



Title	9 . いくつかの形のleaking modeの性質（その2） : いわゆる 群について
Author(s)	吉井, 敏尅
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 22, 125-135
Issue Date	1969-08-30
DOI	10.14943/gbhu.22.125
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/13967
Type	bulletin (article)
File Information	22_p125-135.pdf



[Instructions for use](#)

9. いくつかの形の leaking mode の性質 (その2)

— いわゆる II 群について —

吉井 敏 尅

(北海道大学理学部地球物理学教室)

— 昭和44年4月受理 —

I. ま え が き

小爆破実験で観測される主な波群は、わが国では I, II, III および IV 群と名付けられ¹⁾、多くの研究者によってその性質が調べられてきた。その結果、I 群、III 群および IV 群はそれぞれ屈折 P 波、高次の M 波、 M_{II} 波に対応することはほぼ確かとなったが、II 群については今だ明確な説明がなされていない。

II 群に関する議論の要点は、これを実体波的に見るか表面波的に見るかということであろう。表面波的な見方としては、初期の研究で高次の M 波とするものであったが、II 群の位相速度と地下構造を比べるとこれでは不合理である。1960 年頃から始まった leaking mode の研究が II 群の性質を明らかにするかに思われたが、まだ理論が不完全なこと、および計算が相当難しいこともあって、なかなかこの問題に応用されるまでにはいたらなかった。一方、実体波説の支えは、分散性がとぼしく見えること、および振幅が IV 群のごとくには深さと共に急激に減衰しないことであろう。OKADA²⁾はこの立場から II 群の性質を調べた。

II 群について統一した意見がなかなか得られない 1 つの原因は、観測場所によりその性質が甚だしく異なることであり、これはまた、II 群の発生の複雑さを物語るものでもある。前論文では II 群を leaking mode として説明しようという立場から leaking mode の性質を調べ、ポアソン比が十分大きな場合、II 群を圧力波として近似できることを示した。本論文では、さらに速度比の異なるモデルについて前回と同様な計算を行なった。また、観測例としては、1953 年、地質調査所の構内で行なわれた地震探鉱実験グループの協同実験の記録を用いた。

II. 速度比 1.5 のモデルの分散曲線

前論文³⁾では、半無限媒質と表層の速度比が P 波、S 波とも 2.0 の場合について考察したが、今回はまず速度比 1.5 のモデルについて数値計算を行なった。計算に使用したモデルの定

1) K. TAZIME; Wave Groups Generated by a Very Small Explosion, J. Phys. Earth, 4 (1956), 113-126.

2) H. OKADA; Analyses of Seismic Waves Generated by Small Explosions, J. Fac. Sci., Hokkaido Univ., VII, 1 (1962), 460-485.

3) 吉井敏尅; いくつかの形の leaking mode の性質, 北大地球物理学研究報告, 21 (1969), 117-131.

第 1 表 モデルの定数 (速度比 1.5)

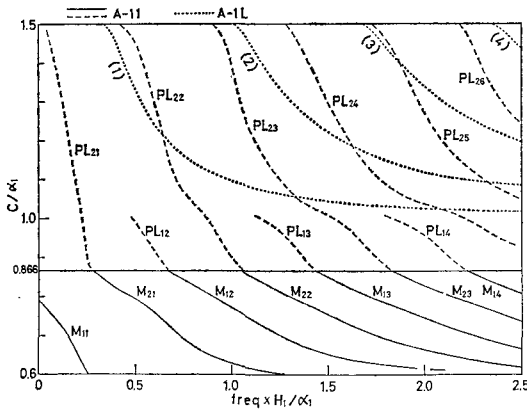
Table 1. Constants of models.

model	α_2/α_1	β_1/α_1	β_2/α_1	ρ_2/ρ_1	σ
A-11	1.5	0.577	0.866	1.0	0.250
A-12	1.5	0.500	0.750	1.0	0.333
A-12A	1.5	0.400	0.600	1.0	0.405
A-12B	1.5	0.333	0.500	1.0	0.438
A-13	1.5	0.250	0.375	1.0	0.467
A-1L	1.5	—	—	1.0	(0.5)

α ; compressional wave velocity.
 β ; shear wave velocity.
 ρ ; density.
 σ ; Poisson's ratio.

