

深発地震の記象による土地の振動特性の研究*

藤 本 文 彦**

550.341

On Vibrational Characteristics of the Ground Assumed from Seismogram Data

F. Fujimoto

(Observation Section, C. M. O.)

In this paper an investigation is made on energy distribution of seismic waves of various periods, which appeared on seismograms.

From many records taken at various places (by Wiechert's Seismographs) of a deep-focus earthquake (depth : about 560 km) which occurred in the northeastern part of Manchuria on July 10, 1940, amplitudes (A) and periods (T) of the waves (P , S and ScS) are measured, and by use of Blut's equation

$$H = \frac{A^2 \pi^2 \rho V I}{T \sin \alpha} \sin 2\alpha,$$

A^2/T being taken as parameter, relative values of energy level among various periods are obtained.

The results are as follows :

1. The energy distribution may be classified into several types.

(a) Type of the zones where the intensity is abnormally high (felt). Energy of short period waves is extremely large, and energy is decreasing for longer periods.

(b) Continental type (Korea, Manchuria). Large energy lies in waves of long periods but no or little energy in short period waves.

(c) Type with two maxima in certain periods.

(d) Type with only one maximum in certain period.

2. Features of energy distribution for ScS waves entirely differ from those for P and S waves.

Even in the above-mentioned types (a) and (b), waves with periods of 2~4 sec are exceedingly predominant.

3. From the above, it may be considered that waves with a wide range of period were sent out from the focus and that the different seismograms taken at various stations might be due to the fact that the waves stirred the ground in accordance with the vibrational characteristics of the places.

* Received Oct. 7, 1954

** 中央気象台測候課

§ 1. 序

地震の記象を細かくみると、 P 波の部分にも、 S 波の部分にも長短いろいろの周期の波が重なっているのに気がつく。これは地震の波がある地点に入射したとき、そこで二次的に起った振動を記録したものであろうか、あるいは震源から記象紙に見られるような周期の異なった波が送り出されるのであろうか。前者と思われるものも確かにあるが、震源から送り出された周期の異なる波が地表に入射して、観測所付近の土地をその振動特性に応じて大小さまざまにゆり動かして、われわれの見るような複雑な記象となるとも考えられる。この調査の目的はこれらの事情を明らかにする手がかりを得ようとするものである。

§ 2. 資料と方法

昭和15年7月10日14時51分ごろ、当時満洲国の東部に深さやく560kmの地震が起った。震央(Fig. 1 参照)および深さは気象要覧によるものである。わが国の北海道、東北、関東両地方のいわゆる異常震域でI~III程度に感じ、全国各測候所の地震計に明りょうに記録された。Fig. 1 を見ればわかるとおり、震央位置を中心にして円を描いてみると、東日本から西日本にかけていくつかの測候所が同じ円周上にのる。しかも、震央距離の比較的小さい輪島、秋田付近をとおる円の半径

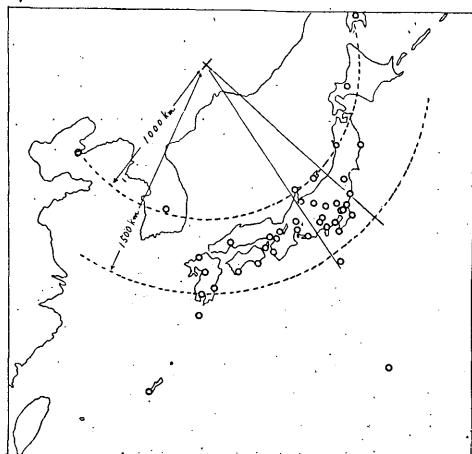


Fig. 1. Epicenter and stations

はやく1000kmであり、震央距離の大きい鹿児島、八丈島の付近をとおる円の半径はやく1500kmで、本邦各測候所の震央距離はこの地震の走時曲線の変曲点より小さい。いま、 $\Delta=1000\text{km}$ と1500kmにおける射出角を走時曲線から算出してみると、それぞれ $72^{\circ}42'$ 、 $72^{\circ}52'$ となる。したがって、震源から各測候所に至る波線はある深さの層をほとんど等しい角で横切っていく。浅い地震の場合には、震央距離によって観測点へ達する波線の最深点が異なるので、各層、ことに、表面近くの複雑な構造で受ける影響が一様でない。以上の点に注目してこの地震の各測候所の記象から P 、 S の波群中の周期の異なるいろいろの波の振幅と周期を読みとり、観測所ごとにどのくらいの周期の波がどの程度のenergyをもっているかを比べてみる。なお、この地震は多くの場所で明りょうな ScS が記録されたので、 ScS についても同様のことを試みた。このような方法は地震計の性能がほぼ同じであることが必要であるが、わが国ではWiechert地震計がおもに使われているので、Wiechert式の記録だけを用いた。読みとった観測所の位置はFig. 1に示してある。

