

地震波からみた自然地震と爆発の 識別について

Comprehensive nuclear-Test-Ban Treaty

National Data Center
(NDC-1)

平成22年9月9日

(財)日本気象協会 NDC-1

概論：人工の爆発と自然地震の違い

～ 波形の違いを調べる前に～

人為起源の爆発が起こり得ない場所がある

震源決定の結果から、人為起源の爆発ではない事象が、ある程度ふり分けられる

深い場所（深さ約2km以上での爆発は困難）

海底下（海底下での爆発は技術的に困難）

海中や海底上での爆発は、地震波とともに水中音波として捉えられる。水中音波観測点と一部の地震観測点

- 震源決定の結果は、爆発と自然地震を区別する最も重要な判断材料にもなる。

- 特に震源の深さは重要なファクター。

概論：人工の爆発と自然地震の違い

- 爆発は、同じ規模の自然地震と比較して、破壊の開始から終了までの時間が短い。

爆発の方が周波数の高い地震波がより多く観測される傾向にある。

- 自然地震は断層面を境にした“ずれ”であるのに対して、爆発は中心から均等に外へ向かう（膨張する）方向のみの運動。

P波初動に違いが出る（後述）

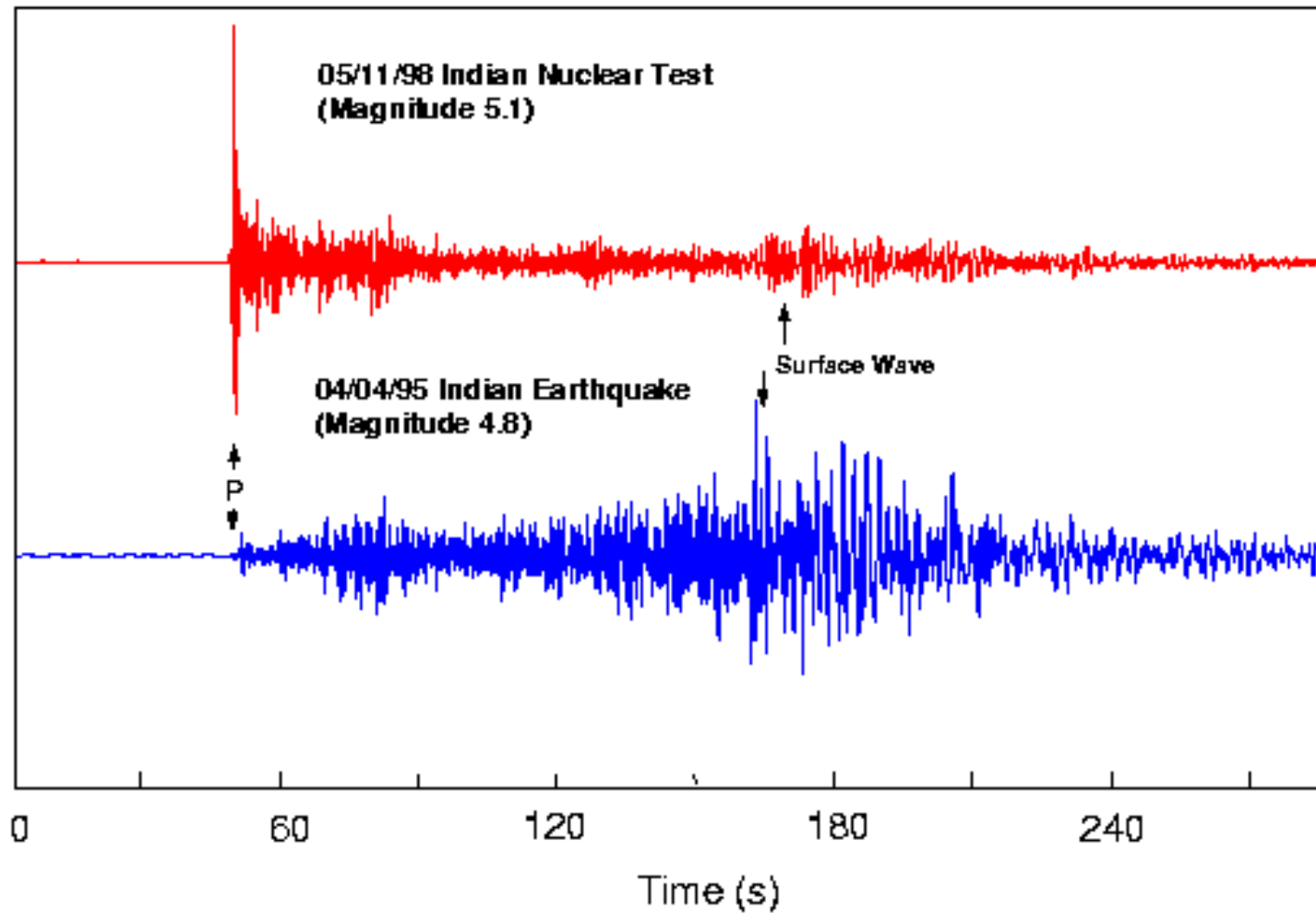


これらの違いが波形の違いとして捉えられる

概論：人工の爆発と自然地震の違い

－波形の違い－

Data recorded at Nilore, Pakistan



既存の事象識別手法の有効性検討

既存手法の多くは、比較的規模が大きい核実験が実施されていた時代に研究された

地震波形の形状の違い --- 見た目の違い

mb:Ms

Regional P/S Ratio

P波初動極性

P波複雑度

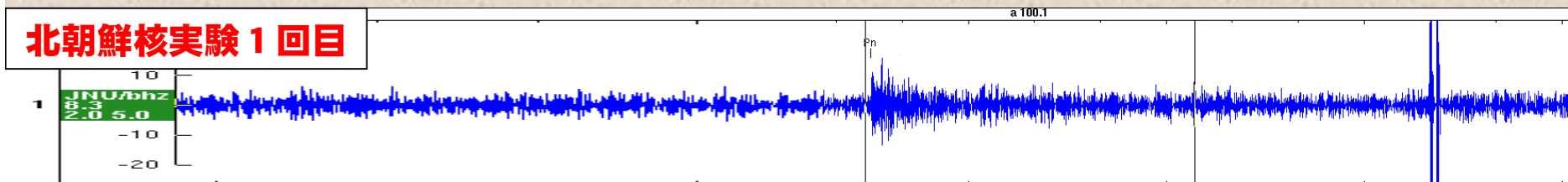
Spectral Ratio, Third Moment of Frequency

