

阿武山地震観測所と京大高圧実験の歴史

—志田順の深発地震存在の発見との関連で—

島田充彦

(元京都大学理学部阿武山地震観測所；同学学部地震予知観測地域センター；
同学防災研究所地震予知研究センター)

1. はじめに

私は、地球物理 4 回生の 1960 年に理学部附属阿武山地震観測所（1990 より防災研究所附属地震予知研究センター阿武山観測所、以後「阿武山」と略す）に配属されて以来高圧実験に携わってきた。そこでは先ず松島昭吾先生の岩石の変形破壊実験¹の手伝いをした。それは試験機に 1 つ 100 kg などの錘を 2 人で人力でいくつかを載せたり降ろしたりするものであった。その試験機は、志田順と松山基範により設計され、大正 7 年(1918)に大阪の安治川鉄工所によって製造された 150 kN の重錘式圧縮装置であった。この装置は阿武山観測所に現存している^{2,3}。

何故、阿武山にその設立（1930）より古い装置があり、志田順と松山基範がそのような装置を作成しようとしたかは、4 回生の学生には知る由もなかった。後年、その経緯を知り、また、志田⁴の深発地震の存在の発見と関係あると考えるに至った。ここではそれらについて、京大地球物理学関連の高圧実験の歴史と共に述べる。

なお、本研究会の世話人から与えられた標題は、標記のように京大高圧実験の歴史とある。事実、京大では理学部の化学教室、地質学鉱物学教室や物理学教室、工学部の土木工学教室、農学部、化学研究所などで高圧実験は行われている。これらの中には地球物理学と密接に関連するものもあるが、ここでは省略する。

2. 京大地球物理学関連の高圧実験の歴史

京大地球物理学関連の高圧実験は、阿武山で上記の重錘式圧縮装置が松島により組み立てられたことから始まると思われる。この装置により、1 軸荷重下での岩石の変形破壊実験や、長時間の一定荷重実験、すなわちクリープ実験が行われた^{1,5}。

1955-1956 には阿武山に、「岩石の流動と破壊」の名目で 3 GPa 発生可能な高圧発生装置が設置された。これは当時最先端の高圧実験を行っていた京大物理化学教室の指導の下に設計されたものである⁶。その後、この装置は油圧式 3 軸試験機（静水圧（封圧）500 MPa、1 軸圧縮能力 2.5 MN、温度 300°C）や油圧復動プレス（4 MN）に改造された。3 軸試験機は岩石の変形破壊実験に用いられ、多くの成果が発表された。中でも、岩石の破壊前の体積膨張、いわゆるダイラタンシー、の封圧下での初めての観測と、それに伴う弾性波速度の変化の測定⁷は、国内外で高く評価されている。その後、この 3 軸試験機は、さらに高い封圧（800 MPa）と高温（500°C）下で精密な岩石の変形破壊実験を行うため改造された⁸。

復動プレスは、後に追加された 5 MN 復動プレスと共に、ピストン・シリンダー型容器（2 GPa；5 GPa）やガードル型容器（8 GPa）の駆動に用いられた。それらにより、岩石と鉱物の弾性波速度、融点、相転移、粘性、電気伝導度、熱伝導度などの高圧・高温下での物性が、地球内部の物性解明のために測定された⁹。また、地球物理学教室（後に教養部地学教室に移設）にもプレスが設置され大容量のピストン・シリンダー型容器により精密な高圧・高温下の岩石の弾性波速度の測定が行われた。

1973 には地震予知研究計画により阿武山に 5 MN 油圧ラム 6 基からなる 6 方押しプレスが設置された。この装置に先端 10 x 10 mm のアンヴィルを用いることにより 12 GPa、また、20 x 20 mm のアンヴィルにより 6 GPa の発生が可能となった。2 段式アンヴィルの試作により 25 GPa の超高压の発生も試験的に行われた。又、この装置は、岩石の変形破壊実験を目的として 6 基のラムは独立に駆動されるように設計され、固体圧力媒体を用いて従来行われていなかった 3.7 GPa まで（温度 700°C）の高い封圧下での岩石の変形破壊実験を可能とし、多くの新しい知見をもたらした¹⁰。

3. 重錘式圧縮装置

阿武山には、明治 41 年からの地球物理教室関連の古い種々の書類が残されている。それらを三木晴男教授が活字化されたものが「阿武山の古文書」として印刷されている¹¹。その中で、大正 7、8 年の項に上記重錘式圧縮装置に関する書類が掲載されている。それらの概要は：

