくことを期待している。今回、基図として用いた土壌図はそもそも戦後に国土の有効かつ適切な土地利用を目的として作成されたものであり、ここに我々の整備した地球化学情報が付加されることでその有効性がさらに高まることを期待したい。

参考文献

- 原 淳子・川辺能成・駒井 武・井本由香利・杉田 創(2007a): 表層土壌評価基本図～宮城県地域～. 産総研地質調査総合センター, CD-ROM.
- 原 淳子・川辺能成・杉田 創・丸茂克美・駒井 武(2007b): 土壌中重金属情報の整備とリスク評価. 資源素材学会講演要旨集, 7.
- 原 淳子・川辺能成・駒井 武(2008a): 表層土壌評価基本図～鳥取県地域～. 産総研地質調査総合センター, CD-ROM.
- 原 淳子・川辺能成・駒井 武・垣原康之・丸茂克美(2008b): 表層土壌におよぼす鉱床由来重金属の影響およびその起源解析. 土壌汚染と地圏環境インフォマティクス2008講演要旨集, 101-105.
- 今井 登・寺島 滋・太田充恒・御子柴真澄・岡井貴司・立花好子・富樫茂子・松久幸敬・金井 豊・上岡 晃(2004): 日本の地球化学図. 産総研地質調査総合センター, 210p.
- 今井 登(2005): 岩石圏の重金属賦存量-日本の地球化学図-, 土壌生成と重金属動態. 博友社, 13-44.
- 環境省(2003): 環境省告示第18号 土壌溶出量調査に係る測定方法を定める件.
- 環境省(2003): 環境省告示第19号 土壌含有量調査に係る測定方法を定める件.
- 丸茂克美・竹内美緒・江橋俊臣・楡井 久(2003): 土壌・地質汚染評価基本図「5万分の1姉崎」. 産総研地質調査総合センター, CD-ROM.
- 丸茂克美・根本尚大・氏家 亨・江橋俊臣・小野木有佳・山田亮一・吉田武義(2006): 土壌・地質汚染評価基本図「5万分の1仙台地域」. 産総研地質調査総合センター, CD-ROM.
- Phillip G. M. and Watson D. F. (1982): A precise method for determining contoured surface. Australian Petroleum Exploration Association Journal, 22, 205-212.
- USEPA (1989): Health effects assessment. In: Office of Emergency and Remedial Response. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC.
- Watson D. F. and Phillip G. M. (1985): A Refinement of Inverse Distance Weighted Interpolation. Geoprocessing, 2, 315-327.
- WHO (1996): Guideline for Drinking-Water Quality, second ed.

HARA Junko, KAWABE Yoshishige and KOMAI Takeshi (2010): The release of geochemical database for sub-surface soils and their exploitation.

<受付: 2009年12月2日>