微動について II

東京大学理学部地球物理学教室 赤 松 敬

(昭和 33 年 2 月 21 日受理)

On Microtremors II

Kei AKAMATU

Geophysical Institute, Faculty of Science, Tokyo University

(Received Feb. 21, 1958)

In the preceding paper, the characteristic frequency, power spectra, distribution of amplitudes and other characteristic features of waves in microtremors or short period microseisms at Hongo in Tokyo were discussed. In this paper, the results are described of the tripartite observations which were conducted at Hongo and Kokubunji in Tokyo, Kakioka in Ibaraki Prefecture and Matsushiro in Nagano Prefecture in order to investigate further in detail the character of propagation of microtremor waves.

The results obtained are:

1. Tripartite observations revealed phase velocities of 300 m/s at Kakioka for vertical motion and 600 m/s at Kokubunji for horizontal motion. The wave lengths 100 m, and 250 m were found respectively.
2. Short period microtremors with frequencies of more than 10 c/s decrease notably during the night in amplitude.
3. Microtremors appear to be composed of waves which are generated from a number of surface sources and which have the character of surface waves.

§ まえがき

前回の報告¹⁾では主に東京本郷の微動について微動の周期, スペクトラム, 振巾の分布及び伝播性について論じた. 伝播性については, 観測した 2 点間の相互相関と 3 点観測によつて大体の速度が計算され, その結果から微動は表面波的な性質をもつものと考えられた. 又スペクトラムについても, 時間及び場所によつて多少の差異がある事が見出されている.

今回は更に微動の波の伝播性について詳しく調べるために, 東京本郷, 国分寺, 茨城県柿岡, 長野県松代で 3 点観測を行つた. 勿論 3 点観測による解析には限度があるが, 前回と同様微動の微視的な構造を調べる一段階として適用してみることにした.

§ 方法及び機械

3 点観測は三角形の二辺を 2~5 m 毎に拡げて, 一辺が最大 30~50 m 迄至る様にして各点で観測を行う. 観測は主に夜間行い, 得られた記録から伝播方向及び伝播速度を計算した. 夜間に観測したのは, 昼間よりも夜間の方が微動の波の構成は簡単化されているからである. 使

用した機械は前回に述べた様に、地震計としては 1 c/s 水平動地震計 3 台（本郷及び国分寺では大体 N-S 成分として使用した）、3 c/s 上下動地震計 3 台、増巾器としては爆破地震動観測に用いられる周波数帯域がほぼ 1~30 c/s のものである。増巾器には $R=200\text{ K}\Omega$, $c=2\text{ }\mu\text{F}$ のみによる積分回路をつけた。（柿岡で観測した時は $R=200\text{ K}\Omega$, $c=1\text{ }\mu\text{F}$., 又松代での観測では積分回路をつけなかつた。）これは 10 c/s 以上の周波数の微動を除くためである。この様な周波数の微動については又別に調べる予定である。本郷で観測したときには増巾器の終段に更に $R=200\text{ K}\Omega$, $c=2\text{ }\mu\text{F}$ による low pass をつけたものも行つた。これは本郷は他の地点に較べて短周期の微動が著しいからである。地震計と、増巾器を合わせた周波数特性は 1~7 c/s 迄ほぼ平坦になつていて、この部分は変位計として使われ、倍率は夜間、1 c/s 水平動地震計で本郷で観測する場合約 20000 倍である。これを基準にすると微動の振巾は国分寺では本郷の約 1/30、柿岡では約 1/60 となる。松代では更に数 100 分の 1 となる。

§ 昼と夜の微動の比較

前回に示した様に、微動の昼夜の振巾の比は場所と観測される周期によつて異なる。本郷では 7~10 c/s の周波数のものについては 17:1 に及ぶ。これは微動の source が夜は減少すると考えれば当然のことである。周期については一般に短周期は昼の記録に多い。夜の記録は短周期の振動が少くなり、非常に規則正しい、より長い周期の振動が続いている場所もある。例えば Fig. 1 に示す様に国分寺と柿岡の記録をみると、規則的な周期が続いている波の上に昼は短周期の微動が重なつている。この短周期のものは震源が極く近い人為的なものであると考えられる。国分寺と柿岡の昼夜の微動のスペクトラムを Fig. 2 に示す。しかし本郷に於い

Fig. 1 A. Records with 1 c/s horizontal seismometers at Kokubunji
1. At night. 2. In the daytime (The ratio of sensibility of amplifier in the daytime to that in the night 1:3)
B. Records with 3 c/s vertical seismometers at Kakioka
1. At night. 2. In the daytime.

Fig. 2-I Spectra from records with 3 c/s vertical seismometer at Kokubunji.
a. In the daytime. b. At night.

Fig. 2-II Spectra from records with 3 c/s vertical seismometer at Kakioka.
a. In the daytime. b. At night.

