松代で観測された S-coupled PL 波の解析

気象庁地震観測所 山 岸 登
(昭和 46 年 8 月 5 日受理)

On the Analyses for S-coupled PL Waves Recorded at Matsushiro Station

Noboru YAMAGISHI
Matsushiro Seismological Observatory,
Japan Meteorological Agency
(Received August 5, 1971)

Frequently, normal dispersed, long-period, wave trains for which surface particle motion is elliptical and progressive in the plane of propagation of SV wave appear near the arrival time of S or SS waves at middle epicentral distant earthquakes.

The analyses of these seismograms recorded at Abuyama and Matsushiro Observatory show a good agreement with the results of direct-PL waves obtained from other shocks occurred on the same path.

Thus, such long period waves can be explained as the result of coupling between the incident SV and dispersive PL waves in the wave-guide when the apparent surface velocity of SV equals the phase velocity of PL wave at the same period and Oliver's hypothesis for the coupling could be almost confirmed from present study based on arrival times of S and SS-PL waves.

Also, the comparison between the PL wave and Rayleigh wave for the observed group velocities was made by using the theoretical dispersion curves computed by YOSHII for leaking mode and YAMAGUCHI, KIZAWA for normal mode respectively.

§ 1. ま え が き

震央距離約 25° から 65° の中距離遠地地震の長周期型地震計の記録で、S 波および SS 波の到着時刻付近に、比較的長周期の正常分散波群がしばしば出現する。波群の水平振幅は表面波と同程度の卓越を示すこともあり、また上下振幅は同じ周期のレーリー波のものよりかなり小さい。地表での分子運動は progressive な楕円運動を示し、伝播は SV 面で行なわれている。通常、S 波の出現時刻付近は PS や SP などの反射波が到達するが、それらは周期の長い波でも孤立波か継続の短い不規則波である。したがって、上述のような性質を示す波群は、J. Oliver らによる、下層からの SV 波と leaking mode による分散性 PL 波とが、マント

ルとクラストによつて形成される wave-guide 中でカップリングを起し、それ以降はその wave-guide 中を PL 波の群速度で伝播し、観測点に到達したものと解釈したい。このため、ここで述べるのは PL 波中、周期の長い fundamental mode 波とカップリングしたと考えられる波群（以下、S-PL, SS-PL で示す）の松代での解析から、J. Oliver の仮説を確かめるための一つの試みである。Leaking mode の理論および記録の解析などは higher mode を含めて既に幾人かの研究者によつて行なわれているが、カップリング波の解析例は外国でも比較的数字が少なく、特に領土が狭い上に長周期地震計での観測体制が不十分なわが国では、現在までほとんど調べられていない。もつとも、これら波群について、J. Oliver らは既に、観測から得られた PL 波の位相速度を用いて S coupled PL 波の合成理論地震記象を作図し、実際の観測記録に調和のとれた波形を描くことを示し、また吉井（1969）らはモデル実験からカップリング波の存在を確認している。実体波 SV と PL mode との間のカップリング形成の仮説は、ある周期の入射 SV 波の apparent surface velocity が、その周期での PL 波の位相速度に等しい時に生成し発達するから、wave-guide 中の条件さえ整えば長周期型地震計の機種や震央位置に因ることなく、ごく不偏的に出現することが考えられる。しかし、自然地震では leaking mode の理論的根拠はマントル最上部での P 波速度（約 8.1 km/sec）に依存するから、仮りに J-B の走時表を基準にとれば、一般的には震央距離約 52° 以遠では SS や SSS などの反射波との間でカップリングが行なわれるだろう。ここでの対象は中距離遠地地震とし、採用した資料は京都大学阿武山および松代観測所のもの、走時や見掛け速度は J-B の表から、比較に用いた理論曲線は JW-1（吉井：1970）、参考としたレーリー波では V60795R28 30H24 と H30（山口、木沢：1961）である。なお記録の解析については地震計の相違による位相差を補正したのち、例えば位相速度などは佐藤の方法（1958）で求めた。

§ 2. S または SS-PL 波の記録例

ここで掲げた記録例は、解析に用いたガリッチン地震計だけに制限したが、1 ton および WWSS 地震計でもカップリング波の良い記録は数多くみられ、震央位置でも片寄りを示さない。Table 1 は解析に用いた、ほぼ同一伝播経路上にあると見做される 6 この地震の表である。このうち No. 12—No. 15 はカップリングをしない直接の PL 波（以下 D-PL で示す）で、カップリング波からの解析結果をチェックするためのものである。

