上部マントルの S 波速度が表面波の 分散に及ぼす影響

法政大学工学部 小 口 雄 康

東京大学理学部 竹 内 均

(昭和 43 年 12 月 14 日受理)

Effects of Shear Wave Velocity in the Upper Mantle to Surface Wave Dispersion

Yûkô OGUCHI

College of Engineering, Hosei University

and

Hitoshi TAKEUCHI

Geophysical Institute, Faculty of Science, The University of Tokyo

(Received December 14, 1968)

Partial derivatives of Love and Rayleigh wave phase velocities with respect to changes of shear wave velocity in the crust and upper mantle are computed as functions of depth and wave period. The partial derivatives for Love wave, $(\partial c/\partial \beta)_L$, decrease monotonously with depth, but those of Rayleigh wave, $(\partial c/\partial \beta)_R$, do not. So, the change of shear wave velocity gives different effects to Love and Rayleigh wave phase velocities.

In the crust, the ratios $(\partial c/\partial \beta)_L/(\partial c/\partial \beta)_R$ are much greater than 1. Then Love wave dispersion is much more influenced than Rayleigh wave dispersion by the change of shear wave velocity in the crust.

In the upper mantle, the ratios $(\partial c/\partial \beta)_R/(\partial c/\partial \beta)_L$ are greater than 1, being 1.5~2.0. By 1 km/sec decrease of shear wave velocity of a suitable layer of 20 km thickness at some depth in the upper mantle of model CANSO, Rayleigh wave phase velocity is decreased by about 0.1 km/sec. Shear wave velocity hereabout is 4.72 km/sec. So, if the shear wave velocity is decreased to zero, Rayleigh wave phase velocity is decreased by about 0.5 km/sec. Thus, discrepancies between Love and Rayleigh wave dispersion results in Japan and in central U.S.A. can be explained by assuming existence of a few soft, thin layers sandwiched by a hard upper mantle matrix.

§ 1. 緒 言

ある基準となるモデルについて表面波の分散を求めておけば、このモデルの物理定数をわずかに変えたモデルの分散が変分法によつて簡単に求められる。そして、このための数表が作られている [例えば, ANDERSON (1963), TAKEUCHI 他 (1964)]. 世界各地の地下構造は、それぞれ異なつているとしても、その差異はこの数表から分散を計算できる程度のものである。従

つて、ある分散曲線が知れたとき、基準のモデルの物理定数をどのくらい変えればよいか計算できることになる。特に、Love 波、Rayleigh 波の両方の分散が知れているとき、この分散を同時に満足させるようなモデルを求めることができる。しかし、この方法からモデルが決められないような観測が、わずかではあるが報告されている [MCEVILLY (1964), KAMINUMA (1966)]. すなわち、Rayleigh 波の分散を満足させるモデルの与える Love 波の分散と観測された Love 波の分散との間に、明らかにくい違いがあるような場合である。このくい違いは、媒質が等方、かつ、深さ方向に物理定数が変化する不均質であるとして分散を求めたことに由来すると考えられている。従つて、この仮定をはずせば、くい違いは説明される。

本報では、この点に注意して、モデルの物理定数を変えることが、Love 波、Rayleigh 波の分散にどのように影響するかを調べ、かつ、上述のくい違いがどのように説明できるかを考察してみた。なお、取り扱った表面波は、周期 20 秒から 60 秒までで、深さ 200 km くらいまでの媒質で分散の特性が決められるものに限っている。

§ 2. S 波の速さの変化が表面波の分散に及ぼす影響

媒質の物理定数の組合せは、いろいろ考えられるが、実際の観測値と比べるには、密度・P 波の速さ・S 波の速さの組合せが便利である。この組合せで、密度・P 波の速さの変化は、S 波の速さの変化と比べて分散に及ぼす影響ははるかに小さい。従つて、大勢をみるには S 波の速さの変化だけを考えればよい。

基準モデルとして、Gutenberg モデルを用いる。ある深さの S 波の速さ β が $\partial\beta$ だけ増加し、他の物理定数が一定であるとき、位相速度 c が ∂c だけ増加したとき、この両者の比を $(\partial c/\partial\beta)_L$, $(\partial c/\partial\beta)_R$ とかき、添字 L ,

Fig. 1. Partial derivatives of phase velocities of Rayleigh and Love waves with respect to the unit change of shear velocity in the Gutenberg model.

R で Love 波, Rayleigh 波の区別を示すことにする. Fig. 1 に, この値を周期 (秒) をパラメータとし, 深さの関数として示してある.