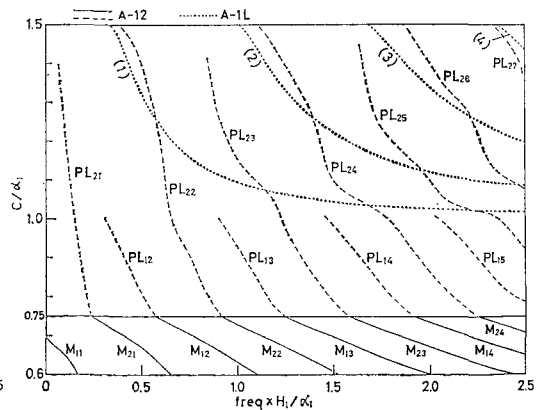
数を第 1 表に示す。前回同様、速度比を 1.5 に保ち全体のポアソン比を 0.250, 0.333, 0.405, 0.438, 0.467, 0.5 に変えた。計算された分散曲線を第 1 図～第 5 図に示す。leaking mode の領域では OLIVER and MAJOR⁴⁾ および SU and DORMAN⁵⁾ の方法で分散曲線が計算された。これらの図には、leaking mode と圧力波の分散曲線を比較するために、モデル A-1L の圧力波の分散曲線も点線で示した。

第 1 図はモデル A-11 ($\sigma=0.25$) の計算例である。leaking mode の分散曲線には M 波との



第 1 図 モデル A-11 の分散曲線、点線はモデル A-1L の圧力波の分散曲線

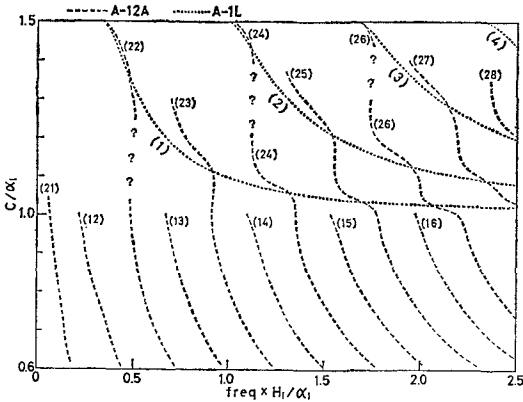
Fig. 1. Dispersion curves for model A-11. Dotted lines indicate the dispersion curves of pressure waves for model A-1L.



第 2 図 モデル A-12 の分散曲線

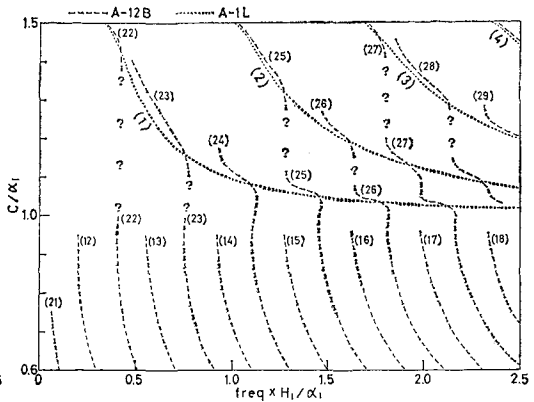
Fig. 2. Dispersion curves for model A-12.

- 4) J. OLIVER and M. MAJOR; Leaking modes and the PL Phase, Bull. Seism. Soc. Amer., 50 (1960), 165-180.
- 5) S. S. SU and J. DORMAN; The Use of Leaking Modes in Seismogram Interpretation and in Studies of Crust-Mantle Structure, Bull. Seism. Soc. Amer., 55 (1965), 989-1021.



第3図 モデル A-12A の分散曲線

Fig. 3. Dispersion curves for model A-12A.



第4図 モデル A-12B の分散曲線

Fig. 4. Dispersion curves for model A-12B.

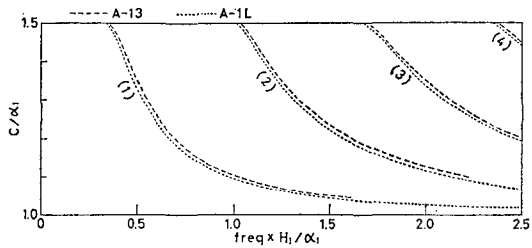
対応をもとに PL₂₁, PL₁₂ 等の名前を付けた⁶⁾。圧力波との関係はほとんど見られない。また, PL_{1n} のシリーズはいずれも $c/\alpha_1 = 1$ 付近から始まる形をしているのが特徴である。このことは GILBERT and LASTER⁷⁾ によっても指摘されており, 彼らは“疑似的なカットオフ”と呼んでいる。

