

京大における爆破地震動観測と地殻構造の研究

橋爪道郎（昭和 36 年卒）

Michio HASHIZUME

17 Mu 8, Suan Luang, Amphoe Amphawa, Samut Songkhram 75110, Thailand

1. はじめに

日本における地殻構造を調査するための最初の人工地震観測は 1950 年岩手県石淵ダムでの採石爆破を利用して行われた。これを契機に爆破地震動研究グループが生まれた。地震源はおもに産業活動による大爆破が利用されこの名称が引き継がれた。発足当時の大きな問題点と技術開発の中心は、可搬高感度の地震計の開発、高精度の時刻信号の受信と記録装置であった。各観測班はこの観測装置一式を持ち運んで 10Km 程度の間隔に観測点を設置し、可能なかぎり 300Km にとどくようなアレイの体制を組むのであった。観測点の位置測定は測量によった。京都大学からは 1953 年釜石鉱山における爆破地震動観測に三雲健・中川一郎が参加したのが最初であった。その後地震観測特に微小地震観測の技術の開発にともない、人工地震観測装置一式もコンパクトになってはいるが、適切な観測点を探すのは依然容易ではない。

2. 爆破地震動の観測

研究目的は地殻構造の解明である。初期の爆破地震動の研究成果として、地質構造に拘わらず、上部地殻はほぼ一様に P 波の地震速度が 6.0 – 6.1 km/s 程度、Birch による古典的な岩石実験から平均原子量が花崗岩に相当する岩石の速度を持つことが明らかになった。これは不思議なことである。いわゆる地震屋さんが描く地殻構造と地質屋さんが描く地質図は別物で相互の不信感を強めた。ごく浅い風化層ともいべき地表部分を除けば、この上部地殻の速度は日本のみならず、大陸のどこで測定しても同じような結果が得られている。この花崗岩層の下部 15 km 程度に、P 波速度が 6.5-7.0 km/s の安山岩—玄武岩程度の速度を持ついわゆる玄武岩層があることは大体わかってきた。しかし観測された走時曲線から下部地殻の構造を決めることは非常に難しい。爆破地震動解析上の問題として、屈折法をとる限り本質的に微小な屈折波の初動の立ち上がりを読み取ることになり、時刻の精度を上げたところであまり効果がない。地震計の感度を上げてでも避けがたい常時微動はどうすることもできない。また多くの場合この下部地殻からの情報を直接運んでくる初動は走時曲線のもとでマスクされた状態となる。これが反射法であっても別の問題が発生して下部地殻の速度構造を知るとは今でも難しいことになっている。さらにその下限のマントルとの境界いわゆるモホロビチツク面（モホ面）はどのような形態になっているのであろうか。もしそれが急激な速度構造の変化だとするとその全反射が観測されてもよいはずである。グループ員の大きな興味のまま日本ではほとんど観測されていない。

問題点を取りまとめると：

1. 上部地殻はなぜ一様な速度構造をもつのか。その厚さは構造帯によりどのように変動をするのか。その地質的あるいは地震の発生場としての意味づけはどうなるのか。
2. 下部地殻は広域的にあるいは深さ方向に（場合によっては低速度層があってもよいがその場合は解析が一段と面倒になる）どのように変化するのか。上部地殻と下部地殻の境界としていわゆるコンラッド面なる速度跳躍が観測されたという報告が大陸地域でしばしば見受けられる。日本ではほとんど観測されていない。筆者の知る限りでは溝上恵などが岡山県渋川に設置された中周期地震計で観測された地震波に明瞭にみられたという報告がある。この下部地殻の物性は何であるのか。地殻の生成の問題として上部地殻と下部地殻の関係は重要である。

3. モホ面の問題は特に日本における爆破地震動観測において頭の痛いところであった。モホ面は存在しないとして下部地殻から連続的に地震波速度がマントルのそれに遷移しても走時曲線解析の問題としては不都合はない。一方大陸地域の観測においては多くの場合モホ面からの強い反射が認められている。日本列島にはモホ面は形成されなかったのか。あるいは地殻変動により破壊されてしまったのか。

3. 京大における爆破地震動研究グループの活躍

京大において常時かなりの数のグループメンバーが存在した。ひとつはこの爆破地震動観測はすべての意味で良き観測地震学のモデルであったからである。多くの地震学を志す諸君はこの観測で修練をうけ、それぞれの分野の専門的な観測に従事していた。しかし地殻構造の解析に参加したメンバーは多くはない。