比較的規模の小さい北朝鮮による核実験では？

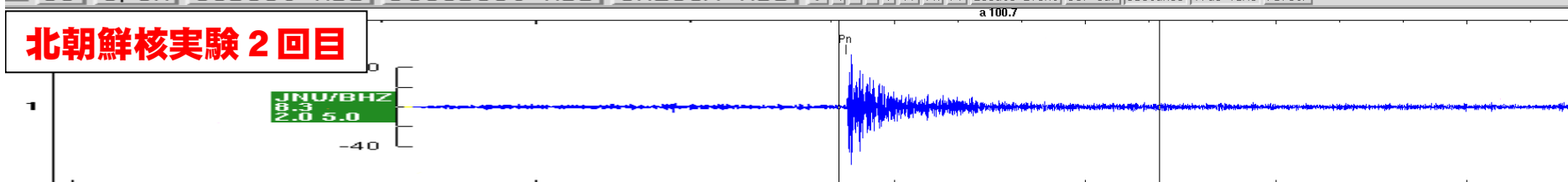
地震波形の形状の違い

JNU (大分) 距離 約900km

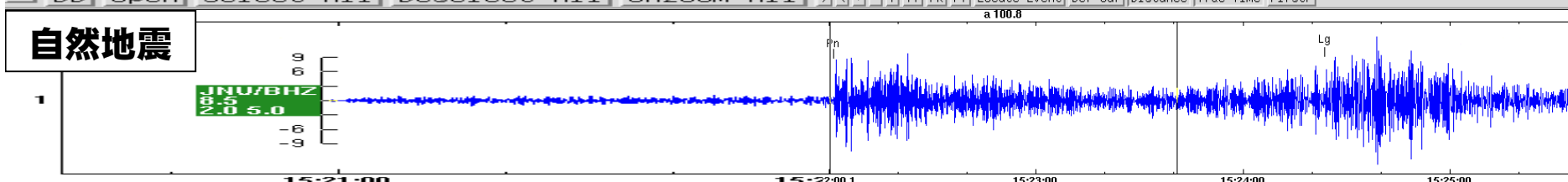
北朝鮮核実験 1回目



北朝鮮核実験 2回目



自然地震



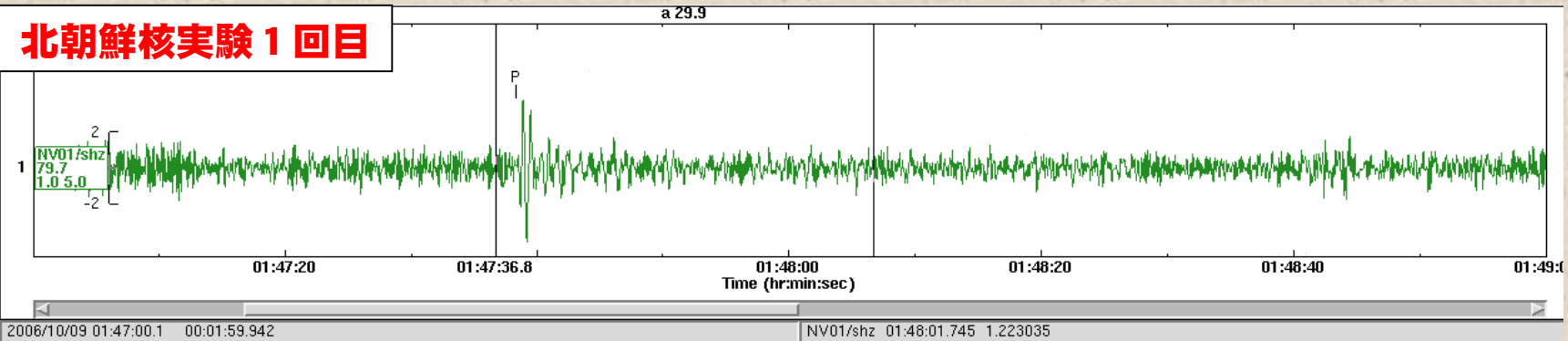
2009/06/08 15:20:26.9 00:05:08.774

JNU/BHZ 15:22:58.125 4.046317

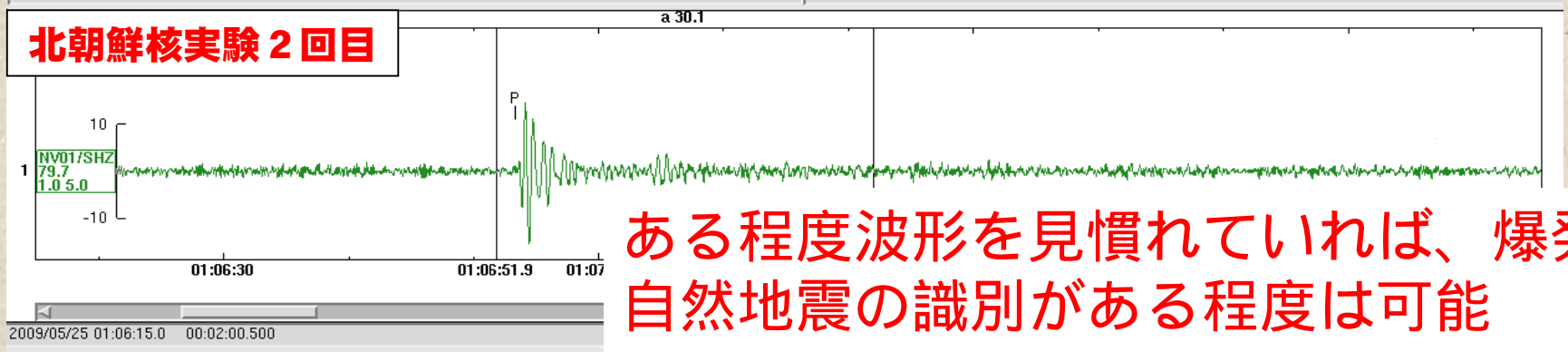
