

地中ガスのラドン濃度に含まれる地殻物性・破壊情報

小池 克明*・柏谷 公希*

Geo-information on Crustal Properties and Failure Included in Radon Concentration of Terrestrial Gas

Katsuaki Koike* and Koki Kashiwaya*

*京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻 Department of Urban Management,
Graduate School of Engineering, Kyoto University, Katsura C1-2-215, Kyoto 615-8540, Japan.
E-mail: koike.katsuaki.5x@kyoto-u.ac.jp

キーワード：地熱貯留層，貯留層温度，活断層，地震，一軸圧縮強度

Key words: Geothermal reservoir, Reservoir temperature, Active fault, Earthquake,
Uniaxial compressive strength

1. はじめに

ラドンはガス体の放射性核種であり，しかも化学的に安定な不活性ガスで，低い濃度でも検出しやすい。また，地震の発生，噴火，熱水の上昇，断層の存在などでラドン濃度が増加する現象が世界的に観測されている。このような利点，および地殻変動・流体への高い応答性から，ラドン，特に同位体の中で減期が3.823日と最も長い ^{222}Rn は，地球科学分野で地震，断層，火山，地熱，温泉，鉱床，地下水などの様々な調査に応用されてきた。しかしながら，増加の大小を支配する因子や増加の物理化学的メカニズムに関して不明な点も多い。

そこで本研究では，地熱地域と活断層周辺での地中ガスを利用した測定，および岩石破壊実験により， ^{222}Rn 濃度増加の因子とメカニズムの解明を試みた。前者の測定では ^{222}Rn と ^{220}Rn （半減期54.5 s），それらの娘核種の壊変に伴って放出される α 粒子を連続的にカウントする。これから原子数算定理論¹⁾により，ガスの放射性平衡状態を考慮して， ^{222}Rn の濃度やガスの年齢を求めている。

2. 地熱貯留層の温度・圧力と ^{222}Rn 濃度との関連

地熱地域での ^{222}Rn 濃度に関する研究報告は多いが，その時間-空間的変動の特徴を詳細に明らかにした例は少ない。そこで，阿蘇山火口西側の3箇所の噴気帯（湯の谷，吉岡，地獄）を対象に選び，長期にわたり火山ガス中の ^{222}Rn 濃度を測定した²⁾。2 kmの範囲にある対象地区には貯留層が2つ存在することがMT探査により推定されている。 α シンチレーションカウンター法により，1994年5月～2006年10月までの12.5年間，週一回の頻度で測定を継続した。より詳細に濃度変化を求めるために，地獄では2001年9月～2004年3月までの2.5年間にわたり，イオンゼンションチェンバー法により連続測定を行った。火山ガスは1.5 mの深度からポンプにより汲み上げたが，前処

理装置により，硫黄を含む高温の水蒸気による検出器の劣化を防いだ。また，クロマトグラフィによるガス中のHe, CO₂, H₂, CH₄濃度測定も週一回の頻度で実施した。

3つのサイトに共通して， ^{222}Rn 濃度の変動は長周期の成分を含み，概して，ガス年齢は ^{222}Rn 濃度の極大値付近で若くなるという傾向が見出された。 ^{222}Rn 濃度とガス年齢の大幅な増減の支配因子として火山性地震の可能性が最も高い。この推測は，連続測定による ^{222}Rn 濃度と地震規模との詳細な対応付けにより確かめられた。

次にCO₂, H₂, CH₄濃度を組み合わせた地質温度計から貯留層温度を推定した。地獄サイトでは229～285°Cの範囲で大きく変動し，平均は265°Cであった。これよりも精度は劣るが，He/CO₂濃度比からも貯留層の圧力を推定した。その結果， ^{222}Rn 濃度は概ね温度と圧力に調和的に変動することがわかった。これに基づきRn濃度と貯留層温度との関係式を求め，同一の貯留層上にあると考えられる湯の谷と吉岡サイトのデータに適用した。第1図で比較するように，濃度が極大，極小となる時期や大域的な変動パターンで両者は類似しているといえる。よって ^{222}Rn は，地表で貯留層の温度・圧力を見積もり，それらの変化をモニタリングするのに有用である。