§ 3. 周期と振幅の読みとり

周期と振幅の読みとりは普通の
 験測と同じ方法で行う。振幅は個
 個の波の全振幅の半分をとる。た
 とえば、Fig. 2 a, b, c の AA',
 BB', CC', DD', EE', ……などを
 読んで、その二分の一をとるので

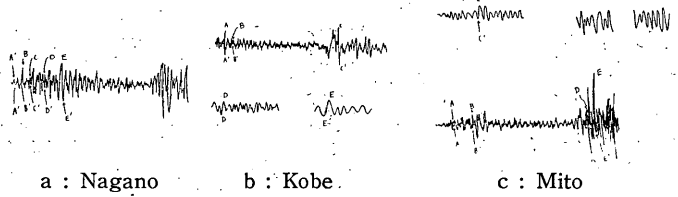


Fig. 2. Several records used in the present investigation

ある。読みとりの際、Fig. 2 a のような周期の長い振幅の大きい波の上に、振幅の小さい短周期の波が重なっている場合には、双方とも比較的容易に、正しく読みうるが、異常震域などのように短周期の波が大きい場合は、長い波を読みにくい場合が多い（たとえば、c の S 波の部分）。それで、tracing paper を記象の上ののせて、長い波を前後から追跡して読んだものもある。波の形として読みうるものはすべて読んだ。二、三の例を Fig. 2 に示してある。ただし、trace したもので、原記象の詳細がはっきり出ていないが、読みとりの例と方法を示すためにのせたものである。

地震計の周期よりずっと周期の長い波は、短周期のものが優勢な場合には読みにくい上に、振動倍率の補正でその振幅は信用し難いと思われるので、5sec 以上のものはとらないことにする。西日本の一部の測候所では短い周期の波の振幅が小さく、6sec 以上の長い波を明りょうに読みうる。ことに、高知の大森式地動計の記象には S の部分に 10sec 以上の長周期の波が明りょうに現れていて、そのようなものが相当大きな energy をもっていることは疑いないが、ここでは Wiechert 地震計の性能を考えて、ひとまず、5sec 以下の波を扱うことにする。

§ 4. Blut の式

地震波の energy を周期と振幅によって表わすものに、Blut の式がある。これは1932年、Blut が弾性波の反射屈折に対する energy の配分を計算する際、導き出したものである。（本多博士「地震波動」の新版に詳しく書いてある）。すなわち、周期 T なる入射 P 波の一周期のあいだの energy を H とすると

$$H = \frac{A^2 \pi^2 \rho V_1 I}{T \sin \alpha} \sin 2\alpha$$

で表わされる。

ここで、energy は地表面に α なる角をもって面積 I なる部分にだけ入射するものとする (Fig. 3)。

さらに、A : 振幅、 ρ : 弾性体の密度、T : 周期、

V_1 : 弾性体を伝わる P の速度とそれぞれする。

S についても同じ形の式が成立する。

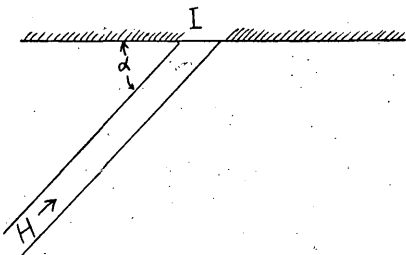


Fig. 3. Incident pencil of energy

一観測点では $\pi, \rho, V_1, T, \alpha$ は constant であるから, A, T から A^2/T を parameter として計算して, どの周期の波がどの程度の energy をもって入射するかを比較できる.

観測点が異なれば ρ, V_1, α が異なるので相互の比較はできないが, これらの量の差の大きくないことを考えて, order の比較をする程度のことはさしつかえないであろう.

Blut の式は homogeneous な二つの弾性体を仮定して導かれたものであるから, 複雑な地殻構造の中を通過してくる波に適用するのは不適當であるが, 近似的に成り立つとして使用する.

