

松代における P 波の走時残差*

涌井 仙一郎**

550.344

P Travel Time Residuals at Matsushiro Seismological Observatory

S. Wakui

(Seismological Observatory, J. M. A.)

A statistical study is conducted on travel-time residuals of P waves for 593 events occurring from 1974 to 1975 and some nuclear explosions. Data obtained at various stations in the world as well as the Matsushiro Seismological Observatory are used in the present study.

The results obtained are as follows:

- i) Mean value of residuals using all data is 0.45 sec earlier in comparison with the P times in Jeffreys-Bullen time table.
- ii) Negative value of P travel-time residual occurs at 10° - 16° of distance and 40° - 50° of azimuth from Matsushiro. Slight change occurs in focal depths.
- iii) It appears that residuals for the region from east off Hokkaido to south off Kurile Islands are such high negative value as -3.2 second.
- iv) Results obtained from USGS and ISC-Bulletins exhibit almost the same trend above-mentioned as far as P wave travel-time residuals.
- v) P wave travel-times of eleven earthquakes which occurred near Matsushiro indicate that P waves passed through the continental mantle are earlier than the oceanic one.

§ 1. はしがき

地震波の速度を正確に求めることは、地球物理学において重要なことである。近年、地震観測の技術ならびにその精度が向上し、 P 波を用いた走時解析から震源決定精度、地球内部の速度モデル、ダイラタンシーに関連した地震波の速度変化の検出などの研究が多くなされるようになった。

ここでは、定常観測で報告される松代の P 波の走時残差が震央距離、震央方位、震源の深さ及び発生場所などに対して、どのような系統的傾向を示すか調査した。すなわち、1974年と1975年の資料を用い、松代の P 波走時と J-B の走時 (1948, ここでは標準走時と呼ぶ) との差異を USGS の EDR (Earthquake Data Report) から求めた。さらに、ISC (International Seismological Center) と USGS とで、おのおの決定した震源による走

時残差の比較、松代地震を用いた逆伝搬の走時なども含めて検討した。

§ 2. 松代の観測精度

このような調査を行うにあたり、最も留意しなければならないのは観測精度の良否である。松代の刻時用水晶時計は年間、ほぼ恒温恒湿の環境条件にある坑道の中に設置され、日差を僅か 10 ms 程度に制御している。なお、毎日 2 回ストロボスコープにより標準電波 JJY との比較較正を行なっている。また定常観測に用いるフィルム記録装置は同期モータを用いて駆動し、記録速度は 120 mm/min である。従って、 P 波の初動の立ち上がりがシャープな場合、1/10 秒単位の精度で観測を行うことができる。

このほか、松代の観測精度を具体的に示すものとして Fig. 1 に Herrin & Taggart (1968) による世界の地震観測所の P 波の平均走時残差と分散値との関係を掲げた。これにより、松代の平均走時残差は -0.67 秒、 σ^2 (分散値) $= 0.80$ で与えられ、世界の観測所の中で観測

*Received Feb. 28, 1979

**気象庁地震観測所

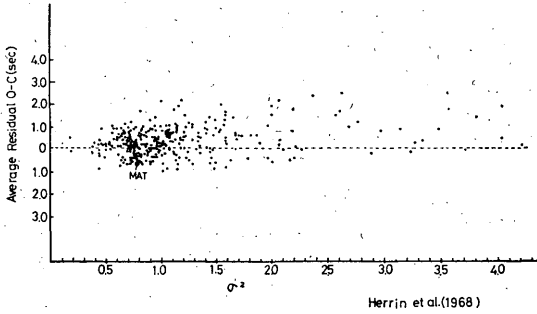


Fig. 1. Station residuals of P travel times vs. corresponding variance. Positive and negative residuals indicate late and early arrivals compared with Jeffreys-Bullen's time table, respectively.

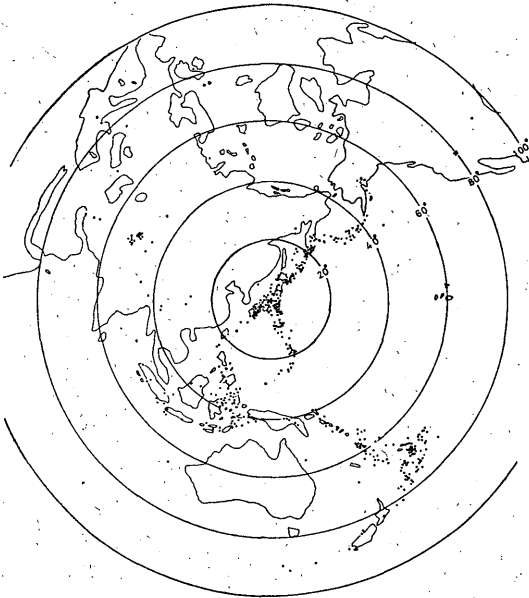


Fig. 2. Distribution of epicenters used in this study.