3. 地殻破壊現象と ^{222}Rn 濃度との関連

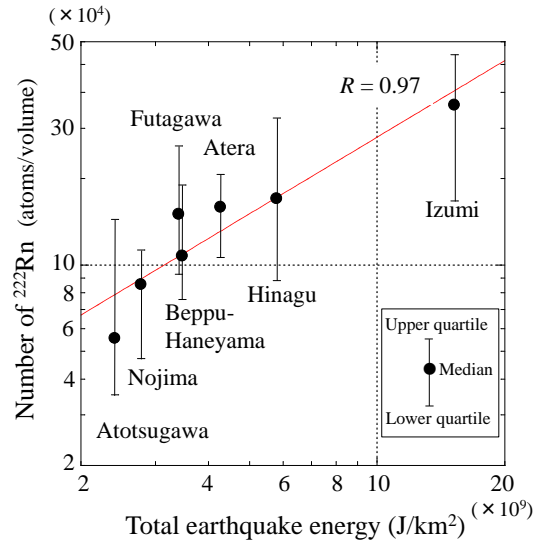
断層近傍で ^{222}Rn 濃度に変化がみられない場合も多く，濃度を増加させる断層の特性は十分には理解されていない。この理解のため，西日本での7つの活断層（跡津川，阿寺，野島，別府一万年山，布田川，日奈久，出水）を対象とし，計230地点で測定を実施した³⁾。21%の測点で放射性非平衡のパターン，すなわち ^{222}Rn 生成からの経過時間が短くガスが若い状態を示したことが特徴的であり，これは ^{222}Rn のキャリアガスの速い上昇速度に起因すると考えられた。親核種であるラジウムが表層に少なくても，ガス速度が大きいと ^{222}Rn 濃度に異常が生じ得る。

次に、2001年1月～2010年9月までの10年間の地震データを用い、マグニチュード M と震源距離 d から全地震エネルギー(TEE)を求めた。各測点から100 km以内にある地震データを用い、 M から求められる地震エネルギーを d^2 で除し、これを加算した結果、 ^{222}Rn 濃度がTEEと強い相関性をもつことが見出された(第2図)。地殻上部でのガス流れはダルシー則に従うと仮定し、これとディスロケーションモデルを組み合わせると、強い相関性は ^{222}Rn のソース深度付近での間隙圧の増加に起因すると解釈できる。この増加はキャリアガスの上昇速度を速くし、結果として ^{222}Rn 濃度も増加する。以上の解釈から、微小な歪み変化にも ^{222}Rn は敏感であることが示唆される。

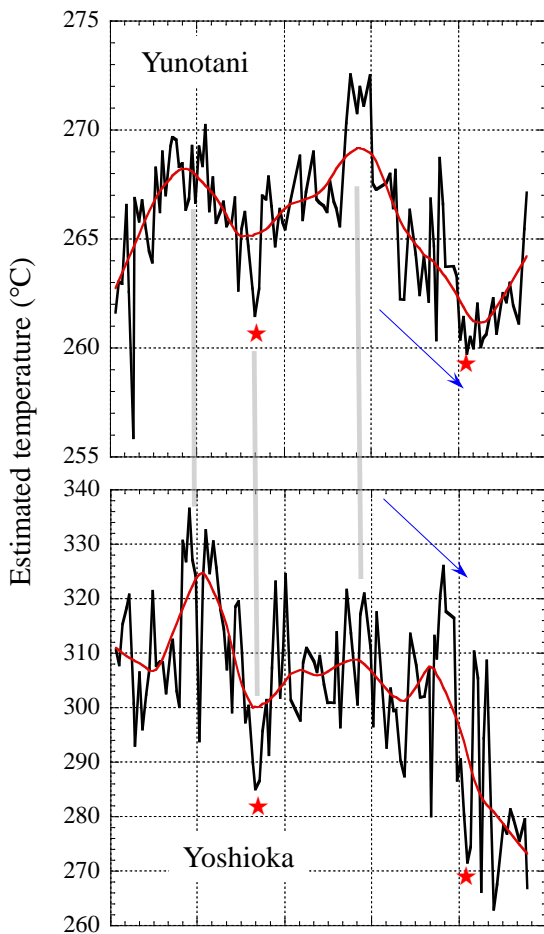
さらに、岩石破壊に伴うラドンの放出量の支配因子を明らかにするために、大島、六甲、土岐、船津、稲田産の5種の花崗岩を用いて一軸圧縮試験を行った⁴⁾。 α シンチレーションカウンター法により ^{222}Rn と ^{220}Rn の壊変数を合計したRn濃度を連続測定したところ、稲田花崗岩以外では一軸圧縮強度の46～57%のレベルで濃度が急増し、破壊後も濃度が上昇した(第3図)。