Fig. 1 では、No. 1 の地震について上に松代、下に阿武山でのガリッチン式 3 成分の記録を示した。松代の長周期 P 波初動からは震央方向が推測される。記録の中間は略したが、約 8 分経過した S 波の期待時刻付近から水平両成分に S-PL 波の良い分散波群が出現し、およ

Table 1. List of earthquakes

No.	Earthquake	Date	T(GMT)	Coordinates	(in km)	M (MAT.)	Instrument
1	Near Sumatra	26 NOV. 1959	23 09 23	6½ S. 103 E.	5950	6½-7	Galitzin
2	Near Sumatra	26 NOV. 1959	07 06 19	5½ S. 102½ E.	5930	6½-6½	"
12	Ryukyu Is.	31 DEC. 1969	19 01 56.1	28.5 N. 129.1 E.	1210	6.5	WWSS
13	Formosa	23 FEB. 1957	20 26 12	24 N. 122 E.	2070	7-7½ (PAS.)	Galitzin
14	Taiwan	27 NOV. 1970	09 39 23.2	24.2 N. 122.3 E.	2020	6	WWSS
15	Near Kyushu	14 NOV. 1968	12 11 50.1	31.6 N. 131.5 E.	805	5.0 (CGS)	"

Fig. 1. Traced records of the earthquake of Near Sumatra (No. 1) observed at Matsushiro and Abuyama Observatory respectively.

Fig. 2. Traced records of the earthquake of Near Sumatra (No. 2) observed at Mastushiro Observatory.

そ2分間つづいたのち同じくカップリングを起した SS-PL 波に連続している。これら2種類のカップリング波は阿武山の記録でも明らかで、Sにくらべ SS-PL 波群では両観測所とも短い周期の分散波群を示している。図中の大、小の黒および白丸から、約300 km隔っている上記2測点での記録上の山、谷を誤読することは考えられない。(図中のタイムは絶対時刻ではない。) もともと、記録に現われたこれら波群の周波数帯域では、理論的にも水平振幅が卓越する筈で、さらに松代の上下動は水平成分にくらべ倍率が低いので、見掛け上かなり小さく記録され、上下での S-PL 波の対応は SS-PL 波ほど明瞭でない。なお、上下動では特にレーリー波の部分まで記録を示し、No. 2 のものと共にレーリー波

の群速度を求めた。(Fig. 7 参照)。Fig. 2 は同じくスマトラ島付近の No. 2 による松代だけの記録である。水平振幅はむしろレーリー波より卓越し、波形もより良く記録されている。波群出現時の周期とか成分による振幅の大、小などは No. 1 のものとよく類似している。

§ 3. 記録の解析

i) 波の運動について

阿武山および松代での No. 1 の地震から得られた S-, SS-PL 波の地表面での分子運動とそ

の振動方向とを Fig. 3 に示した. この場合, normal mode で伝播するレーリー波についても同様のものを掲げ, 比較の対照とすれば甚だ効果的ではあるが, レーリー波の出現時刻にラブ波の尾部が混入し波形が乱れているため, 軌跡の追跡はできなかつた. 両観測点ともほぼ類似した分子運動を示し, SS-PL 波の場合でも全く同じ動きかたを展示している. 矢印の進行方向からみて, 水平成分に長軸をもつ progressive な楕円運動は全くレーリー波のそれとは逆であるし, 振動の方向はほとんど南西方向から入射する 2 測点での水平ベクトル図を満足させるなど, SV 面での伝播を明瞭に現わしている.

ii) 位 相 速 度

No. 1 と No. 2 の地震は, 2 測点間の距離および入射方向から推察すれば阿武山 (入射角 S 45° W) および松代 (同 S 44° W) に対し, ほとんど同一経路を伝播するものと判断されるから, 先に述べた方法でこれら波群の位相速度を求めた. これら 2 つの地震は位置的に極く近い本震とその余震であるから, 震源での発震機構はほぼ等しく, 長い波長の PL 波では 2 測点近傍の地盤特性も無視できよう. また記録に見られるように波形の乱れがなく, 山や谷の対応は一目瞭然であるから関係する地下構造も一様と考えられよう. ただし, SS-PL 波では波の波長に比べ, 2 測点間の距離が大きいため位相速度を求めるのには条件が良くないが, これらの記録から 2 測点での波の identification を誤ることもないから, S

