

11 - 4 地下水観測などで検知された兵庫県南部地震直前の地球化学的異常現象 Geochemical anomalies observed in groundwater and others prior to the Hyogo-ken Nanbu Earthquake

東京大学大学院理学系研究科
Graduate School of Science, University of Tokyo

1. 地下水観測から検知された地球化学的な前兆現象

兵庫県南部地震は、地下水の観測において、明らかな前兆的变化が複数捉えられた地震であった。それらは、

- (1) 六甲高雄 (RTS) の湧水量変化¹⁾
- (2) 西宮 (NMY) の地下水中のラドン濃度変化²⁾
- (3) 六甲 (ROK) の地下水中の塩化物イオンなど化学組成の変化^{3, 4)}

の3例である。これらの変化が観測された場所を第1図に示すが、3つの場合とも余震域、つまり断層が動いた地域の直上に近辺で観測が行われていた共通点がある。

第2図には、観測された3つのデータを同じ時間にそろえて並べて示す。京都大学防災研究所の藤森らが観測していた六甲高雄の湧水量の変化には、時々スパイク的上昇が見られるが、これらは遠地震に対応する変化で、全般的には地震の起きる3~4カ月前ぐらいから湧水量が明瞭に増加している。西宮の地下水のラドンの濃度変化は、その当時広島大学の五十嵐らの観測成果で、地震の2カ月前ぐらい前からラドンの濃度が上がりだし、急増してピークを超えた直後に地震が起きた。なお、地震後は低い状態が続いているのである²⁾。六甲の地下水の塩化物濃度変化は、その当時東京大学の地殻化学実験施設にいた角皆と脇田の測定結果で、地震の数カ月前ぐらい前から上がり始め、1回目のピークのち一旦下がり、2~3カ月前にもう一度上がり出したときに地震が起きた。

兵庫県南部地震でこのような地震直前の変化を捕らえることができたのは、震源域の直上で観測していたことによっており、このような場所は前兆を捕らえるためには理想的な所であることを示した。もっとも、六甲の地下水の測定は事情が逆で、地震が起きてから、角皆らは震源域直上の地震前の地下水を分析できないかと考えた末、六甲の地下水を飲料水にしている「六甲のおいしい水」というペットボトル飲料水には製造年月日を書いてあるので、それを過去2年間にわたって集めて測って、前兆的变化を見つけた。いずれにせよ、地震で動きそうな活断層をねらって観測点を設けることが肝要で、地下水観測を行なう場合、観測点の場所の選定が決定的であることを示している。

西宮のラドン濃度変化は、地震に先立って震源域で微小破壊が進み、岩石中に閉じ込められているウランなどの放射壊変起源のラドンガスの放出で説明ができる。とくにこの地域は花崗岩質であるので、ウランが濃集しており、ラドンも多いことが、明瞭なラドン増加の観測事実につながったと考えられる。塩化物イオンの増加は、破断面からのイオンの溶出、あるいは透水性の増進による地下水同士の混合の促進 (ROK では塩分濃度の濃い地下水の混合をうけた?) によると考えられるし、地下水圧の増加が湧水量増加につながったと考えられる。

なお上記3例以外にも、余震域からかなり離れた鳥取県や兵庫県北部の温泉で前兆的变化を観察したとの報告がある⁵⁾。

2. 震源域での微小クラック発生をサポートする観測や測定

兵庫県南部地震前に地下からラドンが出てきたことを強く示唆する観測結果が2つかある。その1つは、神戸薬科大学構内（神戸市東灘区、第1図のROKのあたり）で安岡と志野木によって測定された大気中のラドン濃度の増加⁶⁾である。第3図左には1984~1996年の長期的な変化を示し、右には地震をはさむ1年間の変化を示す。過去10年間で1994年だけが少しだけ高く、確かに過去最高である。もう少し詳しく時間変化を見ると、兵庫県南部地震が起きる2~3カ月前ぐらいから平年のレベルを超え出したことが分かる。観測点のあたりでは経年変化をこえるラドンガスの放出が1994年に限って起きたと考えられ、岩石の微小破壊によって解放されたラドンが大気中に地面を通してしみ出してきたことが想像できる。なお、同様の現象は大阪府中央区で行なわれている大阪管区気象台の環境放射能測定にも見られた。