いま, 縦軸に A^2/T (A : ミクロン, T : sec) をとり, 横軸に周期をとる. 読みとった振幅と周期から A^2/T を求めて plot する. A は読みとった同じ周期の波の中で, 最大のものをとることにする. 周期の読みとりはドラムの回転の不均一や, 線の太さなどから考え, ± 0.2 sec くらいの誤差が考えられるので横軸は 0.5sec おきにとる. すなわち, 0.8~1.0sec と読みとった周期は 1sec として扱う. 0.5sec 以下のごく短いものは一応そのままとってある. 波の振幅は三成分を合成すべきであるが; 一成分で読んだ波に対応するものを他の成分で求めることはむずかしいので N~S, E~W を別々に plot した.

図の記号は次のとおりである.

* : P の N~S 成分 × : P の E~W 成分 ● : S の N~S 成分

○ : S の E~W 成分 ▲ : ScS の N~S 成分 △ : ScS の E~W 成分

各点の横に ●! のように感嘆符のついているものは, その周期の波が著しく卓越しているという意味で, * のようにポイントを付したものは, その周期の波が他にない孤立して現れた波である. 波の形がくずれて一つの波であるかどうか疑わしいものは, ○? のように疑問符を付した.

各点をつらねて曲線を引いてあるが, これは大体の傾向を示すためのもので曲線そのものに意味はない. また, $K=1$ のように記入してあるのは, 勝又技官* による振幅の地盤係数である. ただし, 読みとった振幅にはこの補正はしていない.

§ 5. $A^2/T-T$ 図について

以上のようにして得た図 (10~12 ページ参照) を比較検討していく.

この際, 発震機構を考慮して震央からはほぼ同じ方位にある観測所を比べることにする.

i 異常震域の特性 宮古は深発地震の異常震域として良く知られているが (この地震では震度 I であった), 秋田はそうでない. 一目して宮古においては短周期の波が優勢であることがわかる. 特に P, S とともに 0.5sec の周期の波が大きな energy をもつばかりでなく, 圧倒的な頻度で現れている. 一方, 秋田は 0.5sec 程度の波の energy はずっと小さいが 2sec 付近の周期の波が最大の energy をもつとともに, 相当な頻度で現れている. 全体として, 宮古よりも長周期の

* 勝又 護 : 地震動振幅の地盤係数 (その一), 験震時報 19 (1955), No. 3~4, 77~80.

P 波が優勢であることを示している。

ScS については、宮古は読みとりにくい、秋田は明りょうで、しかも 1.5~4sec くらいのわりあい広い周期にわたって現れている。2.5sec 付近のものが大きい。後述するが、ScS は全体的にみて 2.5~4sec くらいの比較的長いものが多く、異常震域においも *P*, *S* と異なり、他の地域と同じであるのは注意を引くことである。

ii 本州中央部の状況 Fig. 1 に示してあるような、震央を中心とした細い扇形の地域をながめてみよう。

この地域は測候所の数が多いばかりでなく、異常震域とそうでないところがいりまじり複雑な所である。この地震で感じたのは横浜、宇都宮、小名浜、輪島の四か所であるが、東京、水戸、福島、柿岡などは他の深発地震ではしばしば感じることは良く知られている。輪島はこの地震では震度 I であったが、太平洋方向の深発地震ではたいてい無感である。

以上の事がらを考慮して、この地域の図を比較していく (Fig. 4 参照)。

輪島を見ると、*P* 波の 1 sec の波が著しい energy をもち、かつ、頻度も圧倒的である。*S* についても同じことがいえる。*P*, *S* とも 3 sec 前後で小さくなるが、4.5~5sec で再び大きくなっている傾向がみられる。これを付近の相川、富山、長野のものと比べてみると、energy 分布に著しい差のあることがわかる。これらの三か所は 1 sec 以下の波では order ちがいであるが、やゝ長い周期の波では same order か、逆に輪島のほうが小さくなる。

富山では 6 sec くらいの波が相当な energy をもっている。相川では 2 sec 程度の *S* 波が最大の energy を示しており、長野は 3~4 sec のものが大きく、頻度も大きい。

ScS は各所とも 2.5~4 sec 程度のものに限られ、*P*, *S* とも 1 sec 周期の波が圧倒的な輪島においても、4 sec 程度のものが大きく短周期のものは見当たらない。

甲府、船津、三島を見ると、三島では *P*, *S* とも 1 sec のものがきわめて顕著であり、4~5 sec でやゝ大きな energy を示しているが、中間はない。甲府では 1 sec 付近に山が現れ、長い周期のほうで小さくなっている。船津は山が少し長いほうにずれて 2 sec 付近で最大になっているが、長い方では小さい。ScS はいずれも 2~3.5sec に限られている。甲府の 3 sec のものは特に著しい。以上三か所はいずれも異常震域ではない。

