HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	強震観測におけるSTA/LTA　トリガー方式の問題点
Author(s)	吉田, 邦一; 笹谷, 努
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 69, 85-95
Issue Date	2006-03-15
DOI	10.14943/gbhu.69.85
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/21502
Type	bulletin (article)
File Information	07.pdf

Instructions for use

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

北海道大学地球物理学研究報告
Geophysical Bulletin of Hokkaido University, Sapporo, Japan
No. 69, March 2006, pp. 85－95

強震観測におけるSTA/LTAトリガー方式の問題点

吉田　邦一
産業技術総合研究所　活断層研究センター
笹谷　　努
北海道大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻

(2005年12月20日受理)

Issues in an STA/LTA Trigger Algorithm for Strong Motion Observations

Kunikazu YOSHIDA
Active Fault Research Center, Geological Survey of Japan,
National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)
and
Tsutomu SASATANI
Division of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Hokkaido University

(Received December 20, 2005)

We point out that sometimes a STA/LTA trigger algorithm does not work appropriately for strong-motion observations. The STA/LTA trigger algorithm evaluates the ratio of short-time average (STA) to long-time average (LTA) and is adopted to recognize an earthquake for recording by an event recorder. We observed strong-motion records in the northern part of the Ishikari plain during the 2003 Tokachi-oki earthquake and its largest aftershock. Peak ground accelerations of the records are about 1 m/s^2 and peak ground velocities, about 0.3 m/s. However, two of the stations which adopted the STA/LTA trigger algorithm failed in recording during the main shock and the largest aftershock. We evaluate STA/LTA ratios by using the records obtained at other stations in order to investigate factors in not triggering these events. Weak long-period initial motion of P-wave, which was observed during the 2003 Tokachi-oki earthquake and its largest aftershock, make the STA increase slowly. Since the LTA also increases during the slow STA increase, the STA/LTA ratios do not increase enough to trigger an event even if peak ground motion is large. We note that the STA/LTA trigger algorithm alone is not perfect for strong-motion observations, especially at an urban site.

I. はじめに

地震観測では，記録装置の容量やデータ転送量の節約のため，地震を検知したときのみ地震動を記録する，いわゆるイベントトリガー方式による収録が行われることがよくある．特に，強震動は稀にしか観測されないうえ，地動のレベルは通常の微動とまったく異なることから，微小地震観測などと比べ地震の検知が容易なため，積極的にイベントトリガー方式が採用される．

地震観測における収録開始などのイベントの判定には，レベルトリガー方式やSTA/LTAトリガー方式（たとえば，Stewart et al., 1971; Ambuter and Solomon, 1974; 卜部・平田，1984）がよく用いられている．これらの方式について，以下に簡単に原理を記す．レベルトリガー方式は，地震計出力の振幅がある閾値を超えた時に収録を開始するというものである．STA/LTAトリガー方式についてはIIIで詳しく述べるが，これは地震計出力の短時間平均（STA）と長時間平均（LTA）の比がある閾値を超えた時に収録を開始するもので，入力信号の急激な変化を捉える方法である．この両者を比較すると，レベルトリガー方式では，地震動を記録しつつ変動する背景ノイズにより収録条件を満たさないような閾値の設定を行わなければならないが，STA/LTA方式では，背景ノイズの変動に追従してLTAが変化することで，安定した収録判定を行える特長があるとされてきた．

2003年十勝沖地震(M_{JMA}8.0)の際には，札幌市内で稼動していた各機関の計30点以上の強震観測点のほとんどにおいて記録が得られた．これらの観測点の大半ではイベントトリガー方式による収録を行っていた．札幌では，震度4～5弱を記録し，最大加速度で1 m/s^{2}を，最大速度で0.3 m/sを超える記録が得られた（吉田・笹谷，2005）．また，最大余震（M 7.1）が本震から約1時間余り後に発生し，札幌周辺では最大速度は本震よりやや小さかったものの，震度，最大加速度は本震とほぼ同じ程度の値が観測され，やはりほとんどの強震観測点で記録が得られた．

その一方で，収録が行われなかった強震観測点がいくつかあった．これら収録に失敗した観測点ではSTA/LTAトリガー方式によるイベントトリガー収録を行っていた．前後の状況から，地震時に観測機器は正常に動作していたと推定される．つまり，収録が行われなかった観測点では，震度4にもかかわらず収録開始の条件が成立しなかったと考えるのが妥当である．通常は震度1程度で収録を開始するよう設定されている観測点で，なぜ震度4という大きな揺れにもかかわらず収録が開始されなかったかを検討することは，今後強震観測を行ってゆくうえで重要である．

