

松代群発地震と地下構造

— あとがきにかえて —

高橋 博

国立防災科学技術センター

Matsushiro Earthquake Swarm and Underground Structure

By

H. TAKAHASHI

National Research Center for Disaster Prevention, Tokyo

当地方は地震発生当時、信州大学飯島南海夫助教授の予備的な調査が進められていただけで、公にされた信頼できる地質図がなかった。今回の垣見らの調査により、地層の分布（表層は除く）と全般的な地質構造についてかなり信頼できるものが得られた。また、今回、物理探査を本格的に用いて（地震探査と空中探査は経費的に行なえなかった）地下構造が次第に明らかとなった。すなわち、善光寺平とその東側山地の境に存在すると思われる断層は、深部電気探査により千曲川橋の直下でおさえられ、重力探査の結果ほぼ千曲川沿いにNE-SW方向に走り、震源の分布もこの線を境にその西側では急激に減少し、ほとんど地震が発生せず、その東側地域とするどい対照を示している。また、湧水や地盤の異変現象もこの東側にはほぼ限定されている。なお、鳥打峠で発見された断層は、この断層に平行する副次的なものである。

松代盆地付近の構造としては、まず、その南側は典型的箱型構造をなし、主として第三紀層とこれ貫く深・半深成岩類よりなる。その中心部には深・半深成岩類の貫入をみるが、第3活動期の森（更埴）の地震群は、この付近を中心に深さ10kmから浅い所まで発生した。強い地震を伴うが、地震活動は、火山岩を伴う皆神山と若穂の地震群ほどおびただしい数に達しない。このことは、貫いている火成岩の相違に関係しているかもしれない。松代盆地の北側隆起体は南ほど顕著ではないが、多量の火山噴出物でおおわれ、その基盤の

構造は明らかでないが、石英閃緑岩と第三紀層よりなる。奇妙山の火山噴出物の火道の位置は、今回の調査ではそこまでおおえず明らかでないが、松代盆地の方から供給されたものではないことがわかった（後述の例外を除き）。したがって、火道は山体のどこか中心付近にあるのであろう。松代盆地がカルデラではないかと当初疑われもしたが、盆地全体は地溝状構造をもつ。しかし、一見地形的に見られるほど明確ではない。すなわちその南を限る断層は、地質図に示されているように、（重力探査の結果ともよく整合するが）明らかとなった（一部の地震は、この線に見かけ上まつるごとく分布する）が、北縁は地質調査からは明確な断層は見いだされず、東寺尾付近に、通常の地質図には表示する意義が認められない程度の（NW-S E方向）がせいぜいみとめられた程度である。だが、この北縁地帯は、第3活動期にはきわめて顕著な活動の行なわれた所である。すなわち、それ以前にも竹原、瀬関にみられていた東西走向の地割れが、^{注1)}第3活動期に入るや、加賀井から牧内にかけて幅500m、延長4kmほどの限られた地帯（NW-S E方向）に著しく多数発生した。数のみでなく、それ以前とは異なり、落差を生じ（北おち）、強い地震と同時に見ている前で幅を広め、延長をのばすなど、活動の活発さにおいても従前とは比較にならないものであった。さらに、ほぼ同じ地帯に（延長5km、幅1kmほど）多数の箇所でも多量の湧水を生じ、その一部は発生^{注2)}の当初よりCO₂ガスをともなった温泉水であった。

これらの湧水は、初めは普通の地下水であって次第に温泉の成分をました。そして湧水量の最盛期にはついに地すべりの発生をみた。この地帯をまたいだ皆神山-可候峠(3 km)の測線は、地震研究所のジオジメーターの測定によると、'65年秋

より'66年夏の間約40 cmほど延びていたのであるが、第3活動期に入るや、ほぼ同程度の量が2カ月間で一気に延び、最大の時期には'65年秋より100 cm以上の延びを示した。'66年10~12月の震源分布図(東大)を見ると、この地帯で地