大正 7 年 (1918) に京都帝国大学理科大学教授理学博士 志田 順と同助教授 松山基範が「高圧力ニ於ケル物性ノ研究」の課題名で、2 万気圧の圧縮装置の製作を計画した。それは、圧縮装置本体と直径 1 cm または 1.5 cm の 2 万気圧発生装置及び高温発生用電気動力並びにその設置建物まで含んでいたが、予算の関係で取りあえず圧縮装置本体のみを大正 7 年度に完成させた。製作は大阪の安治川鉄工所により行われ、大正 8 年 3 月 29 日に京都市上京区吉田町京都帝国大学理工科に納入された。

である。また、昭和 2~6 年の項には「地球物理学教室移転に伴う経常費の増額」があり、地震学関係の部分を実験山へ、地磁気関係の部分を実験の火山研究所に移すとある。従って、この装置が阿武山へ設置されたことになる。しかし、大正 9 年から阿武山設立の昭和 5 年までの 11 年間、組み立てられて誰かが使ったか、どうなっていたかは不明である。先に述べた松島の 1956 の論文¹まで記録は残っていない。

さて、この装置は、梃子の応用で、支点から 2 m のところに 1,500 kg の錘を加えることにより支点から 20 cm のところの試料部に最大 15 ton ($\cong 1.5$ kN) の荷重を賦与するものである。単純計算で直径 10 mm の試料空間に 2 万気圧 ($\cong 2$ GPa) の圧力が発生できることになる。しかし、このような単純計算での圧力発生は不可能であるが、この時代に日本でも地球科学における高压実験の萌芽があったことは注目に値する。

4. 深発地震の存在の発見との関連

深発地震は地下 60~70 km より深いところで（深さ 300 km を境に、やや深発地震 (intermediate-focus earthquake) と深発地震 (deep-focus earthquake) に分けられることが多い）起こる地震であり、地下 60~70 km 以浅で起こる浅発地震と異なり、世界的に特定の地域でしか起こらない。即ち、例外もあるが、島弧-海溝地域でしか起こらない。しかもそれらは海溝側から島弧側へ傾いて深くなる面状に発生しており、プレート・テクトニクスでの沈み込み帯を形成している。すなわち、海嶺から拡大してきた海洋プレートは、大陸プレートにぶつかり海溝を生じながら、マントル深部へもぐり込む。もぐり込むプレートはスラブと呼ばれ、深発地震を起こしながら深さ数 100 km まで沈み込み、沈み込み帯を形成する。また、深さ 680 km より深くで起こる地震は現在までのところ観測されていない¹²。

日本の地震学の年表には、1926 年志田順：深発地震の存在の提唱⁴、1927 年和達清夫：深発地震の存在の証明¹³とある。これが世界で最初の深発地震の存在の発見であるが、世界的には、英文の論文である Wadati (1928)¹³が最初であるとされている。それ以前にも、地下 60~70 km より深い地震が存在するという報告はあるが（例えば、1913 Pilgrim, L.; 1921 Walker, G.W.; 1922 Turner, H.H.）、それらの精度は悪く、例えば、刻時精度が分のオーダーであったり、震源が地上に求められたり、信用されるものではなかった。しかし、当時日本では地震観測網はかなり整備されており、精度の高い観測がなされていて、信用できるものであった。

志田の仕事を正當に評価する論文も出ている¹⁴。さらに、Frohlich¹⁵は正しいデータと理論に基づく重要な科学的発見の功績について、1865 に発表されたが死後 16 年の 1900 まで知られなかった Mendel の遺伝の法則発見の場合を例示し、深発地震の発見の場合、Mendel に当たるのが志田順であると述べている。すなわち、1926 年に別府地球物理学研究所開所式で発表後、学術誌に出版されたのは死後の 1937 年であったからである。尤も、1927 年には「地球」に雑録として、図は省略されて、掲載されている。1937 年の「地球物理」には論文の体裁で掲載されているので⁴、Frohlich¹⁵の譬えは必ずしも誇張ではないかもしれない。

