

松代群発地震の生成機構—自然発生的大規模水圧破碎

笹井洋一

東京大学・地震研究所

1 はじめに

1965年8月3日に、長野県北東部の松代町(1966年に長野市に合併)で、小さな地震が3つ発生した。ターンという少し高い音を伴うことの多い有感地震が、日を追って増え、1967年まで続く世界でも有数の、大規模な群発地震活動に発達して行った。この地震活動を監視し、活動予測を行うため、様々な地球物理的、地球化学的、地質学的な調査と観測がなされた。微小地震の群列観測、地殻歪の連続観測、精密水準測量のくり返し、光波測距儀の導入、地割れの連続測定、精密重力測定、プロトンやフラックス・ゲート磁力計の連続観測、くり返しの磁気測量、地下水・温泉水の地球化学的測定など、今日の地震予知計画に動員されているあらゆる観測手法が、初めて、同一の地殻活動に対して投入された。日本においては、実用化を目指す地震予知計画の出発点でもあった。

松代群発地震の全体像については、大竹 [1] による的確な解説があり、詳細な文献リストも示されている。松代地震を考える際に、大竹論文は必読文献と言える。次節に紹介するように、松代地震は大規模な地殻変動と、その最終段階では大量の湧水をともなった。ここでは、これらの諸現象の総体を、「松代群発地震」と呼ぶことにする。本稿はこの地殻活動を統一的に説明するモデルを提案する。

まず、これまでの松代地震の原因をめぐる諸説を簡単にふりかえる。次に、力学的な観測事実を説明するキネマティック・モデルを考える。全ての観測事実を完全に説明するには、観測点近傍での局所的な不均質性を考慮しなくてはならない。しかしここでは個別のデータに合わせた、その場しのぎの説明を避ける。そして均質で等方な半無限

弾性体に、簡単な力源を分布させる、というモデルで、松代で観測された様々な地球物理的データが、定性的には勿論のこと、ほぼ定量的にも説明出来ることを示す。その力源の物理的な実体を説明するものとして、恒石・高橋 [2] による「炭酸ガス・水噴火」説を受け入れる。

松代群発地震の最大の特徴は、地震の総和マグニチュードに比べて、地殻変動が異様に大きいことである。これをまかなったエネルギーが、どこからどのように供給されたのか、という疑問に対して、従来はあいまいな「広域地殻歪」説しか提案されていなかった。ここでは、地下深部の水が受けていた浮力(負の重力エネルギー)を考慮することによって、エネルギー供給が合理的に説明されることを示す。

最後に残された問題は、松代群発地震を引き起こした大量の水と炭酸ガスは、どこから来たかという疑問である。電磁気的手法による地殻構造探査によって、これに明快な回答が得られる。

2 観測データ

第1図に松代付近の地図と主な観測点の分布を示す。ハッチで示したのは、潜伏断層(松代断層)の推定位置である。主な観測事実を列挙する(一次資料の引用を省略。大竹 [1] を参照されたい)。

1. 群発地震は3つの主要な活動期を持ち、松代町の皆神山の直下を中心に10 kmより浅い球状領域から、北東-南西方向へ拡大した。第3活動期の後、松代断層付近は地震の空白域となった。
2. 地震の発震機構は、東西圧縮、南北伸長の四象限型で、総和マグニチュードは6.3と見積

られた。

3. 震源域の中心、皆神山の北麓に、多数の雁行割れ目が現れ、地下に潜在断層(松代断層)を生じた。
4. 第3の活動期に、皆神山北東部を中心に大量の湧水があり、その結果、大規模な地滑りも発生した。湧水の総量は1000万トンと見積られる。
5. 第3活動期に大規模な地殻変動が進行した。最大隆起量70cm以上、最大水平変位は1m以上。これにともなう顕著な地殻歪(特に傾斜変化)が観測された。
6. 地殻隆起に伴い、重力と地磁気の顕著な変化が観測された。
7. 湧水は多量の炭酸ガスを気泡として含み、NaCl, CaCl₂を溶かし込んだ、特異な水であった。

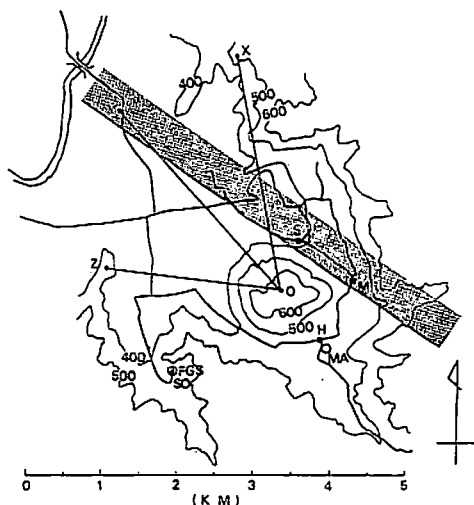


図1: 松代付近の地図と主な観測点分布。中央部の等高線の高まりが皆神山。ハッチは松代断層に対応する地割れ帯で、塩分濃度の大きな湧水地域。太い線が水準路線、皆神山からの3直線は光波測量の測線。S, M, HとFGSは重力点。MAにプロトン、SOにプロトンとフラックス・ゲート磁力計。

3 松代地震の原因をめぐる論争

松代群発地震の原因を論じた論文のうち、重要なものを簡単に振り返ってみよう。KASAHARA [3]は、地殻変動のうちでも、水平変位を松代断層の動きで説明し、かつ隆起に要する重力エネルギーは地震エネルギーより一桁大きいことを、最初に指摘した。中村 [4]は、松代の地殻隆起の推移が、火山噴火のそれと酷似していることを指摘し、火山噴火におけるマグマの代わりに、水が噴出したのが松代地震であるとする、いわゆる「水噴火」説を唱えた。HAGIWARA [5]は松代の水準データに茂木モデルを適用して、圧力中心の深さを求めた。中村の考えに触発されて、NUR [6]とKISSLINGER [7]は松代地震こそ、ダイラタンシー・水拡散が現実にこの地殻で起こっていることを示す現象だ、と主張した。一方、ダイラタンシー論者が頼りにした重力データの信頼性は低いとして、STUART and JOHNSTON [8]は地磁気データに基づいて、マグマ貫入説を展開した。

大竹 [1]はこれら諸説を要約し、問題点を整理している。彼はマグマ貫入説とダイラタンシー・水拡散説が、松代地震における諸々の観測事実を最終的には説明できないことを論証した上で、中村 [4]の水噴火説を再評価した。しかし「水噴火」とは、一体どういうものだろうか？火山では通常、「マグマ溜り」と「火道」があるとされ、「火口」から溶岩や火山灰が噴出する。松代の地下に、これらに対応する構造があるのだろうか？松代における湧水現象は、火山で言えば、割れ目噴火のイメージに近いが、線状に配列した火口とは異なり、広範囲で面的に水が流れだしたのであった。ダイラタンシー・水拡散説と水噴火説との決定的な違いは、前者が圧縮応力下での空隙発生域に周囲から水が流れ込む(隆起域の周囲の水圧が高い)とするのに対し、後者は高圧の水が地盤隆起を起こす(隆起域の水圧が非常に高い)と考えることにある [1]。浅部地殻の圧力条件で、水の圧縮率はごく小さいから、なぜ水の圧力が高まったのか、説明が必要である。つまり、「水噴火」の仕組みが求められている。

