



Title	ウェーブレット変換の地震エコー記録への適用とその効果
Author(s)	山下, 晴之; 渡邊, 朋典; 森谷, 武男 他
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 73, 257-268
Issue Date	2010-03-19
DOI	https://doi.org/10.14943/gbhu.73.257
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/44479
Type	departmental bulletin paper
File Information	73_23_p257-268.pdf



ウェーブレット変換の地震エコー記録への適用とその効果

山下 晴之・渡邊 朋典・森谷 武男・茂木 透

北海道大学大学院理学研究院附属地震火山研究観測センター

(2010 年 1 月 8 日受理)

Application of wavelet transform to EQ-echo records and its effect

Haruyuki YAMASHITA, Tomonori WATANABE, Takeo MORIYA and Toru MOGI

Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Hokkaido University

(Received January 8, 2010)

Anomalous VHF-band radio-wave propagation beyond the line of sight prior to earthquakes has been observed since 2002 in Hokkaido area. These records of the propagation have been collected as variations of electric field, and they include not only EQ-echoes which are shown as anomalous upward rapid drifts associated with an impending earthquake but also other transient signals and high frequency noises. It is not appropriate to apply the Fourier transform to such rapid variations because transient local changes in time domain data are transformed into the overall feature in frequency domain. In contrast, the wavelet transform suppresses this influence of transform by means of expansion and contraction of a mother wavelet. In this study, we applied band-pass filtering with the wavelet transform to reduce steady noise. As a result, we could distinguish components of high frequency noise and intensity variation relating to EQ-echoes. It improves the estimate of edge intervals of EQ-echoes. Furthermore, by the frequency analysis for the EQ-echoes associated with large earthquakes in Hokkaido, we found that high frequency components were attenuating in the EQ-echo especially in case of the southern Rumoi sub-prefecture earthquake (M 6.1) of 2004. This type of EQ-echoes may be characterized as long-distance propagation.

I. は じ め に

地震に先行して、VHF 帯の電波が見通し外に伝播する現象が報告されている (Kushida and Kushida, 1998, 2002; 森谷・他, 2005, 2009). Kushida and Kushida (1998) では、その原因として、地震前に電離層に電子密度変化が起こり VHF 帯の電波を散乱させる可能性を指摘した。これらの研究を受け、近年多くの科学者により、このような地震に先行して観測される VHF 帯電波の散乱波についての研究が行われてきた。一方、Fukumoto et al. (2002) は、アンテナを

地面に対し低角に設置すると散乱波の受信強度が増大することから、散乱体が電離層よりも低い対流圏～成層圏に存在することを示唆した。Hayakawa et al. (2006) は、異なる 2 方向へ向けた水平アンテナによる VHF 帯に含まれる FM 放送波観測を行い、散乱波の受信強度の比からその到来方向を推定し、概ね震央方向を向くことを示し、震源近傍に散乱体が存在することを示唆した。さらに、Fujiwara et al. (2004) では、地震前に放送波のない周波数を受信していた受信機が常に何も受信していなかったことを挙げて、これらの異常な FM 放送波は自然界のノイズとは関係ないことを示した。森谷・他 (2005) は、北海道・日高地域で観測される散乱波の異常伝播継続時間と、関係する地震のマグニチュードや最大震度との間に定量的な関係があることを示した。さらに、森谷・他 (2009) では、観測された散乱波の偏波角が直達波に比べほぼ直角に回転していることを示し、電磁氣的物性にコントラストをもつ散乱体による散乱を示唆した。このように、地震に先行する異常伝播に関する観測的研究は多数行われてきたが、観測された記録をさらに詳しく解析する研究はこれまであまり行われていない。観測された記録には、散乱波あるいは散乱体の情報を含んでいる可能性がある。そこで本研究では、受信記録波形の周波数特性について、近年北海道で発生した規模の大きな地震に先行して観測された VHF 帯電波の異常伝播記録について調べた。なお、本研究では地震に先行する VHF 帯電波異常伝播波形を森谷・他 (2005) にならって「地震エコー」と呼ぶ。

II. ウェーブレット変換による地震エコーの解析

本研究で用いるデータは、FM 放送局から発信された電波を見通し外の場所に置いたラジオにより観測されたものである。通常の FM 放送受信用ラジオでは、電波の強度は出力されないのので、これを改造して狭帯域の電界強度を観測できるようにした。強度変化は受信波を整流後、直流電圧変動として記録される。従って、ここで扱う受信波形記録はこのような包絡線近似した電界強度変化記録である。

