

放射能探査法の地球化学的調査への応用

- 岩盤の風化度調査, 広域地盤の元素濃度マッピングを例として -

石田 聡*・土原健雄*・今泉眞之*

目 次

緒 言	101	2 車載型 線スペクトロメトリー	106
岩盤の風化度調査	102	3 調査地区	106
1 岩盤の風化度と天然放射性元素の移動性.....	102	4 調査方法	107
2 調査地区	103	5 調査結果と考察	107
3 調査方法	103	結 言	108
4 調査結果と考察	104	参考文献	108
広域地盤のU-Th-K濃度分布マッピング	106	Summary.....	110
1 元素濃度マッピングについて	106		

緒 言

岩盤の風化度の調査は、構造物の基礎設計等に必要なものであるが、従来の手法は地質踏査と鉱物分析による変質分帯によっており、時間と経費を要する。また構造物の基礎地盤の風化度判定には、岩級区分が用いられるが、目視等実施者の熟練度に依存する判定要素を含む。森ら（2001）は従来区分法が確立されていなかったD級岩盤について、土壤硬度計や簡易支持力測定器による分類法を提唱したが、すべての岩盤に適用できる物理試験法は提案されていない。岩盤を構成する元素のうちあるものは、風化の進行によって溶脱され、徐々に失われる。このことは岩盤中のある種の元素量を測定することによって、その風化度が判定できる可能性を示している。

一方、森林など人為的な影響が少ない地域の浅層地下水の水質は、帯水層の構成元素と風化による化学反応と関係している。都市部、農村など人間の経済活動が行われている地域では、人為的要因によって環境中に付加された元素（重金属、肥料等）も地下水水質に影響を及ぼす。近年、農村地域では、経済活動（リゾート建設や工場誘致などの土地利用変化、過剰施肥、農業散布）によって、地下水中に多種多様な元素や化合物が付加されつつある。地下水汚染を早期に発見し、未然に防ぐためには、汚染されていない状態の農村において、早急に汚染

されていない状態のバックグラウンドとなる地盤の化学組成を把握し、その変化を監視する必要がある。地盤の化学組成を測定する場合、従来のサンプリング、化学分析という手法は時間と経費を要するため、簡便な調査法の確立が望まれている。

これらはいずれも地盤の化学性（元素濃度）を簡便に測定出来れば解決される問題であり、本研究ではその手法として放射能探査に着目した。放射能探査は測定できる元素が放射性元素に限られるが、測定対象から放出される放射線の強度を直接測定するため、非破壊かつ非接触で測定を行うことができる。特定のエネルギーの放射線の強度は、測定対象に含まれるそのエネルギーの放射線を放出する元素の濃度に比例するので、測定値は元素濃度の指標となる。

放射能探査法とは、放射能を利用した地質調査法の総称であり、大きくは以下のように分類される。

人工的な線源から放出される放射線の散乱・吸収などを測定する方法

利用例：中性子水分計、線密度計

地層や土壌に含まれる天然放射性同位元素から放出される自然の放射線を検出する方法(自然放射能探査法)

利用例：ウラン鉱床等の核燃料物質、断層、温泉、地下水、地すべりなどの調査

は主に検層用として用いられ、地表あるいはボーリング孔にプローブを設置して、非破壊で地盤の特性を調査するものであり（二平・今泉，1998），各種の機器が市販されており、技術的にほぼ確立されている。本稿では自然放射能探査法のうち、線を測定する線スペクトロメトリを用いた探査法を放射能探査法と呼ぶ。

* 地域資源部地下水資源研究室

平成17年2月3日受理

キーワード：放射能探査, 風化, 元素マッピング, カーボン, 花崗岩

放射能探査法は、ウラン鉱山の鉱脈付近で地中空気の放射能が著しく増大することが1905年にドイツで発見され、探査に応用されたのがその最初の事例である(初田, 1957)。それ以後、放射性鉱物の探査は盛んに行われ、1928年のGM管の発明、光電子増倍管を用いたシンチレーションカウンタの開発等、測定技術の進歩と相まって、放射能探査法はウラン鉱山の発見に大きな成果を挙げた。また1920年代に土壤の放射能が断層を横切る付近で増大することが発見され(Ambron, 1928)、放射能探査は放射性鉱物の探査以外にも役立つことが明らかになり、以後断層の探査にも用いられるようになった(初田, 1953)。

日本でも農業土木試験場(現在の農業工学研究所)において1956年から地下水開発のため埋没断層調査を目的として、放射能探査法が開発された。落合(1965)は土中ガスや、地表面や地中孔における放射能を測定する方法で断層検出を試みた後、空間線を計測するシンチレーションカウンタを自動車に取り付けて、連続測定できる装置を開発した。木村(1987)は線のエネルギー弁別を行い、指標核種をラドン(^{222}Rn)の娘核種である ^{214}Bi に設定し、妨害因子を排除する方法をシステム化した。その後、農業工学研究所ではシステムの改良や土中ガスのラドン濃度調査法の導入を図り、様々なタイプの断層で放射能探査による調査を重ねてきた(二平・今泉, 1998)。

一方で探鉱および断層調査以外にも放射能探査法は応用されている。Peck and Bissell(1971)は、水が土壌からの線を減衰させることを利用して、空中放射能探査によって地表の積雪水当量を測定した。Vincent(1972)は、空中放射能探査法を地質調査に応用し、全線輻射量から火成岩類の分布状況を推定した。今泉ら(1992)は地すべり調査に放射能探査法を応用し、地すべり地内の土中ガスのラドン濃度が極めて偏在していることを明らかにした。また近年では海洋底の調査にも放射能探査法が応用されている(Jones, 2001)。

本研究では岩盤の風化度判定、広域的な元素濃度マッピングを放射能探査で迅速かつ経済的に行うために、岩手県北上山地南部の花崗岩分布地域において放射能探査および風化度調査を行い、岩盤から放出される線強度と、風化度を表す他の指標との関係を明らかにした。また、福島県阿武隈山地南部の花崗岩分布地域において放射能探査を行い、岩盤から放出される線強度と、既往の地球化学図を比較し、本研究で用いた手法の有効性について検討した。本研究は、線スペクトロメトリを用いた放射能探査法の新たな地球化学的応用手法を示すものである。