精度が良い観測所に格付けされている。

さらに、1974年~1976年にかけて、Nevadaで行なわれた20個の核実験の資料から、松代の P 波平均走時残差を求めると -1.65 ± 0.54 秒となる。日本にある他の地震観測所、堂平、筑波、城山ではそれぞれ -1.57 秒、 -1.84 秒、 -1.65 秒となる。核実験でも、これらの観測所と比較した時、異常に誤差の大きい値でないことがわかる。従って、用いた資料の観測誤差は極めて小さいものと推定される。

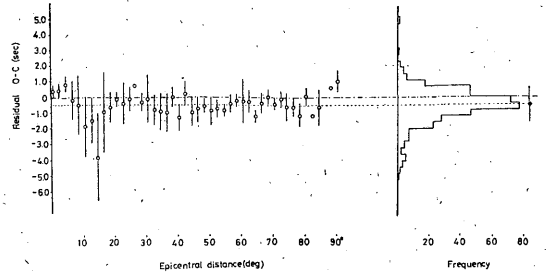


Fig. 3. Left: P wave residuals in every 2° as a function of epicentral distance from Matsushiro. Open circle indicates mean value, and length of line shows standard deviation.

Right: Frequency distribution of residuals.

§ 3. P 波の走時残差

(i) 松代の平均走時残差

走時残差は松代の観測値(O)と標準値(C)との差で、用いた資料は P 波の立ち上がりが見え、時刻精度が ± 0.1 秒まで正確に読みとれるものを選んだ。しかも $O-C$ が ± 6 秒以上あるものは質的にみて除外し、Fig. 2に示した593個の地震を対象とした。また数の上でもなるべく、偏った分布をしないよう全地球的に配慮した。この走時残差の度数分布はFig. 3の右側に示したように中心値が -0.45 秒で、正規分布にはほぼ近い分布で表わされる。すなわち、松代の P 波の走時は標準値に比べ平均 0.45 秒程、速く観測されることがわかる。

(ii) 震央距離と残差

松代からの震央距離別残差分布はFig. 3の左側のようなになる。白丸は走時残差の平均値、縦線の長さは対応する標準偏差を表わしている。図より震央距離 $\Delta \leq 5^\circ$ の近地地震での観測値は常に遅い傾向を示し、これより遠い地震では一般に速い傾向にある。特に $\Delta: 10 \sim 16^\circ$ の範囲で発生する地震はこの傾向が著しく、 $\Delta = 15^\circ$ 周辺の地震では標準より、 3.8 秒も速く到達する結果が得られる。

(iii) 震央方位と残差

松代からの震央方位別残差分布はFig. 4のとおりである。図より震央方位AZ(時計回り): $40 \sim 50^\circ$ 及び $210 \sim 220^\circ$ の辺に負の残差が著しく大きいところがある。このうち前者は松代の北東方向に位置し、(ii)で述べた震央距離別の異常域($\Delta: 10 \sim 16^\circ$)と総合すると北海道東

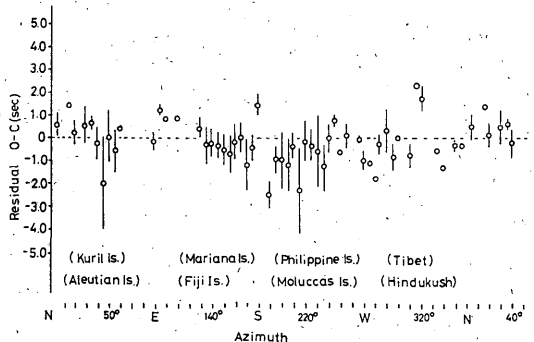


Fig. 4. P wave residuals in every 5° as a function of azimuth from Matsushiro.

