

地球表層環境の聴診器の開発

地球環境医学への道



研究ノート

中嶋 悟*

Developments of Stethoscopes for Earth's Surface Environments

- Toward the Geo-environmental Medicine -

Key Words : Visible-Infrared Spectroscopy, Colorimetry, Water,
Earth's surface, Environmental changes

1. はじめに

地球,特にその表層環境は,約45億年にわたる大気・海洋・固体地球,そしてそれを構成する無機物・有機物・生物間の複雑な相互作用を経て進化し,今日のような状態となってきた.人類は,主に産業革命以来の化石燃料や金属・非金属資源の利用などによって,地球環境に大きな影響を与え,いわゆる「地球環境問題」を引き起こしている.地球環境問題というと,二酸化炭素などの温室効果ガスの排出による地球温暖化や,オゾン層の破壊による極域などでの紫外線の増加などの,「地球規模」での環境変動が主に取り上げられる.しかし,地球表層では,人類の排出した人工的な物質が水・土壌などを汚染し,またごみ・産業廃棄物・放射性廃棄物などの処分問題も顕在化してきている.さらに,地震,火山活動や,地すべり,河川の氾濫などの自然災害もまた大きな被害を引き起こしている.人間の病気にたとえれば,いわゆる地球規模の環境問題は,老化などの体全体の機能の低下に当たるかもしれないが,上記のような局部における問題が,実は病気の

原因として重要である.そこで,このような地球特にその表層の局部の状態を把握する「聴診器」を開発して,局部の「病んだ」状態を調べ,またその推移を予測することが必要である.本稿では,このような地球の聴診器の開発のいくつかと,「地球環境医学」とでもいべき新しい分野の必要性について紹介したい.

2. 分光測色法による地球の顔色の測定

我々の足元の大地は土や岩石からなるが,たえず雨水や河川,海などによって風化や侵食を受けている.雨水は大地にしみこんで地層にろ過されながら地下水となり,時には地球深部のマグマなどによって加熱されて熱水としてわき上がってくる.この熱水からは我々の資源となる金属元素が沈殿濃集したり,温泉沈殿物ができたりする.また,海底では砂や泥の粒子やプランクトンの死骸などが積もって堆積物となり,次第に埋没して堆積岩となる.さらには,マグマから固結した火成岩には,マグマの化学組成などによって様々な鉱物が生成するが,地表に露出してから風化によって様々な物質へと変化していく.このような地球の多様な環境で生成した様々な物質は,鉄などの遷移金属元素の酸化・配位状態の相違により特徴的な色を持っている.従って,地球の構成物質の色は,その生成環境と環境変動の指標となるのである.

しかしながら,従来,地球物質の色の記載方法は言葉によって行われ,その表現の仕方は当然観察者の目の特性や経験等によって左右されていた.従って,地球物質のより客観的かつ定量的記載手法の開発が必要であった.そこで筆者らは,服飾,インテ



*Satoru NAKASHIMA

1955年1月生

1984年仏オルレアン大学理学部地球科学科国家博士課程修了

現在,大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻,教授,仏国家理学博士,地球惑星分光学,水と生命の地球物理化学,資源環境予測科学

TEL 06-6850-5799

FAX 06-6850-5480

E-mail: satoru@ess.sci.osaka-u.ac.jp



図1 様々な地球表層環境の聴診器の開発と地球のお医者さんの概念図(イラストは中嶋光による)

リア業界等における色彩品質管理のために作られた色彩色差計や分光測色計(図1)を用いて、地球物質の色を定量的に測定し評価する方法を開発した^{1, 2, 3}。物質の色は、試料の表面状態、粒度、水分量、結晶度等によって影響を受けるが、ある程度の精度で定量的に表現することができる。少なくとも、同種物質群の連続データの相対変動は大きな意味がある。ここでは色を表現する方法として、国際照明委員会(CIE)の定めに従って、昼間の太陽光線の可視光部分(波長380-780nm)が物質に入射し、物質の反射特性によって反射された光が、標準観測者感度によって観測された値(三刺激値: X, Y, Z)をもとにする。これらは450, 500, 550nm付近の光(いわゆる光の3原色、赤緑青、RGB)の相対強度に対応する。この三刺激値を用いて様々な色空間への表現が提案されてきたが、国際照明委員会が推薦し、色の定量的表現に最も良く用いられるのが球状均等なL*a*b*色空間である。L*が明度に対応し、0だと真黒で100だと真白、a*は正の値が赤で負の値が緑、b*は正の値が黄で負の値が青に対応する。

我々は、この分光測色法を世界で初めて岩石・鉱物・土壌の色測定に適用し、岩石の風化による劣化度や、過去の海底の酸化還元環境の変動などを定量的に表現できることを示した^{1, 2, 3, 4}。その後、この手法は、国際深海掘削計画に採用され、地球物質の色測定方法の標準となっている。我々はまた、火山噴出物の色測定から、火山噴火の時間スケールの評価も行っている⁵。現在では、農業・森林土壌学においても土壌の分類の手段として用いられており、

