微 動 の 減 衰 性

秋田大学教育学部 野 越 三 雄

(昭和 46 年 11 月 1 日受理)

On the Attenuation Characteristics of Microtremors

Mitsuo NOGOSHI

Faculty of Education, Akita University

(Received November 1, 1971)

The attenuation characteristics as the fundamental nature of microtremors are discussed at the present paper. The experimental field is Hakodate City in Hokkaido.

Recently, the attenuations of Rayleigh waves and Love waves were investigated. However, the attenuations of microtremors have not yet been investigated. As the first step, the present paper described the discussion on the attenuation characteristics of microtremors by means of energy of wave motion.

Energy ratio contours agree very well with the structure of the streets in Hakodate City. Namely, the higher level places of artificial disturbance; factories and streets having larger traffic noises, show larger values of the energy ratios.

This fact agrees well with the propagation directions which were obtained by tripartite observations of microtremors.

Therefore, it is suggested that the source of microtremors may have a special frequency characteristics as a source function. Next, the attenuation of microtremors was obtained by calculating the distance-energy relation along an observation line. Fig. 15 and Fig. 16 show these results. Therefore, it is clearly found that both the vertical and the horizontal components of microtremors are attenuated as the inverse first power of distance.

These attenuation characteristics of microtremors seem to indicate a nature of surface waves.

Attenuation coefficients were obtained as reasonable values.

§ 1. は じ め に

微動の持っている基礎的な性質の多面性のうち各特性にスポットをあてて、これまでにその伝播性、振幅特性などについて報告してきた。[野越他 (1970 a, 1970 c, 1971 a)]

ここでは微動の空間的な減衰性という現象にしばつて調べた。微動がある波源を持つものとするれば当然そこから離れたある地点での微動は medium での減衰を示すはずである。

波動の減衰は既にわかっているように、実体波と表面波との場合では距離による減衰が異なっている。したがつて、このことはまた微動の実体波的性質、表面波的性質を区分するきめて

にすることができる。今回はこの現象を調べてみた。

波動の減衰は波動の振幅によつて議論されるが、エネルギーの距離的減衰をもつてそれにあてることができる。とくに微動のように振幅といつても、最大振幅、平均振幅などは問題があるので、ここでは波動エネルギーを算出して議論することにした。

§ 2. 観測点および観測方法

観測場所は北海道函館市内であり、その観測点は Fig. 1 に示されている。合計 33 ケ所であつて、大体均等に分布している。用いた地震計は 1 c/s 上下動 1 台、水平動 2 台の 3 成分または 1 c/s 上下動 1 台、水平動 1 台の 2 成分で直流増幅器に接続し、Data recorder に録音される。その観測、再生系の overall response は大体 1~20 c/s で flat としてある。したがつて、目的としているのはこの周波数範囲である。観測系、観測方法などについては別の論文 [野越他 (1970 a, 1970 b)] に詳しく述べられてあるので、ここでは省略する。

Fig. 1. Map showing locations of microtremor observation sites in Hakodate City.

§ 3. エネルギーの計算方法

微動のエネルギーの計算には非常に簡単に考えて一般の波動に適用される波動エネルギーの計算式を用いた。

§2 で述べた方法で観測された微動の記録振幅は地動速度を表わしており，観測系の感度計算で補正することによって，その絶対値を算出することができる．そこで Fig. 2 で示されるような波形を考えたとき，この波動がゼロ線を

横切るところで新しくはじまる正弦波におきかえた．すなわち，波動がゼロ線を横切る点毎に区切られた個々の山谷のエネルギーは振幅と半周期が等しい正弦波のエネルギーに等しいものと考え，各山谷における $V_i^2 \Delta t_i$ が計算される．

