

地下水や地下ガス中の特定の化学成分の濃度（比）や同位体比に注目し、1)その時間変化と地震発生との関連を調べたり、2)その空間分布を調べて、プレートテクトニクスや活断層等との関連を調査したりすることが、地球化学的地震予知研究である(小泉, 1997)。日本の場合はこれに加えて、地下水の物理量（水位・自噴量・水温）の時間変化と地震との関連を調べる水文学的地震予知研究も、「地球化学的地震予知研究」に含める事が多いがここでは区別して説明する。

土壌ガスや大気中の Rn 濃度と地震との関連に注目した、地球化学的地震予知研究の先駆的なものは Hatuda (1953), Okabe (1956) らに認められるが、これらは、当時の日本の地震学界にはあまり評価されなかった(岡部, 1986)。その後、1966年のソ連タシケント地方の地震(M5.5)発生前に、地下水中の Rn 濃度が変化したということで再評価され(Ulmov and Mavashev, 1971)、ダイレイタンシー水拡散モデル(Scholz et al., 1973)が理論的裏付けとなって、1973年頃から、東京大学の脇田らを中心に日本でも研究が再開された(脇田, 1984)。さらに、中国での海城地震(1975年2月, M7.3)の予知の成功の際、地球化学的観測が非常に有効であったことが伝えられると、文部省測地学審議会は「第三次地震予知計画の一部見直しについて」(1975年7月)を建議し、地下水に関する研究の推進を訴えるに至った。このようにして地球化学的手法が、特に短期的予知に有効な手段になりえるものとして、日本の地震予知研究に本格的に取り入れられる事となった。

当初短期予知に有望とされたことから、上述の1)は特に熱心に行なわれ、地震前の異常変化例がいくつか報告された(例えば、Wakita et al., 1980)。しかしながら、化学成分濃度（比）の連続観測は、地球物理的観測に比べて長期安定性や即時性で劣る上に、深さ数 km 以深で発生する物理破壊現象である地震と、地表付近の化学成分濃度（比）変化を定量的に結びつけるのは難しく、結果として因果関係の立証は困難であり研究は深化せず徐々に下火になっていった。近年、大気中のラドン濃度が地震前に変化するといった研究が見直されているが(Yasuoka, et al, 2006)、同じ課題の克服が求められている。

2)については、Rn やその娘元素の出す放射線を測定することによる活断層探査は(Hatsuda, 1954)、すでに一般的な物理探査手法として用いられるようになってきている(例えば、物理探査学会, 1992)。主に地殻起源の He4 とマントル起源の He3 の比を取ることで、地下ガスの起源を同定できる He3/He4 比の分布とテクトニクスとの関係を論じる研究も熱心に行われている(Sano and Wakita, 1985; Sano et al., 2009)。さらに、断層のコアを詳細に解析して、断層運動を化学的な面から解析しようという研究も行われるようになってきている(Tanaka et al., 2007)。

水文学的地震予知研究は、地下水位(水圧, 自噴量)測定に特化した形で行われている(小泉, 2013)。多孔質弾性論を用いて、地殻変動を仲介した形で、地震と地下水位を結びつけ、「メカニズム不明」という欠点を克服している。

## 用語説明

### ・ダイレイタンシー(ダイラタンシー)水拡散モデル

ダイレイタンシーとは岩石破壊前に生ずる体積膨張のことで、Nur(1972)や Scholz et al. (1973)はこの現象を地下水の移動に結び付けて、以下のような地震発生のモデルを提唱した。地震発生が間近な領域では、応力の増大によって、微小破壊が進行し、岩石中に空隙が生じ体積が膨張する。このことによって、岩石中の空隙内の圧力(空隙圧)が低下する。その後、周辺域から地下水が流入し、微小破壊域の岩石空隙は水の飽和状態に近づく。これは逆に空隙圧の上昇を生じるため、岩石の破壊強度を低下させ地震の発生にいたる。以上が、ダイレイタンシー水拡散モデルの概要である。Scholz et al. (1973)は、このような考えに基づいて、地震波の縦波と横波の速度比(VP/VS)・地殻変動・地電流・大地比抵抗・微小地震活動度・地下水等の地震前の挙動について統一的に解釈した。ここでは、地下水の挙動は地震発生に直接関与する形になっており、従来、他の地球物理学的観測量に比べて、地震との結びつきに関する理論的根拠が薄弱であった地球化学的地震予知研究の有効性を示すこととなった。