地震波形の形状の違い

NVAR (ネバダ) 距離 約9000km

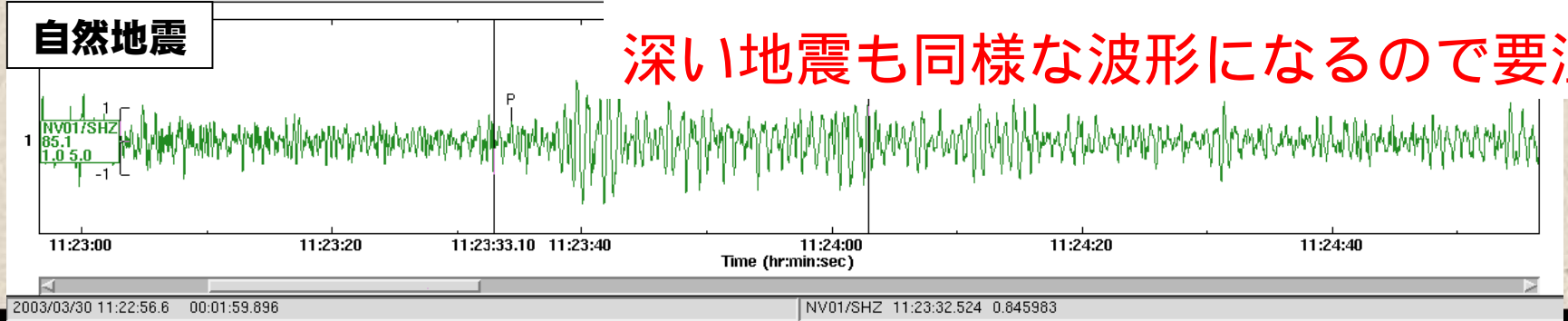
北朝鮮核実験 1回目



北朝鮮核実験 2回目



自然地震



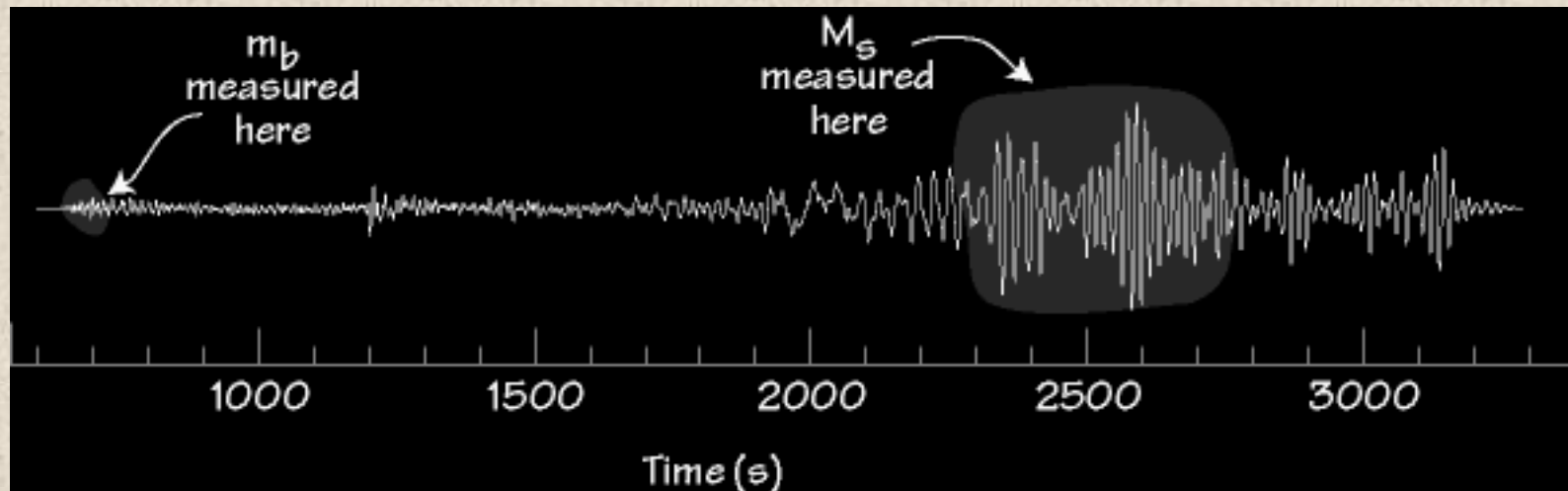
ある程度波形を見慣れていれば、爆発と自然地震の識別がある程度は可能

深い地震も同様な波形になるので要注意

mb : Ms

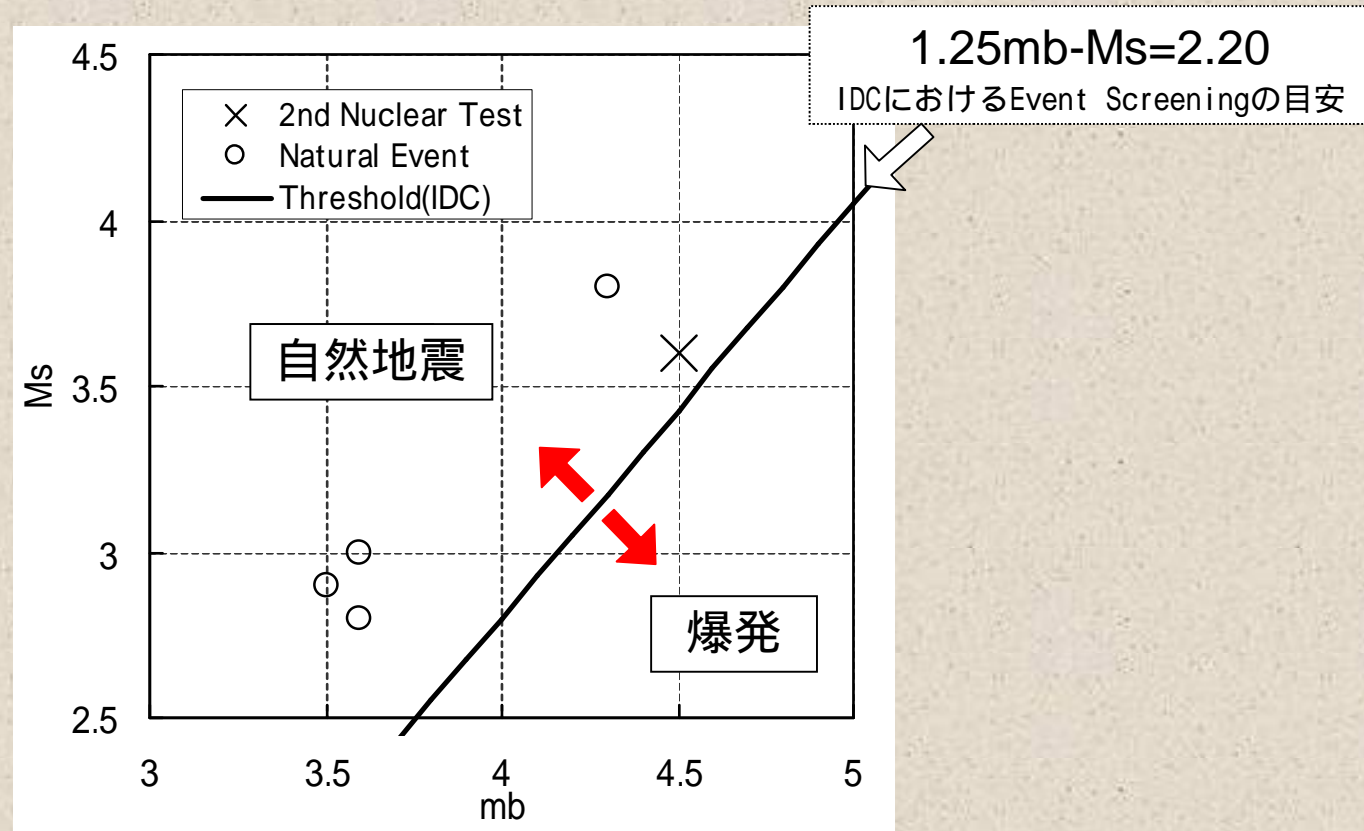
mb: 実体波マグニチュード。P波の初動から5秒以内の最大振幅をもとに算出したマグニチュード。