本論文の一部は東北農政局よりの受託研究の一部である。研究を進めるにあたっては東北農政局農村計画部資源課の備前地質官(当時)、椎名地質官(当時)、阿部地質官ら、関係各位のご指導、ご協力を頂いた。ここに、

感謝の意を表する。

岩盤の風化度調査

1 岩盤の風化度と天然放射性元素の移動性

量的には極微量であるが、地殻を構成している岩石や造岩鉱物中にはウラン(^{238}U)、トリウム(^{232}Th)、カリウム(^{40}K)などの天然放射性同位元素が含まれている。火成岩におけるこれらの一般的な含有量はウランが2~10ppm、トリウムがその3~5倍程度、カリウムが数%(^{40}K の存在比はその0.0117%)である(Harmon and Rosholt, 1982)。これらは地球生成時に存在していたもので、 ^{238}U が45億年、 ^{232}Th が140億年、 ^{40}K が13億年と半減期が非常に長いことから現在まで残存している。 ^{238}U 、 ^{232}Th はその放射性崩壊によって親核種から徐々に娘核種が生成する崩壊系列を形成している。天然に存在しているこれらの放射性同位元素については放射平衡が成り立っているため、娘核種(^{222}Rn 、 ^{214}Bi 、 ^{208}Tl など)から放出される放射能の測定によって親核種の存在量を定量することができる。

^{238}U (以下、U)と ^{232}Th (以下、Th)はマグマから晶出する1次鉱物に4価の状態に含まれている。この状態ではこれらは同じ大きさのイオン半径をもち、地球化学的には同じ挙動を示す。しかし、風化などの二次鉱物の生成過程では、4価のウランは、容易に酸化して6価となり、ウラニルイオン(UO_2^{2+})を作る。そのため、

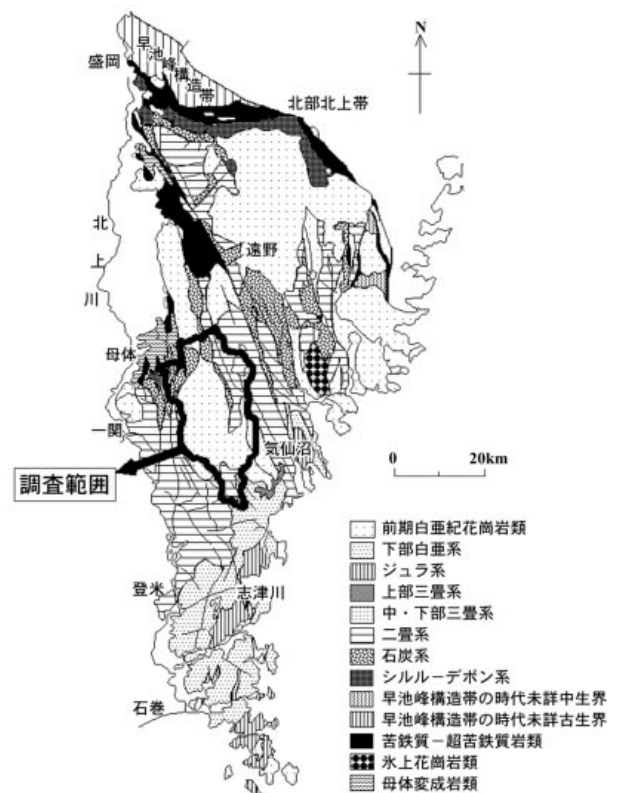


Fig.1 調査地周辺地質平面図
Geological map around study area

溶脱したり、粘土（特にモンモリロナイト）や有機物に吸着される性質を持っている。しかしThは、6価にならないため、移動性が低く、両者は全く別の挙動を示す（片山、1961）。

中井（1960）は、山陰花崗岩の分布する数地区の試料のU、Thの濃度を測定し、試料採取地域の弾性波伝播速度のデータと比較し、花崗岩の風化度とU含有量あるいは、Th/U比とに関係があることを明らかにした。すなわち速度が低下するにつれてU含有量は減少し、またTh/U比は、新鮮岩では2~5の値であるのに対し、速度の低いものでは10以上の高い値を示した。速度の低下は、風化による結晶粒間の空隙増加によると考えられるので、Th/U比の減少は、Uの化学的風化作用による溶脱の程度を表していると推定される。このように、Uの風化による移動は広域にも起こっている。また三浦（1975）は、花崗閃緑岩の貫入岩体の風化過程における化学的变化について、風化に伴うイオンの減少率は Ca^{2+} 、 Na^{+} 、などで大きく、これらの元素は風化の初期段階で急激に失われるが、 K^{+} の減少はこれらと比べて相対的に小さく、風化が進むにつれて徐々に減少するとしている。このことはKが花崗岩類の風化度を表す指標となる可能性を示している。

2 調査地区

Fig.1に調査地周辺の地質平面図を示す。調査地域は北上山地の南端部にあたる岩手県千厩町ほかに位置している。これらの花崗岩類分布域は開析の進んだ緩傾斜の丘陵地となっており、谷に沿って沖積層が埋積して細長い平地を形成している。丘陵地をなす花崗岩は全体的に風化が進んでおり、風化帯中に地下水を賦存している。谷底平野は主に水田として、傾斜地の丘陵地は点在する畑地として利用されており、中古生界からなる地区外の急峻な山地と比べ農地としての利用率が高い。地区内には小河川しかなく、また地下水は生活用水として伏流水が使われている程度の利用状況である。

地質は白亜紀の花崗岩（千厩岩体）が主体となっており、周囲は古生代~中生代にかけて堆積した日本で最も古い年代の地層群で、花崗岩体はこれに貫入している（竹内・御子柴、2003）。調査地の表層地質は千厩岩体のトーナル岩、折壁複合深成岩体の石英モンゾ閃緑岩、花崗岩、後期二畳紀の泥岩に大別されるが、今回調査対象とした地区は、主に石英モンゾ閃緑岩の分布域に位置している。

