

兵庫県北部における微小群発地震の特徴

—^{てらぎ}照来コールドロンは火山性群発地震の象徴か?—

The case study of earthquake swarms in the Northern Hyogo Prefecture, Japan

—Does the Teragi cauldron symbolize "volcanic" earthquake swarms?—

高田卓也

Takuya Takata

株式会社蒜山地質年代学研究所

Hiruzen Institute for Geology and Chronology, Co. Ltd., 161-1 Sai, Okayama 703-8248, Japan

takata@geohiruzen.co.jp

1. はじめに

2004 年の暮れ, 兵庫県北部で微小群発地震が続いているとの報道に接した時, 私はいやな予感を覚えた. その予感とは, 新潟県で起きた 2004 年 10 月 20 日の台風 23 号による豪雨災害と, その後 10 月 23 日に発生した新潟中越地震による複合災害が, 兵庫県北部に重ね合わされて見えたことである. 私はまず, 地震活動の全貌を明らかにしたいと思いつき, 情報収集を始めた. 成熟期を迎えた感のあるインターネットを利用して, 各研究観測機関がホームページ上に公表している情報を収集した. 同時に地震に関する基本的な書籍も読み始めた. 年末から年始にかけて繁忙な時期ではあったが, 情報が蓄積され漠然とではあるが地震の全貌が掴めてくるにつれて, この研究にのめり込んでいった.

兵庫県北西部に位置する香美町^(a)および新温泉町^(b)では 2001 年以来, 体を感じることでできる地震が断続的に群発している (例えば, 田中・松本, 2004). ここは, 日本海で採れるズワイガニの陸揚げ拠点であり, 黒毛和牛の産地としても知られ, また, 湯村温泉に代表されるように温泉地が数多く分布する地域である. 私とこの地域との関わりは, 私が応用地質株式会社に就職した 1991 年に始まる.

私に与えられた最初の仕事は村岡町 (現: 香美町村岡区) の地すべり観測業務であり, その後並行して温泉町 (現: 新温泉町照来地域: 図 1) の地すべり調査業務も実施した. 私は 1991 年から 2002 年までの間, 途切れた時期もあるがおよそ 10 年間に渡って兵庫県北部地域と関わることとなった. 兵庫県北部は, 私が地質技術者としてのキャリアをスタートさせ, 地すべりのイロハを学んだ場所である.



図 1. 豪雪に沈黙する照来川周辺の集落の様子 (2000 年 2 月 24 日, 高田撮影).

^(a) 2005 年 4 月に兵庫県美方郡の美方町・村岡町・及び城崎郡香住町が統合した.

^(b) 2005 年 10 月に兵庫県美方郡の浜坂町と温泉町が合併してできた.



図 2. 2001, 2004 年兵庫県北部地震の震央位置と周辺の地勢及び代表的な被害地震の分布。

その兵庫県北部の地質的特徴は火山岩の分布にある。舞鶴帯・三郡帯などの中生界と白亜紀後期～古第三紀の花崗岩類および火山岩類（矢田川層群）を基盤にして、主に以下に記す 4 つの時代で区分される火山岩類が被覆する。

- (1) 新第三系中新統の北但層群：下位の八鹿累層椿色火山岩層に代表される玄武岩質安山岩類と中位の豊岡累層河江火山岩層に代表される流紋岩類。
- (2) 新第三系鮮新統の照来層群：下位の高山累層歌長流紋岩と上位の小代累層寺田安山岩層。
- (3) 鮮新世後期の火山岩類：鉢伏山・氷ノ山・瀨川山周辺に分布するカルクアルカリ質安山岩を主とする。
- (4) 第四紀更新世の火山岩類：扇ノ山火山群・神鍋火山群・玄武洞に分布するアルカリかんらん石玄武岩を主とする。

兵庫県北部において火山岩が地表に広く厚く分布することと温泉地が数多く立地することは、熱源の存在を示唆し、マグマの供給源が枯渇していないことを予感させる。しかしながら、上記の火山岩類の中では、神鍋火山群が比較的新しい火山とされているものの、歴史時代に活動している火山はない。また、地殻熱流量の観測記録（田中，2004）では $50 \sim 75 \text{ mW/m}^2$ と際だって大きな値を示す場所でないことが判断されている。

2001 年および 2004 年の兵庫県北部地震は、扇ノ山の東北東側にあり（図 2）、新第三系鮮新統の照来層群が分布する地盤の地下で発生している。照来層群の堆積物は、南北性と東西性の断裂に支配された花崗岩類および北但層群を基盤とする陥没盆地であるが、陥没形成後の流紋岩質火山活動（歌長流紋岩）によって凹地地形が強調されたものとされていた。しかし近年の詳細な地質調査によって、急崖に囲まれた盆地内部を火砕流堆積物が埋積していることが明らかになり、火山活動に伴った陥没構造（コールドロン）の可能性が提唱されている（小室ほか，2002）。

扇ノ山の北側には西北西－東南東系の雨滝－釜戸断層と北東－南西系の扇ノ山北東断層が分布している（活断層研究会）。前者は左横ズレの、後者は右横ズレのセンスを示

し、いずれも确实度 II の活断層とされている。現在まで公表された発震原因は、活断層である雨滝－釜戸断層との関わりが強調され、延長部に相当する断層の運動によるものと提唱されている。しかし、断層を運動させた原因については未だ不明である。

本小文では 2001 年と 2004 年に発生した 2 件の兵庫県北西部地域での群発微小地震を端緒とし、インターネットを介して情報を収集し、地震発生場を目視するためのモデルについて考察する。

2. 2001 年および 2004 年の群発微小地震から研究へ

兵庫県北部における 2001 年および 2004 年の群発微小地震について以下に紹介する。次にこの 2 つの地震から私ごとの様に問題意識を抱いたかを述べる。

2-1. 2001 年兵庫県北部地震

2001 年兵庫県北部地震は、2001 年 1 月 12 日 8 時 00 分に発生したマグニチュード 5.4（後に 5.6 に修正される）の地震を本震とする群発地震（2000 年 12 月 4 日～2001 年 12 月 31 日に 6639 回発生している：中尾ほか，2002）である。私はその本震が発生する前年 2000 年 11 月より、蒜山地質年代学研究所の所員とともに、兵庫県北部美西方地域における急傾斜地の点検業務を請けて、現地調査を行っていた。同年 12 月 24 日になって積雪が始まり、現地作業は一時的に中断した。