関東地方の各観測所の energy 分布をしらべていくと、異常震域の中にも長周期の波が相当な energy をもっている所があることがわかる。横浜、宇都宮を見ると (両域とも震度 I) *P*, *S* とも 1 sec 以内の短周期が卓越していることは予想どおりであるが、2 sec 付近で一たん小さくなり、それより周期の長い波が割合大きな energy をもつて現れてくる。宇都宮は 3 sec 付近で、短周期のものより大きくなっている。横浜も 4.5sec 付近に energy の大きなものがあり、宮古の

energy 分布と比べるとおなじ異常震域でも相違が見られる.. ScS は双方 3~4.5sec で割に大きく現れている.

前橋, 富崎はこれらに近い分布をしている. たゞし, 前橋は山がやゝ長い方にずれ (1.5sec), 短周期のほうはずっと小さい. 富崎は 1 sec 付近が最大で, それより短い波も長周期のものと order を比べると小さくはないが, 宇都宮, 横浜の短周期の波に比べると order ちがいに小さい. 前橋, 富崎は深発地震は感じないところである.

次に筑波山, 柿岡, 銚子, 小名浜, 水戸および扇形領域からやゝはずれるが福島を検討する. 以上の各地は銚子を除いては, 深発地域に対してしばしば感じる場所である. 共通の傾向として 1 sec ないしその前後に山が出て, 長い周期のほうに向かって一樣に低くなっていること, および 0.5sec 以下の極短周期の波が相当大きな energy と頻度で現れていることである. 筑波山では山が 1.5sec 付近に現れ, 他に比べてわずかに長い方にずれている.

これらの地域でこの地震を感じたのは小名浜だけであるが, 水戸, 柿岡, 福島は短い波の energy が相当大きく, 加速度も宮古, 宇都宮と比べて変らないように思われるが, この場合, 波の energy の絶対値を比較できないのである. たゞ, これらの各地がしばしば異常震域となり, この地震を感じたかどうかにかかわらず, 同じような energy 分布をしていることは注意すべきことである.

ScS についてみると, この地域の一部 (福島, 小名浜, 柿岡) にやゝ 1 sec の短い波が現れている. しかし, 長周期の波の energy と比べると, P, S の場合と異なり長い波のほうが優勢である. このことから, 異常震域の P, S の部分の短周期の大きな振幅の波は地震本来のものと考えべきであろう. さらに, 八丈島をしらべてみると, 1 sec 付近に比較的大きな energy が現れているが, 3~5 sec の波がほぼ同じ大ききで並んでいるのは, 関東地方の他の測候所と違っている.

iii 東海, 近畿地方 箱根以西は彦根など一, 二を除いては一般に深発地震は感じないことが知られている.

この地方の各地の energy 分布を見ると, 一般的な傾向があつて形に多少のちがいがあつたが, 1 sec 前後に一つの山があり, それからずっと低く, 2~3 sec で谷となり, それより周期の長いほうに向かって再び高くなつている.

前述の前橋, 横浜, 富崎, 宇都宮などがこれと似たような分布をしていたが, この場合は和歌山を除いては長い周期の山が短いほうの山よりもずっと高くなつているのが違つているところである. 浜松, 亀山, 神戸は 4 sec 付近, 名古屋では 3 sec 付近が長い周期の山になっているようである. 大阪のものをみると, 短周期の部分が比較的小さく, だんだん大きくなり, 長いほうで圧倒的に大きく, 著しい頻度で現れている. 3 sec 付近で幾分小さくなつているようであるが, 大阪の型は例外である. 岐阜のものは明らかでないが, P の部分だけについてみると, やはりこの地方の一般的

傾向に含めうる。

SaS はいずれも 3 sec 前後のものが優勢である。この地方を全般的にみて、東日本に比べて長周期の波が卓越していることが目だつ。 SaS はこの地方でも長周期のものより 3 sec 程度のものが優勢であることを注意しておきたい。

これまでの全体を通じて 1 sec 付近に energy の一つの山が出ているところが多い。西日本の一部にも同じような傾向があり、実際に震源から、この程度の周期の波が相当大きな energy で送り出されたとも考えられる。

iv. **西日本** 四国南部の室戸岬、清水の energy 分布は 5 sec 以上の長い部分で顕著である。広島は地震計が不調であったが同じような傾向がみられる。さらに図はないが、高知、山陰の浜田も 5 sec 以上の長い波からなる簡単な記象をしている。松山を除いた中国、四国の特徴のようである。なお、清水、室戸岬の P の部分に energy は小さいがごく短周期の波が現れているが、 S の部分にはこれに当るものが見当たらない。