Ms: 表面波マグニチュード。周期の長い表面波と呼ばれる波をもとに算出したマグニチュード。



爆発事象のMsが、自然地震に比べて小さくなる性質を利用（識別手法としては最もポピュラー）

mb : Ms



mb vs Msによる核実験と朝鮮半島周辺の自然地震との比較
1回目の核実験は表面波が検知されなかったためMsが算出されていない。

爆発と自然地震の境界付近にあるものの、mb:Msでは2回目の核実験は識別できなかった。

爆発の規模が小さい場合、この手法による識別は困難。

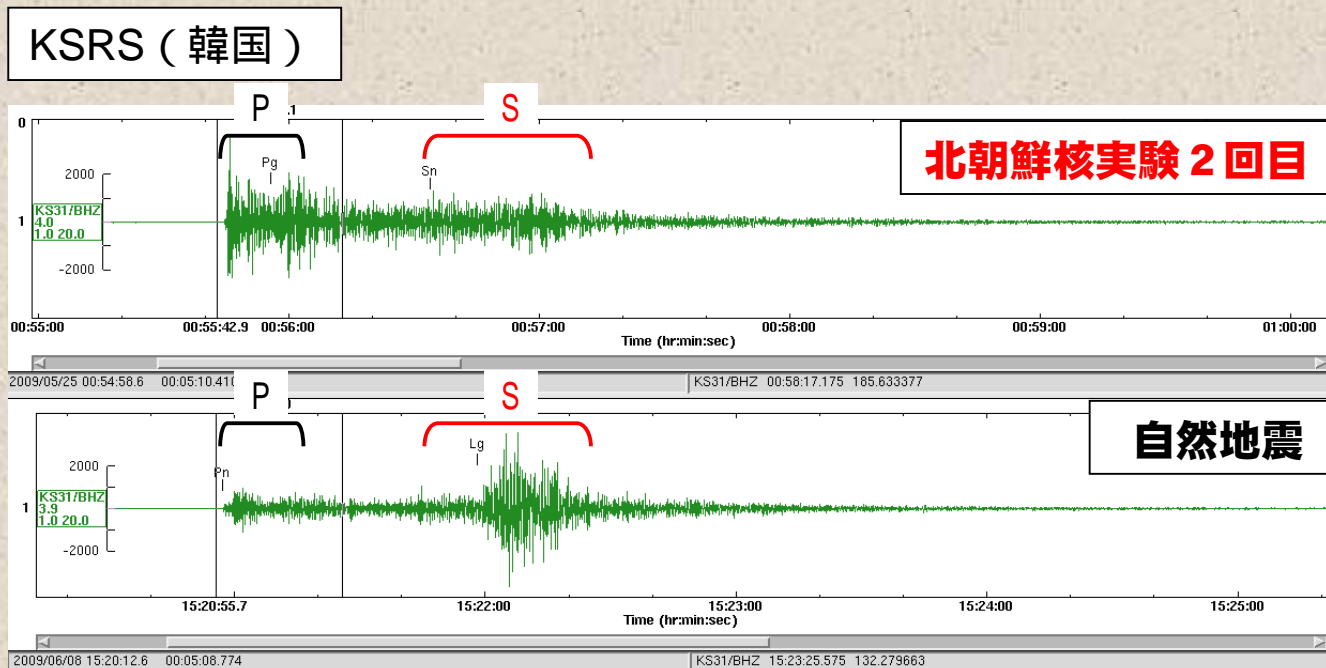
Regional P/S Ratio

爆発事象ではS波が発生しにくく、その振幅がP波に比べて小さくなる性質を利用

Regional Distance(震源からの距離1800km以内)の観測点の波形をもとに計算

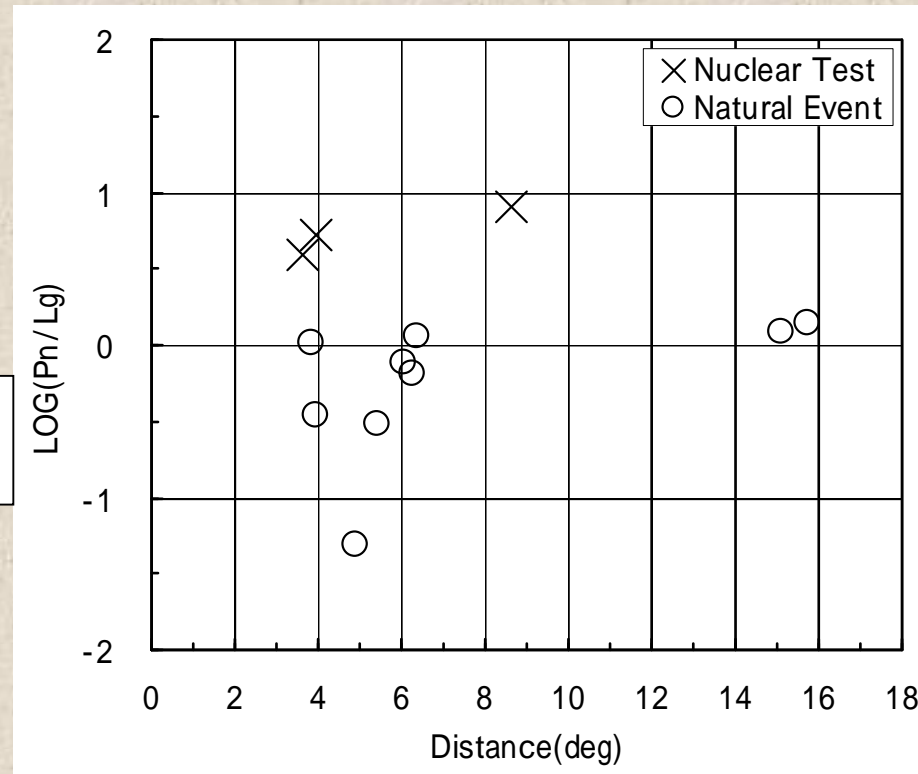
$$\text{Regional P/S Ratio} = (\text{P波の振幅}) / (\text{S波の振幅})$$

爆発事象はP/S Ratioが大きくなる



Regional P/S Ratio

↑
値が大きいほど
爆発らしい



爆発事象と自然地震とのRegional P/S Ratioの比較
地点ごとの計算値を震源からの距離に応じてプロット

規模の小さいイベントに対しても良好な結果が得られた。
ただし、震源の近く（距離1800km以内）に観測点が必要

Regional P/S Ratio (発展型)