翌年 1 月 12 日の地震発生当日、私は神戸市西区の凍てつく高速道路脇の法面で、地すべりに起因するコンクリート構造物の変状を踏査し記載していた。翌日、点検業務の依頼主から電話があり、急傾斜地の地震による被害状況をまとめるように指示を受けた。地元への聞き込みと視察を行ったが、軽微な損壊にとどまり安心していた。呑気なものであるが、その後発生した変状災害は私のそんな思いこみを一掃させた。

図 3 の記事にあるとおり、国道に変状が発生し、群発地震（当時は余震とされた）との関連が取り沙汰されていたので、現地での詳細な地質調査が始まった。併せて、緊急時の周辺施設の点検⁽³⁾も実施されることとなった。ここで言う「緊急時」とは、時間雨量 30mm 以上の降雨時、もしくは震度 3 以上の地震発生時を指す。

調査は進展し、原因と変状発生機構が明らかになった頃は降雪期を過ぎており⁽⁴⁾、余震活動は収束していた。しかし、秋までこの緊急点検体制は解除されなかった。これは芸予地震など比較的大きな地震が相次いで発生していたためである。常に現地の降雨量や震度が気に懸かり気象情報に一喜一憂したが、春以降の出動はなかった。

⁽³⁾ この点検時には積雪があり、大型トラックの交通量が非常に多い区間であったため、出動の指示が出ると憂鬱になった。ただし、春までに出動した回数は 3 日であった。

⁽⁴⁾ 2001 年の年明けから地震の緊急時点検に追われていたため、急傾斜地点検業務の進捗は極めて遅れることとなったが、蒜山地質年代学研究所の総力によって無事に完了させることができたことを記しておく。



図 3. 2001 年兵庫県北部地震の余震によって生じた道路災害を報じる記事 (読売新聞, 2001 年 1 月 21 日)。

2-2. 2004 年兵庫県北部地震

2004 年 12 月の兵庫県北部地震は, 2001 年 1 月に発生した群発地震の活動域内で発生した。2004 年の夏から秋にかけて, 記録的な回数で発生し日本に接近・上陸する大型台風によって, 私の作業日程は振り回されていた。10 月 20 日には兵庫県豊岡市の洪水災禍に直面することとなった。この時の台風 23 号が残した爪痕は, 山腹斜面崩壊を主とした数多くの斜面土砂災害にもみられた。私は蒜山地質年代学研究所の草野氏らとともに, 人家に影響を与えた斜面崩壊現場をつぶさに見て歩き, 斜面調査報告書をまとめた。

そのような状況の中, 平成 16(2004)年 12 月 4 日の朝, 神戸新聞神戸版の朝刊第 1 面の記事 (田中・松本, 2004) が目に留まった。その記事の中で私の心を捉えた内容は以下のとおりである。

- (1) 12 月 2 日午後 1 時頃より, 兵庫県美方郡美方町と同郡温泉町の境界付近において微小地震が相次いで観測され, 3 日午後 6 時までに 192 回の地震の発生が観測された。
- (2) 平成 13(2001)年 1 月に震度 4 の地震が発生した際と震源位置がほぼ重なる。
- (3) 2001 年と今回の地震の震源地は, 昭和 18(1943)年に M7.2 の鳥取地震を引き起こした断層の東端にあたり, 昭和 24(1949)年にも M6.3 の地震 (浜坂地震: 中尾ほか, 2002) があつた。

2-3. 二つの群発地震から問題設定へ

2004 年の群発地震に際し, 私が日頃から心に抱いていた問題意識が研究課題として明瞭な形で認識される様になった。特に 2001 年の地震を踏まえた上で 2004 年の地震に着目した時, 以下の 5 つの問題点について調査が必要であると考へた。

- (1) 複合災害の危険性について: 2004 年 10 月 23 日に新潟県を襲った中越地震は, 台風 23 号の通過後に発生したため, 相乗効果で極めて甚大な災害となった。2004 年の兵庫県北部地震の発生でも, 複合災害とな

るのではないか?

- (2) 地震の相互関係について: マグニチュードは 1~3 クラスであるが, これらは大地震の予兆を示す前震なのではないか?あるいは余震や 2001 年時と同様の群発性地震で収束するものと判断して良いのか?
- (3) 群発地震の周期性について: 2004 年の地震は 2001 年兵庫県北部地震からの周期的活動なのか?
- (4) 他地域の地震との関連について: 1943 年の鳥取地震を引き起こした断層と関係があるというが, それはどの断層なのか?そして活断層なのか?
- (5) 火山性群発地震の可能性について: 震源域は比較的新しい火山岩の分布地帯である。火山性群発地震とは考えられないか?

問題 (1) については災害として発生してみないと分からないことであり, そのようなことが起こらないことを祈るだけである。日本の山腹は脆弱であり, 複合災害でなくても崩壊しやすいのだから, 常に予期しておかなくてはならないであろう。問題 (2) に関しては, 他の地震との相対的な比較が必要である。本小文執筆時には大地震は発生していないが引き続き経過を観察する必要がある。この様に問題 (1) と (2) は現象を記載することでしか解決できず, 本論では扱わない。これに対し問題 (3) ~ (5) は, 記録を調べることによって推察できる可能性がある。そこで次に述べる様にインターネットを駆使して 2004 年の年末までには, 幾つかの報道関係資料と気象庁やその他の地震観測研究機関が公表している地震プロフィールを入手し, 問題に対する考察を試みた⁽⁶⁾。

3. 情報を収集する

3-1. インターネット上で得られる地震データ

「兵庫県北部地震」でキーワード検索を行い, 文献資料・報道記事及び地震観測記録等が得られるサイトを逐次閲覧し, 他に関連するキーワードも駆使して情報を収集した。2001 年の地震は発生規模や被害がそれほど大きくなかったのにも関わらず, 様々な研究グループが主として地震動および地震発生回数に関する研究報告を行っていた。それらは, 例えば, 神戸大(木村・寛, 2003), 京大防災研 (中尾ほか, 2002), 東大地震研 (山科, 2001), 気象庁 (橋本ほか, 2001), 鳥取大 (西田, 2001) などである。