九州は北部の福岡と中部以南の宮崎、熊本、鹿児島、および名瀬では energy 分布が大いに違っている。

福岡は後に述べる大陸のものに似て、 S の長い波 (5 sec 以上) が大きい。 P にはやゝ短い波も見られるが S は 3 sec 以下のものは見当たらない。

熊本、宮崎、鹿児島のは山と谷をもつ型であるが、その位置は少しずつずれている。すなわち、宮崎は 1 sec 付近が山で 2~3 sec で谷となり、さらに 5 sec 付近で前の山とほぼ同じ程度になっている。熊本は 1.5 sec 鹿児島は 2.5 sec 付近が前の山であるが、4.5~5 sec で再び大きくなっている。宮崎、熊本は東海、近畿地方のものと似ている。名瀬は 0.5 sec のごく短い波が顕著で energy 分布は異常震域型であるが、5 sec 付近の波が中間の波に比してやゝ大きな energy をもっている。

SaS については、3~4 sec 付近の波が優勢であるのは他のものと変りはない。

v. **北海道** この地方は南東部に異常震域をもち、南方沖にはきわめて地震が多いので、この調査には本州中央部とともに重要であるが、Wiechert 地震計のあるのは札幌、森、根室である。これらのうちで、手もとに記象紙のあるのは札幌だけで、しかも、 S の部分は scale out してとれなかった。それで、 P 、 SaS について同じく図を作ったが、 P についてみると秋田の型に近く、2 sec 付近が山で両側は小さくなっている。

vi. **その他** 以上のほかに、当時日本の一部であった朝鮮の大邱、大連、父島、那覇、樺太の大泊と恵須取の記象紙があったので同様の図を作った。

まず、大陸の energy 分布を見ると、長い周期の波が圧倒的に優勢であるのが特徴である。 P の

部分には短い波も見られるが、 S については他で見られるような短周期はないのに気が付く。九州北部、四国、中国地方の一部の測候所もこれに似ている。

ScS はやはり 3 sec 程度の波が現れている。父島、那覇は方位が大分ちがうが震央距離はあまり違いはないので二つを比べてみる。那覇では P がきわめて小さいので S だけを plot した。これによると、1.5sec, 3 sec 付近のものがごく短い波や長い波に比べて大きい。3.5sec 程度の ScS は S よりずっと大きな energy をもっている。父島では 2~3 sec の部分が、その前後に比べて大きな energy を示している。

樺太の大泊、恵須取はいずれも 3 sec 付近が大きな山となり、頻度も大きい両側では小さい。ことに、恵須取では 3 sec 前後にしぼられ、短いものも長いものもない。

いずれも秋田や札幌のものと同じ型である。

§ 6. 結 論

日本全国にわたり $A^2/T-T$ diagram をつくり、比較したものを総括すると次のようになる。

1. energy 分布図は各所でさまざまであるが、大きくみて下の各型に分類できる。

a. 異常震域型：宮古、福島などが代表的なもので、短周期の波が圧倒的に大きな energy をもち、周期の長いものほどずっと減少している。柿岡、筑波山、小名浜などがこれにはいる。この型は予想されるところであるが、異常震域には宇都宮、横浜のように、短い波だけでなく長い波も相当な energy をもっているものもある。

b. 大陸型：大連、大邱のように長い周期の波が著しい energy をもち、短い波が現れないか energy が微弱なもの。北九州、四国、中国地方にはこの型に近いものが多く、大阪もややいている。

c. 山と谷のあるもの：この型は関東地方、東海、近畿地方、九州中南部など広い範囲にわたって、いずれも 1~2 sec 付近に一つの山があり、それから減少して谷となるが 4~5 sec の長い周期のほうで再び大きくなる。前の山が後より大きいものと、その逆のものがある。横浜、富崎は前者であり、東海、近畿地方のものは後者が多い。

d. 山が一つあるもの：異常震域型の山を長いほうへ移したような形である。秋田の山は 2 sec 付近でその両側は小さい。大泊、恵須取、札幌、父島がこれにはいる。船津も似ている。これらはすべて深発地震には感じないところである。

2. ScS は P , S の energy 分布と全く無関係に独自の分布をする。異常震域型のところも、大陸型も、その中間の波 (2.5~4 sec) が大きな energy をもつが、この狭い範囲に限られるのはいかなる意味があるのかわからないが、異常震域における S 波の長い周期のものと、短い周期の波との関係を ScS の両者の関係と比べてみると、 S 波のごく短い大きな振幅の波は、二次的なも

