



Title	9. 遠地震の周波数解析と地殻モデル (第2報)
Author(s)	高波, 鉄夫; TAKANAMI, Tetsuo
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 26, 133-145
Issue Date	1971-09-30
DOI	https://doi.org/10.14943/gbhu.26.133
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/14012
Type	departmental bulletin paper
File Information	26_p133-145.pdf



9. 遠地地震の周波数解析と地殻モデル (第2報)

高波鉄夫

(北海道大学理学部地球物理学教室)

— 昭和46年4月受理 —

I. ま え が き

遠地地震の初動P波部分の周波数解析を行なうことによって、観測点およびその附近の地下構造の推定を試みた。なおこの研究は前の報告¹⁾の続きとしてなされた。

II. 地震記象とその周波数解析

記象の得られた場所は札幌官区气象台、および浦河測候所である。解析に用いられた記象

第1表 札幌管区气象台で収集された地震のリスト

Table 1. List of earthquakes registered at Sapporo Meteorological Observatory and the relevant informations.

No.	Origin Time	Location	Delta	Focal depth	M	Azimuth
1	1969, 31, Jan 11, 33, 03.5	S 21.9, W 179.6	73.9	595 km	5.9	143.1
2	1969, 11, Feb 07, 58, 05.8	S 22.7, E 178.6	77.8	67.3	6.0	145.07
3	1969, 12, Feb 07, 16, 13.5	S 6.7, E 126.8	51.2	450	6.0	197.3
4	1969, 28, Feb 11, 40, 32.5	N 36.0, W 10.6	97.2	122	7.3	338.4
5	1969, 31, Mar 16, 15, 54.4	N 22.7, E 34.0	83.0	?	6.0	301.8
6	1969, 10, Apr 23, 54, 03.9	N 42.0, E 130.9	7.7	555	5.6	265.7
7	1969, 18, July 14, 24, 48.0	N 38.2, E 112.1	22.6	shallow	?	267.6
8	1969, 05, Aug 02, 19, 19.6	S 5.7, E 125.3	50.6	521	6.2	199.6
9	1968, 11, Feb 14, 44, 47.6	S 5.5, E 153.2	49.5	74	7.0	165.9
10	1968, 19, Aug 03, 38, 30.6	S 10.1, E 159.9	55.5	538	6.2	158.7
11	1964, 21, Mar 12, 42, 17.5	S 6.4, E 127.9	50.7	367	?	195.9
12	1964, 02, Apr 10, 11, 55.0	N 5.0, E 97.0	54.46	?	5.2	238.6
13	1964, 08, July 20, 55, 39.0	S 5.5, E 129.8	49.45	167	6.5	193.5
14	1964, 10, July 01, 39, 49.3	S 15.5, E 167.6	63.0	121	6.6	152.2

1) TAKANAMI; Frequency Analysis of Short-Period P waves in the Teleseismograms and Crustal Structure Models, Geophy. Bull. Hokkaido University., 25 (1971), 207.

は固有周期約5秒の59A型地震計3成分により記録されたもので、各地震の詳細については第1表と第2表に示されている。

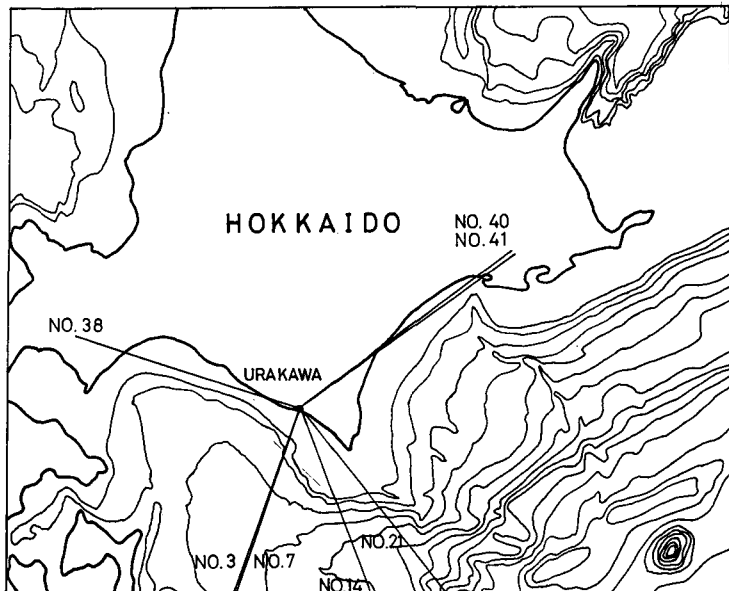
また各観測点での地震の到来方向は第1図と第2図とに示されている。今回はそのなかから Banda sea で起きた深発地震2個とニュージーランドの北、Kermadec Trench の西側で起きた地震1個とを選び出して解析の対称とした。

これらの地震の規模はいずれもマグニチュード約6.0程度である。各観測点で記録された地震記象のトレースの結果が第3図に示されている。いずれの記象も垂直成分の立ち上がり部