モデル A-12 (第2図) では, 圧力波と leaking mode との関係が, やや現れ始めている。

モデル A-12A (第3図) では, ポアソン比が 0.405 とやや大きくなったため, ここに見られる leaking mode をいわゆる PL mode と呼んで良いものかどうか問題なので, 本論文では単に (21), (12) 等でその次数を表わすことにした。

モデル A-12A では leaking mode と圧力波との関係がますますはっきりしてくる。田治米・浜田⁸⁾ は, 固体-液体モデルについて固体層のポアソン比を大きくしていった時の分散曲線を計算し, ポアソン比 0.5 の極限において圧力波の分散曲線は無数の M 波の分散曲線から構成されることを示した。第3図の leaking mode と圧力波の関係は, これに大変良く似ている。

OLIVER and MAJOR の方法で計算すると, これらの leaking mode は圧力波に近い部分で特性関数の極小が特に鋭くなっており, この部分が卓越した波群として観測されるであろうことが期待される。



第5図 モデル A-13 の分散曲線

Fig. 5. Dispersion curves for model A-13.

6) F. GILBERT and S. J. LASTER; Experimental Investigation of Model Seismograms for a Layer over a Half-Space, *Geophysics*, **30** (1965), 571-596.

7) 前出 6).

8) 田治米鏡二・浜田和郎; 固体-流体波から流体-流体波への移り変わり, *地震*, **14** (1961), 63-76.

さらにポアソン比が大きくなってモデル A-12B (第 4 図) では、上に述べた圧力波との関係はさらにはっきりしてくる。

ところで、前論文では $PL_{22} \rightarrow$ 圧力波 (1), $PL_{24} \rightarrow$ 圧力波 (2) という対応があるらしいと述べたが、第 4 図からも明らかなように、この考えは改められるべきであろう。ポアソン比が 0.5 に近づくと leaking mode の間隔がしだいに狭くなり、ついには無数の leaking mode が圧力波を構成することを考えると、PL mode と圧力波の次数を対応させることは全く無意味である。

また、第 4 図にはしばしば $dc/df > 0$ の部分が見られる。この部分では群速度が負となるはずであるが、物理的な意味は明らかでない。

モデル A-13 (第 5 図) はさらにポアソン比が大きく、leaking mode の分散曲線はモデル A-1L の圧力波に極めて近くなった。モデル A-13 の分散曲線も、くわしく見ると A-12B のように多数の分散曲線から構成されているはずであるが、近似法の“分解能”があまり良くないために圧力波にそった鋭い極小のみが目立つと考えられる。

III. 速度比 3.0 のモデルの分散曲線

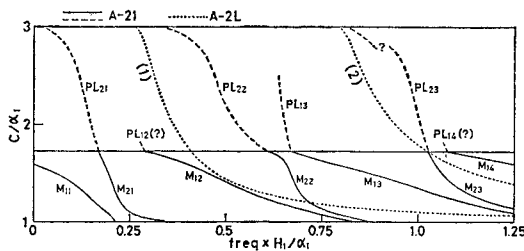
数値計算に使用したモデルの定数を第 2 表に、計算結果を第 6 図～第 10 図に示す。

第 6 図はモデル A-21 の計算結果である。前と同様にモデル A-2L の圧力波の分散曲線を

第 2 表 モデルの定数 (速度比 3.0)

Table 2. Constants of models.

model	α_2/α_1	β_1/α_1	β_2/α_1	ρ_2/ρ_1	σ
A-21	3.0	0.577	1.732	1.0	0.250
A-22	3.0	0.500	1.500	1.0	0.333
A-22A	3.0	0.400	1.200	1.0	0.405
A-23	3.0	0.250	0.750	1.0	0.467
A-24	3.0	0.167	0.500	1.0	0.468
A-2L	3.0	—	—	1.0	(0.5)

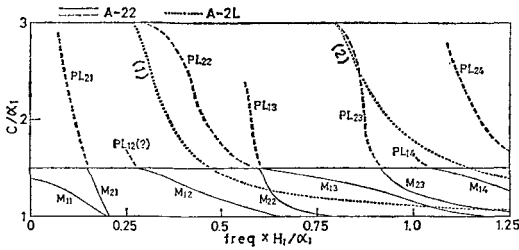


第 6 図 モデル A-21 の分散曲線、点線はモデル A-2L の圧力波の分散曲線

Fig. 6. Dispersion curves for model A-21. Dotted lines indicate the dispersion curves of pressure waves for model A-2L.