もう1つの例は、ヘリウムの測定である。ウランが放射壊変してラドンができる時、壊変をくり返すので、 α 粒子、つまり ^4He の原子核が同時に放出される。ヘリウムはラドンよりも軽いので明らかに動きやすく、当時広島大学の佐野らは、地下水に溶けているヘリウムの測定から地震に関連する過剰なヘリウムの供給を示した⁷⁾。第4図には、地震が起きる前の1993年4月と起きた直後（1995年1月）に採取した西宮の地下水のデータを示す。 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 、 $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ を両軸にとるダイヤグラム上に示すと、明らかに ^4He が多くなる方向で変化したことが分かる。半減期が3.8日のラドンと異なって ^4He は放射壊変しないので生成とともに蓄積し、供給が止まってもある程度の時間は蓄積量が保たれる。したがって、いつヘリウムが地下水に供給されたかわからないが、地震を挟んで ^4He が地下水にたくさん入ったことは明らかで、岩石の微小破壊によるヘリウムの供給を示唆する。

3. 地震発生の予測性を示す地下水観測データの解析

地下水の時系列データから地震発生を予測できるかは、大変重要な課題である。フランスの物理学者のソネットのグループは、Tsunogai and Wakitaの六甲の地下水のデータ³⁾が、不均質媒体の破壊のフラクタルな現象を非常によく表しているを見抜き、地下水中の塩化物イオンなど化学組成の変化を「臨界点」に至る現象として解析した^{8, 9)}。岩石中にできる微小クラックの表面積が地下水中のイオン濃度と比例することを大胆に仮定すると、例えば塩化物イオン濃度の変動がちょうど岩石が割れ始めて最後に臨界点に至るというモデルに非常によく合っている。しかしどの成分もよくあうわけではなく、第5図に示すように、比較的好く合っているのが塩化物イオン、マグネシウムイオン、硫酸イオンで、カリウムイオンあたりになると、分析も悪くかつ変動が大きく、モデルとあわない。将来こういう解析法がうまく使えるようになってくれば、刻々と得られる地下水の時系列データを用いて地震発生の時刻を予測する有望な方法として認められるようになるかもしれない。

4. これまでの観測例との比較

兵庫県南部地震以前に報告された地下水に関連する前兆現象の代表例として、1978年伊豆大島近海地震に先立つ地下水中のラドン濃度変化^{10, 11)}があげられる。この場合は、歪み変化と呼応した地震前のラドン濃度の減少であり、微小クラックの発生では説明ができなかった。今回の兵庫県南部地震に先立つラドン濃度の変化は、タシケント地震以来しばしばいわれてきた本震に先立って起きる微小クラックの発生で説明できる現象を実際にとらえたことになる。さらに、地下水中のラドン濃度の地震前の変化には多様性があることも示したことになる。

5. 地震時あるいは地震後の地下水の変化

兵庫県南部地震では地下水に現れた地震時あるいは地震後の変化が数多く報告されている。トピックスの課題から直接は外れるが、密接に関連する現象であるので、以下に、報告例を列挙する。

- (1) 淡路島の異常湧水^{12, 13, 14)}
- (2) 近畿，中国，四国地方の温泉鉱泉の変化^{5, 15)}
- (3) 湯谷温泉（鳥取県）水温上昇¹⁶⁾
- (4) 竜洋観測井（静岡県）ラドン濃度低下¹⁷⁾