恒石・高橋 [2]は、松代の地下から湧出した水は、NaCl, CaCl₂などのイオンと炭酸ガスを多量に含んでいたことに注目し、炭酸ガスが遊離した

ことによる体積膨張が、水の圧力を高めた原因である、とした。この説は NaCl 水溶液中の炭酸ガス溶解度が、圧力・温度の上昇と共に増加する、という実験結果を根拠にしている。これが「炭酸ガス・水噴火」説である。この考えは火山噴火のメカニズムと共通性を持つ。マグマは地下数 km 位までは、岩石との密度差による浮力で、地殻中を上昇できる。そこから地表へ噴出するには、マグマ中で揮発性物質（主として水蒸気）が発泡して、体積膨張を起こすことが必要である。マグマの場合の水蒸気の役割を、松代の地下水では炭酸ガスが担った、というのが、「炭酸ガス・水噴火」説である。

一方、「水噴火」の実体を定量的にモデル化する重要な一歩は、萩原 [9] によってなされた。彼は半無限弾性体の中に微小な球を多数ガウス分布させる、という複合茂木モデルを考えた。大竹 [10] は松代一等重力点における重力測定データを、改訂された水準データに基づいて、再検討した。彼は松代地震の全期間を通じて、重力変化勾配（重力変化と隆起量の比）はほぼ一定で、 $-2.8 \mu\text{gal}/\text{cm}$ であったことを見いだした。この重力変化勾配は、複合茂木モデルで、小球が水で満たされている場合と、見事に一致する。小球というのは非現実的なようだが、複合茂木モデルの力学場は、無数の微小な開口クラックが万偏なく、あらゆる方向を向いている場合と等価である [11]。つまり水が岩石の隙間に入り込んで、空隙を押しひろげた結果、松代の地殻隆起が生じたのである。松代地震原因論における、決定的なブレイク・スルーであった。

WAKITA *et al.* [12] は松代地震の 10 年後に、松代で湧水のあった地域で、地中ガスを採取し、 He^3 と He^4 の同位体比が上部マントルのそれに近いことを見いだした。彼らはこのことから、小規模な（直径 1 km 以下）ダイアビルが上昇し、冷却して大量の水を放出したのではないかと論じた。水の起源についての新説である。これについては第 8 節で議論する。

4 萩原モデルの問題点

萩原 [9] の複合茂木モデルについて、簡単に説明する。これは半無限弾性体中に多数の微小な球

がガウス分布しており、内部から静水圧を受けて地殻隆起をもたらす、というものである。線形弾性体の変位と応力は重ね合わせが効くので、複合茂木モデルの力学場は一個の小球の作る変位や応力をグリーン関数として、ガウス分布の重みをつけて積分して求められる。茂木モデルの重力変化は、地表のいたるところでその点の隆起量に比例し、かつその比例定数（即ち重力変化勾配）が場所によらず一定、という性質を持つ [13]。従って複合茂木モデルの重力変化勾配も、地表の観測点の位置によらず一定で、単一茂木モデルのそれと等しい。

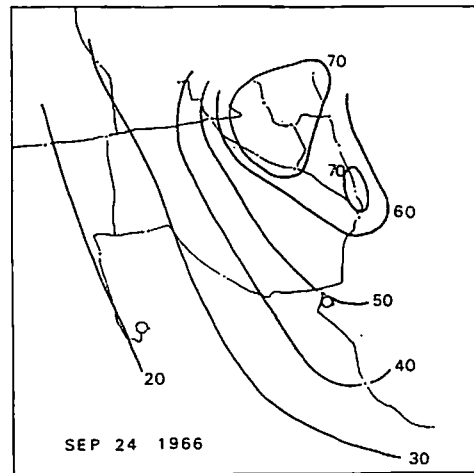


図 2: 最大隆起の時期 (1966 年 9 月) における隆起のコンター図 [14]。皆神山の西南西 8.5 km の水準点 (更埴市) を不動と仮定。

複合茂木モデルは、松代一等重力点 (第 1 図参照) の重力変化勾配をうまく説明する。ところがこのモデルは、松代で起こった地盤隆起の全体のパターンを再現できないのである。第 2 図は最大隆起の時期 (1966 年 9 月) における、隆起の等高線を示す。従来、松代の地殻変動については、ドーム状隆起が強調されていた [4]。しかしこの図によれば、隆起のコンターはほぼ南北に伸びた楕円形で、松代断層をはさんで 2 つのピークが存在する。この解釈として、2 つのピークの下に別々の小球分布の中心を置くことが、考えられる。ところが、これには次のような困難がある。

第 3 図は、同じく最大隆起の時期における三角点の水平変位である。但し基準値は 1904 年の三等

三角測量であり、測定精度が異なる上に、三角点の改埋等の影響も含むデータである。KASAHARA [3]はこのデータをもとにして、松代断層の左横ずれ変位を2mと見積った。しかし断層から離れた地域に、西北西-東南東の左横ずれ運動では説明しきれない、きわめて大きな南北方向の水平変動が残る。茂木モデルや複合茂木モデルでは、最大隆起の30%くらいしか、水平変位を生じない[11]。複数の複合茂木モデルを組み合わせても、大きな水平変動を説明できないという困難を、解消できないのである。

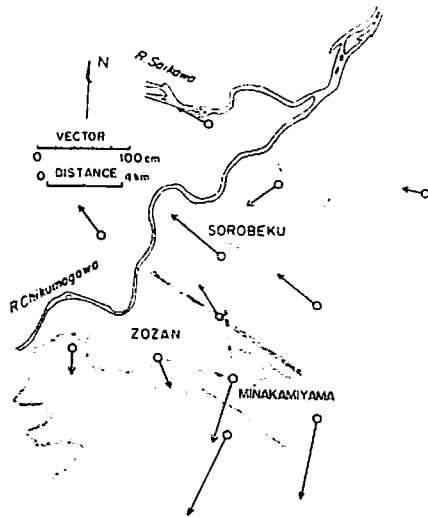


図3: 松代地域の三角点の水平変位 [15]. 1904年(一部は1952年)の設置以後, 1966年10月に再測が行われた。

5 高圧の水の役割—開口割れ目の生成と破壊強度の低下

既に述べたように、複合茂木モデルは、様々な方向を向いたクラックが内部から静水圧を受けて開口する場合と、力学的に等価である。地殻が等方的な応力状態に置かれていれば、あらゆる方向に一樣に引っ張り割れ目が出る。日本列島のように、サブダクションに伴う強い差応力を受けている地殻では、どうであろうか? 流体が岩石の隙間に浸透し、圧力が高まって膨張する時、中間主

応力(σ_2)軸を含む面内で、最大主応力(σ_1)軸に平行なクラックが、最小主応力(σ_3)軸方向に開くことが知られている[16]。これは岩脈形成の理論に適用され、側火山列から地殻の主応力方向を推定する方法[17]の根拠となっている。松代地域を含む日本列島中央部は、 σ_1 がほぼ東西、 σ_2 が鉛直、 σ_3 がほぼ南北という応力状態にある、とされる。このような地殻内に高圧の水が浸透すれば、ほぼ東西走向で垂直なクラックが、南北方向に開口するであろう。

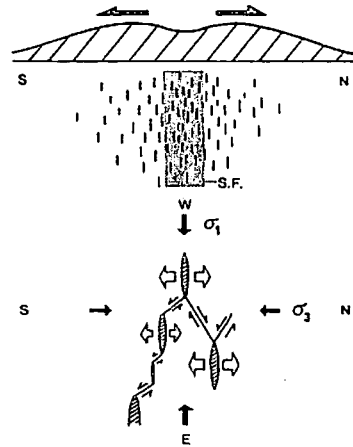


図4: 松代の地下に生じたと推定される開口クラック群の模式図。クラックの走向に垂直な断面図(上図)と、上部から眺めたクラック走向と主応力方向との関係(下図)。

第4図はこのようなテンション・クラックが多数発生した場合を、模式的に示したものである。垂直なクラックの開口によって、地表は開口方向に引っ張られて、大きな水平変位を生ずる。クラックが集中している場合は、水平方向の圧縮の結果、分布中心の両側に盛り上がりを作ることもある。松代の湧水は隆起の2つのピークの間で、最も活発であり、大規模な地滑りもその地域に発生した。この事実は水を含んだクラック分布の中心が、どこにあったかを示している。

