

日本全土の元素分布の調査とその活用

— 陸と海を統合した地球化学図の作成 —

今井 登

日本全土における海と陸の元素分布を調査し、日本の地球化学図を初めて作成した。これにより日本列島の海と陸のバックグラウンド値が明らかになり、陸から海への元素の連続的な流れを知ることができるようになった。地球化学図作成に用いた試料は、陸では河川堆積物3,024個、海では海底堆積物4,905個で、分析した元素はヒ素、水銀、カドミウムなどの有害元素を含む53元素である。この研究では、特定の地域で確立した方法を適用し、現実的な実施可能性を考慮した発想の転換により一挙に全国カバーへの展開を実現し、陸域から海域、さらに土壌へと対象を拡大している。地球化学図は、人間・産業活動による土壌や海底堆積物の汚染の評価にも使用される。また、結果は出版やweb公開により、社会的なインパクトを与えている。本稿では、日本の地球化学図を作成するために採った研究シナリオを述べ、次に試料採取から試料処理、化学分析・元素濃度測定、地図作成、データ公開に至る一連の研究プロセスを述べる。

キーワード: 地球化学図、元素分布、有害元素、土壌汚染、環境汚染

Investigation of the distribution of elements of the whole of Japan and their applications

– Geochemical map of land and sea of Japan –

Noboru Imai

A geochemical map of the whole of Japan has been drawn for the first time by surveying the distribution of elements in land and sea throughout Japan. This map revealed the natural background of the elements distribution and allows us to know the continuous flow of elements from land to sea. The samples used in this work are 3024 riverbed sediments and 4905 seabed sediments and 53 elements including toxic elements of As, Hg, Cd, etc. have been analyzed. In this research, a new survey method has been established for a certain district at first and then it has been applied to the whole of Japan with modification taking realistic operability into consideration, and the object has been extended from land, sea to soil. The geochemical map is also used for evaluating the pollution of soils and marine sediments resulting from human and industrial activities. The results have been made public through publication and website and have had various social impacts. In this paper, the research scenario adopted to compose the geochemical map of Japan is first described, then a series of research processes are described starting from material sampling and treatment chemical analysis, measurement of element concentration, composition of geochemical map to data release.

Keywords: Geochemical map, distribution of elements, toxic elements, environmental pollution

1 はじめに

私達の周りには、どのような元素がどのくらいの濃度で存在しているのだろうか。こんな基本的なことがこれまでなかなか分からなかった。これを視覚的に一目で分かるようにしたのが地球化学図である。たとえば今問題になっている土壌汚染や海洋汚染を議論する上で、ヒ素や水銀、カドミウム等の有害元素の分布が分かれば大きな手がかりとなる。ここでは地球化学図とは何か、著者らが日本の地球化学図をどのように計画して作成したかを述べ、さらにそれがどのように活用されているかを述べる。

2 地球化学図の目的と背景

2.1 地球化学図とは

地球化学図とは、地表(地殻の表層)における元素の濃

度分布図のことである。図1に元素の濃度分布がどのような要因で決まっているかを示した。最も重要なのは、その地域にどのような岩石や堆積物が分布しているかであり、これが自然のバックグラウンドである。その上に、人為的な影響である工業や農業等の産業活動や人々が活動する都市からの排出物が付加され、全体の元素濃度分布はこれらの合計となる。すなわち、汚染を考える場合には自然のバックグラウンドとの比較で考える必要がある。

2.2 地球化学図作成の目的

地球化学図作成の目的は大きく分けて二つ考えられる(図1)。一つ目は、日本の国土の地球化学基本情報を提供することである。地表における元素の分布と移動に関する情報は、岩石の成因や日本列島の成り立ち等地球科学のあらゆる議論の基盤となるデータである。どこにどのよ

産業技術総合研究所 地質情報研究部門 〒305-8567 つくば市東 1-1-1 つくば中央第7

Institute of Geology and Geoinformation, AIST Tsukuba Central 7, 1-1-1 Higashi, Tsukuba 305-8567, Japan E-mail: noboru.imai@aist.go.jp

Original manuscript received May 13, 2010, Revisions received September 4, 2010, Accepted September 8, 2010

うな元素が分布して、その地域や全体の平均値はどのくらいの濃度か等は地球科学の研究を行う上で基礎となる。例えば、日本列島がどのような元素からできているかという最も基本的なデータとしての平均化学組成や、地表のウラン、トリウム等の濃度分布から求められる自然放射線量等の推定がある。学術上の応用として、岐阜県神岡にあるニュートリノ測定のための液体シンチレーション測定装置（KamLAND）に対する自然バックグラウンド推定のために地球化学図が使用されている例がある。ここでは地球化学図で示された地表のウランとトリウムの濃度分布から自然バックグラウンドを推定している^[1]。

二つ目は環境問題で、産業廃棄物や工場廃液等による土壤汚染や海洋汚染を明らかにするための手がかりを与えることである。これらの汚染を評価するためには、有害元素の分布と汚染評価の基準となる自然バックグラウンド値を求めることが重要であるが、これまでは特定地域で限られた元素の調査が実施されたのみで、日本全域を対象にした詳細かつ総合的な調査はなされていなかった。この研究では、日本全土の海と陸における微量有害元素（ヒ素、ベリリウム、カドミウム、水銀、モリブデン、アンチモン等）をはじめとする53元素の分布とバックグラウンド値を明らかにし、元素分布の起源や環境中における元素の動きを解明するために地球化学図を作成した^{[2][3]}。これにより全国的な元素の分布が明らかになり、その起源と循環メカニズムを解明する研究や、環境中における人為汚染の評価、汚染の拡散防止や浄化対策立案に必要な基礎データを提供することができる。

3 地球化学図作成の流れ

図2に著者らが採った地球化学図作成のスキームを示し

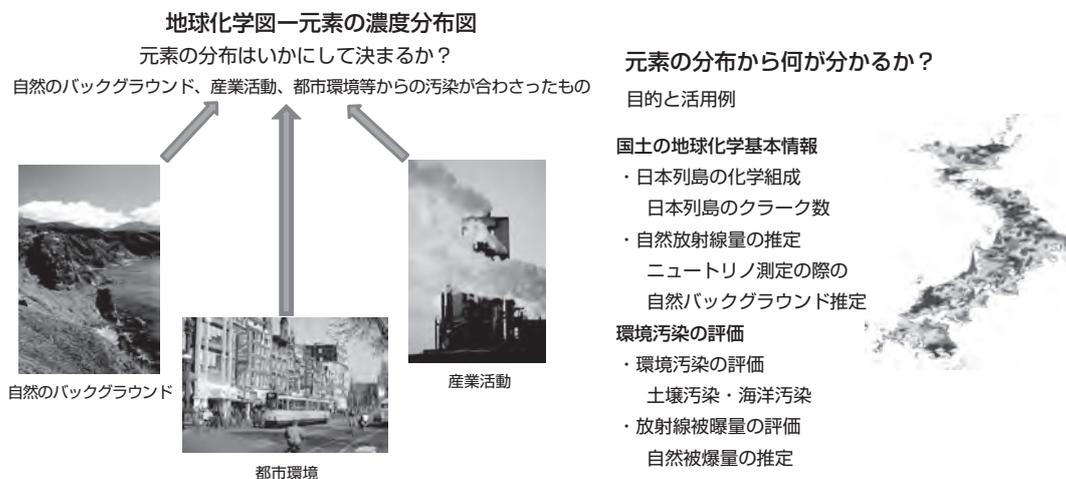


図1 地球化学図における元素分布の要因と活用例
自然のバックグラウンド、産業活動、都市環境からの汚染の合計が元素分布となる。活用例としては国土の基本情報としての利用と環境汚染の評価がある。

