Technical Report

地圏環境インフォマティクスのデータベース構築とその応用例*

狩 野 真 吾¹ 土 屋 範 芳² 井 上 千 弘² 原 淳 子³
駒 井 武⁴ 白 鳥 寿 一⁵ 神 宮 宏⁶

Database Architecture of Geosphere Environmental Informatics and its Application

by Shingo KANO^{a*}, Noriyoshi TSUCHIYA^a, Chihiro INOUE^a, Junko HARA^b
Takeshi KOMAI^b, Toshikazu SHIRATORI^c and Hiroshi JINGU^d

- a. Graduate School of Environmental Studies, Tohoku University, 6-6-20, Aoba, Aramaki, Aoba-ku, Sendai 980-8579, Japan
(*Corresponding Author FAX: 022-795-6336, E-mail: s-kano@mail.kankyo.tohoku.ac.jp)
- b. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 16-1, Onokawa, Tsukuba, 305-8569, Japan
- c. Dowa Eco-System Co., Ltd., 14-1, Sotokanda 4-Chome, Chiyoda-ku, Tokyo 101-0021, Japan
- d. Geotechnos Co., Ltd., 2-22-17, Kameido, Koto-ku, Tokyo, 136-0071, Japan

Recently, many researches and studies of geosphere environments have been conducting to clarify regional variations and the anthropogenic or natural contamination by metals in soils. However, particularly in Japan, those results were held by individual research institute and nationwide database have not been systematized. In this study, an integration of geosphere environmental information and database architecture were carried out by using a geographical information system (GIS). Geosphere environmental information such as geology, topography, soil, vegetation, satellite image, position of mineral deposit, alteration and heavy metal's concentration in groundwater, in river-bed sediments and in soils was collected. In this study, we examined a hydrologic analysis considering the Pb concentration in river-bed sediments as an example use of the database. The topographic map, geologic map, position of mineral deposit and geochemical map in Japan published from the Geological Survey of Japan, AIST were overlaid on the GIS and evaluated Pb concentration distribution at each watershed. As the result, mineral deposits were the most probable main resource of Pb. We also evaluated the relationship between the Pb concentration and the geology at the backland of sampling points. After analyzing the exposed ratio of various types of rocks at each watershed and calculating the correlation coefficient between the ratio of rock exposure and the value of Pb concentration, we found that some sedimentary rocks exposed along rivers and a certain kind of metamorphic rock showed a little good correlation with Pb concentration. It is expected that the geosphere environmental information database can be used in a determination of anthropogenic pollution, determination of health risk, and reflection to national land use plan.

KEY WORDS: GIS, Geosphere Environmental Information, Hydrologic Analysis, Soil Pollution, Heavy Metal

1. は じ め に

土壤汚染問題における自然由来汚染（自然的原因による高濃度の重金属含有土壌）などに関する国土のバックグラウンド把握の必要性等から、近年、地圏環境情報の評価に関する取組みが世界的に数多くなされている¹⁻⁶⁾。また、我が国でも、道路、鉄道の敷設時における鉱染帯回避やその対策検討などで、これらの把握

が重要と考えられている。一方、国内において個別機関や民間企業によってなされる土壌汚染に関する調査、研究結果は個別に保管され、全国にわたる詳細なデータシステムが作成され体系化された例は少ない。

このような状況を踏まえ、独立行政法人産業技術総合研究所では日本全土における有害元素の濃度分布と元素のバックグラウンド値を明らかにするため、日本全土から系統的に採取された約3,000個の河川堆積物中の金属元素をはじめとする53元素を同一手法（ICP発光、質量分析法、原子吸光法）で定量し、日本の地球化学図を作成した⁷⁾。この地球化学図には、ヒ素、水銀、カドミニウム、アンチモン、ビスマス、鉛等の有害金属元素も含まれており、国内で初めて全国規模で土壌中の有害元素の分布状況を整備した点において画期的であった。