一般に， K を定数とすると，total enrgy E は

$$E = K \sum_{i=1}^n \sum_{m=1}^3 V_{mi}^2 \Delta t_i$$

で表わされる．ここで， m は整数で成分を意味し， n は整数である．

したがって，1成分の場合は

$$E = K \sum_{i=1}^n V_{i1}^2 \Delta t_i \quad (1)$$

で計算される．この式を用いて，火薬爆破によつて生成された波動のエネルギーを論じた研究はいくつかある．[例えば，HOWELL and KAUKONEN (1954)，HOWELL and BUDENSTEIN (1955)，飯田他 (1967)] このような波動には初動があつて最後尾があるので，いわば有限の時間で上の式を適用することができる．しかし，観測される微動の場合は勿論そのような波形は見あたらず，このような式は適用できないと思われる．しかし，ここではやや強引に次のように考えた．

[1] 微動を確率定常過程としてとらえ，その振幅の統計的検定によつて，ある有限区間では正規分布していることを確める．

[2] [1] を満足するような区間では周波数分析である power spectral density function が定常状態に近づく．

[3] [1]，[2] が満足される区間ではおおよそそこで算出されるエネルギーも定常的であろう．

このような考慮の下に上の式をエネルギー算出に用いた．

ところで，すでに報告してあるように，[1]，[2] の検定はすんでおり [野越他 (1970 b)]，33ヶ所について，その区間 (40 sec) での周波数分析も終つている．[野越他 (1971 b)]

Fig. 2. Illustrating the method of choosing amplitudes and time intervals in the computation of energy.

V_i : velocity amplitude. Δt_i : time interval.

従つて、エネルギー算出にはこの周波数分析がなされた区間に適用すればよいことになる。一応、チェックの意味で同一場所で観測された微動の上下、水平動2成分について、同一記録上でそれぞれ3カ所 A, B, C をとり、それぞれのエネルギーの時間的变化を計算した。上下動成分の場合は Fig. 3 に、水平動成分の場合は Fig. 4 のようになる。

これらの図からわかるように、上下、水平動成分どちらも、40 sec ほど計算すればどの区間をとつても、積算エネルギーともいうべき $\sum V^2 dt$ なる量もその時間的变化もほとんど変化しないとしてよい。従つて、この時間の区間で全観測点でえられた記録に適用することができる。

その計算の結果は Table 1 に示されている。

§ 4. 考 察

一般的にいつでもこのようなエネルギー量が大きければ大きいほど微動の発生している source に近いわけで、このような観測点の分布が密になればなるほどエネルギーの大きい所が見出しやすいことになる。このように考えて、えられたエネルギー量の最大の所を 100 として基準にし、正規化した。これを energy ratio として Table 1 に示してある。これによるとエネルギー最大の場所は上下動、水平動成分とも必ずしも一致してい

Fig. 3. Time variations of wave energy by the vertical components of microtremors. A, B and C; Samples of the same finite length of time in the same record.

Fig. 4. Time variations of wave energy by the horizontal components of microtremors. A, B and C; Samples of the same finite length of time in the same record.

Table 1. $\sum V_i^2 \Delta t_i$ and energy ratio at each observation site.