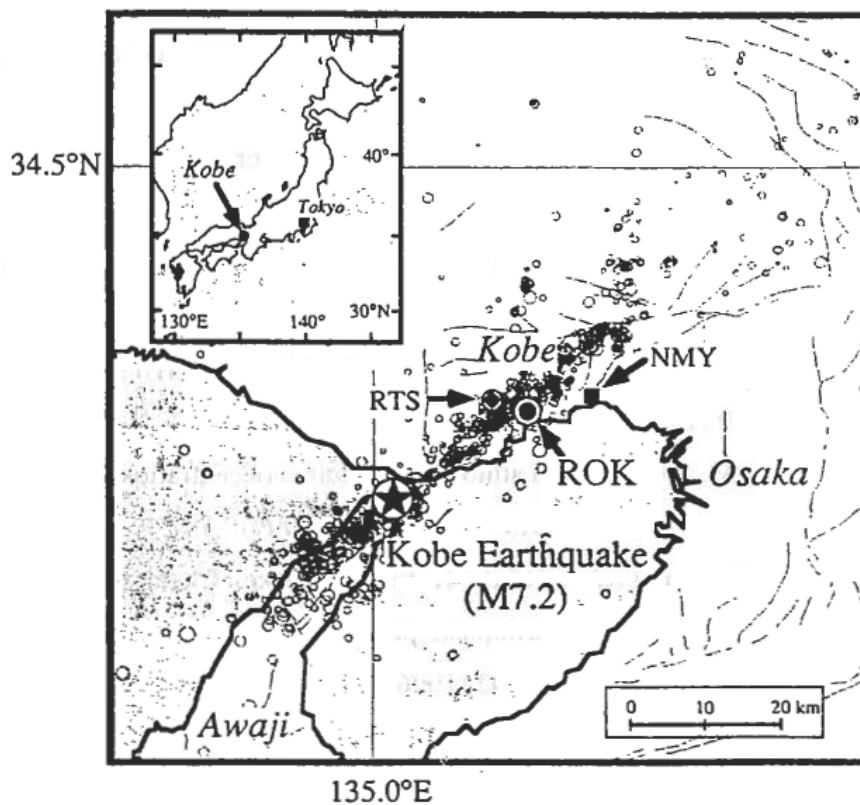
近畿地方ばかりでなく、中国四国、中部地方まで地下水に変化が現れたことが分かる。

(野津憲治)