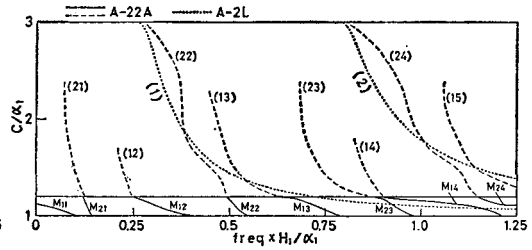
点線で示した。このモデルでは“疑似的なカットオフ” $c/\alpha_1 \approx 1$ が β_2/α_1 よりも小さいためか PL_{1n} は一般にあまり明瞭でないが、 PL_{13} のみはやや優勢である。

普通、速度比の大きなモデルでは M 波の分散曲線が大変複雑で、一見他のモードに乗りうつるような形がしばしば見られる。第 6 図でも $c/\alpha_1=1$ 付近で M_{11} と M_{21} 、および M_{12} と M_{22} の間にこれが見られる。また、 PL_{13} は $c=\beta_2$ で実際は M_{13} につながっているにもかかわらず、むしろ M_{22} にスムーズにつながるように見える。 PL_{22} と M_{13} についても同様である。このように leaking mode もふくめて“乗りうつり”の現象が見られるのは興味深いことである。



第 7 図 モデル A-22 の分散曲線

Fig. 7. Dispersion curves for model A-22.



第 8 図 モデル A-22A の分散曲線

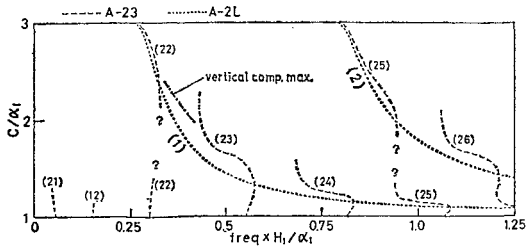
Fig. 8. Dispersion curves for model A-22A.

第 7 図のモデル A-22 の場合も、各モードの間隔が A-21 よりは狭くなったが定性的にはほとんど同じであり、圧力波との関係も明らかでない。また、 $c=\beta_2$ で $PL_{22} \rightarrow M_{13}$ 、 $PL_{13} \rightarrow M_{22}$ とつながっているように見える。

モデル A-22A (第 8 図) では leaking mode と圧力波との関係がやや現れてきた。ここでも $c=\beta_2$ で $(23) \rightarrow M_{14}$ 、 $(14) \rightarrow M_{23}$ とつながっているように見えるが、leaking mode 同志でも (22) と (13) の間、および (24) と (15) の間にこれに近い現象が見られる。

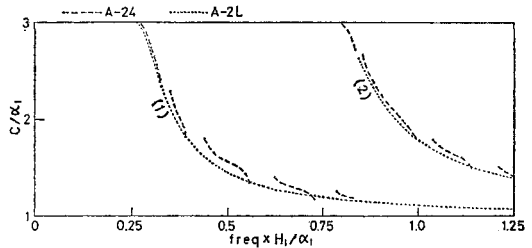
モデル A-23 (第 9 図) ではポアソン比が相当大きい ($\sigma=0.467$) にもかかわらず A-13 や A-3 ほど圧力波に近くならない。これはおそらく速度比の違いによるものであろう。また、第 9 図に示したように、SU and DORMAN の方法でスペクトルの上下成分の極大をたどって行くと (22) と (23) はつながるようである。

さらにポアソン比の大きなモデル A-24 (第 10 図) では、leaking mode の分散曲線は圧力波の分散曲線に大変近いにもかかわらず、切れ切れになっている。



第 9 図 モデル A-23 の分散曲線

Fig. 9. Dispersion curves for model A-23.



第 10 図 モデル A-24 の分散曲線

Fig. 10. Dispersion curves for model A-24.