本稿では，本震および最大余震時の強震観測の状況を簡単に整理し，札幌市内の観測点で収録された3つの地震の地震動記録についてSTA/LTA比の値を検討する．そして，条件によっては，比較的強い揺れにおいても，STA/LTA比が十分大きな値にならずに収録条件を満たさないことがあることを示す．

II. 強震記録の取得状況

我々は，石狩平野北部の厚い堆積層が地震動に与える影響を調べる目的で，札幌市内に1996年

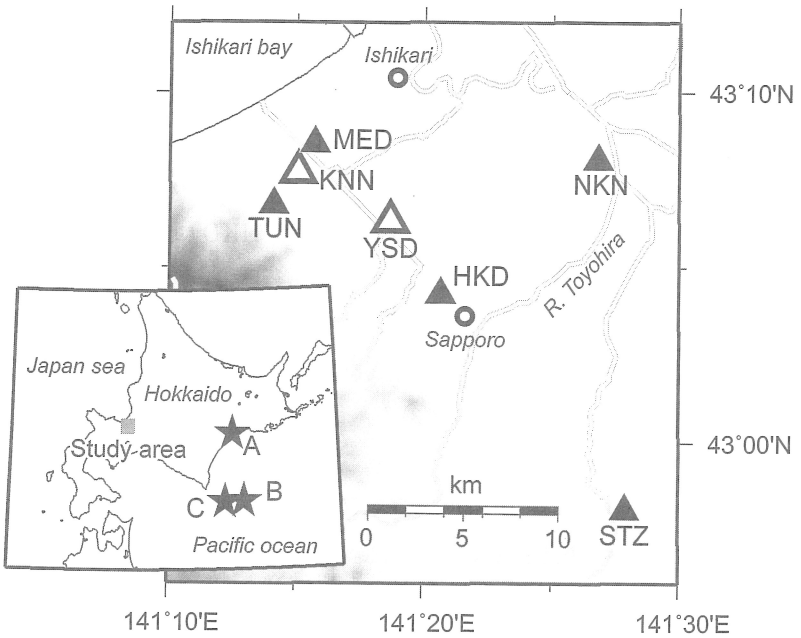

Fig. 1. Map showing seismic observing stations used in this study. Solid triangles show the strong-motion stations which have obtained records of the 2003 Tokachi-oki main shock and its largest aftershock. Open triangles show the strong motion stations which didn't have obtained records of the events. Solid stars in the map inset show the epicenters used in this study. A; 1999 May 13 event (M6.4), B; the 2003 Tokachi-oki earthquake (M8.0), C; the largest aftershock of the 2003 Tokachi-oki earthquake (M7.1).

から強震計を展開し，観測を行ってきた．この観測網のうち，十勝沖地震の発生した 2003 年 9 月 26 日には，7 点の強震観測点が稼動していた (Fig. 1)．これらの観測点のうち，HKD，KNN，TUN, YSD ではイベントトリガー収録を行っていた．イベントトリガー収録を行っている観測点では，常時地動を監視し，地動があらかじめ設定した条件（収録条件）を満たした時に地震と判定し，地震動を記録するように設計されている．また，MED，NKN，STZ では連続収録を行っていた．これらの観測点の概要と収録状況を Table 1 にまとめた．

十勝沖地震では，MED，NKN，STZ，TUN の 4 観測点で本震および最大余震の地震動記録を得ることができた．このうち，TUN では STA/LTA トリガー方式によるイベントトリガー収録を行い，記録を得ることができた．データの得られた観測点のうち，新第三紀火山岩上に位置す

Table 1. Trigger list of our strong-motion stations. Trigger algorithm is also shown.

Station	Trigger algorithm	2003 Tokachi-oki Main shock	2003 Tokachi-oki the Largest aftershock	1999 Tokachi-nambu
HKD	Level	Triggered	(Memory full)	Triggered
TUN	STA/LTA	Triggered	Triggered	Triggered
KNN	STA/LTA	Triggered	Not triggered	Triggered
YSD	STA/LTA	Not triggered	Not triggered	Triggered

るTUN観測点で観測された上下動の最大加速度は0.29 m/s² であった．最も大きな振幅であったSTZでの水平動の最大加速度は，1.1 m/s² で，最大速度は0.24 m/sであった．この他，第四紀の堆積層上にある観測点での最大加速度は1 m/s² 程度であった．