また、種々の検討により、破壊に伴うRn濃度の増加量の主要因子は放射性核種の含有量であり、これに加えて鉱物粒径、一軸圧縮強度、散逸面積の進展速度、および破壊形態(せん断型あるいは引張り型)も因子になり得ることがわかった。圧縮強度が小さく引張り破壊型は、ラドンの放出と移動に有利となる十分な量の間隙や応力解放を生じさせ、小さな粒径はRnの散逸係数を増加さ

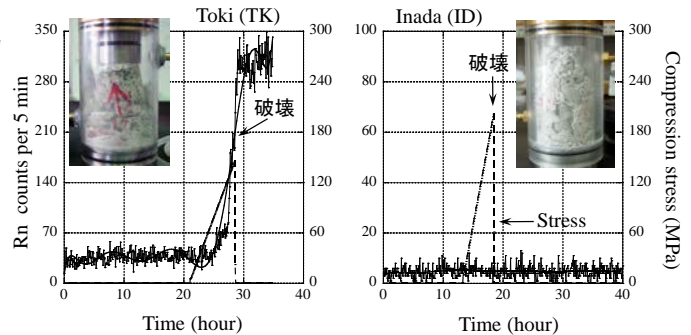
せると考えられる。これらの条件が揃わないと、稲田花崗岩のように岩石破壊はRn濃度を増加させない。よって、地震エネルギーや震源距離、地殻の放射性核種含有量に加えて、鉱物組成と岩石の力学的性質も地中ガスの ^{222}Rn 濃度を増加させるのに重要な因子であるといえる。



第2図 7つの活断層域での全地震エネルギー(TEE)と ^{222}Rn 濃度



第1図 2つの噴気サイトでの ^{222}Rn 濃度に基づく地熱貯留層の推定温度(★印は極小値、線分と矢印は対応するパターンを表す)



第3図 圧縮進展に伴うRn濃度(5分間当たりの ^{222}Rn と ^{220}Rn の壊変数のカウント)と一軸圧縮応力との関係(土岐と稲田花崗岩の例)

4. まとめ

長期間・広範囲にわたる測定と一連の岩石試験により、 ^{222}Rn 濃度には貯留層の温度・圧力、測定地周辺の地震エネルギーの累計、および岩石の圧縮強度や破壊形態などの力学的性質の情報が含まれていることが明らかになった。 ^{222}Rn はこのような地殻物性や応力・歪み変化、それに伴うガス上昇速度変化に敏感であるといえ、これらに関連した現象のセンサーとしての活用が期待できる。

文献

- 1) Koike, K., Yoshinaga, T., Asaue, H., 2009. Radon concentrations in soil gas considering radioactive equilibrium conditions with application to estimating fault-zone geometry. *Environ. Geol.*, v. 56(8), p. 1533-1549.
- 2) Koike, K., Yoshinaga, T., Asaue, H., 2014. Characterizing long-term radon concentration changes in a geothermal area for correlation with volcanic earthquakes and reservoir temperatures. *J. Volcanol. Geoth. Res.*, v. 275, p. 85-102.
- 3) Koike, K., Yoshinaga, T., Ueyama, T., Asaue, H., 2014. Increased radon-222 in soil gas because of cumulative seismicity at active faults. *Earth, Planet and Space*, v. 66(1), p. [57]1-9.
- 4) Koike, K., Yoshinaga, T., Suetsugu, K., Kashiwaya, K., Asaue, H. Controls on radon emission from granite as evidenced by compression testing to failure (under review).