

Title	 北朝鮮核実験による地震波形記録
Author(s)	吉澤,和範
Citation	 北海道大学地球物理学研究報告, 71, 39-48
Issue Date	2008-03-15
DOI	10.14943/gbhu.71.39
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/32758
Туре	bulletin (article)
File Information	71-39.pdf



北海道大学地球物理学研究報告 Geophysical Bulletin of Hokkaido University, Sapporo, Japan. No.71, March 2008, pp.39-48

北朝鮮核実験による地震波形記録

吉澤 和範

北海道大学大学院理学研究院自然史科学部門 (2007 年 12 月 27 日受理)

Seismic waves generated by North Korean nuclear test on October 9, 2006

Kazunori YOSHIZAWA

Department of Natural History Sciences, Faculty of Science, Hokkaido University (Received December 27, 2007)

Seismic waves generated by a nuclear test carried out by North Korea on October 9, 2006 were observed throughout the Japanese islands. Clear arrivals of Pn waves, which traveled below the Moho discontinuity underneath the Japan Sea, were recorded by the Japanese broad-band seismic network, F-net, deployed by National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention (NIED). We analyzed the waveforms of the nuclear event observed at F-net stations as well as some global seismic stations in East Asia. Apparent path-average velocity of Pn waves and their maximum amplitudes are estimated from vertical component seismograms of the F-net stations. We found conspicuous regional variations of apparent path-average velocity and maximum amplitude. For example, fast apparent velocity and larger amplitude are observed in the paths across the Japan basin in the northern Japan Sea, whereas slow velocity as well as relatively smaller amplitudes are found in the path to stations in Kyushu. Such regional variability of *Pn* waves is likely to make it difficult to estimate source parameters for this small-scale explosive event in the Korean Peninsula, only using the Japanese seismic network. These results suggest the necessity of a precise three-dimensional seismic model of the Japan Sea to utilize Japanese seismic network data for analysis of regional seismic waves that propagate along a variety of paths in the Japan Sea.

I. はじめに

2006 年 10 月 9 日,北朝鮮北東部において核実験が実施された.核実験による爆発としては 比較的小規模であったため、実験直後の段階では、この爆発が核実験によるものか又は爆薬等によ るものかの判断が難しい所であったが、その後、米国政府によって、大気中の放射性物質の検出が 報告され、核実験が実施されたことが客観的に裏付けられている(Kim and Richards, 2007). この爆発による地震波形は世界各地の地震計によって捉えられている.日本列島は爆心域の西 側から南側までをカバーする位置に広がっており、また震央距離も比較的近いことから、この核 実験による波形記録は、日本列島全域に展開されている地震観測網でも明瞭に記録されている.

地震波形の解析による震源パラメータについては、日本の気象庁(JMA, 2006a,b)をはじめ、 米国地質調査所(US Geological Survey: USGS)や包括的核実験禁止条約機構(Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization: CTBTO)の国際データセンター(International Data Centre: IDC)等による報告がなされている。震源決定に利用したデータによって、震源パラメー タの推定値に多少のばらつきはあるものの、実体波マグニチュード(mb)でおよそ 4.2 前後、 爆心地は北朝鮮北東部の吉州(キルジュ)北西部付近と推定されている。

一般的な核実験では、TNT 火薬相当量で数 10 キロトン以上の規模となるものが多い. 今回 の実験のように、TNT 火薬相当量で 0.5~1.0 キロトン程度の小規模な核実験探知の可能性につ いては、すでにいくつかの論文で議論がなされている(Kim and Richards, 2007; Kvaerna et al., 2007; Che et al., 2007). また、この核実験による地震波は、爆心から遠く離れた米国西部 に展開中の広帯域地震観測網(USArray)の一部でも記録されている(Ammon and Lay, 2007).

本研究では、防災科学技術研究所によって日本全国に展開されている広帯域地震観測網(F-net) で捉えられた核実験による波形記録と、爆心地近傍の大陸内に位置する IRIS (Incorporated Research Institutions for Seismology) 観測点の波形記録について、それらの波形の特徴を概観 する. さらに日本列島で観測された P波相の波形と、それらから推定される日本海直下の地震 学的構造との関係についても考察を行う.