高圧の水(炭酸ガス・水)は、もうひとつ重要な役割を果たした。それは群発地震を発生させた原因であった。岩石が圧縮応力下でせん断破壊を起こす条件は、Coulomb - Navierの破壊基準とし

よく知られている [16]。岩石の破壊実験によれば、破壊の平面は中間主応力の軸を通過して、その平面の法線は最大主応力とある角度をなす。その角度を $\pi/2 - \theta$ と置くと、破壊面に働く最大せん断応力 τ と法線応力 σ (圧縮を正にとる) の間には、通常次の関係が成り立つ：

$$|\tau| = S_0 + \mu\sigma \quad (1)$$

ここで

$$\tan 2\theta = 1/\mu \quad (2)$$

S_0 は媒質のせん断強度、 μ は内部摩擦係数と呼ばれる。破壊面が最大主応力軸となす角度は、 45° より小さいことが多い。この説では、最大主応力軸に対して θ だけ傾いた、2つの共役な破壊面が存在し得る。

ところが間隙水を持つ岩石では、Coulomb - Navier の条件 (1) は次のように変更されることが、実験のおよび理論的に明らかにされている [18]：

$$|\tau| = S_0 + \mu(\sigma - p) \quad (3)$$

ここに p は間隙水圧である。(1) と (3) の関係は、 $\sigma - \tau$ 平面における Mohr 円の表示で、直観的に理解できる。第 5 図は σ_2 軸を含む任意の平面内での、法線応力 σ とせん断応力 τ の関係を示す。Mohr 円の説明は省略する (JAEGER [16] を参照)。

第 5(a) 図は間隙水が関与しない場合で、この図に引かれた直線が、破壊条件 (1) を表す。実線の円において σ_1 と σ_3 の差が増大し、点線のように Mohr 円の半径が大きくなって直線に接する応力状態になった時、せん断破壊が発生する。一方、第 5(b) 図は間隙水を含む条件 (3) の場合である。試料に加えられた応力は同じでも間隙水圧が高まると、破壊が発生する。すなわち第 5(b) 図の点線のように Mohr 円が動いて、破壊条件の直線に接することになる。

松代の群発地震は、東西方向の σ_1 、南北方向の σ_3 、鉛直方向の σ_2 という応力状態の下で間隙水圧 p が高まり、WNW - ESE、もしくはそれと共役な ENE - WSW 走向の垂直横ずれの断層面を持つせん断破壊が、多数発生した現象と考えられる。松代断層はこれらの破壊面のうち、西北西走向のものが選択的に発達したのであろう。松代地震については、地下水が「引金」となった、とい

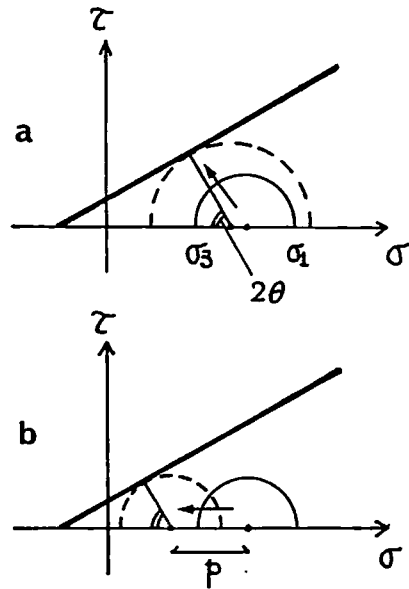


図 5: Coulomb-Navier の破壊基準を示す Mohr 円表示。(a) 最大主応力と最小主応力の差が大きくなって、せん断破壊を生ずる場合。(b) 応力場が不変のまま間隙流体圧がたかまって、破壊にいたる場合。

う言い方をされることがある。しかし HUBBERT and RUBEY の理論 [18] に従えば、間隙水圧の高まり、すなわち高圧の水の上昇が、地震発生の直接の原因だった、というべきであろう。

6 複合テンション・クラック・モデルの導入

第 4 図のように、多数の開口割れ目がガウス分布している場合の力学場は、複合テンション・クラック・モデル [11] で定量的に扱うことができる。これは複合茂木モデルを拡張したもので、グリーン関数として 1 箇の開口割れ目の作る力学場およびポテンシャル量 (重力とピエゾ磁気変化) を用いる。松代の場合は、前節の考察に基づいて、 T_{11} 型と呼ばれる、垂直面が水平方向に開口するくい違いの歪核を採用すればよい。モデルのパラメータは最大隆起量 Δh_0 、ガウス分布の水平分散 σ_r 、鉛

直分散 σ_z 、そして分布中心の深さ D である。以下に、松代で観測された隆起、水平変位、重力変化、地磁気変化、そして地殻変動に寄与した水の体積などが、このモデルによってどの程度説明できるか、を見ることにする。

6.1 地盤隆起

第6図は最大隆起の時期の隆起パターン(第2図)を、大まかに再現するようにパラメータを定めたモデルによる、隆起コンターである。 $\Delta h_0 = 73 \text{ cm}$ 、 $D = 1.3 \text{ km}$ 、 $\sigma_r = \sigma_z = 1.1 \text{ km}$ 、クラックの走向は $N125^\circ W$ とした。ただし、このパラメータの組合せでは、隆起に2つのピークを生じた事実を再現できない。複合テンション・クラック・モデルは、異なるパラメータのモデル複数個を重ね合わせることが可能である。第2図を一層忠実に再現するには、2種類の複合 T_{11} クラック・モデル、もしくは T_{11} と T_{00} (複合茂木モデル)の組合せが必要らしい。ここではモデルが複雑になるのを避けて、大まかに適合するような単一の複合 T_{11} クラック・モデルを採用した。



図 6: 最大隆起のパターンを大まかに再現するモデルの等隆起線。単位 cm。図の枠の大きさは第2図のそれと同じで、一辺が 5km。

6.2 水平変位

水平変位については、開口クラックによるもの他に、松代断層の動きも考慮しなくては行けな

い。KASAHARA [3] は松代における水平変動を、全て松代断層の左横ずれ運動で説明しようとして、潜伏断層の変位量として 2 m という大きな値を得た。また M の大きな地震の表面波記録を用いて地震モーメントを求め、個々の地震に伴う断層のスリップ量を推定した。彼は松代断層の変位が、これらの比較的大きな地震に伴うスリップの和で説明できる、としている。KASAHARA [3] のモデルに対しては、次のような問題点が挙げられる。

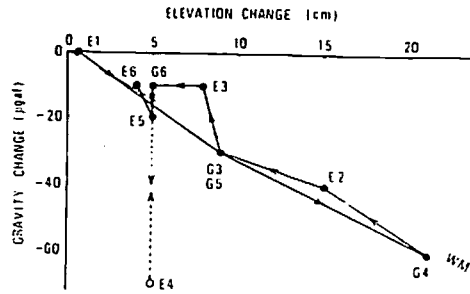
1. 当時の理論的制約から、断層モデルは 2 次元の無限に長い断層である。また表面波を用いたスリップ量推定では、剛性率を 10^{10} cgs と仮定しているの(通常は $3 \times 10^{11} \text{ cgs}$ 位)、1 桁大きな変位量が得られている。
2. 地表で観察された断層変位は 0.5 m で、推定値の 1/4 である。
3. 第3図について指摘したように、左横ずれ運動では説明できない、南北方向の大きな変位がある。
4. 「水噴火」後の沈降期に、水平変位の向きが逆転した。