のでないと考えられそうである。

3. 各地の P , S の energy 分布からみて、震源から相当広い幅にわたる波長の波が送り出され、入射地点の土地の振動特性に従って複雑な記象を書くと考えて良いのではないと思われる。特に多くの所でみられる 1 sec 付近の山は震源から、この周期の波が比較的大きな energy で送り出され、1 sec の振動特性をもつ測候所に大きく現れたと考えて良さそうである。このように考えると、地震の規模により送り出される energy spectrum が違うときには energy 分布は変わってくるであろう。さらに方法を改良し、十分な資料によってこの種の調査が行われることを希望する。

この調査は 1951 年末ごろから 1953 年ごろにかけ、筆者が地震課に勤務していたとき、公務の余暇に手をつけたもので、細かく検討する余裕がなかったため、内容にずさんな点があることは認める。特にある周期の頻度などは数量的に表現すべきであった。また、本州北東部、北海道南東部の資料がなく彦根などがなく心残りであったが、この種の調査は行われていないので、不備を承知の上で発表する次第である。

最後に発表に至るまで種々有益な御意見を聞かせていただいた地震課勝又技官ならびに、読みとりに当って参考意見を伺った験震係諸氏に深く感謝する。

また、この論文作成に当り、御激励をたまわった広野博士、執筆をしばしばすすめてくださった宇佐美技官にあつくお礼を申し上げる。

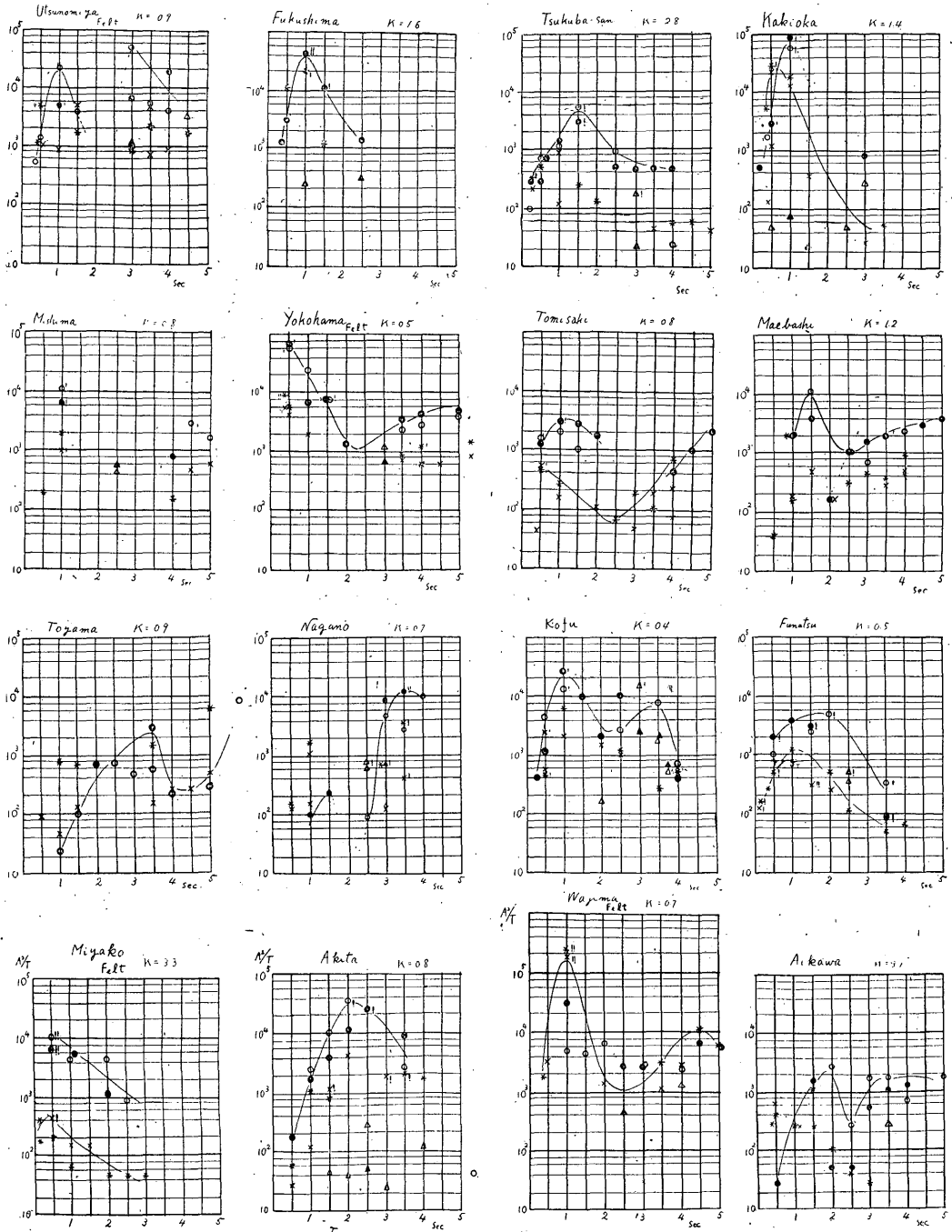


Fig. 4 a. $\frac{A^2}{T}-T$ diagrams
 T : periods (sec), A : Amplitude (μ)
 \times : E~W comp. of P waves, \bullet : N~S comp. of S waves, \circ : E~W comp. of S waves
 \blacktriangle : N~S comp. of ScS waves, \triangle : E~W comp. of ScS waves
 Exclamation mark, point and interrogation mark attached to the above six marks show the predominant, isolated and obscure waves respectively.