一方，YSDでは本震および最大余震で，KNN，HKDでは最大余震で記録が得られなかった．HKDでは，記録容量の小さなロガーを用いていたため，最大余震の時点で既に記録容量一杯のデータが蓄積されており，この地震の記録を行えなかった．HKDには速度計（東京測振VS-1）が設置されており，レベルトリガー方式により収録判定を行っていた．YSD，KNNの2観測点では，記憶容量に余裕があったが収録を開始していなかった．これら2観測点は住宅街中にあり，収録判定にTUNと同じSTA/LTAトリガー方式を採用していた．これらの観測点のセンサーには，YSDでは加速度計（旧アカシJEP-6 A 3）を，また，KNNでは速度計（東京測振VSE-11/12）を用いていた．

記録の得られなかった3点のうち，YSDおよびKNNでは，地震時に機器自体は正常に動作していたが，収録が行われなかったと推定される．地震後（YSDでは9月26日午後，KNNでは10月16日）にデータ回収を行った際には，データロガーは正常に動作していた．また，本震の後，データ回収を行うまでの間にも人工的なノイズの記録は行われていた．センサーにも特に異常は見られず，停電等も発生していなかった．これらのことから，収録が行われなかった理由は，震度4の地震動であったが収録条件が成立しなかったためと考えられる．

Ⅲ．STA/LTAトリガー方式による地震の検出

十勝沖地震で収録を開始しなかったYSDとKNN，および記録の得られたTUNでは，データ収録装置として白山工業LS-8000 WDを用い，上下動成分のデータからStewart et al.（1971）に準じたSTA/LTAトリガー方式によるイベントトリガーによる収録を行っていた．この方法は微小地震観測などでは広く使われており，比較的安定した収録判定を行うことができるとされる実績のある方法である．具体的な手順は，永易・山本（1998）に述べられているが，以下に概要を示す．

まず，時刻iにおける観測値y_iから，LS-8000 WDの設定パラメータHipassで指定する値i_hだけ前の時刻の値$i-i_h$を引き，ある種の階差

$$x_j = y_j - y_{j-i_h} \tag{1}$$

を求める．ここで，$j=i\cdot i_l$であり，(1)の計算は，サンプリング間隔からLS-8000 WDの設定パラメータLowpassで指定した値i_lごとの間隔に間引いて行う．この操作はハイパスフィルターに相当する．次に，求めたx_jから，短時間平均（STA）と長時間平均（LTA）の値をそれぞれ

$$\mathrm{STA} = 1/N_S \sum_{k=1}^{N_S} |x_{j-k}| \tag{2}$$

$$\mathrm{LTA}=1/N_L\sum_{k=1}^{N_L}|x_{j-k}| \tag{3}$$

として求める．ここで，N_S，N_LはSTA，LTAそれぞれを計算するウィンドウ長を示す．間引いた間隔 i_lごとにSTA，LTAの値を求め，STA/LTAの比の値を計算し，STA/LTA比が予め設定した閾値を，設定した回数以上連続して超えた時に地震と判定し，収録を開始する．

YSDやKNN，TUNでは，P波の到達の検出を狙って，上下動成分の記録に対し，STA/LTAトリガーを用いた収録判定を行っていた．これらの観測点では，トリガー計算に用いる短時間平均(STA)と長時間平均(LTA)のそれぞれの長さを1.28秒，10.24秒として，4サンプリング毎に計算し，STA/LTA比が3を4回連続で超えたときを収録開始の条件としていた．なお，YSDとTUNでは加速度計による観測であったので，前処理として(簡易な方法で)積分し，速度波形としてから収録判定を行っていた．この方法は，1996年以降我々が行ってきた強震観測においても比較的取りこぼしが少なく，良い収録判定の方法と思われていた．

ところが，十勝沖地震の震源近傍で発生した地震を札幌で観測する状況では，STA/LTA比を用いた収録判定方法は収録条件を満たしにくいらしく，YSDでは十勝沖地震の本震や最大余震だけではなく，それ以外の多くの余震についても，収録開始の条件を通常用いられる条件から大幅に変えるまで収録をほとんど始めなかった．KNNにおいても，他の場所で起きた地震に比べ，余震はあまり収録されなかった．ただし，TUNでは多くの余震の収録が行われているので，連続収録によるMEDの記録とあわせて，IVで詳しい検討を行う．

