

新潟地震余震観測

吉川宗治, 古沢 保, 小野博尉

AFTERSHOCKS OF THE NIIGATA EARTHQUAKE OF JUNE 16, 1964.

By Soji YOSHIKAWA, Tamotsu FURUZAWA, and Hiroyasu ONO

Synopsis

Synopsis. The aftershocks of the Niigata earthquake of June 16, 1964, were observed on magnetic tape using 3-ch. data recorder. The analog records were digitized with A-D converter and punched on the paper tape. From the digitized records Fourier spectra were obtained, and the spectral structures of P-waves and main phases were examined to discuss the ground motions caused by the different earthquakes and the differences due to the ground characteristics.

1. 序 論

1964年6月16日に新潟地方を襲った地震は各地に多くの被害をもたらしたが、中でも新潟市内の被害が特に大きかった。これは震動そのものによる建物の倒壊よりも、地震によって励起された軟弱地盤の惹き起した種々の現象（例えば不等沈下、噴砂等）によるむしろ二次的ともいえる被害が大きかったためである。

一方この地震は粟島に見られる土地の隆起、海底の断層等の地殻変動や、津波その他の諸現象を伴ない、又非常に多くの余震が何日も続いたのである。京都大学防災研究所でも色々の角度からこれらの地震によってもたらされた現象を調査したのであるが、その一環として7月6日から7月13日までの約一週間、新潟県北蒲原郡中条町で行なった余震観測の結果について報告する。観測にとりかかった時は本震発生後約20日間も経過して、余震観測としてはやや時期を逸した感があった。そのため余震を取り扱う際に一般に行なわれる震源分布による余震の活動域の決定や、余震活動の時間的推移を統計的に求めたりするのは不可能であろうという予測のもとに、余震及び観測地点の振動特性等を調べるという目的で観測を行なった。

記録は全て 3-ch. のデータ・レコーダーを通して磁気テープに録音し、A-D変換器を用いて digitize したものを解析した。観測は一点で 3 成分地震計を用いる場合と、水平動一成分を約 200 m ほど移動させ、水平成分 (E-W 成分) による二点観測との 2 つを行なった。これはことなつた場所により振動の様式がどの程度変化するかを実験的に調べて見るためである。

2. 観測方法及びデータ

観測に用いた器械は、換振器として固有周期 1 秒、感度 2.6 volt/kine の上下動 1、水平動（倒立振り子）2 の 3 成分微動計、これに結合する増巾器として最大倍率が 5600 倍のトランジスター・DC・アンプ、それに記録装置としての 3-ch. データ・レコーダーである。

観測場所は新潟県中条町関沢で、山地から平地に移り変る境界地帯である。このあたりは海岸の砂丘地帯周辺が相当の被害を受けたのに比べ、本震の震源には新潟市等に比しかなり近かつたのであるが、被害が全

く出ていない所である。地震計設置点として、関沢部落で最も大きな屋敷の庭を借り、そこで3成分による観測を行なった。2点で比較観測を行なう場合は、屋敷から約 200m 離れた両側が田圃になった道路上に、水平動一成分を移動させ、EW成分による同時観測をした。観測点付近は弾性波探査によると、地層がかなり急傾斜になっていて、地形的にも山地から沖積地へ移り変っており、200m はなれば沖積層がかなり厚くなり、地盤の性質としても相当異なっているものと想定される。

観測期間は7月6日から7月13までの一週間で、人為的振動を避ける必要上夜間観測を行なった。時間的には大体午後9時頃から翌日の午前6時頃までであるが、0時から4時までを中心にした。その間、磁気テープの取り替え、地震計の移動を除いては連続観測とした。この期間中は連日大雨が続き、各地に洪水が出るといった条件としては最悪とも言える状態だったが、地震計に箱をかぶせて雨が直接あたるのを防ぎ、又、水が浸み込んで leak するのを避けるため全体をビニールでおおった。

Table 1 に得られた地震を示す。余震観測としては時期的に遅かった上、最初有感地震を狙い、増巾器感度を下げて用いたりしたため数としては問題にならぬ位少なかったが、それでも7月12日昼に震度Ⅲ程度の大きな余震が発生し、12日夜から13日早朝にかけてはかなりの地震を連続して記録できた。