このことは, 以下の点で格好の研究材料と成り得るものと予想した。

- (1) 2000 年鳥取県西部地震との連動が指摘され, 山陰地方広域の地殻運動として考察できること。

⁽⁶⁾ 2001 年兵庫県北部地震 (群発地震) の活動域は, 東海地域あるいは同じ兵庫県内でも南東部地域に比べて, これまで地震活動が活発でなかったため, 世間に注目される機会は少なかった。この 2001 年の地震活動に限ると, 2000 年 10 月 6 日 13 時 30 分に発生した鳥取県西部地震 (M7.3) の余震活動が続く中で発生したため, 注目度が少しは高まったのであろうことは確かである。これに対し, 2004 年の兵庫県北部地震は, 規模において小さく, 台風 23 号災害や新潟県中越地方地震災害に比較されて, 世間の注目度は非常に低いものと成ったのは残念なことである。

- (2) 周辺地域に長大な構造線（活断層）がなく、活動範囲が局所的であるため、整理・分類が必要であったこと。
- (3) 1995 年兵庫県南部地震以降、観測所の増加や検出器の精度向上によって、微小な地震活動データも観測できるようになったこと。

地震観測データは、気象庁地震データベース[1]、京都大学防災研究所・地震予知研究センターの SATARN 地震観測速報[2]、防災科学技術研究所・広帯域地震観測網（F-net）[3]、東京大学地震研究所・地震地殻変動観測センター[4]を参照し、可能な限り引用した。数値データはマイクロソフト・エクセルで集約した。

なお、北緯 $35^{\circ} 20' \sim 35^{\circ} 35'$ 、東経 $134^{\circ} 20' \sim 135^{\circ} 37' 50''$ の範囲（小室ほか, 2002）の解析範囲において収集できた地震データの個数は、気象庁地震データベースの有感地震より 234 個（1926 年～2004 年）、東京大学・地震地殻変動観測センターの広島系地震情報より 1,767 個（1994 年～2004 年）、京都大学・地震予知研究センターではより 21 個（2001/1/12～2/23：中尾ほか, 2002）、防災科学技術研究所 F-net の地震のメカニズム情報検索より 52 個（2001/1/12～2/23）であった。

3-2. 観測データを比べてみる

2001 年兵庫県北部地震の本震・震源情報を表 1 に示す。各観測機関の地震データが集まってくると、同じ地震について微妙に情報が異なることがわかってきた。これは各機関の観測所の目的や設置された地震計の性能、及び特に震央位置についていえるのだが地震を感知した観測所の数（密度）によって発生したものと考えられる。次に各項目の単位について疑念が生じた。これまで収集してきた値が、同じ基準で使用されているのか不安となってきた。観測データの主な表示値について調べた結果を以下に記す。

時間は、UTC（Universal Time Coordinates 協定世界時：Greenwich 標準時に等しい）と、JST（Japan Standard Time 日本標準時：協定世界時より 9 時間進んでいる）とがある。当然のようだが、どのデータも JST で表示されているため混乱はしなかった。米国地質調査所[5]が発表するデータは UTC によって表記されている。

震央位置を示す緯度・経度座標の表記は、測地基準系が平成 14（2002）年 4 月 1 日に施行された改正測量法に基づいて、従来の日本測地系から世界測地系（測地成果 2000：国土地理院[6]）に変わっているため、どちらの測地系を用いた表記なのか確認する必要が生じた。表 1 では「*」を付したデータが世界測地系に基づき、他は日本測地系によるデータである。防災科学技術研究所では早くから世界測地系で表記されている他、現在では気象庁も世界測地系に基づくデータを公表しているが、その他の機関では日本測地系で示されていた。従って既存の地形図や地質図に投影する際には、日本測地系に換算すると便利である。

深度の単位は km であるが、いずれの機関も「どこから」の深さか明示されていない。ただし米国地質調査所 [5]では基準を Sea level としている。観測機関による違いは、

表 1. 2001 年兵庫県北部地震（本震）の震源情報比較。

観測情報源	震央位置		深度 (km)	マグニチュード (M)
	北緯 (°N)	東経 (°E)		
気象庁	35.4617 35.4650*	134.4917 134.4900*	11.00	5.6
京都大学防災研究所	35.4591	134.4894	8.263	5.4
東京大学地震研究所	35.4630	134.4897	1.50	5.7
防災科学技術研究所 (F-net)	35.4615*	134.4948*	10.40	5.4

注1) 震央位置について*を付したデータは世界測地系に基づく。その他の震央位置データは日本測地系に基づく。

注2) いずれのデータでも発生日および発生日時は2001年1月12日、8時00分としている。

解析に用いたモデル地盤に設定された弾性波速度層の構成の違いに起因したものと推察する。

地震が発するエネルギーの大きさ（規模とも表現される）を表すマグニチュード（提唱者の名に因み Richter scale とも云われる）は、観測された地震計の振幅値と震源との距離に従属する値であり、深度と同様に観測機関の個性が現れるようである。気象庁では 2003 年 9 月 25 日から計算方法を改訂し、溯って過去の地震データの見直しを行っている。これは、地震の揺れを 3 次元方向の変位量で表した振幅から算出されたマグニチュード (Mj) が、地震を起こした断層の運動モーメント（震源断層面積、平均変位量、及び剛性率の積）から換算されるマグニチュード (Mw) と、系統的にずれることが分かってきたためとされている。2001 年に兵庫県北部地震の直後に報告された本震のマグニチュードは 5.4 であったが、その後 5.6 に修正されている。