IV．2003年十勝沖地震の記録とトリガー方式

1．実際の強震記録におけるSTA/LTA方式によるトリガー状況

札幌市内で十勝沖地震の際に観測された強震記録をもとにSTA/LTA比の値を計算し，その値の挙動を検討する．札幌北西部では，YSDやKNNの比較的近くに位置する強震観測点であるMEDやTUNで十勝沖地震の記録が得られている．MEDやTUNでは，センサーにYSDと同じ種類の加速度計(旧アカシJEP-6 A 3)を用いて観測を行っていた．それぞれの観測点の位置関係はFig. 1に示されている．

MED，TUN，KNN，YSDの全観測点で収録の行われた1999年5月13日十勝支庁南部の地震(M 6.4，深さ約104 km，震央距離約200 km)と，十勝沖地震の本震(2003年9月26日M 8.0)および最大余震(2003年9月26日M 7.1)の地震記録それぞれについてSTA，LTA，STA/LTA比の時刻歴を計算した．これらの値の計算で必要な，IIIで述べられたパラメータには，十勝沖地震の際にYSDやKNNで設定されていたものを用いた．計算したSTA，LTA，STA/LTA比の値と，観測波形と比較したものをFigs. 2～4に示す．震央位置はFig. 1に示されている．ロガーにはトリガー時刻が残されていないため，実際のトリガー時刻は明らかではないが，STA/LTAトリガーによる収録開始の条件はおおむね図中の閾値の線（STA/LTA＝3）を越えた時刻に成立する．なお，積分処理の方法がデータロガーで用いている方法と異なるため，ここで示した

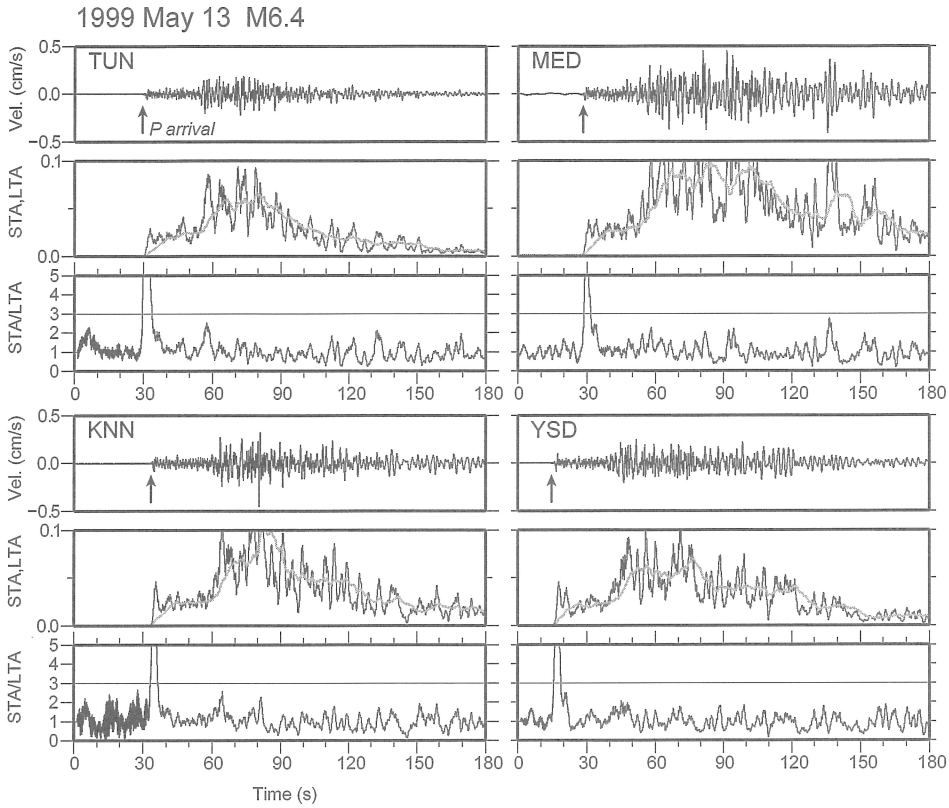

Fig. 2. Comparison of STA/LTA ratios of the records taken at MED, TUN, KNN and YSD during the Tokachi-nambu earthquake (1999 May 13, M6.4). Upper of each panel shows velocity waveforms of U-D component. An arrow below the waveform indicates P-wave arrival. Middle of each panel shows STA (solid line) and LTA (gray line) values. Lower of each panel shows STA/LTA ratios. Trigger level at TUN, YSD and KNN (STA/LTA=3) is shown by horizontal lines in the STA/LTA panels.