松代断層については、地下に潜伏した 1 枚の断層面を考えるよりも、有限の幅のある破碎帯を考えた方がよい。結局、水平変位に関しては、複合 T_{11} クラック・モデルと破碎帯モデルを組み合わせたものが有効であろう。破碎帯の第 1 近似として、地表に達する細長い直方体の中に、左横ずれの微小なくい違い面を分布させるモデルが考えられる。このモデルに伴う変位や、重力、地磁気変化については、現在準備中である。

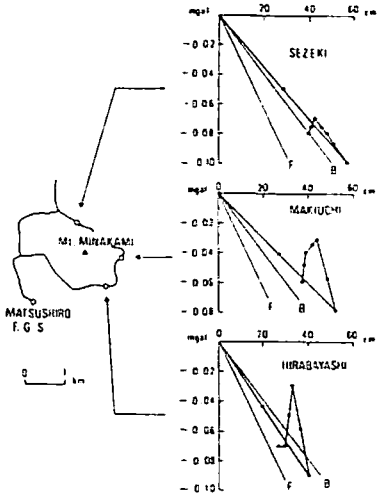
6.3 重力変化

松代地震に伴った重力変化については、水準測量の改訂結果を考慮に入れた、2つの解析結果がある。第7(a)図は、松代一等重力点における隆起と重力変化の関係を示す [10]。松代地震の全期間を通じて、重力変化勾配はほぼ一定 ($-2.79 \mu\text{gal/cm}$) であったことが分かる。第7(b)図は、隆起域の中心部における測定結果である [19]。第1回目の測定(各図の原点に対応)が 1965 年 11 月、2回目は 1966 年 12 月で、既にかなり沈降が進んでいた。

しかし隆起の中心部であるため、重力の変化量は FGS よりかなり大きい。



a



b

図 7: 重力と隆起の関係. (a) 松代一等重力点 (FGS) の変化 [10]. (b) 隆起中心部の変化 [19]. 上から第 1 図の S(瀬関), M(牧内), H(平林) に対応する。

第 8 図は最大隆起時期のモデル (第 6 図) において、クラックが水で満たされている場合の重力変化のコンターを示したものである。FGS においては隆起 27 cm、重力変化 $-70 \mu\text{gal}$ で、第 7(a) 図の右下端の延長上に位置する。つまり複合 T_{11} クラック・モデルも、FGS の重力変化をうまく説明できるのである。一方、隆起の中心部では $-200 \mu\text{gal}$ を越える重力の減少が期待されるが、残念ながらこの時期の測定は行われていない。いずれにして

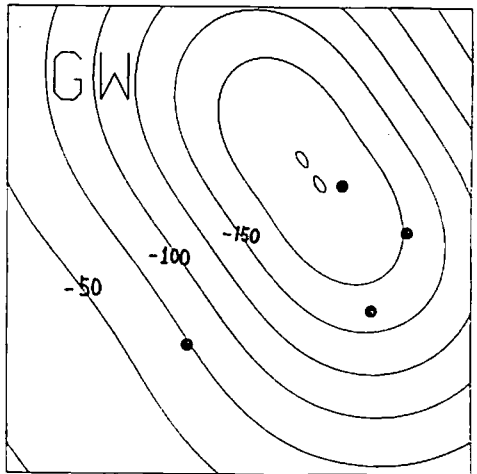


図 8: 第 6 図のモデルに伴う重力変化。単位 μgal 。

も、第 7(b) 図の複雑な重力変化を、単純なモデルで説明するのは不可能である。田島 [19] が考察しているように、測定点付近の密度の違いと、空隙への水の出入りを考えなくてはならないであろう。

複合 T_{11} クラック・モデルを用いても、萩原 [9] の結論は支持される。松代地域の地下に生じた開口クラックは終始、水で満たされていたと考えられる。

6.4 地磁気変化

松代地震の際には、地磁気観測が精力的に行われた。第 9 図は皆神山の南麓で観測された全磁気変化である [20]。地殻変動の最盛期に全磁気は増加し、沈降期に減少している。3 年後の再測で約 10nT 減少しているのが見いだされた。STUART and JOHNSTON [8] は全磁気増加を茂木モデル型圧力源の増圧によるピエゾ磁気変化で、また 3 年後の減少をマグマ溜りの周りの熱消磁域の拡大で説明し、「松代地震 = マグマ貫入説」を展開した。

大竹 [1] はマグマ溜りの周囲の、熱消磁域の拡大は非常に遅いことを示して、熱消磁説を否定した。しかし火山においては、熱伝導によらない効率的な熱拡散の仕組み (熱水の拡散) が存在する。実際、過去 10 年間に着実に蓄積された「火山地磁気効果」の観測例 (三宅島、伊豆大島、阿蘇、草津白根、雲仙など) によれば、熱消磁で説明される地磁気変化が圧倒的に多く、かつ変化量も大きい。

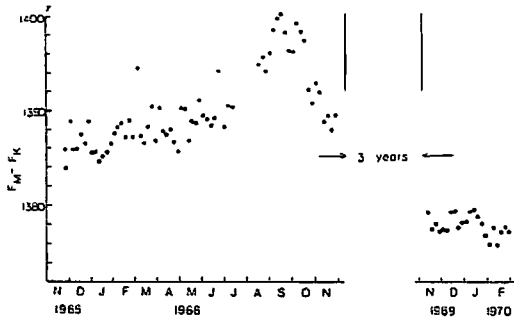


図9: 松代観測点(第1図のMA)における全磁力変化

地震後の再測までに3年の期間があるのも、注意が必要である。松代と基準点の鹿野山の間では、 -1 ないし -3 nT/年くらいの経年変化率の差がある。従って3年間で -10 nTという全磁力減少のうち相当な部分は、松代の地下に原因を持たない、通常の経年変化と思われる。つまり地震後の全磁力変化は、実際はもっと小さくて、第9図は松代の地下浅部で、通常の火山活動に見られるような温度上昇は起こらなかった証拠である、と考えるべきだろう。マグマ貫入説を否定するという結論は、大竹 [1] のそれと同じである。

松代では地震研究所によって、頻繁に伏角のくり返し測量が行われた。特に1966年5月から9月にかけて、皆神山周辺で伏角が最大1分(約10 nT)程度増加したことが報告されている [21]。測量の誤差も大きい、くり返し測量は数カ月毎に行われたので、人為的擾乱のチェックは厳しくなされており、松代地震の初期から最大隆起の時期にかけて、伏角の増加が確認されている。もうひとつ信頼できるデータとして、松代地震観測所における3成分連続観測がある [22]。ここでは1966年9月から1967年1月頃まで、偏角(D)がほぼ一様に東偏を続けて9 nTに達したのに対し、H、Z、F成分の変化は小さかった。

第10図は重力変化と同様に、最大隆起時期のモデルに伴うピエソ磁気変化を示したもので、(a)全磁力、(b)伏角そして(c)偏角の変化である。平均磁化3 A/m、磁気応力係数 1×10^{-4} bar $^{-1}$ を仮定しているが、これは皆神山を構成する岩石につい