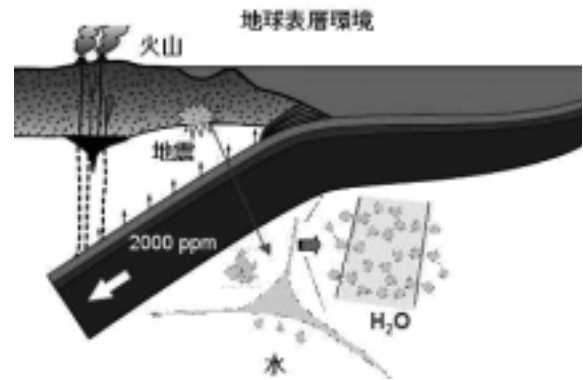


図2 地球表層環境の概念図。プレートのもぐりこみとマグマの発生、火山の噴火や、地震発生と結晶粒界薄膜の水に近い「かたい」水をイメージ化してある。

また稲作土壌の鉄分不足の検出にも利用できる³)。その他、考古学の発掘調査においても利用され、2300年前(弥生時代)の水田跡の検出にも成功した³)。土木・建設基礎工学においても、岩盤の劣化度に基づく等級区分の指標としても用いられている。今後は、環境調査などの現場において、土壌の健全度などの診断への利用が期待される。

3. 赤外分光法による水分の測定

岩石中の水は、地球の動的な過程を大きく支配していると考えられている。すなわち水は地球内部物質の粘性・強度や拡散・流動の速さに大きく影響し、プレートのもぐりこみ、脱水、マグマの発生と噴火、岩石の変形・変成作用、流体と物質の移動といった動的過程の基礎物性を左右している(図2)。そこで、まずこのような地球内部の水の分布を調べるため、顕微鏡下で岩石等の薄片試料を観察しながら、岩石中の水の状態と量を非破壊で測定できる顕微赤外分光法(図1)を用いて、様々な岩石中の水の状態と分布を調べてきた^{1, 2, 4, 5, 6})。

我々は、実際にプレートが地下200km程度までもぐりこんだと推定される岩石(超高压変成岩)中の水の分布を調べたところ、鉱物(輝石など)中の欠陥OHとして2000ppm程度の水が含まれ、地球表層から地球深部へ多量の水が運ばれていることが確認できた(図2)。また、実際にプレートとともにもぐりこんでいく実在の岩石を超高压高温状態にした下部マントル鉱物(ペロブスカイトやウスタイト)には、約2000ppmもの欠陥OHが含まれていた。地球深部の下部マントル物質は大きな体積を持つの

で、海水の5倍程度も水が蓄えられる可能性がある。これらの研究から、地球表層から内部への水の循環が定量化できるようになり、約10億年後には地球表層の水は枯渇してしまうとの予測もある⁷⁾。

一方、地球浅部の地殻中では、顕微赤外分光測定の結果、岩石が地球内部へ埋没していくにつれ含水量が減少していくことが観測され、また水は主に水分子の形で、多結晶体の粒界に保持されていることがわかった(図2)^{5,8)}。

さらに、この結晶粒界が200nm程度の狭さになると、その間に保持されている薄膜水は、その赤外スペクトルから、水素結合距離が短く、氷に近い「かたい」ものであることが示唆された。このような結晶粒界薄膜水の物性は、液体自由水のそれとは異なると推定され、拡散係数、透水係数などが小さくなる事が想像されるほか、粘性、電気伝導度、核磁気共鳴法における水素原子核のスピン緩和時間などの物性が異なることが期待される⁸⁾。

これまで、地下約10kmの地震震源域では、しばしば電気抵抗の増大と弾性波伝播速度の異常(V_p/V_s の低下)等が観測され、地震発生には地殻深部の水とその飽和度が関与していると想像されてきた。上述した結果に基づけば、地震発生に関して次のような作業仮説が提案できる⁸⁾。地殻深部で温度上昇に伴い結晶の粒径が増大するにつれ、含水量が低下し、粒界の幅も減少し、水の連結度も低下する。やがて、孤立した「かたい」結晶粒界薄膜水が卓越し、粘性が高く、水が流れにくくなり、電気伝導度や弾性波伝播速度も大きく変化する。このような岩石は、プレートの沈み込み等で蓄積される歪みを塑性変形等でまかないきれなくなり、破壊が起こって地震発生につながると考えられる。流体の化学組成の違いと結晶へのぬれ角の変化も、地震発生過程などの地球のダイナミクスに大きな影響を与えていると考えられる。

火山の噴火においては、地下深部で生成した含水量の大きいマグマから、上昇に伴う圧力低下により脱水が起こり泡が生成していく。泡だらけになったマグマがはじけ飛んで放出されたものが軽石などの火山噴出物である(図2)。