1968年浅野周三が計画した爆破地震動における日ソ協力は画期的な事業であった。両国が数人の地殻構造に興味を持つ地震学者を招待してお互いの観測現場とその観測結果を提示するプロジェクトであった。京都大学からは著者が参加した。ウクライナに連れて行かれて、観測車に乗せられた。カウントダウン、発破、約10秒あまり、記録計のガルバノメーター記録が一斉に揺れ始めた、モホ面からの反射波の到来である。その後日本においても、モホ面の反射波の観測に成功したという幾つかの報告はあるが、多くは期待通りの結果が得られていない。日本の観測において問題となる複雑な表面地質に由来すると思われる低いS/N比のためか、火山活動・あるいはデラミネーションなどの作用によるモホ面付近の複雑な構造のためであるか。論理的には波動論を用いれば観測記録は一定の地殻モデルにより説明がつくはずである。橋爪道郎・伊藤潔などは波動論を用いて日本における爆破地震動記録のシミュレーションを行なったがおおきな成果は得られなかった。

その間、微小地震観測が地震予知のための事業として展開された。その観測結果は地殻構造の解明に大きく貢献した。筆者は微小地震の多くは上部地殻で発生することを突き止めた。筆者はさらに震源の深さが正確にきめられた微小地震の走時を解析してポワソン比が上部地殻と下部地殻の境界付近で急に大きくなることを発見した。つまり下部地殻はより柔らかい物性を持った岩石によって構成されているようである。その後、たとえばGPSによる地殻変動解析などによると、上部地殻の変動は地震の破壊現象として進行するのに対して下部地殻はどちらかというと粘弾的な挙動を行なうことが分かってきた。つまり地震は主に上部地殻の破壊現象によって発生するのである。

筆者は1969年に岡山大学に出向したが、この問題は長いこと筆者の心の中にあった。一言にいうと岩石学でいう「花崗岩成因論」である。古典的な岩石実験では收拾がつかないことはすでに分かっていた。この問題への日本の地質学者による貢献は大きい。マントル物質に含まれる少量の水はその分別溶融に強い影響を与える。これによりマントル物質から玄武岩ないし安山岩が生成されたとする考えはたぶん大丈夫であろう。それでは6.1 km/s程度の速度を持つ花崗岩的な上部地殻はこの下部地殻のさらなる火成活動を経て、地表で風化変成作用などを伴い地球物質の最終的な産物として作られたのであろうか。カナダの盾状地でこれを示唆するK-feldspar (カリ長石) に富む巨岩を強い印象をもって眺めた。しかし地殻上部を構成する花崗岩層のバルクを説明する岩石学のモデルはなかった。

地震は岩石の破壊で発生する。その破壊を誘起する要因として、少量の水が想定されている。水は地殻物質の強度を落とす作用を成す。そして水は上部地殻が生成されたときあるいはその後変成作用で脱水をした際に放出されるであろう。時として地表水により地震が誘起されこともあるようである。その破壊の記録は断層として残されているであろう。屈折法を主とした爆破地震動解析でこれを検出するのは容易でない。

海洋の地殻は大陸の地殻とまったく異なる。そしてその海洋地殻と大陸地殻の境界である海溝付近の構造はどのようなになっているのであろうか。海洋地殻の研究はプレート・テクトニクス発展に貢献するところが大きであったが、発展初期の問題に関して京都大学の貢献はほとんどなかった。

4. いくつかの問題と展望

以上大陸地域における地殻構造の問題を論じた。では島弧ではどのようにになっているであろうか。東北を横断する大爆破の実験が 1965 年気仙沼沖、1966 年男鹿半島沖で実施された。その解析に京大からは橋爪道郎・尾池和夫が参加した。発表されたモデルは大陸地殻の標準的な速度を与えて、走時にある適当な重みを与えて作られたものである。いま考えてみるとやはり大陸標準モデルを参照したのは間違っていたようである。その後、吉井敏剋らによって提出された上部マントルの速度を 7.5 km/s とした構造は島弧をより良く代表しているように思われる。しかしここで島弧から海溝に推移する区間の地殻はどう変化しているのかにはあまり注意が払われなかった。両モデル作成の際の差異は上部マントルの速度の仮定のほかに、S/N 比の悪いデータの取捨選択と重みつけもあった。しかしその結果は島弧から海溝に至る遷移地帯で単に地殻が薄くなってゆくのではなく、双方のモデルとも下部地殻は太平洋側では海溝近くまで、そして日本海側でもそれと同程度の沖合まで、ほぼ同じ厚さであるのに対して上部地殻のみが薄くなっている。この事実は花崗岩成因論に重要な示唆を与えるように思われる。

実体波による走時曲線の解析に伴う危険性はその最も早く到達する地震波行路の情報のみを与えることである。したがってバルクの地層としての地震学的情報は構造全体の情報を一様に伝播してくる情報媒体を利用しなければならない。筆者はカナダの盾状地においてまれに発生する地震の表面波を利用して、この盾状地を形成年代別に速度構造を求めてみた。かなり面倒な手続きを必要とするが、表面波速度はその周期によって運ばれる伝播媒体の情報量が異なることを利用して、これと盾状地の生成年代の行路のマトリックスを選別的に掛け合わせた。ほぼ上部地殻の情報のみを運ぶ 5 秒程度の波から上部マントルまで浸透した 20 秒程度の波を乱れることのない表面波として観測できたのは驚異的なことであった。その結果この広大な盾状地の地殻物性は上部地殻・下部地殻とも年代に拘わらずバルクとしてほとんど一定であることが分かった。