STA, LTA の値は，データロガーで実際の観測時に計算された値と多少の差があるが，以下の議論に影響を与えるほどではない．また，全期間の KNN と 1999 年の YSD では速度計により観測していたので，これに該当する記録に関しては，前処理の積分を行っていない．

最初に 1999 年十勝支庁南部の地震に対する STA/LTA 比の挙動を検討する (Fig. 2)．この地震の場合，どの観測点においても，P 波到達前は STA/LTA 比が 1 前後である．記録波形の P 波初動の立ち上がりは極めて明瞭であり，P 波の到達と同時に STA/LTA 比は 7 前後まで増大し，P 波の到達が的確に検出されている．その後，10 秒ほどで元のレベルに戻って行く．このような時は，STA/LTA トリガー方式による収録判定が効果的である．ただし，P 波の到達から 30 秒ほど後に S 波が到達し，地震動の振幅が大きくなっているが，これに対して STA/LTA 比の変化は小さいことに注目すべきである．これは，S 波では全く収録条件を満たさないことを示している．

2003 年十勝沖地震の本震の場合 (Fig. 3) には，P 波到達前における STA/LTA 比はやはり 1 前後であったものが，KNN や TUN では P 波到達後に 5 を超える．ところが，MED では，P 波

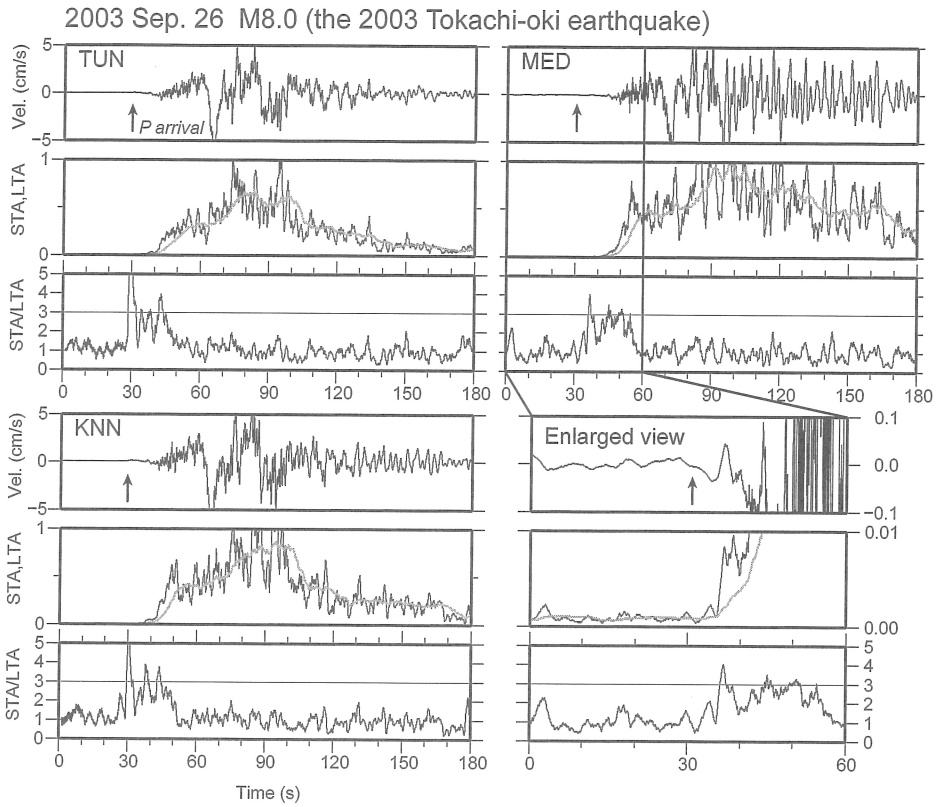

Fig. 3. Comparison of STA/LTA ratios of the records taken at MED, TUN and KNN during the 2003 Tokachi-oki earthquake (2003 Sep. 26, M8.0). Same format as Fig. 2. The initial part of the record at MED is enlarged in the lower-right panel.