第2表 浦河測候所で収集された地震のリスト

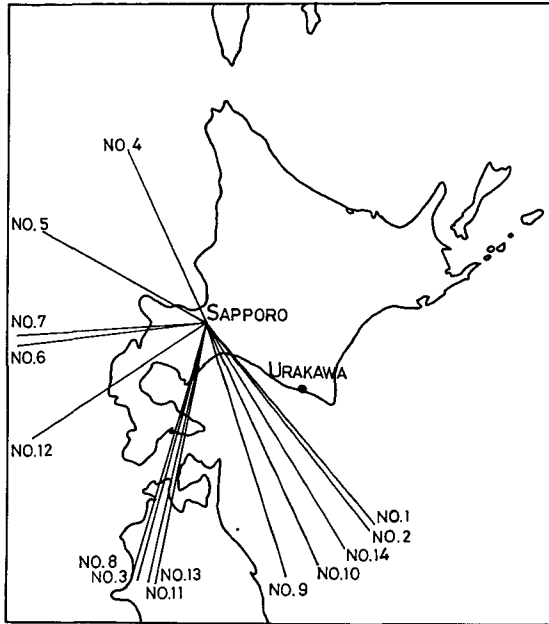
Table 2. List of earthquakes registered at Urakawa Meteorological Station and the relevant informations.

Origin No.	Time	Location	Delta	Focal depth	M	Azimuth
3	1969, 05, Aug 02, 19, 19.9	S 5.7, E 125.3	50.2	521 km	6.2	201.8
7	1969, 12, Feb 07, 16, 13.5	S 6.7, E 126.8	50.7	450	6.0	199.5
14	1968, 19, Aug 03, 38, 30.6	S 10.1, E 159.9	54.3	538	6.2	160.2
21	1967, 10, Oct 02, 21, 49.5	S 21.1, W 179.3	72.0	654	7-7.2	143.5
38	1966, 15, Mar 00, 53, 06.6	N 36.3, E 70.7	54.6	219	6.6	289.6
40	1966, 05, Feb 18, 32, 09.3	N 52.3, E 174.3	23.5	41	6.5	53.5
41	1966, 06, Feb 13, 07, 47.0	N 52.1, E 175.7	24.31	35	5.9	54.4



第1図 浦河における地震波の到来方向

Fig. 1. Azimuth of earthquakes at Urakawa.

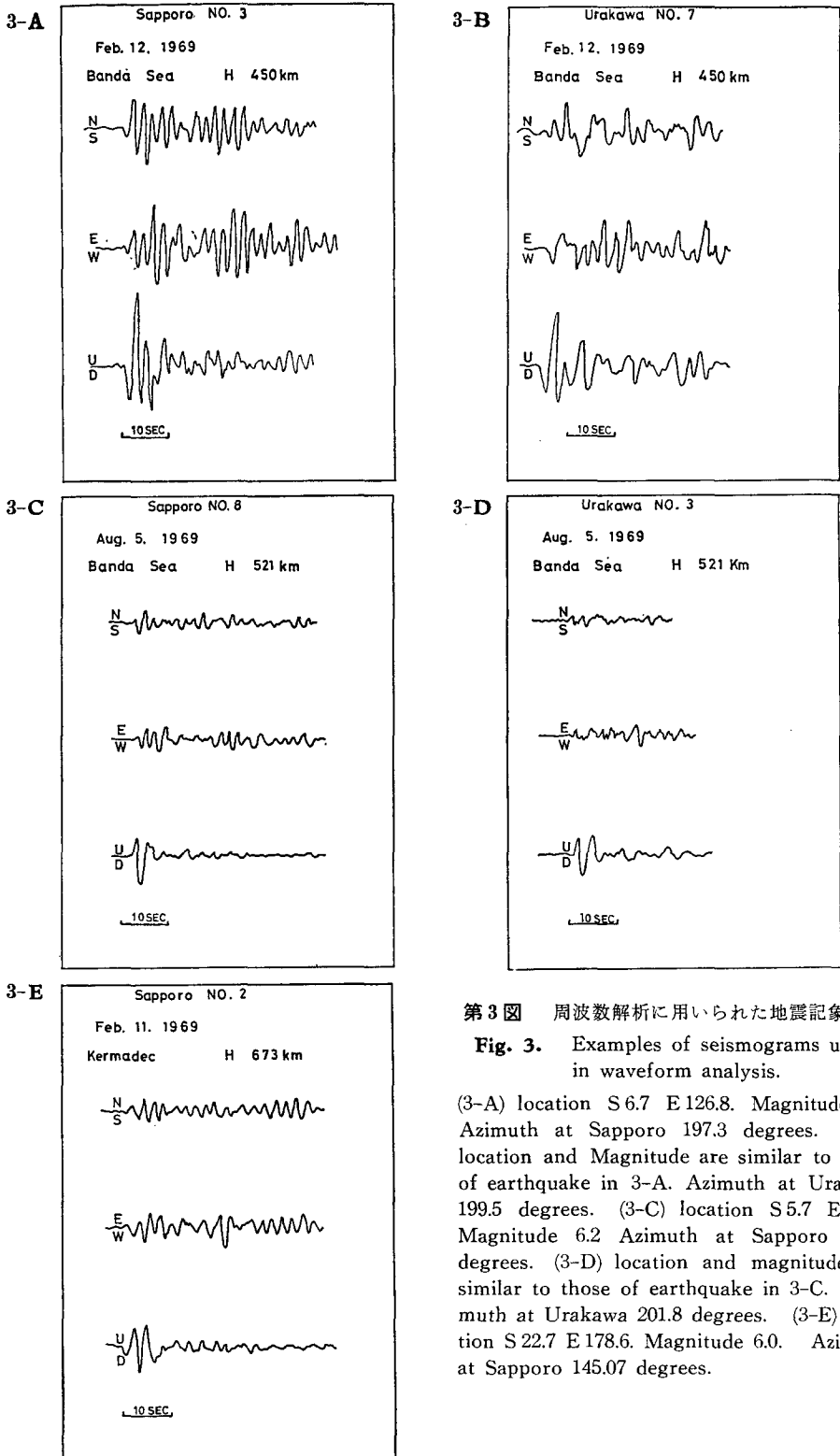


第2図 札幌における地震波の到来方向
Fig. 2. Azimuth of earthquakes at Sapporo.