No.	Observation site	Vertical comp.		Horizontal comp.	
		Measured energy (CGS)	Energy ratio	Measured energy (CGS)	Energy ratio
1	Gryokaku	6.95×10^5	12.28	6.08×10^5	2.57
2	I. G.	1.67×10^5	2.95	1.44×10^6	0.608
3	O. G.	5.63×10^8	0.0994	1.20×10^5	0.506
4	Shoshinji	2.46×10^4	0.435	1.06×10^5	0.447
5	Keibajo	2.84×10^4	0.502	7.22×10^4	0.305
6	K. M. S.	1.10×10^6	19.4	7.95×10^6	33.5
7	Konpira jinja			1.06×10^7	44.7
8	Shinkawa P.	4.44×10^6	78.4	2.37×10^7	100.0
9	Yu. E. S.	4.09×10^5	7.23	9.02×10^5	3.81
10	O. E. S.	9.34×10^5	16.5	3.36×10^6	14.2
11	H. C. H. S.	2.03×10^5	3.59	6.52×10^5	2.75
12	Hongyoji	1.18×10^6	20.8	7.21×10^6	30.4
13	Tokito Machi	2.86×10^6	50.5	8.70×10^5	3.67
14	Yunohama P.	3.02×10^6	53.4		
15	Hakodate Prison	2.55×10^5	4.51	1.62×10^5	6.84
16	H. P. O.	8.70×10^5	15.4	2.92×10^6	12.3
17	W. E. S.	1.38×10^6	24.4	4.65×10^6	19.6
18	M. E. S.	5.02×10^6	88.7	4.47×10^6	18.9
19	Okawa P.	9.55×10^5	16.9	1.99×10^6	8.40
20	Koryuji	6.95×10^4	1.23	6.77×10^4	0.286
21	Zo. E. S.	1.56×10^5	2.76	7.54×10^5	3.18
22	Toyokawa inari	5.69×10^6	100.0	8.64×10^6	36.5
23	Ao. E. S.	2.23×10^4	0.394	2.26×10^6	9.54
24	Sakae Machi	2.01×10^6	35.5	2.17×10^6	9.16
25	Matsukawa Ap.	5.66×10^6	100.0	3.43×10^6	14.5
27	Hi. E. S.	2.57×10^3	0.0454	9.17×10^4	0.387
37	H. U. M.	4.68×10^3	0.0826	8.52×10^4	0.359
31	H. U. N.	3.14×10^3	0.0554	4.18×10^4	0.203
32	Fukabori	1.50×10^5	2.95	3.46×10^5	1.46
33	Chiyogadai	1.13×10^5	19.9	2.78×10^6	11.7
34	Kamiyunokawa	4.89×10^2	0.0086	1.00×10^4	0.0421
35	Nanaehama	6.94×10^6	122.6	7.16×10^6	30.2
36	Hakodate Eng.	2.31×10^4	0.408	1.78×10^5	0.751

ない。

これは微動源における波動の生成とからめて考えれば興味ある問題である。

Table 1 に示された energy ratio を 1/25 000 地図上の観測点にプロットして、コンターを描くことができる。観測点が少ないので、多少強引に描くと、函館市における微動の定常的なエネルギーの空間的分布は上下動の場合は Fig. 5, 水平動の場合は Fig. 6 のようになる。

Fig. 5. Contours of energy ratio distributions of vertical microtremors.

Fig. 6. Contours of energy ratio distributions of horizontal microtremors.

上下動成分の場合と水平動成分の場合はその最大のエネルギーを示すコンター附近の位置が先に指摘したように少しずれているが大勢的にはほとんど同じ傾向を示しており、1/25 000 地図の市街地などの構成と比較すると極めて示唆に富んでいる。すなわち、このコンターは市街地の分布状況と非常によく一致しており、微動のエネルギーの大きい所は工場地帯、交通量の多い繁華街であることが直ちに理解される。

また、函館市の中心街から離れて、湯ノ川温泉街が東部に位置しているが、ここも微動源の一つを形成しているらしく、ここより離れるに従って、そのエネルギーが減少しているのがみられる。さらに、微動の伝播性の論文[野越他(1970 a)]で報告したように、同図に Chiyogadai (33), Kamiyunokawa (34) での tripartite による伝播方向を示すと、その方向はそれぞれエネルギーの大きい所をよく指向していることがわかる。すなわち、このことは微動に発生源があつて、そこから伝播性の波がでていると考えられる。この点に関して、今までの研究では同時多点観測で、その到来方向と人工的騒乱の多い地点との比較にとどまっていたのが、以上のことから微動の発生源の確認と、その範囲の指摘という点で、今後さらにいろいろな問題を派生させることになる。たとえば、微動の Source function といった問題にも示唆するものとなる。

次に、エネルギーの最大のところを基準にして、一応そこから波が伝播すると考えて、全観測点の energy ratio と距離との関係を上下動成分、水平動成分についてみたのがそれぞれ Fig. 7, Fig. 8 である。上下動成分についてみれば、Fig. 5 でみたように energy ratio は距離と共に減少していくのが大きな傾向として認められるが、途中により小さな微動源があるとバラツキは大きくなる。また、当然ながら Fig. 5 のコンターからエネルギーの大きい分布は大体南北に細長くなつていて、この方向では距離に対する減衰はみられない。そこで、この基準点から一直線に観測点が並んでいて、しかも energy ratio が reasonable に減少し

Fig. 7. Energy ratios against distance from a standard point for the vertical components of microtremors.