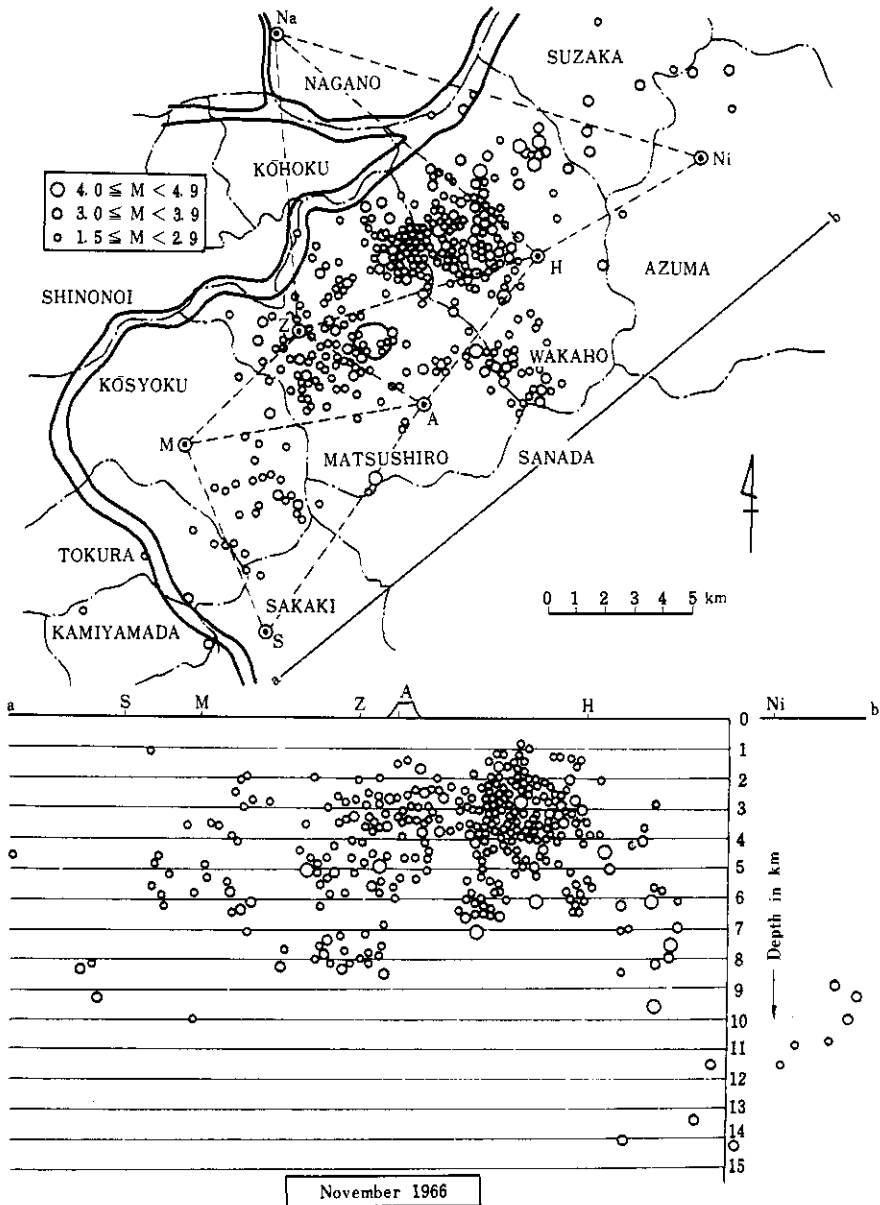


図-1 1966年11月震源分布(震研)