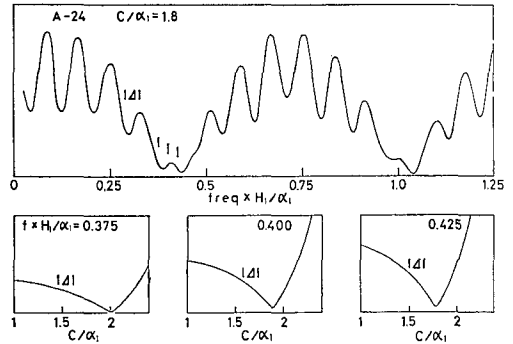
第 11 図にモデル A-24 の特性関数の絶対値の計算例 ($c/\alpha_1=1.8$) を示す。この曲線は見かけ上 2 つの波長の曲線が重ね合わさった形をしているが、長波長のものには P 波、短波長のものには S 波が主として寄与していることに前論文でも述べた。leaking mode の分散曲線が切れ切れとなるのは、この短波長の振動が原因なのである。

OLIVER and MAJOR の方法では、一般に $c=const.$ について特性関数の極小をたどるのであるが、 f (周波数) $=const.$ について特性関数の絶対値を描いたのが第 11 図の下である。

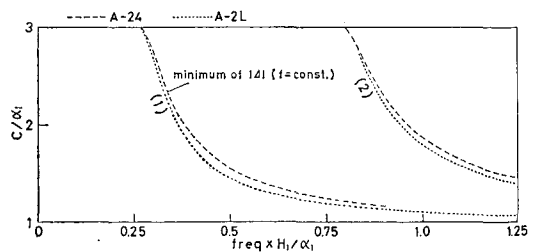
上に述べた短波長の極小は、 $f=const.$ にはほぼ平行な“谷”を形作っているため、これらの図には短波長の振動は全く見られない。

$f \times H_1/\alpha_1=0.400$ および 0.425 は、第 10 図の分散曲線のちょうど切れ目にあたるが、 $f=const.$ の図上では鋭い極小が存在する。これらの極小は、例えば $f \times H_1/\alpha_1=0.375$ の場合等に比べややその絶対値は大きいのであるが、ともかくこれらをたどって分散曲線を描くと第 12 図のようになる。第 11 図および第 12 図から想像されるように、モデル A-24 の leaking mode の分散曲線は、実質的にはほとんどモデル A-2L の圧力波の分散曲線に等しいと考えて良いであろう。

今回の計算例でも、ポアソン比が 0.48 程度になると leaking mode の分散曲線は圧力波の分散曲線にほとんど一致することが確かめられた。一般に、小爆破実験ではポアソン比が 0.48 以上がほとんどで、0.49 あるいはそれ以上になることも珍しくない。従って、II 群を近似的に圧力波として解析することはほとんどの場合許されるであろうし、必要なら近似法で leaking mode の計算を行なえばよい。しかし、この種の波群は S 波の構造には全く鈍感と思われるので⁹⁾、より正確に地下構造を推定するためには、IV 群あるいは III 群と合わせて解析することが望まれる。



第 11 図 特性関数の計算例
上；位相速度一定 下；周波数一定
Fig. 11. Example of characteristic function.
Upper; $c=const.$ Lower; $f=const.$



第 12 図 $f=const.$ の条件で得られたモデル A-24 の分散曲線

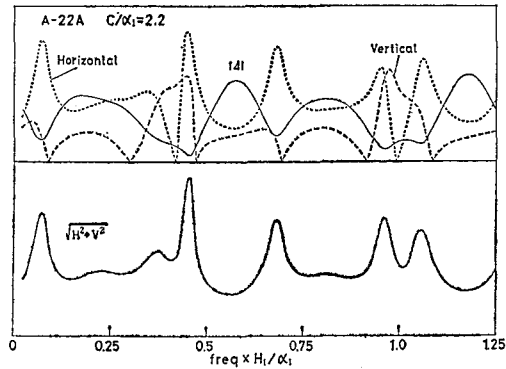
Fig. 12. Dispersion curves for model A-24
Minima of the characteristic function were traced under the condition of $freq.=const.$

9) 吉井敏尅；東シナ海で観測された水中分散波について，北大地球物理学研究報告，20 (1968)，77-89.

IV. 近似法についての1考察

OLIVER and MAJOR および SU and DORMAN の方法で分散曲線を求める際生ずる1つの問題は、特性関数の極小、スペクトルの上下・水平面成分の極大が完全には一致しないことである。

これら3つの関数は、それぞれ極値を中心としてひどく“非対称的”なことが多く、これが極値の位置を乱す原因となっているのである。1例として、モデル A-22A についての計算例 ($c/\alpha_1=2.2$) を第13図に示す。となり合った極値が、互いに相手の位置を乱したり、急な付号の変化がひどく極値をずらしていることが明らかであろう。そこでスペクトルの上下・水平両成分を合成した振幅 $\sqrt{H^2+V^2}$ を計算してみると下図のようになり、上に述べた欠点がうまく消える。各極大はほぼ対称的な形をしており、 $f \times H_1/\alpha_1=0.4$ および 1.0 付近のようになりにかなり接近している



第13図 上; 2つの近似法の計算例
下; 合成された振幅のスペクトル

Fig. 13. Upper; Calculated example of two approximate methods.
Lower; Spectrum of synthesized amplitude.