た。地球化学図を作成するために試料採取、試料処理、化学分析・元素濃度測定、地理情報システムを用いた作図の4段階を踏んだ。まず、研究室で地形図や地質図、土壤図等をもとに試料採取点を定めた。その地点をもとに実際に現地で試料採取を行った。試料は全国各地から採取した河川堆積物、海底堆積物、土壤等の試料である。試料は実験室に持ち帰って乾燥し、ふるい分け、磁性鉱物の分離、粉碎等の試料処理を行った。次に試料を酸で溶かし、元素濃度をICP分析や原子吸光分析等で測定した。このようにして求めた全国各地での元素濃度から地理情報システムを用いて地球化学図を作図した。

図には同時に地球化学図で用いる河川堆積物、海底堆積物について試料採取、採取した試料、試料処理、地球化学図を示した。河川堆積物については、試料採取は河川に行きスコップ等で採取するだけと比較的簡単であったが、試料処理では乾燥後のふるい分けや磁性鉱物を分離する作業が必要であった。一方、海底堆積物の採取には船が必要で、船上から採泥器を降ろして海底から試料を挟み込むようにして試料採取を行った。採取した試料は乾燥と粉碎を行った。分析と作図はすべての試料で基本的に同じように行った。

4 地球化学図作成における研究の展開

このような地球化学図を作成することは、地表での重金属の局所的な異常濃集帯を発見してその周辺に存在する鉱床を探査する目的で古くから行われていた。しかし、先進国では未発見の鉱床がほとんどなくなり、現在は別の観点、すなわち環境問題から地球化学図が見直されている。地球化学図を用いれば、有害元素がどのように分布しているかが分かるからである。このような観点で初めて全国的

な地球化学図を作成したのがイギリスの Imperial College の Webb らのグループであった^[4]。かれらはイギリス全土（約 151,000 km²）から約 50,000 個の試料を採取して全国をカバーする地球化学図を作成し地球化学アトラスと名付けた。現在では、ヨーロッパ全土に拡張されて地球化学図が作成されている^[5]。国内外の地球化学図については文献を参照されたい^{[6]~[9]}。

4.1 産総研の研究シナリオ

図3に日本全土の地球化学図の作成と公開のためのシナリオを示した。地球化学図を作成するうえでの構成要素としては、図に示したように元素分布、元素存在度、地殻表層、元素の種類、試料の種類と採取密度、陸域・海域、採取試料の代表性、試料の処理、試料の分析、公開の媒体、作図とデータの標準化、調査・分析体制、方法の標準化が考えられる。これらは地球化学図作成のための基本的な構成要素であるが、さらに地球化学図を支えるキーとなる五つの基本要素である基本特性、網羅性、信頼性、ユーザー利便性、運用性として統合することができる。これらの一つ一つが土台となって最終目標である「海と陸を統合した日本全土の地球化学図の作成と公開」が達成されることが考えられる。

産総研でのこれまでの地球化学図の作成の経緯を図4に示す。鉱床を目的とした地球化学探査は産総研でも以前から行っていたが、広域の地球化学図を系統的に作成したのは北関東地域が初めてであった。計画した目的は全国をカバーするための第一段階としての手法と方法論の構築であった。その後、重点地域として仙台・山形と日本海沿岸（北陸から秋田沖）の地球化学図を作成し、いくつかの経緯を経て全国展開を行い陸域の全国地球化学図を完成した。

次に陸域部分の延長としての海域の全国地球化学図を作成し、海陸の全国地球化学図が完成した。現在はさらなる展開として土壌の全国地球化学図を作成中である。

4.1.1 北関東の地球化学図の作成（最初の方法論の構築と展開への模索）

上記のように旧工業技術院地質調査所では1991年に水戸市からいわき市にいたる北関東地域で地球化学図を作成した^{[10][11]}。プロジェクトの最初の立ち上げの動機は、イギリス全土の地球化学図が発表され大きなインパクトを与えていたことである。イギリス全土が色づけされて元素の分布が一目で分かるというその分かり易さと強烈な印象は特筆されるもので、しかもその手法は鉱床探査を目的とした地球化学探査という、地質調査所の地球化学グループがこれまで行っていた手法そのものであった。北関東地域の地球化学図の作成は、当時の地球化学関連の複数のグループが協力して新たな国土の基本図に取り組みという点では初めての大型プロジェクトとして提案され、大きな期待を集めて開始された。

北関東の地球化学図では約 4,000 km² から河川堆積物の試料を約 3,850 個採取したが（試料の採取密度は約 1 km × 1 km に 1 個）、プロジェクトを始めるに当たって、この膨大な数の試料採取をいかに行うかが問題となった。結局、7-8 人の研究者と 20 人以上の補助者（学生）がチームを作り、5 年間にわたり夏休みの最初の 2 週間で試料採取を行うこととなった。このときはできるだけ試料処理を現地で完了することとし、川の水を用いて細粒の砂を現地でふるいをとおしてろ過し分離した。化学分析に当たっては、当時ようやく普及しはじめた ICP 発光分析法と、多元素を同時に分析できる中性子放射化分析法を自動化することに

試料採取 ⇒ 試料処理 ⇒ 化学分析 ⇒ 元素濃度測定 ⇒ 地理情報システムによる作図

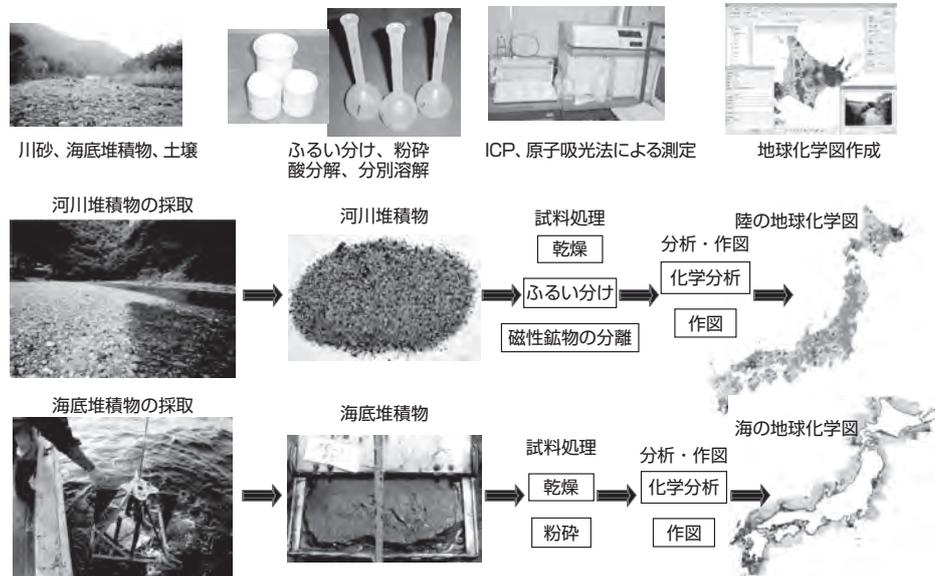


図2 地球化学図作成のスキーム
試料採取から地理情報システム (GIS) による地球化学図の作図までと、地球化学図で用いた河川堆積物、海底堆積物と試料処理、化学分析、地球化学図。

より行った。分析した元素はコバルト、クロム、銅、ニッケル、リン、鉛、ウラン、亜鉛等の26元素であった。この研究は広域的な地球化学図を日本で初めて本格的に作成した点で重要な意義があったが、試料採取から分析まで膨大な作業を伴い、役割分担や仕事内容を適切に検討することが重要であった。地球化学図については常にこのような点が問題となる傾向があるので注意が必要である。