志田の考え⁴をまとめると次のようになる：(1) 明治 39 (1906) 年 1 月 21 日の強震は、日本各地や外国への初動の到着時刻の比較からかなり深くで起こったものと考えていた（現在の推定では、震央三重県沖、 $M = 7.6$ 、深さ 350 km）。(2) 大正 15 (1926) 年 7 月 27 日の関西地方の地震は、日向灘、能登西方日本海中や熊野灘が震源と発表されていたが、日本各地の初動の向きから、震央琵琶湖付近で深さ 260 km と推定した（現在の推定は震央滋賀県北部、 $M = 6.8$ 、深さ 360 km）。(3) アイソスタシー説（当時の地球内部構造は、未だ地震波速度分布もなく、アイソスタシー説による地下 100 ~ 200 km 以深は粘性の低い物質からなると考えられていた）と深発地震の存在との抵触、また圧力 2 万気圧 ($\cong 2$ GPa) で岩石が流動性を帯びるという実験結果（引用されていないが、年代と内容から Bridgman の実験¹⁶と推察される）から、深さ 260 km（圧力 10 GPa に相当）で地震が起こるためには、何か別の機構が存在するはずであることを指摘している。

従って、志田・松山の 1918 年の「高圧力に於ける物性の研究」は、深発地震の発生機構の解明を目的としていたものと推測できる。

5. おわりに（深発地震の発生機構）

深発地震の発生機構は、近年高圧実験によってかなり解明されてきた。それには京大地球物理関係者も他の日本人研究者も寄与しているとはいえないが、志田と松山が目指していたことがどのような形で実現したかを、概括しておく。

深発地震の存在が明らかになって以来、その発生機構に関する多くの説が提唱されてきた。それらは、浅発地震のものに類似の摩擦不安定説、塑性不安定説、剪断不安定説、相転移説などであるが、夫々一長一短があり、必ずしも満足には深発地震を説明できない。

摩擦不安定説は、地下深部の高圧高温下では、乾燥状態では脆性的な破壊（摩擦すべり）より塑性流動が卓越し、有効ではない。しかし、間隙水圧が存在すると有効圧力が減少し、見かけ上岩石には小さい圧力しか加わらないので、岩石は脆性領域の破壊を起こす。蛇紋岩のような含水鉱物を含む岩石は、低温では脆性的に振舞い、温度が高くなると延性化する。さらに温度が高くなると、含水鉱物が脱水反応を起こし、解離した水が間隙水圧を高めて再び脆性化する（高温再脆性化）¹⁷。この実験はプレート・テクトニクス確立以前のものである。スラブは水を含む海洋プレートが沈み込むことから、この高温再脆性化による摩擦不安定説は（やや）深発地震の発生機構として有効であると復活している。ただし、含水鉱物は地下 300 ~ 400 km より深くに相当する圧力では存在できないので、それより深い地震にはこの説は有効ではない。

地下 410 km から 680 km までの地震学的遷移層はマントル鉱物の順次の相転移あるいは化学変化により説明されることと、680 km より深い地震が観測されていない事実とを考えると、相転移説は有効である。しかし、相転移による破壊があるとしても、それは急激な体積減少によるもので発震機構は等方的である。観測される深発地震の発震機構は、大部分は浅発地震と同じ 4 象限型ダブルカップルであり、相転移説は発生機構としては不十分であるとみなされた。それを覆す実験が行われた。

Durham ら¹⁸は、ガニメデなどの氷惑星や氷衛星の物理過程の研究のため、氷の封圧下での変形実験を行った。氷-Ih 相（常温常圧の氷）は、その安定領域では塑性流動する、又その高圧相である氷-II 相に試料全体が転移すると塑性流動する。しかし、差応力が高くなり平均圧力が準安定的に高圧相に入り、しかも試料全体は高圧相に転移しないような条件では、シャープでスムーズな破断面をもち、最大剪断方向（破壊角 45°に相当）の破壊が起こることを見出した。このような準安定

条件下での相転移に伴う破断面形成は転移断層形成と呼ばれ、その後の研究から、この破断面にのみ高压相が存在することから、反クラック (anti-crack) の概念が導入された¹⁹。すなわち、クラックの概念は、ある物質の割れ目にはその物質より低密度のもの（一般には環境流体または真空）が存在することであり、これに対して反クラックでは割れ目に周囲より高密度のもの（高压相）が存在する。反クラックの進展による破壊なら、クラックの進展に伴う浅発地震と同様の発震機構が期待され、また、スラブが沈み込むにつれて、沈み込まれる物質は準安定的に高压相領域に進行していくことを考え、この転移断層形成が深発地震の発生機構として有力視されている。その後、氷以外の鉱物の相転移やマントル遷移層で重要なかんらん石-スピネル転移についての実験も行われ、同様の転移断層形成が起こることも明らかにされている。

その他にも、非常に高い圧力下では物質は非晶質化することが見出されている。特に蛇紋石のような含水鉱物は非晶質化に伴い AE と呼ばれる弾性波動（実験室での地震の雛形のようなもの）を発生することから、深発地震の発生機構として提唱されている²⁰。