3 調査方法

調査地区内の表層露頭31箇所を選定し、それぞれの地点で線スペクトロメトリによる放射能探査、風化度調査等を行い、花崗岩分布域における岩盤の風化状況と放射性核種の分布との関係について検討を行った（調査範囲約1.5km²）。露頭の状況はほぼ新鮮な状態から、風

化によってマサ化したものまで様々である。またマサ化した露頭においては、直径数十cm~1mの球状の風化残留核（岩級区分ではC_L級以上）が点在する箇所が全体の半数近くあった（Fig.2）。



Fig.2 露頭状況
Outcrop in study area

風化度調査では山中式土壤硬度計による土壤硬度、シュミットロックハンマーによる反発度を測定すると共に、100ccサンプラーによる試料採取を行った（露頭の硬度により試料を採取出来ない箇所あり）。採取した試料は研究室に持ち帰り、乾燥・湿潤密度の測定等を行った。土壤硬度、シュミットロックハンマーによる反発度は各露頭でそれぞれ10回測定を行い、平均値を取った。

放射能探査ではクリアパルス株式会社製8675型ハンドボーン携帯用線分析装置を使用した。本機は1024ch波高分析器と分解能7%以下のNaI検出器を用いている。測定では露頭表面を削剥し直径30cm程度の平面とし、その上に検出器を置いて測定時間15分で天然放射性核種（⁴⁰K、²¹⁴Bi、²⁰⁸Tl）から放出される線の計数率を測定した（Fig.3）。

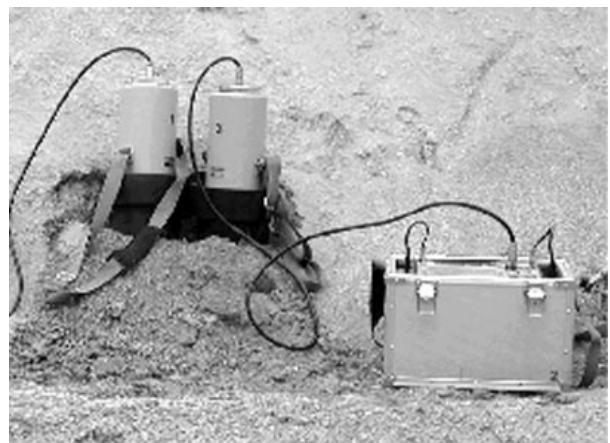


Fig.3 ハンドボーン携帯用線分析装置
Hand-borne type gamma-ray radioactive prospecting devices

測定された計数率は、コンプトン連続部と光電効果のピーク部の合計された計数率である。必要とする計数率は光電効果部分のピーク面積であるので、得られた値を補正する必要がある。今回の調査では各々のピーク領域からベースライン領域を除いて正味計数率とした。今回計測対象としている1.46~2.62MeVの範囲の線は、岩石や表土により減衰させられる。2.7g/cm³の密度の岩石からの全線のほぼ90%は、表層の15~22.5cm以浅から放出されたものである。同様に1.5g/cm³の乾燥した表土では、放射線の90%は、表層から30~45cm以浅から放出されたものである。この様に放射能測定は、相対的に薄い表層に含まれる放射性原子にのみ応答しているので、表層地質の情報を示していると考えられる(Darnly, 1972)。

4 調査結果と考察

a 風化度調査

山中式土壌硬度計による測定では、土壌硬度(貫入量)は18.5~31.1mmの範囲内であった。また比較的風化の進んでいない堅牢な岩石が露出している箇所ではコーンの貫入量が小さく、測定値を取れなかった。シュミットロックハンマーによる反発度測定ではマサ化している露頭のほとんどで反発度が弱く測定値が取れず、測定対象のほとんどは花崗岩類岩体であったが、マサ化していても30以上の土壌硬度を持つ露頭では10~20程度の反発度が得られた。これらの調査結果に対して東北農政局高柴調整池で用いられた岩級区分(森ら, 2001)を適用し、土壌硬度27mm未満をD_L級、27mm以上33mm未満をD_H級、シュミットロックハンマーの反発度15以上をC_L級、21以上をC_M級、31以上をC_H級に分類した。Table 1に岩級区分に対応する露頭数と、これに対応する乾燥密度を示す。乾燥密度はD_L級で1.2~1.7、D_H級で1.5~1.8であった。

露頭における放射能探査では、それぞれの元素の計数率は検層器と露頭の位置関係によって変化するので、元素移動の指標とする⁴⁰K、²¹⁴Biの計数率を、これらと比べて移動しにくい元素である²⁰⁸Tlの計数率で除した計

Table 1 調査結果
Result of investigation

岩 級	D _L	D _H	C _L	C _M	C _H
土壌硬度	27mm >	27mm	33mm	nd	nd
S.R. ハンマー	nd	15 >	15	21	31
乾燥密度	1.2~1.7	1.5~1.8	nd	nd	nd
⁴⁰ K/ ²⁰⁸ Tl	5.0~6.7	7.3~9.2	7.6~8.1	8.2	8.0~10.4
²¹⁴ Bi/ ²⁰⁸ Tl	0.1~0.2	0.1~0.4	0.2	0.3	0.3~0.4
露頭数	5	17	3	1	5

数率比を取り、風化度調査結果との比較に用いた。⁴⁰K/²⁰⁸Tl 線計数率比は5.0~11.5の範囲内にあり、このうち10を越えるもののほとんどはマサ化していない花崗岩岩体(岩級区分ではC_L級以上)での測定結果であった。また、²¹⁴Bi/²⁰⁸Tl 線計数率比は5.0~11.5の範囲内であった。それぞれの岩級区分に対応する計数率比をTable 1に示す。

b 風化残留核とマサとの比較

選定した箇所中、直径1m程度の風化残留核が露頭していて、同一露頭でマサと風化残留核の双方を放射能探査によって測定することできる箇所が3箇所あった。それぞれの測定結果をTable 2に示す。