4.1.2 全国の地球化学図へ（発想の転換による展開）

この後、研究の範囲を拡張して全国の地球化学図を作成しようとしたが、当時はそのままの形で全国に展開することを想定していたため、日本列島の広さが約38万km²に対して試料数は1kmメッシュとして38万個にもなり、実現には膨大な手間と費用がかかることが予想され、プロジェ

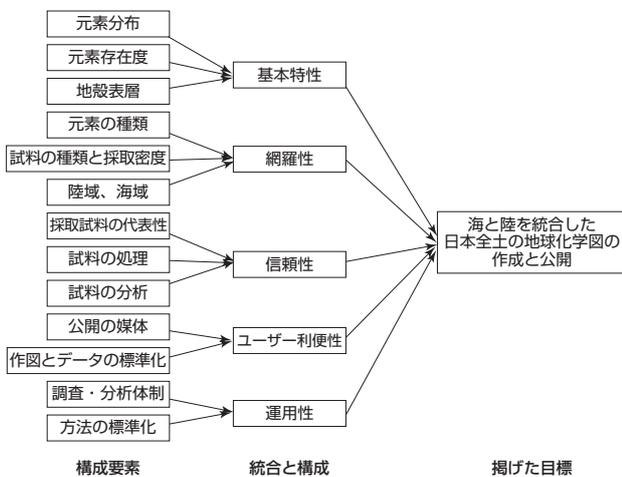


図3 日本全土の地球化学図の作成と公開のためのシナリオ
各構成要素と地球化学図を支えるキーとなる基本要素および最終目標。

クトを提案してもまじめに耳を傾けてくれる人はいなかった。この間、独自にごく狭い地域であるが仙台市^[12]および山形市周辺地域^[13]で地球化学図を作成する仕事を継続していた。また、海域としては能登半島から秋田沖にかけての沿岸海域地球化学図^[14]も作成した。

大きな転機は雑談の中からであった。ある時、地球化学図の全国展開は本当に無理なのかという話題になり、費用と人員から夢物語であるとあきらめていた自分に対して、発想を逆転させてみたらどうか、実現するためには現実的な観点から費用と人員にどのような条件が必要であるか考えてみたらどうかと提案があった。当時は1kmメッシュという試料採取密度にとらわれていたため、それよりメッシュが粗くなると意味がないと考えていたが、この点にこだわらなければ費用、人員、実施期間に目処が見えてくることがわかった。一般的なプロジェクトの期間として5年を設定し、10kmメッシュにすることで試料数を約3,000個に抑えることができる。これなら十分に実現可能である。すなわち第一段階として試料採取密度は粗くてもまず全国をカバーし、必要があればその後で特定の地域を別途試料採取密度を上げて地球化学図を作成すれば両方の要求を満たすことができるのではないかと考えた。こうして外部に予算要求しプロジェクトを開始したのが1999年であり、日本で初めて全国の地球化学図が完成したのは2004年のことであった^[2]。これにより10kmという粗いメッシュであっても日本列島のいくつかの特徴的な元素分布を初めて明らかにすることができ、当初の試料採取密度が粗すぎでは何も分からないのではないかと懸念は払拭された。全国

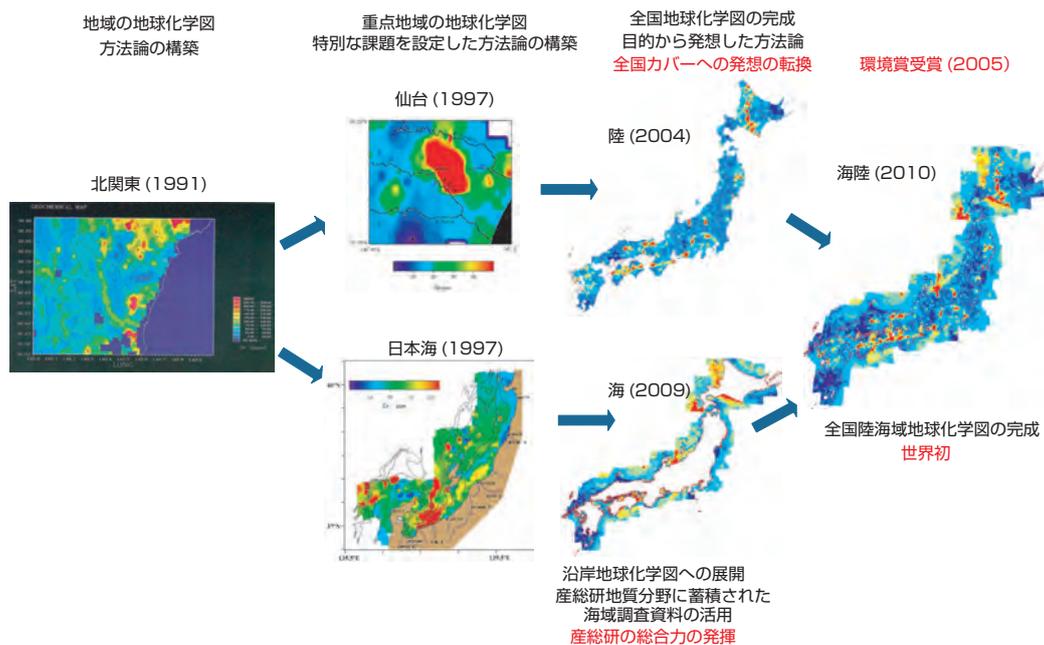


図4 地球化学図作成における研究の展開
産総研がこれまでに作成してきた北関東の地球化学図(1991)から日本の地球化学図(2004)、海と陸の地球化学図(2010)まで。

地球化学図は視覚的な分かり易さからさいわいにも社会から大きな反響があり、さまざまな方面で利用されると共に2005年に「環境賞」を受賞することができた^[15]。

4.1.3 沿岸海域の地球化学図（次の段階への進展）

その後の展開として、どのように研究を進展させるかについていくつかのアイデアがあったが、一つは陸の延長として、元素分布が海にどのように伸びているかという課題があった。海の地球化学図に関しては以前に北陸～秋田沖の海域で作成した経験があり、また地質調査所の長年の沿岸海域調査の研究ですでにかなりの海域で海底堆積物試料が採取済みであり、試料が保管されていたことが契機となった。地質に関する総合研究機関として、これらの過去の研究蓄積を最大限に利用することで全国の沿岸海域で比較的容易に地球化学図が作成可能であると思われた。日本全国についてその時点で入手できていなかったいくつかの海域（面積で全体の約3割）で新たに試料採取を行うことで、全国の沿岸海域の海底堆積物をそろえることができた。新旧あわせた試料総数は4,905個にのぼり、これを用いることにより2010年に「海と陸の地球化学図」を完成することができた^[3]。海と陸の両方を統合した全国地球化学図の作成は例がなく世界初であった。これにより、陸と海の元素分布がつながり、陸から海へ元素が移動していく過程を理解することが可能となった。その後現在は、さらなる研究の展開として外部予算を獲得し、全国から約3,000個の土壌試料を採取して全国の土壌地球化学図を作成中である。

5 地球化学図を作成するための要素技術（目的達成のための要素技術の開発）

地球化学図を作成するための要素技術としては試料採取、化学分析、作図がある。目的を達成するために、実際に開発した手法の留意点について、従来法とどのような違いに着目して地球化学図を作成していったかについて以下に述べる。実際の詳細な手順は過去の文献を参照されたい^{[2][3]}。重要なのは膨大な数の試料に対する取り扱いの自動化と、すべての試料を単一の手法で処理する標準化であると考えた。これまではさまざまな地域で異なった手法により地球化学図が作成されたため、それらをすぐに比較することは困難であったが、標準化した手法を採用することにより全国のデータを均質かつ統一的に解析できるようになった。