ではこの点については著しい差はない様にみえる。これは前回の報告にも示した。スペクトラムは前回と同様記録紙上振巾を $1/50$ 秒毎に十、一でよみとつてコレログラムを作り、短時間自己相関函数を用いて求めた。

増巾器に C-R 回路を二段につけて短周期を除いた場合、本郷で観測される波は 1.5 c/s 位の周波数の波である。この程度の波になると約 47 m へだたつた 2 点で Fig. 3, I A に示す様に、一見対応がついている如くみえる。即ち約 47 m はなれた 2 点での相関係数は 0.7 位になる。周期の長い波程よりへだたつた 2 点でよく対応がつくのは前の結果と同じである。松代では地下に地震計が置かれた事、及び山地よりなる地形が他の場所に較べて異なる点であるが、三角形の三辺を 184 m , 183 m , 147 m として観測した場合、Fig. 3-III に示す様にこの程度はなれていても一つ一つの波の対応はついている。

§ 伝播方向及び伝播速度について

3 点観測の結果得られた記録から 3 点共波形がよく対応のつく波の山及び谷をえらび出し

Fig. 3-I Records with 1 c/s horizontal seismometers at Hongo in the night.

- A. Records with two integrating circuits. ($R=200 \text{ K}\Omega$, $C=2 \mu\text{F}$)
 $a=46.8 \text{ m}$ $b=23.4 \text{ m}$ $\alpha=45^\circ$
 B. Records with one integrating circuit. ($R=200 \text{ K}\Omega$, $C=2 \mu\text{F}$)
 $a=15 \text{ m}$ $b=18 \text{ m}$

Observation points corresponding to record numbers.

Fig. 3-II A. Records with 1 c/s horizontal seismometers at Kokubunji in the night. a, b—20 m
 B. Records with 3 c/s vertical seismometers at Kokubunji in the night. a, b—20 m
 C. Records with 3 c/s vertical seismometers at Kakioka in the night. a, b—20 m

Observation points corresponding to record numbers.

Fig. 3-III Records with 1 c/s horizontal seismometers at Matsushiro in the daytime.
 a—183 m b—147 m $\alpha=67^\circ$

Observation points corresponding to record numbers.

て、一つ一つの波の伝播方向及び伝播速度を計算した。各観測点の記録は Fig. 3 に示してある。前回でも述べた様に本郷は他の観測点と違って波と波との対応がつけにくい。この結果からみて本郷では夜間でも微動の source は比較的密であつて、観測点の四方に散在し各々から出た

波が重なり合つて観測点に伝わつて来るものと考えられる. この様な場合には Tripartite Station Method では十分に解析する事はできない. これに較べて国分寺及び柿岡では大体一定の方向から来ている波の group (5~10 山) が多い. しかもそれら group 毎の一つ一つの波の周期もほぼ一定している. これは本郷の記録に較べて著しいことである. 殊に国分寺の記録では夜間記録された微動の長い series について常にその周期と波形が殆ど一定している事は著しい. (Fig. 3-II A). 国分寺や柿岡の様な場所では観測点近くには微動の震源は少なくなつて, 観測される微動は比較的遠方から伝わつて来る波が多いのではないかと思う. 計算の結果から得られた伝播方向及び伝播速度の頻度の graph を Fig. 4 及び Fig. 5 に示す. 頻度は計

Fig. 4—I, II Frequency distributions of the direction of wave propagation at Kokubunji.

Fig. 4—III Frequency distribution of the direction of wave propagation at Kakioka.

られたものから $(f_{i-1} + 2f_i + f_{i+1})/4$ による overlapping mean をとつたものを示してある. Fig. 4 は頻度を円形に, 方向は 10° 間隔にとつてある. Fig. 4 から, 国分寺において 1 c/s 水平動地震計で観測した結果によると, 波の来る方向は大体 50° の扇形に, 3 c/s 上下動地震計で観測した場合は大体 60° の扇形にひろがつている. 両者の最大頻度の差は 30° である. 柿岡では 3 c/s 上下動地震計で観測したのであるが, この場合は大体 80° のひろがりとなる.

I. 1 c/s Horizontal seismometer

II. 3 c/s Vertical seismometer

Fig. 5-I, II Frequency distributions of phase velocities at Kokubunji.

III. 3 c/s Vertical seismometer

Fig. 5-III Frequency distribution of the phase velocity at Kakioka.