Ⅱ. 北朝鮮核実験による波形記録

Fig. 1 に本研究に用いた観測点の位置と, CTBTO/IDC による爆心地の位置を示している. また, CTBTO/IDC の他, USGS 及び気象庁が報告している爆心地に関するパラメータを Table 1 に示す.本研究では, CTBTO/IDC による震源パラメータを利用する.

F-net 観測点に加え、爆心地に近い大陸内部の観測点 MDJ(中国・牡丹江 Mudanjiang)及び INCN(韓国・仁川 Inchon)で観測された波形も含め、震央距離毎にプロットした波形記録 を Fig.2(鉛直成分)及び Fig.3(東西成分)に示す.これらの図中の実線は、標準地球モデル IASP91 (Kennett and Engdahl, 1991)から推定した Pn 波、Pg 波、Sn 波及び Sg 波(例えば、

	Origin Time	Latitude	Longitude	mb
CTBTO/IDC	2006/10/09/01:35:27.6	41.3119	129.0189	4.1
USGS	2006/10/09/01:35:27.8	41.294	129.134	4.2
JMA	2006/10/09/01:35	41.2	129.2	4.9

Table 1 List of parameters of the nuclear test in the north-eastern region of North Korea reported by CTBTO/IDC (International Data Centre of Comprehensive Test Ban Treaty Organization), USGS (US Geological Survey) and JMA (Japan Meteorological Agency). [modified from Kvaerna et al. (2007)]



Fig. 1. Locations of F-net broad-band seismic stations deployed by NIED are plotted as triangles, and IRIS stations in China (MDJ) and South Korea (INCN) as squares. The star is the epicenter determined by CTBTO/IDC. White triangles represent the F-net stations at which clear Pn-wave arrivals are observed.

Aki & Richards, 2002)の理論走時である. これらの波形は, 記録された速度波形に, 2~8Hz のバンドパスフィルターをかけたものを震央距離毎に表示している.

大陸内の2点(MDJ及びINCN)の記録には、二つのP波相が見られる.これらはそれぞれ、 モホ面直下の上部マントルを伝播する屈折P波(Pn)と、大陸地殻内部を通過してきた直達P 波(Pg)に相当する.Pg波は厚い大陸地殻内部では、比較的遠方でも大きな振幅で観測される が、地殻の薄い海洋域では遠くまで伝播できないため、日本海を挟んで爆心からの距離が 600km以上離れている日本列島では観測することはできない.

日本列島の F-net 観測網では、日本海の地殻直下の上部マントル内部を通過してきた Pn 波が、 広い範囲に渡り観測されている。特に S/N 比が高く、明瞭な P波の初動パルスが確認できた Fnet 観測点については、Fig.1 において白い三角で示している。爆心からの距離が遠い地点(特 に、震央距離 1200km 以遠)では、初動のフェイズも不明瞭となり、特に太平洋側の海洋島の 観測点や道南以外の北海道及び沖縄の観測点ではノイズに埋もれているため、核実験によると思 われるフェイズの同定は困難である。Pn 波が明瞭に記録されたすべての観測点において、S波 がほとんど観測されていない(または極微弱な振幅しかない)ことから、爆発性の震源であるこ とは容易に推測できる。

Fig.3 に示した水平成分(東西成分)の記録では、震央距離 800km 程度までの、一部の観測

吉澤 和範



Fig. 2. Seismic records (vertical component) of the North Korean nuclear test recorded by broad-band seismograph stations in East Asia, including IRIS stations; MDJ in China and INCN in South Korea, and F-net stations (NIED) in Japan. The abscissa is the distance from the epicenter reported by CTBTO/IDC, and the ordinate the elapsed time after the initiation of the event. The seismograms are band-pass filtered with a frequency range between 2 and 8 Hz. Solid lines represent the theoretical travel times for *Pn*, *Pg*, *Sn* and *Sg* phases calculated from the IASP91 model.



Fig. 3. Same as Fig. 2, but for horizontal EW component.