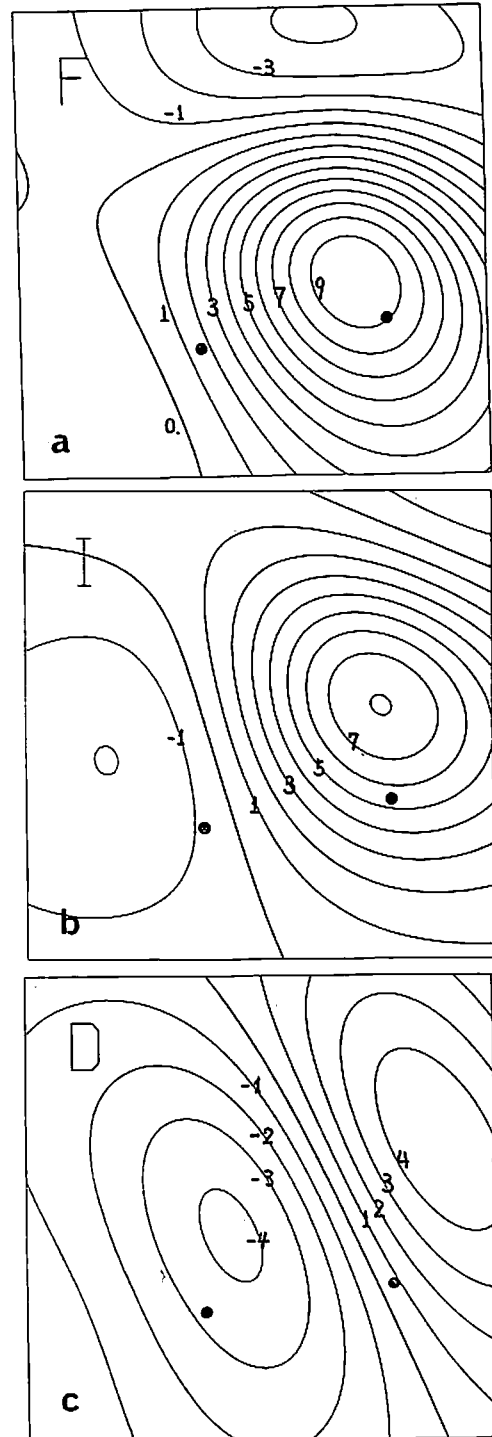


図10: 第6図のモデルに伴う地磁気変化。単位 nT。(a) 全磁力、(b) 伏角、(c) 偏角。

ての実測値 [23] を用いている。このモデルは第3活動期における松代観測点の全磁力増加と、全域における伏角の増加を定量的にも説明することが分かる。一方、10(c)図で明らかのように、この時期に松代地震観測所付近では偏角が西偏している。沈降期にこれが回復して行ったとすれば、フラックス・ゲート磁力計のデータも定性的に説明できる。ただし、モデルの期待値は実測の半分である。これは観測点が地下壕内にあり、局所的な増幅効果を受けたためかも知れない。

地磁気変化がピエゾ磁気効果で説明されることは重要である。ピエゾ磁気効果は応力場の性質に敏感で、クラックの走向によって全く異なる地磁気変化を生じ得るからである。このことは同時に、クラックの開口はダイラタンシー現象という受動的なものではなく、クラック内部の圧力の増大によって発生したことを、強く支持するものである。

6.5 地殻変動に寄与した水の体積

複合テンション・クラック・モデルではモデルのパラメータが与えられれば、半無限媒質中に生じた開口クラックの総体積を計算できる。井筒屋 [14] は水準測量成果を再整理して、一部の誤りを訂正し、松代から約10km離れた水準点(更埴市)を基準とした隆起コンター図15枚を作製した。第2図はそのうちの1枚に他ならない。そこで井筒屋の成果を用いて、各時期の隆起パターンと大まかに一致する、複合 T_{11} クラック・モデルを決定した。第11図はこのようにして求めたモデル・パラメータの推移をグラフにしたものである。

$\sigma_r = \sigma_z$ として、隆起パターンとほぼ一致するコンターが得られる。第11図から、クラック分布の中心は2 km から1.2 km あたりへ上昇して行ったこと、分散も大体Dと同じ値をとって小さくなっていることが見て取れる。「水噴火」と呼ばれるような大量の湧水現象は、1966年8月から10月にかけて起こった。開口クラックの総体積が最大だった1966年9月11日測定の時点と12月では、1800万 m^3 の落差がある。クラックは水に満たされていたから、この差が湧出した水量に相当する。松代における湧水の総量は1000万トンと推定されているので、モデルの与える湧水量は少し大きすぎる。

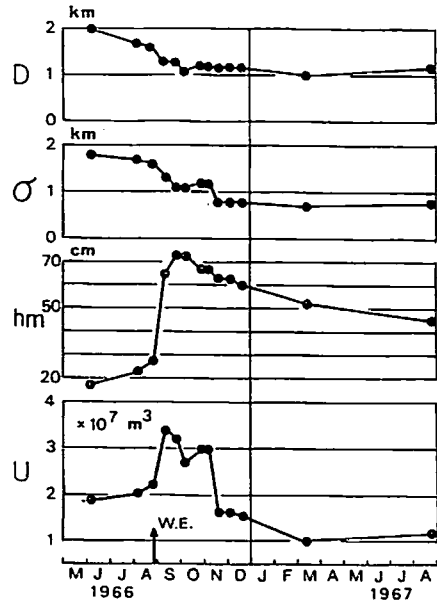


図 11: 隆起パターンを大まかに再現する複合 T_{11} クラック・モデルのパラメータとクラックの総開口量の時間変化。下段の矢印は「水噴火」の最盛期。

T_{11} 型クラックでは、クラックのなす仕事は地殻を水平方向に押し広げるのに費やされる。一方、 T_{00} 型や T_{33} 型(上下方向に開口するもの)では、同じ体積のクラックでもより効率よく隆起を生ずる。6.1節で述べたように、 T_{11} 型と T_{00} 型の混合の方が実際の松代隆起を一層良く説明できそうである、という事情もある。 T_{00} 型クラックも寄与していたとすれば、隆起量を説明するのに必要な水の量が少なくて済む。ここで重要なことは、モデル・パラメータを若干手直すことで松代における湧水量は十分説明できる、ということであろう。

7 エネルギー収支

松代群発地震は、日本の地震研究者に「地震予知」の課題に直面させた。2節で述べたように、地震回数は大きな3つの活動のピークを持ち、それ以降は周辺に拡大して行った。この群発活動はいつまで続くのか、大地震の発生に結び付くのか、といった住民の深刻な問いに、研究者は明確な答えを出せなかった。テレメータ・システムの無かった当時、震源とマグニチュード(M)の迅速な決定に

大きな労力が注がれた。活動予測に役立つような経験法則として、坪井の「地震体積説」[24]があったからである。この説によれば、地殻が貯えることの出来るせん断歪エネルギーは、平均して 10^3 erg/cc である。あるMの地震を発生し得る地殻の体積には限りがある。だから逆に地震発生領域の体積を知り、そこで起きている群発地震の累積のMが分かれば、その領域が既に地震のエネルギーを放出しつくしたのかどうかを判定したり、あるいは今後起こり得る地震の最大のMも予測できるだろう。よく考えてみると、これはまだ群発地震の発生していない領域について、何も云っていない。実際に、松代では新たな活動期毎に、地震発生域が拡大して行った。当時の松代町長、中村兼治郎氏をして、「学問が欲しい」と嘆かせた由縁である。