も、相手の形を乱すようなことは無い。この合成された振幅は、水平成分、上下成分をバラバラに考えるよりはむしろ物理的にも意味があると思われ、今回の解析の1部にはこの関数も参考にした。例えば、計算機により自動的に極値を見つけ出して leaking mode の分散曲線を作るときには、この方法が大変有力であろう。

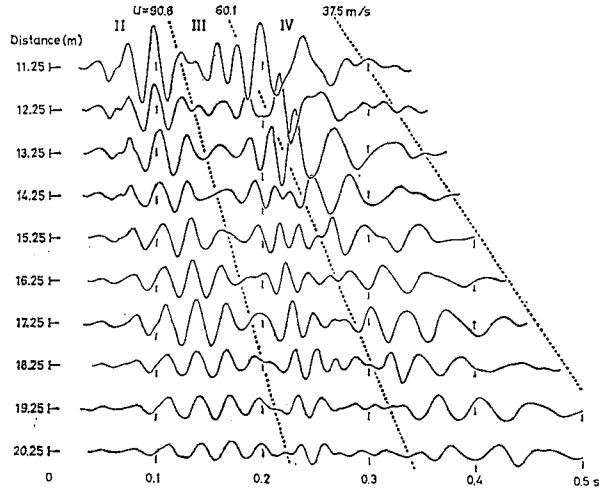
V. 解析例

解析の例として、1953年、地震探鉱実験グループにより地質調査所(川崎市)の構内で行なわれた実験¹⁰⁾について述べる。記録を第14図(上下成分)および第15図(水平成分)に示す。これらは主として表面波を解析する目的で得られたものであるが、地震探鉱実験グループの最初の共同観測にもかかわらず、記録は極めて良好である。この理由の1つは地下構造が比較的単純なことであろう。TAZIME¹¹⁾は、これらの記録に見られるいくつかの波群が表面波として説明されうるとし、いわゆる、“4分の1波長則”を示した。

第14図に認められる3つの波群(II群, III群, IV群)を図のように U (群速度)=90.8 m/s および 60.1 m/s の線で分けると、各波群の特徴が良くわかる。また、IV群の終りと思われるところに $U=37.5$ m/s の線を引いた。

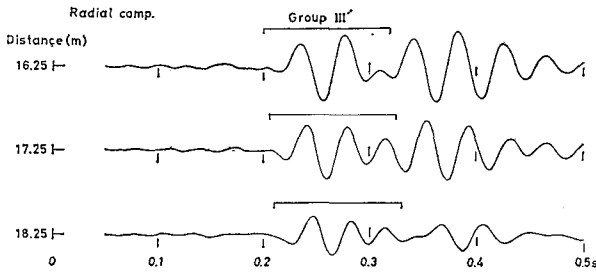
10) この実験のくわしい内容については、地震探鉱実験グループ会報, 第1号(1954).

11) 前出 1).



第 14 図 地質調査所構内での小爆破実験で得られた上下成分記録

Fig. 14. Records of vertical component obtained from small explosion seismology experiment in the ground of Geological Survey of Japan.

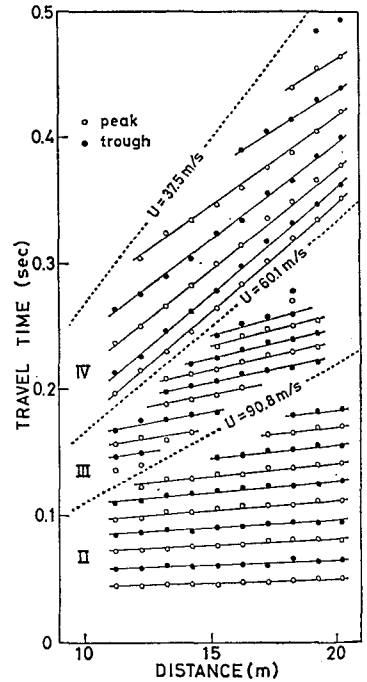


第 15 図 水平成分記録

Fig. 15. Records of horizontal component.