方沖及び千島列島南部に位置する。又、AZ: 210~220° ことるのは震央距離との関係から、モルッカ諸島付近で発生する地震になる。

次に、松代から南東方向に位置するマリアナ諸島及びフィジー諸島の地震に対する残差は比較的小さい。これは次の(iv)で述べるように深い地震は残差が小さいことに基づくと考えられる。

(iv) 震源の深さと残差

同じ資料を用い、震源の深さ別P波走時残差を求めると Fig. 5 のようになる。深さ0~200 km の地震の残

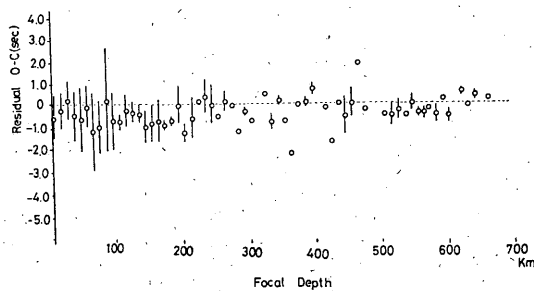


Fig. 5. P wave residuals in every 10 km as a function of focal depth.

差は負側に分布し、このうち 100 km 以下の浅い地震の分散は大きく、70 km 付近では-1.2 秒で一番大きい。これは地殻・マントル上部における地域的な速度構造の複雑な影響が表われているものと考えられる。この資料では 250 km 以上の地震数は少ないが、比較的零線付近にばらついていて、450 km 以上の深発地震は残差が小さく、± 0.5 秒以内にある。

§ 4. 北東方向の速度分布

上記の調査により、走時残差が最も大きく現われるのは Δ : 10~16°, AZ: 40~45°, そして、震源の浅い地震に限られるようである。そこで、松代より AZ: 40~45°, 震源の深さ 33 km 以下の浅い地震を対象に、見掛け上の速度を震央距離によって求めると Fig. 6 のようになる。図中の実線は標準走時によるもの、黒丸はここで得られた $d\Delta/dt$ 値である。

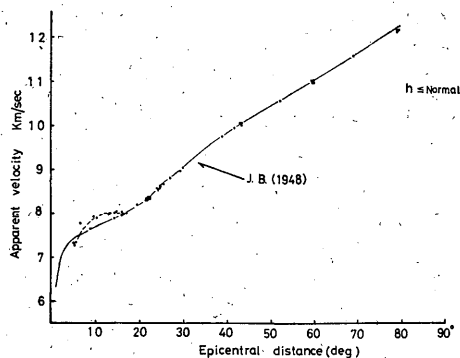


Fig. 6. P wave apparent velocities for normal depth from Jeffreys-Bullen's time tables. Black dots in the plot show values obtained in the present study.

Δ が 17° 以遠では標準走時と一致するが、 Δ : 6~16° では大きな相違を示めし、特に 11° 付近では松代の速度が約 2% も速い。これは先に得られた走時残差と同様な傾向を示し、北海道から千島方面におよぶ顕著な High V ゾーンが存在が暗示される。これをもう少し詳しくみるために、ほぼ同じ方向から入射するとみられる核実験の資料を追加して走時残差を調べた。

Nevada Test Site (松代より $\Delta \approx 79.5^\circ$, $AZ \approx 52^\circ$) からの平均走時残差は-1.65秒、Amchitka ($\Delta \approx 32.5^\circ$, $AZ \approx 51^\circ$) では-3.8秒、北海道東方沖方面の残差の大きい地域 ($\Delta \approx 15^\circ$, $AZ \approx 43^\circ$) では-3.8秒がそれぞれ得られている。これらの三者がほぼ同じ方向から入射した波と考えると、比較的の日本列島に近いもの程、P波が標準走時より速くなり、走時残差が大きくなる傾向がみられる。しかし、核実験、自然地震及び伝搬経路などによる相違があるので、一概に論ずることは出来ない。

§ 5. ISC と USGS との残差の比較

世界的な資料から震源を決めている ISC の報告と USGS のそれから、同じ地震についての震源要素決定結

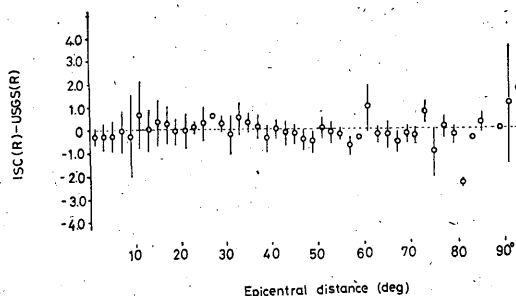


Fig. 7. Comparison between ISC's and USGS's residuals as a function of epicentral distance.

