

近地地震観測所としての松代の 潜在検知能と効率について*

正務 章**・荒川 義則**

550. 341

On the Potential Earthquake Detectability and the Efficiency of the Matsushiro Seismological Observatory as a Station of Near Earthquakes

Akira Masatsuka and Yoshinori Arakawa

(Seismological Observatory, J.M.A.)

For the purpose of obtaining the basic information on optimum observation systems at the Matsushiro Seismological Observatory (MAT), the present situation of the potential earthquake detectability and the efficiency of the station for near and shallow earthquakes are investigated. The results summarized are as follows.

(1) As well known, the earthquake detectability of a seismic station has a clear relation to the behaviour of short-period background noises. First, the conditions of these noises at MAT are investigated.

(2) By considering the possibility of identifying *P*- and *S*- waves against the background noise conditions, the minimum detectable amplitude of earthquake at MAT is evaluated. Namely, this critical amplitude is determined by means of the signal-to-noise ratio of which value is 4.

As a result, the quantities in the daytime and the nighttime are obtained as $1 \times 10^{-2} \mu$ and $4 \times 10^{-3} \mu$ respectively.

(3) The procedure for determining the magnitude of earthquake is developed on the basis of the maximum amplitude and the *S-P* time interval at MAT. And, it is verified that the agreement between the estimated magnitudes by the present method and by the JMA's formula is practically sufficient.

(4) The potential earthquake detectability of a station may be shown by the minimum detectable magnitude of earthquake at a given epicentral distance down to which events should be detected without omission.

Under this consideration, the procedure for estimating the minimum detectable magnitude is presented. Consequently, the quantities at MAT are determined, as a function of epicentral distance and focal depth.

(5) Lastly, the efficiency of MAT is discussed from both sides of the potential earthquake detectability and the frequency response of available seismographs.

目 次

- | | |
|---------------------------------|---------------------|
| 1. まえがき | の決定法 |
| 2. 松代における常時微動の現状と近地地震動の検知可能限界振幅 | 4. 近地地震に対する松代の潜在検知能 |
| 3. 松代の1点観測によるマグニチュード | 5. 近地地震観測所としての効率 |
| | 6. むすび |

1. まえがき

高倍率地震観測所における地震検知能を明確にし、さ

らに観測所の効率の現状を把握しておくことは、観測施設を効率のよい最適システムに改善整備するための基礎資料としても、また人工雑微動源の増設計画から観測環境を守る対策を考える基盤としても、必要なことと考える。しかし、検知能をどのような量で表わすかという点

* Received Jan. 12, 1975.

** 地震観測所

においては、対象とする地震（遠地とか、近地とか）によっても違うし、まだ問題が残っているように思われる。

萩原・岩田(1965), Kaminuma(1969), 本谷(1972), 山岸・斉藤・末広(1972)などは、ある広域の観測網(USCGS, NOAA)でとらえられた世界の地震を基準にして、対象とする観測所がその何%を検出しているかという、いわば相対的検知率を用いて、主として遠地地震に対する検知能の状況を示された。これに対し、Santó(1970)は、USCGSで残らず検知されると思われる、ある指定地区内で発生する地震の最小マグニチュードの値と $m=4.5$ の地震が指定地区で予想される発生総数の何%検知されているかという割合(%)とで、USCGSによるその地区の地震の被検知度を表わし、世界のいろいろな地区におけるその変動を調べられた。

本文では、当初に述べたような必要性もあって、遠地地震を主体にした既往の諸調査とは少し立場を変え、常時微動の振動特性の現状から出発して、近地浅発地震動(以下、地震動と呼ぶ)に対して松代地震観測所(以下、松代と呼ぶ)が持ち得る最大の検知能(以下、潜在検知能と呼ぶ)を明確にするとともに、これと現用地震計の機能とを対比することにより、近地地震観測所としての松代の効率についても検討した。