参 考 文 献

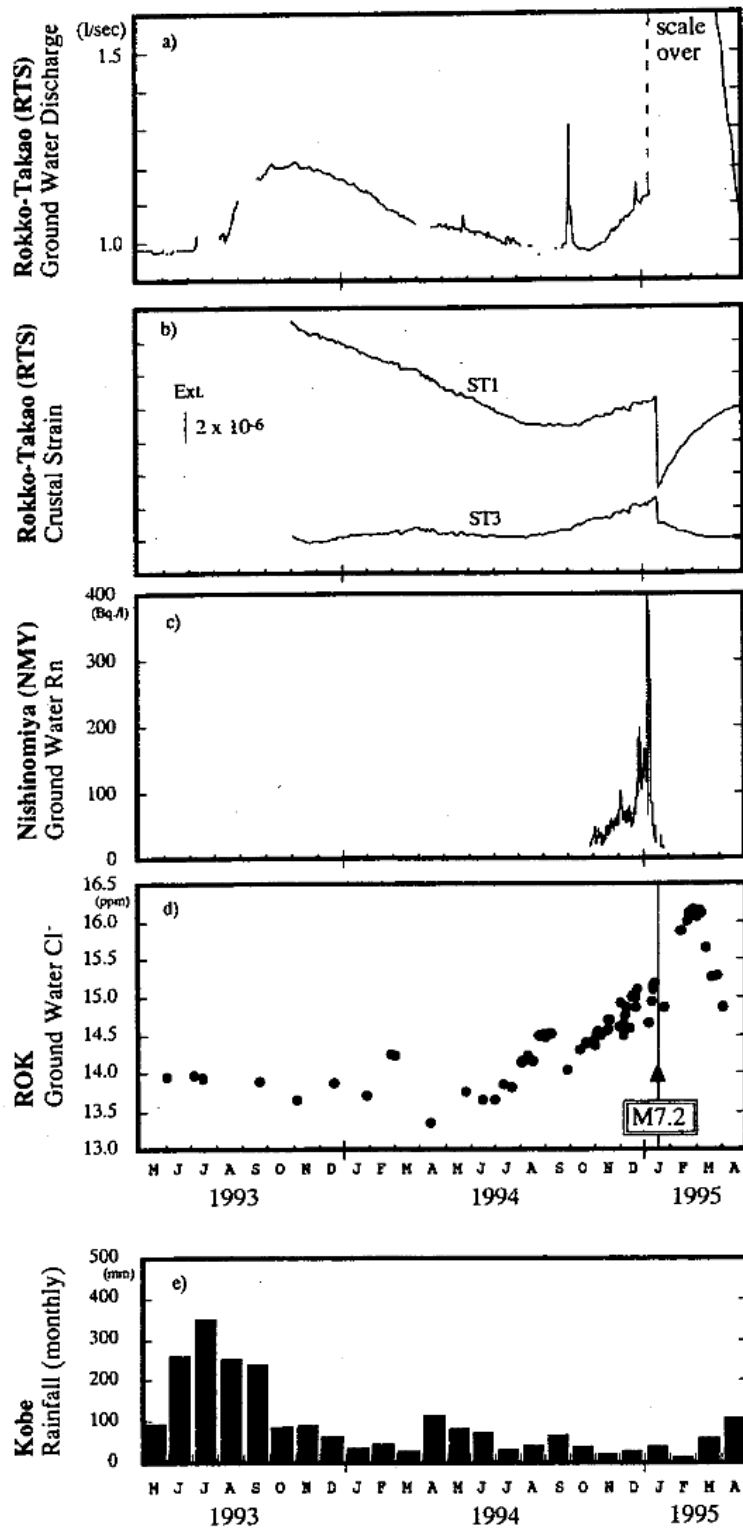
- 1) 森邦夫ほか3名，六甲高雄観測室における兵庫県南部地震に関連する湧水量変化．京都大学防災研究所年報，38 B1, 287-296 (1995).
- 2) Igarashi, G. et al. Ground-water radon anomaly before the Kobe earthquake in Japan. *Science*, 269, 60-61 (1995).
- 3) Tsunogai, U. and Wakita, H., Precursory chemical changes in ground water: Kobe earthquake, Japan. *Science*, 269, 61-63 (1995).
- 4) Tsunogai, U. and Wakita, H., Anomalous changes in groundwater chemistry-Possible precursors of the 1995 Hyogoken Nanbu earthquake, Japan. *J. Phys. Earth*, 44, 381-390 (1996).
- 5) Koizumi, N. et al., Groundwater anomalies associated with the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake. *J. Phys. Earth*, 44, 373-380 (1996).
- 6) Yasuoka, Y. and Shinogi, M., Anomaly in atmospheric radon concentration: A possible precursor of the 1995 Kobe, Japan, earthquake. *Health Phys.*, 72, 759-761 (1997).
- 7) Sano, Y. et al., Helium degassing related to the Kobe earthquake. *Chem. Geol.*, 150, 171-179 (1998).
- 8) Johansen, A. et al., Discrete scaling in earthquake precursory phenomena: Evidence in the Kobe earthquake, Japan. *J. Phys. I France*, 6, 1391-1402 (1996).
- 9) Johansen, A. et al., New evidence of earthquake precursory phenomena in the 17 January 1995 Kobe earthquake, Japan. *Eur. Phys. J.*, B15, 551-555 (2000).
- 10) Wakita, H. et al., Radon anomaly: A possible precursor of the 1978 Izu-Oshima-kinkai earthquake. *Science*, 207, 882-883 (1980).
- 11) Wakita, H., Geochemical challenge to earthquake prediction. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 93, 3781-3786 (1996).
- 12) 佐藤努，高橋誠，淡路島異常湧水の化学組成変化 - 1995年兵庫県南部地震による影響 - . *地球化学*，31, 89-98 (1995).
- 13) Sato, T. et al., Coseismic spring flow changes associated with the 1995 Kobe earthquake. *Geophys. Res. Lett.*, 27, 1219-1222 (2000).
- 14) Tokunaga, T., Modeling of earthquake-induced hydrological changes and possible permeability enhancement due to the 17 January 1995 Kobe earthquake, Japan. *J. Hydrol.*, 223 221-229 (1999).

- 15) King, C-Y. et al., Hydrogeochemical anomalies and the 1995 Kobe earthquake. *Science*, 269, 38-39 (1995).
- 16) Kitagawa, Y. et al., Comparison of postseismic groundwater temperature changes with earthquake-induced volumetric strain release: Yudani hot spring, Japan. *Geophys. Res. Lett.*, 23, 3147-3150 (1996).
- 17) Ohno, M. and Wakita, H., Coseismic radon changes of the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake. *J. Phys. Earth*, 44, 391-395 (1996).



第1図 兵庫県南部地震の前兆的变化が観測された地下水の観測地点 (文献4による) RTS: 六甲高雄, MY: 西宮, ROK: 六甲 (ROK) (本震, 余震域, 活断層を加えてある)