4. 設定した問題についての調査結果とまとめ

収集した情報を元に 2001 年および 2004 年の兵庫県北部地震（微小群発地震）で私が抱いた問題について以下にまとめた。

4-1. 群発地震の周期性

中尾ほか(2002)によると、美方地域では 1975 年以降に特異な地震活動が発生しているとしている。マグニチュード 3 以上の地震が 1977 年に発生し、それは 2001 年の活動域と同じであった。その後 1982 年に北東方の湯村温泉付近で、1990 年にはさらに北東方でそれぞれ発生し、湯村断層⁽⁴⁾に沿って移動している傾向が認められたとしている。さらに、1994 年 3～4 月に 1990 年活動域の北方で、同年 5 月に 1982 年活動域の北東方で、さらに同年 12 月に 1977 年活動域の東方でそれぞれ発生している。要するに地震活動域は、約 14 年かけて北東方へ移動し、わずか 1 年以内で折り返してきたことを示している。このことは、この地域の地殻にかかる応力が 1994 年頃に急激に変化し、地震活動のパターンの変化として顕れたものと推定された。こ

⁽⁴⁾ 湯村断層は旧温泉町鐘尾付近から旧浜坂町久斗山付近をとり旧香住町小原付近に至る南西-北東方向に伸びる右横ずれ断層で、微小地震がこの断層に沿って線状に発生しているが、活断層地形を示していない。従って日本の活断層地図（活断層研究会, 1991）においては活断層と認定されていない。

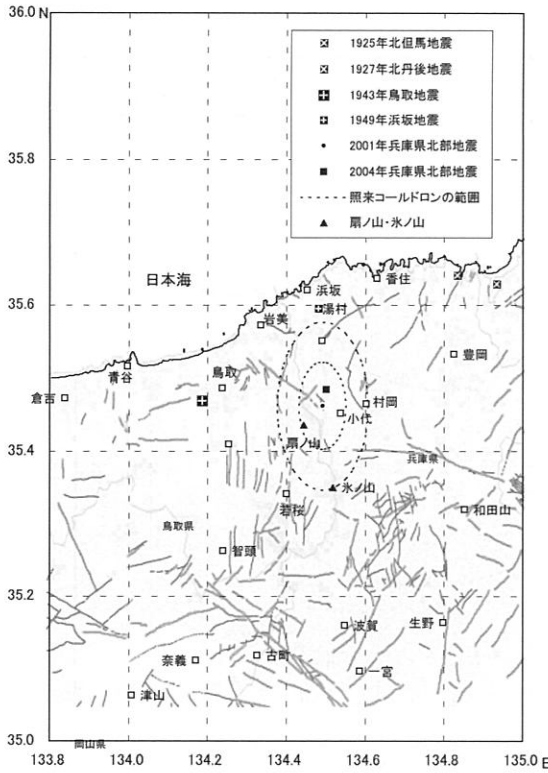


図 4. 主な地勢・被害地震本震の震央位置と断層の分布図. 中央付近破線楕円は照来コールドロンの範囲 (外輪と底面) のおおよその位置を示す. 断層の分布はシームレス地質図 (独立行政法人産業技術総合研究所/著作物管理番号: H17PR0-316) [7] および NPO 法人大気イオン地震予測研究会 e-PISCO ホームページの「活断層分布図」[8]から引用した.

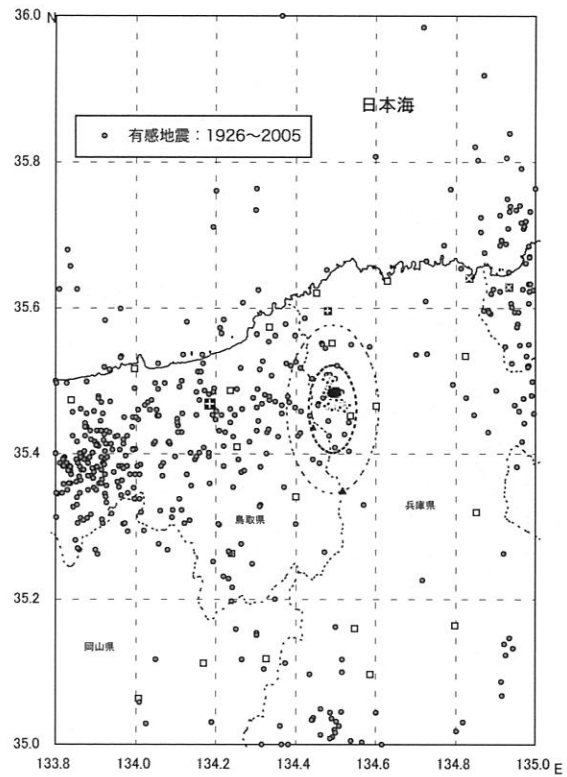


図 5. 1926 年以降の有感地震の震央分布図 (気象庁データを使用). 2001 年及び 2004 年の兵庫県北部の群発地震の震央は照来コールドロンの北部底面に集中している. 1926 年から 2005 年までの有感地震を灰色に塗りつぶした円で示した. その他のプロットについては図 4 の凡例の通り. 太い破線で示したプロットのほとんどは図 8 に示した太い破線で囲まれたプロットである.

の地域に「活動帯の中や活動帯に隣接する非活動域の空白域→(先駆的地震活動)→本震(群発地震)発生」のパターンがあると指摘されていた. 2001 年の地震活動はそれに合致しているというのである. 地殻にかかる応力の変化がパターンに則った地震発生原因であるとされるが, 地殻応力の変化の原因は何か, 周期性パターンの一環なのか, といったことには言及していない.

4-2. 他地域の地震との関連

新聞記事 (田中・松本, 2004) において関係が指摘された 1943 年鳥取地震と 1949 年浜坂地震は 2001・2004 年の群発地震と, どのような関係なのだろうか? 鳥取県地震と浜坂地震は, それぞれマグニチュードが 7.2 及び 6.3 と比較的大きく, いずれも広域な群発地震を伴うことが共通した特徴である. これらの地震と 2001・2004 年の群発地震に共通点があるならば, 鳥取や浜坂の様に比較的大きなマグニチュードを持つ地震が発生する可能性も考えられる.