$(\partial c/\partial \beta)_L$ は, 深さと共に, ほぼ単調に減少しているが, $(\partial c/\partial \beta)_R$ は, ある深さで極値をもつ. このことは, S 波の速さがどの深さで変化するか, Love 波, Rayleigh 波の分散に異なつた影響を与えることを意味する.

これをはつきりさせるため, $(\partial c/\partial \beta)_L/(\partial c/\partial \beta)_R$ の値を深さに対して示したのが Fig. 2 である. この比は地殻で大きな値をもっている. すなわち, 地殻の S 波の速さを変えると, Love 波の分散に大きく影響し, Rayleigh 波の分散には影響が小さいことを意味する. この差がどのくらいあるかという 1 例を Fig. 3 に示した. 一方, 上部マントルにおいては, この比が 1 以下となる. すなわち, S 波の速さの変化が, Love 波より Rayleigh 波に大きく影響することになる. Fig. 4 に $(\partial c/\partial \beta)_R/(\partial c/\partial \beta)_L$ の値を示した. 上部マントルでは S 波の速さの変化が, Love 波のそれより Rayleigh 波の方に約 2 倍近く影響している. なお, 参考のため CANSO モデル [BRUNE 他 (1963)] におけるこの比も Fig. 4 に示しておいた. Gutenberg モデルとほとんど一致した結果を与えていることは当然かも知れないが, 大変面白い.

これらの図から, ある分散曲線が与えられたとき, 基準のモデルをどの深さで変化させればよいか, 大体の目安がつけられる.

Fig. 2. Ratios of partial derivatives of Love and Rayleigh wave phase velocities.

Fig. 3. A sample of effect on the dispersion with respect to change of the shear velocity in the crust.

Fig. 4. Ratios of partial derivatives of Rayleigh and Love wave phase velocities.

§ 3. Love 波, Rayleigh 波の分散のくい違い

前述したように, McEVILLY, KAMINUMA の観測は Love 波, Rayleigh 波の分散にくい違いを生じ (Fig. 5, Fig. 6) 両者ともこの差異を異方性によつて説明している. すなわち, 媒質が水平方向, 深さ方向で S 波の速さが異なる transverse isotropy をもつとして地下構造が決められた. その方法は次の通りである.

まず, Rayleigh 波の分散曲線を満足する地下構造を決める. この構造から Love 波の分散を求めると, 位相速度の計算値は McEVILLY, KAMINUMA の両方とも, 実測値より小さくなる. transversely isotropic モデルでは, Rayleigh 波の分散は深さ方向の S 波の速さで決まり, Love 波では主として水平方向の S 波の速さで決まる [小口・竹内 (1968)]. すなわち, 水平方向の S 波の速さを増すことによつて, Rayleigh 波の位相速度に何ら影響を

Fig. 5. Love and Rayleigh wave dispersion in Japan after Kaminuma.

Fig. 6. Love and Rayleigh wave dispersion in central U.S.A. after McEvelly.

与えずに, Love 波の位相速度を大きくすることができる. この S 波の速さの増加分を適当にとることによつて実測値と一致する Love 波の分散を求めることができる. MCEVILLY, KAMINUMA の両者とも, この増加分を主として上部マントルにとつている.

こうして決められた地下構造と, 代表的な大陸構造をもち, Rayleigh 波, Love 波の分散に違いがない CANSD モデルとを比べてみよう. AKI (1967) が指摘しているように, 次の事柄に気がつく. すなわち, 1) P 波の速度分布は比較的良好一致をみせている. 2) Rayleigh 波に対する S 波の速さは, 上部マントルで CANSD モデルより小さくなる. 換言すれば, ポアソン比が大きくなる (Fig. 7 参照). 3) 従つて, 大陸構造をもつ地殻の下に柔らかい上

部マントルがあることになる. 4) 一方, Love 波に対しては, S 波の速さ, ポアソン比が上部マントルでもほとんど一致する.

これらの点に注目して, Love 波, Rayleigh 波の分散のくい違いを, 別な立場から説明したのが AKI (1967), TAKEUCHI 他 (1967) である. 上述の transverse isotropy は, 長波長の Love 波について, 厚い硬い層と薄い柔らかい層とが交互に入り混つた互層構造と同等の分散を与えることが知られている. AKI は KAMINUMA の観測に対して互層構造を考えた. そして CANSD モデルに近い構造を硬い層にとり, 上部マントルに柔らかい層を数%入れることによつて Love 波, Rayleigh 波の分散を同時に説明した. TAKEUCHI 他は, マントル中に薄いマグマ・ポケットが数%含まれていれば, Love 波にほとんど影響せず, Rayleigh 波の位相速度が小さくなることを指摘した. この両者とも, 上部マントルの構造が CANSD 的であり, おそい Rayleigh 波の位相速度は, そこに含まれている比較的わずかな柔らかい媒質によると考えている.