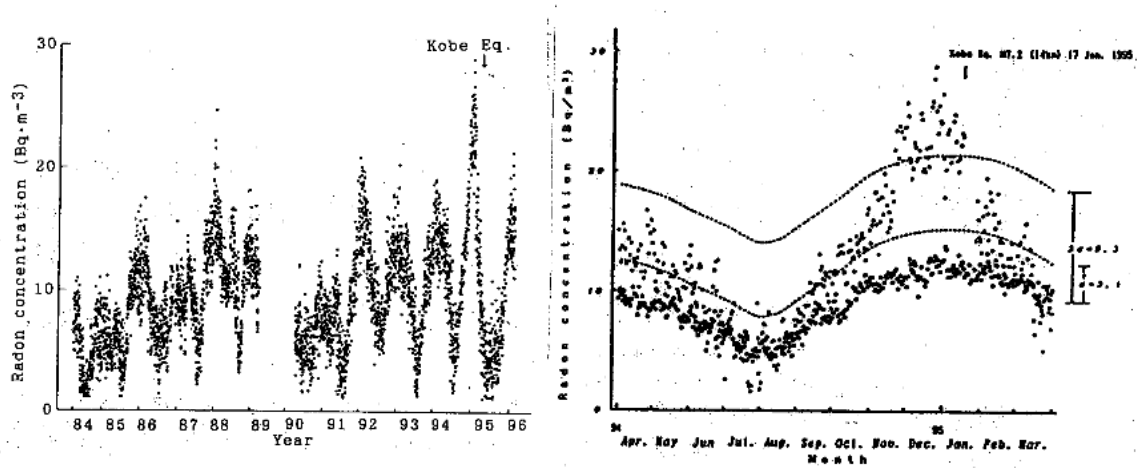
Fig.1 Locations of groundwater observation sites where precursory anomalies before the Hyogo-ken Nanbu Earthquake were observed (from reference 4) RTS: Rokko-Takao, NMY: Nishinomiya, ROK: Rokko (This map includes locations of main shock, aftershocks and active faults)



第 2 図 兵庫県南部地震前後に観測された地下水データと降水量 (文献 4 による)
 a) 六甲高雄の地下水湧水量, b) 六甲高雄の地殻歪み, c) 西宮の地下水中ラドン濃度,
 d) 六甲の地下水中塩化物濃度, e) 神戸の月間降水量

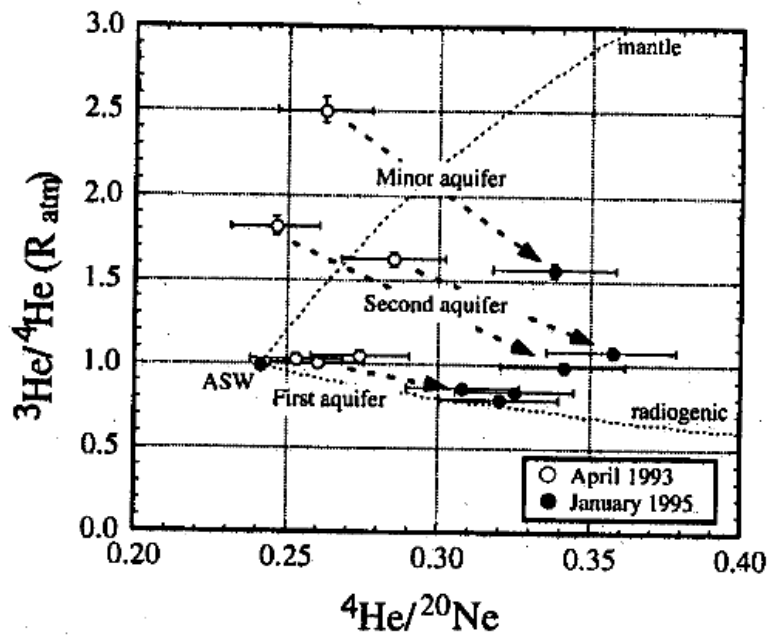
Fig.2 Temporal variations observed in groundwater and rainfall from May 1993 to April 1995 (from reference 4)

a) Groundwater discharge at Rokko-Takao, b) Crustal strain at Rokko-Takao, c) Groundwater radon content at Nishinomiya, d) Groundwater chloride content at Rokko, e) Monthly rainfall at Kobe