Table 2 放射能探査結果比較
Comparison of gamma ray count ratio

露頭名	⁴⁰ K/ ²⁰⁸ Tl 線計数率比		²¹⁴ Bi/ ²⁰⁸ Tl 線計数率比	
	残留核	マサ	残留核	マサ
A	8.068	7.842	0.344	0.131
B	8.663	7.276	0.405	0.097
C	8.822	5.737	0.365	0.131

c 考 察

Table 2より、風化残留核とマサを比較した全ての露頭において、⁴⁰K/²⁰⁸Tl 線計数率比、²¹⁴Bi/²⁰⁸Tl 線計数率比ともマサで減少している。このことは、風化が進むにつれてK、Uの溶脱が進み、これらの元素の割合が減少していることを示している。

Fig.4に今回調査した露頭の土壌硬度と⁴⁰K/²⁰⁸Tl 線計数率比との関係を示す(岩級区分としてはD級に属する)。⁴⁰K/²⁰⁸Tl 線計数率比は土壌硬度が小さくなるにつれて低下し、両者には正の相関が認められる。回帰式の相関係数は0.82であった。この結果は風化の進行による土壌硬度の減少の指標として、⁴⁰K/²⁰⁸Tl 線計数率比を用いることができる事を示している。

Fig.5にシュミットロックハンマー反発値と⁴⁰K/²⁰⁸Tl 線計数率比との関係を示す。サンプル数が11と少なく、かつ値にばらつきがあるものの、岩級区分がC_H級からC_L級(シュミットロックハンマー反発値が15以上)の範囲においては、シュミットロックハンマー反発値の減少に対して⁴⁰K/²⁰⁸Tl 線計数率比はほぼ横ばいか、僅かに減少する程度である。回帰式の相関係数は0.72とD級岩盤を対象とした場合と比べて小さかった。この結果はC級岩盤については風化の進行に伴うKの溶脱量がD級岩盤程大きくないことを示しており、⁴⁰K/²⁰⁸Tl 線計数率比を風化度の指標とすることは適当ではないと考えられる。

Fig.6に土壌硬度と²¹⁴Bi/²⁰⁸Tl 線計数率比との関係を示す(岩級区分としてはD級に属する)。全体的には土壌硬度が小さくなるにつれて⁴⁰K/²⁰⁸Tl 線計数率比が低下する傾向にあるが、値のばらつきが大きく、直線

近似式の相関係数は0.16と小さかった。

Fig.7にシュミットロックハンマー反発値と $^{214}\text{Bi}/^{208}\text{Tl}$ 線計数率比との関係を示す。岩級区分がC_H級からC_L級の範囲において、シュミットロックハンマー反発値の減少と $^{40}\text{K}/^{208}\text{Tl}$ 線計数率比の低下は整合的であり、両者には正の相関が認められる。回帰式の相関係数は0.85であり、D級岩盤を対象とした場合と比べて大きかった。

これらの結果は $^{214}\text{Bi}/^{208}\text{Tl}$ 線計数率比が $^{40}\text{K}/^{208}\text{Tl}$ 線計数率比の場合と異なり、岩級区分がC級の範囲において風化度の指標になることを示している。またこの違いは風化過程におけるKとUの挙動の相違を示している。Kは比較的風化に強い鉱物である正長石に主に含まれている元素であり、風化の末期（岩級区分がD級に至る時期）まで花崗岩中に残存しているためD級岩盤の風化度の指標になる。Uは正長石より風化の影響を受けやすい黒雲母に主に含まれるため（Tieh et al, 1980）、黒雲母が風化を受けるC級岩盤の風化過程において溶脱

し、風化度の指標となると考えられる。Pliler and Adams (1962) は花崗岩類から溶脱したUおよびThが残留堆積物や二次残留堆積物に集積することを明らかにしている。Fig.6に示される通り、D級の露頭においては $^{214}\text{Bi}/^{208}\text{Tl}$ 計数率比が高い箇所が何箇所もあり、このような箇所では溶脱したUやThが部分的に集積して $^{214}\text{Bi}/^{208}\text{Tl}$ 線計数率比を変化させている可能性がある。

以上より放射能探査による $^{40}\text{K}/^{208}\text{Tl}$ 線計数率比と $^{214}\text{Bi}/^{208}\text{Tl}$ 線計数率比はそれぞれ花崗岩の風化度と相関を持ち、放射能探査による風化度調査が可能であることを示した。本手法で留意すべき点は、同じ花崗岩体の中でもウラン・トリウムはマグマの残液中に濃集することから、その含有率が岩体の部分により変化することである。また岩体形成時におけるカリウムの挙動もウラン・トリウムと異なる。このため調査にあたっては、地質や元々のK, U, Tlの元素比が同じ地域を調査範囲に設定する必要がある。

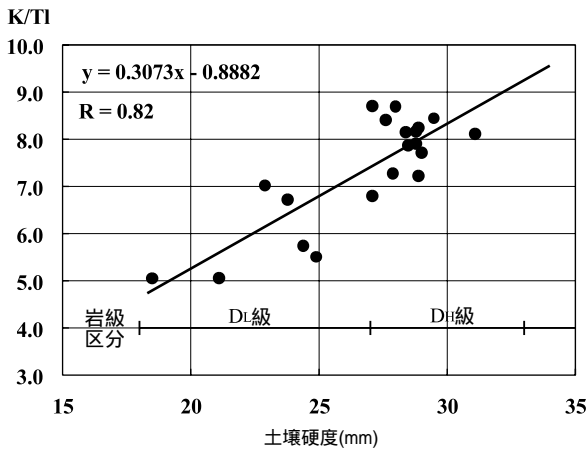


Fig.4 土壌硬度と $^{40}\text{K}/^{208}\text{Tl}$ 計数率比

Relationship between the $^{40}\text{K}/^{208}\text{Tl}$ rate and the hardness index