Fig. 8. Energy ratios against distance from a standard point for the horizontal components of microtremors.

Fig. 9. Relations between contours of energy ratios and observation lines A and B for the vertical components of microtremors.

ている点を探がすと同図の黒丸のようになる。これを A-Line とする。また図から明らかなように別系統として、湯ノ川温泉街を源とする B-Line が見い出される。

これらの事情は全く水平動成分の場合にも適用され、Fig. 8 に示される C-Line, D-Line がえられる。ただし、B-Line と D-Line とは同じ観測線である。

これら A, B, C, D-Line をもう一度 Fig. 5, Fig. 6 でみてみるとそれぞれ Fig. 9, Fig. 10 のようになる。大体、このような直線の方にエネルギーが伝わり、減少しているとみなされる。ただし、B-Line と D-Line とは同じ直線的な観測線であるが、D-Line の場合は Yunohama P. (14) における水平動成分の欠測のため、1点観測点が不足している。

次に、これらの Line に沿つて、算出されたエネルギーはどのように時間的变化として減衰するかをみたのが、上下動成分の場合 A-Line, B-Line としてそれぞれ Fig. 11, Fig. 12 に示されている。この図の Δ は基準点を一応 0 km としたときの震央距離に対応するものである。

上下動成分の場合、その時間的变化でエネルギーの減り方はほとんど同じ傾向で減少してい

Fig. 10. Relations between contours of energy ratios and observation lines C and D for the horizontal components of microtremors.

くことがわかる。水平動成分の C-Line における $\Delta = 1.47 \text{ km}$ での時間的変化のみが違う傾向を示している。この説明は困難であるが、あるいは別の Source からの波が混在したのかもしれない。

この微動のエネルギーのいわばたまり方は火薬爆破によつて生成される波動の場合のように、 Δ が大きくなるにしたがつて極めて早い時間に急速にエネルギーが増加して緩急になる点がおそく現われてくるという分散的な現象【飯田他 (1967)】は顕著ではないが、その傾向はいく分みられるようである。このことは微動の発生するからくり、また波動の生成伝播との関連で興味深い。しかし、これ以上の議論は火薬爆破によつて発生する波動と少なくとも観測される微動のような波動とは単一には比較できないので控えなければならないであろう。唯、微動の発生源に類似させて火薬爆破による波動との比較を試みる実験解析はおこなわれている。【吉村他 (1967), 野越他 (1970 b, 1971 c)】

次に、これらの観測線に沿つて、エネルギーが距離と共にどのようにして減衰していくかをみてみた。

Fig. 11. Time variations of wave energy on A-line for the vertical components of microtremors.
 Δ : distance from a standard point.

一般的に波動の減衰の仕方には2通りあると考えられている。

Source から距離 r はなれた、点 P におけるエネルギー E_p は

$$E_p = E_0 r^{-\beta} e^{-\alpha r} \quad (2)$$

である。ここで、 E_0 は定数で $r=0$ におけるエネルギー、 α は減衰係数である。そして、エネルギーの拡がり方として、 $\beta=2$ の場合が波動の source から媒質中を radial 方向に等しく拡がる形式に相当し、 $\beta=1$ の場合が波長程度の厚さの範囲での境界面附近に限定される形式にあたりと考えられている。すなわち、 β は波動の種類によつて異なる定数で、実体波の場合は 2、表面波の場合は 1 の値をとるとされている。[HOWELL *et al.* (1955)]