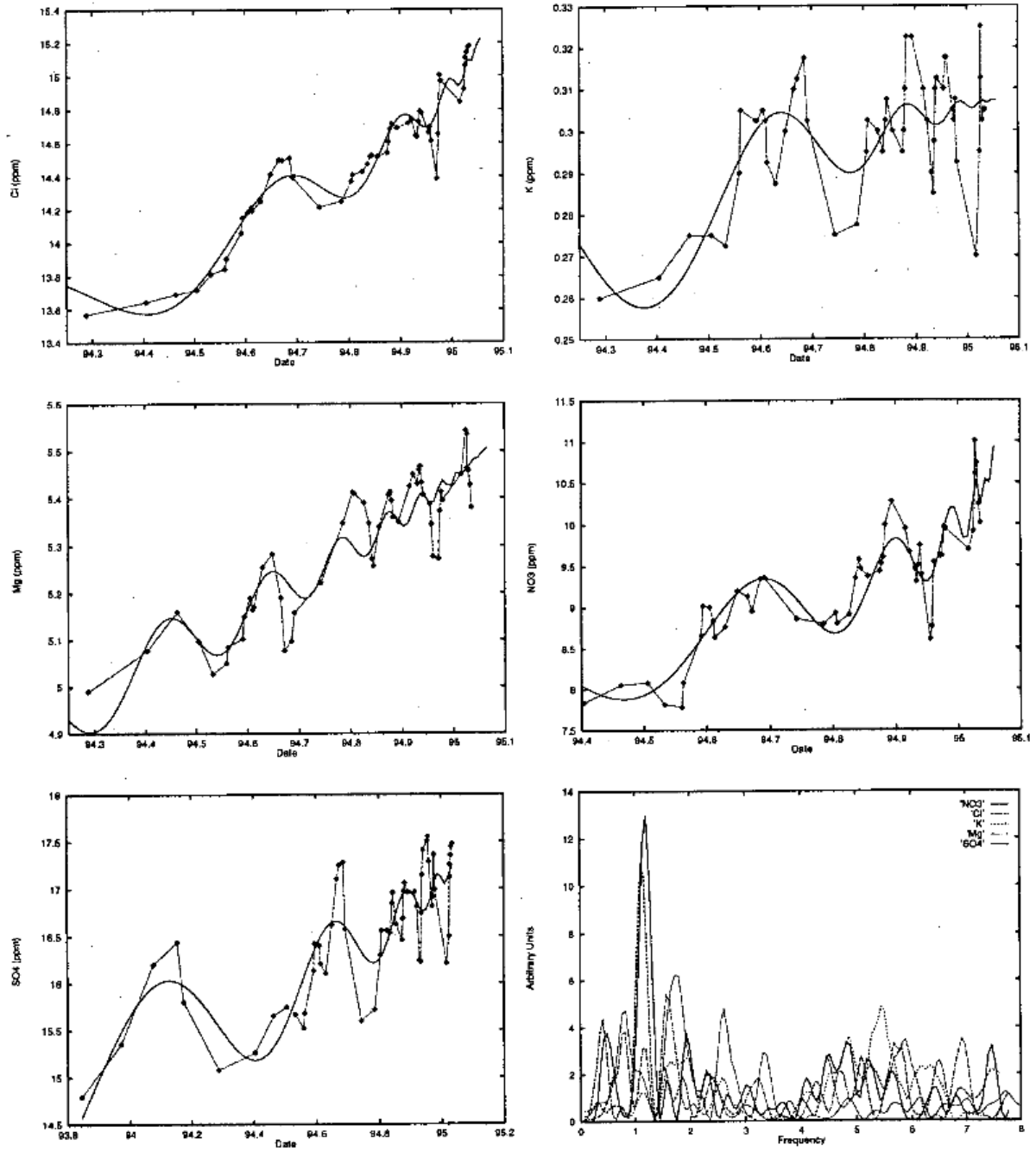
第3図 神戸薬科大学構内での大気中のラドン濃度変化⁶⁾
 (左図) 1984-1996年, (右図) 1994年4月-1995年3月

Fig.3 Temporal variation in atmospheric radon concentration observed at a station in Kobe Pharmaceutical University⁶⁾
 (left) 1984-1996 (right) April 1994 - March 1995



第4図 西宮地下水の³He/⁴He、⁴He/²⁰Neの変化⁷⁾
 AWS: 0 における大気に飽和している水

Fig.4 Variation in ³He/⁴He and ⁴He/²⁰Ne in groundwater at Nishinomiya⁷⁾
 AWS: air saturated water at 0



第5図 六甲の地下水のCl⁻、K⁺、Mg²⁺、NO₃⁻、SO₄²⁻の経時変化と「臨界点」モデルによる解析⁹⁾
 Fig.5 Temporal variations in Cl⁻, K⁺, Mg²⁺, NO₃⁻ and SO₄²⁻ in Rokko groundwater and their analyses using "critical point" model