分は単純なパルス波型を示しているが、大きな振幅を形成する later phase が水平成分の一部の記象に見られる。なお第3図の3-Aと3-B, 3-Cと3-D等は Banda seaで起きた2つの同一の地震波を札幌と浦河とで観測された記象例であり、3-Eは Kermadec-trenchの西側で起き札幌で観測された記象例である。この札幌で記録された地震 No. 2は Kermadec-trenchの西側から札幌にはほぼ南南東の方角より入射している。TOMODA and SEGAWA²⁾によって得られた重力分布図、第4図を参照してみると静内沖には大きな負の重力異常の中心があり、地震 No. 2はその地帯を通過し、かつ石狩一苫小牧低地帯に沿ってきた地震波とも言える。一方浦河で観測された地震 No. 3と No. 7とは共にこの重力異常帯を南南西の方角に横切って入射している。この2つの地震はいずれも Banda seaで起きた地震であり、札幌では No. 8, No. 3と称されている。

以上得られた地震波の初動 P 波部分を周波数解析し、振幅スペクトラムおよび PHINNEY³⁾の方法に適合させるために垂直成分と水平成分との比を求めた。解析方法の詳細についてはすでに報告済みであるが、以下の議論では第5図に示されているような平行な成層構造を考えを

- 2) TOMODA and SEGAWA; Measurement of Gravity and Total Magnetic Force in the sea near and around Japan, J. Geodetic Soc. Japan., 12, 157.
- 3) PHINNEY; Structure of the Earth's Crust from Spectral Behavior of Long-period Body Waves, Jour. Geophy. Res., 69 (1964), 2997.
- 4) TAKANAMI; 前出 1).
- 5) TAKANAMI; 前出 1).

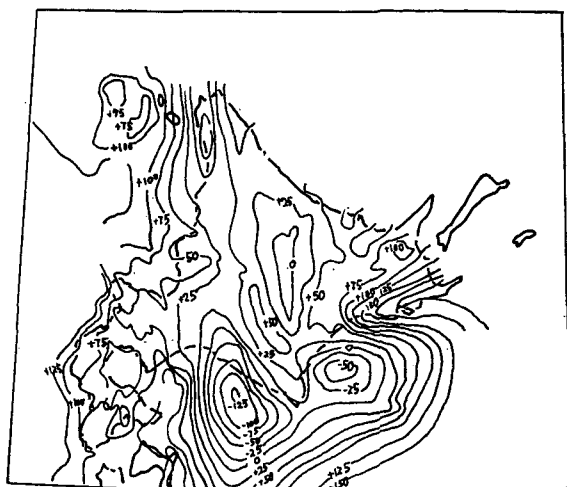


第3図 周波数解析に用いられた地震記象の例

Fig. 3. Examples of seismograms used in waveform analysis.

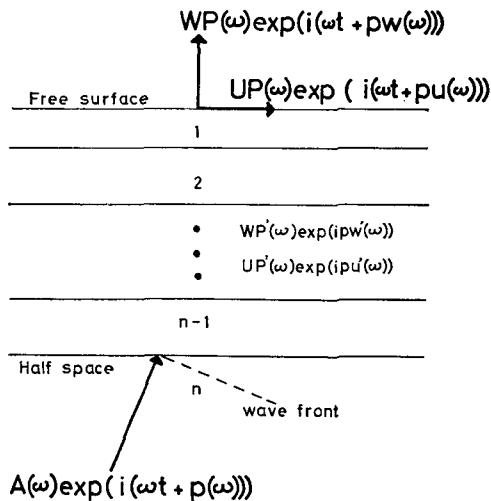
(3-A) location S 6.7 E 126.8. Magnitude 6.0 Azimuth at Sapporo 197.3 degrees. (3-B) location and Magnitude are similar to those of earthquake in 3-A. Azimuth at Urakawa 199.5 degrees. (3-C) location S 5.7 E 125.3 Magnitude 6.2 Azimuth at Sapporo 199.6 degrees. (3-D) location and magnitude are similar to those of earthquake in 3-C. Azimuth at Urakawa 201.8 degrees. (3-E) location S 22.7 E 178.6. Magnitude 6.0. Azimuth at Sapporo 145.07 degrees.