そこで, (1), (2) 式より

$$e^{-\alpha r} = C r^{\beta} \sum_{i=1}^n V_{1i}^2 \Delta t_i \quad (3)$$

がみちびかれる。ただし, 定数 C は $C = K/E_0$ である。

(3) より, 結局減衰係数 α は

$$-\alpha = dY/dr$$

で求められる。ただし,

$$Y = \log_e(r^{\beta} \sum_{i=1}^n V_{1i}^2 \Delta t_i)$$

である。

この Y に含まれる r^{β} のべき数はさきに述べたように波動の種類によつて定まった値をとるとされている。

そこで, $\beta = 1$ の場合を A, B, C, D-Line についてそれぞれ計算すると, 上下動成分が Fig. 15, 水平動成分が Fig. 16 のようになる。

A-Line の場合, 上下動成分のエネルギー減衰を示したものであるが, 極めてよく $\beta = 1$ の曲線にのることがわかる。このときの減衰係数 α は約 $\alpha = 2.86 \times 10^{-3}/\text{m}$ となる。

B-Line の場合はやはり上下動成分のエネルギー減衰を示したものであるが, Yunohama P. (14) を基準にしている。図から明らかなようにこの場合は連続した一本の直線的な減衰はしないようで, Yo. E. S. (9) と Hakodate Eng. (36) との間に断絶が存在している。この測線は平地ではなく, Yunohama P. (14), Yu. E. S. (9) は平野部に, Hakodate Eng. (36), H.U.N. (31) は高台に属していて, いわば階段上の地形をしているといつてよい。その差は 20 ~ 30 m と思われる。つまり, B-Line におけるエネルギーの減衰のギャップはこの地形によるものと考えられる。このように考えると, 平野部における減衰の勾配と高台におけるそれとはほとんど一致するのは説明がつけられる。測点は少ないが微動のエネルギーの地形による蓄積の仕方への影響という面で極めて示唆的である。平野部におけるエネルギー減衰も, 高台にお

Fig. 12. Time variations of wave energy on B-line for the vertical components of microtremors.

Δ : distance from a standard point.

Fig. 13. Time variations of wave energy on C-line for the horizontal components of microtremors.

Δ : distance from a standard point.

けるエネルギー減衰も $\beta = 1$ とした直線にのり、減衰係数 α は約 $\alpha = 1.88 \times 10^{-3}/\text{m}$ となる。次に、水平動成分の場合の C-Line についても、A-Line とほぼ同様のことがいえ、 $\beta = 1$ としたとき、一本の直線によくのつて減衰している。この場合の減衰係数 α は約 $\alpha = 1.31 \times 10^{-3}/\text{m}$ となる。

D-Line の場合はやはり水平動成分についてのエネルギー減衰であるが、B-Line と同じ測線であつても Yunohama P. (14) での水平動成分の観測がないので、Yu. E. S. (9) を基準としている。したがつて、観測点の数は非常に少ない。この場合図にあるように Hakodate Eng. (36) のみが極端に小さく出すぎてしまつていたので、これを除いて考えればやはり $\beta = 1$ の直線にのり、減衰係数 α として約 $\alpha = 2.39 \times 10^{-3}/\text{m}$ がえられる。しかし、この場合

Fig. 14. Time variations of wave energy on D-line for the horizontal components of microtremors.
 Δ : distance from a standard point.