これらの地震の発生状況を検討するために気象庁の有感地震データを用いて, 震央分布図と地震履歴図を作成した. 図 4 および図 5 には主な地勢・被害地震本震の震央位置と断層の分布および 1926 年以降の有感地震の震央分布 (気象庁データ[1]を使用) を示した. また 1943 年鳥取地震お

よび 1949 年浜坂地震の余震 (群発地震) の分布を図 6 および図 7 にそれぞれ示した. 鳥取地震・浜坂地震の余震も含めてどこかの断層に沿って線状に並んでいるものと期待したがこれらの震央分布図を概観すると, そうではないようである. 1995 年兵庫県南部地震では有馬-高槻構造線や六甲-淡路断層系に沿って余震活動の震央が並んだ図をよく目にするのだが, 鳥取地震や浜坂地震の場合ではそうならなかった. ただし, 鳥取地震の余震 (図 6) の一部が北西-南東系の雨滝-釜戸断層の南側に, また鳥取地震および浜坂地震 (図 7) の余震の一部が北東-南西系の扇ノ山北東断層に沿って, それぞれ発生しているように見える.

西田 (2001) は, 鳥取地震において西南西-東北東系の吉岡断層・鹿野断層が地上に現れ, 余震も含めた震源断層が約 32km の長さで海岸線にほぼ平行な右横ずれ断層型が推定されていることと, 2001 年兵庫県北部地震の本震となる震源断層が雨滝-釜戸断層に平行なものであれば右横ずれ断層となることを関係付け, 鳥取県中部~西部で発生した他の地震が, 北北西-南南東系~北西-南東系の左横ずれ断層型によって起こったことと, はっきり区別できることを強調している. 新聞記事にある過去の地震との関連性は, このことを受けての記述と考えられる.

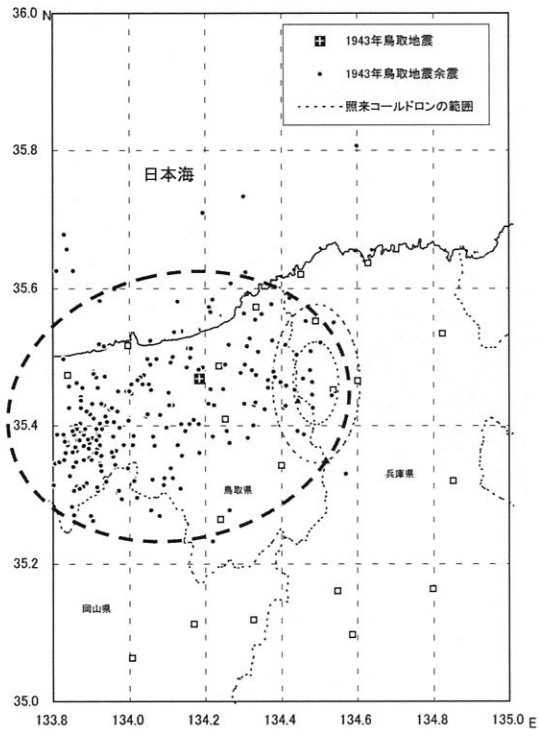


図 6. 1943 年鳥取地震の余震（群発地震）発生域の分布状況。太い破線で示したプロットは図 8 に示した太い破線と対応している。

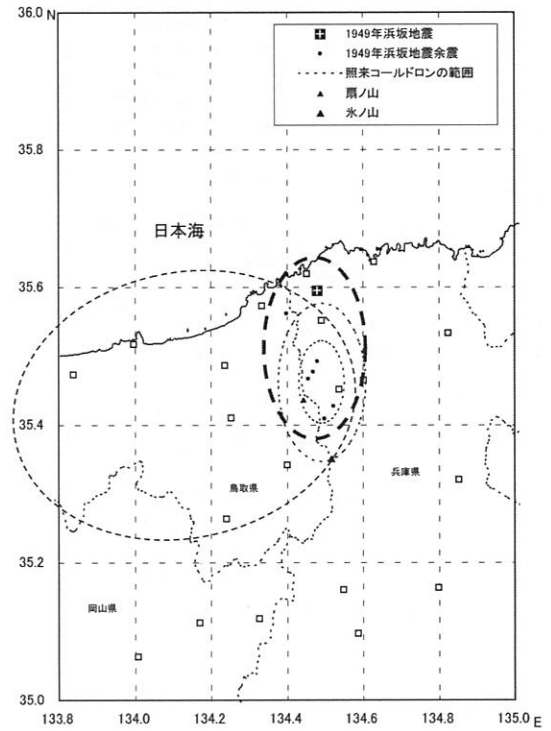


図 7. 1949 年浜坂地震の余震（群発地震）発生域の分布状況。太い破線で示したプロットは図 8 に示した太い破線と対応している。鳥取県側の広い波線域は図 6 に示した 1943 年鳥取地震の余震発生域に当たる。

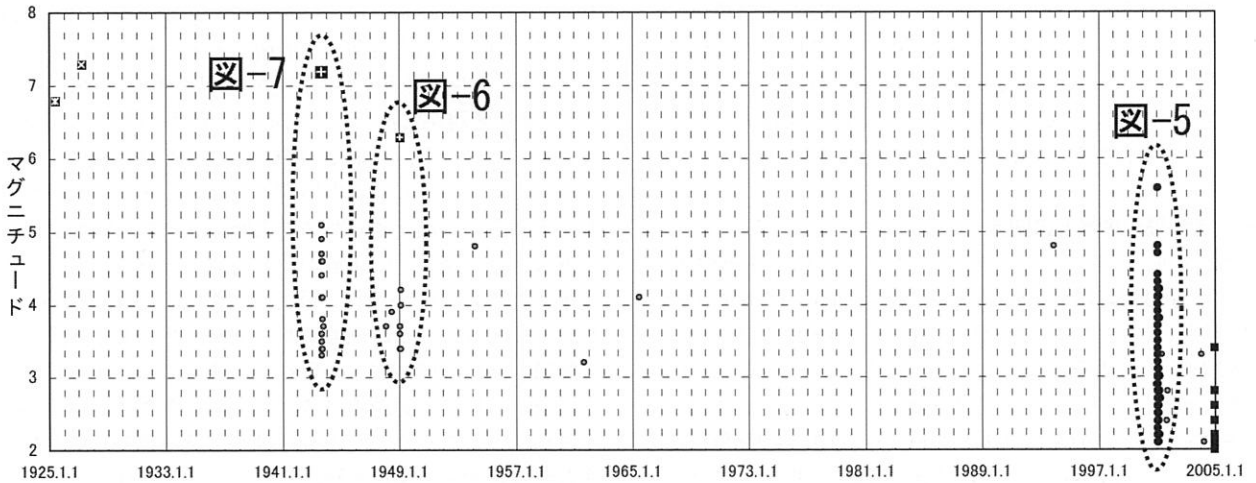


図 8. 照来コールドロン内部で発生した地震の回数と規模をプロットした地震履歴図。1950～2000 年間は群発地震が無いことがわかる。また、1965～1993 年間は有感地震が検知されていない。