しかし、このモデルはやがて疑問視されるようになり(例えば、茂木, 1982)、現時点でこのモデルを支持する人は少ない。

### ・多孔質弾性論

物体にかかる力(応力)と変形(歪(ひずみ))の関係を記述したのが弾性論であり、地震と地殻変動(地面の変形)は弾性論によって理論的に結びつけることができる。弾性論における変数は応力と歪

の二つであるからここに地下水の関与する余地はない。他方、多孔質弾性論は、空隙のある弾性体を考え、その空隙が水で満たされている状況での、応力・歪・空隙中の水圧・空隙中の水の量（以降、単に含水量と称す）との相互関係を示す理論である[Biot, 1941; Roeloffs, 1996; Wang, 2000]。空隙中の水=地下水、空隙中の水圧=空隙圧=地下水圧=地下水位とみなせば、この理論を用いることで地下水と地殻変動を結びつけることができる。ただし、弾性論に比べて、含水量や間隙圧といった変数が増えるので、解析に当たっては、対象としている現象に応じて、含水量一定（非排水条件という）や間隙圧一定（排水条件という）といった仮定を用いることが多い。

## 参考文献

- Biot, M. A. (1941), General theory of three-dimensional consolidation, *J. Appl. Phys.*, 12, 155-164.
- 物理探査学会(1992), 図解物理探査, 物理探査学会, 239pp.
- Hatuda, Z. (1953), Radon content and its change in soil air near the ground surface, *Mem. Coll. Sci., Univ. Kyoto, Ser. B, Vol. XX*, 285-306.
- Hatuda, Z. (1954), Radioactive method for geological exploration, *Mem. Coll. Sci., Univ. Kyoto, Ser. B, Vol. XXI*, 231-271.
- 小泉尚嗣(1997), 地球化学的地震予知研究について, *自然災害科学*, 16, 41-60.
- 小泉尚嗣(2013), 地下水観測による地震予知研究-地下水位変化から地殻変動を推定することによる地震予知-, *シンセシオロジー*, 5, 4, 277-286.
- 茂木清夫(1982), 日本の地震予知, サイエンス社, 352pp.
- Nur, A. (1972), Dilatancy, pore fluids, and premonitory variation of  $t_p/t_s$  travel times, *Bull. Seismol. Soc. Amer.*, 62, 1217-1222.
- Okabe, S. (1956), Time variation of the atmospheric radon content near the ground surface with relation to some geophysical phenomena, *Mem. Coll. Sci., Univ. Kyoto, Ser. A, Vol. XX*, 99-115.
- 岡部 茂(1986), ラドンと地震-昔と今, *地球化学実験施設彙報*, 4, 16-27.
- Roeloffs, E. A. (1996), Poroelastic techniques in the study of earthquake-related hydrologic phenomena, *Adv. Geophys.*, 37, 135-195.
- Sano, Y. and H. Wakita(1985), Geographical distribution of  $^3\text{He}/^4\text{He}$  ratios in Japan: Implications for arc tectonics and incipient magmatism, *J. Geophys. Res.*, 90, 8729-8741.
- Sano, Y., A. Kameda, N. Takahata, J. Yamamoto, J. Nakajima(2009), Tracing extinct spreading center in SW Japan by helium-3 emanation, *Chemical Geology*, 266, 50-56.
- Scholz, H. C., L. R. Sykes and Y. P. Aggarwal(1973), Earthquake prediction: A physical basis, *Science*, 181, 803-809.
- Tanaka, H., K. Omura, T. Matsuda, R. Ikeda, K. Kobayashi, M. Murakami, K. Shimada (2007), Architectural evolution of the Nojima fault and identification of the activated slip layer by Kobe earthquake, *J. Geophys. Res.*, 112, B07304, doi:10.1029/2005JB003977.
- Ulomov, V. I. and B. Z. Mavashev(1971), The Tashkent earthquake of 26 April 1966, *Acad. Nauk Uzbek SSR FAN*, 188-192.
- Wakita, H., Y. Nakamura, K. Notsu, M. Noguchi and T. Asada(1980), Radon anomaly: A possible precursor of the 1978 Izu-Oshima-Kinkai Earthquake, *Science*, 207, 882-883.
- 脇田 宏(1984), 地球化学的地震予知研究の10年, *東京大学理学部地殻化学実験施設彙報*, 3, 2-26.
- Wang, H. F. (2000), *Theory of Linear Poroelasticity with Applications to Geomechanics and Hydrogeology*, Princeton Univ. Press, Princeton, 287pp.
- Yasuoka, Y., G. Igarashi, T. Ishikawa, S. Tokonami, M. Shinogi(2006), Evidence of precursor phenomena in the Kobe earthquake obtained from atmospheric radon concentration, *Applied Geochemistry*, 21, 1064-1072.