の場合と全く同じ方法を用いた. このような見地にに基づき, 震源でのエネルギー放出が同一方向と見做される上記 2 測点の記録から得られた S-, SS-PL 波の位相速度を, 理論曲線 JW-1 と共に Fig. 7 の最上部に示した. 筆者は以前, 九州近海の 3 つの地震による D-PL 波の位相速度を求め, それらの平均値は地殻の厚さ 30 km と置いた JW-1 の理論分散曲線ではほぼ代表されることを示した. ここで解析した S-, SS-PL 波の位相速度も JW-1 との極端な相違は認められないから, 観測精度から推してほぼ同一経路上で発生した異なる地震による D-, S-PL 波の位相速度は第一近似的に満足される一致が得られたといえよう.

iii) coupling point の決定

J. Oliver の仮説に従えば, いろいろの周期を伴う下層からの入射 SV 波の apparent sur-

Fig. 3. Particle-motions of the ground surface for S-PL and SS-PL waves observed at Matsushiro and Abuyama Observatory respectively.

face velocity が wave-guide 中を伝播する, ある周期での PL 波の位相速度に等しい時にカップリングを起すから, ほかの周期の SV 波は直ちに減衰し記録には現われないだろう. そこで, J-B の表から見掛けの速度に等しくなる値を探せば, 震央から数えた coupling point の震央距離が判明する. この手順を反復すれば, 与えられた全分散波の coupling point が決定される. Fig. 4 の上に, J-B の表による S および SS を基準に置いた SS の見掛け速度を円滑化して示した. 下には得られた S および SS-PL 波の coupling point を波の周期に関係づけて掲げた. 目察による実線は, ほかの経路を伝播する地震には当てはまらないだろう. No. 1 と No. 2 は震央位置は近いけれども, 得られた解析値はやや開きのあるほぼ平行した 2 本の線で与えられた. これは資料がやや古いため C.G.S. で決められた震源要素の精度が低いことに因るらしい. カップリングを成すとき, 震央距離が増せば SV の入射角は減少し, 見掛けの速度は増すから, 遠方で行なわれるカップリングほど早い速度をもつ——いいかえれば長周期の波ほど観測点に近づいた位置に coupling point が存在することになる. 例えば No. 1 では周期約 44 秒の波は松代から 15° , 35 秒では 22° の所でそれぞれカップリングを成し, 30.8 秒の波では全震央距離の約半分に当る 26° の間を S-PL 波の形で wave-guide 中を伝播したものと解析される. SS-PL 波では, S にくらべ震央から遠い所でカップリングを成すが S としての走路が短いため, 早期の PL 波とカップリングするから波群の周期は小さく減衰も早い.

iv) S および SS-PL 波の群速度

震源を S 波として出発し, wave theory で伝播する PL 波とカップリングを成したあとのエネルギーは PL 波の群速度で伝達されるので, ii) で決定されたおのおのの周期波の coupling point を用いて, 震央から観測点に至る全経路および S の走時から coupling point までの距離および走時を差引いた残余のものを基準として, 通常の方法でカップリング波の群速度が得られる. 次に, これら解析値は位相速度のときと同じく, D-PL 波の群速度を満足するか否かを比較, 照合した. すなわち, No. 1 と No. 2 の伝播経路上にはほぼ近い位置で発生した台湾および琉球近海での 4 つの地震 (Fig. 5, Fig. 6) による観測値を, JW-1 の理論曲線

Fig. 4. upper: Apparent surface velocities of S and SS used here. These curves are obtained from J-B Table.

lower: Epicentral distance (in degrees) for coupling point of S and SS-PL waves vs. period of wave trains.