2. 松代における常時微動の現状と近地地震動の検知可能限界振幅

どんな地盤のところにも、大小の差こそあれ、常時微動が現われる。常時微動が存在すれば、近地浅発地震の規模が次第に小さくなって、ある振幅になると遂に微動の中に埋没し、位相の検出はもちろん、地震動の存在すら判別できなくなる。常時微動の程度により、地震動の検出限界値が決まるはずである。本節では、まず松代における常時微動*の現状を概観し、次に、この妨害のもとで検知**し得る地震動の最小振幅(以下、検知可能限界振幅と呼ぶ)を定める。

2.1 常時微動の特性

(1) 周期 1973年7月から1974年6月までの12か月において、代表的な常時微動が発生している日を各月ごとに2日ずつ選び出し、それらの周期の出現度数分

* 脈動は対象にしない(松代の脈動周期の出現度数の山はおおむね2秒前後と4秒前後のところにある)。

** 本文で検知とは、主要な位相が概ね検出できることと定義する。

*** 水平動の $N-S$ 成分を代表としてとり、全振幅の $1/2$ で表わした。

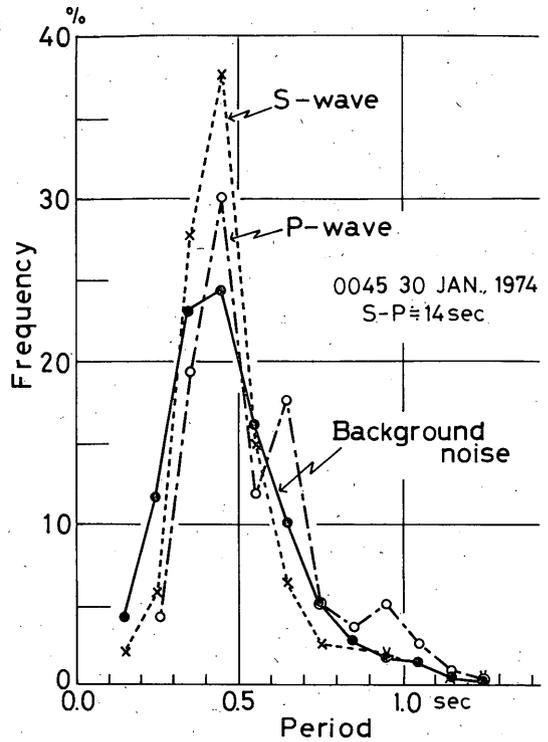


Fig. 1. Frequency distributions of the periods of background noise and of P - and S -wave trains for a shallow earthquake.

布を調べてみた。その結果は Fig. 1 のとおりで、松代においては $0.3\sim 0.5$ 秒の常時微動が卓越し、全体としては $0.1\sim 0.8$ 秒の帯域に含まれるものがほとんどであることがわかる。

次に、常時微動の周期特性に対し、地震動のものがどのようになっているか、少し比較してみた。実例として、1974年1月30日00時45分ごろに発生した地震($S-P: 14$ 秒)の松代における P 波列の部分と S 波列の部分の周期の出現度数分布を求め、Fig. 1の常時微動のものに重ねて示してみる。この比較図でみられるとおり、既に Kanai, Tanaka, Osada (1954) が指摘した如く、当所でも両者の周期特性はほとんど同じになっている。他の $2\sim 3$ の近地浅発地震についてあたってみた結果もほぼ同様である。