図8の地震履歴図によると、兵庫県北西部～鳥取県東部における群発地震の発生は、1943年以降では4回(1943年、1949年、2001年、2004年)である。それらの余震分布域を比較すると、先発の2回はいずれも後発の2回の発生範囲を包括し、余震の発生範囲が広いものから次第に活動の範囲を収縮した感がある。また、1949年から2001年の約52年間には、1954年、1965年及び1993年に単発的に地震が発生しているものの、体感じられた群発地震の空白期間とできる。これを、この地域における一連の地殻活動と捉えるのか、応力方向の転換期を迎えたものと判断すべきかの判断は、今後の課題である。

4-3. 火山性群発地震の可能性

2004年末に本記念誌の企画を聞いた時、この微小群発地震の事例を紹介することに決めたが、まとめ始めてすぐに無謀さを実感した。特にこの火山性群発地震の可能性に関する調査は困難であった。

そこでまず次の2つの研究成果を参考にすることとした。近年受け入れられつつある火山性陥没構造を指摘した小室ほか(2002)と発震機構解を用いた応力場を議論している木村・寛(2003)である。この2つの研究を踏まえ、2001年と2004年の群発地震が火山性であるとの視点から収集したデータをまとめる。

4-3-1. 火山性陥没構造の認定(小室ほか, 2002)

小室ほか(2002)は重力観測によってブーゲー異常図(本小文中では重力異常解析図とした)を作成し、多角形平底鍋状のピストンシリンダー型陥没カルデラからなる照来層群の堆積盆「照来コールドロン」を提唱した。Gravity Research Group in Southwest Japan(1994)の報告によって照来層群分布域に顕著な低重力異常が認められたため、火山性陥没構造(カルデラ)の存在が認知されてきた。現在ではカルデラ地形が侵食によって消失されているため「照来コールドロン」と呼ぶこととしている。火砕流堆積物(歌長流紋岩類下部凝灰岩層)が基盤岩に高角度の不整合面でもアバットしていることから、火砕流の噴火が起こる前に急崖で囲まれ閉じた盆地が形成されていたとされる。なお、上位層準地層が火砕流堆積物に部分的にアバットする場合は確認されており、コールドロン内部が幾つかの小ブロックに分かれて差別的陥没活動があった可能性がある。この差別的陥没活動は重力異常分布の底部凹凸からも示唆される。湯谷礫岩層より上位の地層は、擾乱されず水平にコールドロン内に堆積していることから、陥没活動は礫岩堆積時期にはほぼ終息したものとされている。規模は約14km×17kmで、質量欠損は $\Delta M=3.2 \times 10^{13} \text{kg}$ と計算されている。

同地域について「美方コールドロン」の呼称を提唱する平松ほか(2001)及び平松ほか(2002)もあり、前者と同様に重力観測の結果から提示している。笠谷ほか(2002)は、広帯域MT(Magnet:磁場・Telluric:電場)計測により作成した地殻比抵抗分布の最適モデル図に示された深度2kmまでの浅部低比抵抗部が、平松ほか(2002)が推定した照来層群の堆積基盤深度と調和的であるとしている。

また、深度15kmまでの上部地殻に対比される高比抵抗部と、それに接する低比抵抗部との境界に震源が分布することを指摘している。

4-3-2. 発震機構解による応力場の解明(木村・寛, 2003)

木村・寛(2003)は発震機構解から得られる断層面の運動を解析した。活動した断層面は、2001年の本震において東西方向の走向でほぼ垂直なものとし、群発する余震活動は本震による応力変化を受け、北西-南東方向に伸びるクラスタ状に発生したものと指摘している。

発震機構解(メカニズム解)は、検知された震動初動の押し・引きを、震源を中心とした仮想球体(震源球)の下半球面に観測点位置で投影し、直交する2つの節面の走向・傾斜を解として求め、応力状態によって塗り分けた図で表現される。西田(2001)は発震機構解より本震がほぼ南北方向の主圧力(橋本ほか, 2001では前年12月からの活動が、北西-南東方向に圧縮軸を持つ横ずれ断層型と記している)を示すのに対し、1月20日からの余震は北側に移り東西方向からやや時計回りに回転した方向の主圧力(橋本ほか, 2001では東西方向に主圧力軸を持つ横ずれ断層型)を示していることを問題視している。気象庁でまとめた1951年以降の中国地方東部の主圧力軸方向は、主として東西方向であり、2001年兵庫県北部地震の本震の圧力軸方向が特異であるとし、周辺断層の走向と横ずれ断層の運動方向の違いによって、解釈を試みている。

笠谷ほか(2002)は、長野県西部地震で確認された低比抵抗部から高比抵抗部へ流体が移動して地震が発生する現象を引用し、兵庫県北部でも同じ現象であろうと展望している。ただし、既知の(活)断層が震源域と場所も走向も異なり、比抵抗構造との関係も不明であるとしている。照来コールドロンとされる地域の高比抵抗部内に、地表に現れない断層群があり、それは発震機構解に示される断層情報に反映されているものと考えられる。

4-3-3. 照来コールドロン地下構造私案

上記の2つの研究から見えない場所の断層分布と走向を解析できれば、照来コールドロンの内部構造や移動する流体の分布を推定できる手懸かりが得られるものと考えた。そのため、既往の断層と震源分布を対比し、発震機構解による断層からみた地質構造の提示を試みる。