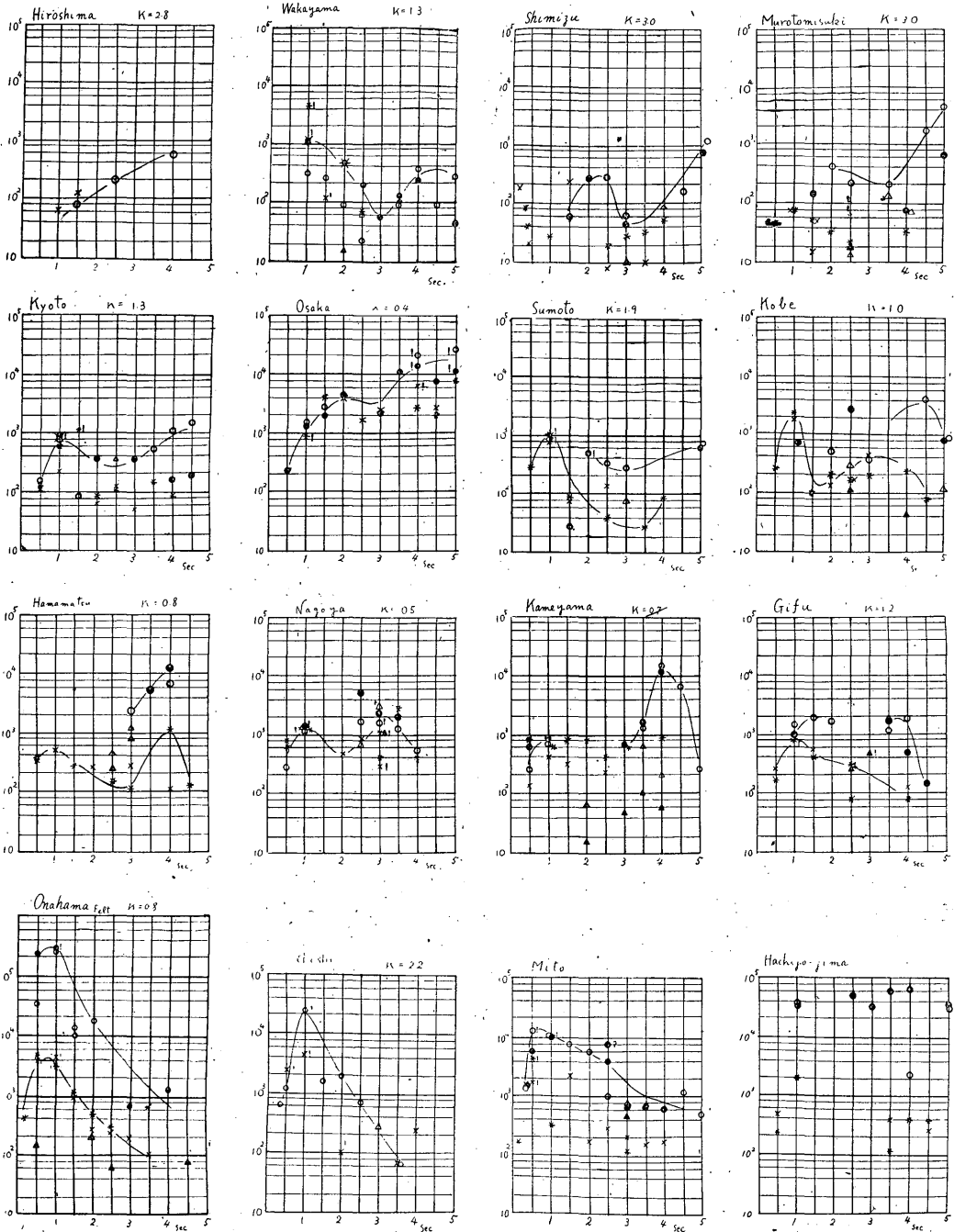


Fig. 4 b. $A^2/T-T$ diagrams