最近、土壌・地質汚染評価基本図～1:50,000 仙台地域～が独立

*2007年3月15日受付 11月8日受理

- 1. 東北大学 大学院環境科学研究科 研究員
 - 2. 普通会员 東北大学 大学院環境科学研究科 教授
 - 3. 普通会员 産業技術総合研究所 地圏資源環境研究部門 研究員
 - 4. 普通会员 産業技術総合研究所 地圏資源環境研究部門 副部門長
 - 5. 普通会员 DOWA エコシステム株式会社 部長
 - 6. ジオテクノス株式会社 ジオサイエンス事業部 担当課長
- [著者連絡先] FAX: 022-795-6336 (狩野)

E-mail: s-kano@mail.kankyo.tohoku.ac.jp

キーワード: GIS, 地圏環境情報, 地形解析, 土壌汚染, 重金属

Fig.1 Configuration of Geosphere Environmental Informatics System.

行政法人産業技術総合研究所から刊行され、含有重金属量や溶出量を地質単位との関連性の中で議論できるデータが提供された。しかしながら、本データはhtmlファイルとして格納されているため、地理情報のシステム展開が充分ではない。

土壤中に含まれる重金属をはじめとする汚染物質の種類や環境管理のための基準値は、環境省の環境基準（平成3年環境庁告示第46号、改正平成13年環境省告示第16号。）によって示されている。しかしながら、重金属が物理的あるいは化学的にどのような状態で土壤中に存在するか、その存在形態について、例えば農用地土壌や市街地土壌等を対象に各分野での目的に応じた個別の分析はなされているが、それらの相互関係は明らかでない。土壤中に含まれる重金属の形態情報を多角的、広域的に把握するためには、各分野における個別の検討事例を比較検討しデータベースとして統合する必要性がある⁸⁾。

さらに、土壤中に含まれる重金属の分布を評価するためには、重金属の発生、移動、堆積の各過程を把握することが重要である。重金属の発生要因には例えば地質や鉱床、地熱や温泉等の影響が考えられ、移動には流水や地形の影響が挙げられる。また堆積については地形の効果が影響すると考えられる。このように、重金属の挙動を正確に把握するためには様々な情報を結びつけ検討する必要性がある。

そこで、著者らは土壤中に含まれる重金属の情報と地質や地形、土壌、植生、変質帯分布、地下水データ等のデータを統合することにより、重金属の濃度分布や形態情報と地図環境情報との関連性について把握することのできる情報システムを開発することを目指している（Fig. 1）。本報告はシステムの全体概要およびFig. 1の太枠内に対応するデータベースの構築について述べるとともに、データベース活用例として東北地方における河川堆積物中の重金属濃度分布に着目した地形解析例を紹介する。なお、データ

ベースの構築には地理情報システム（Geographical Information System；以下、GISと記す。）を用いた。

2. システムの構成と特徴

2・1 GISソフト

本研究ではArcView 9.2 (ESRI社)を使用した。また、エクステンションとしてラスターデータをベクタデータに変換可能なArcScan、主にラスター画像の空間解析が可能なSpatial Analyst、データの統計解析が可能なGeostatistical Analyst、および三次元表示が可能な3D Analystを搭載した。

2・2 対象とする地図環境情報

本研究で考慮する土壌中の汚染物質は重金属類とし、土壌の環境基準物質のほか要監視項目や一部生態系などでも今後検討が必要と考えられるものを対象とする。また、本システムで取り扱う地図環境情報は、土壌中の重金属分布を検討する際に必要と考えられる、地形、地質、土壌、植生、変質帯分布、鉱床位置、衛星画像、岩石中、土壌中および河川堆積物中の元素濃度、地下水中の化学物質および元素濃度を対象とした。

上記の地図環境情報の他にも、本システムは一般にGIS用データとして普及しているシェープファイル形式、Excelで編集された既往の文献や分析データを取り込むことが可能である。このように、新たに公表されたデータを継続的に取り込むことで情報の蓄積および継続的な更新が可能である。

2・3 システムの特徴

2・3・1 地図環境情報の結合

GISでは複数の地図環境マップをレイヤーとして重ね合わせることができる。さらに、個々のマップがもつ固有の属性を相互に比較し、相関性の有無や高い相関性の領域を抽出したりすることができる。このような機能を用いることにより、岩石や土壌中の重金属分布と地質や土質等と