ことにする。各層の媒質は均質等方な弾性体としさらに最下層は半無限の媒質とする。また対称とする波はy軸方向に運動が一樣な平面波であると仮定する。一方、実際に得られた記象を周波数解析する際は立ち上がりから FEJER-KERNE window⁶⁾ の Time window をかけて P 波の立ち上がり部分を強調させた。波形の読みとり間隔 Δt は 0.25 秒で、その time duration は 25 秒間である。水平成分に関しては南北成分と東西成分とを合成して radial な成分を求めた。その結果が第 6 図に示されている。この第 6 図の 6-A と 6-B は札幌の記象 No. 3 について 2 つの典型的なウインドウ⁶⁾ の影響による差異を示した図である。さらにこれらの結果の中で 0.2 cps から 0.6 cps までの範囲に限り垂直成分の振幅スペクトラムの比較を行なった。その具体例が第 7 図に示されている。なお札幌の No. 3 と浦河の No. 7 の地震、そして札幌の No. 8 と浦河の No. 3 の地震は同一の地震である。まずはじめに、これらの地震を用いて各観測点での振幅スペクトラムの比較を行なった。その結果、第 6 図から明らかのように札幌の記象では低周波数領域で多少の違いは見られたがピーク的位置を注目するとおおよそ一致していると言える。



第 4 図 北海道およびその付近における重力のブーゲ異常分布図。(ミリガル)

Fig. 4. Contoured map of Bouguer Gravity Anomaly in near and around Hokkaido after TOMODA and SEGAWA (1966). (mgal)

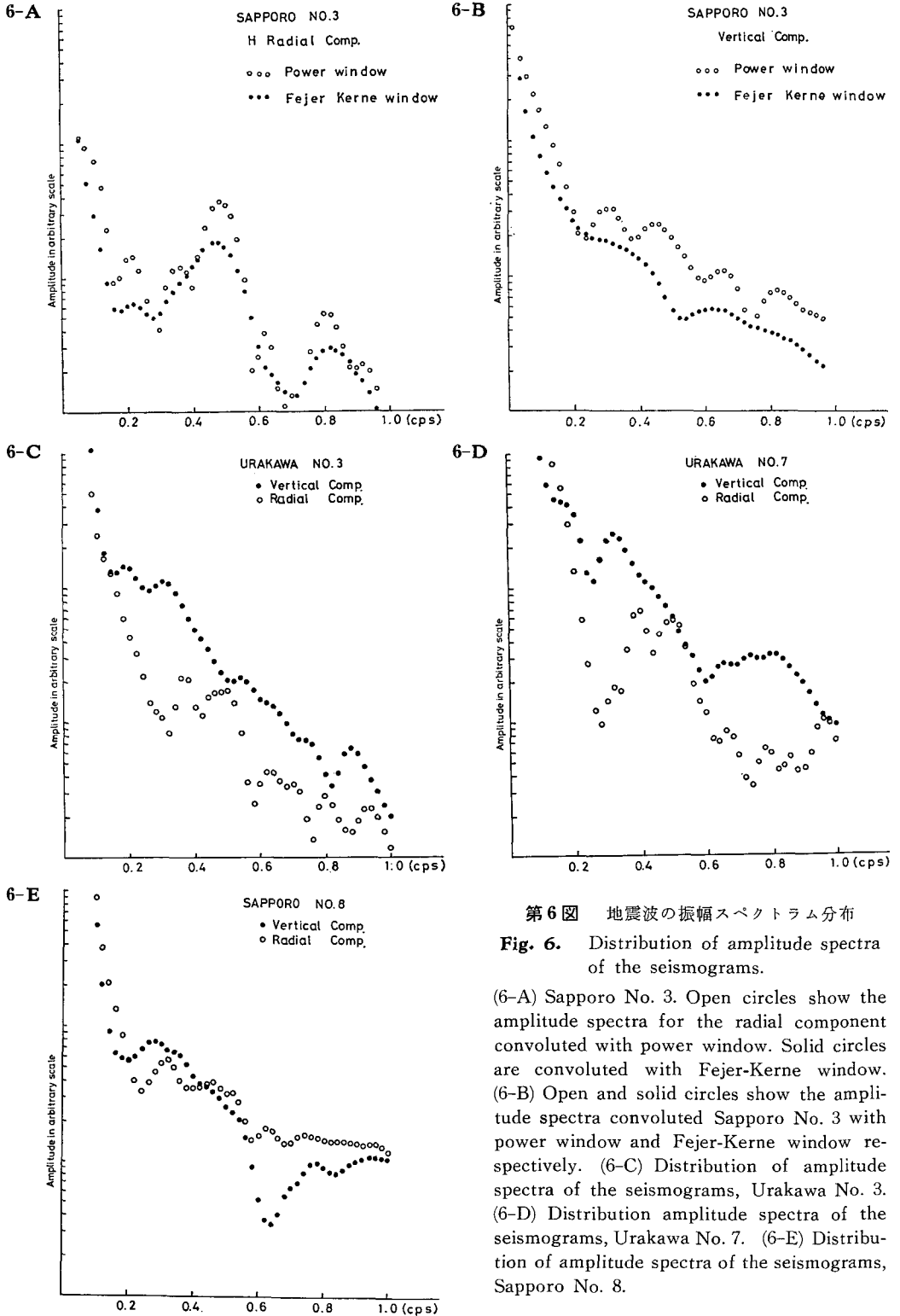


第 5 図 理論に用いられた水平互層モデル

Fig. 5. Schematic representation of assumed layered model.

一方浦河の結果では 0.26 cps の谷と 0.32 cps の山とは完全に一致し、さらに 0.32 cps より 0.6 cps までの周波数範囲における振幅スペクトラムの減衰の割合は殆んど完全な一致を示している。次にこれらのことがらを考慮しながら観測点、およびその附近の地下構造の特徴に言及したい。第 7 図から明らかのように札幌南部 (厳密には少なくとも地震波の到来方向数 km に及

6) TAKANAMI; 前出 1).