第 15 図は水平成分の記録であるが、上下成分に比べ II 群の振幅が大変小さく、III 群は周期が約 2 倍ほど長くなっている。また、IV 群も上下成分とは異なった種類の波らしい。

第 16 図は上下成分の記録から得られた山谷の走時図である。従来小爆破実験の解析では、記録上の山谷そのままの位置をプロットしてこの種の走時図を作るのが普通である。しかし、第 14 図の IV 群のようにやや周期の長い波では、短周期の波が重って山谷の位置が乱されることが多いので、今回は記録をある程度スムージングしてから第 16 図を作成した。この図から位相速度と群速度が算出された。



第 16 図 上下成分記録から得られた山谷の走時図

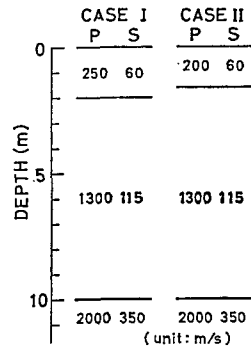
Fig. 16. Travel time diagram obtained from the records of vertical component.

第17図は今回分散曲線を計算した地下構造モデルの例である。CASE Iは太田・他¹²⁾が1966年、同じ場所で行なった屈折法の解析結果をもとにしたモデルである。後に述べるように、このモデルは観測された表面波をかなり良く説明できることがわかった。CASE IIはこれを少し変形してさらに良く実測値を説明できるように改めたモデルである。

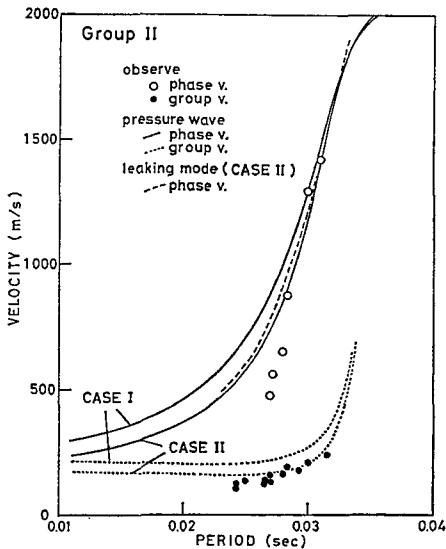
第18図はII群の分散と理論曲線との比較である。太田・他のモデル(CASE I)から計算した圧力波の分散曲線でもかなり良く実測値を説明できるが、1層目の速度を少し小さくしたCASE IIの方がより実測値と合う。また、破線でCASE IIのleaking modeの位相速度を示したが、圧力波とほとんど一致する。群速度についても同様である。

これらのモデルの欠点は、実測値の短周期の部分をうまく説明できないことである。しかし、前論文の例のように地近表くに速度勾配を持たせることによって、かなりこの欠点を改めることができる。

第19図はIV群についての実測値と理論曲線との比較である。CASE Iは群速度の実測値と良く合うが、位相速度は長周期の方にずれる。試みに位相速度の実測値を数値微分して群速度を計算してみると、図中の▲印のようになり、直接求めた群速度(●印)と合わない。従っ

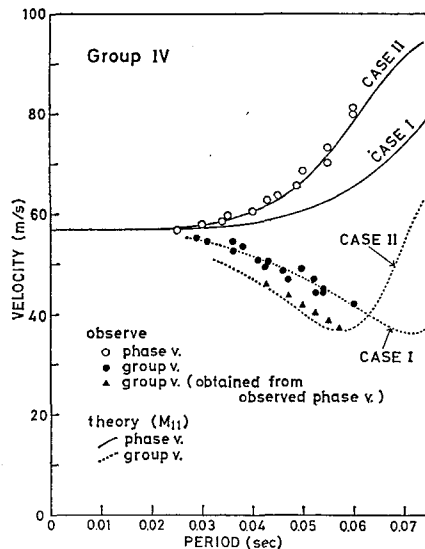


第17図 2つの地下構造モデル
Fig. 17. Two structural models.



第18図 II群の分散

Fig. 18. Dispersion of the wave group II.



第19図 IV群の分散

Fig. 19. Dispersion of the wave group IV.

12) 太田 裕・他; 地質調査所構内におけるS波速度の測定, 地質調査所月報, 18 (1967), 43-48.