初動の振幅がやや小さいことを反映して，STA/LTA 比は 4 前後までは増大するものの，1999 年の地震（Fig. 2）ほどには大きくならない．P 波到達以降徐々に振幅が大きくなるが，1999 年の地震の場合に比べ，STA の増加がゆっくりである．このため，STA が増加する間に LTA も増加し，STA/LTA 比はせいぜい 4 前後に留まっている（Fig. 3 の拡大図参）．そしてどの観測点においても 20 秒ほどで元のレベルに戻って行く．この後，S 波や表面波などが到達しても，特に STA/LTA 比は変化せず，1～2 前後を維持したままである．

2003 年十勝沖地震の最大余震（M 7.1）では P 波到達後，STA/LTA 比は MED，TUN 共に 3 をわずかに超える程度までしか増加しない（Fig. 4）．この地震の直前に発生した別の余震（震源は十勝沖，深さ 58 km，M 4.9，気象庁カタログより）のため，STA，LTA の値は最大余震の P 波到達前に既に大きな値を示している（Fig. 4 の拡大図参）．このため，振幅のそれほど大きくない P 波初動が到達しても，MED，TUN ともに STA の増加は相対的に小さく，STA/LTA 比はあまり大きくならない．TUN では他の観測点に比べノイズレベルが小さいため，直前に発生した余震で収録条件を満たして収録を開始し，そのまま最大余震についても収録を行っているが，そ

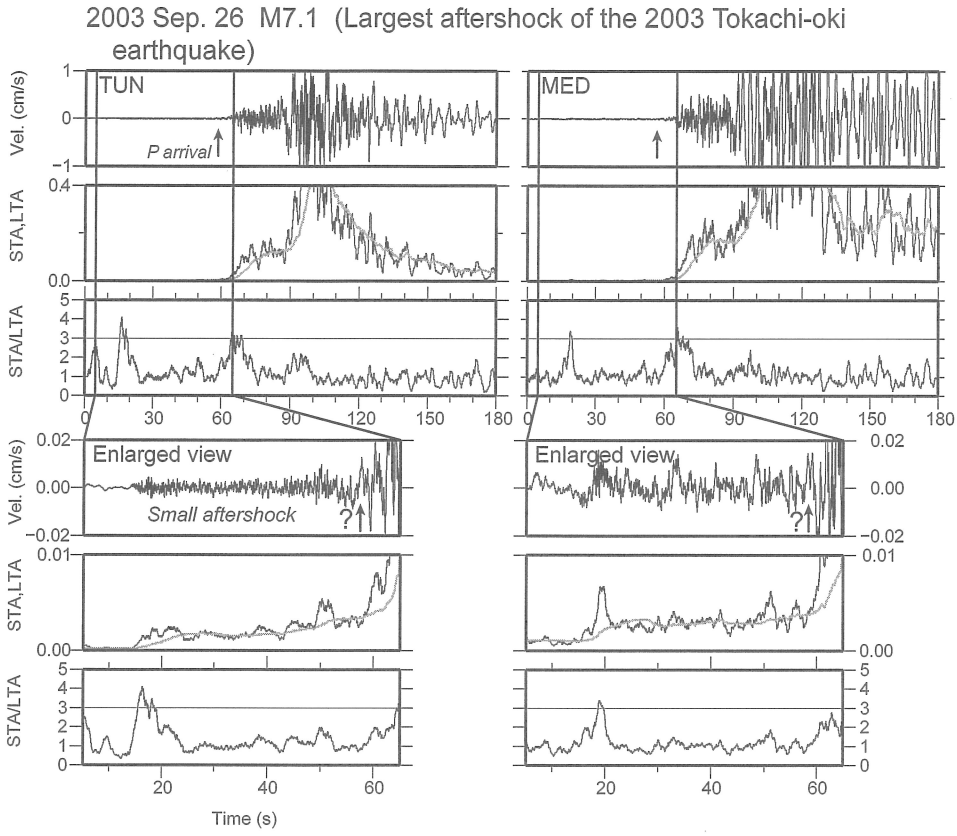

Fig. 4. Comparison of STA/LTA ratios of the records taken at MED and TUN during the largest aftershock of the 2003 Tokachi-oki earthquake (2003 Sep. 26, M7.1). Upper panels are same format as Fig. 2. The initial parts of the records are enlarged in the lower panels. Note that P arrival of the largest aftershock is ambiguous due to a small preceding aftershock. TUN's recorder is triggered by the small aftershock.

うでなければ記録が得られなかった可能性すらある．

P 波波形の形状そのものの他に，YSD や KNN では道路のそばに観測点が位置しているので，到達した P 波が交通ノイズに埋もれていた可能性が考えられる．このような場合，P 波到達以前から STA，LTA の値が共に大きいため，振幅の小さな P 波の到達では STA の変化が相対的に小さく，STA/LTA 比の変化が小さかったことも考えられる．一方，TUN のように比較的ノイズレベルの小さい観測点では，P 波到達以前の STA や LTA は小さい．このような観測点では，P 波の到達による STA の増加は相対的に大きくなり，P 波到達とともに STA/LTA 比が十分大きい値を示す．