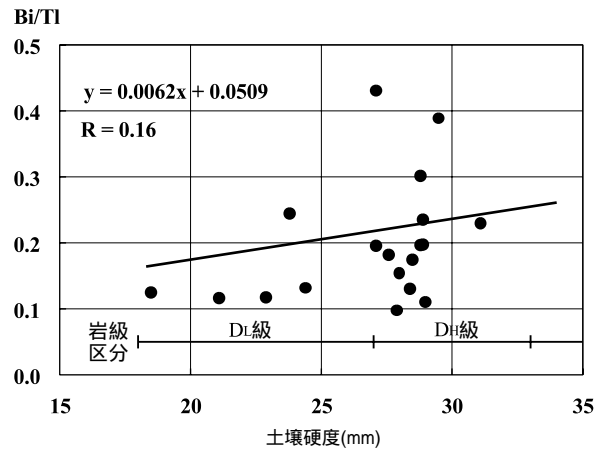


Fig.6 土壌硬度と $^{214}\text{Bi}/^{208}\text{Tl}$ 計数率比

Relationship between the $^{214}\text{Bi}/^{208}\text{Tl}$ rate and the hardness index

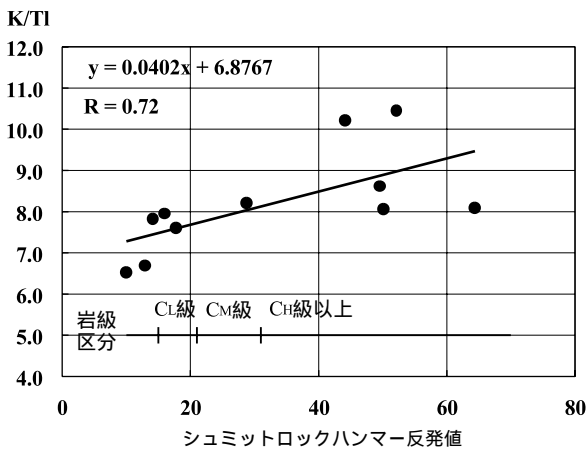


Fig.5 シュミットロックハンマー反発値と $^{40}\text{K}/^{208}\text{Tl}$ 計数率比
Relationship between the $^{40}\text{K}/^{208}\text{Tl}$ rate and Schmidt hammer test

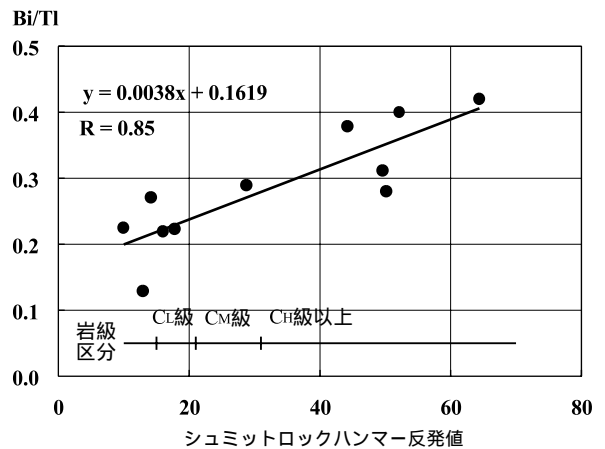


Fig.7 シュミットロックハンマー反発値と $^{214}\text{Bi}/^{208}\text{Tl}$ 計数率比
Relationship between the $^{214}\text{Bi}/^{208}\text{Tl}$ rate and Schmidt hammer test

広域地盤のU-Th-K濃度分布マッピング

1 元素濃度マッピングについて

元素の濃度分布図を示す地球化学図については、近年国土の全てをカバーするものが欧米において刊行されている。日本においても伊藤ら(1991)が北関東地区を対象に調査を行い、地球化学図を作成している。この研究では広域の元素分布を代表する試料として河床堆積物を選定し、5km間隔で採取した試料の分析結果を、試料採取地点より上流の流域全体の平均的な元素分布とした。試料の採取効率は4人1班編制で、条件の良い平野部・北部山岳部で1日あたり約22試料、それ以外の箇所では1日あたり13試料であった。分析方法は誘導プラズマ発光分光分析法(ICP-MS)、中性子放射化分析法(NAA)等が用いられた。分析結果は60秒(約1.5km)四方のメッシュ毎に整理され、30元素について元素別にマッピングされた。この研究は日本で最初の広域的な地球化学図の作成例として評価に値するものであるが、同時に試料採取、分析等に労力を要することが課題として挙げられる。また解析結果が1.5×1.5kmメッシュによって表現されることから、数ha単位で農地の元素濃度を把握することは困難である。解析精度を上げるためには試料採取密度を上げる必要があるが、そのためにはこれまでの研究方法では作業量的に困難であり、より簡便な手法の開発が必要である。Vincent(1972)はサウジアラビアの地質調査に際し、航空機に搭載したNaIシンチレーションカウンタによって高度約90mの上空から放射能探査を行い、全線輻射量を測定すると共に、エネルギー弁別によってウラン、トリウム、カリウムの放射線強度の広域的な濃度分布を明らかにした。この研究は元素濃度マッピングを目的としたものではないが、放射能探査による元素濃度マッピングの可能性を示した研究として注目される。広域的な元素濃度マッピングに放射能探査法を応用する場合、測定地点毎に検層器を設置する方法では手間が掛かりすぎ、空中からの探査では測定精度的に問題がある。このため本研究では、広域に非破壊で地盤の化学性を調査する手法として、車載型線スペクトロメトリーによる広域U-Th-K濃度分布マッピング(地球化学図)手法を開発した。

2 車載型線スペクトロメトリーの改良

車載型線スペクトロメトリーにはクリアパルス株式会社製、7040型車載用地熱採取位置探査装置を使用した。本装置には直径5インチのNaI(Tl)シンチレータと光電子増倍管を一体化したマルチ・ライン形シンチレーション検出器が18本搭載されている。検出器より出力された信号は1024chスペクトル分析器を通してスペクトル・データに変換され、エネルギー強度のヒストグラム・データとしてメモリーに蓄積される。ヒストグラム・データはスペクトル解析され、散乱強度の変動に影