マントル地震の発生頻度は、深さと共に減少し 300~400 km で極小となり、再び増加し 600 km あたりに極大をもち、680 km でなくなる¹⁵。このことから、一般に 300~400 km までのやや深発地震の発生機構は、含水鉱物の脱水による高温再脆性化説、それ以深の深発地震に対しては、転移断層形成（反クラック）説が支持されている。

（文献）

1. 松島昭吾, 1956, 花崗岩の変形と破壊について, *地震* **2**, 8, 173-183; Matsushima, S., 1960, On the flow and fracture of igneous rocks, *Bull. Disaster Prevention Res. Inst., Kyoto Univ.*, No. 36, 2-9.
2. 島田充彦, 1963, 高压実験による深発地震発生機構の解明, *高压力の科学と技術*, **2**, 151-160.
3. 秋本俊一, 物性研のテトラヘドラル・プレス 30 年に憶う, *高压力の科学と技術*, **2**, 177-178.
4. 志田 順, 1926, 深発地震の存在の提唱: 京都帝国大学別府地球物理研究所における謝辞, *地球*, **7**, 87-89 (1927); *地球物理*, **1**, 1-5 (1937).
5. Watanabe, Hikaru, 1963, The occurrence of elastic shocks during destruction of rocks and its relation to the sequence of earthquakes, *Spec. Contr. Geophys. Inst., Kyoto Univ.*, No. 3, 297-302; 前田純一, 1974, 封圧下における花崗岩のクリープ破壊と Elastic Shocks, *地震* **2**, **27**, 65-74.
6. Kiyama, R., 1956, High pressure equipments in Abuyama Seismological Observatory of Kyoto University, *Rev. Phys. Chem.*, **26**(1), 24-35.
7. Matsushima, S., 1960, Variation of the elastic wave velocities of rocks in the process of deformation and fracture under high pressure, *Bull. Disaster Prevention Res. Inst., Kyoto Univ.*, No. 32, 2-8; Matsushima, S., 1960, On the deformation and fracture of granite under high confining pressure, *Bull. Disaster Prevention Res. Inst., Kyoto Univ.*, No. 36, 11-20.
8. Yukutake, H. and Shimada, M., 1995, A novel triaxial testing apparatus for deformation, fracture and frictional sliding of rocks at high pressure and temperature, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, **32**(2), 181-184.
9. 島田充彦, 2001, 実験室で地球内部をさぐる-高压プレスと共に 38 年-, *京大防災研年報*, No. 44, 27-46.
10. Shimada, M., 2000, *Mechanical Behavior of Rocks under High Pressure Conditions*, A.A. Balkema, Rotterdam, 178 + x pp.
11. 三木晴男, 1985, 阿武山の古文書, *地震予知「きんき・けいはんしん」会報*, No. 8, 21-37.
12. Stark, P.B. and Frohlich, C., 1985, The depths of the deepest deep earthquakes, *J. Geophys. Res.*, **90**, 1859-1869.
13. 和達清夫, 1927, 深発地震の存在とその研究, *気象集誌*, **5**, 119-145; Wadati, K., 1928, Shallow and deep earthquake, *Geophys. Mag.*, **1**, 161-202.

14. Frohlich, C., 1987, Kiyoo Wadati and early research on deep focus earthquakes: Introduction to special section of deep and intermediate earthquakes, *J. Geophys. Res.*, **92**, 13,777-13,788.
15. Frohlich, C., 2006, *Deep Earthquakes*, Cambridge Univ. Press, Cambridge, 573+xv pp.
16. Bridgman, P.W., 1918, The failure of cavities in crystals and rocks under pressure, *Am. J. Sci.*, **45**, 243-268.
17. Raleigh, D. and Paterson, M.S., 1965, Experimental deformation of serpentinite and its tectonic implications, *J. Geophys. Res.*, **44**, 653-669.
18. Durham, W.B., Heard, H.C. and Kirby, S.H., 1983, Experimental deformation of polycrystalline H₂O ice at high pressure and low temperature: Preliminary results, *J. Geophys. Res.*, B377-B392.
19. Kirby, S.H., 1987, Localized polymorphic phase transformations in high-pressure faults and applications to the physical mechanism of deep earthquakes, *J. Geophys. Res.*, **92**, 13,789-13,800.
20. Meade, C. and Jeanloz, R., 1991, Deep-focus earthquakes and recycling of water into the earth's mantle, *Science*, **252**, 68-72.