震が発生しておらず、あたかも地下の岩石が破壊しつくされたかのようにである。また、加賀井温泉

の湧出量は、松代付近に震源をもつ強い地震の前後に湧出量の変化を伴うが、震源がこの地帯にあ

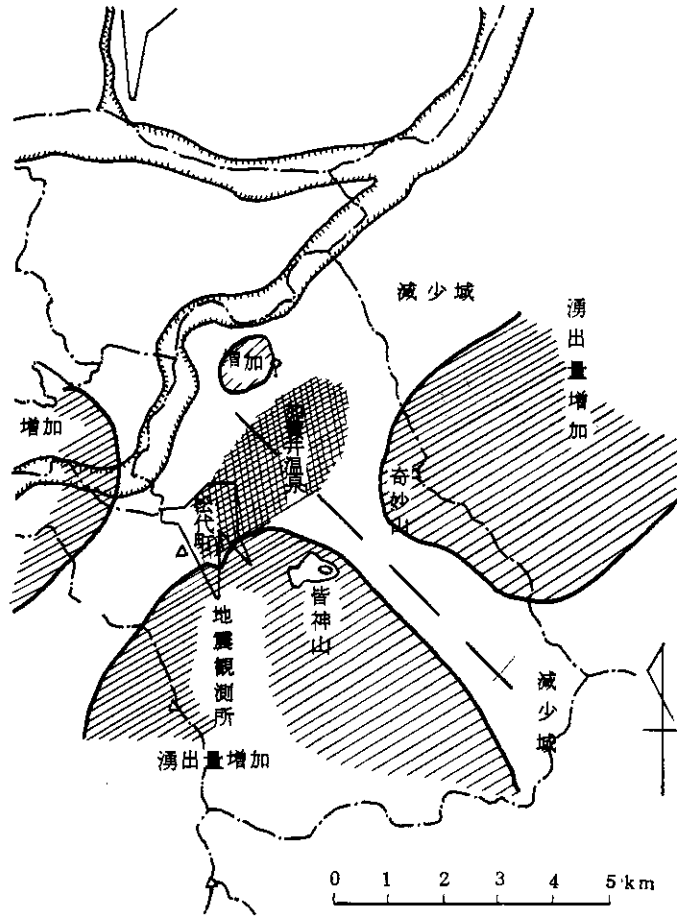


図-2 震源位置と加賀井温泉湧出量の関係

る場合、他の場合と反対に湧出量の減少がみられる。¹⁾ 国土地理院の三角測量の結果も、松代盆地北側山地はNW方向に変位し、皆神山側はS方向、象山付近はSE方向に変位し、1904年と比較した変位量の大半は、最近の地震に伴って生じたようである。これらのことから、松代盆地北縁には活動中の構造線があると見るべきである。なお、電気探査などの測定結果や最近の調査で、菅間付近に沖積層の下にガケ状の地形が埋没しているらしいことがわかった。

この盆地にとってもう一つ大きな構造上の問題は、皆神山北・東部に重力探査の結果明らかとな

ったカルデラ状の埋没構造である。しかも、深部電気探査の結果からも、同じ所でその西側には地下300mぐらいから存在する高抵抗体が、この低重力地域では突然1.5km以上あるいはそれよりかなりの深さまでないことである。この低重力地域は、第3活動期には異常隆起をおこし、その等隆起線は重力の等値線と驚くほどよく一致している(図-3)。地震研究所の水準測量によると、その最盛期には屋代と比べて実に90cmほども隆起を示した。湧水の量もこの低重力地の中心付近でもっとも多かった。なお、第3活動期後、地震研究所の測定によると、重力が1年前に比べて皆神