響されない一次線の測定値として出力される。

本装置は主に断層調査用に使用されているものであるため、広域的なU-Th-K濃度分布をマッピングするための下記の改良を行った。

- スペクトルの解析計算では、 ^{40}K 、 ^{214}Bi 、 ^{208}Tl 計数値のネット値を算出し、 $^{214}\text{Bi}/^{40}\text{K}$ 、 $^{214}\text{Bi}/^{208}\text{Tl}$ 、 $^{40}\text{K}/^{208}\text{Tl}$ の計算を行う。ネット値の計算では、従来は各核種スペクトルの裾2チャンネルを予め指定し、そのチャンネル前後2チャンネル、合計5チャンネルの平均値を散乱線補正計算に使用していたが、平滑化後の5チャンネルの最低値を使うように改良した。
- 新たにGPSを搭載した。GPSデータの取得は、プログラムのスタート時にコンピュータの内蔵タイマーをGPSからの世界標準時から日本標準時を計算して合わせ、その後は測定値の記録時に自動的にGPSによる位置データとコンピュータのタイマー値を取得してデータファイルを作成する事とした。
- データ解析プログラムは新たにVisual Basicにて作成し、線データに関しては測定時と同様な解析と表示ができる仕様とした。また、1測線測定終了時に、測線の ^{214}Bi 、 ^{208}Tl 、 ^{40}K 、Total、 $^{214}\text{Bi}/^{208}\text{Tl}$ 、 $^{214}\text{Bi}/^{40}\text{K}$ 、 $^{40}\text{K}/^{208}\text{Tl}$ 変化を移動平均で平滑化し、平滑化された値の Bi_{ave} 、 Tl_{ave} 、 K_{ave} 、 $\text{Total}_{\text{ave}}$ 、 $\text{Bi}/\text{Tl}_{\text{ave}}$ 、 $\text{Bi}/\text{K}_{\text{ave}}$ 、 $\text{K}/\text{Tl}_{\text{ave}}$ を計算し、GISプログラムに渡す線解析データファイルを作成する仕様とした。測定した線スペクトルデータは文部科学省の標準ファイル形式であるJACデータファイルに変換可能である。
- 測定結果はGISソフト(ESRI社製Arc View 3.2)上で国土地理院の1/25000地形図に次の情報を表示する仕様とした。
 - 測定中のカーボン位置、移動軌跡の表示
 - 1測線測定終了時の異常点(測定値が、前後の測定値と比べて指定した割合以上異なる点)の分布(^{214}Bi 、 $^{214}\text{Bi}/^{208}\text{Tl}$ 、 $^{214}\text{Bi}/^{40}\text{K}$ の3種類)
 - 全測線測定終了時の異常点分布図と計数率および計数率比コンター表示(^{214}Bi 、 ^{208}Tl 、 ^{40}K 、 $^{214}\text{Bi}/^{208}\text{Tl}$ 、 $^{214}\text{Bi}/^{40}\text{K}$ 、 $^{40}\text{K}/^{208}\text{Tl}$ の6種類)

3 調査地区

Fig.8に調査地周辺の地質平面図を示す。調査地域は伊藤ら(1991)の地球化学図の調査範囲の北部に相当し、福島県小名浜より約50km西方の、東白川郡鮫川村ほかに位置しており、標高650~750mの隆起準平原である阿武隈山地の南部である。西縁は棚倉破砕帯の一部に重なる幅5km程の低地・丘陵地に接している。

調査地域周辺の地質は阿武隈の变成岩類や花崗岩類、中・古生界八溝層群の堆積岩類、第四紀洪積層などから構成される(吉岡ら、2001)。調査地は棚倉破砕帯の東側に発達する阿武隈高地に位置しており、花崗岩質の深成岩類や变成岩類が広く発達している。これらの深成岩

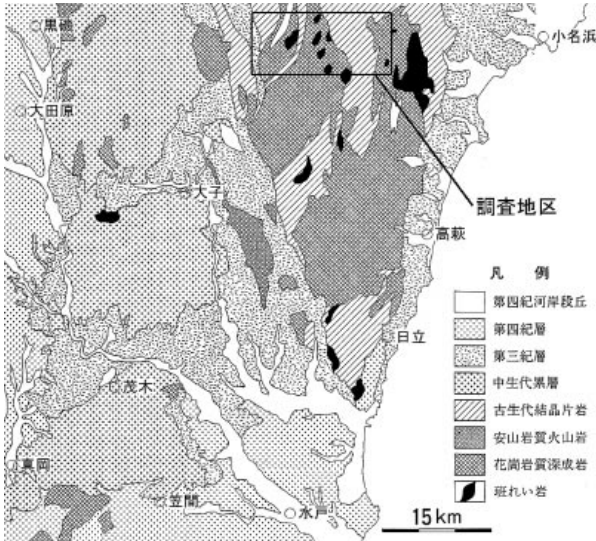


Fig.8 調査地周辺地質平面図(上岡ら1990に加筆)
Geological map around study area

類や変成岩類の分布域には、様々な規模で斑れい岩質の貫入岩体が分布している。また調査地区西縁部には新第三系の砂岩が分布している(福島県, 1998)。

4 調査方法

本研究では伊藤ら(1991)の方法に対し、調査地点の元素濃度を代表するものは、その地点のオリジナルな地質を反映する露頭であると考え、調査地区内において27露頭を選定し、車載型線スペクトロメトリーを用いて放射能探査を行った。測定は計測器を搭載した車を露頭の横に停止させ、30秒間の測定を10回行った。測定で得られた入射線カウント数を積算し、エネルギー弁別によって²¹⁴Bi, ²⁰⁸Tl, ⁴⁰Kそれぞれの計数率(count/min)を求めた。放射能探査によって元素濃度を測定する場合、出力は計数率となるが、それぞれの核種の線計数率は地形に左右される(谷部では大きく、尾根部では小さくなる)ので、検層器と露頭の位置関係をなるべく同一にする必要がある。そのため本研究においては、検層器を搭載した車の片側が切り立った露頭と接し、反対側が平地となる条件で調査地点を選定した。