の関連性を地図上で把握することが可能である。

2・3・2 深度情報の考慮 地質図に関して、本システムでは深度情報を考慮した検討を目指している。GISに地質図を入力する際に地質層序を考慮することにより、土壌層の下位および後背地域にどのような地層が存在するかを把握し、別の箇所でも出現した地層同士を関連づけることを可能とする。

たとえば、ボーリングコアの情報をを用いて深度方向の重金属濃度分布を把握し、地質との対応関係を明確にすることにより、サンプリングされていない領域の重金属濃度を地質図から類推することが可能となる。

現在、地質情報が断片化されている状況においては、一般に対象となる地域の地質調査等のデータしか取得できず、その値のみで種々の判断がなされることが多い。このことにより、工事開始後に重金属含有土壌について計画外の費用が生じることや、土壌汚染対策における自然的原因に関する不公平が生じることになる。このような評価手法を用いることにより、一例としてトンネル掘削時において、周辺既存情報も考慮して土壌の重金属含有量などを把握し、対策時も考慮した適切なルートを設定するための基礎情報として利用することができる。また、地質に関連する自然的原因による汚染分布とそれ以外の人為的原因による汚染分布とを区分する際の判断材料にもなり得る。

3. システムが含むデータベースについて

データベースは以下に示す地図情報から構築した。なお、対象範囲はすべて日本全国である。

①**地形図**：地形図は国土地理院発行の数値地図 50m メッシュ（標高）⁹⁾を用いた（承認番号 平 19 総使、第 407 号）。数値地図 50m メッシュ（標高）は 1:25,000 地形図に描かれている等高線からベクトルデータを作成し、それから計算によって求めた数値標高モデル (Digital Elevation Model; 以下 DEM と記す。) である。データは 1:25,000 地形図を経度方向及び緯度方向にそれぞれ 200 等分して得られる各方眼の中心の標高である。

②**地質図**：地質図には産業技術総合研究所発行の 20 万分の 1 日本シームレス地質図データベース¹⁰⁾を使用した。

③**土壌図**：土壌図には国土交通省土地・水資源局国土調査課がウェブサイトで公開している 20 万分の 1 土地分類基本調査に基づく全都道府県の土壌図¹¹⁾を用いた。ラスター画像における土壌境界線をパソコン上でトレースして境界線のみを細線化画像を作成し、GIS 上で ArcScan の機能により細線化画像からポリゴンを作成した。そして各ポリゴンに土壌分類および都道府県名の属性を入力し、データベース搭載用のベクタデータとした。

④**植生図**：植生図は環境省生物多様性センター、生物多様性情報システム発行の自然環境情報 GIS¹²⁾を使用した。データはポリゴンからなるベクタデータである。

⑤**変質帯分布図**：変質帯は、広域地質構造調査報告書¹³⁻²⁰⁾に記載される中性変質帯および酸性変質帯を対象とした。これらの変質帯の分布域について流域を考慮して紙地図上にトレースし、土壌図の場合と同様に ArcScan を用いてポリゴンを作成した。その際、属性として都道府県名、市区町村名、変質タイプ、変質鉱物、規模の各情報を入力した。中性変質帯には Pyrite, Sericite, Smectite, Chlorite, Epidote, Kaolinite, Alunite が含まれ、酸性変質体には Kaolinite, Alunite, Pyrophyllite, Halloysite, Dickite 等が含まれる。

⑥**鉱床位置図**：文献²¹⁻³²⁾に基づき、全国の鉱床の位置情報に関するポイントのベクタデータを作成した。その際、属性として都道府県名、市区町村名、稼行当時の鉱山名称、経緯度、鉱種を入

力した。

⑦**衛星画像**：(財)リモート・センシング技術センター (RESTEC) が提供する全国の衛星画像ラスターデータを使用した。

⑧**岩石、土壌、河川堆積物中の元素濃度**：岩石中の元素濃度は原子吸光法、ICP 発光分析法および ICP 質量分析法によって分析を行った。土壌中の元素濃度に関して、本研究では Yamasaki, *et al.* (2001)³³⁾に記載される全国 78 地点、114 個の土壌試料の分析結果をポイントデータとして使用した。分析は土壌中の 57 元素を対象に ICP 質量分析法および ICP 発光分析法を用いて行われた。