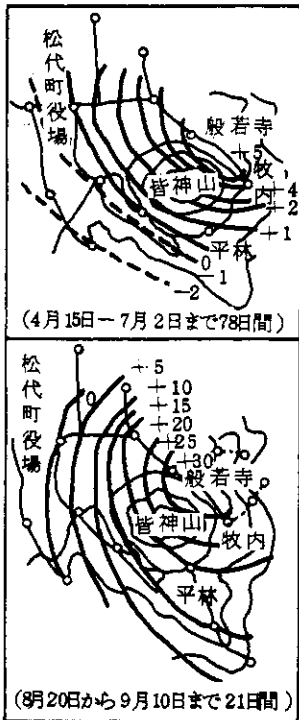


図-3 皆神山周辺水準測量結果(東大震研) 数字は cm で隆起を示す。

山、牧内、瀬関付近のみ $13/100\text{mgal}$ ふえ、これは比較的浅い所で密度増加があったと考えねばならないという。沢村らの調査によると、岩沢付近にみられる奇妙山初期の火山噴出物は南側で、しかもかなり近くから供給されたものとのことで、カルデラ状構造が火山性起源のものであっても差しつかえないことを示している。以上から次のような一つの見方もなりたつと思う。すなわち、このカルデラ状構造は火山性起源のもので、瀬谷の試算した程度の規模で粗ぼろな火山噴出物から構成され(その密度も瀬谷の試算にあう)、そこは塩分濃度の著しく高い温泉水で満たされている。その下部は密度の高い別の火山性物質で充たされ、構造の断面に変化などあるかもしれないが、かなり地下深部まで達する何らかの構造的連続をもっている。第3活動期に入るや、特にこの部分に地下からの圧力が急激にまし、その圧力は直接マグマを考える必要はなく、多量の熱水やガスでもよいかと思うが、カルデラ状構造内に異常に隆起した。その際、粗ぼろな岩石からなる部分の下底付近がとくに圧密をうけ、その付近の温泉水が多量

にしぼり出されて地表に一時に流出した。このほか、第1活動期のころ気象庁で加賀井温泉付近で観測した記象によると、加賀井からみて第4象限の方に地下に 45° 程度の傾きで不連続面があるとみる必要があるといい、また初期の地震は皆神山付近で発生し、初動が押し上げる方向であったときくが、それとも矛盾しない構造である。以上の諸結果からこの低重力地の中心に密度変化のおきたと思われる $2\sim 3\text{ km}$ ぐらいまで達する深層試験錐により、その辺の状態を調べる必要がある。

なお、第3活動期における主な活動のパターンをみると、地震回数(エネルギー)は8月初めから急激に増加して8月末にはピークに達して以後減少し、10月末には7月ごろよりも減少した。地割れは、地震回数とほぼ比例して8月中に多数発生した。地震観測所内の水管傾斜計の傾く速度は8月初めから速くなり、9月10日ごろ最高となり、月末に傾斜量はほぼ極に達した。また、皆神山北東部、瀬関付近を中心とする地盤隆起は、8月末から特に大きくなり9月末~10月初に最大となった。皆神山一可候時間の延びは、8月末から急増し、9月末に極大に達した。一方、異常な湧水は9月上旬からはじまり、9月中旬から激増し10月上旬にかけて最大となったようである。地すべりと、地すべり性の地割れは9月17日~10月9日の間に発生している。なお、湧水中の塩分濃度は、水量のへりつつある今('67年2月)もなおゆるやかに増加している。以上のように見てくると、地震動の活動が先行し、地盤の運動が1月ぐらい位相がおくれて活発となり、湧水がそれにややおくれ、それに伴われる地すべりは数日ほどおけているようである。これらは、今回の地震活動全般を互いに関連づけて考える手がかりを与えているものと思う。

以上は、松代盆地を中心にみた場合の地下構造と地震の関係である。もう少し広くみる。関谷経井沢測候所長の調査によると、信越地方に発生した群発地震(鳴動を含む)は、上越国境の浅貝付近より志賀高原を経て北アルプスの焼岳に至る間で、過去100年間に8回ほど起きており、その地震の最大規模は $M < 6$ とみてよく、付近に活火山のある場合、数カ月後に噴火を伴う。これに対し、その北側の地域では群発地震はみられず、地震の規模も大きいものは $M \geq 6$ であるという。前者は、フォッサマグナ帯の中の飯島のいう中央隆起帯に

属し、その多くが火山岩の広く分布する地域で、後者は、中新世後期より第四紀初期にかけて地層の厚く発達し、NE—SW方向を軸とする褶曲構造の発達した裏日本油田構造地域に属する。群発地震の地帯はその境目に近いやや内側に分布しているが、それに対応する明りょうな構造線はみられない。