果から求められた走時残差を震央距離によって比較すると Fig. 7 の様になる。縦軸は ISC の走時残差から USGS の走時残差を引いた値、すなわち、USGS の計算値から ISC の計算値を引いた値となる。 $\Delta \leq 10^\circ$ 及び $\Delta \geq 40^\circ$ では USGS の値はやや早めに、 $20^\circ \leq \Delta \leq 40^\circ$ 間には逆に若干遅めとなっている。しかし、全般的に両者の相違は ± 1 秒以内に収まっており、また系統的にも差はほとんど認められない。このことは ISC の震源要素を用いても、松代の走時残差は負側に多く分布することを示している。震央距離や震央方位などによる残差も上述の結果と同傾向を示すものと考えられる。

§ 6. 逆伝搬法による走時残差

いろいろな地域で発生した地震を松代で観測すると、前述のような結果が得られた。そこで、ここでは逆に松代付近に発生した地震を遠い観測点で観測した時の走時残差を調べた。資料は $M : 5.0$ 以上の松代地震 11 個を用い、ISC の報告により、それらの走時残差を震央距離

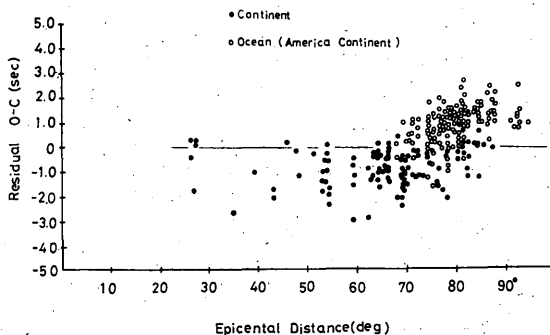


Fig. 8. P wave residuals obtained from earthquakes occurring near Matsushiro. Open and solid circles show oceanic and continental paths, respectively.

に対してプロットすると Fig. 8 のような関係になる。 $\Delta : 26 \sim 70^\circ$ の観測点ではほとんど負側の残差を示し、 $\Delta \geq 70^\circ$ 観測点では零線の両側に分布している。図中の白丸の大部分はアメリカ大陸の西海岸に位置する観測点で、 P_n の速度が比較のおそい地域に属するためか、その残差は正側に分布している。黒丸は松代より西方向にあたるアジア・ヨーロッパ大陸の観測点が多く、大陸のマントル中を伝搬してきた波の走時残差を表わしている。これは負の残差を示し、低速度層の影響が見掛上マスクされ、標準値より早く到達している。

日本の観測所を除くと、 $\Delta \leq 26^\circ$ では観測所が少なく、資料も欠いているがこの図を Fig. 3 と比較すると全く異なっていることがわかる。これは震央距離では合致するが、地理的位置が異なるので逆伝搬の方法にはなっていないことによる。しかし、大陸と海洋下を伝搬する地震波の走時残差が、この様にかなり系統的な差を示すのは興味あることと考えられる。

§ 7. 地域的にみた走時残差

これまでの調査では、走時残差を震央距離、震央方位及び震源の深さ等と個々に比較したが、あまり有意的な結果が得られなかった。そこで、これらを総合した差異を地域別に調べてみた。すなわち、緯度及び経度をおのおの 10° 毎のメッシュに区切り、その区域内に発生した地震の、松代における走時残差を調べると Fig. 9 のようになる。各メッシュの地震数になるべく等しくなるように、新たに 261 個のデータを追加した。図中の四角印は松代の到着時刻が標準値より速い地域、丸印はその逆を示す。当然のことながら速度の速い地域が多く占めている。日本海を含めた日本列島周辺、アリューシャン列島

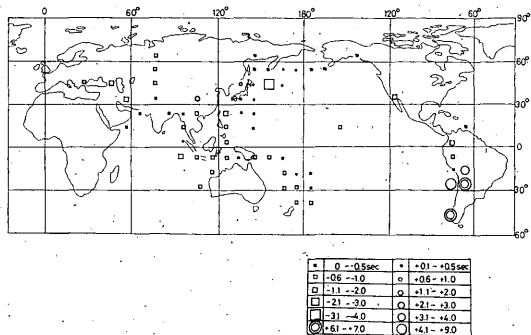


Fig. 9. Regional variations in P wave travel time residuals. Square (Negative) and open (Positive) circles represent early arrivals and late ones, respectively.