⑨**地下水中の化学物質および元素濃度**：地下水中の化学物質および元素濃度について、本研究では環境省水・大気環境局が平成 15 年度に実施した全国地下水質測定結果³⁵⁾に基づき、都道府県名、市区町村名、経緯度、井戸深度、化学物質および元素濃度 (ベンゼン, 1,2-DCA, 1,1-DCE, cisDCE, DCM, 1,1,1-TCA, 1,1,2-TCA, TCE, 1,3-DBP, PCB, PCE, CCl₄, シアン, Hg, As, B, Cd, Cr, F, Pb, Se) を属性としたポイントデータを作成した。

4. 流域解析による重金属濃度分布の検討

土壌中に含まれる重金属の空間分布を評価する場合、周辺の地形の影響や地圏環境情報を考慮することが重要である。流水や地形の情報の処理手法は多くの研究事例が流域単位で行われている³⁶⁾。本研究では、GIS を用いた地圏環境情報のデータベースの活用例として、日本の地球化学図データベース³⁴⁾の重金属含有量データを用いて、重金属の分布と地形やその他地圏情報との関連性に関する検討を試みた。

日本の地球化学図データベースを作成した際の試料として採取された河川堆積物は、採取した地点より上流域に分布する岩石や堆積物、土壌等を河川が流下するに際して削剥、混合してできたものと位置づけ、河川堆積物の組成はその河川の上流域の地質を代表すると考えた⁷⁾。そこで、本研究においても河川堆積物試料はその採取地点上流域に分布する岩石や堆積物、土壌等の情報を有するという前提のもとに解析を行った。

4・1 解析の内容

河川堆積物中の重金属の含有量について、局所的に大きな重金属の発生源がある場合、地域全体が高濃度帯として表示されることがある³⁴⁾。一方、日本のような急峻な地形が多い環境では、河川の流れによる移動現象が重金属の分布に与える影響は大きいと考えられる。重金属の移動を考慮した解析手法は我が国における地圏に関する情報システムを検討する上で非常に重要な事項である。しかしながら、このような観点から重金属の分布を検討した例は少ない。そこで、本研究では地域を限定し、重金属の移動を念頭においた解析を実施した。すなわち、河川堆積物試料の重金属含有量はその採取点の上流域全体の代表値であるという前提のもと、まず各採取点に対応した流域図を作成し、流域図と重金属データとを重ね合わせ、重金属含有量を流域単位で評価することとした。

4・2 解析に使用したデータ

解析対象物質は Pb である。本解析で対象とした河川は岩手県、宮城県を流れる北上川、宮城県仙台平野の鳴瀬川および名取川、福島県、宮城県を流れる阿武隈川である (Fig. 2)。北上川は流路延長が 249km、流域面積が 10,150km² であり、鳴瀬川は流路延長が 89km、流域面積は 1,133km² である。また、名取川は流路延長 55km、流域面積は 939km² であり、阿武隈川は流路延長が 239km、流域面積は 5,390km² である。解析対象の DEM は国土地理院発行の数値地図 50m メッシュ（標高）から作成した。また、Pb の分布の検討項目として、本解析では地質および鉱床を考慮

Fig.2 Analytical area and objected watershed boundaries.

し、データベースの中から地質図と鉱床位置図を使用した。

4・3 解析方法

①**流路網および流域の抽出**：流路網の抽出は ArcView 9.2 に標準装備されている Hydrology Modeling ツールを用いて行った。解析の概略を以下に示す。まず、対象メッシュに隣接する 8 メッシュの中から下り勾配の最大傾斜を示す方向を求め、対象メッシュの流向とする。次に流量は決定した流向にすべて流れるとする。なお、下り勾配の無いメッシュ（窪地）や平坦な場所に到達すると計算が留まってしまうことを避けるため、窪地平坦と認識されるメッシュの DEM の値を徐々に大きくし、下り勾配を認識できるまで変化させる。この方法について、全メッシュをスタートとして海または計算領域外に達するまで行うことにより累積流量は河道として認識される。流路網を抽出後、同様の解析ツールを用いて地球化学図データベース³⁴⁾における河川堆積物試料の採取地点に対する流域をポリゴンとして抽出した。