調査結果は10回の測定値の平均値を取り、²¹⁴Biの線計数率と伊藤ら(1991)の調査結果(U濃度)と比較した。

5 調査結果と考察

測定地点は伊藤ら(1991)の調査結果によるU濃度の0.75~4.50ppmの範囲に入る。Fig.9に放射能探査による²¹⁴Biの線計数率とU濃度分布との比較を示す。図中の丸印が放射能探査結果を示し、四角形のメッシュがU濃度を示す。U濃度は約1.5km四方の(60秒×60秒なので実際にはやや南北に伸びた長方形の)メッシュ毎に表示されているので、露頭におけるそれぞれの²¹⁴Biの線計数率と、露頭が属するメッシュにおける伊藤ら

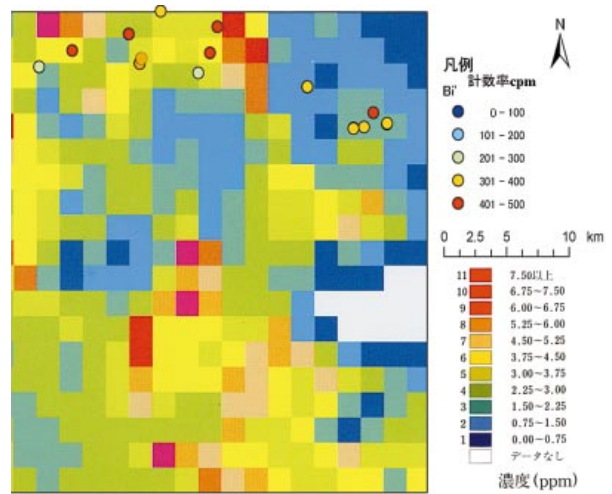


Fig.9 放射能探査結果と既存調査(伊藤ら1991)との比較
Comparison with radioactive prospecting result and past investigation (Ito et.al. 1991)

(1991)のU濃度と比較した。同じメッシュ内に複数の調査地点がある場合は平均値を取った。Fig.10に²¹⁴Biの線計数率とU濃度との比較結果を示す。伊藤ら(1991)によるU濃度は0.75ppm単位で階調表示されているので、比較にあたっては階層毎の濃度範囲の中央値(1.50~2.25ppmの場合1.875ppm)を当該メッシュのU濃度とした。²¹⁴Biの線計数率にばらつきがあるものの、両者の間には正の相関が認められ(相関係数0.81), 回帰式は次式で表される。

$$y = 44.128x + 247.53 \quad (1)$$

x : U濃度 (ppm)

y : ²¹⁴Bi 線計数率 (cpm)

同じU濃度の階調内で²¹⁴Biの線計数率ばらつきがあるのは以下の理由によると思われる。

露頭と検層器の位置関係が完全に同一では無いこと
U濃度がメッシュ内で不均一であること

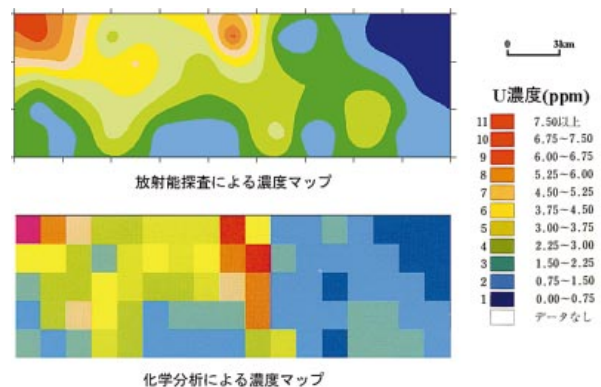
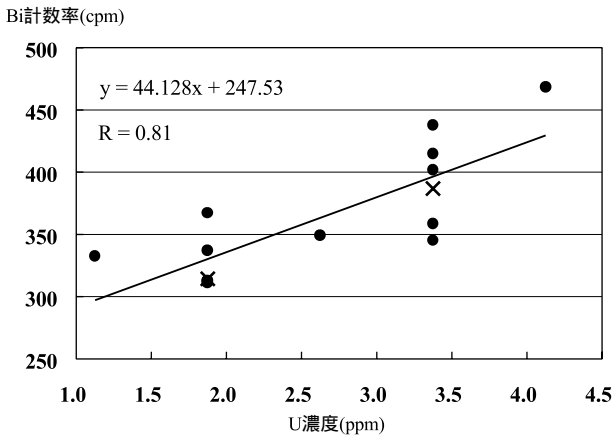


Fig.11 放射能探査と化学分析によるU濃度マップ
U concentration map by radioactive prospecting and chemical analysis

Fig.10 ^{214}Bi の線計数率とU濃度の比較

Comparison with gamma ray count ratio of ^{214}Bi and U concentration

大気中を飛散しているラドンの影響があること

Fig.10には1メッシュあたり5箇所以上の測定を行った2点を×印で示しているが、いずれも回帰直線に近い位置にプロットされている。このことは、個々の露頭での値はばらつくものの、全体的には放射能探査結果が伊藤ら(1991)の調査結果と整合的であることを示している。Fig.11には放射能探査結果を(1)式よりU濃度に換算し作成した濃度マップと、伊藤ら(1991)が化学分析によって作成した濃度マップを示す。放射能探査の調査点数を増加させることにより、より詳細なマップの作成が可能であると考えられる。

以上の調査結果は、本研究で用いた放射能探査法によって、広域的な元素濃度分布を把握することが可能であることを示す。本手法の適用条件としては検層器と露頭との位置関係が、測定箇所毎に同じである必要があり、測定箇所の選定が精度を左右すると考えられる。

結 言

本研究では岩盤の風化度判定を放射能探査で迅速・経済的に行うために、岩手県北上山地南部の花崗岩分布地域において放射能探査、風化度調査を行い、岩盤から放出される線と、風化度を表す他の指標との関係を明らかにした。調査の結果、放射能探査による $^{40}\text{K}/^{208}\text{Tl}$ 線計数率比とD級に区分される花崗岩の風化度、 $^{214}\text{Bi}/^{208}\text{Tl}$ 線計数率比とC級に区分される花崗岩の風化度はそれぞれ相関係数0.8以上の正の相関を持ち、放射能探査による風化度調査が可能であることが示された。