5.1 試料採取

5.1.1 北関東の地球化学図における試料採取^[11]

広域の地球化学図を作成する上で最も重要なのは、膨大な数の試料をどのようにして採取するかである。この研

究で使用した河川堆積物を採取するにあたって初期の頃に用いた方法は、試料採取後の処理の時間をいかに少なくするかであった。このため、できるだけ現地で必要な作業を終わらせてしまうように努力した。前述したように具体的には、研究者一人と補助者（学生）2～3人が1チームとなり、1/2.5万か1/5万地形図を見ながら車で試料採取点に移動する。1 km メッシュで試料採取を行うためにはかなり小さな川や沢まで移動する必要があり、車で入れない場合は歩くしかない。試料採取点は支流の付け根（その流域の一番下流の部分）で行うのが原則で、あらかじめ研究室で採取地点を定めておき、そこにいかに早く到着するかが重要である。

現地に着いた後は、川砂の中から80メッシュ（約0.17 mm）より細かい河川堆積物の成分をふるい分ける必要がある。できるだけ細粒の川砂を80メッシュのふるいに入れて、川の水をかけながらふるいを通った砂や泥をろ紙で濾し分けて80メッシュ以下の成分を分離する。しかし、試料によってはろ紙が目詰まりを起こしてろ過にとっても長い時間がかかったり、細粒の砂がなかなかなくて探すのに手間取ったりした。必要量がとれないと何度もろ過してますます時間がかかる。結局、1日に採取できるのは数個程度であることが多かった。試料は宿に戻って広げて乾かすと一晩でかなり乾燥した。こうして2週間の出張で一人60～100個程度、全体で600～800個の試料を採取することができた。

5.1.2 全国の地球化学図の試料採取^[2]

全国の地球化学図を作成するに当たって考えたことは、北関東で問題になった膨大な作業に対する人的負担をいかに減らすかであった。すべてを外注してしまえば手間は減るが費用も莫大になり、研究プロジェクトとして現実的ではない。費用を抑えるにはできるだけ自前のマンパワーで行うしかないが、それには最も手間のかかる試料採取、採取現場では試料処理作業は一切行わず、採取作業のみにとどめたことが重要であった。そうすれば仮に外注したときも費用も安く済むからである。したがって、北関東の時のような現地でのふるい分けと乾燥は行わず、できるだけ細粒の砂を探して約2 kgと比較的多量の試料をスコップや採泥器で採取してくるだけにとどめた。また、試料採取地点はできるだけ大きな河川と大きな道路を選び、川と道路が交差する到達しやすい地点に設定した。しかし、試料採取密度が粗いので試料採取点の間の移動距離が長く時間がかかり、特に山間部では谷が深く地図上では容易に試料採取できるように見えても、実際の川は断崖絶壁のはるか下方で、川に下りる道を探すのに長時間を費やしたり（この場合でも釣り人等のために川に下りる小さな道が意外とあったりす

る)、場合によっては不可能な場合もあった。結局、試料総数 3,024 個のうち約半数は自前で採取し、それ以外は外注して採取することとした。この場合は実験室で乾燥とふるい分けの作業が別途必要であるが、多数の試料を並行して一挙に行うことで比較的効率よく行うことができた。

5.1.3 海底堆積物の採取^[3]

海の地球化学図の作成についても試料採取が最大の問題であった。海底堆積物の採取は船を使用するため陸上の試料採取と違って個人で行うことは困難である。特に、水深数百 m を超えるような試料採取は、大型の専用船でないと事実上不可能であり多大な費用もかかる。この研究では、過去に地質調査所が日本周辺海域の調査で 2,000 トン級以上の専用海洋調査船を用いて約 3,000 m の水深まで採取した海底堆積物試料をそのまま使用することができたのは経費の節減にとって大きかった。これとは別にこの研究で、試料のなかった海域で新たに採取した場所の水深はせいぜい 100 m ~ 200 m 以下であり、個別の研究予算ではこの程度が限度である。しかし、水深 200 m 以下の海域は意外と広く、特に大陸棚の発達した西日本では広い海域を問題なくカバーすることができた。試料採取と試料処理は基本的には陸域と同じ方法によった。海底堆積物試料は、調査船から降ろしたグラブ採泥器(スミスマッキンタイヤー型採泥器)を用いて採取した。試料総数は 4,905 個である。試料を採取して引き上げた様子を図 2 に示した。

5.2 化学分析

この研究では大量の試料を分析する必要があるため、試料処理と分析の方法はできるだけ標準化すると共に自動化するように努力した。分析法は北関東の地球化学図では ICP 発光分析法と放射化分析法を用いて 26 元素を、全国の地球化学図では ICP 質量分析法と原子吸光法を用いて 53 元素を測定した。いずれもオートサンプラーや自動測定システムを最大限に活用した。試料処理を簡単化するために、河川堆積物は 80 メッシュ以下の成分を粉碎することなくそのまま分析した。ほとんどの場合は粉碎したときと分析値は同じであった。また、河川堆積物については磁石を用いて砂鉄等の磁性鉱物を除いて分析した。河川の中では水の分別作用により重鉱物等が濃集する場合があります、特に砂鉄の多い地域では砂鉄マップのようになって不自然な地球化学図になってしまうことを避けるためである。分解法は硝酸・過塩素酸・フッ化水素酸の混合酸による分解と、0.1 N の塩酸抽出による分析を併用した。

5.3 作図法

地理的に離散的な地点から採取した試料から、連続的な地球化学図を作成するにはデータの無い部分を補完する

必要がある。河川堆積物についてはデータをそのまま補完するのではなく、各試料採取点ごとに流域解析を行って上流となる流域を定めて、その地域を同一濃度とする方法をとった。計算を簡単にするため、このように流域で表した濃度データにメッシュをかけて、各メッシュに流域の元素濃度を割り当て、そのメッシュデータに対して補完を行って作図した。海底堆積物に関しては、海水や海流による試料の移動も考えられるが、取り扱いが複雑になるのでここでは考慮せず、そのまま濃度データを補完して地球化学図を作成した。

6 全国の地球化学図とその解釈(自然と人間活動における元素挙動の理解)

この研究では海と陸の地球化学図を 53 元素について作成したが、元素毎に自然界や人間活動による挙動が異なり、それぞれの状況に応じた解釈が必要となる。ここでは特徴的なクロム、水銀を例に挙げて述べることにする。ほかの元素およびそれぞれの地域での元素分布の特徴の詳細については個別の論文を参照されたい^{[16]-[20]}。

6.1 クロムの地球化学図

図 5-1 にクロムの地球化学図を示した。この図でまず目につくのは四国と北海道に 2 本の赤い線(高濃度地域)が見られることである。すなわち四国・近畿を東西に横断して東海・関東に至る中央構造線や、北海道の中央部を南北に縦断する構造線に沿って 200 ppm 以上の顕著な高濃度地域が見られる。これは、この地域に分布するクロムやニッケルを多量に含有する緑色岩類や、その周辺の超塩基性岩に起因すると考えられる。海域でも赤色の濃度の高い部分が北陸沖や北海道南部沿岸海域に見られる。もっとも顕著なのは北陸地方のフォッサマグナの北端である糸魚川市姫川周辺で、陸域のクロムの高濃度域が海域の延長方向に伸びている。これは陸の姫川流域のクロムの高濃度域と海の高濃度域が連続するもので、姫川からクロムを高濃度に含有する蛇紋岩の碎屑物が海域の富山深海長谷に沿って流れ出ていることを示している。図にはこの地域の海底地形も示したが、姫川沖に海底の谷があり、碎屑物が姫川からこの谷に沿って海に流れ出ている様子が分かる。