②**流域図と地質図の統合**：ArcView 9.2 に標準装備されているオーバーレイ機能を用いて、流域図と地質図との重なり部分のみをそれぞれ切り出した。その後、面積計算ツールを用いて各流域に含まれる地層の露出面積を算出し、流域の面積で除することにより流域に占める割合（以下、占有面積比と記述する。）を計算した。このようにして得られた流域と地質図の統合図は、流域ごとに区切られているため、流域ごとにそれらの特性をみることが可能である。さらに、流域単位で重金属含有量との関連性を検討することが可能である。

③**Pb 含有量と地質の流域に対する占有面積比との相関性**：各流域について、Pb 含有量と地質の占有面積比との間の相関係数を多変量解析ソフト（ThinkSTAT 多変量解析 for Excel, (株) アルバック）を用いて算出した。

4・4 解析結果

4・4・1 Pb 含有量と鉱床との関連性の検討

Pb の含有量と鉱床との関係について詳細に検討するため、鉱床を含む流域を対象に、鉱床から試料採取点までの距離を流路網に沿って計測し、Pb の値と鉱床からの距離についてプロットした結果を Fig. 3 に示す。縦軸は Pb の含有量を解析対象の全サンプルにおける最大値で除して規格化した値、横軸は鉱床からの距離の逆数と坑口数との積である。坑口数を乗じたのは鉱床の規模をグラフに反映

Fig.3 Relationship between Pb concentration and the distance from mineral deposits.

させるためである。なお、1 つの鉱床に複数の坑口がある場合は、便宜上、それらの分布の重心に位置する地点を代表点とし、その点と試料採取点との距離についてプロットした。Fig. 3 より Pb の濃度と鉱床からの距離との間には正の相関性（相関係数：0.57）が見られ、鉱床に近いほど Pb の濃度は高いことがわかった。

4・4・2 各流域の Pb 含有量の検討

DEM から作成した流域図と地球化学図の Pb 含有量データとを統合し、流域を Pb 含有量によって色分け表示した結果を Fig. 4 に示す。図中の○印は Pb を産出する鉱床位置を示す。流域を塗色した色は青ほど濃度が低く、赤くなるほど濃度が高い。Pb の値は流域ごとに異なり、最も低濃度の流域で 6.61ppm、最も高濃度の流域で 52.21ppm だった。また、全体的に見ると、上流域に比べて中～下流域の含有量が高い傾向が見られた。

このように、流域を考慮した Pb 含有量の分布図は、含有量の分布に地形の効果を加味した点において、重金属の移動現象に則した分布図であるといえることができる。しかしながら、例えば Fig. 4 における一部の高濃度流域を拡大表示した Fig. 5 では、Pb の主な発生源であると考えられる鉱床の上流部も鉱床の下流部と同一の色で塗色されており、流域の細分化に関して課題を残している。重金属の移動を考慮し、より実態に則した分布図を作成するためには、重金属の発生源や地形の影響を十分に考慮した上で試料採取点を決定する必要がある。

4・4・3 Pb 含有量と地質との関連性の検討

後背地域の地質が河川堆積物中の重金属含有量に与える影響を検討するため、岩相の露出頻度と重金属含有量との関係について検討した。Fig. 6 は、流域に対する岩相の占有面積比と Pb 含有量との間の相関係数に基づいて塗色されており、赤ほど正の相関性が高く、青ほど負の相関性が高い。

解析の結果、正の相関が最も高かった岩相は、前期中新世の海成・非海成堆積岩類の 0.33 だった。その他に、完新世および前期更新世の海成・非海成堆積岩（相関係数はそれぞれ 0.30, 0.25）、阿武隈変成岩（0.26）、および前期～中期更新世、前期中新世の非アルカリ珔長質火山岩類（それぞれ 0.28, 0.21）が相対的に高い値を示した。全体的には、平野部や河川に沿って露出する岩相との相関性が高く、上流部や中生代以前の古い岩相との相関性は低かった。また、全体的には相関係数の値は低く、河川堆積物中の Pb 含有量に対して特に強い相関性を示す岩相は見られなかった。その原因としては、鉱床の影響や生産活動に伴う人為的な汚染の影響、発生源からの Pb の移動等が考えられ、今後の検討課題である。

Fig. 4 Pb concentration distribution considering watersheds.