松代群発地震についてもその震央分布域の長軸は、善光寺平とその東側山地の境にある断層線より数 km 東側にある。しかもその西側に主として湧水（含温泉）や地盤の異常があり、その東側は湧水で悩んでいるといわれている。しかもこの軸にほぼ沿って点々と温泉が分布し、保科—長野、屋代—皆神山周辺—長野の水準測線上の隆起のピークもほぼこの軸上にあたる。これから妙徳山—高遠山を結ぶ線あたりに、構造的弱線の存在を疑わせるが、地質学的には見いだされない。瀬谷の重力探査の結果をみると、千曲川東側に高重力の所が点々とならび、そのさらに東側に低重力の所がまた点々とならんでいる。震央分布の長軸は、これらNE—SW系の構造の中、低重力の地帯にほぼ合致する。なお、重力図についてはさらにこまかくみると、若穂や皆神、森の地震群は何れも重力の低い部分に、比較的よくまとまって発生しているように思われる。

構造に関係あるものとしては、初動の分布の大半が、従来の信越地方に発生した地震と同じ方向をもつことから、一つ一つの地震はEW方向の圧縮、NS方向の引張りにより発生していると考えられる。前述の三角測量の結果もこれに整合している。

以上いくつかとりあげてみた現象は、今回の地震と地下構造の関係が深いことを示している。なお、今回の地震の毎日の度数分布をみると火山活動の場合とよく似たパターンを示し、また、震源分布の鉛直断面も上方にとがった三角分布を示し、これも噴火の際とよく似ていと火山関係者から指摘されている。地下構造と関係の深いのは、一つには浅い地震だからでもあるが、それだけでなく、今回の地震に火山性要因が働いているからではなからうか。もちろん、個々の地震は当地方に以前より働いている応力を解消する方面に発生はしているが、とくにこの地帯はフォッサマグナ形成後、火山活動（および後火山作用）が今なお働き続けている地域であり、地下における火山性活動

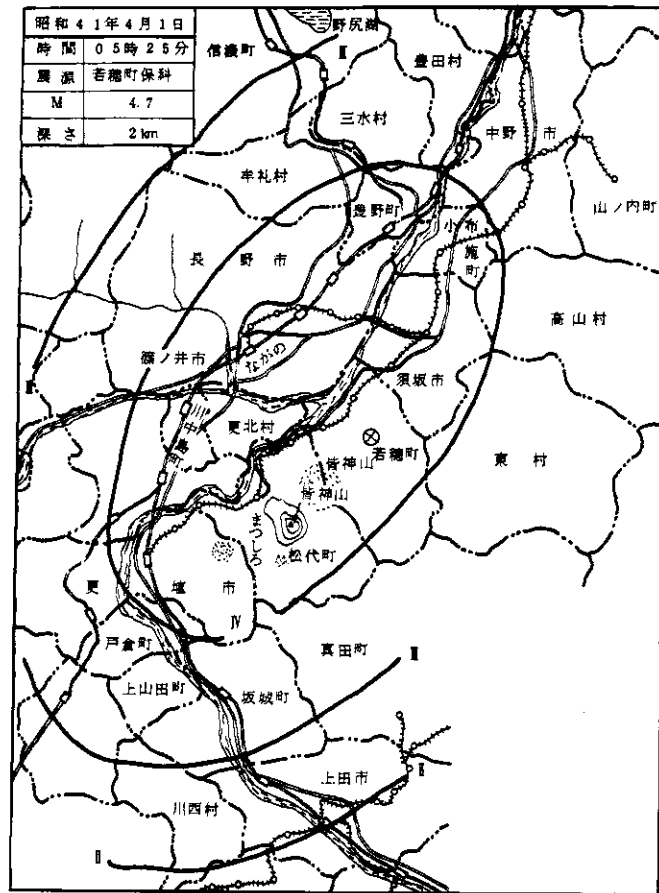
を考えることはおかしなことではない。

次に今回の地震で地下構造との関係で重要なことは、地震波の伝搬の異方性である。たとえば、1966年6月21日の地震（図—4）にみるように、若穂で震度Vの地震が発生し、長野ではIVであるが、すぐとなりの松代ではⅢないしⅡである。地震波はあたかも谷によって、その開いた方に打ち出されたかのようである。その「打ち出される方向」は、瀬谷の重力の正規構造、またはノイズ構造で、低い部分（0以下）の分布方向（NW—SE）とよく一致し、高い部分が反射壁をなすかのごとくである。同様なことは、長野市の浅川に観測点をもうけて、はじめて千曲川西岸の極微小地震がはあくされたり、Sの到達がややおそいと思われる観測点があったり、各点で求めても震源があわなかったり、地震波伝搬に地表から数 km までの地下構造が強く影響している。したがって、人工爆破のように震源の明らかな地震を協同観測し、弾性波についての浅部地下構造調査を行なう必要が、関係者の間でとええられるに至った。