KASAHARA [3] は松代地震に伴うエネルギー収支を議論している。第1表に示す通り、累積マグニチュードから求めた地震エネルギーは 1.66×10^{21} ergs で、大部分は第1から第3の活動期に放出された。震源域の体積 ($30 \times 15 \times 5 \text{ km}^3$) に地殻に貯えられる平均的な歪エネルギーをかけると、 2×10^{21} ergs となる。これは地震エネルギーとほぼ一致する。つまり松代地震においても地震体積説は成り立っていたことになる。

表1. 松代地震で消費されたエネルギー [3]

地震エネルギー	$\times 10^{18}$ ergs
合計	1,661
第1活動期	250
2	841
3	392
4	124
5	51
重力エネルギー	$\times 10^{18}$ ergs
合計	17,000
広域	10,000
皆神山周辺	7,000

しかし KASAHARA は更に重要な指摘を行った。松代における地殻隆起は、重力場の中で地殻物質を持ち上げるという仕事を行ったことになる。第1表にあるように、その重力エネルギーは 1.7×10^{22} ergs と見積られ、地震エネルギーより一桁大きい。表の中で皆神山周辺の局所的隆起部分では、その後

沈降に転じている。KASAHARA の位置エネルギー見積りの方法は、地表での隆起量が地下 5 km まで一次式で減衰してゼロになるような垂直変位をしたと仮定して、隆起コンター図から積算するものである。ちなみに複合テンション・クラック・モデルでは、地下の任意の点の垂直変位を計算できる。予備的な検討によれば、地中の変位分布は KASAHARA が仮定したものとそれほど違わない。第1表の計算は水準測量値が改訂される前のデータに基づいているので、皆神山周辺の部分で過大な見積りをしている。しかしそれは高々 10 % 程度で、松代地震で地震エネルギーより一桁大きな位置エネルギーが消費されたという結論は変わらない。

地殻変動をまかなったエネルギーが地殻に貯えられた歪エネルギーから供給されたと考ええると、群発地震の震源域の 10 倍の体積を要することになる。「広域地殻歪」が地殻変動を起こしたという言い方は、一見もっともらしい。しかしこの立場に立つなら、長野県全体くらいの広がりを持つ地域から、どうやって歪エネルギーを松代に集中させるのか、という仕組みを説明しなくてはならない。KASAHARA [3] の重要な問いに答えようとする試みは、今までなされていないようである。

5 節と 6 節の考察によれば、大量の地下水が開口クラックを作りながら上昇し、副産物として地震も起こしたのが「松代群発地震」である。従って、地殻変動を起こすエネルギーは地下水自体が担っていた、と考えるのが自然である。密度が 1 である水は自分より重い地殻の岩石の中に閉じ込められれば、浮力(負の重力エネルギー)を受ける。地表から深さ h にある単位体積の水の持っている位置エネルギーは

$$\Delta E = \Delta \rho g h \quad (4)$$

ここで $\Delta \rho$ は水と岩石の密度差、 $g (= 980 \text{ cm/sec}^2)$ は重力定数である。 $\Delta \rho$ として 1.65 を用いて、1000 万トン(= 10^{13} cc) が地下 10 km で受けている浮力のエネルギーは、 1.617×10^{22} ergs となる。これは KASAHARA が見積った地殻隆起に費やされたエネルギー 1.7×10^{22} ergs とほとんど一致する。

群発地震は 10 km より深い所でも発生しているので、浮力エネルギーの見積りは更に大きくなり得る。そのうえ、隆起の約 70 % は永久変形として残っているから、実際に上昇してきた地下水は湧

出量をはるかに上回るはずである。上述の議論は、地下深部の水が浅い部分の水を玉突き式に押し上げて行った場合でも成り立つことは、すぐ理解できる。

「松代群発地震」で費やされた全エネルギーの算出には、まだ見落とされているものがある。地震エネルギーというのは、波動として放出されたものと理解される。開口およびせん断クラックを作って、弾性体としての地殻を歪ませたエネルギーは、勘定に入っていない。またクラックを新たに開口させるには、岩石の粒間結合力で打ち勝って仕事をしなくてはならない。一方「炭酸ガス・水噴火」説の立場からは、地殻浅部においては炭酸ガスの発泡による増圧効果(相転位のエネルギー)が期待できる。これらの評価は、現在の筆者の手に余る。ただ「松代群発地震」の本質が、地殻の深部に閉じ込められたまわりの岩石より軽い水が、むりやり通路を作って地表に出てきた現象であるとすれば、浮力を考えるだけで、エネルギー論的にそう困ることはあるまい、と思える。

8 水と炭酸ガスはどこから来たか?

さて我々は最後の疑問に到達した—松代に出現した大量の水と炭酸ガスはどこから来たのだろうか? 大量の湧水は地殻上部における通常の水循環では説明できない。地球化学者達は松代の湧水の起源として、「化石海水」やマグマからの供給の可能性を検討している [25]。これは上部地殻に何等かの水の貯留域があるとする立場である。大竹 [1] は脱水反応による水の放出の可能性を示唆したが、上部地殻の造岩鉱物でこのような反応を起こす具体例は示していない。

前節で検討したエネルギー収支の見地からは、松代の湧水は少なくとも 10km より深い所から上昇してきた、としなくてはならない。ただし、地下深部の水が全てそのまま地表に到達する必要は無く、地殻上部の地下水を押し上げたり、それと混じり合っても構わない。実際に地表に湧出した水は、浅部の地下水と混合したものであった。

WAKITA *et al.* [12] の「松代=ヘリウム・スポット」説は、深部に上昇してきた小規模なマントル・

ダイアビルが冷却して一挙に水を放出したというモデルで、水の起源を説明する。ダイアビルの直径 (~1 km) は、1000 万トンの水を含み得るマグマの容積から算出された。しかし水を短時間に放出するには、冷却し易いように、ダイアビルが多数の散弾のように分離してはならない、とされている。これは深部のマグマ貫入説と云ってもよい。

ヘリウム同位体比の観測から、かなり確からしい推測として云えることは、松代の地下は不活性なヘリウム・ガスが通過し易い状態になっており、しかもその空隙の多い状態は上部マントルに達している可能性もある、ということであろう。このヘリウム・ガスの通路は、松代地震を起こした深層水の上昇によって形成された可能性が強い。松代地震の以前にヘリウム同位体比の測定は行われていないから、この考えが立証されたとは云い難いが。

現在我々の持つ物理探査技術では、想定されているような小規模な溶融体(現在は固化している?)の存在を検知できない。松代の湧水の起源について、他に何の可能性も無ければ、我々は散弾状ダイアビルの上昇があったという WAKITA *et al.* のモデルを受け入れざるを得ない。しかし 1980 年代に進展した地殻の電磁氣的構造探査から、我々はもうひとつ有力な水の供給源がある、と主張したい。

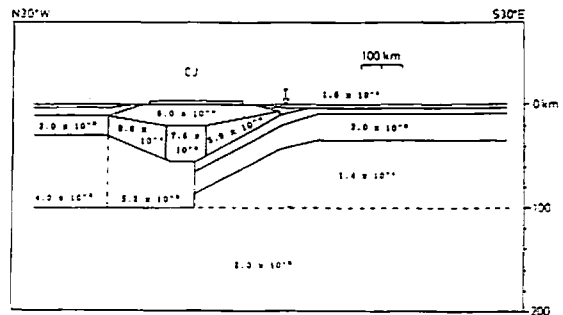


図 12: 本州中央部の電気伝導度構造 [26]。御前崎から能登半島にぬけるほぼ南北の断面図。図中の数値の単位は S/m。

第 1 2 図は、本州中央部の電気伝導度構造の南北断面を示す [26]。本州の下部地殻には、太平洋

側と日本海側の伝導度の低い部分にはさまれて、 7.6×10^{-2} S/m という電気伝導度の高い領域が存在する。下部地殻の良導層の有力な原因として、部分溶融と自由水が挙げられる。電気伝導度の値だけでは両者の見分けはつかず、この領域の温度の情報が決め手になる。