Table 1 に含まれる地震の中で例えば N5-450 のようなものは余震ではないと思われるが、その他のものはP～S時間、波形が大体似ている。人体に感じるか、又はそれに近い割合大きな地震である点等から余震と判断してもよいと考えられる。その他、テープの取り替え等の時に起り、完全に記録出来なかった地震及び車等の振動が重なったものは記載しなかった。なお表中、V, H(E), H(N) は3成分による観測を、V, H(E), H(E) は2点による比較観測を、それ以外は2成分のみ記録できた事を示す。

3. 解 析

磁気テープ上のデータはデータ・レコーダーにより再生して、その出力をそのままAD変換器(DATAC 1030)に入れ、数値化する。数値化の Sampling Frequency を定める場合どの程度の周波数で原記録に忠実になるかを知るため、10 c/s, 100 c/s, 1000 c/s で Sampling して比較してみた。その一例を Fig. 1 に示す。10 c/s の Sampling では原記録に比し波形の変形が著しく、この記録にはより高い周波数成分が含

Table 1. List of Aftershocks.

Earthq. No.	Date	Time	P-S Time	Initial Mov. in P	Components
		h m	sec		
N 2-773	July 7	5: 58	1.1-1.2	—	V, H(E), H(N)
N 0-553	8	0: 47	7	—	H(E), H(N)
N15-320	10	0: 22	6.6-6.7	(—)	V, H(E)
N25-958	11	6: 02	2.1	+	V, H(E), H(N)
N 8-118	12	3: 20	3.1	—	V, H(E), H(E)
N 8-457	12	3: 37	2.8	—	V, H(E), H(E)
N 5-450	12	4: 46	24 ?	+	V, H(E), H(N)
N28-440	13	2: 31	4.0	—	V, H(E), H(E)
N28-778	13	2: 56	4.2	—	V, H(E), H(E)
N28-820	13	2: 59	4.3-4.4	—	V, H(E), H(E)
N31-093	13	3: 22	1.6	+	V, H(E), H(E)
N31-420	13	3: 38	4.5-4.6	—	V, H(E), H(E)
N 4-524	13	6: 04	6.7-7.0	—	V, H(E), H(N)
N 4-649	13	6: 13	4.8-4.9	—	V, H(E), H(N)

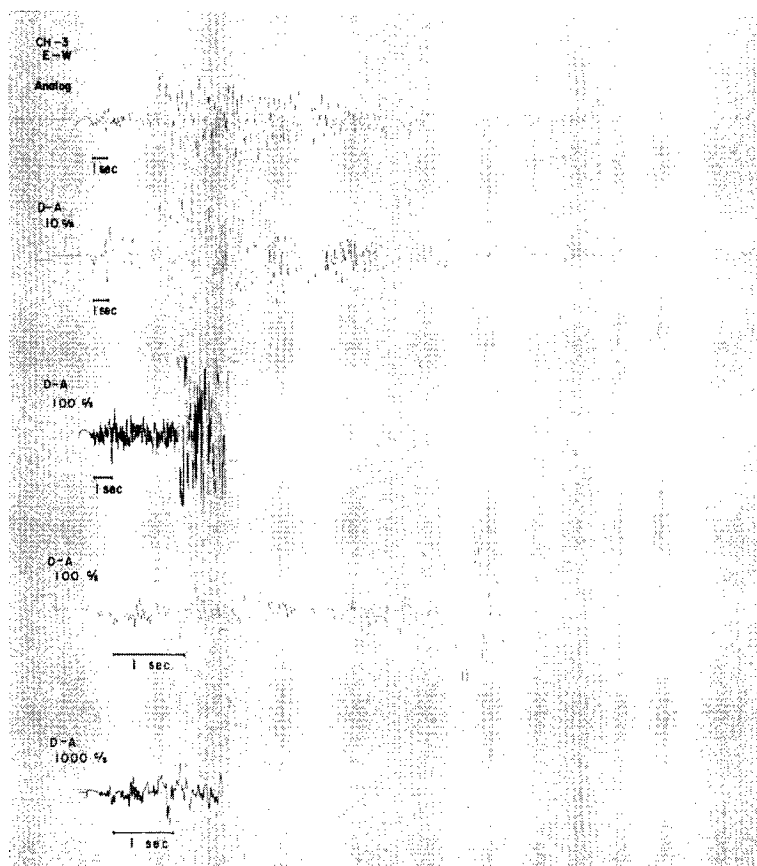


Fig. 1. Comparison of playback of earthquake N4-649 digitized at different sampling rates with original record.