第 6 図 地震波の振幅スペクトラム分布

Fig. 6. Distribution of amplitude spectra of the seismograms.

(6-A) Sapporo No. 3. Open circles show the amplitude spectra for the radial component convoluted with power window. Solid circles are convoluted with Fejer-Kerne window. (6-B) Open and solid circles show the amplitude spectra convoluted Sapporo No. 3 with power window and Fejer-Kerne window respectively. (6-C) Distribution of amplitude spectra of the seismograms, Urakawa No. 3. (6-D) Distribution amplitude spectra of the seismograms, Urakawa No. 7. (6-E) Distribution of amplitude spectra of the seismograms, Sapporo No. 8.

ぶ地域)は浦河の南南西(厳密には浦河およびその南南西附近の海底地域)のに比べて振幅スペクトラムの減衰の程度が弱い。その周波数に対する減衰度の大きい浦河の結果は0.26 cps 附近の振幅スペクトラムを強く減衰させる地下構造を暗示させた。このことは重力分布図, 地質図等と比較する上で興味のある結果と言えよう。

III. 地下構造モデル

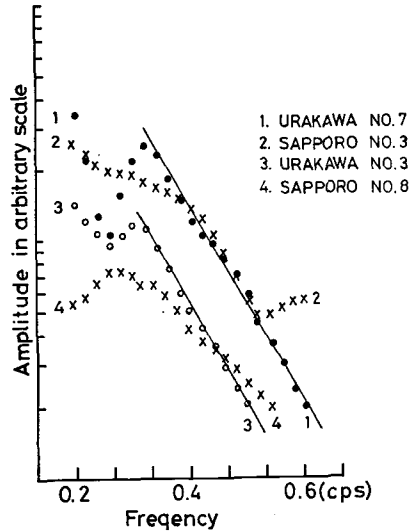
ここでは前章で触れた観測結果から適当な地下構造を推定し, その得られた地下構造モデルを用いて地震波の伝播経路による地下構造の違いを検討した。なお札幌の記象を用いて行ったこの種の試みはすでに報告⁷⁾した。

1. 札幌

今回は北海道南西部の地下を通過してきた地震波に合う地下構造を推定し, そしてそのモデルと石狩一苦小牧低地帯の下を通過してきた地震波の結果とを比較した。まず第8図に前者の地震から得られた結果とそれに合わせて作った理論曲線とが示されている。

図中, 点線で描かれたモデル M-S-7-1 と実線のモデル M-S-7-27 との内容は下に示された通りである。ここで考えている構造は半無限媒質の上に1層をもった単純なモデルである。さらにこの地域は速度分布が殆んど明らかでないので本州における人工地震観測の結果⁸⁾や岩石資料についての速度測定資料⁹⁾等を考慮してモデルを求めた。なお密度は NAFE and DRAKE¹⁰⁾の関係式を用いて地震波速度に対応する値を推定した。

第8図における白丸の観測結果と2つのモデルの理論値とは多くの試行にもかかわらず完全な一致は期待できなかった。とくにピークの大きさにそのことが言える。ただし層厚の大小はピークの大きさよりその周波数に対する位置に大きく寄与するので, 今回はそれらの曲線の山谷の位置に限り注目した。モデル M-S-7-27 は第1番目のピークによく合うモデルであ



第7図 札幌の解析に用いられた地震波の振幅スペクトラム分布の比較。周波数範囲は0.2 cps から約0.6 cps まで。成分は垂直成分。

Fig. 7. Distribution of amplitude spectra for the vertical component of the seismograms, Sapporo No. 3 and No. 8, Urakawa No. 3 and No. 7. Frequency range is from 0.2 to about 0.6 cps.

7) TAKANAMI; 前出 1).

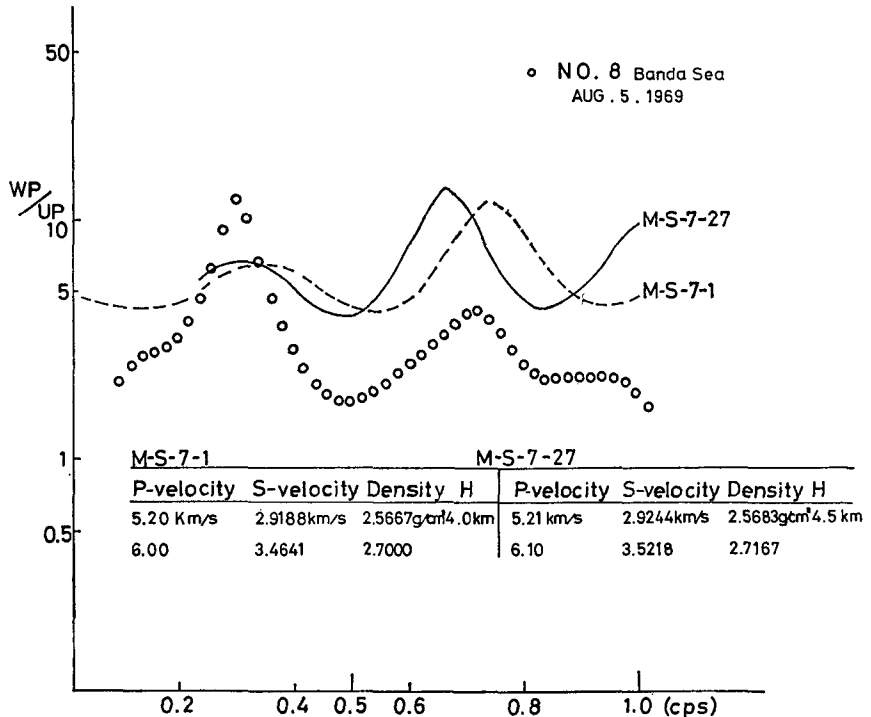
8) MIKUMO; A study on crustal structure in Japan by the use of Seismic and gravity data, Bull. Earthq. Res. Inst., 44 (1966), 965.