周波数別にP/S Ratioを計算

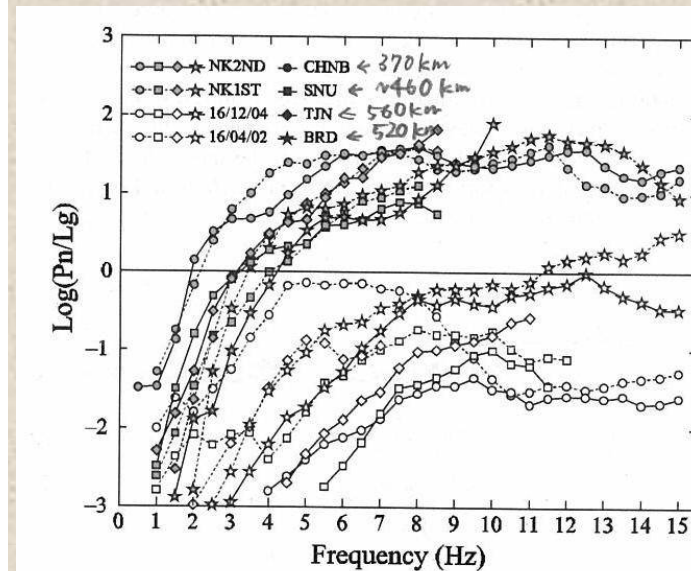
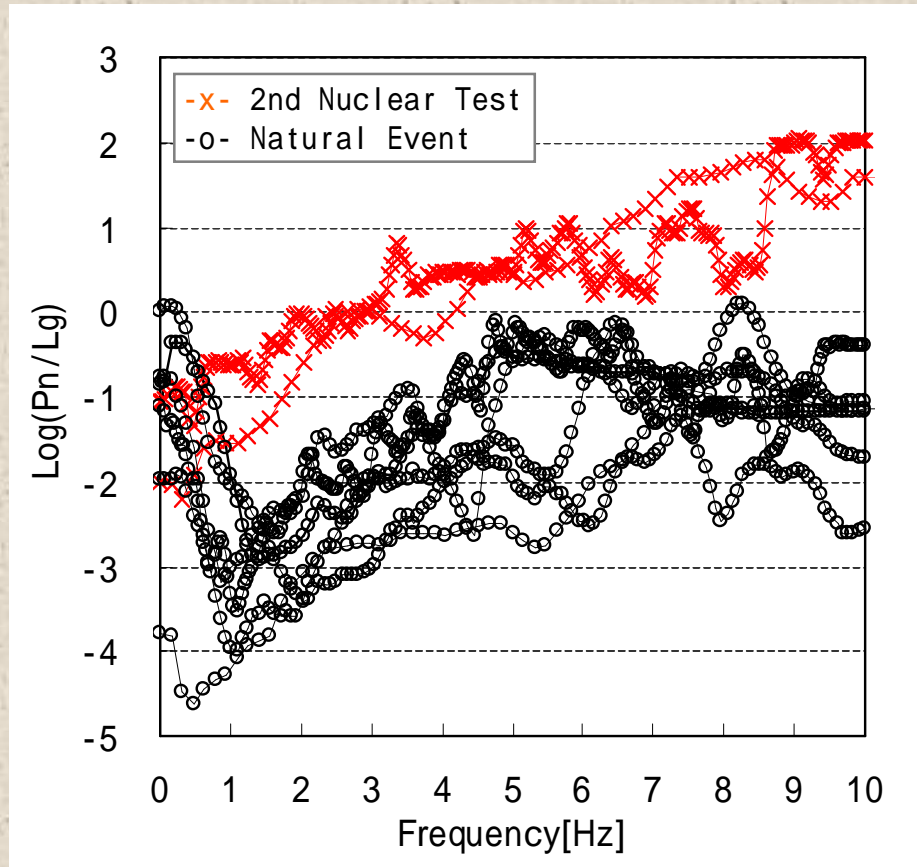


Figure 3. Spectral ratios of P_n/L_g as a function of frequency for two explosions and two natural earthquakes. The North Korean nuclear tests (filled symbols) are clearly distinguished from earthquakes above 4 Hz.