一般に、時系列データの周波数解析にはフーリエ変換が用いられている。しかし、我々の VHF 帯電波観測データにおいては、地震エコーが急激に変動する性質が見られ、さらに人工ノイズによるランジェントな信号が多く混在する。このようなデータにフーリエ変換を適用すると、時間領域での局所的性質がスペクトル領域での全体的な性質に変換されてしまうため、逆変換しても元の波形の特徴を再現することは難しい。一方、このような問題点を克服するために近年注目されているウェーブレット変換では、信号平面上において、不確定性原理による信号の時間的広がりや周波数の広がりとの間のトレードオフの関係をマザーウェーブレットの縮小によって効率化することができ、信号のランジェントな変動に対して時間・スケールの両領域で局所的な影響に抑えることができる (Farge, 1992)。また、連続ウェーブレット変換には常に逆変換が存在するため、元の時系列データの再構成が可能である。連続ウェーブレット変換は非直交変換であるため完全な再構成ではないが、コンピュータの丸め誤差程度に抑えることができると

言われている (Farge, 1992). さらに, 過剰完全性という性質を利用し, 任意のスケールを使用し, フィルタ出力が可能である. 本報告では, このウェーブレット変換を VHF 帯異常伝播データに対して適用することを試みた.

ウェーブレット変換に使用するマザーウェーブレットは, 信号の性質や解析の目的によって選ばれる. VHF 帯異常伝播データはトランジェントな変動を多く含むため, 時間・スケール領域での高い局在性が必要である. 本研究では, これを満たすものとして Morlet ウェーブレット (Morlet et al., 1982 a) を使用した. Morlet ウェーブレットは, 指数関数 $e^{i\omega t}$ を基底関数とし, それに時間・周波数局在性に最も優れるとされるガウス関数窓を乗じたものとして, 次式で表される.

$$\Psi_0(t) = \pi^{-1/4} e^{i\omega_0 t} e^{-t^2/2} \quad (1)$$

ここで, t は無次元の時刻を表すパラメータであり, ω_0 は無次元の角周波数を表す. また, ウェーブレット係数から元の時系列信号を再構成する際には, 全体的性質に変換されたトランジェント成分が再構成後のデータに反映されにくい δ 関数による再構成を行うことにする.

時系列データ $f(t)$ の連続ウェーブレット変換は, マザーウェーブレット $\Psi_0(t)$ の時間スケールの伸縮, さらに時間中心をシフトしたたくさんの振動成分の畳み込みとして, 次式で定義される.

$$Wf(b, a) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) a^{-1/2} \overline{\Psi\left[\frac{t-b}{a}\right]} dt \quad (2)$$

あるいは,

$$Wf(b, a) = \langle f, \Psi_{b,a} \rangle \quad (3)$$

と表される. ここで, a と b はそれぞれ $\Psi_0(t)$ の伸縮, 時間方向のシフト量を表し, $\overline{\Psi}$ は Ψ の複素共役を意味する. $a^{-1/2}$ は正規化のための係数である.

重ね合わせの原理により, ウェーブレット変換はフーリエ空間において次式で表される.

$$Wf(b, a) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \widehat{f}(\omega) \overline{\widehat{\Psi}_{b,a}(\omega)} e^{ib\omega} d\omega \quad (4)$$

ここで, $\widehat{f}(\omega)$, $\widehat{\Psi}(\omega)$ はそれぞれ $f(\omega)$, $\Psi(\omega)$ のフーリエ変換である. (4)式により, 高速フーリエ変換 (FFT) を利用して, 各スケール a における全てのデータ点のウェーブレット変換を同時に効率よく行うことができる (Torrence and Compo, 1998).

ウェーブレットのスケールとフーリエ周波数の関係は必ずしも対応しないが, Morlet ウェーブレットは指数関数 $e^{i\omega t}$ を基底関数に含むため, 両者の関係は単純に定義される (Meyers et al., 1993).

$$a = \frac{\omega_0 + \sqrt{2 + \omega_0^2}}{2\omega} \quad (5)$$

ここで、 a はスケールを表し、 ω はそれに応じたフーリエ周波数である。

連続ウェーブレット変換を用いた場合、その過剰完全性により任意のスケールにおけるスペクトルの計算が可能になる。ここでは、原田（2004）に従い、次のように2の整数乗で得られるスケールを更に小分割することにより、希望するスケール分解能を得る（Torrence and Compo, 1998）。

$$a = a_0 2^{jd_j} \quad (j=0, 1, \dots, J) \quad (6)$$

$$j = \frac{\log_2(Nd_t/a_0)}{d_j} \quad (7)$$

ここで、 j はスケールインデックスを表し、 J は分解可能な最大のスケール数を与える。 d_t , d_j はそれぞれ、サンプリング間隔、スケール間隔を与えるパラメータである。 d_j はマザーウェーブレットのスペクトル領域でのバンド幅を考慮して決められ、 d_j が小さいほどスケール分解能が高くなる。また、 a_0 は分解可能な最小スケールであり、対応するフーリエ周波数が近似的に $2dt$ になるように選ばれる。ここでは、 $d_1=1/2$ とする。一方、ウェーブレット逆変換は次式で定義される（Farge, 1992; Meyers et al., 1993）。

$$f(t) = c_\psi^{-1} \int_0^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} a^{-2} Wf(b, a) \Psi_{b,a}(t) db da \quad (8)$$