このような面からみても、地震動は常時微動に埋没しやすく、これによって観測所の地震検知能が大きく制約されることがうなずける。

(2) 振幅 各対象時間の振幅***の平均値から日変化曲線と年変化曲線を求めて示すと、Fig. 2 (1),

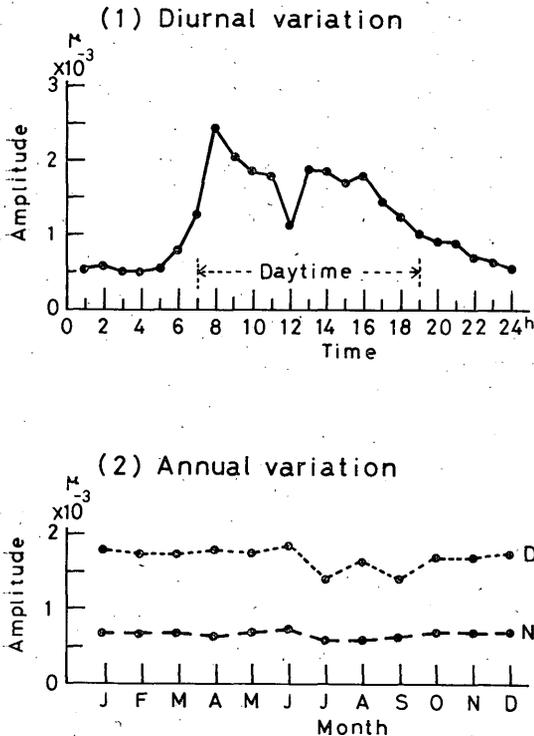


Fig. 2. Diurnal and annual variations of average amplitude of background noises.
 D: variation in the daytime.
 N: variation in the nighttime.

(2) のとおりになる。

これをみると、常時微動の振幅は著しい日変化をするが、松代では年変化はほとんどしない。そして、人の活動の時間的な変化と全く並行的な変動を示している。すなわち、朝の7時頃から急激に振幅を増し、19時頃には小さくなっていく。昼休みに相当する時間帯に、かなりはっきりした振幅の谷が現われるのもおもしろい。

そこで、7時から19時までを昼間、その他の時間を夜間として、それぞれの時間帯における平均振幅を求めてみると、 $1.8 \times 10^{-3} \mu$ および $0.7 \times 10^{-3} \mu$ となる。しかし、個々の振幅は、一般に (平均振幅) $\times (1 \pm 0.4)$ の間で変動しており、常時微動が発達する場合の昼間には時として $2.5 \times 10^{-3} \mu$ に達し、また夜間でも $1.0 \times 10^{-3} \mu$ になる。

したがって、地震動の検出を妨害する常時微動の振幅の上限值は、昼間においては $2.5 \times 10^{-3} \mu$ 、夜間においては $1.0 \times 10^{-3} \mu$ になるものと思われなければならない。

2.2 地震動の検知可能限界振幅

* 近地震では、S波が最大動になることが多い。

常時微動と重なって地震動が現われる場合、その最大動のSN比がどれ位になれば、主な位相が常時微動から頭をだし、その検出が可能になる確率が大きくなっていくものであろうか。

ある地点における地震記象の型は、地震計の特性・発震機構・震源の深さ・震央距離・伝搬経路・観測地点の地盤など、いろいろな条件に支配される。したがって、多くの地震について、それぞれのP相とS相の振幅比 A_P/A_S をとってみれば、かなりばらついた値が現われるような気がする。そこで、1972年1月から8月までと1973年1月から4月までの12か月に発生した浅発地震で、松代の $(S-P)_m$ が約10~30秒の65個の地震記象から A_P/A_S の値を求め、その出現度数分布を調べてみると、Fig. 3のとおりで、それほどばらついた現われ

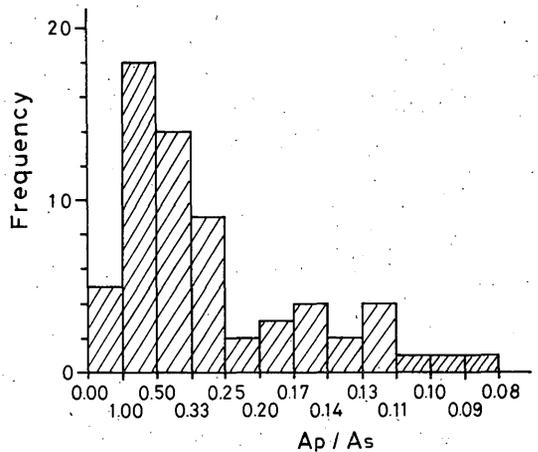


Fig. 3. Frequency histogram of A_P/A_S for shallow earthquakes.