6.2 水銀の地球化学図

図 5-2 に水銀の地球化学図を示した。陸上では北海道のイトムカや紀伊半島の大和鉱山等の大規模な水銀鉱床の存在する地域で顕著な高濃度を示すほか、大都市周辺でも濃度が高い場合が多い。海については、東京湾、伊勢湾、大阪湾等で濃度が高く、人口密集地からの人為的影響が考えられる。図には九州、北陸、近畿地方の水銀

の地球化学図を示した。九州西部の八代海や新潟沖で高濃度域が見られる。これらの高濃度域には過去の水銀汚染の影響が残留している可能性がある。また、佐渡北部周辺海域の水銀の高濃度は、過去の佐渡金山の採掘に伴う影響が可能性として考えられる。近畿地方の伊勢湾、大阪湾の水銀の高濃度は都市からの人為的な影響のほか、紀伊半島における大規模な水銀鉱床である大和水銀鉱床の影響も関与しているものと考えられる。

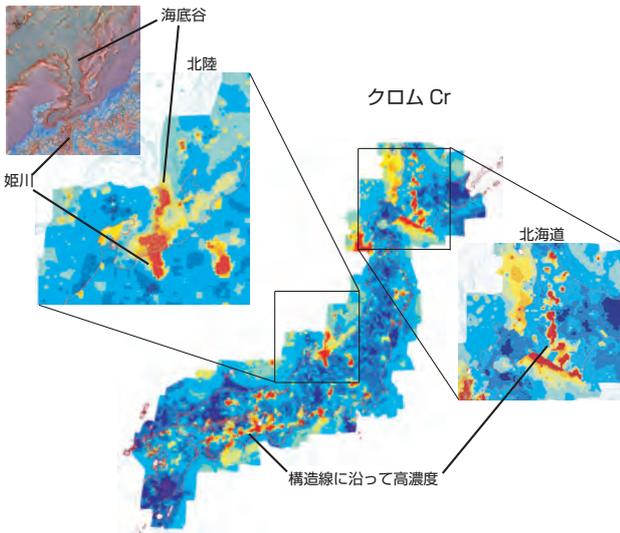


図 5-1 クロム Cr の全国地球化学図と北陸および北海道の地球化学図の拡大図
中央構造線と北海道の構造線に沿ってクロム濃度の高い赤い帯が見える。フォッサマグナ北端の姫川では陸から海への高濃度域の連続性が認められる。

7 データの公開 (公共財としての社会への情報提供)

これまでに蓄積された地球化学図の全データを、ウェブ上で容易に参照できる形で公表するためネットワーク上にホームページを作成した。図 6 に地球化学図のホームページを示した。ここでは全国の陸と海の地球化学図が参照できるほか、地域ごとに拡大した地球化学図、および全 3,024 個の河川堆積物および 4,905 個の海底堆積物のそれぞれの元素濃度等の詳細情報がネットワーク上で簡単に参

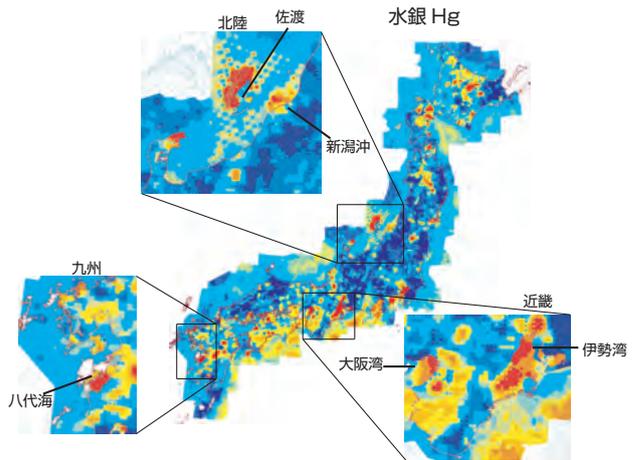


図 5-2 水銀 Hg の全国地球化学図と九州、北陸、近畿地方の地球化学図
八代海、新潟沖は過去の汚染の影響が、佐渡では鉱山の影響が、伊勢湾、大阪湾では鉱床と都市活動の影響が高濃度の可能性として考えられる。

図 5 地球化学図の解釈による自然と人間活動における元素挙動の理解

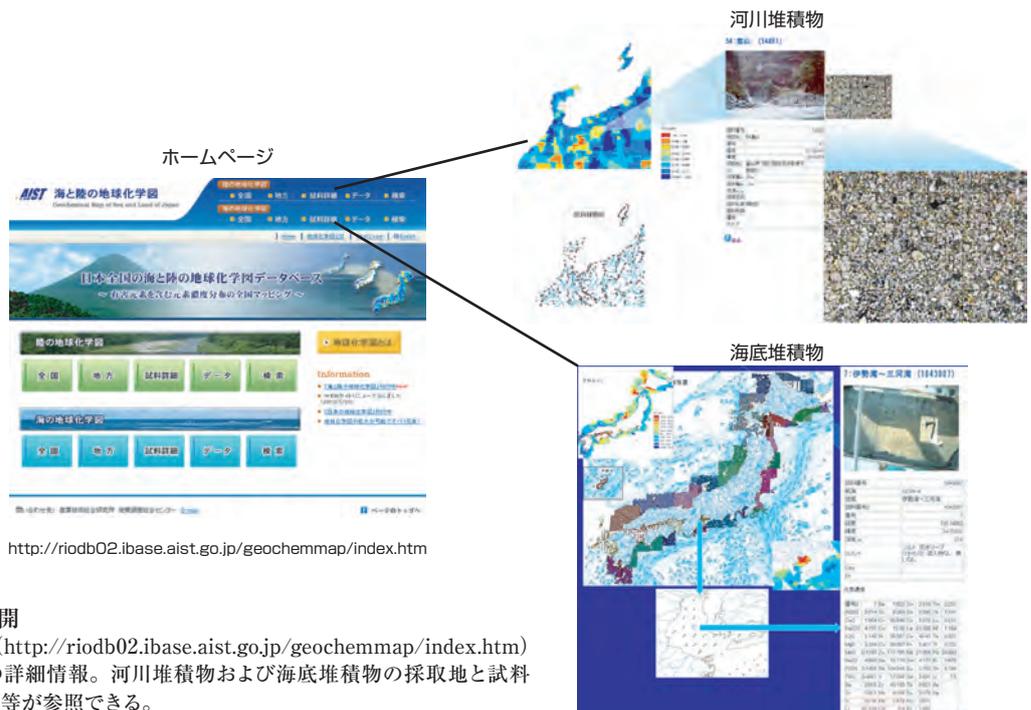


図 6 地球化学図の情報公開
地球化学図のホームページ (<http://riodb02.ibase.aist.go.jp/geochemmap/index.htm>) と河川堆積物、海底堆積物の詳細情報。河川堆積物および海底堆積物の採取地と試料の写真と緯度経度、元素濃度等が参照できる。

照できる。また、河川堆積物はすべての試料で採取地と試料の写真を、海底堆積物試料は一部の試料で採取時の試料の写真を見ることができる。特に、河川堆積物はクリックすると大きく拡大して見ることができ、その地域に分布する大まかな岩石の種類や堆積物を推定することができる。また、このほかホームページ上から全試料の元素濃度、緯度経度、全国・地方地球化学図データ（画像 /GIS シェープファイル）および関連情報をダウンロードすることができる。