まれていることがわかる。100 c/s と 1000 c/s ではほとんど波形の相異がなく、したがって解析には 100 c/s で十分である。地震計の周期等から判断してもそれほど高い周波数成分が存在しないのは当然と言えよう。しかし、wave orbitを知るにはできるだけ多くの点がある方が都合が良いので、1000 c/s の Sampling をも併用した。

観測が一ヶ所なので、origin を定めるのに水平動 2 成分の P 波初動及び S 波初動の wave orbit を調べ、P-S Time を用いてみた。wave orbit は AD 変換器により、DA 変換を施し、XY 記録計に描かせた。Fig. 2 (a),(b) にこのようにして得られた地震 N4-649 の水平面に於ける P 波ならびに S 波の wave orbit を示す。

P 波初動はほぼ $N40^{\circ}W$ の方向に明瞭な長軸を有し、(b) 図の S 波初動と見なされる部分は大体 P に直角の動きをしている。P-S Time は $4.8 \sim 4.9$ 秒であるから Fig. 4 の上側の × 印付近が震央になる。N25-958 についても同様に Fig. 3 (a), (b) から P 波の水平面は $N50^{\circ}E$ に polarized しており、S 波はほぼそれに直角になる。P-S Time は 2.1 秒で震央は Fig. 4 の下側の × 印になる。

次に波形を比較する意味で、N4-649, E28-820, N25-958 の 3 つの地震を各成分毎に並べて Fig. 5 (a), (b), (c) に示す。N25-958 の U-D 成分は初動方向が逆で、震源が近いことにより、非常に High Frequency

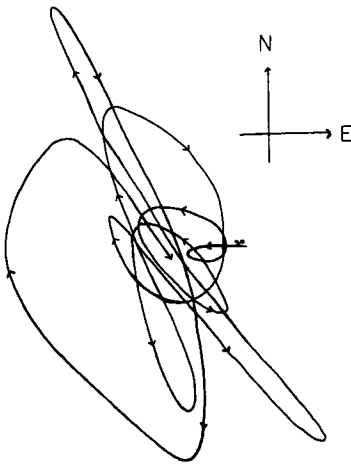


Fig. 2. Particle motion in the horizontal plane of the P and S motion from N4-649.
(a) : P motion,

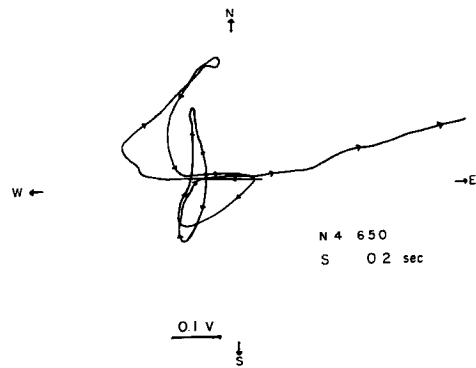


Fig. 2. Particle motion in the horizontal plane of the P and S motion from N4-649.
(b) : S motion

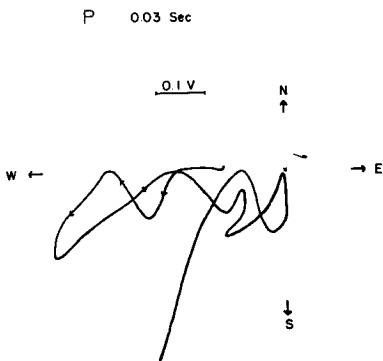


Fig. 3. (a) Particle motion in the horizontal plane of the P and S motion from N25-958.
(a) : P motion,

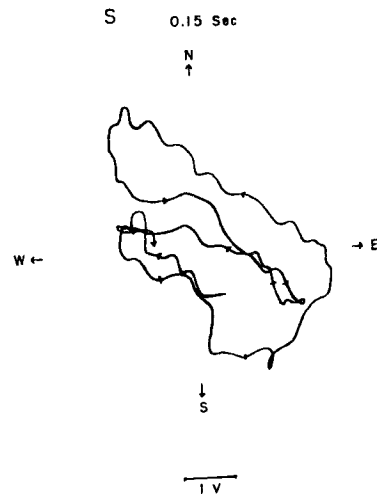


Fig. 3. (b) Particle motion in the horizontal plane of the P and S motion from N25-958.
(b) : S motion