A_P : amplitude of P-wave.
 A_S : amplitude of S-wave.

方をするものではないことがわかる。すなわち、P相の振幅がS相の振幅の1/4より大きい頻度がそれ以下の場合に比べて格段に多く、その出現確率は60~80% (信頼度90%) となっている。このことは、松代においては、最大動*のSN比が4以上になれば、常時微動の妨害のもとでもP相とS相の検出の可能性が相当大きくなることを示しているといえよう。そこで、やや大雑把ではあるが、常時微動の上限振幅の4倍値をもって、松代における検知可能限界振幅と考えることにする。

以上の検討から、現在の松代における昼間と夜間の検知可能限界振幅を決めると、それぞれ $1.0 \times 10^{-2} \mu$ と

$4.0 \times 10^{-3} \mu$ となる。

3. 松代の1点観測によるマグニチュードの決定法

本文で対象とする主な地震の規模は、一般の気象庁観測網で捕捉されるもののマグニチュードに比べ、かなり小さいものである。したがって、松代の1点観測資料からマグニチュードが決められるようにしておく必要がある。

3.1 マグニチュードの算定式とノモグラム

気象庁では、周知のとおり、日本およびその付近に発生した深さ60km以浅の地震のマグニチュード(M)を、次の坪井の式で業務的に決定している。

$$M = \log A + 1.73 \log \Delta - 0.83 \quad (1)$$

ただし、Aは水平成分を合成した最大地動振幅 (μ)、

Δ は震央距離 (km) である。

いま、松代の世界標準地震計(短周期)に記録された

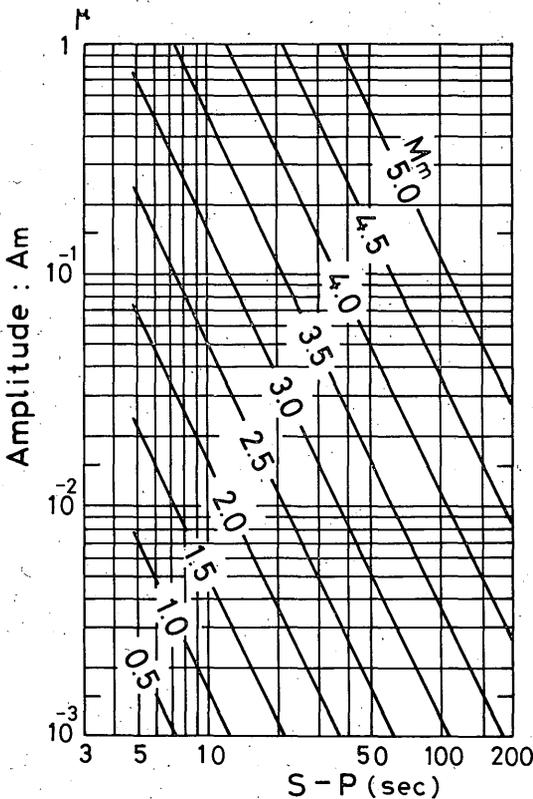


Fig. 4. Nomogram for determining the magnitude of shallow earthquake, based on both the maximum amplitude and the S-P time interval.

地震の水平2成分の最大振幅のうち大きい方を $A_m(\mu)$, S-P時間を $(S-P)_m$ (秒), マグニチュードを M_m とするとき、次式の関係があるとする。

$$M_m = \log A_m + a \log (S-P)_m + b \quad (2)$$

ただし、a と b は定数とする。

1972年2月から8月までと1973年1月の8か月に発生した10秒 $<(S-P)_m < 100$ 秒の浅発地震を対象にし、気象庁地震観測網の資料によってMが決定され、かつ松代で振幅がはっきり観測できたものを抽出すると、101個ある。そこで、これらの地震についての A_m と $(S-P)_m$ と M_m の代りのMとを用いて、(2)式の定数a, bを最小二乗法で決定することにする。その結果は(3)式のとおりである。