大久保 [27] は航空磁気測量のデータを用いて、日本列島地下のキュリー点深度分布を求めた。第 13 図は 12 図の断面にそったキュリー点深度の分布である。大久保 [27] の議論によれば、この地域での「キュリー点」の温度は 400° C 程度とされる。第 13 図で陸域中央部の、キュリー点等温面が最も深い地域(深さ 15km)が、第 12 図における下部地殻良導層の位置にあたる。この温度は遊離した水が存在できる範囲にあり、かつ部分溶融は期待できない低温である。従って歌田モデル(12 図)の下部地殻良導層は、塩分を多量に溶かし込んだ塩水(saline fluid; brine)が岩石の隙間で連結した状態である可能性が高い。つまり本州のこの付近(松代も含む地域)の下部地殻には多量の水がある、と期待される。

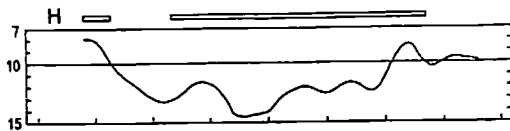


図 13: 図 12 と同じ断面のキュリー点深度分布 [27]。図の枠上に示す横棒が陸域を示す。縦軸の数値は深さで単位は km。

安定した大陸地殻において、その上部は高比抵抗で下部が低比抵抗である地域が多いことは、1970 年代後半から明らかになってきた。最近 JONES [28] は世界各地の下部地殻の良導層とその成因について、詳細なレビューを行っている。良導層の原因としては遊離した水が有力である [29] が、問題はなぜ軽い水が下部地殻に留まってしまうのか、という点である。ETHERIDGE *et. al.* [30] は地温が 370° C 程度の地殻のやや深部で、低温変成作用で生じた鉱物が岩石の空隙に沈澱して不透水層を作っている結果、地殻下部や上部マントルの変成作用で生成された水が、このキャップの下にトラップされて活発な熱水対流を行っている、という水循環モデルを提案した。JONES [31] はこの不透水

層をコンラッド面の上盤側に対応させて、地殻の一般的な特徴—上部地殻は地震波に対して透過的で高比抵抗、下部地殻は地震波の反射面が多く低比抵抗—を、水の存在で説明した。

地球上の色々な地域での下部地殻の比抵抗構造は様々であり、良導層の成因にしても別な考え—例えば「伝導性鉱物」説の他に、最近では「粒子間の薄膜状炭素」(Grain Boundary Film) 説が提案されてもいる [28]。しかし活発な沈み込み帯では、スラブから大量の水が供給されるというのは、共通認識のようである。PEACOCK [32] によると、40km より浅い所では、間隙水が排出されたり、低度の変成作用でメタンと水から成る液体が生成される。より深いところでは沈み込むプレート内の変成作用で、 H_2O と CO_2 が解放され、これがマントル・ダイアピルの生成に寄与する。本州中央部の良導層の水は、当然、後者のメカニズムでもたらされたものであろう [33]。

下部地殻には定常的に水が供給されているとすれば、地殻の中間に形成された不透水層で上昇を阻まれた水は、どこかに出口を求めるとであろう。東北日本と中央日本の下部地殻良導層の存在が明らかになり始めた頃に、YUKUTAKE [34] は大規模な断層が下部地殻からの水の通路になっている可能性を指摘している。もうひとつの通路は、その根が下部地殻にまで達しているはずの火山である。もし手近な所に有効な脱出路が無かったなら、水の圧力が高まって頭上の不透水層を破壊し(水圧破壊!)、下部地殻の水は自ら通路を切り開くのではなかろうか [35]? 最後に述べた可能性は、水循環モデル [30] の安定性に関連して、FOURNIER [36] によっても議論されている。

松代群発地震の生成機構では、炭酸ガスが重要な役割を果たしていることは既に述べた。炭酸ガスの起源についても、2つの考えがある。ひとつは深層水が酸性であって、浅部地殻の方解石($CaCO_3$)を分解して CO_2 を発生させたというものである [25]。もうひとつは下部地殻の水はもともと大量の CO_2 を溶かし込んでいるのではないかと、いう推測である。沈み込むスラブで起こる変成作用では H_2O と共に CO_2 を生成する [32]。下部地殻においては、 400° C の温度領域である上層部は H_2O が豊富で、岩石の隙間の流体がつながり非常に低比抵抗になるが、 600° C 位の下層では CO_2 が卓越し

て流体の連結度が悪くなり比較的抵抗が高くなるというのが、JONES [31] の説明である。炭酸ガスの起源についての両説の当否を判定するには、地殻物質と水・炭酸ガスとの化学反応の吟味、あるいは同位体等を用いた検証が必要であろう。

炭酸ガスの起源に関連して、次のような問題がある。複合テンション・クラック・モデルで松代地震のその後の過程も理解しようとする、ひとつ都合の悪いことがある。それはモデルで想定しているような液体の内圧で開口するクラックは、長い間その形状を保ってられないことである。破壊力学によれば、クラック先端部の応力集中でクラックはどこまでも延びて行き、開口量はゼロになってしまう。ところが松代では、隆起量の70%位が永久変形として残っている。この困難を解決するには、クラックを開口させた水が何かの固体に置き換われればよい。ここで再び「炭酸ガス・水噴火」説に登場願うと、湧水に含まれたCO₂は脱ガスして水の圧力を高めた他に、方解石を作って沈澱し、開口割れ目を埋める役割も果たしたのではないかと云う(恒石・高橋、私信)。松代の深層ボーリングで確認されている方解石は、炭酸ガスの供給源だったのか(浅部起源説)、下部地殻からの水の遺留品(深部起源説)なのかは、本稿のモデルにとって重要な問題である。

9 結論

大量の水を注入することで地震が発生した例として、米国コロラド州のデンバー地震が有名である [37]。兵器工場の廃水を深井戸に廃棄のために注入した所、従来は地震活動が非常に低かったデンバー周辺に、群発地震が起こった。この事件をきっかけに、地震の制御をも目指して、同じくコロラド州のランジェリイ油田で水圧破碎実験が行われ、地震の発生と水との密接な関係が、野外で確かめられた [38]。この2つの事例は HUBBERT and RUBEY の理論 [18] を基に解析されている。

松代群発地震の震源域で観察された出来事は、上記の人工的実験=水圧破碎に伴う諸現象のあらゆる特徴を備えており、本質的には同じことが起こったと考えられる。5節と6節で展開したのは、人工実験と異なり、ポンプもボーリング孔も無い

自然の条件下で、水圧破碎はどういう形態をとるのかというモデルを、観測データから構築したものである。一方、7節と8節では、松代地震を引き起こした水と炭酸ガスの供給源を論じた。ここでは下部地殻にそれらの貯留域が求められ、かつ、地表への水(と炭酸ガス?)の上昇開始にあたっては、不透水層(コンラッド面?)の水圧破壊が示唆された。デンバーで注入された工場廃水は64万トンであったのに対し、松代の湧水は1000万トンである。「松代群発地震」はまさしく、自然のおこなった大規模な水圧破碎実験であった。

恒石幸正、高橋春男の両氏には、「炭酸ガス・水噴火」説にとどまらず、松代地震の色々な側面について教えて頂いた。特に第5節の水の役割に関する議論は、恒石氏に全面的に負っている。心から感謝します。

参考文献

- [1] 大竹政和, 松代地震から10年, 科学, 46, 306-313, 1976.
- [2] 恒石幸正・高橋春男, 松代群発地震発生機構についての考察, 地質学会春季大会講演集, p.72, 1975. 恒石幸正, 4章:断層,「地質構造の科学」(木村敏雄・編), 朝倉書店, 370pp, 1984.
- [3] KASAHARA, K., The source region of the Matsushiro swarm earthquakes, *Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo*, 48, 581-602, 1970.
- [4] 中村一明, 松代地震から学んだこと, 科学朝日, 1971年10月号, 127-133, 1971.
- [5] HAGIWARA, T., Cause of shallow earthquakes occurring in the earth's crust as suggested by the accompanying land deformation, *Phys. Earth Planet. Interiors*, 6, 250-255, 1972.
- [6] NUR, A., Matsushiro, Japan, earthquake swarm: Confirmation of the dilatancy-Fluid diffusion model, *Geology*, 2, 217-221, 1974.