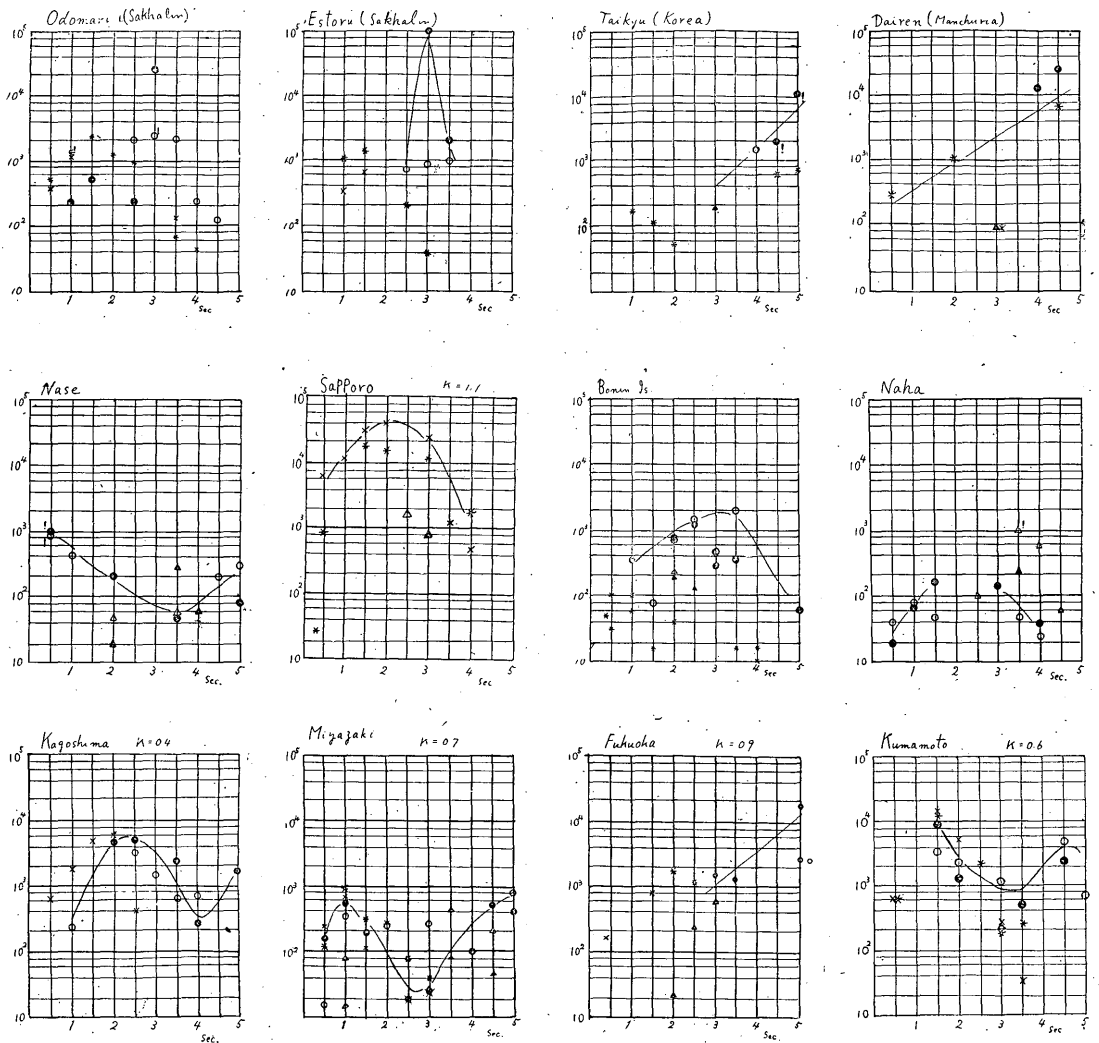


Fig. 4 c. $A^2/T-T$ diagrams