$$M_m = \log A_m + 2.12 \log (S-P)_m + 1.70 \quad (3)$$

(3)式に基づいて、 A_m と $(S-P)_m$ を与えて M_m を求めるノモグラムを画くと、Fig. 4. のようになる。

3.2 適用性の検証

松代の1点観測資料から上述の方法で求めた M_m と気象庁地震観測網の資料で決められた対応する地震のMとを比較し、その適用性の程度を確かめておく。

1973年2月から4月までの3か月に発生し、Mと M_m

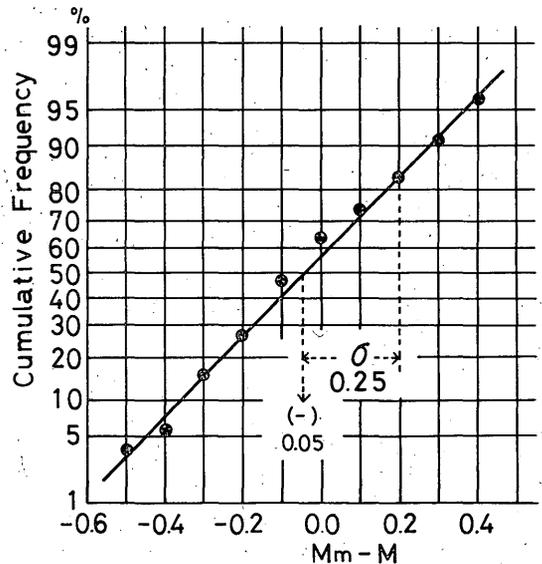


Fig. 5. Cumulative frequency curve of magnitude difference, $M_m - M$, plotted on a normal probability paper.

M_m : magnitude determined by the single station method of MAT.

M: magnitude determined by the JMA seismological network.

が対応して決められた10秒 $(S-P)_m < 100$ 秒の浅発地震を抽出すると、全部で52個ある。これらの地震について M_m とそれに対応する M との偏差 $(M_m - M)$ を求めて、その累積度数分布を正規確率紙に記入すると、Fig.5 のとおりになる。この図でわかるように、 $(M_m - M)$ は -0.05 を平均値とし、標準偏差が 0.25 の正規分布に極めて近い分布をしている。

したがって、気象庁地震観測網で決められる程度の地震規模の算定に、それと 0.5 位までの偏差を許すことにすれば、松代の1点観測による方法も大体不都合なく実用できることになる。

そこで、(3)式の適用範囲を、その定数の決定や適用性の検証に用いた地震のマグニチュード ($M > 3.5$) より小さなものの算定まで広げられるものとして、議論を進めることにする。

4. 近地震に対する松代の潜在検知能

さきに求めた検知可能限界振幅に相当する地震動を松代の地盤に生ぜしめる地震のマグニチュードを検知可能限界マグニチュードと呼ぶことにすると、いうまでもなく、これは距離によって変わる。すなわち、検知可能限界マグニチュードは(3)式またはFig. 4の A_m に検知可能限界振幅を代入することにより、 $(S-P)_m$ の関数として決まってくる。いま、昼間における検知可能限界マグニチュードを $M_m(\min)_D$ 、夜間のそれを $M_m(\min)_N$ と表わして、実際の数値を入れて求めると、それぞれ次式のとおりになる。

$$M_m(\min)_D = 2.12 \log(S-P)_m - 0.30 \quad (4)$$

$$M_m(\min)_N = 2.12 \log(S-P)_m - 0.70 \quad (5)$$

また、 M_m の算定用ノモグラムに入れて示せば、Fig. 6 のとおりである。震央距離の関数として求める場合は、 $(S-P)_m$ を走時表で変換して対応させればよい。