9) HAYAKAWA; Measurement of Longitudinal and Transverse wave velocities of Dunite, Peridotite and some other rocks in Hidaka Area, Hokkaido, Geophysical Papers dedicated to Professor Kenzo SASSA. (1963), 25.

10) NAFE and DRAKE; Physical Properties of marine sediments, The Sea., 3 (1963), 794.

り、それに多少の物理定数を変化させて第2番目のピークにも合うようにしたのがモデル M-S-7-1である。このモデルのプロフィールは第9図に示されている。このモデルの場合、仮に入射角を30度とすると観測点より波の伝播方向に約5.3 kmにおよぶ地下構造が地震記象に反映されていると言える。そしてこの北海道南西部の地下構造が反映したと思われる地震波から推定されたモデル M-S-7-1と、Kermadec trenchの西側で起き、石狩—苫小牧低地帯の下を通過してきた No. 2 の地震の結果とを比較したのが第10図である。

互いに似た分布を示しているが明らかに第1番目のピークの位置が相対的に M-S-7-1 モデルより低い周波数へ移っているのが解る。したがって、すでに検討済みの理論曲線の動作¹¹⁾からこの M-S-7-1 モデルより比較的厚い層をもつ構造が考える。先の報告¹²⁾ですでに述べたことがらでもあるが、地震波の到来方向に従って第1番目のピークの位置に比較的漸移的な変化が見られたのでその到来方向により第1番目のピークの位置のグループ分けを行なった。今

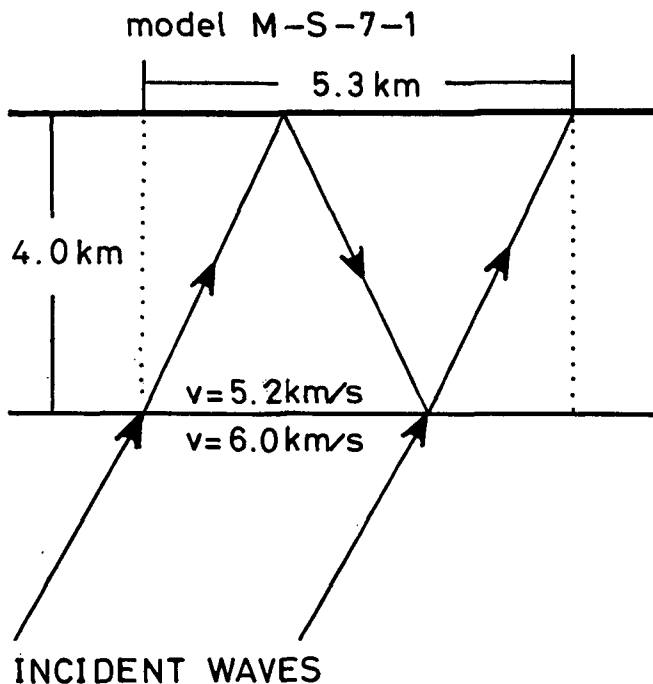


第8図 札幌における振幅スペクトラム比の観測値と理論曲線との比較

Fig. 8. Comparison of the amplitude spectra ratio of the vertical component to the horizontal ones between observed and theoretical.

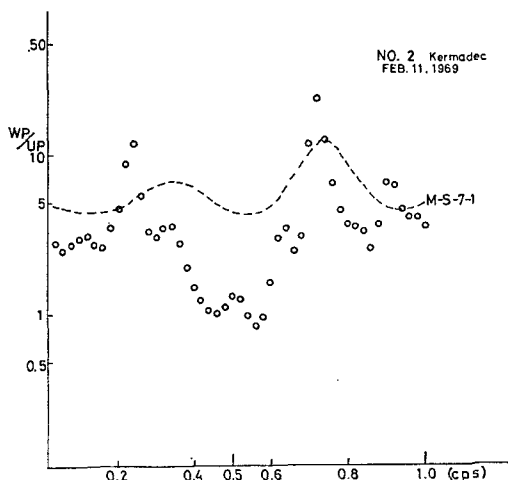
11) TAKANAMI; 前出 1).

12) TAKANAMI; 前出 1).



第9図 モデル M-S-7-1 のプロフィール

Fig. 9. Schematic representation of the profile for the assumed model named Model M-S-7-1.



第10図 モデル M-S-7-1 と札幌の記象 No. 2 との振幅比の比較

Fig. 10. Comparison of amplitude spectra ratio of between Sapporo No. 2 and Model M-S-7-1.

第3表 札幌における地震波の到来方向と振幅比の第1ピークの位置

Table 3. Relation among the first peak position of amplitude spectra ratio and azimuth at Sapporo.