及び中国大陸の一部に、僅かの正值（速度の遅い）区域が存在する。日本周辺の走時残差が系統的に遅くなるのは、島弧に共通した日本列島下の特異な地下構造に影響されることと、近地震であるため標準走時に適合しないことのためであろう。

次に負側残差区域をみると、北海道東方沖から千島列島南部にあたる北緯 $40\sim 50^\circ$ 、東経 $150\sim 160^\circ$ に囲まれた地域の残差は平均 -3.2 秒と、大きな負値を示し、周囲から孤立した著しい速度異常地域となっている。なお、この地域に発生する地震の震源は JMA と ISC とでは、かなり系統的な偏りがあると指摘されている。この様に、上部マントルの異常構造を反映した一地域と考えられ、震央距離や震央方位に関する異常残差がここでも一応説明出来る。

アジア及びヨーロッパ大陸は全般に負側の残差を示し、Fig. 8 に掲げた結果と矛盾しない。その他の地域は、ほぼ $1.1\sim 2.0$ 秒の範囲内で平均的に速度は速くなっている。

なお、参考までに直達 P 波だけでなく、Core に支配される松代の裏側、アルゼンチン及びチリ等に発生する ($\Delta \approx 150^\circ$) 地震の PKP 波の残差を調べると、 $6\sim 7$ 秒と極めて大きな正值を示している。PKP 波については Bolt (1968) の表を使用しているが、この地域の残差のばらつき幅は小さく、常に数秒のほぼ一定値を示めている。

§ 8. むすび

任意の観測点で得られる地震波の走時残差は震源決定精度、発震機構、地震波の伝搬経路（地域的差異）、観測精度等に大きく支配されるものと考えられる。松代の走時残差は観測誤差によるランダムな誤差は小さく、震源決定の誤差、走時の地域的差異などに基づく系統的誤差が大きい。この調査で得られた P 波の走時残差の特長は次のように要約される。

1) J-B の標準走時と比較すると、自然地震は平均 0.45 秒、Nevada の核実験では 1.65 秒それぞれ速く観測される。震央距離 $10\sim 16^\circ$ 、震央方位 $40\sim 50^\circ$ に著し

い負の残差が存在する。震源の深さ別では 200 km より浅いものは負側に分布し、深い地震は残差が小さい。

2) ISC と USGS との報告をもとにした走時残差を比較すると、殆んど零線を中心に僅かの幅で帯状分布を示し、系統的な偏りはみられない。

3) 松代地震を用いた逆伝搬の走時残差は、異質なものと比較する結果となり、逆伝搬とはなり得なかった。しかし、松代地震の P 波が主として海洋側を伝搬する場合は一般に標準走時より遅く、主として大陸側を伝搬するものは逆に速く到達する傾向が見出された。

4) 全世界の地震を地域別に走時残差を調べると、早く到達する地域が多い。日本列島近海は僅かに速度が遅い。北海道東方沖から千島列島南部の地震は顕著な負の残差を示し、標準走時より平均 3.2 秒、すなわち約 2% 程度速い結果が得られた。

最後に、多くの御助言および御協力いただいた山岸登主任研究官ならび勝又護主任研究官（現気象研究所）に心から感謝を申し上げます。

参 考 文 献

- Cleary, J. and A. L. Hales (1966) : An Analysis of the Travel Time of P Waves to North American Stations in the Distance Range 32° to 100° , Bull. Seism. Soc. Amer., **56**, 467-489.
- Herrin, E. and J. N. Taggart (1968) : Regional Variations in P Travel Time, Bull. Seism. Soc. Amer., **58**, 1325-1337.
- Lilwall, R. C. and A. Douglas (1970) : Estimation of P -Wave Travel Times using the Joint Epicentre Method, Geophys. J. **19**, 165-181.
- 牧 正 (1976) : 日本列島下の上部マントル P 波速度構造, 地震, **29**, 233-245.
- 溝上 恵・辻浦 賢 (1974) : 堂平微小地震観測所における P 波の走時の偏差とマントル上部の構造および方位性について, 地震研究所速報, **12**, 57-71.
- Sengupta, M. K. and B. R. Julian (1966) : P -Wave Travel Time from Earthquakes, Bull. Seism. Soc. Amer., **66**, 1555-1579.
- 鈴木貞臣 (1976) : 自然地震の走時から推定される北日本の上部マントル速度の地域性 (P 波), 地震, **29**, 99-116.
- 宇津徳治 (1975) : 地震に先駆する P 波速度変化地域の検出, 地震, **28**, 435-448.