地表断層との関連が希薄であるのにも関わらず、鳥取地震や浜坂地震の本震が発生した際には、扇ノ山周辺の地下でも呼応して群発地震が発生しているのは、笠谷ほか(2002)が指摘したように流体の移動が活発に生じていることを予感させる。流体は取りも直さずマグマか地下水を連想させる。扇ノ山火山群は第四紀更新世中期の玄武岩質～安山岩質火山岩類からなるが、周辺には新第三紀中新世の北但層群八鹿累層を成す椿色火山岩層に始まり同鮮新世の照来層群小代累層を成す寺田安山岩層などの玄武岩～安山岩も分布する。これらの連続性は不明であるが連綿と受け継がれる火山活動が存在する可能性を示唆する。これまで照来コールドロンが地表地質の情報から提唱されなかったのは、陥没地を被覆する堆積物(照来層群)や火山岩類の分布が広範であるためと考えられる。地震の発生域とな

る地質構造の異常性が認められたことにより、照来コールドロンが見いだされたのだろう。

2001年及び2004年の兵庫県北部地震の震央は小室ほか(2002)の重力異常解析図によれば照来コールドロンのほぼ中央部に分布している。私はこの震央付近で既知の活断層とは系統の異なる断裂群、すなわちコールドロンの陥没構造を規制するような断層が発見できる可能性があると考えた。そこで照来コールドロン周辺でこれまでに発表されている発震機構解の一つである断層解の分析を行った(図9)。ここで用いた発震機構解は防災科学技術研究所 F-net [3] による地震のメカニズム(CMT: Centroid Moment Tensor)解である。断層解は走向、傾斜、すべり角のデータからなるが、このうちの走向データを地表面に投影し、図9に示すように照来コールドロンの重力異常解析図および同地域の地質図(小室ほか, 2002)と重ね合わせた。

これによると、雨滝一釜戸断層(西北西-東南東系)の東方延伸部としてほぼ東西系と北西-南東系の断層が、照来コールドロンのほぼ中心部で浮き上がってきた。他に扇

ノ山北東断層に平行な断層(北東-南西系)も認められるが、定方向への延伸性に乏しいようである。図5はコールドロン内部に多数の断層が存在しうる可能性を示せたものと判断できる。木村・箕(2003)は、2001年の本震が東西系の断層面で発生し、その後本震が引き起こした応力変化によって余震活動が北西-南東系の断層面で発生したものと指摘した。しかし、この地域では北東-南西系の断層活動が主体であるため、本震の運動こそが応力を伴う何らかの活動によって生じたものとすべきである。

ところで、扇ノ山北東断層を含めて三角形に囲まれる領域がコールドロンの中央部から北部にかけて見えてきた。コールドロンの鍋底部分に認められる重力異常量の凹凸状況は、このことも影響しているものと考えられる。ただし、直ぐに火山活動と結び付けられる結果ではない。だが、氷ノ山火山群(コールドロン南部)や扇ノ山火山群(コールドロン西部)のように新第三紀鮮新世後期以降に噴出した火山岩が分布しない箇所であることから、今後も目を離せない地域であるといえる。

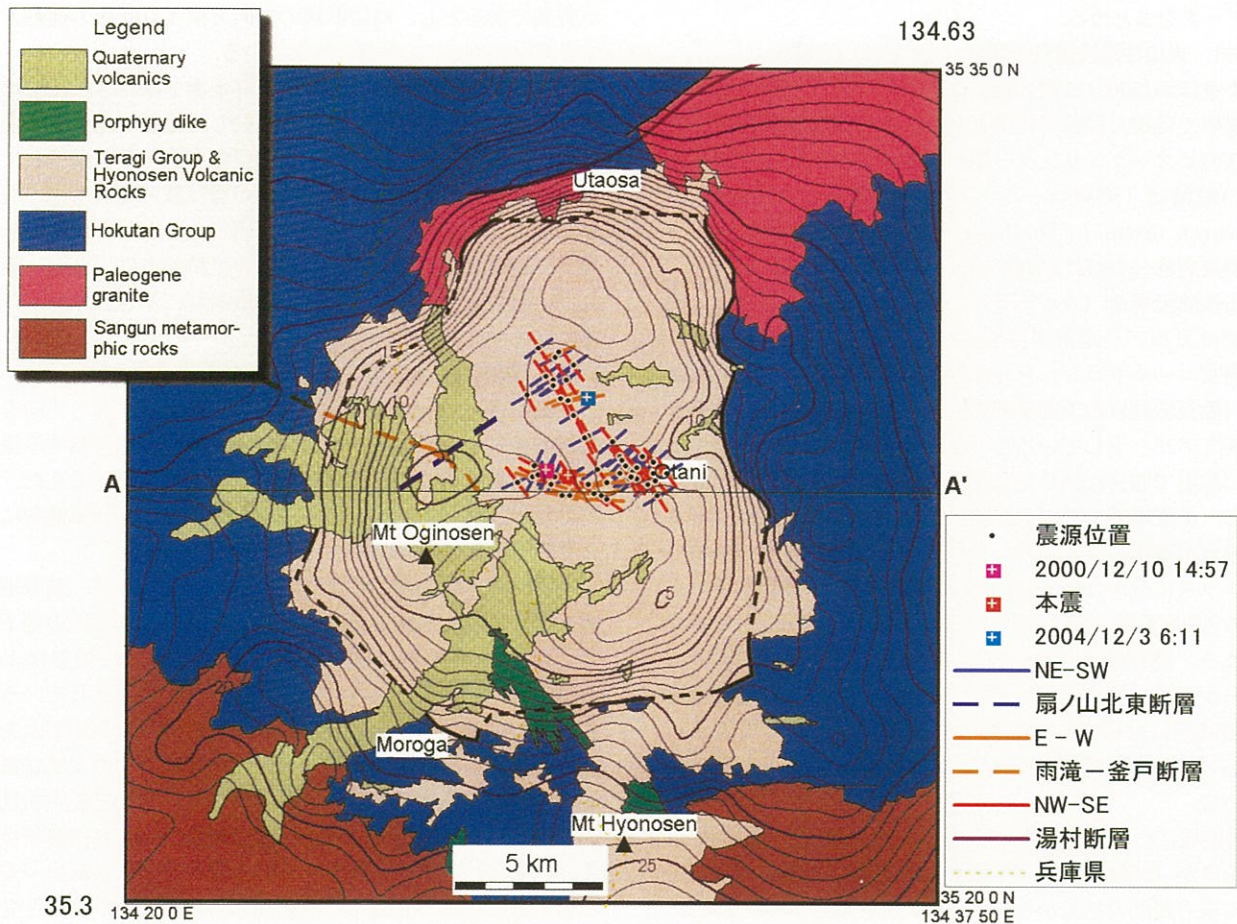


図9. 照来コールドロン周辺における断層解(走向データ)の投影図。断層解と他の地質学的地球物理学的データを比較するため、ここでは断層解を同地域の重力異常解析図および地質図上にプロットした。断層解データは防災科学技術研究所 F-net [3] による地震のメカニズム(CMT: Centroid Moment Tensor)解である。また重力異常解析図および地質図は小室ほか(2002)を引用した。