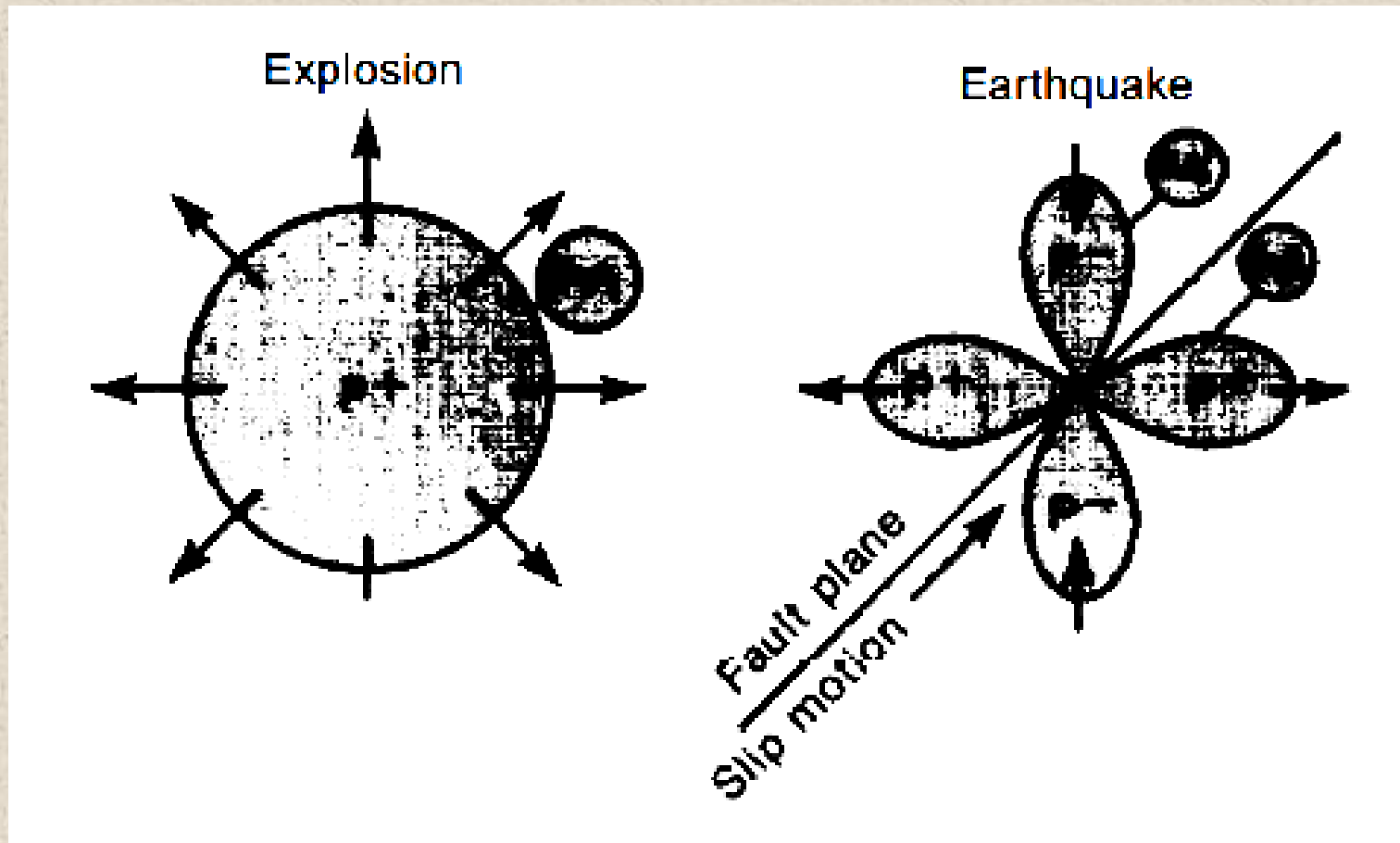
爆発事象と自然地震との周波数別P/S ratioの比較

mbが3.5以上、震央距離3~6°の観測点のデータを使用

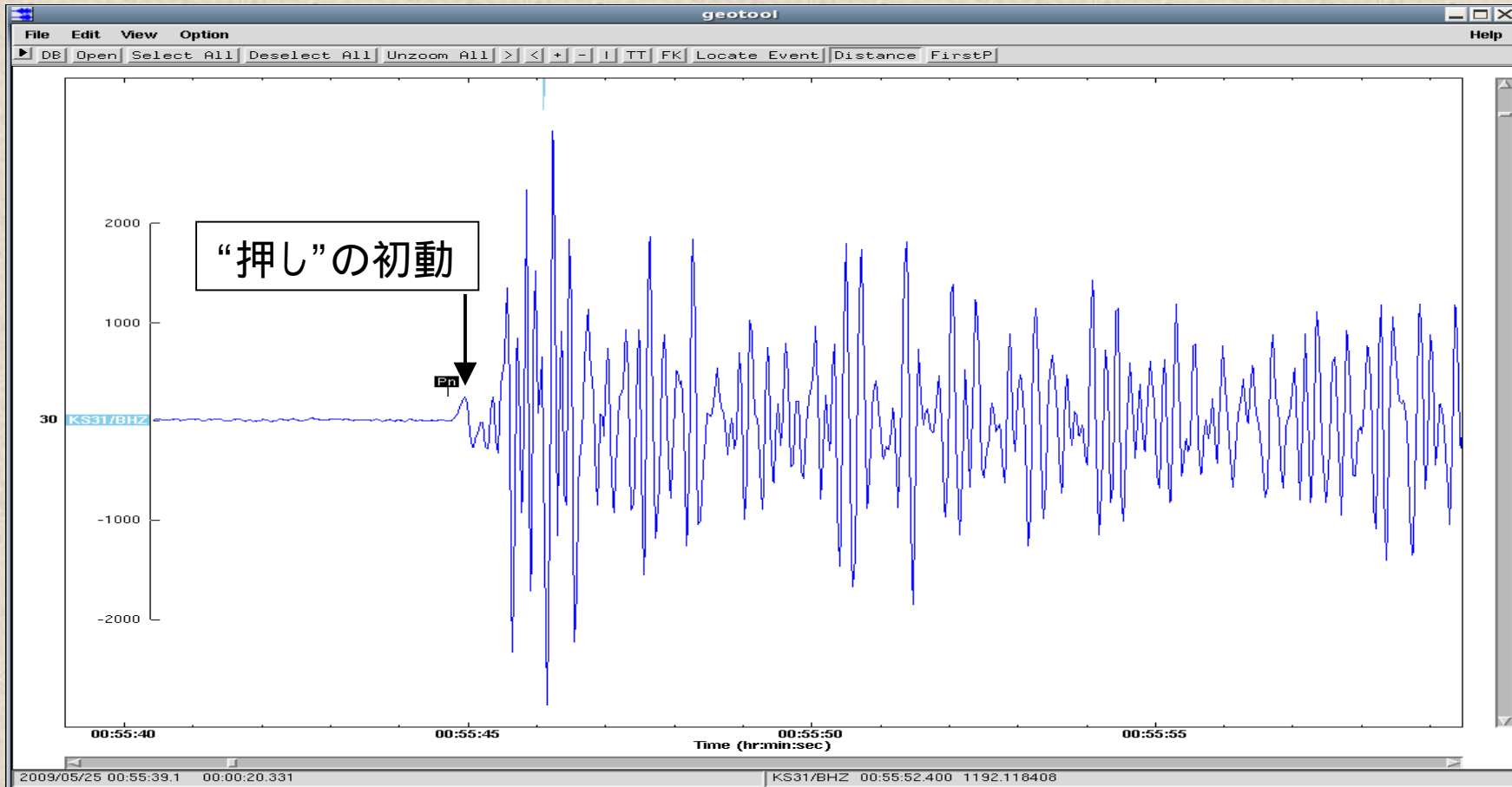
右図はShin et al. (2009) による解析

P波初動極性

爆発では、“押し”のP波初動しか観測されず、“引き”が観測されないことを利用

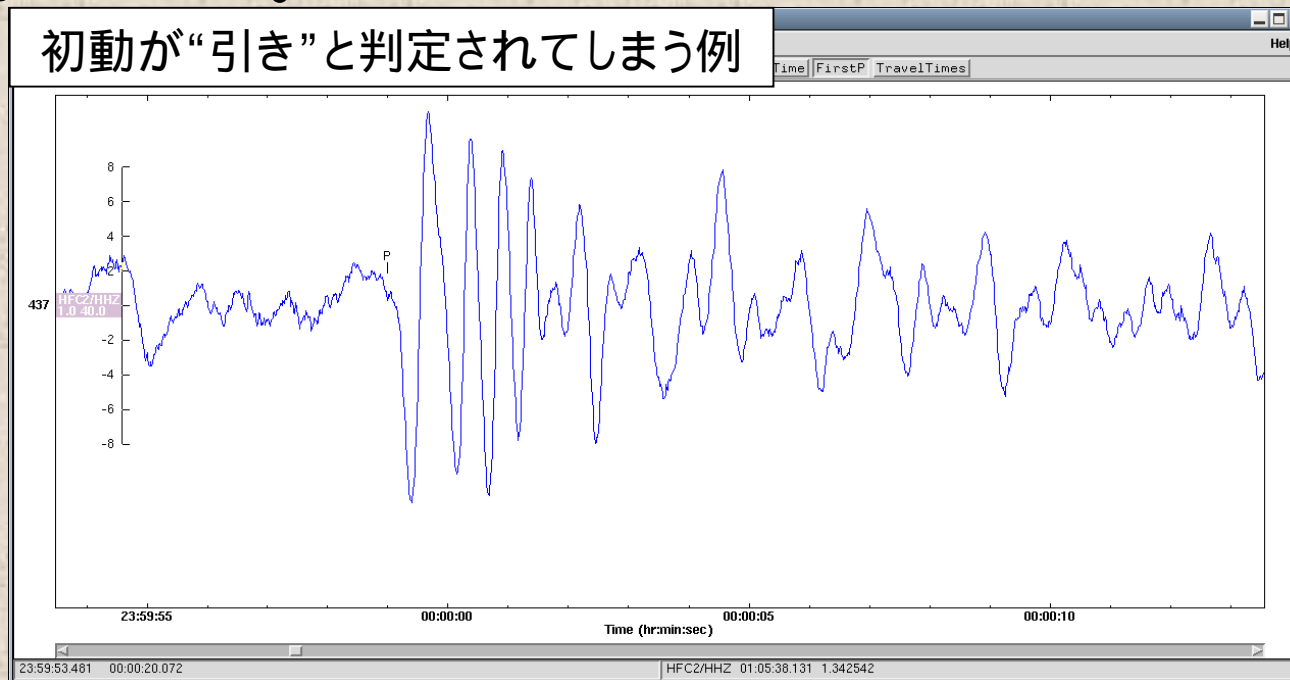


P波初動極性



P波初動極性

2回目の核実験を対象に初動極性を調べたところ、初動が“引き”のように見えるシグナルが多数存在し、容易には識別できない。