さて、ある観測所が持ち得る最大の検知能、すなわち潜在検知能は、検知可能限界マグニチュードを指定して震央距離で表わすか、あるいは逆に、指定された震央距離における検知可能限界マグニチュードで示すことができる。ここでは、前者によることにして、松代におけるその現状を示してみる。その結果は、Table. 1 (1), (2) のとおりである。

いま一例として、深さ 20 km の地震に対する松代の潜在検知能を地図上に表わしてみると、Fig. 7 のとおりになる。常時微動の発達する昼間においても、例えば $M_m(\min)_D = 3.0$ の等値線は、北は東北地方中部から西は近畿地方の中部を通る。そして、夜間のものは昼間の

ものより、ずっと広い地域を掩っている。

この大きな潜在検知能は、Fig. 8 から推察されるように、大きな工場や交通機関から離れ、しかも舞鶴山(標

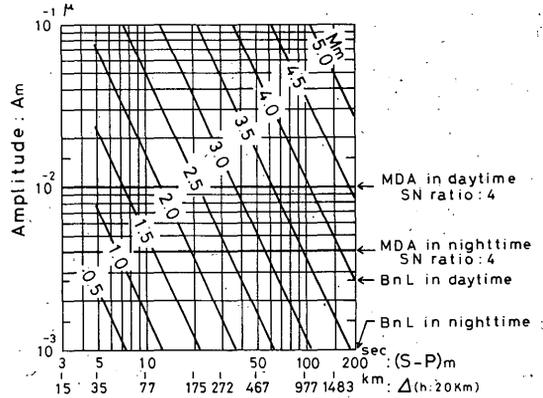


Fig. 6. The procedure for estimating the minimum detectable magnitude as a function of $S-P$ time interval or epicentral distance. MDA: minimum detectable amplitude of earthquake. BnL: background noise level.

Table 1. Relation among the minimum detectable magnitude at MAT, the focal depth of earthquake and the epicentral distance.

(1) Daytime

Depth	$M_m(\min)_D$					
	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
0 km	51	94	168	317	576	1,035
20	55	99	184	333	583	1,045
40	46	101	190	340	603	1,059
60	26	97	190	347	610	1,072

(2) Nighttime

Depth	$M_m(\min)_N$					
	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
0 km	82	155	278	513	918	1,629
20	87	164	294	520	931	1,636
40	86	169	301	539	944	1,663
60	81	167	307	541	957	1,668

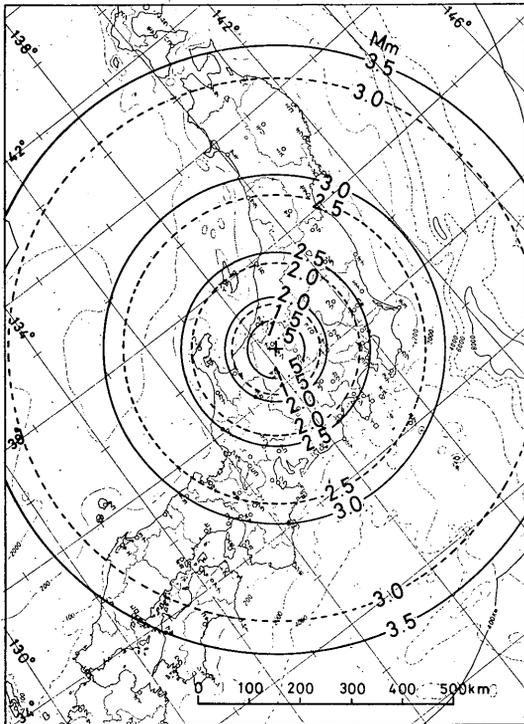


Fig. 7. Contour map of the potential earthquake detectability of MAT.

Solid line: iso-detectability line in the daytime.

Dotted line: iso-detectability line in the nighttime.