て、位相速度、群速度の実測値を同時に説明できるようなモデルは存在しないと考えられる。この原因は、主として水平方向の構造の変化であろう。CASE II では1層目の厚さを小さくしたので、位相速度の実測値と良く合う。

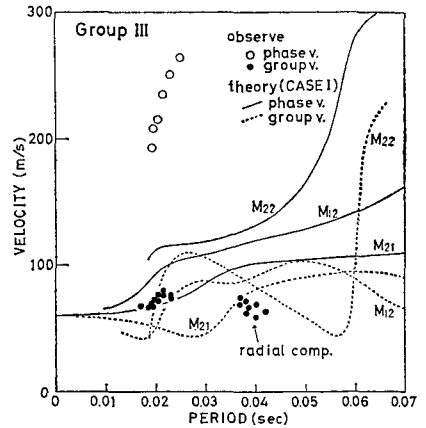
ここで特筆すべきなのは、太田・他の求めた1層目のS波の速度(60 m/s)が、IV群の分散を説明するうえで極めて都合が良いことである。

III群の解析結果を第20図に示す。図から明らかのように、上下成分の記録に見られるIII群は非常に高次のM波と思われ、これから信頼できる情報を得ることは不可能であろう。従って、計算はCASE IのM₂₂波までで打ち切ったが、ここに観測されたIII群の周期は主として2層目の厚さに大きく左右されるようである。第15図に見られるIII'群は周期がこれより2倍ほど長い、やはり高次のM波と思われる。

III群はM₂₁波と考えられていることが多いが、今回のように非常に高次のM波が卓越することもあるらしく解析には注意が必要である。この原因は単に計器の特性のためだけではないらしい。今回計算したような地下構造モデルでは、圧力波の分散曲線のうち位相速度の小さな部分はM波の領域に入ってくる。あるいは、ポアソン比の大きな場合、M波も圧力波に近い部分で振幅が卓越するのかもしれない。この問題は、理論的にM波の excitation function¹³⁾を計算することによりある程度解決されるであろう。

VI. あとがき

本論文では、II群を leaking mode として説明するという立場から、様々な速度比、ポアソン比を持ったモデルについて分散曲線を計算した。その結果、ポアソン比が0.5に近い場合、leaking mode の分散曲線が圧力波の分散曲線に極めて近くなることが確かめられた。しかし、実際に観測されるII群については不可解なことが少なくない。later arrival があからさまにパルス状の形で重なり、分散波とはみなせないような波形となることもしばしばある。II群の性質をよりくわしく調べるには、分散のみでなく振幅の深度分布、スペクトラム等を合わせて考察することが必要である。KUBOTERA and OHTA¹⁴⁾によれば、II群の振幅の深度分布は、圧力



第20図 III群の分散
Fig. 20. Dispersion of the wave group III.

13) D. G. HARKRIDER; Surface Waves in Multilayered Elastic Media I. Rayleigh and Love waves from Buried Sources in a Multilayered Elastic Half-Space. Bull. Seism. Soc. Amer., 54 (1964), 627-679.

14) A. KUBOTERA and Y. OHTA; On Seismic Waves Generated by Small Explosions [II], Spec. Contr., Geophys. Inst. Kyoto Univ., 7 (1967), 169-179.

波のそれに大変良く似ているという。

謝 辞

有益な助言をいただいた田治米鏡二教授に深く感謝する。

数値計算には北大計算センター, NEAC 2203G および東大大型計算機センター, HITAC 5020 を使用した。老大な計算結果のプロットを, 三津谷洋子嬢と柳原祐子嬢にいただいた。また, 解析の一部に, 地震探鉱実験グループによる記録を使わせていただいた。

9. Characteristics of Some Types of Leaking Mode (II)

— On the Wave Group II —

By Toshikatsu YOSHII

(Department of Geophysics, Faculty of Science, Hokkaido University)

The wave group II observed in the experiment of small explosion seismology were considered. The dispersion curves for rather simple models shown in Table 1 and Table 2 were calculated by OLIVER and MAJOR's and SU and DORMAN's approximate methods. These curves are shown in Fig. 1-Fig. 10. When POISSON's ratio of the model is nearly 0.5, the dispersion curves of the leaking mode are almost same to those of the pressure waves. It is immediately recognized from above result that the wave group II can be approximately analyzed as the pressure wave.

Some actual examples of analyses were shown in Fig. 14-Fig. 20.