ここで、 c_ψ は $\|\hat{\Psi}(\omega)\|^2 \omega^{-1}$ を全周波数にわたり積分したもので、マザーウェーブレットに固有でスケールに非依存な定数である。 $\hat{\cdot}$ はフーリエ変換を表す。この逆変換式が成り立つためには、マザーウェーブレット $\Psi_0(t)$ が次式で表されるアドミッシブル条件を満たす必要がある。

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \Psi_0(t) dt = 0 \quad (9)$$

これは、 $\Psi_0(t)$ が有限の時間 t において十分に減衰し、時間平均がゼロとなることを意味する。

連続ウェーブレット変換の逆変換の場合、時間およびスケール領域での過剰完全性の影響を考慮する必要があるが、一方でこの過剰完全性により、マザーウェーブレットとは異なる関数を使用しての再構成が可能となる（Farge, 1992; Torrence and Compo, 1998）。ここでは、 δ 関数による再構成法を使用する。この方法では、ウェーブレット係数の実部 $\text{Re}\{Wf(b, a)\}$ を全スケールにわたり積分することで、元の時系列データを再構成される。

$$f(t) = \frac{d_j d_t^{1/2}}{C_\delta \Psi_0(0)} \sum_{j=0}^J \frac{\text{Re}\{Wf(b, a)\}}{a^{1/2}} \quad (10)$$

ここで、 a はスケールを表し、 J は分解可能な最大のスケール数を与える。 d_t と d_j はそれぞれ、

サンプリング間隔, スケール間隔である. $a^{1/2}$ は全てのウェーブレット変換が同じ L^2 ノルムを持つように正規化する. $\Psi_0(0)$, C_δ はマザーウェーブレットに固有な定数であり, Morlet ウェーブレットについてはそれぞれ $\pi^{-1/4}$, 0.776 である (Torrence and Commpo, 1998).

再構成の際に任意のスケールのみを使用した再構成が可能であり, これを利用することによりバンドパスフィルタ処理が可能となる. (6)式におけるスケールインデックス j を利用して, スケール j_1, j_2 間を通過バンドとすると, この間のスケールに対する再構成は, (10)式より

$$f_{bpf}(t) = \frac{d_j d_t^{1/2}}{C_\delta \Psi_0(0)} \sum_{j=j_1}^{j_2} \frac{\text{Re}\{Wf(b, a)\}}{a^{1/2}} \quad (11)$$

で表される.

連続ウェーブレット変換の積分区間は (8) 式のように $(-\infty, +\infty)$ で定義されるが, 実際の時系列データは有限の長さを持つため, データの始点と終点での不連続の影響を受け, 両端のある区間においてスペクトルの推定に誤差が生じる (いわゆるエッジ効果). ウェーブレット関数の幅はスケールに依存することから, エッジ効果が問題となる区間長はスケールに応じて変化し, $\sqrt{2a}$ で与えられる (Torrence and Commpo, 1998).

本研究では, 解析プログラムとして, 原田 (2004) による連続ウェーブレット変換のフォートラン・コードを使用し, 上述の Morlet ウェーブレットを用いた連続ウェーブレット変換, および δ 関数を用いた時系列データの再構成を行った. 連続ウェーブレット変換により時系列の長さ分だけのスペクトル値 (ウェーブレット係数) が推定される. このコードでは, 入力可能な最大データ点数は 52,000 点であり, サンプリング間隔とスケール間隔は任意で設定することができる. 出力ファイルは 2 種類あり, ひとつは, 実部・虚部のウェーブレット係数とパワースペクトルの時間変化を格納したもので, ファイル数はスケールの数だけあり, 最大で 89 個までである.

もうひとつは, 実部・虚部のウェーブレット係数とパワースペクトルの平均値が格納されたものである. パワースペクトル平均値の算出の際には, 両端のスケールの 3 倍のデータ区間を棄却することでエッジ効果の影響が避けられ, また, スケール間隔により各スケールに対応する周期も算出される.