交通ノイズと同じように，直前に地震が発生した 2003 年 9 月 26 日最大余震 (M 7.1) では，直前の地震のコーダ波に最大余震の直達 P 波が埋もれていた (Fig. 4)．TUN や MED の記録では，直前の地震の影響で，最大余震の P 波直前の STA, LTA の値は，本震の P 波直前の STA, LTA

の値よりも数倍大きな値を示していた．KNNでは堆積盆地上の観測点であり，堆積盆地構造の影響で後続波が励起，増幅される現象がある（吉田，2004）ので，直前の地震によって励起された後続波の振幅はTUNよりも大きいことが考えられる．これが，最大余震のP波検出に大きな影響を与えた可能性がある（データが得られていないので，断定はできない）．

このようなことから，十勝沖地震の本震や最大余震でYSDやKNNにおいて収録が行われなかった原因は，トリガーアルゴリズムにあると考えて良さそうである．1999年十勝支庁南部の地震のように，P波初動が明瞭な立ち上がりを持っている記録に対しては，STA/LTAトリガーアルゴリズムは効果的に働き，全観測点で記録が得られている．しかし，2003年十勝沖地震のような，P波初動の明瞭な読み取りが難しい記録に対しては，収録条件を満たさない可能性がある．観測点ごとにSTA/LTA比の値にばらつきがあることを考えれば，YSDやKNNで収録条件を満たさなかったとしても，それほど不思議ではない．さらに，STA/LTAトリガーアルゴリズムの性質として，S波などのP波に続く波にほとんど反応しないため，P波で収録条件を満たさなければ，最大振幅が大きくても最後まで記録が得られないことになる．収録条件の満たしやすさは，イベントごとの違いが支配的に見えることから，入射波の条件によるといえる．観測点固有の問題としては，ノイズの影響の問題も考慮に入れる必要がある．

この現象は，トリガーアルゴリズムの動作原理から，LS-8000 WD固有の問題ではなく，STA/LTA比を用いた単点トリガーシステム一般の問題であると考えられる．LS-8000 WDと多少異なる観測システムにおいても，STAがゆっくりと大きくなる場合，LTAも合わせて大きくなるため，STA/LTA比が大きくならない現象は同様に起きる可能性がある．

2．強震記録で用いるべきトリガーアルゴリズム

2003年十勝沖地震においてP波初動の振幅が小さいのは，震源の破壊過程の複雑さ（例えばYamanaka and Kikuchi, 2003, Honda et al., 2004, Horikawa, 2004, Koketsu et al., 2004, Yagi, 2004）を反映していることが原因の一つとして挙げられる．例えば，Yamanaka and Kikuchi (2003)は，破壊開始点とすべりの大きな領域が20～50 km離れていることを示しており，これがP波初動の小さな振幅として反映されている．他の研究においても，破壊開始点とすべり最大の領域の中心は15 km（Yagi, 2004）～50 km（Koketsu et al., 2004）程度離れ，最大すべり領域に破壊が到達するまで数秒～数十秒かかるという結果が得られている．

一般に地震の震源過程は2003年十勝沖地震に限らず複雑である．観測条件によっては，伝播経路の影響も受けることも推測され，今回，札幌で観測されたP波初動の不明瞭な立ち上がりは特殊なものではないと思われる．したがって，収録条件の設定に際しては，P波初動は時として不明瞭であることも想定する必要がある．

強震観測では，振幅の大きな地震動は逃さず収録を行いたい．その上で，メモリーや伝送系の容量が許す限り小さな地震についても収録を行えれば，研究上都合が良い．また，交通ノイズなどの地震以外の振動は除外できれば，地震動だけを効率よく集めることができる．STA/LTAト

リガー方式は，背景ノイズのレベルの変化に強いが，P 波初動が不明瞭な強震動を（背景ノイズレベルの変化と誤認して）取り逃がす危険もある．トリガーパラメータの設定次第では十勝沖地震を確実に捕らえることができるかもしれないが，それは他の問題（例えば，人工ノイズでも収録しやすくなるなど）を引き起こす可能性もある．レベルトリガー方式で強震動を取り逃がすことは考えにくいが，観測点によっては人工ノイズを避けるよう厳しい収録条件を設定すると，逆に小さな地震は全く記録されない．これは，機器の故障に気づきにくくなるなどの欠点にもつながる．