が多いのが著しい特徴である。

N28-820 は3成分による観測でなく、震源方向が求まらないが、N4-649 とは初動方向及び P-S 時間共ほとんど同一であり、発生時間もあまり違わなく、目で見ただけでは波形も良く似ている。これを詳しく調べるためP波初動からS波到達までのいわゆるP波部分の Power Spectrum をとり比較する。Fig. 6,7 に

各々の Spectrum を示す。解析方法は Filon's method に従って周波数間隔を 1 cps にとり, 1~20 cps の範囲をフーリエ解析した。Fig. 6 より N4-649 の P 部は水平成分に於いては, 3~7 cps の周波数成分が卓越し, 15 cps 付近の成分が少なく 18~20 cps の短周期の波が 3~7 cps に重なって存在する。上下動成分は全体としてあまり明瞭な卓越成分が見られないが, 15cps 付近を境に大きく 2 つに分け得る。水平動の NS-成分及び EW-成分の 2 つは Spectrum において互いにかなり異なっているが, この地震の震源方向から判断すると EW-成分, NS-成分が似ていると考えられるゆえ, この点は興味があるけれども, 原因を何処に求めるかは今の所不明である。

Fig. 7 に示された N28-820 の同じく P 部の

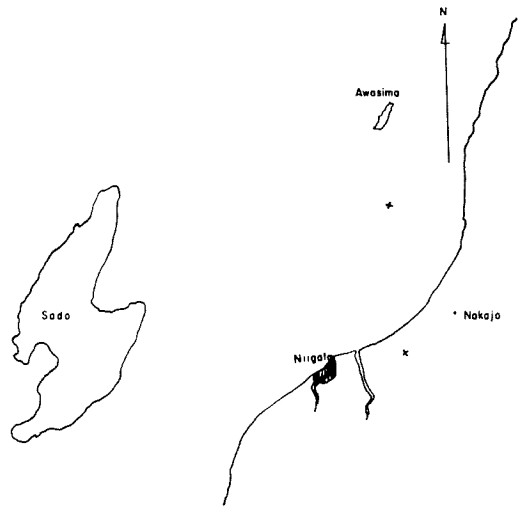


Fig. 4. Locations of epicenters and station.

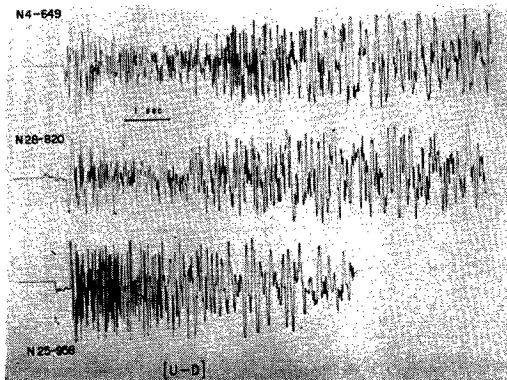


Fig. 5. (a) Digitized earthquakes (N4-649, N28-820, and N25-958) with sampling frequencies of 100 cps.

(a) : U-D components,

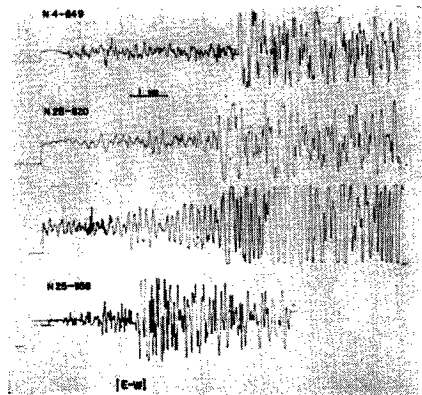


Fig. 5. (c) Digitized earthquakes (N4-649, N28-820, and N25-958) with sampling frequencies of 100 cps.

(c) : E-W components.

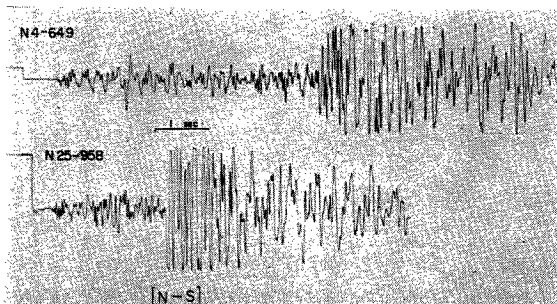


Fig. 5. (b) Digitized earthquakes (N4-649, N28-820, and N25-958) with sampling frequencies of 100 cps.