III. バンドパス・フィルタリングによる定常的ノイズの分離

VHF 帯電波の異常伝播記録には, 高周波の電界強度変動がノイズとして含まれており, このノイズの電界強度は, 定常状態では 1 db 程度であるが, 地磁気活動が激しい時には 10 db 程度に達する事がある. 電界強度入力とラジオ出力の特性曲線の非線形性 (森谷・他, 2005) により, これらのノイズは, 通常は電界強度入力が高いほど大きく増幅されてしまうので, 仮に地震エコーとノイズ双方の電界強度入力が重なって入力された場合, ノイズの振幅は地震エコーが観測されてない定常時のそれに比べて大きくなる. このことは, 地震エコーの検出や, その継続時間

を判断するためのエッジの判定の障害になる場合がある．そこで，全観測記録に対して，(11)式のバンドパス・フィルタリングを利用し，定常的なノイズを含む高周波成分の分離処理を行った．ここでは，地震エコー継続時間は経験的に数分以上である事を考慮し，カットオフ周期を1分とした．

Fig. 1 は，えりも観測点（ERM）にある受信装置に記録された広尾放送局（HOO）から発信された 83.8 MHz の FM 放送波の電界強度変化である．この後，2004 年 11 月 13 日まで地震エコーが見られ，11 月 27 日に十勝支庁南部で M5.6 の地震が発生した．ここでは，計算機への負荷を抑えるために，データのサンプリング間隔を4秒とし，さらに，スケール解像度は1/2としたため，カットオフ周期1分に相当するスケールはスケール9である．定常的なノイズ成分が高周波成分として分離されており，6時と21時に現われる波形の特徴が明確になっている．これらの定常的な高周波ノイズはスケール11（周期66秒）あたりまで見る事ができ，スケールが小さいほど振幅も大きい．

IV. 2004 年留萌支庁南部地震エコーで見られた特徴

2004 年 12 月 14 日に留萌支庁南部を震源とした M6.1 の地震が起こった（以下留萌地震と呼ぶ）．この地震に先行して，11 月 29 日からえりも観測点（ERM）で広尾放送局と同じ周波数

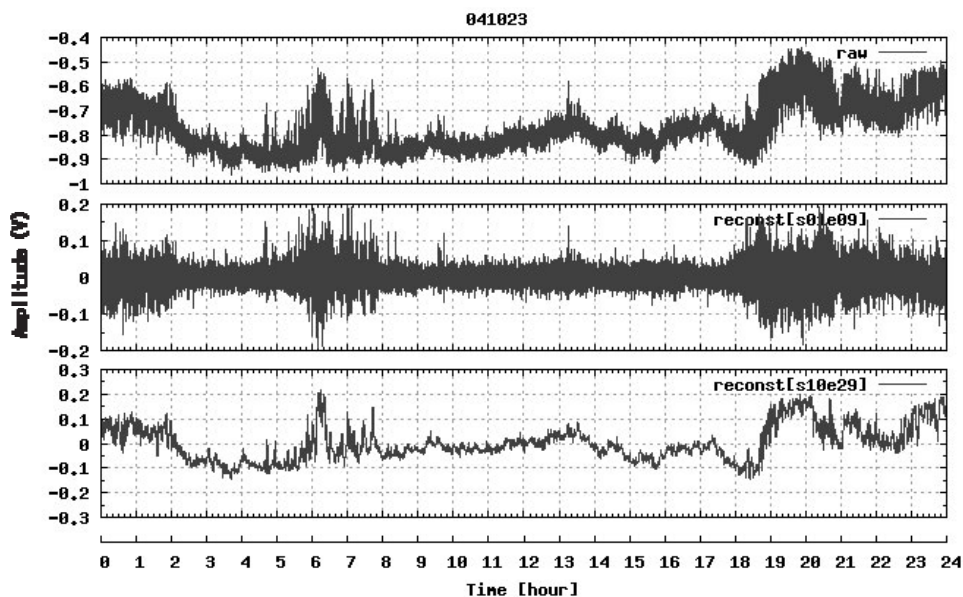


Fig. 1. An example of band-pass filtering. The top panel shows the raw data observed at Erimo (ERM) observation site on 23 October. The middle shows the reconstructed data with scale 1 to 9, that is, the data include period from 4 to 66 sec. The bottom shows the reconstructed data with scales of 10 to 29, that is, the data includes components at period from 93 to 67701 sec. High frequency components are distinguished

83.8 MHz の異常伝播を観測している 2 つのチャンネルに地震エコーが観測され始めた．道内では遠軽局と羽幌局が広尾局と同じ周波数であり，実際には震源に近い羽幌放送局の放波を受信していたと思われる（森谷・他，2005）．ERM では受信装置の ch 3 と ch 5 でこの広尾局と同じ周波数の電波異常を監視しており，ch 3 は東向き，ch 5 は西北西向きのアンテナに接続されている．ふだん ch 3 では日高山脈直下で発生する地震に感度が高く，逆に ch 5 は広尾放送局と反対の方向を向いており，アンテナの指向性より日高山脈の地震に対しては異常が現れない．Fig. 2 は 11 月 25 日からの 5 日間の観測データをプロットした．12 月 19 日に日高山脈直下で M 4.5 の地震が起こっており，これに対する地震エコーは 12 月 14 日の留萌地震に対するエコーと重なっている可能性がある．赤で囲まれた部分は ch 3 のみに現れる日高山脈の地震に対する地震エコーであり，青で囲まれた部分は双方のチャンネルに異常があるため留萌地震に対するエコーであると推測できる．ch 3 と ch 5 両方に地震エコーが観測された全時間は約 6500 分であり，森谷・他（2009）で得られたマグニチュードと全伝播異常観測時間との関係