8 地球化学図の活用（国土の基本情報の多様な活用）

地球化学図は日本の海と陸の地殻表層の元素分布を表し、そのデータは国土の地球化学基本情報として重要である。また、河川堆積物は全国津々浦々からまんべんなく採取され、個々の河川堆積物はそれぞれの地域の流域を代表しているため、すべての試料の平均値は日本全体の平均化学組成とも考えられる。日本に分布する代表的な岩石166試料の分布割合とその組成から計算して求めた日本の平均化学組成（日本列島のクラーク数）^[21] が求められているが、これを理論値とすると、地球化学図における3,024個の河川堆積物の平均値は実際に測定した実測値とも言える。実際に両者はよく一致することが分かっている。

また、放射能レベルの評価にも利用することができる。自然放射線量は、空からの宇宙線と周囲の岩石や堆積物からの自然放射線の合計で決まるが、後者は岩石や堆積物中のカリウム、ウラン、トリウム濃度が大きく関与する。すなわち、これらの元素の濃度を地球化学図から求めて自然放射線量の概略値を算出することができ、例えばカリウム、ウラン、トリウムを多く含有する花崗岩が広く分布する西日本は自然放射線量が大きいことがわかっている。また、各地の原子力施設からの放射能の汚染レベルについても、これらのバックグラウンドと比較することにより評価できると考えられる。

一方、社会的な利用としては、地球化学図は最近問題になっている土壤汚染について各地における基盤的なデータとして利用されている。自治体の関連施設や会社・工場の所有地における元素濃度を簡単に知ることができ、詳細な汚染調査の事前調査として有効である。2.1節で述べたように、土壤汚染を考えるときに環境基準と共に自然のバックグラウンドレベルとの比較が重要である。もともと周辺にある鉱床や温泉等で自然のバックグラウンドレベルが高い地域があり、工場等による人為的な汚染と区別する必要がある。地球化学図は基本的には自然のバックグラウンドを表すので、これと比較することにより周辺の環境汚染を評価することができる。このようなデータは国・自治体における汚染の拡散防止や浄化対策立案の基盤資料として利用

することができ、産業立地や工場周辺のリスク評価に利用することにより、立地評価費の軽減や土壤汚染対策経費節減に役立つと考えられる。

以上のように地球化学図のデータは、基本的にすべて一般に公開されているため、利用する側の工夫によってさまざまな利用法があると考えられ、こちらでは考えつかないような利用法が時に提案される。例えば科学警察研究所の捜査における土壤試料の全国のデータベースとして、産地推定に使用する可能性について現在共同研究を行っているところである。いろいろな応用の可能性についても、今後大いに地球化学図のデータが利用されることを望みたい。

現在私達は全国から約3,000個の土壤試料を採取して土壤地球化学図を作成している。この中で地殻における元素の分布と移動・拡散過程の解明に関する研究成果を応用して、有害元素についての全国規模での陸域～河川域～海域を一体化した環境汚染評価システムを開発する予定である。今後、さまざまなデータを統合化して有害元素による汚染に関する考察を行っていきたいと考えている。

参考文献

- [1] S.Enomoto, E.Ohtani, K.Inoue and A.Suzuki: Neutrino geophysics with KamLAND and future prospects, *Earth and Planetary Science Letters*, 258, 147-159 (2007).
- [2] 今井 登, 寺島 滋, 太田充恒, 御子柴(氏家)真澄, 岡井貴司, 立花好子, 富樫茂子, 松久幸敬, 金井 豊, 上岡 晃, 谷口政碩: *日本の地球化学図*, 210, 地質調査総合センター (2004).
- [3] 今井 登, 寺島 滋, 太田充恒, 御子柴(氏家)真澄, 岡井貴司, 立花好子, 池原 研, 片山 肇, 野田 篤, 富樫茂子, 松久幸敬, 金井 豊, 上岡 晃: *海と陸の地球化学図*, 207, 地質調査総合センター (2010).
- [4] J.S.Webb, I.Thornton, M.Thompson, R.J.Howarth and P.L.Lowenstein: The Wolfson geochemical atlas of England and Wales, *Imperial College of Science and Technology*, 69 (1978).
- [5] R. Salminen, W. De Vos and T. Tarvainen: *Geochemical Atlas of Europe*, Part 1 and 2, EuroGeoSurveys (<http://www.gtk.fi/publ/foregsatlas/>) (2005,2006).
- [6] K.Yamamoto, T.Tanaka, M.Minami, K.Mimura, Y.Asahara, H.Yoshida, S.Yogo, M.Takeuchi and M. Inayoshi: Geochemical mapping in Aichi prefecture, Japan: Its significance as a useful dataset for geological mapping, *Applied Geochemistry*, 22, 306-319 (2007).
- [7] 青木かおり, 新藤智子, 楠野葉瑠香, 福岡孝昭: 河床堆積物の化学分析に基づく地球化学図作成の今後の展望－地球化学図作成のための準備と分析方法を中心に－, *地球環境研究*, 11, 227-238 (2009).
- [8] 菅 和哉, 黒沢邦彦: 北海道中央部における土壌元素の地球化学図, *北海道立地下資源調査所調査研究報告*, 26, 39 (1996).
- [9] T.Seki, K.Yamaguchi, Y.Noumi, M.Asada, T.Matsuda and J.Takada: Geochemical characteristics of sediments from the Takahasi river at Okayama prefecture. *KURRI Progress Report*, 1999, 111 (2000) (岡山県の地球化学図 <http://www.big.ous.ac.jp/~seki/kagakuzu/a.htm>).
- [10] 伊藤司郎, 柴田 賢, 田中 剛, 宇都浩三, 安藤 厚, 寺島 滋,

今井 登, 金井 豊, 坂本 亨: 地球化学図による元素のバックグラウンドと人為汚染の評価技術に関する研究, 昭和60年度国立機関公害防止等試験研究成果報告書, 82-1~82-17, 環境庁 (1985).

- [11] 伊藤司郎, 上岡 晃, 田中 剛, 富樫茂子, 今井 登, 金井 豊, 寺島 滋, 宇都浩三, 岡井貴司, 氏家真澄, 柴田 賢, 神谷雅晴, 佐藤興平, 坂本 亨, 安藤 厚: 地球化学アトラス-北関東-, 35, 地質調査所 (1991).
- [12] 今井 登, 岡井貴司, 遠藤秀典, 田口雄作, 石井武政, 上岡 晃: 仙台市周辺の地球化学図と環境評価, 地質ニュース, 513, 26-30 (1997).
- [13] 今井 登, 岡井貴司, 遠藤秀典, 石井武政, 田口雄作, 上岡 晃: 山形市周辺地域の地球化学図, 環境地質アトラス, 37-40, 地質調査所 (2000).
- [14] 今井 登, 寺島 滋, 片山 肇, 中島 健, 池原 研, 谷口政碩: 日本海東部沿岸域海底表層堆積物中の重金属等の地球化学的挙動, 地質調査所月報, 48, 511-529 (1997).
- [15] 今井 登, 寺島 滋, 太田充恒, 御子柴真澄, 立花好子: 環境賞, 環境評価の基盤となる地球化学図の作成, 日立環境財団 (2005).
- [16] M.Ujiiie-Mikoshiha, N.Imai, S.Terashima, Y.Tachibana and T.Okai: Geochemical mapping in northern Honshu, Japan, *Applied Geochemistry*, 21-3, 492-514 (2006).
- [17] A.Ohta, N.Imai, S.Terashima, Y.Tachibana, K.Ikehara and T.Nakajima: Geochemical mapping in Hokuriku, Japan: Influence of surface geology, mineral occurrences and mass movement from terrestrial to marine environments, *Applied Geochemistry*, 19, 1453-1469 (2004).
- [18] A.Ohta, N.Imai, S.Terashima and Y.Tachibana: Application of multielement statistical analysis for regional geochemical mapping in Central Japan, *Applied Geochemistry*, 20, 1017-1037 (2005).
- [19] A.Ohta, N.Imai, S.Terashima and Y.Tachibana: Influence of surface geology and mineral deposit to spatial distributions of elemental concentrations in stream sediments in Hokkaido, Japan, *J. Geochemical Exploration*, 86, 86-103 (2005).
- [20] 寺島 滋, 今井 登, 立花好子, 岡井貴司, 御子柴(氏家)真澄, 太田充恒, 久保田蘭: 関東地域の土壌, 河川堆積物, 東京湾堆積物の化学組成とバックグラウンド評価, 地質調査研究報告, 58, 69-91 (2007).
- [21] S.Togashi, N.Imai, Y.Okuyama-Kusunose, T.Tanaka, T.Okai, T.Koma and Y.Murata: Younger upper crustal chemical composition of the orogenic Japan Arc, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 1, 1049, doi:10.1029/2000GC000083 (2000).