(b) : N-S components,

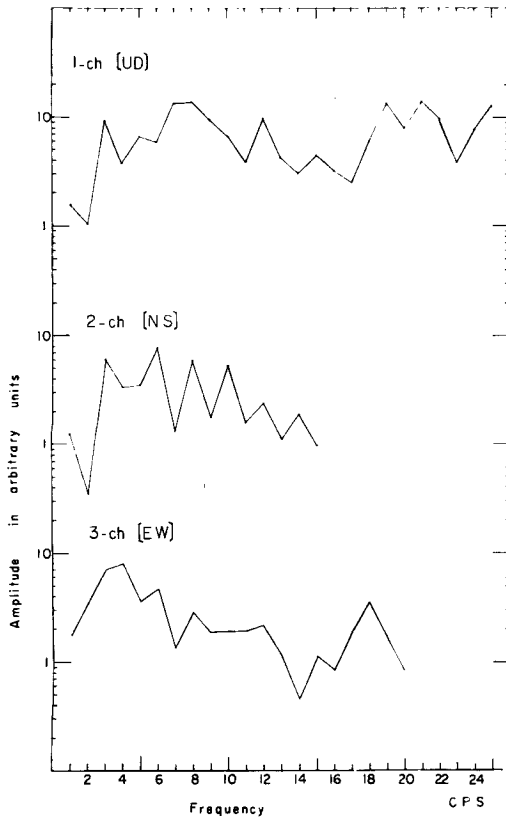


Fig. 6. Power spectrum of P-part of N4-649.

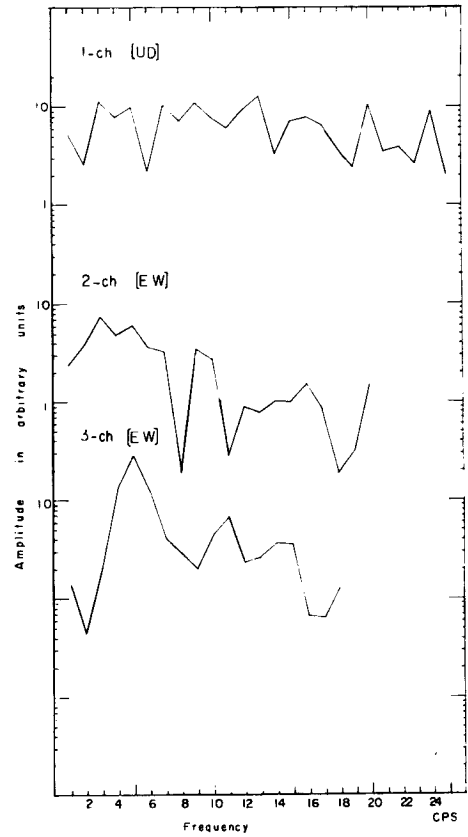


Fig. 7. Power spectrum of P-part of N28-820.

Spectrum ではU-D成分にはやはり明瞭なピークが見出されない。ここでU-D成分及び図の真中の曲線は屋敷裏庭での観測を表わし、最下段のch-3は200m離れた成分である。水平動(共にE-W成分)を見ると、山地の延長で沖積層が薄いと考えられる裏庭(ch-2)では3~7cpsに卓越し、8cps及び11cpsに鋭い谷があり、9~10cpsにもう一つの山が存在することが明らかである。一方沖積層の道路上に置いた成分では、ch-2と比較して5cpsを中心に4~6cpsの範囲に広がるはっきりしたピークがみられる。そして、11cps付近ならびに15cps付近に第2、第3の山があるが、第1の山に比べると振幅は小さい。又、ch-2には存在しない鋭い谷が2cpsにあり、8cps、11cpsの谷がch-3では各々9、12cpsにずれていて、谷の鋭さもch-2に比し、ずっと弱くなっている。この相異は同じ地震、同じ成分による観測であり、又200m程度の差は震央距離に比べほとんど無視できるゆえ、震源及び途中の伝播経路に問題を帰すことは不可能と思われる。したがってこれは地震計の設置点付近の非常にlocalな差に原因すると言える。ch-3はch-1、ch-2にはほとんど雑微動が無いのに比し、雑微動が大きく、しかもアンプの倍率が他の2つより高く振幅も全体として大きくなったゆえ、小振幅の水平動P波の部分は影響されたかも知れない。この点は詳しくは検討していないが、ここでは一応P波部分が観測点付近の地盤に影響されるという具合にスペクトル構造の相異を解釈しておく。