$$\text{Log}_{10}(Te) = 1.06M - 2.89 \quad (12)$$

をほぼ満たしている（ただし， Te は異常継続時間(単位：分)， M はマグニチュードである）．

一方，日高山脈での地震発生の 12 月 19 日まで，ch 3 だけで観測された全伝播異常観測時間は

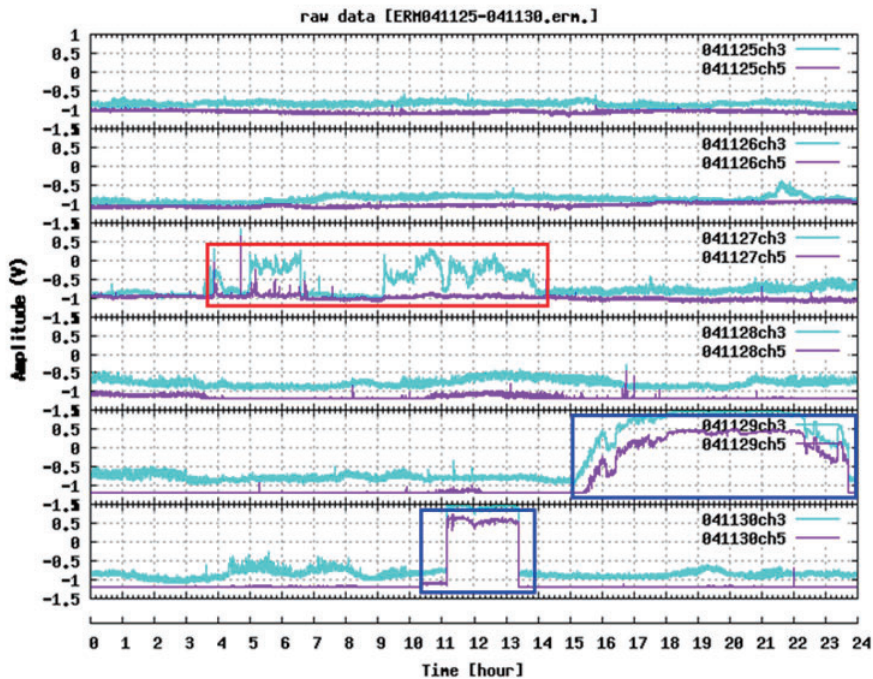


Fig. 2. An Example record of EQ-echoes observed at ERM at the period of 25-30 in November, 2004. The red box shows the EQ echoes associated with the Hidaka earthquake (M 4.5) which occurred on 19 December beneath Hidaka Mountains. The blue boxes show the EQ echoes associated with the Rumoi earthquake (M 6.1) which occurred on 14 December in the southern Rumoi sub-prefecture.

約 600 分を越えており、(12)式によると予想マグニチュードは 5.3 となるので、これは実際より大きい。しかし、ch 5 の記録は一部ベースライン以下に変化しているので、本来双方のチャンネルで観測されたものを、ch 3 だけで観測された記録として過剰に算定している可能性がある。森谷・他 (2005) では、地震エコーが見られなくなってから地震が発生するケースが多いが、留萌地震のエコーに関しては 12 月 14 日の地震発生後も度々観測され、12 月 24 日まで続いた。Fig. 3 は縦軸をスケール、横軸を時間とし、ウェーブレット変換後の各スケールのパワースペクトルの日平均値を示したものである。これからも、高いスケール（長い周期）において、地震の前後の 11 月 27 日から 12 月 24 日までに $100V/\sqrt{\text{Hz}}$ 以上の大きな値を取っていることがわかる。

留萌地震のエコーを見ると、オフセット状に強度が変化した時の高周波変動が小さくなっている事がある。この事は、波形にウェーブレット変換を用いて、各スケールの高周波成分に着目するとより明瞭に現われる。Fig. 4 は、12 月 13 日の記録であるが、これよりオフセット状変化時に明らかに高周波成分が減衰している事がわかる。通常使われているラジオでは、森谷・他 (2005) で示されている入出力特性により、高いデジベルでの電界強度入力はさらに増幅されるので、オフセット時に乗る変動は強くなるはずである。また、Fig. 5 は、観測点のアンテナ近傍で、トランスミッターを用いて人工的に発生させた電波を受信した時の波形であるが、通常はこのようなオフセット時にはノイズが増幅される。このことから、オフセット時に見られた高周波成分の減衰は、ラジオの特性によるものではなく、地震エコーそのものが持つ特徴と考えられる。