距離が離れると初動がノイズに埋もれて正しく読み取れない。

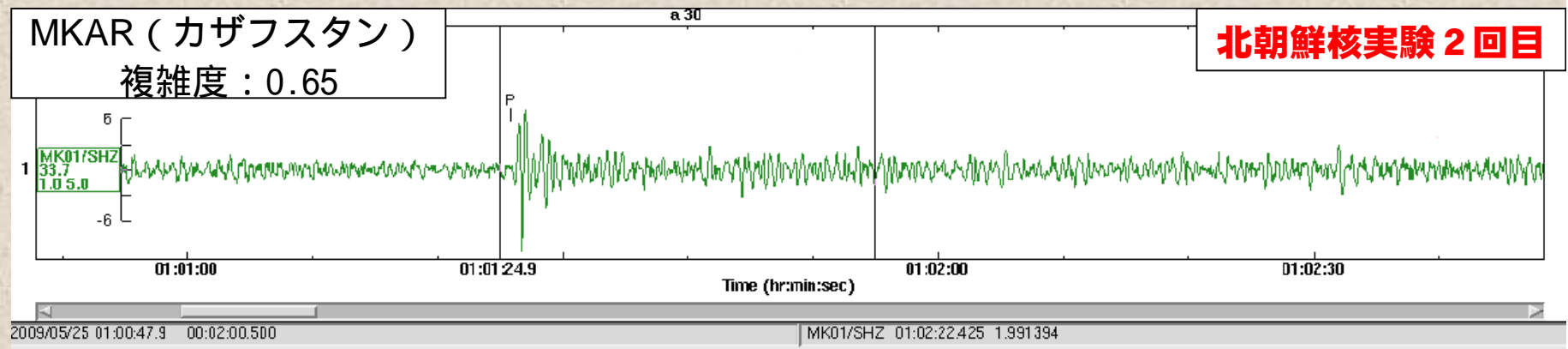
今回の規模の事象で正しく極性を読み取れるのは、震央距離がおよそ 10° 以下の地点に限られる。 利用可能な地点数少ない

P波複雑度

爆発はP波の継続時間が短く、波形が単純な形状となる傾向にある、という性質を利用

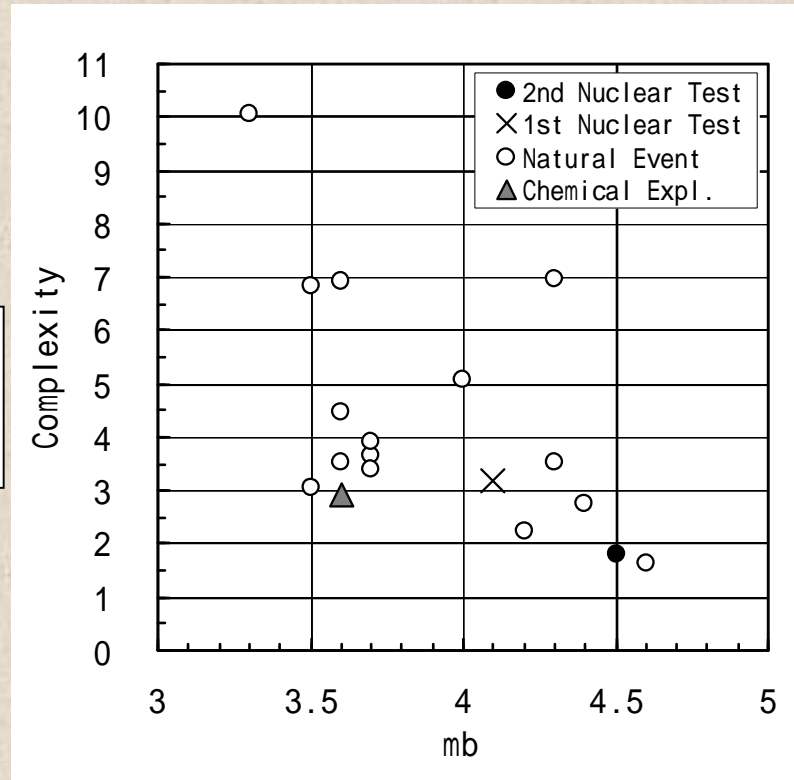
$$\text{複雑度} = \frac{\text{P波の到達時刻を基準として} \\ \text{5～30秒の振幅の積分}}{\text{0～5秒の振幅の積分}}$$