点において、わずかな振幅ながら S波(Sn波)に相当するフェイズが確認できる。等方的な爆発性震源の場合、震源から発生する地震波は、通常は P波のみであるが、爆心地周辺の地形や 伝播経路での散乱による影響、さらに爆発による近傍断層のずれの誘発等により、微弱な S波 も発生することがある。特に、爆心からの距離が近い大陸内部の観測点(MDJ 及び INCN)で は、鉛直・水平成分の双方で、微弱な S波が確認できる。

次節以降では、自然地震の波形記録との比較や、*Pn*波が明瞭に記録された F-net 観測点の波 形から推定される見かけの平均速度と最大振幅の分布について考察する.

Ⅲ. 自然地震記録との比較

北朝鮮北東部での核実験の爆心地周辺域は, 普段は地震活動が極めて低い地域であるが, 2002 年 4 月 16 日 (UTC) に, 今回のイベントとほぼ同程度のスケール (mb4.6) の自然地震



Fig. 4. Three-component seismograms recorded at the MDJ station in north-eastern China for (a) nuclear-test event on October 9, 2006, and (b) a natural earthquake on April 16, 2002. Epicentral distances are 370km and 441km, respectively. The seismograms are band-pass filtered with a frequency range between 2 and 8 Hz.

が、爆心地の南南西約 70km の地点において発生している(気象庁, 2006b). Fig. 4 に MDJ で観測された核実験および自然地震の 3 成分記録の比較を示す.

核実験による波形記録(Fig. 4 (a)) では、P波(Pn波および Pg波)の振幅が大きく、S波 は P波に比べてかなり微弱である。ただし、震源で発生する S波は小さいが、大陸表層を伝播 する Lg波が認められる。また、vertical 及び radial 成分の時間 120~140 秒において、大陸表 面を伝播するレイリー波(Rg) も確認することができる。

自然地震の記録(Fig. 4 (b))では、*Pn*波や*Pg*波に比べて、顕著な振幅を持つ*S*波(*Lg*波)が観測され、爆発性震源とは明らかに異なる地震波形が得られることが分かる.

なお, *Lg* 波は大陸地域では一般的に観測されるが,海洋域ではすぐに見えなくなる.このような性質から,日本海中央部〜北部の日本海盆が海洋性の地殻構造を持つことが,古くから知られている(宇津, 1958).

Ⅳ. F-net の核実験波形と、伝播経路の影響

Fig.2 及び Fig. 3 に見られるように, F-net 観測点の一部では, 明瞭な *Pn* 波が観測されている. これらの観測点のうち, 爆心地からほぼ等距離(930~940km)にあり, かつ, 爆心からの方位角が異なる 4 つの観測点における変位波形を Fig. 5 に示す.

震央距離はほぼ同じであるが、初動の Pn 相の到達時刻や最大振幅が、場所により大きく異なっていることが明らかである(振幅の縦軸が、IMG と他の 3 観測点とで異なることに注意). そ



Fig. 5. Vertical component seismograms recorded by four F-net stations (IMG in south-western Hokkaido, TGA in Shiga, ISI in Tokushima, STM in Nagasaki) located at nearly the same epicentral distance (930 - 940 km) with a variety of azimuth from the epicenter. Note that amplitudes of the bottom three panels are magnified compared to the top. The seismograms are band-pass filtered with a frequency range between 4 and 8 Hz.

こで,これら P 波の速度・振幅の異常の大まかな分布を調べるため, Pn 波の見かけの波線平均 速度及び最大振幅の分布について,以下で詳細に検討する.

1. 見かけの波線平均速度分布

ここでは簡単のため、*Pn*波の到達時刻 *T*と震央距離 Δから、見かけの波線平均速度を *v=*Δ/ *T*として見積もり、それらを波線毎に色分けしたものを Fig. 6 に示す。今回の核実験では、北 海道から九州まで広範な地域で *Pn*波が明瞭に観測されており、日本海のほぼ全域をカバーする ような波線分布が得られている. *Pn*波の到達時刻が検知できた全波線に対する見かけの平均速 度の平均値は約 7.58km/s となる。Fig. 6 ではこの平均値からの摂動を示している。

爆心から西側へ伝播した Pn 波は、日本海盆を通過し、北海道南部〜東北地方北部で観測されている.日本海盆中央部直下は、厚さ約 9km の海洋性地殻構造となっており (Sato et al., 2004)、この領域を通過した Pn 波は高速度の異常を示している.