高 510 m) の地下 100 m において、閃緑岩帯と黒色頁岩の堅固な岩盤をくりぬかれた坑道に設けた地震計の静けさのたまものである。

5. 近地震観測所としての効率

前節で明らかにした潜在検知能を、観測所の現実の検知能として顕在化するには、これにみあった機能をもつ観測施設が備えられねばならない。すなわち、その検知可能限界振幅までの地震動を余すことなく記録するために必要にして十分な特性をもつ地震計が備えられると、潜在検知能はそのまま顕在化され、効率 100% の観測所となる。

* この場合、常時微動が重なった記録線の幅 (ただし、太さの 1/2) は 0.4 mm 程度になる。

** 他の地震計はすべてプロマイド記録で、可視記録が直接得られる方式である。

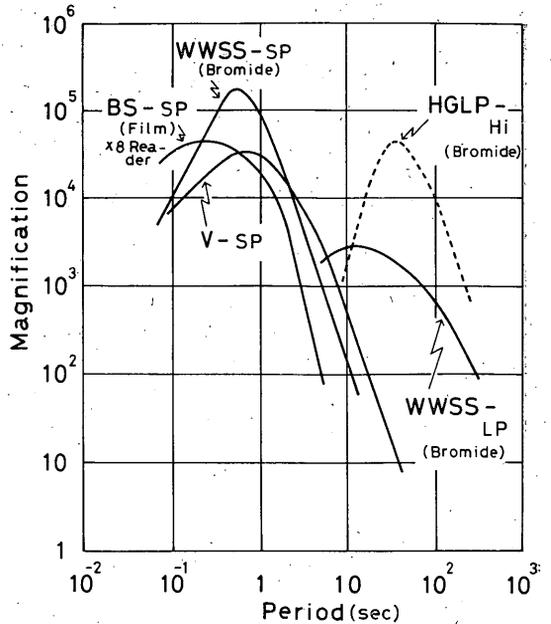


Fig. 9. Frequency response curves of the seismographs at MAT.

では、近地震観測所としての松代の効率の現状はどうかであろうか。

現在の地震観測は可視記録による方式で行われている。したがって、対象となる地震記録の最大動の SN 比がたとえ 4 以上であっても、目視できないほど記録が小さくは目的は達せられない。少なくとも目視記録としては、夜間の検知可能限界振幅に相当する最大動が 1.5 mm 拡大されることが必要である*。このためには、松代に位においては約 38×10^4 という振動倍率を必要とする。

さて、当所に現在整備されている高倍率地震計の振動倍率曲線は Fig. 9 のとおりで、【直接 38×10^4 倍で可視記録を与えるような地震計はない。しかし、ペニオフ短周期地震計 (BS-PS) の記録方式はフィルム記録で、倍率 8 倍の読取器を用いて観測用の可視記録を得る方式である**。

したがって、0.1~0.8 秒の周期帯に属する検知可能限界振幅までの微小地震動の捕捉と観測には、このペニオフ短周期地震計が必要にして十分な機能を発揮する。松代における近地震動の周期は前述したとおり、おおむねこの周期帯に属しているので、当所の近地震観測所としての効率の現状は概して満足すべき状態にあるといえよう。