伝播速度は graph から国分寺では水平動で約 600 m/s, 上下動で約 400 m/s に山が出ている. 柿岡では約 300 m/s である. このみかけの速度は色々な方向から来る波の合成されたものであろうから, 頻度の最大値が大体の波の速度をあらわしているとみてよいであろう. 観測される周波数は国分寺では水平動で約 2.6 c/s, 波長は約 250 m, 上下動で 2~3 c/s, 柿岡では 3.6 c/s, 波長は約 100 m である. 国分寺での上下動地震計の記録から出した速度の頻度分布が他の二つに比較して flatなのは, 記録をみても例えば国分寺の 1 c/s 水平動地震計で観測した記録

に較べて複雑であつて, 異なる周波数と異なる速度の波が合成されていると考えられる. 波の山と谷のよみとりの精度から求めた一つの波の方向及び速度の probable error は $\pm 10\%$ 位である. 松代では他の例と異なり, 観測される波は 1.5 c/s の周波数のもので 1 km/s 以上の速度を持つ. 松代は観測点が地下にあること, また地形その他から考えて別の種に類別すべきであろう. 例えば遠地地震, 脈動, また充分遠方の人工的 noise 源, 或は土地の性質等の影響も考えられる. 伝播速度

及び波長からみると土壤その他の速度, 土壤の厚さ等を考え合わせて, 以上観測された微動は表面波の性質を持つ様である. すなわち, 速度, 波長と一搬の土壤その他の速度, 波長とを較べて実体波とは考えにくい. 例えば那須, 萩原, 表の実験²⁾によれば, ローム層に於ける縦波の速度は 135 m/s その波長は 4~4.5 m である. 又地震探鉱グループによる東京都下田無農場に於ける地震探鉱の結果³⁾は, 縦波の速度が表面から約 2 m 位まで 200 m/s 前後, それ以下

10 m 位まで 1210 m/s, 更にそれ以下 20~30 m まで 1780 m/s, 更にその下は 2280 m/s となっている. 人工的理由による雑微動の源は主として地表にあるから, 実体波の振巾は表面波の振巾に較べて小さいであろう. 又夜間の記録の様に短周期が減衰した記録では, 比較的遠い源から伝わって来る表面波と考えると, 小規模の爆破地震動観測の記録等にみられるが如き表面波の波形等と較べて納得できる様である.

§ Discussion

土地の固有周期の問題については今村以来色々議論されて来たが, 大部分はその原因が地層の重複反射にあると考えられている. 又は地下に層がある場合, 波の入射の仕方によつてある種の波が卓越するともいわれる⁴⁾. 一方微動についても土地によりある特定の周期が卓越するといわれている^{5), 6)}. 今回観測された微動には, この様な波 (主に下方から入射又は反射して来る波) は目だたない様である. すなわち 3 点観測の結果では比較的小規模の面積, 例えば三角形の三辺が 10 m 内外でもすでに 3 点で一様に振動しないのである. 2 点で多小の phase のずれがある. この事は前回の論文でもスペクトラムについて示した. 前回及び今回の観測結果から得られた速度及び波長から考えて, 微動は表面波的な性質を持つと考えてよい様である. 恐らく微動の震源はその殆どが地上にあるのであろう.

§ 結 果

1. 3 点観測の記録から得られた微動の伝播方向及び伝播速度の頻度分布から, 方向については国分寺では大体 50° ~ 60° の扇形にひろがり, 柿岡では 80° 位にひろがつている. 速度は水平動で観測したもので $600\sim 700$ m/s, その波長は約 250 m, 柿岡では上下動で観測したもので約 $300\sim 400$ m/s, その波長は約 100 m である.

2. 夜間の記録では短周期が著しく減少する. これは今回の観測では国分寺と柿岡に於いて著しい. この様な場所では昼間の短周期の微動は Fig. 1 に示した如く, 全く人為的なものと考えられる.

3. 前回の報告にも少しふれたが, 更に今回の観測から微動は数多くの源から発生した波が合成され, 主として表面波の性質を持つて伝わると考えられる.

今後は更に微動の波の微視的な性質を調べるために半模型的な field 実験により, 又個々の波の構成も詳しく調べたいと思う.

終りに, 熱心に御指導, 御激励をいただいた松沢教授, 浅田助教授に深く感謝する. 実験に御協力いただいた栗本広氏, 寺島敦氏に感謝する. 又国分寺の実験では郵政省電波研究所の敷

地の使用を御許可下さった甘利所長に、実験中種々御配慮をいただいた同研究所平尾研究室長に感謝する。

参 考 文 献

- 1) 赤松 敬：「微動について」，地震 Ser. 2, **9** (1956), 21.
- 2) 那須信治，萩原尊礼，表俊一郎：「土壤層中に於ける人工地震波の伝播並に土壤の弾性に関する研究」，B.E.R.I. **14** (1936), 561.
- 3) 亀谷卓也：「浅い構造と表層補正」，地震探鉱実験グループ会報第2号 (1954), 13.
- 4) K. Kanai & S. Yoshizawa: "Relation between the Amplitutde of Earthquake Motion and the Nature of Surface Layer IV. (the Case of Finite Strain)", B.E.R.I. **34** (1956) 167.
- 5) K. Kanai, T. Tanaka & K. Osada: "Measurement of the Micro-tremor I", B.E.R.I. **32** (1954), 199.
- 6) 金井 清，田中貞治，長田甲斐男：「常時微動の測定結果」第2—7報，B.E.R.I. **35** (1957), 109—191.