次に地震による相異を見るため、Fig. 8にN28-820とN4-649の対応成分を並べて描く。U-D成分は細かい点では色々あるが、どちらもはっきりした特徴が見られないため余りよくわからない。しかし水平成

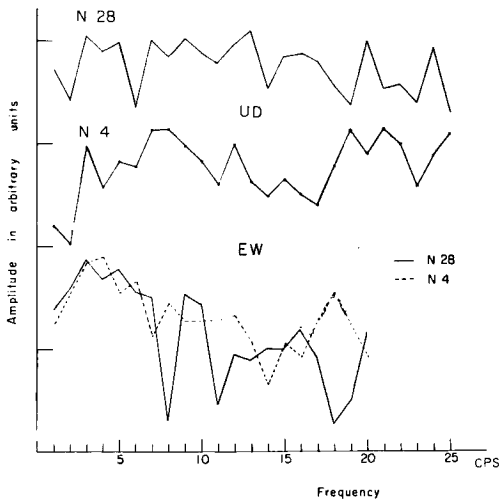
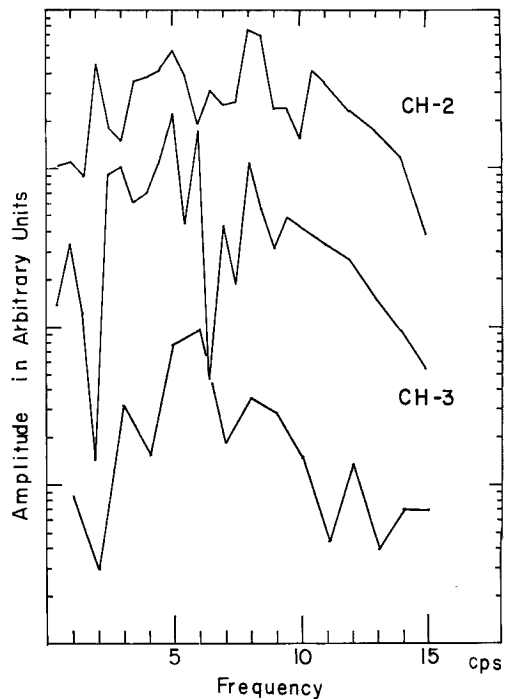


Fig. 8. Comparison of spectra between N4-649 and N28-820.

Fig. 9. Power Spectra of max. amplitude parts of N8-455 and earth-noise.
 (upper): E-W comp. of fixed station.
 (middle): E-W comp. of moving station.
 (lower): Earth-noise of moving station (E-W comp.).



分 (E-W) では 7 cps 以下の低周波部分の形は大体同じだが, N 28-820 では 8 及び 11 cps に鋭い谷があるのに N 4-649 ではむしろ逆にそこで振巾が大きくなっている。そして N 28-820 では 15 cps 付近が第 3 の山を形成しているのに反し, N 4-649 では最も低い部分になり, 18 cps でも全く反対になっているのが著しい対照を示す。これら 2 つの地震は同じ日に 3 時間位の時間差で発生したものであり, P~S 時間の差も 0.5 秒と非常に小さく, 初動方向も同じである。したがって同じようなスペクトル構造を持っても不思議ではないのだが, ここに見られる相異は, 同じようだとと思われる余震でも発震機構が異なるのか, それとも, 10 cps 以上の短周期成分は伝播経路の少しの違いに大きく影響されるゆえなのか, いろいろ考えられるが, 震源の情報が無いため立ち入った解釈が出来ない。