よびレーリー波での両観測値を用いるのと同じ解釈で、2つの異なるモードによる分散状態をきわめて簡単に比較、検討した。Fig. 7 の最下段には、ほぼ同じ進行方向をとる 5 この地震の上下成分を対象としたレーリー波の群速度を、海水層の厚さ 2 km とおいた理論曲線とならべて示してある。No. 1 および No. 2 は台湾近海のものより群速度が大きめで 24 km の曲線に半ば一致しているが、D, S および SS-PL 波から得られる約 33 km の曲線を満足させない。一方、台湾および琉球のものを平均してみれば、ほぼ 30 km の曲線に適合しているのが見られる。スマトラ島付近のレーリー波は構造的に変化の多い震央距離約 53° 、S-PL 波では約 26° 間の平均地殻構造の状態を伝えるから、比較の対象としては資料の選定に欠陥がある。他方、台湾および琉球のものでは、同じ震源から出た異種の表面波を比較することになり、図に見られるように D-, S-PL 波では平均 33 km、レーリー波では約 30 km に数えられる。ただし、ここで比較に用いたモデルはわずかに異なり、(海水層を 2 km と置いた JW-1 WB でもあまり変わらない) 資料もすくないから、観測値のバラツキも考慮した大雑ばな定性的見立をとれば、2つのモードから与えられる分散状態は、波群開始時の波の周期の相違を除外すれば、初期の解析としてはまず一致しているものと認められよう。

§ 4. あとがき

i) いろいろの伝播経路による中距離遠地震の記録にしばしば現われる S および SS 波付近の正常分散波群は、波の走時を基準とした今回の解析結果によれば、震源から直接観測点に到達する D-PL 波から得られる地表面での分子運動、振動方向、群速度、位相速度、水平と上下成分での振幅比などの性質や観測値をほぼ満足させ、また理論的に得られているそれらに対する結果ともあまり矛盾しないなどのことから、実体波 SV と PL 波とによるカップリング波と解釈され、J. Oliver の仮説が確かであることを裏付けている。

ii) Leaking mode の最も興味ある性質は、伝播途上で失なわれるエネルギーの最大損失が SV 波に因る点で、ほかの表面波では考えられない減衰過程を終る。紙面の関係でこれについての解析は割愛したが(別に報告の予定)、得られた結果として波の減衰常数 α (per 1000 km) は $\alpha(\text{S-PL}) = 1.2 \times 10^{-3}$ (周期 40 秒~31 秒間の平均値)、および $\alpha(\text{SS-PL}) = 1.5 \times 10^{-3}$ (同 30 秒~23 秒間) を追記しておく。おわりに、記録のコピーをいただいた京大阿武山観測所に謝意を申し上げます。

文 献

- CHANDER, R. et al., 1968, On the Synthesis of Shear-Coupled PL Waves. Bull. Seism. Soc. Amer., 58, 1848-1877.

- CRAMPIN, S., 1967, Shear-Coupled Higher Mode Seismic Surface Waves. *Bull. Seism. Soc. Amer.*, **57**, 1-8.
- GILBERT, F. and S. J. LASTER, 1962, Experimental Investigation of PL Modes in a Single Layer. *Bull. Seism. Soc. Amer.*, **52**, 59-66.
- IBRAHIM, A-B. K. et al., 1967, Travel-Time Curves and Upper-Mantle Structure from Long Period S Waves. *Bull. Seism. Soc. Amer.* **57**, 1063-1092.
- OLIVER, J. and M. MAJOR, 1960 Leaking Modes and the PL Phase. *Bull. Seism. Soc. Amer.*, **50**, 165-180.
- OLIVER, J., 1961, On the Long Period Character of Shear Waves. *Bull. Seism. Soc. Amer.*, **51**, 1-12.
- OLIVER, J., 1961, Propagation of PL Waves across the United States. *Bull. Seism. Soc. Amer.*, **54**, 152-160.
- 佐藤良輔, 1958, 分散曲線による地殻構造の決定について (II). *地震*, **11**, 121-134.
- Su, S. S. and J. DORMAN, 1965, The Use of Leaking Modes in Seismogram Interpretation and in Studies of Crust-Mantle Structure. *Bull. Seism. Soc. Amer.*, **55**, 989-1021.
- YAMAGUCHI, R. and T. KIZAWA, 1961, Surface Waves and Layered Structures. Part 2. Theoretical dispersion curves for suboceanic surface waves. *Bull. Earthq. Res. Inst.* **39**, 669-809.
- YOSHII, T., 1970, Analyses of Some Leaking Modes. *J. Fac. Sci., Hokkaido Univ.*, 287-378.