5. あとがき

本論は良く知る地域に起こった2回の群発地震に端を發し, これまで地質技術者として抱えてきた課題に対してインターネットを駆使して研究するという試みの顛末記である. 執筆の全過程でインターネットに依存し, 機械教師の限界と戦った. 検索方法(質問)が身勝手な上, サイト運営側(情報提供)にも独自のポリシーがあって, 対話が成立していないからである. しかし, 書籍や論文よりも噛み砕いた表現が用いられたものもあり, 情報の読み方・捉え方の幅が広がった感もある. かえって妄想にかき立てられ易い状況にあるが, しっかりとブレーキをかければ, 現代の補助的な学習方法として成り立つことを, 身をもって体験できた. 作図作業はそれなりに楽しみ, カラフルな地質図との対比は眺めて楽しいものである. 好奇心が少しでも満たされると, 目的を忘れてしまいそうになった.

扇ノ山と周辺の断層については, 今後も現地を詳細に踏査し, 火山岩の化学的性質にも着目し, 有識者からの意見を聴き知見を深めていく予定である. 火山活動・地震活動については, 今後も見守ってゆくこととしたい.

謝 辞

郷津知太郎氏には本文と図表を校閲していただき, 改善意見をいただいた. ここに記して感謝いたします.

文 献

- Gravity Research Group in Southwest Japan (1994) A Bouguer gravity anomaly map in central Japan. Reports, Geological Survey of Japan, no. 280, 29-36.
- 橋本徹夫・青木重樹・上野 寛・竹中潤・中村浩二・西出則武・浜田信生・吉川一光 (2001) 平成 12 年(2000 年)鳥取県西部地震と兵庫県北部地震. 地球惑星科学関連学会合同大会予稿集, So-009(要旨).
- 平松良浩・本多 亮・河野芳輝 (2001) 「兵庫県北部地震」は中新世のカルデラ内で発生した!? 地球惑星科学関連学会 2001 年合同大会, So-011(要旨).
- 平松良浩・本多 亮・河野芳輝 (2002) 中新世カルデラ”美方コールドロン”で発生した兵庫県北部地震と中国地方の重力異常. 月刊

- 地球号外 38 西日本の地震活動, 102-108.
- 笠谷貴史・大志万直人・塩崎一郎・中尾節郎・矢部 征・近藤和男・藤田安良・宇都智史・吉田賢一 (2002) 兵庫県北部域での地殻比抵抗構造. 京都大学防災研究所年報, 45B, 571-576.
- 活断層研究会(1991): 新編・日本の活断層: 分布図と資料. 東京大学出版会, 437p.
- 木村武志・笈 楽磨 (2003) 2001 年兵庫県北部地震の震源過程, およびそれに伴う群発地震活動と ΔCFF の関連. 地球惑星科学関連学会合同大会予稿集, S052-P002, ポスターセッション演旨).
- 小室裕明・古山勝彦・志知龍一・羽木伸幸・山本明彦 (2002) 照来コールドロンの重力異常. 火山, 47, 9-15.
- 中尾節郎・片尾 浩・渋谷拓郎・渡辺邦彦 (2002) 兵庫県北部の地震 (2001 年 1 月 12 日, $M_j=5.4$) と一連の地震活動について. 京都大学防災研究所年報, 45B, 561-569.
- 西田良平 (2001) 兵庫県北部地震と周辺の地震活動. 地球惑星科学関連学会合同大会予稿集, So-010(要旨).
- 田中明子 (2004) 日本周辺の地温勾配・地殻熱流量データ. AIST Today, 4, 33.
- 田中陽一・松本茂洋 (2004) 美方郡, 微小地震 2 日で 200 回. 神戸新聞第 38421 号 15 版 B, 1 面, 神戸新聞社.
- 山科健一郎 (2001) 2001 年兵庫県北部地震の活動予測の試み. 地球惑星科学関連学会合同大会予稿集, St-001(要旨).

データベース

- [1] 気象庁ホームページ. 報道発表資料より閲覧できる. <http://www.jma.go.jp/jma/menu/houdou.html> (なお地震データは震度データベース検索より抜粋した. http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/shindo_db/shindo_index.html)
- [2] 京都大学防災研究所付属地震予知研究センターホームページ (日本語版) <http://www.rcep.dpri.kyoto-u.ac.jp/main/HomeJ.html>
- [3] 防災科学技術研究所・広帯域地震観測網 (F-net) ホームページ (日本語版) <http://www.fnet.bosai.go.jp/freesia/index-j.html>
- [4] 東京大学地震研究所・地震地殻変動観測センターホームページ (日本語版) <http://eoc.eri.u-tokyo.ac.jp/harvest/>
- [5] U. S. Geological Survey の Earthquake Hazards Program のホームページ. <http://earthquake.usgs.gov/>
- [6] 国土地理院ホームページ. 世界測地系に基づく測地基準成果 (測地成果 2000). <http://www.gsi.go.jp/LAW/G2000/g2000-h6-htm>
- [7] 産業技術総合研究所・研究情報公開データベース (RIO-DB). 20 万分の 1 日本シームレス地質図データベース. <http://www.aist.go.jp/RIODB/db084/>
- [8] NPO 法人大気イオン地震予測研究会 e-PISCO ホームページ内の「活断層分布図」. <http://www.e-pisco.jp/quake/fault/land/land.html>