以上、今回の調査を中心に地下構造と、今回の地震との関係をひろった。ここに報告されている調査は、第1活動期の震源域を対象にしているため、今日の事態にあわないので、現在（'67年2—3月）行なわれている調査結果が待たれている。

次回には、それらの結果と、コア—の測定結果、観測井による観測結果、地盤異常関係の調査を報告する予定である。

注1) 星野らの岩石力学調査によると、岩石の割れ目は松代盆地付近にほぼNS方向のものと、ほぼEW方向のものがあり、前者は千曲川沿いの断層と関係して形成されたものでなく、後者はそれより新しいもので前者の断層形成後のNW—SE方向の断層と関連して形成されたものようである。したがって、今回の全体としてNW—SE方向に活動した地帯の地割れとして、その一つ一つがEW方向で、しかもきわめて直線的でそのN側がW方向にずれており、当地における破砕性の活動としては他の諸事象ともよく整合する。なお、瀬関—滝本に発生したものはこれらと共役的なものであり、矛盾はしない。したがって、ここに述べた地割れ群は、地すべり活動とは関係ないものと考えられる。なお、今回の地震において、地震動とともに地すべり性の地割れが活動した例はない。（'67—2—21、松代地震と地すべりに関す



震度別表

度	地名
V	
IV	長野, 松代
III	
II	上田
I	軽井沢

被害状況 (長野県警測)

種別	地名	松代町	若穂町	更埴市
住家1部破壊		1		
非住家 "		1		
石垣のくずれ		1	2	1

図 - 4 震度分布の例

るシンポジウム)

注2) 当地方の温泉には、野口喜三雄(都立大学)によると、上山田、保科、湯田中などの弱アルカリ性の温泉が千曲川東側山地中にNE - SW方向に点在し、その含有Cl⁻量は温度に比例して多くなる。松代盆地内には、これと同系統の温泉が、東条の太陽通信付近や松代市街地内にも出る

が、多くはCl⁻が濃くCO₂ガスを多量に伴い、しかもCl⁻濃度は温度に比例しない全く独自の温泉水である。北野によれば、泉質的にもCaCl₂型で日本ではめずらしいという(前記シンポジウム)。その分布も弱アルカリ性温泉のそれとは直角で、松代盆地北縁にはほぼNW - SEの方向で延長も数kmと思われる。この系統の温泉は、

Cl⁻ など塩類がふえても温度が上らない所から、やや以前に形成されて地下でしばらくたくわえられ、熱を失ったものでないかと思われている。また、今回の調査で、当盆地地中にはCO₂ガスが多く、それが構造線と思われる所や菅間付近でも多いことがわかり、植物源でないこともわかった。したがって、多量のCO₂ガスが火山活動に伴われて形成され、松代盆地地下にたくわえられているものと思われる。なお、当地と浅間山に関して対称な磯部にもCO₂の著しく多い温泉がある。

注る) 松代だけでなく、北は若穂町(現長野市)、温湯(ぬるゆ)から南は更埴市石杭に至る間で発生し、何れも温泉水や湧水の増加をみた土地である。地質関係者の調査により、皆神山北側の山地

は地質時代より地すべり等の崩壊が度々あったことが明らかとなった。これに関連して盆地内の地割れが、全部地すべり活動によるものと考えた方が一部にでているが、E-W方向の直線的な地割れは、地震活動に伴う基盤の運動により生じたものとする。

参 考 文 献

- 1) 地震調査報告, 松代群発地震(第2報)
(1966) p. 11.
- 2) 飯島南海夫: フォッサ・マグナ北東部の火山層序学的並びに岩石学的研究(その1).
信州大学教育学部紀要, 12(1962),
p. 86~133.