Earthquakes	First Peak Position of W_p/U_p (cps)	Azimuth (degrees)
A No. 1	0.26	143.1
2	0.24	145.0
14	0.16	152.2
10	0.16	158.7
9	0.20	165.9
B No. 13	0.18	193.5
11	0.18	195.9
3	0.22	197.3
8	0.24	199.6
C No. 12	0.24	238.6
6	0.24	265.7

回はそれを若干修正して第3表に示した。

2. 浦河

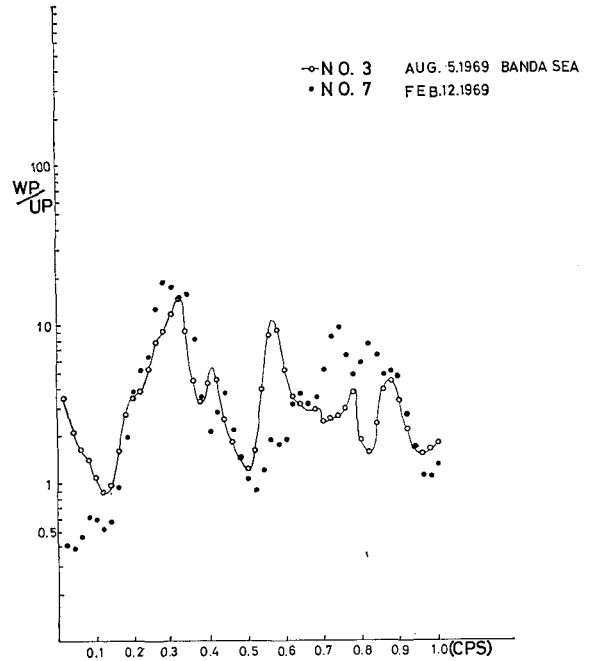
浦河附近の地下構造がかなり複雑であることは多くの地質の説明から考えられる。今までに求められた当地域の地下の速度構造としては田治米・他¹³⁾による地表附近の地震探査の結果と早川¹⁴⁾による露頭の岩石サンプルについての地震波速度測定の結果とがある。

後者の報告によれば、この附近には非常に早い速度をもつ地下深部の岩石が露出していたり、地質の説明¹⁵⁾によると、地層が大きく傾斜していることが知れる。したがって構造は横方向に著しく変化していると考えられ、この様な地域に水平層を仮定した理論を用いて地下構造を議論するのは明らかに危険であろう。しかしその様な複雑な構造にも、かつての激しい造山運動の中心である脊稜山脈から離れるに従って次第に緩傾斜の成層構造へと変化していくことが期待される。したがって少なくともその方角より入射した地震波についての水平層を仮定した、理論的考察は可能になると思われる。すなわち No. 3 と No. 7 との地震はそれを満足している。またそれらの地震の到来方向は S 21.86° W と S 19.51° W とであるので両者は殆んど同一経路を通過してきたと言える。

第11図に示されているように、この2つの地震の振幅スペクトラム比に完全な一致は見られないが、しかし約 0.1 cps から 0.56 cps の周波数範囲内では起り得る種々の誤差を考慮すると殆んど一致していると言える。今回は地震の数も少ないので前節の札幌の解析と同じく直接1つの地震に合う構造を求めてみた。第12図に示されたモデルが No. 3 の地震に合わせて作ったものである。

第11図に示されているように、この2つの地震の振幅スペクトラム比に完全な一致は見られないが、しかし約 0.1 cps から 0.56 cps の周波数範囲内では起り得る種々の誤差を考慮すると殆んど一致していると言える。今回は地震の数も少ないので前節の札幌の解析と同じく直接1つの地震に合う構造を求めてみた。第12図に示されたモデルが No. 3 の地震に合わせて作ったものである。

図中の白丸は観測結果から求められた振幅スペクトラム比であり、実線がそれに合わせて



第11図 浦河の記象 No. 3 と No. 7 とにおける振幅比の比較

Fig. 11. Comparison of the observed curves between Urakawa No. 3 and No. 7. They are closed circles curve and solid line respectively.

13) TAJIME et al.; Private communication. (1970).

14) HAYAKAWA; 前出 9).

15) MINATO et al.; The geologic development of the Japanese islands (1965).

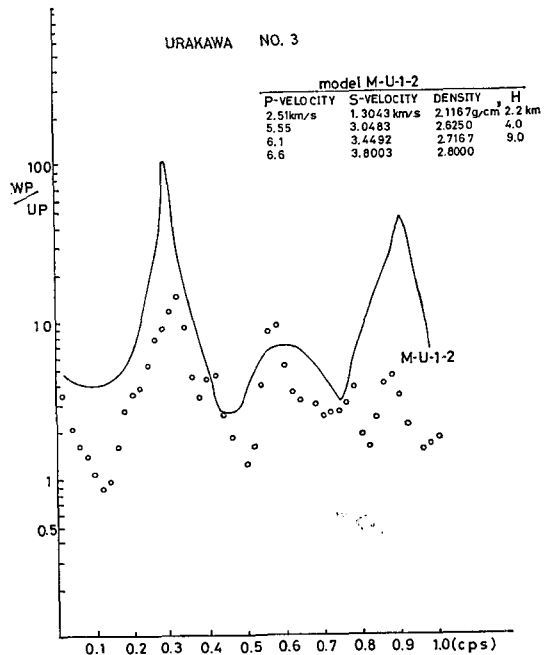
作った M-U-1-2 モデルの結果である。そのモデルの構造パラメータは図中右上に記されている。振幅スペクトラム比のピーク的位置についてはおおよそ一致させてあるが、理論曲線の方が大きくなる様子が見られる。しかしこの点は表層と 5.5 km/s の P 波速度を示す層との間にやや transit な堆積層を押入すれば解決されると思われる。したがって当地域附近は堆積層が厚く積っていることが考えられる。