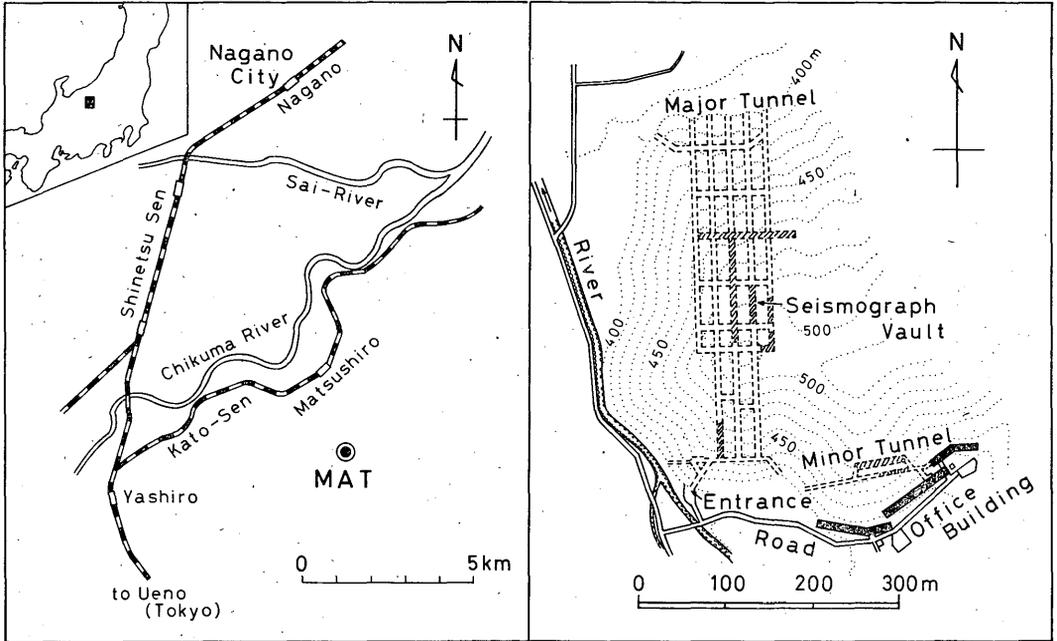


Fig. 8. Maps showing the station environment of MAT.

6. むすび

以上の調査結果を要約すると、次のとおりである。

(1) 松代における常時微動の卓越周期は 0.3~0.5 秒で、総体的に 0.1~0.8 秒の帯域に含まれる。近地浅発地震の P 波列と S 波列の部分の周期特性もこれとほとんど同じである。

また、振幅は著しい日変化をするが、年変化はほとんどしない。そして、振幅の上限値は昼間で $2.5 \times 10^{-3} \mu$ 、夜間で $1.0 \times 10^{-3} \mu$ に達する場合がある。

(2) 地震動の P 相と S 相の振幅比 A_P/A_S の出現度数分布からみて、松代の検知可能限界振幅として常時微動の振幅上限値の 4 倍をとり、昼間の値を $1.0 \times 10^{-2} \mu$ 、夜間の値を $4.0 \times 10^{-3} \mu$ と評価した。

(3) 松代における世界標準地震計（短周期）の水平 2 成分の最大振幅の大きい方の値と S-P 時間とを用いて、近地浅発地震のマグニチュードを算定する実験式を求め、その適用性を検証した。

(4) 松代の検知可能限界マグニチュードを震央距離の関数として求めた。これにより、近地浅発地震に対する松代の潜在検知能を明確化した。

(5) 潜在検知能と現用の高倍率地震計の特性とから、近地震観測所としての松代の効率について検討した。周期 0.1~0.8 秒の地震動に対しては満足すべき効率であることがわかった。

最後に、常時微動の調査にご協力いただいた当所の山岸(登)主任研究官と有益な討論をして下さった気象庁地震課並びに当所の方々に厚くお礼申しあげる。

参 考 文 献

萩原尊礼・岩田孝行 (1965) : 筑波地震観測所の Detection Capability について。地震, II, 18, 113~122.
 Kaminuma, K. (1969) : The Seismological Observation and the Earthquake Detection Capability of Syowa Station, Antarctica. Bull. Earthq. Res. Inst., 47, 453~466.
 本谷義信 (1972) : 浦河地震観測所における地震観測 (III) — 地震検知能力。北海道大学地球物理学研究報告, 27, 55~65.
 山岸 登・齊藤 進・末広重二 (1972) : 松代地震観測所の Detection Capability について。Pap. Met. and Geophys., 23, no 3, 197~213.
 Santó, T. (1970) : Regional Variation of the Passive Detectability of Earthquake in the World. Bull. Earthq. Res. Inst., 48, 1107~1120.
 Kanai, K., T. Tanaka and K. Osada (1954) : Measurement of the Microtremors I. Bull. Earthq. Res. Inst., 32, 199~209.