そこで、我々は、顕微赤外分光計(図1)に加熱ステージを設置して、マグマ・火山ガラスからの脱水過程のその場観測を行い、この過程は、主に水分

子の拡散によって律速されていることを明らかにした。そこで、この拡散係数を用いれば、マグマからの脱水・発泡過程の時間スケールを見積もることができる。たとえば、マグマの温度が950 °Cであれば数十秒程度、500 °Cであれば数時間程度と推定される⁸⁾。このような研究から推定される火山噴火の時間スケールは、火山防災上、火山性微動等が観測されてから住民に避難を勧告する猶予時間を設定する上で極めて有益であろう。

このように、顕微赤外分光法による地球内部の水の測定によって、地震や火山活動といった地球ダイナミクスの定量的な研究が可能になってきた。

4. その他の様々な聴診器

これまで述べてきた可視光や赤外光の分光法に基づく地球表層環境の「聴診器」は、最も一般的な電磁波を用い、比較的安価で容易な手法である(図1)。このような手法は、地球物質のみならず生命物質にも用いることができる^{6,8)}。例えば、サボテンの組織を、減衰全反射(ATR)赤外分光法によって測定すると、サボテン体内の水は、自由水よりも構造化された「かたい」ものであると示唆された。このことがサボテンが乾燥に強い原因の1つである可能性がある。また、10代から20代女性の手指などの皮膚表皮の水分について、減衰全反射赤外分光法で測定してみたところ、13歳から22歳にかけて、皮膚最表面の水分量が年齢とともに急激に減少した。また、水分が減るほど、より水素結合の短い構造化された「かたい」水が増える傾向が見られた。このように、水分測定は様々な物質に適用することができるので、現在は近赤外ファイバ分光器(図1)を用いて、より現場での測定に適した「聴診器」を開発中であり、地球物質のみならず、生物やアスベストなどに応用を試みている。

その他、新しいナノスケールの分析手法としての近接場顕微赤外分光法の開発、さらに音波やX線、核磁気共鳴などを用いたエコー、レントゲン、人間ドックなどに対応する岩石評価手法の開発も行っている。

5. 地球環境医学に向けて

以上に紹介したような「聴診器」を用いて地球表層環境を計測し、その経時変化を調べていくことで、

岩盤が風雨などで劣化している箇所，土壌の鉄分が不足している箇所，地震・火山活動，さらには水や土壌の汚染箇所など，地球表層の「病んだ場所」を見つけ，その推移を追跡していくことが可能となる．このような地球表層環境の「診察」に基づいた「地球環境医学」(図1)とでもいうべき分野を作っていかなければいけないと考えているが^{9,10)}，「治療」に関しては，多くの方々の様々な努力をお願いしなければ到底できない．皆さんと共に，美しい地球を守っていききたいと思う．

参考文献

- 1) 中嶋 悟 (1994b) 「地球色変化 - 鉄とウランの地球化学」, 近未来社, 名古屋, 292p.
- 2) 中嶋 悟 (1994c) 飯山敏道, 河村雄行, 中嶋 悟 共著「実験地球化学」東京大学出版会, (1994) 中の「分光学」「反応速度学」「物質移動学」の章, pp.110-233.
- 3) 中嶋 悟 (1998) 大地の色 地球物質の分光測色と地球環境, 化学と工業, 51, 1198-1201.
- 4) 中嶋 悟編著 (1996) 「地球化学分光学」, 月刊地球, 1996年4月号. p.209-276.
- 5) 中嶋 悟編著 (2000) 「水・岩石相互作用の機構と速度」, 月刊地球, 2000年7月号. p.419-495.
- 6) 中嶋 悟編著 (2004) 「新しい地球惑星生命科学」, 月刊地球, 2004年8月号. p.501-562.
- 7) Nakashima, S, Maruyama, S., Brack, A. and Windley, B.F. (2001) “Geochemistry and the Origin of Life” Universal Academy Press, Tokyo, 355p.
- 8) Nakashima, S, Spiers, C.J., Mercury, L., Fenter, P and Hochella, Jr., M.F (2004) “Physicochemistry of Water in Geological and Biological Systems. - Structures and Properties of Thin Aqueous Films” Universal Academy Press, Tokyo, 281p.
- 9) 中嶋 悟 (2007) 「地球環境科学入門」講談社サイエンティフィック, 執筆中.
- 10) 中嶋 悟 (2007) 「地球のお医者さんになろう」コロナ社, 執筆中.

この記事をお読みにになり，著者の研究室の訪問見学をご希望の方は，当協会事務局へご連絡ください．事務局で著者と日程を調整して，おしらせいたします．

申し込み期限：本誌発行から2か月後の月末日

申し込み先：生産技術振興協会 tel 06-6944-0604 E-mail seisan@maple.ocn.ne.jp

必要事項：お名前，ご所属，希望日時（選択の幅をもたせてください），複数人の場合はそれぞれのお名前，ご所属，代表者の連絡先

著者の都合でご希望に沿えない場合もありますので，予めご了承ください．