一方,爆心から南方へ伝わる波線は,朝鮮半島南東部〜大陸棚の地域を通過し,九州〜中四国 地方の観測点に到達する.特に,波線経路の大部分が大陸地殻(および大陸棚)の直下を通過す る九州地方西部では,他の地域に比べて,*Pn*波の見かけの平均速度が顕著に遅くなる.これら



Fig. 6. Ray paths with perturbations of apparent path-average velocity of the first arrival *Pn* waves. Reference velocity of apparent path-average velocity is 7.58 km/s.

の速度の極端な違いから、屈折波が地殻内を通過する際の影響が Pn 波の見かけの波線平均速度 に大きく影響を与えていることが推測できる.

また、日本海中央部の大和堆南部〜大和海盆を通過する波線に沿った見かけの平均速度には、 かなり地域性が見られる.特に、大和堆からその南の北隠岐堆における地殻の厚さは約 22km (Kurashimo et al., 1996) となり、周辺の海盆域に比べて地殻が厚く、これがこの地域を通過 する一部の波線でみられる見かけの平均速度の低速度異常とも関係していると思われる.これら の波線のうち、中部地方の山岳地帯直下を通過して太平洋側で観測された波線(例えば JIZ 観 測点等)の見かけの平均速度が低速度となる点については、日本列島の厚い島弧性地殻(約 40km 程度)による影響も大きいと考えられる.ただし、個々の波形の Pn 波到達時刻の目測値 には大きな誤差も含まれており、波線毎の結果の解釈には注意を要する.

2. 最大振幅分布

Fig. 7 に,各観測点における変位の最大振幅の対数を,観測点毎に色分けして示す.爆発性の震源であることから,爆心からのP波の放射パターンはほぼ等方的であると考えると,震源からの方位による最大振幅の違いは、主に,観測地点直下の地域性や,波線経路の違いによる影



Fig. 7. Variations of maximum amplitude of the first arrival Pn waves in a log-scale observed at F-net stations. Broken semi-circles indicate equidistance from the epicenter.

響を反映するものと考えられる.ここでは, Pn波の変位波形に 2~9Hz のバンドパスフィルター をかけ,そのエンベロープの最大振幅の対数値を,観測点毎に表示している.また,爆心からの 距離 600~1200km までの等距離地点を,破線の半円で示している.ここでは,各観測点毎の地 震計のレスポンス補正を行っているが,観測地点毎のサイト特性については特段考慮していない.

Fig.7 に見られるように、多くの観測点は、震央距離 800~1100km の範囲内に位置している が、震源からの方位に応じて、その最大変位の大きさに一定の傾向がある。特に爆心の南~南東 部の観測点(中四国~九州北部)に比べ、爆心の西側に位置する観測点(北海道~東北北部)に おいて、等距離にも関わらず振幅が一桁以上大きくなっている。

爆心地から南方への波線の経路(例えば中四国地方方面への波線)では、厚さ約 15km の地 殻をもつ対馬海盆(Kim et al., 1994)からその南部の海陸境界へと、徐々に地殻が厚くなる地 域を通過するのに対し、爆心から西方への波線経路では、厚さ 10km 以下の海洋性地殻構造を もつ日本海盆を通過する.

核実験の震源過程が等方的であると仮定すれば、震源からの方位に依存する *Pn*波の振幅異常は、波線経路直下の構造変化(特にモホ面形状の変化)の影響によるものと考えられ、これにより、*Pn*波の最大振幅が一桁以上変化し得ることが、Fig. 7 から示唆される.

この他にも, 観測された振幅の異常に影響を与える要因としては, 爆心地近傍の地表面での反 射等による二次的な波の影響や, 震源における爆発自体の非等方性も考えられる. Pn 波の振幅 異常の厳密な解釈のためには, 遠地の地震記録も含めた詳細な検討や, 日本海直下の 3 次元的 構造を考慮した上での波線追跡や波動場シミュレーションによる検討も必要と思われる.