執筆者略歴

今井 登 (いまい のぼる)

1980年東京大学理学系研究科化学専門課程博士課程修了。1981年地質調査所技術部化学課入所、現在産総研地質情報研究部門地球化学研究グループ。地球化学、分析化学が専門。岩石の分析、ESR年代測定、地球化学図、産総研岩石標準試料の発行を行ってきた。現在は、地球化学図を全国の陸域、海域、土壌について作成するプロジェクトを進めている。地球化学図で2005年環境賞、認証標準物質で2010年文部科学大臣表彰科学技術賞（開発部門）を受賞。



査読者との議論

議論1 全般的なコメント

コメント (富樫 茂子: 産業技術総合研究所評価部)

本論文は、国土の基本的な地質情報の一つとして、日本全国をカバーする陸域と沿岸域の地球化学図を完成するまでの方法論という点で意義のある論文です。地域情報から作成を開始した地球化学図を、発想を転換することで外部予算を獲得して全国一気に展開が可能とし、さらに多様に利用されることにより環境賞を受賞している点が特筆でき、シンセシオロジー論文としての確度です。

なお、読者に、まず地球化学図とは何で、どのように使われるかをわかりやすい図で示したほうが良いと思います。いくつかの具体例のキーワードを後章の活用の部分からも加えて記載してください。さらに、地球化学図作成の経緯についてもシンセシオロジーとしてより一般化した方法論の記述が望まれます。

当初の原稿は「解説」的でしたが、上記の一次コメント等に対応し、研究の進め方や社会貢献の方法論の一般化を意識した再構成により改善されました。

回答 (今井 登)

ご指摘にしたがい、論旨の展開を明確にするために文章の構成を修正しました。「2.1 地球化学図とは」で地球化学図の説明を行い、「3 地球化学図作成の流れ」で地球化学図作成のスキームについて述べ、全体としての構成を整えました。

議論2 研究シナリオの類似性

コメント (小野 晃: 産業技術総合研究所)

この研究の目標は海と陸とを統合した日本全土の地球化学図の作成であり、その成果がオリジナルな優れたものであると同時に、統合的、構成的な手法を含んだ第2種基礎研究および製品化研究の方法論としても優れたものと思います。

地球化学図を作成することは、大規模なデータベースを作ることと等価ではないかと考えます。査読者は物性データベースの構築に携わった経験がありますが、シナリオの設定部分がよく似ているように思いました。

データベースの構成要素は、データの基本特性、データの網羅性と信頼性、ユーザーがデータベースを使うときの利便性、データベースを構築したり利用に供したりするときの運用性等等です。データベースに関するこれらの特性は、地球化学図にも共通すると思うのですがいかがでしょうか。もし共通する部分があるならば、類似したシナリオの図を地球化学図でも描いていただくと、読者にとって分かりやすいと思います。

回答 (今井 登)

たいへん丁寧に原稿を見ていただき有り難うございました。また、具体的なシナリオの図を提案していただき有り難うございます。図は全体を見通すうえでたいへん分かりやすく、良くできていると思われますのでこれをもとにいくつかの用語を修正して全体シナリオの図3としてみました。専門外の方の視点は参考になるものが多くたいへん勉強になりました。有り難うございました。

議論3 研究の初期段階での動機

質問 (小野 晃)

この論文では、日本における地球化学図の研究の源流は、1991年の北関東地域のものにまで遡るとしています。今回、日本全土の地球化学図が出版されるまでに約20年を要していますが、北関東の地球化学図で方法論を構築できたことが今日の成功につながる大きな要因だったと思います。

その意味では、北関東の地球化学図の作成を決断したことが、たいへん重要なポイントだったように思います。当時、その決断

した動機はどのようなものだったのでしょうか。先行するイギリスの地球化学図の研究から刺激を受けて始めたのでしょうか。あるいは独自の学術的な興味から始めたのでしょうか。

回答（今井 登）

ご指摘のように北関東の地球化学図を最初にアイデアを出して立ち上げたことがたいへん重要なポイントであったと思います。当時の地球化学図プロジェクトの立ち上げの目的はいくつかあったと思います。1991年3月に北関東地域の地球化学図が完成いたしました。そのプロジェクトが5年計画で1985年4月1日が開始です。予算（公害特研）が通ったのがその前年ですから、準備は1984年頃からは行っていたこととなります。当時の私はまだ新人であり、立ち上げの経緯のすべてを知っているわけではありませんが、次のようなことであったと思います。

立ち上げの動機の第一は、ご指摘のようにイギリス全土の地球化学図が発表され大きなインパクトを与えていたことです。イギリス全土が色付けされて元素の分布が一目で分かるというその分かり易さと強烈な印象は特筆されることです。しかもその手法が鉱床探査を目的とした地球化学探査という、地質調査所の地球化学グループがこれまで行っていた手法そのものであったことで、私達にもすぐにでもできるように思われました。

当時の地球化学図作成に係わったグループは高いポテンシャルを持って地球化学の基礎研究や化学分析を行っていましたが、地質調査所の「地質図作り」といった主要プロジェクトとはある意味遠いところで仕事をしておりました。地球化学図は、そのような地球化学関連の複数のグループがまとまって新たな国土の基本図作りを一緒に行うことのできる一つの大型プロジェクトとして考え出されたもので、地球化学関連グループが初めて行うプロジェクトとして大きな期待を集めました。もちろん広域的な元素の分布と移動過程を知るという独自の学術的な興味もありましたが、当時の大型分析設備である放射化分析装置やICP発光分析装置等の導入による地球化学研究の促進も大きな目的でした。曲折もありましたが、だれもが認めるようになったのは全国図が完成して高い評価を得てからだと思えます。

議論4 野外調査と室内実験の方法論の類似性

コメント（小野 晃）

データの量が増大するという点からみますと、十分密なメッシュで試料を採取すること、広域をカバーすることは競合する要素で、どちらを優先するか、あるいはそれらをどう調和させるかは難しい問題だったと思います。この研究では粗い調査点でも広域であれば科学的に意味のあるデータが取得できるという仮説を最初に設定したことが重要な点であったように思います（それは後から見事に検証されることになりました）。