さらに留萌地震のエコーでは、森谷・他 (2005) で述べられているオフセット状に立ち上がる

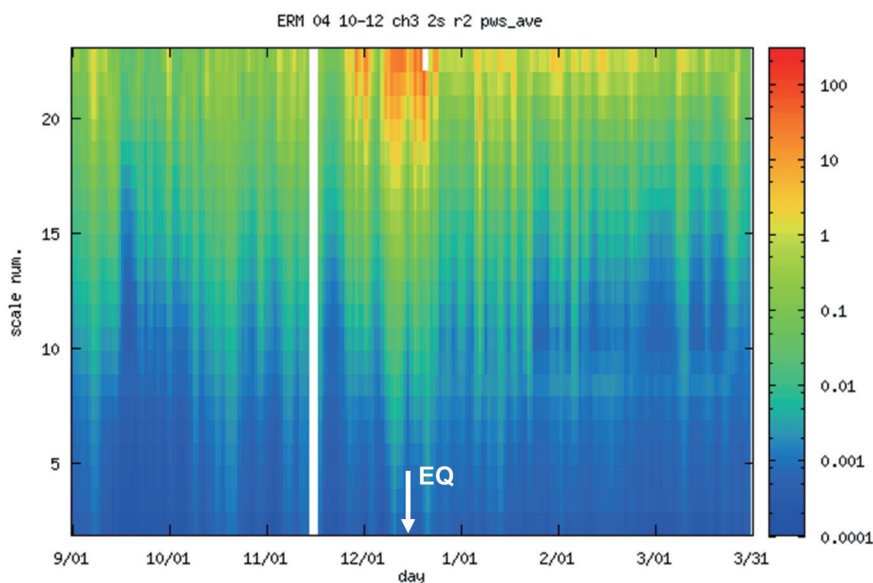


Fig. 3. Running spectrum of intensity variation of VHF band radio waves from September 2004 to March 2005. The EQ-echoes associated with the Rumoi earthquake are recognized as higher power values in higher scales (longer period) from 27 November to 21 December.

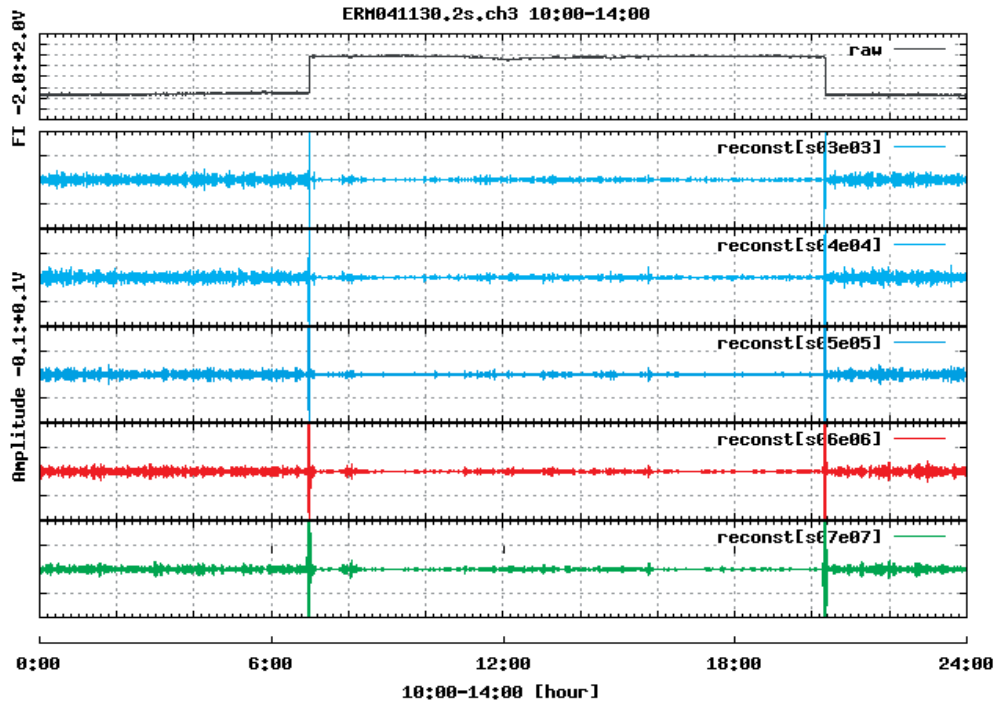


Fig. 4. Attenuation of high-frequency components during the EQ-echo (Top) observed at ERM on 30 November. Other panels show the reconstructed data (scale 3-7) at high frequency components.