地盤の震動特性を求めるには一般に常時微動及び地震の主要部分の周波数特性を調べる方法が用いられるが, 普通はゼロ線を切る点の周波数頻度分布によって卓越周期を出している¹⁾。これではエネルギーとして卓越する周期がはっきりしないので, ここではフーリエ解析により Power Spectrum を求めて周波数特性を得て見た。Fig. 9 に N 8-455 の水平動成分の S 波以後の最大振巾部分を約 10 秒間, 並びに P 波初動直前までの常時微動をやはり 10 秒間用いて計算した結果を示す。N 4-649, N 28-820 を用いれば P 波部分等と比較出来て興味があるのだが, 振巾が大きすぎ, データーレコーダーの制限である最大入力 1 V を超え, 解析出来ないゆえ N 8-455 で議論する。ch.-2 すなわち裏庭での記録は地震が無い部分ではほとんどゼロで, いわゆる微動が存在せず, 常時微動としては ch.-3 すなわち道路上のみを解析した。

Spectrum を計算する前に, 15 cps 以上 cut off の low pass digital filter をかけ, 得られた結果を 3 つおきにとり, つまり 100/3 cps の Sampling を施したと考えられるものをデータとしてフーリエ解析した。Spectrum の周波数間隔は 10 cps までは 0.5 cps, 10 cps 以上は 1 cps に選んだ。ただし常時微動は計算時間の都合で 1 cps 間隔にとった。Fig. 9 は上から裏庭 (ch.-2), 道路上 (ch.-3) の地震, 常時微動

の順で Power Spectrum を示す。先ず ch.-2 では 2 cps, 5 cps, 8 cps, 10.5 cps にピークがあり、中でも 8 cps を中心とする山が最も大きい。しかし全体にそれほど大きな差は見られない。一方 ch.-3 は、谷がかなり急激に振動しているが、2 cps, 6.5 cps の鋭い谷が著しく、その間つまり 5 cps を中心に振巾が最も大きい。その他 8 cps, ch.-2 には無い 1 cps にも山がある。5 cps, 8 cps のピークは ch.-2, ch.-3 に共通する故、地震そのものによる特性を表わすとも考えられるが、1 cps, 2 cps, 6 cps の互いに反対の相になっているのは地盤の相異を表わすと思われる。しかし、この図からは普通言われる地盤の固有振動による卓越周期に相当するものは見出し得ない。したがって地盤の良否等を議論するのは無理なようである。

最後に地震による振動と常時微動の Spectrum を比較する。常時微動の方は 1 cps 間隔にしか計算していないため、完全に対比させることは出来ない。しかし対応する成分を比べるため地震のスペクトルを 1 cps 間隔で結んでみると、10 cps までは 2 cps の谷、5, 6 cps のピーク、7 cps の谷、8 cps の山等は定性的に全く同じになり、唯一の相異は最大点が 5 cps と 6 cps に入れ変っている点だけである。10 cps 以上では様子が少し違って、この点は先の P 波部分の場合と同様問題になると思われるが、ここではこれ以上触れない。又、道路上での記録に 2 cps 成分が鋭く吸収されているのは詳しく検討すれば面白いであろう。

4. 結 び

以上の解析の結果次のような点が明らかになった。

(1) 水平面での方向がほぼ 45° に近い方向から来た地震における E-W 成分、N-S 成分でも P 波部分のスペクトル構造に違いが見られる。

(2) 同一地震の、同一方向の記録でも観測点の相異による P 波部分のスペクトル構造の相異が見られる。これは P 波から S 波までの間にある波は観測点付近の地盤の性質に強く影響されるような成分によって構成されていると考えられる。

(3) 時間的にも近接して発生し、震央距離、初動方向等もほとんど同じである余震の間にも、P 波部分のスペクトル構造には相異がある。

(4) 地盤の異なる観測点での同じ地震による主要部分のスペクトルはかなり異なる。特に沖積層道路上の 2 cps 成分の吸収は興味がある。

(5) 常時微動と地震の主要動部分のスペクトル構造は 10 cps 以下の周波数では同じと考えてよい。

この報告では解析した地震の数も少なく、震源その他の情報も得られなかったので、結果について十分検討し、はっきりした結論を出せなかったのが残念である。今後もう少し詳細に解析し、結果の解釈等も試みるつもりである。

尚この報告における計算は全て KDC-I を使用して行なったものであることを付記する。

終りに本調査において種々御便宜を賜った新潟県中条町役場ならびに熊倉利直氏に厚く御礼申し上げます。又、観測、解析の上でいろいろ御助言、御援助下さった京都大学理学部和田卓彦助教授に感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 例えば震研地盤研究会：東京都地盤調査報告，震研集報 vol. 33, pp. 471-545, 1955.