IV. 議論及び結論

札幌と浦河とで観測された地震記象からそれらの地域の地下構造を推定するのが今回の目的である。現段階では他の有益な資料も少なく、既述のような方法だけからは厳密な結論を出しにくいと言える。ただ研究の対称とした札幌と浦河とは、地質構造が大きく異っているので波形にそれが反映され、二地域間の相対的比較は可能と思われる。具体的に言えば¹⁶⁾、札幌は南西北海道の東北部に位置し、そこの第三紀の岩相は殆んど火山噴出物で代表される。またその東南部台地地域には第四紀以降の火山噴出物や段丘堆積物の発達が著しく、他方北部の低地帯には沖積層が厚く堆積している。

一方浦河は前者の東北日本弧内帯地域の火山性物質を主とした地帯に存在するのに対し、堆積物質を主とした外帯地域にあり、かつ北海道をやや南北に貫く脊梁山脈の南部、西側に存在する。そしてその附近には造山運動の激しかった白亜紀から第三紀に及ぶ変成帯が分布している。ところで一方、TOMODA and SEGAWA¹⁷⁾ によるこの附近の重力測定の結果を見ると静内沖に大きな負の重力異常帯の中心があり、その負の異常帯の延長が石狩一苦小牧低地帯と一致するかまたは並行して走っている。さらに脊梁山脈をほぼ中心に正の重力異常帯があり、急峻な傾斜で静内沖の負の重力値へと変化している。したがって当地域は水平的に重力異常変化の著しい地帯の中にあるとも言える。

今回の解析の結果、このような地帯の下を通過してきた地震波からは層が比較的厚い構



第12図 浦河の記象 No. 3 とそれに対応する地下構造モデルとの振幅比

Fig. 12. An assumed model for the seismogram of Urakawa No. 3.

16) 例えば、北海道地下資源調査所；5万分の1地質図幅説明書，札幌，浦河。

17) TOMODA and SEGAWA；前出 2)。

造からなっていることが暗示され、さらにそこを通過した浦河の記象の場合、垂直成分の振幅スペクトラム分布の中には 0.26 cps に強い減衰を与えるような特異な地質構造が反映されていることが解った。また同一地震を用いて 0.32 cps から 0.6 cps の周波数範囲に限って周波数に対する振幅スペクトラムの減衰の割合を札幌の記象と比較すれば、浦河の記象の方がその程度がやや大きいと言えた。以上のことがらから、この地域を中心に堆積層が厚く分布していることを暗示していると思われる。

V. 謝 辞

記象の収集に際しては、札幌官区气象台、および浦河測候所等の地震観測課担当諸氏に御協力を仰いだ。また京大工学部（現在カリフォルニア工科大学に勤務）の栗田氏、そして北大理学部地球物理学教室の田 助教授、岡田 助教授等から終始有益な助言を受けた。これらの諸氏に深謝する。

なお本論文の数値計算は北海道大学大型計算機センターでなされたものである。

9. Frequency Analysis of Short-Period P Waves in Teleseismograms and Crustal Structure Models (No. 2 Near and at Sapporo and Urakawa)

By Tetsuo TAKANAMI

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

Crustal structure beneath Sapporo in Hokkaido was already investigated by the author, by means of amplitude spectra ratio of the vertical component to the horizontal one of short-period P waves.

This paper is to develop the understanding more strictly about the relation between the observed amplitude spectra ratio and its explanatory theory, we call it PHINNEY's method derived from Haskell matrix theory, and about local variance of the contents of amplitude spectra, owing to geological structure around the stations.

Three events were selected out of the earthquakes, which had been registered at both Sapporo Meteorological Observatory and Urakawa Meteorological Station during the period from 1964 to 1969.

They were all deep and distant earthquakes. As to magnitudes of them, they were almost the same scales as in about 6.0.

One of their waves came from the west of Kermadec Trench to Sapporo and the others were from Banda Sea. At the same time, Urakawa station's seismographs had also recorded them, except one from Kermadec Trench.

They were all examined in respect of not only the contents of amplitude spectra but the variance of amplitude spectra ratio of the vertical component to the horizontal one, and also studied from the point of Geotectonics.

Difference between them are allowed us to be appeared.

For example, Tendency of great attenuation of amplitude spectra versus frequency was recognized when some of their waves propagate through the region of heavy negative gravity anomaly zone, being off Shizunai in the southern part of Hokkaido.

And when some simple crustal structure models were made up fitting experimental amplitude spectra ratio into the theoretical one derived from PHINNEY's method, even under the complicated geological condition, we may say that the layer thicknesses in that zone are rather larger, from the reason of first peak shift of the ratio toward lower frequency with increasing the total layer thickness.

From this fact in addition to the former, we are sure that the zone has great sediments as a reflection of geocyncline during the period from the Cretaceous to the Tertiary.

In addition, Heavy attenuation was seen near at 0.26 cycles in the contents of amplitude spectra of the vertical component.

This result will support the above conclusion too.