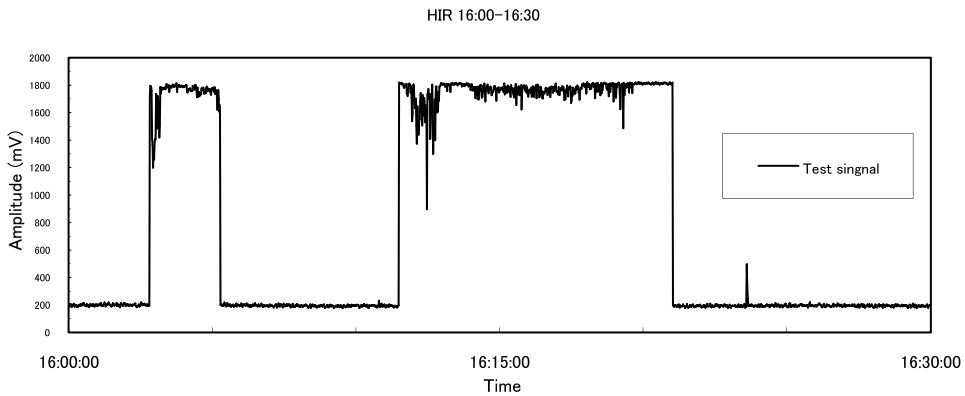


Fig. 5. Test-EQ-echo intentionally transmitted by an artificial radio source. High-frequency components are amplified in signals than other data.

異常だけでなく、比較的に立ち上がりがゆっくりとしている異常もみられた。これらの異常においても高周波成分の減衰が見られ、さらにこの波形について、縦軸をスケール、横軸を時間としたランニングスペクトルを取ると、ゆっくりとした立ち上がりを反映するかのよう、徐々に大きいスケールに減衰が伝播して見えてくる (Fig. 6)。この地震に対応する全地

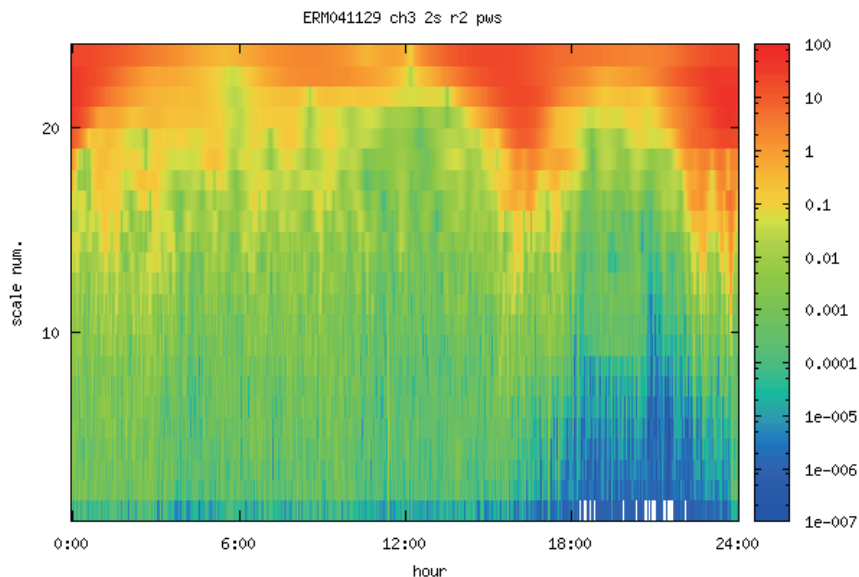


Fig. 6. Running spectrum for EQ-echoes observed at ERM on 29 November. Lower power values ($<0.0001 \text{ V}/\sqrt{\text{Hz}}$) appeared at small scales in EQ-echoes time spectrum similar to wave form shown in Fig. 2.

震エコーの90%以上において、これらの特徴がみられたが、日高山脈で発生する地震に対する地震エコーの場合はこの傾向は見られないため、地震エコー時の高周波ノイズの減衰は、散乱波が比較的長い距離を伝播してくる場合の特徴かもしれない。

V. ま と め

本報告では、ウェーブレット変換を用いた周波数解析、ノイズフィルタリングをVHF帯電波伝播異常記録に適用し、地震エコーの周波数特性について議論した。この方法による高周波ノイズフィルタリングは、継続時間推定の精度を上げるために、ノイズに埋もれてしまったシグナルの始端や終端を明確にするのに有効であるだけでなく、オフセット時の受信強度の振幅評価における精度を上げるのにも有効である。VHF帯電波は人工電波であるため、電波発信局の出力と受信観測点での電界強度の比較より、大気中の電波減衰率を仮定した上で伝播距離の推定をすることができる。複数の発信局の電波が観測された場合、これにより散乱体の位置が特定できる可能性がある。しかし、地震エコーのオフセット時にノイズが乗ってしまうと、ラジオの入出力特性より増幅されてしまい、電界強度の比較が困難になる。このことから、オフセット時のノイズ除去は散乱体位置の推定をする上で非常に重要である。