Fig. 6 Distribution of the correlation coefficients between Pb concentration and the geology.

Fig. 5 Local distribution of Pb concentrations.

5. お わ り に

本報告では、地圏環境インフォマティクスのシステムおよびシステムを構成するデータベースとその活用例について述べた。システムは種々のデータの取り込みが可能なことから、網羅していない地域や新たに追加される土壌、岩石、河川堆積物中の重金属量を入力していく。また、地質、土壌、植生、地下水情報等との関連性を具体的に検討する目的で、本報告では述べていないが岩石試料の形態分析も実施しており、重金属の地圏環境中での物理的、化学的挙動をより明らかにしていく予定である。さらに、データベースは利用されることが重要であり、より実用的なツールを開発している。GISソフトに重金属濃度分布に関する独自の空間検索機能や統計解析ツールを開発し、地圏環境インフォマティクスのシステムを完成させる。情報公開方法については、システムの概要、使用したデータベースの一覧、開発したツールの機能紹介とともに、ArcReader (ESRI社がWebサイトで無償配布)で閲覧可能な各種データベースをDVD-ROMに収録し、無償配布する予定である。システムの使用イメージとしては、地質の重金属の状況を単に含有量のデータのみではなく、地質やその他の統合したデータベースのファクターとの関連性をもって抽出できるツールなどがある。このような、一般的には高度な知識や経験がなければ進まない検討をある段階まで行うことができることは非常に

重要である。これにより、各自治体等で自然の金属汚染を判定・指導する際の根拠となる基本図面、広域の道路計画におけるルート決定および工事に伴う処理・措置の概算設計用資料、自治体や全国における様々な環境管理の基礎図面、および今後の地圏環境の変化を判断する際の初期図面、水系(表流水・地下水)、生態系、港湾堆積環境を今後考える際の基礎図面、環境を念頭にいた上での新たなテーマ等の考慮材料、リモートセンシングのような俯瞰技術の環境面での検討に有効に活用できると考えられる。

謝辞 本研究成果は、東北大学大学院環境科学研究科、産業技術総合研究所、DOWAホールディングス(株)の間で行われている産学官共同研究である「地圏環境インフォマティクスのシステム開発と全国展開」(平成17年度科学技術振興調整費採択、プログラム名「産学官共同研究の効果的な推進」)の研究成果の一部をとりまとめたものである。

References

- 1) B.F. Alemaw, E.M. Shemang and T.R. Chaoka: Phys. Chem. Earth, **29** (2004), 1125-1128.
- 2) X. Li, S. Lee, S. Wong, W. Shi and I. Thornton: Env. Poll., **129** (2004), 113-124.
- 3) C. Zhang and P. O'Connor: Appl. Geochem., **20** (2005), 1737-1745.
- 4) G. Bianchini, M. Pennisi, R. Cioni, A. Muti, N. Cerbai and W. Kloppmann: Geothermics, **34** (2005), 297-319.
- 5) X. Liu, J. Wu and J. Xu: Env. Poll. **141** (2006), 257-264.
- 6) J. Paz, J. Sanchez and F. Visconti: J. Env. Man., **79** (2006), 150-162.
- 7) N. Imai, S. Terashima, A. Ohta, M. Mikoshiba, T. Okai, Y. Tachibana, S. Togashi, Y. Matsuhisa, Y. Kanei and A. Kamioka, *Geochemical map of Japan*, (Geological Survey of Japan, 2004), pp. 1-21.
- 8) Y. Ogawa, J. Hara, N. Tsuchiya, K. Marumo and T. Komai: Res. Geol., in submitted (2007).
- 9) Geographical Survey Institute: Suuchi Chizu 50 m mesh (Elevation), (2001, CD-ROM).
- 10) Geological Survey of Japan, AIST: Seamless digital geological map of Japan (2005).
- 11) Land, Infrastructure and Transportation Ministry: Scale 1:200,000 Fundamental Land Classification Survey, (Web: <http://tochi.mlit.go.jp/tockok/index.htm>).
- 12) Biodiversity Center of Japan, Ministry of the Environment: Japan Integrated Biodiversity Information System (Web: <http://www.biodic.go.jp/>).
- 13) Agency for Natural Resources and Energy, METI: Report on the regional geological structure survey, Hokushu region during the fiscal year Showa 46 (Tokyo, 1972), p.169.
- 14) Agency for Natural Resources and Energy, METI: Report on the regional geological structure survey, Kurihara region during the fiscal year Showa 58 (Tokyo, 1984), p.42.
- 15) Agency for Natural Resources and Energy, METI: Report on the regional geological structure survey, Nishi-Tsugaru region during the fiscal year Showa 59 (Tokyo, 1985), p.57.
- 16) Agency for Natural Resources and Energy, METI: Report on the regional geological structure survey, Hakkoada region during the fiscal year Showa 59, (Tokyo, 1985), p.121.
- 17) Agency for Natural Resources and Energy, METI: Report on the regional geological structure survey, Tazawa region during the fiscal year Showa 60 (Tokyo, 1986), p.151.
- 18) Agency for Natural Resources and Energy, METI: Report on the regional geological structure survey, Ogachi region during the fiscal year Showa 63 (Tokyo, 1989), p.226.