強震観測に目標を絞るならば，強震動の地動振幅は通常の都市ノイズよりも十分大きいので，収録判定にはレベルトリガー方式を用いるか，あるいは STA/LTA トリガー方式とレベルトリガー方式を併用する方がよさそうである．LTA は交通ノイズのようなパルス状の信号には鈍感であるが，大地震では確実に大きな値となるので，LTA がある閾値を超えたら収録を開始する，というある種のレベルトリガー方式を併用する方法もありそうである．もちろん，記録装置や伝送系の容量に余裕がある場合には，連続記録の取得が最も確実であることは言うまでもない．

V．ま　と　め

我々は STA/LTA トリガー方式に関して，2003 年十勝沖地震の際の石狩平野北部の記録を対象に STA/LTA 比の値を検証し，このトリガー方式は大振幅の入力があっても必ずしも収録条件を満たすわけではないことを示した．この地震では，石狩平野北部では震度 4 程度で，多くの観測点で記録が得られた．しかし，機器は正常に動作していたと思われるにもかかわらず記録の得られなかった強震観測点があった．この原因として収録判定の方法に問題があったのではないかと考えられるので，収録判定に用いる STA/LTA 比の値を，記録の得られた観測点の強震記録を用いて検討した．その結果，STA/LTA トリガー方式による収録判定では，P 波初動の振幅が小さく，その後ゆっくりと振幅が大きくなった場合，収録条件を満たさないことがあることが判明した．さらに，P 波初動の後，S 波などで徐々に振幅が大きくなっても，それは STA/LTA 比にはほとんど影響を与えず，収録条件がほとんど満たされないことがわかった．この結果として，札幌市内の 2 点の観測点で十勝沖地震とその最大余震の収録が行われなかったと考えられる．STA/LTA 比による収録判定を用いた観測点で確実に強震記録を得るためには，数値実験などにより上手な収録開始条件の設定を探すか，他の収録判定法を併用するなどの対策の必要がある．

謝辞　観測点の設置にあたっては札幌稲雲高校と今野重信氏に協力していただいた．また観測にあたっては，北海道大学大学院理学研究科　一柳昌義氏や多くの当時の大学院生の協力を頂いた．記して感謝します．図の作成には GMT (Wessel and Smith, 1991) を利用しました．

文　献

Ambuter, B. P., and S. C. Solomon, 1974. An event-recording system for monitoring small earthquakes, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **64**, 1181−1188.

Honda, R., S. Aoi, N. Morikawa, H. Sekiguchi, T. Kunugi and H. Fujiwara, 2004. Ground motion and rupture process of the 2003 Tokachi-oki earthquake obtained from strong motion data of K-NET and KiK-net, *Earth Planets Space*, **56**, 317−322.

Horikawa, H., 2004. Fault geometry and slip distribution of the 2003 Tokachi-oki earthquake as deduced from teleseismic body waves, *Earth Planets Space*, **56**, 1011−1017.

Koketsu, K., K. Hikima, S. Miyazaki and S. Ide, 2004. Joint inversion of strong motion and geodetic data for the source process of the 2003 Tokachi-oki, Hokkaido, earthquake, *Earth Planets Space*, **56**, 329−334.

永易功・山本肇，1998．LS-8000 WDの基本性能，機動強震アレイ観測のための小型強震計の製作と観測・解析マニュアルの製作，平成7～9年度科学研究費補助金［基盤研究（A）；代表者: 工藤一嘉］研究成果報告書，35−42.

Stewart, S. W., W. H. K. Lee and J. P. Eaton, 1971. Location and Real-time Detection of Microearthquakes along the San Andreas Fault System in Central California, *Bull. Roy. Soc. New Zealand*, **9**, 205−209.

卜部卓・平田直，1984．ミニコンピュータによる，長時間海底地震記録テープの自動再生処理システム，地震2，**37**，633−645.

Wessel, P., and W. H. F. Smith, 1991. Free software helps map and display data, *EOS Trans. Am. Geophys. Union*, **72**, 441.

Yagi, Y., 2004. Source rupture process of the 2003 Tokachi-oki earthquake determined by joint inversion of teleseismic body wave and strong ground motion data, *Earth Planets Space*, **56**, 311−316.

Yamanaka, Y., and M. Kikuchi, 2003. Source process of the recurrent Tokachi-oki earthquake on September 26, 2003, inferred from teleseismic body waves, *Earth Planets Space*, **55**, e21−e24.

吉田邦一，2004．堆積盆地の地震応答に関する研究　―石狩平野北部地域を例として―，北海道大学博士論文，155 pp.

吉田邦一・笹谷努，2005．石狩平野北西部における2003年十勝沖地震時の長周期地震動，地震2，**58**，107−113.