上に計算した $(\partial c/\partial \beta)$ の値から上述のことを説明してみよう. まず, CANSD モデルを基準

Fig. 7. Physical parameters in the models.

M: McEvelly model
G: Gutenberg model
K: Kaminuma's J-S-01
C: CANSD model

にして, KAMINUMA の観測値をみると (Fig. 5), Love 波で 0.1 km/sec から 0.15 km/sec, Rayleigh 波で 0.2 km/sec から 0.3 km/sec 小さい. 従つて, $(\partial c/\partial \beta)_R/(\partial c/\partial \beta)_L$ がほぼ 2 くらいの値をもつような深さに柔らかい層を入れればよいことになる. Fig. 4 から, 短周期では 60 km, 長周期では 100 km 位の深さに柔らかい層を考えればよい. 即ち, 上部マントルに柔らかい層を考える必要がある, Fig. 2 からわかるように地殻の S 波の速さを変えても目的は達せられない. 次に, 柔らかい層の厚さを推定するために, CANSD モデルの $(\partial c/\partial \beta)_R$ の値を調べてみる. 深さ 75~95 km の厚さ 20 km の間で, 周期 60, 40 秒で約 0.1, 20 秒で約 0.006, 深さ 35 km~55 km の厚さ 20 km で, 60 秒で約 0.04, 40, 20 秒で約 0.1 である. CANSD モデルの S 波の速さは, ここで 4.72 km/sec であから, S 波の速さを 0 にすれば, はば 0.5 km/sec だけ Rayleigh 波の位相速度がおそくなる. 欲しいのは約 0.3 km/sec であるから, 柔らかい層をマグマ・ポケットとすると厚さは 20 km もいらないことになる. $(\partial c/\partial \beta)$ の深さ分布を考えると, 数層の数 km の厚さのマグマ・ポケットを考えれば, 十分 Love 波, Rayleigh 波の分散が説明できることになる. McEVILLY の例では, Love 波の分散は CANSD モデルのそれとほとんど一致し, Rayleigh 波では 0.1 km/sec ほどおそい. 従つて, CANSD モデルよりむしろ硬い上部マントルを考え, これに極く薄いマグマ・ポケットを入れれば実測値を説明できる.

結局, Love 波, Rayleigh 波の分散の異常は, CANSD モデルに近い大陸構造の上部マントルにわずかなマグマ・ポケットの存在を考えることによつて十分説明できることが, $(\partial c/\partial \beta)$ の値から推定される.

§ 4. お わ り に

Love 波, Rayleigh 波の分散の相違が異方性によるか, 互層構造ひいてはマグマ・ポケットの存在によるかの決め手はない. しかし, 上部マントルの構造が世界中ほぼ同じで, そこに含まれているマグマ・ポケットの量がその原因となるという考えは, 大変尤もらしいと思われる. 今後観測がふえるに従つて, 話はもつとはつきりするであろう.

文 献

- AKI, K., 1967, Seismological Evidences for the Existence of Soft Thin Layers in the Upper Mantle Under Japan, *J. Geophys. Res.*, **73**, 585~594.
 ANDERSON, D. L., 1963, Universal Dispersion Tables 1, Love Waves Across Oceans and Continentals on a Spherical Earth, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **54**, 681~726.
 BRUNE, J. and J. DORMAN, 1963, Seismic Waves and Earth Structure in the Canadian Shield, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **53**, 167~210.
 KAMINUMA, K., 1966, The Crust and Upper Mantle Structure in Japan, Part 3, *Bull. Earthq.*

- Res. Inst., **44**, 511~518.
- McEVILLY, T. V., 1964, Central U.S. Crust-Upper Mantle Structure for Love and Rayleigh Wave Phase Velocity Inversion, Bull. Seism. Soc. Am., **54**, 1997~2015.
- 小口雄康, 竹内 均, 1967, 不等方性が表面波の分散に及ぼす影響 (I), 地震, **21**, 21~31.
- TAKEUCHI, H., J. DORMAN and M. SAITO, 1964, Partial Derivatives of Surface Wave Phase Velocity with Respect to Physical Parameter Changes within the Earth, J. Geophys. Res., **69**, 3429~3441.
- TAKEUCHI, H., Y. HAMANO and Y. HASEGAWA, 1967, Rayleigh—and Love—Wave Discrepancy and the Existence of Magma Pockets in the Upper Mantle. J. Geophys. Res., **73**, 3349~3350.