四国の三波川構造帯に地殻深部で変成を受けたと思われる地層が観察される。これを当時の瀬戸大橋架橋工事の爆破を利用して速度構造を求めた。意に反してどこにでも観測される花崗岩層に相当する速度が観測されただけで地殻深部において生成されたと思われる物質に相当する速度は検出されなかった。

筆者は 1982 年学究生活から離れることになった。そしていま地殻構造の問題を再度振り返ってみると疑問だと思っていた諸事項が、平朝彦らによって四国の四万十帯における付加体の精力的な調査に基づいてかなり明快なモデルとして与えられていることに気付いた。その昔室戸岬にある地球化学者に連れられて枕状溶岩をみたことがある。なぜこのようなものがここにあるのか不思議に思った。これらの海洋性の物質が最終的には付加体として下部地殻に押し上げられて物理的な破壊と、注入された水の作用による化学的反応の過程を繰り返し、さらに火成作用による安山岩質の物質と混じり、変成作用をともしない、ついに平均原子量が花崗岩くらいの上部地殻が全体としてアイソスタシーを保ちつつ形成されたのであろう。基本的には下部地殻は上部地殻より先に形成されていたであろう。このような付加体が滑り込むさい無数に発生するデコルマンなどが地震波反射面であるコンラッド面を曇らせるのであろう。

今日において、地殻に関する知識は大爆破による屈折波の解析のみでなく、地下資源探査にともなう各種のデータからも多く蓄積した。しかし、大爆破による速度解析は捨てがたい精度をもつ。地殻に応力がかかると、あるいは水が増加すると媒体の速度が変化する。現在開発されている各種の技術をさらに改良するならば、長期間の精度良いデータを得ることができるであろう。直接手に取ることができた最深の陸上ボーリングは玄武岩層にとどかない。地殻の二次元的な速度構造さらには 3 次元のトモグラフィーを作るとすると、大爆破観測手法による自然地震を利用した下部地殻の速度構造の研究は有望であろう。下部地殻の生成機構も十分解明されたとはいえない。日本において微小地震は多くの場所で、待てばかならず観測される。モホ面の反射が観測されるとすればその広がりを見ることができるともかもしれない。このためには自然地震の震源の深さを精度良く決めなければならない。浅い地震の深さを精度よく決めることは一般的にはその深さに対応するスペーシングの調密な観測網を地震発生地域直上に展開することが必要である。微小地震の観測の一環とし

て阿武山地震観測所の中村正夫が精力的に洞密地震観測網を展開したが残念ながら中断された。再度この手法を発展させてはどうであろうか。他の惑星の成り立ちは次々に解明されてゆくなか、われわれの足元の地殻の構造とその成因はまだ分かっていないことが多い。

金沢大学から京都大学の地質学教室に出向された坂野昇平には地殻の構成物質をバルクとしてとらえる考えを始終支援していただいた。幸い、COE21 を契機として地質学と地球物理学の交流は一層深められたと聞く。上記坂野昇平・岡山大学温泉研究所におられた京大地質学教室の先輩である松本隆・地球化学の松井義人らからは地球科学へ行く道を学んだ。今後環境問題などが加わるならば単に古典力学の範囲では収まらないかもしれない。

本原稿を書くに際して特に参照した文献をあげておく。各論は文献検索を利用してください。本文における著者引用は第一著者以外は京大の関係者のみ掲示した。

(文献)

平朝彦 地質学 *1* (2001) ; *2* (2004) ; *3* (2007) 岩波書店

巽好幸 安山岩と大陸の起源 (2003) 東京大学出版会

Hashizume, M. Investigation of microearthquakes, Disaster Prev. Res. Inst. Kyoto Univ., (1969) **19**, pp 67-85 ; (1970) **19**, pp 1-17 ; (1970) **20**, pp 53-64 ; (1970) **20**, pp 65-94

Hashizume, M. Surface-wave study of the Canadian Shield: 1976, Phys. Earth Planet. Interiors, **11**, pp 333-351

Hashizume, M., K. Oike, S. Asano, H. Hamaguchi, A. Okada, S. Murauchi, E. Shima, and M. Nogoshi, Crustal structure in the northeastern part of Honshu -- Part II Crustal structure: 1968, Bull. Earthq. Res. Inst. Tokyo Univ., **46**, pp 607-630

Yoshii, T. and S. Asano, 1972: Time-term analyses of explosion seismic data, J. Phys. Earth, **20**, 47-57