シグナルの大半が初動付近にあって、P波の継続時間が短い 複雑度の値は小さくなる



P波複雑度

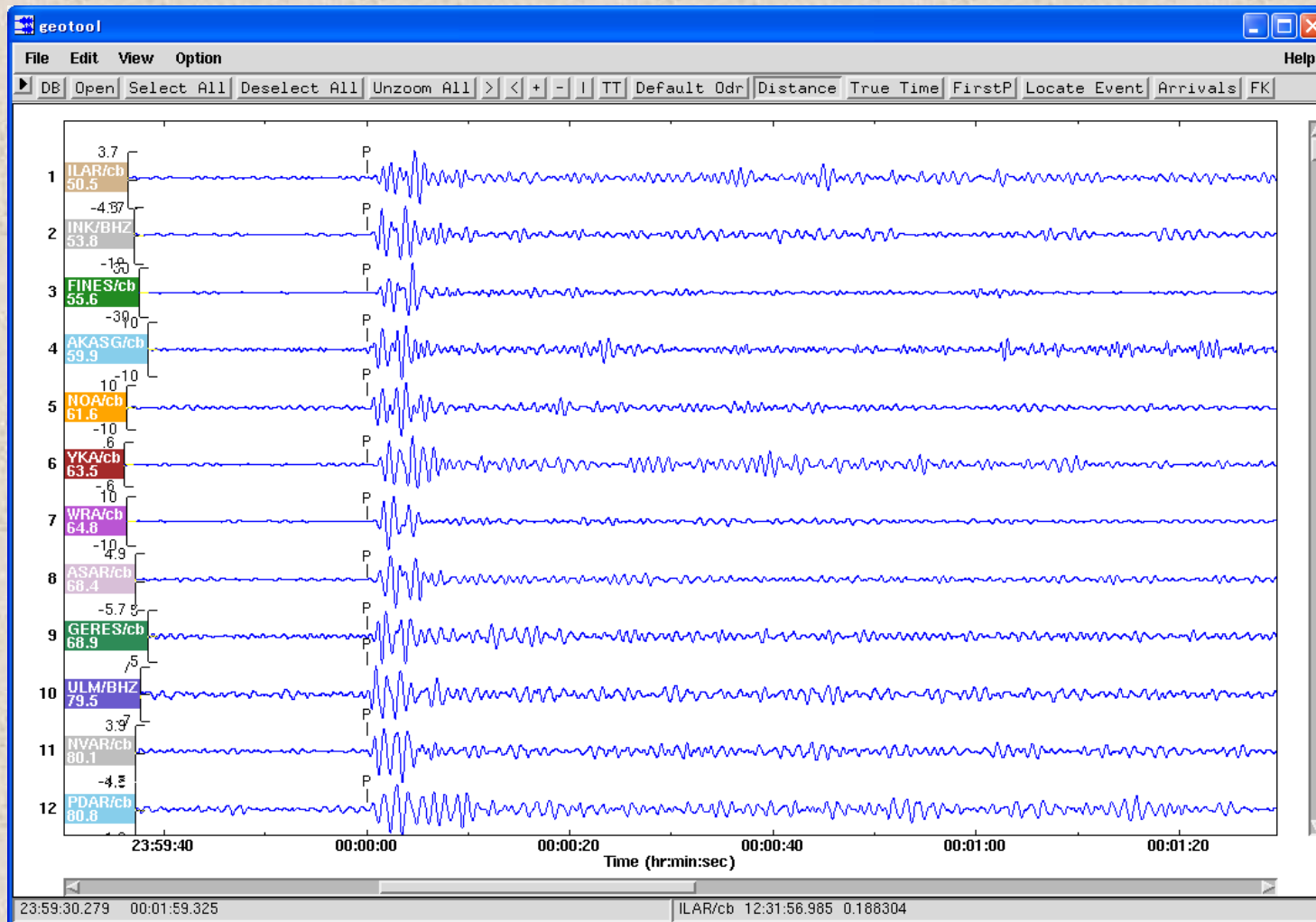
値が小さいほど
爆発らしい
1以下が目安



自然地震と爆発事象との複雑度の比較
イベントごとの複雑度平均値をmbに応じてプロット

- ・爆発は複雑度が小さい傾向だが、自然地震でも複雑度が小さいものがある。
- ・マグニチュードが小さいと爆発と自然地震の区別は困難

P波複雑度



爆発事象のような特徴を持つ自然地震の波形の例
mb=4.6、複雑度はイベント平均で1.64

Spectral Ratio · Third Moment of Frequency

爆発では、自然地震に比べて周波数が高い（波長が短い）成分の波が卓越する性質を利用

Spectral Ratio

$$SR = \frac{\int_{h1}^{h2} A(f)df}{\int_{l1}^{l2} A(f)df}$$

高周波数成分 / 低周波数成分

ここで、 $A(f)$: スペクトル密度

$$l1=0.35\text{Hz} \quad l2=0.85\text{Hz} \quad h1=1.45\text{Hz} \quad h2=1.95\text{Hz}$$

Third Moment of Frequency

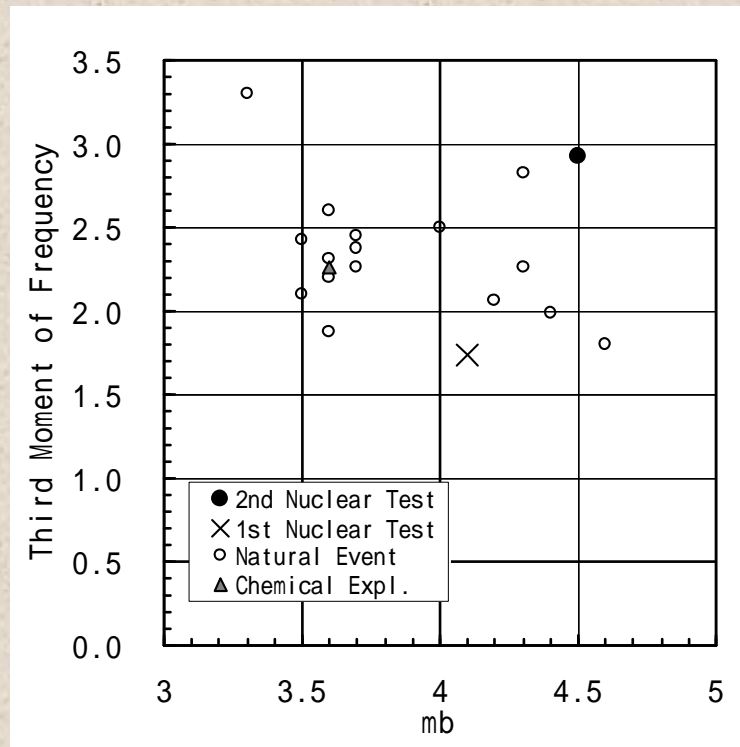
$$TMF = \left[\frac{\int_0^{f0} f^3 A(f)df}{\int_0^{f0} A(f)df} \right]^{1/3}$$

平均周波数のようなもの

ここで $f0=5.0\text{Hz}$ (IDCに準拠)

いずれも爆発では大きい値をとる(はず)

Spectral Ratio · Third Moment of Frequency



爆発事象と自然地震とのTMF（震源周辺の地点のみ）の比較
TMFの算出には震源からの距離20°以内の地点のみ使用

震源に近い地点のみ使用すると、2回目の核実験におけるTMF
の値が改善された。 識別に利用できる可能性

ただし、mbの小さい他の爆発事象では自然地震との区別は困難

まとめ

- 現段階では爆発事象かどうかを識別するための手段として最も信頼性が高いのは、解析者による波形の観察であり、既存の識別手法により算出される指標値のみで機械的に識別するのは困難。
- 自然現象の持つ“ゆらぎ”のために、自然地震でも爆発事象のような特徴を示す事象も存在する。
- 規模の小さい爆発事象については、検知される観測点が少なくなることと、自然地震も爆発に似た特徴を現し始めるため、自然地震との区別がつきにくい。

まとめ

- 一方で、解析者の熟度や主観に依らずより客観的に爆発事象を識別でき、かつ信頼性の高い指標が必要である。
- Regional P/S Ratioが有力であったほか、その他の手法でも震源に近い地点のデータを用いれば、有効と思われるものがいくつかあった。
- 今後、実運用に耐えられると思われる識別手法の選択と精度向上に向けた解析方法の改善、新手法の研究が必要である。