V. まとめ

本研究では、核実験の爆心地の比較的近傍(~1100km 程度)に位置する、日本および東アジ アの広帯域観測点で得られた地震波形記録を概観し、日本海直下を伝播してきた波形に見られる 速度や振幅の異常から、日本海下の地震学的構造の空間変化との関連についても考察を行った.

Table 1 に示すように,今回の核実験の震源パラメータの推定値,特にマグニチュードについ ては,各機関によって大きなばらつきがある.これは,今回のイベントの規模が小さく,また, 爆心地を取り囲むような地震観測網が存在せず,各機関が利用している観測データの分布や質に 大きなばらつきがあることが要因として考えられる.

日本列島は、爆心地の西側から南側まで、震央から見た全方位の約4分の1をカバーしている上、北海道から九州まで、広い地域で明瞭な Pn 波が観測されている.しかし、観測された波形記録には、伝播経路の影響による地域差が顕著に見られ、これが爆心地や爆発の規模の正確な特定を困難にしていることは否めない.

今回行った核実験波形の解析から、日本海の各地域直下を伝播する Pn 波の解析には、波線毎 の地域性を考慮する必要があり、日本海直下の詳細な 3 次元速度構造モデルが不可欠であるこ とが強く示唆される.特に、日本列島で記録された地震波記録を用いて朝鮮半島における震源位 置やその規模を正確に決めるためには、その途中の経路となる日本海直下の3次元的不均質性 の影響まで考慮することが必要であろう.

謝辞 本研究では、防災科学技術研究所の F-net 広帯域地震観測網及び IRIS-GSN 観測網の 記録を利用させて頂きました.また、蓬田清氏から有益なご助言を頂きました.記して感謝いた します.

文 献

- Aki, K. and P.G. Richards, 2002. *Quantitative Seismology, 2nd Edition*, University Science Books, Sausalito, CA, 700pp.
- Ammon, C.J. and T. Lay, 2007. Nuclear test illuminates USArray data quality, EOS Trans. AGU, 88 (4), 37, 52.
- Che, I.-Y., M.-S. Jun and J.-S. Jeon, 2007. A compound linear discriminant method for small-magnitude seismic events and its application to the North Korea seismic event of October 9, 2006, *Earth Planets Space*, **59**, e41-e44.
- Kennett B.L.N. and E.R. Engdahl 1991. Travel times for global earthquake location and phase identification, *Geophys. J. Int.*, 105, 429-465.
- Kim, H.J., C.H. Park, J.K. Hong, H.T. Jou, T.W. Chung, V. Zhigulef and G.I. Anosov, 1994. A seismic experiment in the Ulleung basin (Tsushima basin), Southwestern Japan sea (East sea of Korea), *Geophys. Res. Lett.*, **21**, 1975-1978.
- Kim, W.-Y. and P.G. Richards, 2007. North Korean nuclear test: Seismic discrimination at low yield, EOS Trans. AGU, 88 (14), 157, 161.
- 気象庁, 2006 a. 北朝鮮関連の地震波形分析結果,報道発表資料,平成 18 年 10 月 9 日.
- 気象庁, 2006 b. 10 月 9 日 10 時 35 分頃の震動波形について,報道発表資料,平成 18 年 10 月 11 日.
- Kurashimo, E., M. Shinohara, K. Suyehiro, J. Kasahara and N. Hirata, 1996. Seismic evidence for stretched continental crust in the Japan Sea, *Geophys. Res. Lett.*, 23, 3067-3070.
- Kvaerna, T., F. Ringdal and U Baadshaug, 2007. North Korea's nuclear test: The capability for seismic monitoring of the North Korean test site, Seis. Res. Lett., 78, 487-497.
- Sato, T., M. Shinohara, B.Y. Karp, R.G. Kulinich and N. Isezak, 2004. P-wave velocity structure in the northern part of the central Japan Basin, Japan Sea with ocean bottom seismometers and airguns, *Earth Planets Space*, 56, 501-510.
- 宇津徳治, 1958. 日本における Lg 相の観測(1), 験震時報, 23, 61-76.