は B-Line での上下動成分の場合のように平野部と高台とでギャップがあるような不連続的な直線は引くことはできない。このことは階段上の地形が上下動成分と水平動成分の場合とでは違った影響を与えるということを示しているのかもしれない。しかし、平野部には一点しか観測点がないので、これ以上議論することはできない。

以上のように、微動のエネルギーの減衰の仕方は $\beta=1$ の場合としてよく説明できるようである。すなわち、このことはエネルギーの減衰性という面からみた微動の表面波的性質を指摘したことになる。また、A, B, C, D-Line の測線についてえられた減衰係数 α は $1.31 \times 10^{-3} \sim 2.86 \times 10^{-3}/\text{m}$ にわたっているが、この値を出すときの error を考慮すれば一応妥当な値と思われる。そして、この値は列車によって起こされた波動の減衰を調べた結果〔嶋他 (1970)〕の減衰係数が $2 \times 10^{-3}/\text{m}$ には近いものであり、その微動の生成・伝播に関して極めて興味深い。

Fig. 15. $[\text{Energy}] \times [\text{Distance}]$ against distance from a standard point on A and B-lines for the vertical components of microtremors.

以上の観測，計算結果からの考察をまとめると，微動源としての人工的騒乱源との関連を明らかにし，媒質によるエネルギー減衰から，微動の生成伝播に関する表面波の性質を指摘したことになる。しかし，この観測点の分布はこのようなテーマについて行なうためのものではなかったので，必ずしも理想的な空間的分布ではないので，今後さらにこの種のテーマの実験にはもう少し違った場所で行なえばさらに良い結果がえられると期待される。これを機にまた微動に関していろいろな問題が派生してくるであろう。例えば，微動の source に関してはその mechanism, source function など，生成伝播については表面波としての減衰 [前川 (1969), KUDO *et al.* (1970)] などへのつながりが将来検討されと考えられる。今後の研究が期待される。

この研究を遂行するにあたり，北海道大学理学部田治米教授にいろいろ助言と励ましの言葉をいただき厚くお礼申し上げる。また，観測において多大な努力を払われた北大理学部地球物理学科 D. C. 学生五十嵐享氏に深謝の意を表する。さらに，北大理学部助教授岡田広氏にも討議していただいた。お礼申し上げる。

Fig. 16. $[\text{Energy}] \times [\text{distance}]$ against distance from a standard point on C and D-lines for the horizontal components of microtremors.

計算は秋田大学電子計算室 FACOM 270-20, 東北大学大型計算機センター T. S. S. (課題番号 G 2301 D 1207) によりおこなわれた。

文 献

- HOWELL, B. F. and E. K. KAUKONEN, 1954, Attenuation of Seismic Waves near an Explosion, Bull. Seism. Soc. Amer., 44, 481-492.
- HOWELL, B. F. and D. BUDENSTEIN, 1955, Energy Distribution in Explosion-Generated Seismic Pulses, Geophysics, 20, 33-52.
- 飯田汲事・青木治三・水野正彦, 1967, 波動エネルギーの時間的空間的分布, 物理探鉱, 20, 16-21.
- KUDO, K., A. M. ALLAM, I. ONDA and E. SHIMA, 1970, Attenuation of Love Waves in Soil Layers, B. E. R. I., 48, 159-170.
- 前川 博, 1969, 小爆破による表面波の減衰, 北大地物研究報告, 22, 109-123.
- 野越三雄・五十嵐享, 1970 a, 微動の伝播性, 地震 [2], 23, 264-280.
- 野越三雄・五十嵐享, 1970 b, 微動の振幅特性 (その 1), 地震 [2], 24, 281-303.
- 野越三雄・五十嵐享, 1971 a, 微動の振幅特性 (その 2), 地震 [2], 24, 26-40.
- 野越三雄・五十嵐享, 1971 b, 微動と地震動災害について, 北大地物研究報告, 26, 169-191.
- 野越三雄・乗富一雄・片寄白王, 1971 c, 新潟県柴雲寺における小爆破実験で観測された波動の解析 (第一報), 地震探鉱実験グループ会報, 第 59 号, 1-14.
- 嶋 悦三・柳沢馬住・工藤一嘉, 1970, 列車によつて起こされ波動の減衰, 地震 [2], 23, 332-334.
- 吉村正義・坂尻直巳・五十嵐享, 1967, 釧路市および札幌市郊外の雑微動の測定, 北海道災害研究グループ, 2, 61-75.