野外調査ではありませんが、実験室内での研究、たとえば物性研究では試料の温度を変えて物性を測定する場合に、まず粗い温度間隔で必要とする温度の全範囲をカバーして全体の傾向をいち早く把握し、その後さらに興味ある範囲を選んでより細かい温度間隔で測定していくという手法をとります。分野は違っても、まず全体像を把握し、それから詳細な部分に進んでいくという手法が共に有効であることは共通の手法であるように思います。野外調査は室内実験のように測定を容易に繰り返せるものではないので、そのような手法がより重要と思えました。

回答（今井 登）

ご指摘のように全体像を把握し、それから詳細な部分に進んでいくという手法がたいへん重要であると思います。その点になぜもっと早く気がつかなかったかについては、当時は外国を含めた類似研究がほとんど1 km メッシュかその程度であったことからメッシュを大きく広げて全国をカバーするという発想はありませんでした。山あり谷ありの野外の多様性のある地形と地質を前に

すると、10 km 四方に1点というのはとてつもなく少なく、本当に意味のあるデータが得られるのか疑問のように思えました。結果としてうまくいって良かったと思います。

全国をカバーするためには、各県の自治体や大学に呼びかけてそれぞれの地域で地球化学図を作ってもらってつなぎ合わせるといのが当時の考えでした。しかし、なかなかうまくいかず、最初のプロジェクトの提案者が異動した大学と、関心を持ったいくつかの大学がそれぞれの地域で現在も地球化学図の作成を行っています。

議論5 採取試料の代表性

質問（小野 晃）

この研究では川の支流の付け根部分の堆積物が、その流域の地殻表層を代表しているという前提をとっているように思います。たいへんうまい方法と思いましたが、そのような河川堆積物がその流域を十分に代表していることはどのようにして確認されているのでしょうか。また、これだけでなく何かほかの条件が必要か等、元素の分析結果の領域代表性に関してお考えがあれば教えてください。

また論文中で現在進行中の研究として土壌の元素分布にも言及していますが、地殻表層と土壌とはどのように定義が違うのでしょうか。川の支流の付け根部分の堆積物には土壌も混入しているのではないかと素人的には想像しますが、土壌の混入は無視するほどで、地殻表層を表していると言えるのでしょうか。

なお本論文の主題ではありませんが、土壌の元素分布を調査するときに、どのような場所から土壌の試料を採取すれば、ある領域の土壌の元素を代表していると言えるのでしょうか。

回答（今井 登）

付け根にある河川堆積物がその流域を代表していることはモデル的にいくつかの地域で確認いたしました。以下に仙台市周辺の亜鉛とリンの濃度を例にとって示します。図 a で 39 番の試料は図の上部の広瀬川の流域の付け根にあり、広瀬川全体の代表点と考えられます。図 b の散布図で見ると、流域にある各点の平均値と 39 番の濃度は亜鉛とリンのいずれに対してもおよそ平均値にあることが分かります。したがって、この場合には広瀬川流域全体は 39 番の試料でよく代表されていることが分かります。

代表性を高めるために注意していることは、現場の試料採取で、より平均化されていると考えられるなるべく細粒の試料を採取すること、工場排水等人為的な影響の可能性のある地点を避けること、重鉱物（砂鉄等）の濃集等に注意して、そのような試料を避けるように注意すること等です。

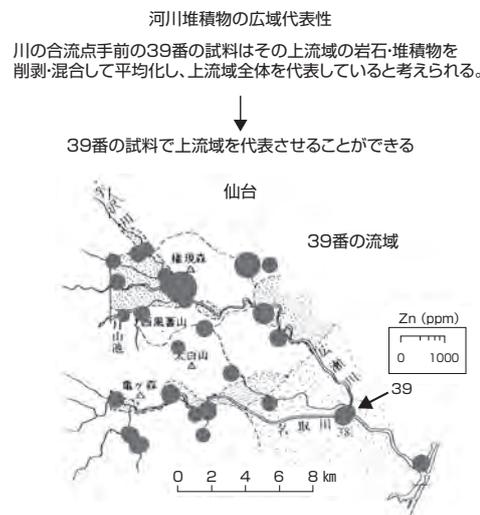


図 a 仙台市周辺の亜鉛とリンの濃度モデル例

地殻表層と土壌の定義の違いですが、地殻の厚さは陸地と海域で異なり数 km から数十 km です。「地殻表層」とは曖昧ですが 1 km 以内の数十～数百 m ではないかと思えます。これに対して土壌は表層の有機層から A 層、B 層、C 層と続きますが数 cm ～数十 cm（数 m）の単位です。河川堆積物に占める土壌の混入割合については場所により異なり、また川に削り込むのは表層の割合が高いことが考えられますが、上記の層の厚さの差が目安になり、割合はそれほど大きくないと思えます。しかし結局のところ、土壌も基本的には周辺の岩石が風化してできたものであり、外部からの混入やさまざまな人為的な影響はあっても基盤の岩石・堆積物と化学組成は大きく異なることが多いと思えます。

土壌試料の採取点の選び方ですが、設定した試料数と採取すべき面積から試料密度が求まります。この研究では約 10 km メッシュです。したがって 10 km × 10 km から 1 個の試料を採取することが基本ですが、全国図を作成するこの研究では試料採取密度が粗いため代表する採取点は慎重に選びました。すなわち、地質図と

土壌図を見比べながら可能な限り各地質区分・土壌区分を代表すると思われる地点を選ぶようにしました。結果として河川堆積物と土壌を用いた地球化学図は比較的よく一致する結果が得られました。しかし、採取密度がより高い場合は、土壌は基盤の目のようにメッシュ状に採取するのが基本だと思います。

議論6 採取試料の保存と再調査

質問（小野 晃）

海底堆積物の調査では、過去に産総研が採取し、保存していた試料を活用して分析に供したと書かれています。研究の継続性、総合性、相互利用性を遺憾なく発揮した点で組織の優れた機能と体制を示したものと思えます。

今回の研究では陸域と海域で新たに採取した試料も同様に、たとえば将来より詳細な分析が必要になった時等のために、地質標本館等に保管しておくという理解でよろしいでしょうか。

回答（今井 登）

全国の海底堆積物の採取につきましては、地球化学図の研究グループ内に沿岸海域プロジェクトの海底堆積物採取の責任者と研究者も加わりました。したがって、過去に採取した海底堆積物試料の資産を十分に生かせたと共に、欠けていた海域の試料を今回採取できたことで全国セットとして揃えることができ、沿岸海域プロジェクトの方にも少なからぬ貢献ができたことと自負しています。

地球化学図プロジェクトで採取した河川堆積物 3,000 個、海底堆積物 5,000 個、土壌 3,000 個は保存庫に分類・保存されています。これだけの数の化学組成既知の試料が全国セットとして利用できる形で保管されているのはたいへん貴重な財産です。科学警察研究所の全国土壌データベース作りや、名古屋大学のストロンチウム同位体比全国マップ作り等、実際にこれまでも外部の方に利用されてきました。地質調査関連試料は原則として地質標本館に登録して保管することになっており、ご指摘のように地球化学図の試料も地質標本館に登録して保存いたします。

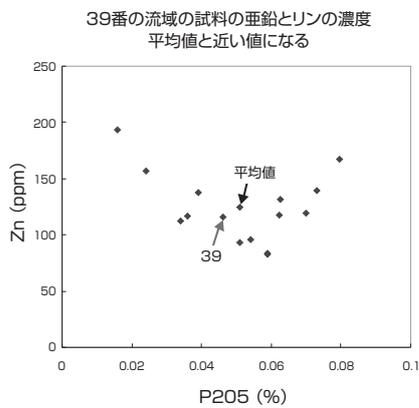


図 b 散布図