また非破壊で広域の地盤の化学性を調査する手法として、車載型線スペクトロメトリーによる広域U-Th-K濃度分布マッピング(地球化学図)手法を開発し、北関東の花崗岩類分布域における27露頭において放射能探査を行い、既存の調査結果との比較を行った。調査の結

果、放射能探査によって得られた ^{214}Bi の線計数率は、既往の研究で化学分析によって求められたU濃度と相関係数0.8以上の正の相関を持ち、本研究で用いた放射能探査法によって、広域的な放射性元素濃度分布を簡便に把握することが可能であることが示された。本手法は検層器が車載型であるため、広域的な元素濃度を短期間で効率的に調査することができ、地下水汚染が懸念されている地域のバックグラウンド調査としての活用が期待される。また、Kは肥料に含まれているので、肥料や耕土の流亡調査等への応用も期待される。

参考文献

- 1) Ambronn, R. (1928): *Element of Geophysics, as Applied to Explorations for Minerals, Oil and Gas*. New York: McGraw Hill Book Co., 123-129
- 2) Darnly A. G. (1972): *Airborne gamma-ray survey techniques, Uranium Prospecting Handbook*, The Institution of Mining and Metallurgy, 174-211
- 3) 福島県(1998): 土地分類基本調査「塙・大田原・川辺・大子・高萩」, 32-53
- 4) Harmon R.S. and Rosholt J.N. (1982): *Igneous Rocks, Uranium Series Disequilibrium*, Clarendon Press Oxford, 145-166
- 5) 初田甚一郎(1953): 放射能探鉱, 物理探鉱, 6(3・4), 131-137
- 6) 初田甚一郎(1957): 放射能探査の発展, 物理探鉱, 10(3), 1-9
- 7) 今泉眞之・奥山武彦・濱田浩正・小前隆美・金子文宣(1992): 放射能探査による地すべり調査 - 千葉県鋸南町における地すべり調査(その1) -, 平成4年度農業土木学会講演要旨集, 404-405
- 8) 伊藤司郎・上岡 晃・田中 剛・富樫茂子・今井登・金井 豊・寺島 磁・宇都浩三・岡井貴司・氏家真澄・柴田 賢・神谷雅晴・佐藤興平・坂本享・安藤 厚(1991): 地球化学アトラス - 北関東 -, 地質調査所
- 9) Jones D.G. (2001): Development and application of marine gamma-ray measurements: a review, *Journal of Environmental Radioactivity*, 53, 313-333
- 10) 上岡 晃・伊藤司郎・田中 剛・今井 登(1990): 地球化学図 - 元素の地表分布とその解析 -, 地学雑誌, 99, 17-31
- 11) 片山信夫(1961): 総説, ウラン・その資源と鉱物, 朝倉書店, 1-12/40-53
- 12) 木村重彦(1987): 地表の自然ガンマ線による温泉開発位置の探査法について, 温泉科学, 37, 73-92

- 13) 三浦 清 (1975) : 大東花崗閃緑岩の赤色風化 - 深成岩類の風化に関する研究 (第3報) - , 応用地質, 16 (2), 48-55
- 14) 森 充広・備前信之・望戸 尚 (2001) : 衝撃加速度を指標とした風化花崗岩の地盤評価法 - N値等との相関について - , 日本応用地質学会東北支部第9回研究発表会講演要旨, 61-66
- 15) 中井順二 (1960) : 花崗岩の天然放射性元素の含有量と風化の影響, 物理探鉱, 13 (2), 42-44
- 16) 二平 聡・今泉眞之 (1998) : 放射能探査法の測定原理と応用事例, 農土誌, 67 (11), 33-40
- 17) 落合敏郎 (1965) : 放射能式地下水探査法, 昭晃堂, 42-44
- 18) Peck E.L. and Bissell V.C. : Evaluation of Snow Equivalent by Airborne Measurement of Passive Terrestrial Gamma Radiation, *Water Resources Research*, 7 (5), 1151-1159
- 19) Pliler, R. and Adams, J.A.S. (1962) : *Geochim. Cosmochim. Acta* 26, 1137
- 20) 竹内 誠・御子柴真澄 (2003) : 5万分の1地質図幅「千厩」, 産業技術総合研究所地質調査総合センター
- 21) Tieh T.T., Ledger E.B., and Rowe M.W. (1980) : *Chem. Geol.*, 29, 227
- 22) Vincent J. Flanigan (1972) : Gamma Radiation, an Aid to Geologic Mapping on the Arabian Shield, Kingdom of Saudi Arabia, *The Natural Radiation Environment*, 667-679
- 23) 吉岡敏和・滝沢文教・高橋雅紀・宮崎一博・坂野靖行・柳沢幸夫・高橋 浩・久保和也・関 陽児・駒澤正夫・広島俊男 (2001) : 20万分の1地質図幅「水戸」, 地質調査所

Application of radioactive prospecting method to geochemical survey

ISHIDA Satoshi, TSUCHIHARA Takeo and IMAIZUMI Masayuki

Summary

To measure the degree of weathering in the bedrock more quickly and economically, the radioactive prospecting and the investigation of the degree of weathering in the bedrock were carried out in the southern Kitakami massif region where granitic rocks are distributed in Iwate Prefecture. This result showed that $^{40}\text{K}/^{208}\text{Tl}$ gamma ray counting ratio and $^{214}\text{Bi}/^{208}\text{Tl}$ gamma ray counting rate had a positive correlation with the degree of weathering of granite. This result also showed that the radioactive prospecting was effective to the investigation of the degree of weathering. Subsequently, the technology that investigates the chemistry of the ground in the large area by nondestructive, car-borne radioactive prospecting method has been developed. The radioactive prospecting was carried out using this method in the North-Kanto region. ^{214}Bi gamma ray counting rate were compared with U concentration which had been investigated in the past. This result showed that ^{214}Bi gamma ray counting ratio had a positive correlation with U concentration. This result also showed that the radioactive prospecting was effective in mapping concentration of the element of U.

Keywords : radioactive prospecting , weathering , element mapping , car-borne , granite