- [7] KISSLINGER, C., Processes during the Matsushiro, Japan, earthquake swarm as revealed by leveling, gravity, and spring-flow observations, *Geology*, **3**, 57-62, 1975.
- [8] STUART, W. D. and M. J. S. JOHNSTON, Intrusive origin of the Matsushiro earthquake swarm, *Geology*, **3**, 63-67, 1975.
- [9] 萩原幸男, 複合茂木モデルとしての松代地殻隆起, *測地学会誌*, **23**, 25-35, 1977b.
- [10] 大竹政和, 松代地震に伴った重力変化の再検討, *測地学会誌*, **22**, 49-52, 1976b.
- [11] SASAI, Y., Multiple tension-crack model for dilatancy: Surface displacement, gravity and magnetic change, *Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo*, **61**, 429-473, 1986.
- [12] WAKITA, H., N. FUJII, S. MATSUO, K. NOTSU, K. NAGAO and N. TAKAOKA, "Helium spots": Caused by a diapiric magma from the upper mantle, *Science*, **200**, 430-432, 1978.
- [13] 萩原幸男, 伊豆半島の異常隆起を説明する茂木モデルとそれに伴う重力変化, *震研彙報*, **52**, 301-309, 1977a.
- [14] 井筒屋貞勝, 松代群発地震にともなう水準測量の改訂値, *震研彙報*, **50**, 273-280, 1975.
- [15] 国土地理院, 松代群発地震に伴う測地測量報告書, 第2報, 1967.
- [16] JAEGER, J. C., 弾性・破壊・流動論-工学および地球科学への応用-, 共立全書, 1968.
- [17] 中村一明, 広域応力場を反映した火山体の構造-側火山の配列方向-, *火山*, **14**, 8-12, 1969.
- [18] HUBBERT M. K. and W. W. RUBEY, Role of fluid pressure in the mechanics of overthrust faulting, I. Mechanics of fluid-filled porous solids and its application to overthrust faulting, *Bull. Geol. Soc. Amer.*, **70**, 115-166, 1959.
- [19] 田島広一, 地震および地殻変動に伴う重力の変化, *震研彙報*, **50**, 209-272, 1975.
- [20] YAMAZAKI Y. and T. RIKITAKE, Local anomalous changes in the geomagnetic field at Matsushiro, *Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo*, **48**, 637-643, 1970.
- [21] RIKITAKE, T., Y. YAMAZAKI, M. SAWADA, Y. SASAI, T. YOSHINO, S. UZAWA and T. SHIMOMURA, Geomagnetic and geoelectric studies of the Matsushiro earthquake swarm (5), *Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo*, **45**, 395-416, 1967.
- [22] 気象庁, 松代群発地震調査報告, 気象庁技術報告第62号, 105-124, 1968.
- [23] 木下肇・大中康啓, 松代町・皆神山岩体の磁性-地震予知への応用・その(1), *火山*, **13**, 1-11, 1968. 大中康啓・木下肇, 火山岩の磁化の応力効果-地震予知への応用・その(2), *火山*, **13**, 12-20, 1968.
- [24] 例えば, 宇津徳治, 「地震学」第2版, 共立全書, 310pp, 1984を参照.
- [25] KITANO, Y., R. YOSHIOKA, S. OKUDA and K. OKUNISHI, Geochemical study of ground waters in the Matsushiro area, Part 1: Chemical composition of ground waters, *Bull. Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ.*, **17**, 47-71, 1967. 細野義純, 松代群発地震に際し観察された地下水位の異状と水質の変化について, *地質学雑誌*, **74**, 569-581, 1968. 吉岡竜馬・奥田節夫・北野康, 松代群発地震地域の地すべり地帯に湧出した地下水のハロゲン元素について, *京大防災研年報*, **14B**, 667-675, 1971.
- [26] UTADA, H., A direct inversion method for 2-dimensional modeling in the geomagnetic induction problem, Ph. D. Thesis, Univ. Tokyo, 409pp., 1987.
- [27] 大久保泰邦, 全国のキュリー点解析結果, *地質ニュース*, 362号, 12-16, 1984. 大久保

- 泰邦, 地熱探査とキュリー点解析, 地熱エネルギー, **11**, 369-394, 1986.
- [28] JONES, A. G., Electrical conductivity of the continental lower crust, in "*Continental Lower Crust*" (Editors: D. M. FOUNTAIN, R. ARCULUS, and R. M. KAY), Elsevier, 485pp., 1992.
- [29] 例えば, SHANKLAND T, J. and M. E. ANDER, Electrical conductivity, temperatures, and fluids in the lower crust, *J. Geophys. Res.*, **88**, 9475-9484, 1983. HYNDMAN R. D. and P. M. SHEARER, Water in the lower continental crust: modelling magnetotelluric and seismic reflection results, *Geophys. J. Int.*, **98**, 343-365, 1989.
- [30] ETHERIDGE, M. A., V. J. WALL, and R. H. VERNON, The role of fluid phase during regional metamorphism and deformation, *J. Metamorph. Geol.*, **1**, 205-226, 1983.
- [31] JONES, A. G., MT and reflection: an essential combination, *Geophys. J. R. astron. Soc.*, **89**, 7-18, 1987.
- [32] PEACOCK, S. M., Fluid processes in subduction zones, *Science*, **248**, 329-337, 1990.
- [33] TATSUMI, Y., Migration of fluid phases and genesis of basalt magmas in subduction zones, *J. Geophys. Res.*, **94**, 4697-4707, 1989.
- [34] YUKUTAKE, T., A review of studies on the electrical resistivity structure of the crust in Japan, *Earthq. Predict. Res.*, **3**, 345-364, 1985.
- [35] 笹井洋一, 電磁気観測から推定される熱構造, シンポジウム「内陸地震—発生の場と物理」, 14-19, 1992.
- [36] FOURNIER, R. O., The transition from hydrostatic to greater than hydrostatic fluid pressure in presently active continental hydrothermal systems in crystalline rock, *Geophys. Res. Lett.*, **18**, 955-958, 1991.
- [37] HEALY, J. H., W. W. RUBEY, D. T. GRIGGS and C. B. RALEIGH, The Denver earthquakes, *Science*, **161**, 1301-1310, 1968.
- [38] RALEIGH, C. B., J. H. HEALY and J. D. BREDEHOEFT, An experiment in earthquake control at Rangely, Colorado, *Science*, **191**, 1230-1237, 1976.

A Generating Mechanism of Matsushiro, Central Japan, Earthquake Swarm: Spontaneous Hydraulic Fracturing.
 Yoichi SASAI,
 Earthquake Research Institute,
 The University of Tokyo.
 Yayoi 1-1-1, Bunkyo-ku, Tokyo 113, Japan.