- 19) Agency for Natural Resources and Energy, METI: Report on the regional geological structure survey, Tsugaru Peninsula region during the fiscal year Showa 63 (Tokyo, 1989), p.156.
- 20) Agency for Natural Resources and Energy, METI: Report on the regional geological structure survey, Oshima, Shimokita regions during the fiscal year Heisei 3 (Tokyo, 1992), p.434.
- 21) H. Matsuno: Wakayanagi Chiiki no Chishitsu, (Geological Survey of Japan, 1967), p.24.
- 22) H. Takahashi and H. Matsuno: Wakayanagi Chiiki no Chishitsu, (Geological Survey of Japan, 1969), p.26.
- 23) F. Takizawa: Kinkasan Chiiki no Chishitsu, (Geological Survey of Japan, 1974), p.62.
- 24) N. Kitamura: Furukawa Chiiki no Chishitsu, (Geological Survey of Japan, 1981), p.32.
- 25) T. Ishii: Matsushima Chiiki no Chishitsu, (Geological Survey of Japan, 1982), p.121.
- 26) N. Kitamura, A. Ohzawa and H. Nakagawa: Yoshioka Chiiki no Chishitsu, (Geological Survey of Japan, 1983), p.50.
- 27) F. Takizawa: Ishinomaki Chiiki no Chishitsu, (Geological Survey of Japan, 1984), p.103.
- 28) N. Kitamura, T. Ishii, A. Samukawa and H. Nakagawa: Sendai Chiiki no Chishitsu, (Geological Survey of Japan, 1986), p.134.
- 29) K. Kamata: Tsuya Chiiki no Chishitsu, (Geological Survey of Japan, 1993), p.70.
- 30) F. Takizawa: Tome Chiiki no Chishitsu, (Geological Survey of Japan, 1990), p.126.
- 31) Editorial Committee for Nihon Kinzanshi: Nihon Kinzanshi 3rd Tohoku, (MMIJ, 1992), p.222.
- 32) Nihon Kougyou Kyokai Tansa Bukai: Nihon no Koushou Souran, (Journal of MMIJ, 1968), p.941.
- 33) S. Yamasaki, A. Takeda, M. Nanzyo, I. Taniyama and M. Nakai: Soil Sci. Plant Nutr., **47** (2001), 755-765.
- 34) Geological Survey of Japan, AIST: Geochemical map of Japan, (2005, Web: <http://riodb02.ibase.aist.go.jp/geochemmap/index.htm>).
- 35) Ministry of the Environment: Result of groundwater quality measurement, (2003, CD-ROM).
- 36) J. Park, T. Kojiri and K. Tomosugi: J. J. Soc. Hydr.ol. Water Res., **16** (2003), 541-555.