一方、連続ウェーブレット変換の問題点として、波群内の1つのサンプルが複数個の変換結果へ影響してしまうことによる多重評価が指摘されており、これは定量的データ変換として妥当ではない性質と指摘されている(松林, 2007)。このことは、時系列上の1つの波の時間幅が大きい場合、内積計算の範囲がシフトして通り過ぎるまで内積計算の対象となるため、変換前のパワーの情報が保存されなくなってしまうという性質を有することを意味する。本研究で行われたノイズフィルタリングもこの問題に起因する誤変換を含んでいる可能性がある。ノイズに埋もれたシグナルを明瞭にする目的では、この問題は大きな影響を及ぼさないが、受信強度の振幅評価をする上では大きな問題となるため、この多重評価問題を解決可能なマッチング・メイエ追跡法(松林, 2007)などの手法が有効であろう。

周波数解析では、留萌地震のエコーにおいて高周波成分減衰がみられた例を挙げた。ゆっくりとした立ち上がりの地震エコーにおいては、受信電界強度が大きくなるにつれて、大きなスケールにも減衰が伝播していく様子も見られた。この現象は、留萌地震に限ったもので、他の地震のエコーでは殆ど現われない。これらが何を表しているかは定かではないが、比較的長い距離を伝播してきた電波の特徴かもしれない。しかし、留萌地方の地震で地震エコーが観測された事例は他になく、さらなるデータの蓄積と解析が必要である。一方では、高周波成分を安易に単なるノイズとして分離してしまうと、散乱体に関する情報を失わせてしまう可能性がある。地震エコーはある観測点において、地震が予想される域の近傍、もしくはその方角にある放送局をターゲットにしたチャンネルにだけ現われ、複数のチャンネルには現われない。この性質より、高周波成分を各成分で再構成し、各チャンネル同士でその相関が高いものはノイズと断定して問題がないだろう。そのためには全てのチャンネルにおいて同一のラジオを使い、チャンネルごとの特性を揃えることが望ましい。

地震エコーは、受信電界強度波形の立ち上がりと終わりが急なステップ型になるのが一般的であり、ノイズが少ない観測点ならば地震エコーの分別は目視によるもので十分であるが、ノイズが多い場合は地震エコーが高周波の変動に埋もれてしまう可能性もある。また、異常継続時間が数秒の地震エコーの場合は目視による分別は難しいことがある。これらの問題を解決するために、このようなステップ状の波形の検出に対しては、マザーウェーブレットに矩形状のメキシカンハットを用いることも有効であろう。

謝辞 本研究を進めるにあたり、原田誠氏(東海大学)にウェーブレット変換コードを提供して頂きました。ここに記して深く感謝致します。

文 献

- Frage, M., 1992. Wavelet Transform and Their Application to Turbulence, *Annu. Rev. Fluid. Mech.*, **130**, 395-457
Fujiwara, H., M. Kamogawa, M. Ikeda, J. Y. Liu, H. Sakata, Y. I. Chen, H. Ofuruton, S. Muramatsu, Y. J. Chuo and Y. H. Ohtsuki, 2004. Atmospheric anomalies observed during earthquake occurrences, *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L17110.

- Fukumoto, Y., M. Hayakawa and H. Yasuda, 2002. Reception of over-horizon FM signals associated with earthquakes, *Seismo Electromagnetics Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling* Edited by M. Hayakawa and Molchanov, 263-266.
- 原田誠, 2004. インターステーション応答関数法による ULF 帯電磁場データの信号弁別に関する研究, 千葉大学学位申請論文.
- Hayakawa, M., K. Ohta, S. Maekawa, T. Yamauchi, Y. Ida, T. Gotoh, N. Yonaiguch, H. Sasaki and T. Nakamura, 2006. Electromagnetic precursors to the 2004 Mid-Niigata Prefecture earthquake, *Physics and Chemistry of the Earth*, **31**, 356-364.
- Kushida, Y. and R. Kushida, 1998. On the possibility of earthquake forecast by radio observation in the VHF band, *RIKEN Review*, **19**, 1-13.
- Kushida, K. and R. Kushida, 2002. Possibility of earthquake forecast by radio observation in the VHF band, *J. Atmos. Electr.*, **22**, 3, 239-255.
- 松林弘智, 2007. 波形形状を考慮したウェーブレット変換法の開発—複素メイエマッティング追跡法—, 物理探査, **60**, 4, 283-295.
- Meyers, S. D., B. G. Kellym and J. J. O'Brien, 1993. An Introduction to Wavelet Analysis in Oceanography and Meteorology: With Application to the Dispersion of Yanai Waves, *Mon. Wea. Rev.*, **121**, 2858-2866.
- Morlet, J., G. Arens, E. Fourgeau and D. Giard, 1982 a. Wave Propagation and Sampling Theory-Part I: Complex Signal and Scattering in Multilayered Media, *Geophysics*, **47**, 2, 203-221.
- Morlet, J., G. Arens, E. Fourgeau and D. Giard, 1982 b. Wave Propagation and Sampling Theory-Part II: Sampling Theory and Complex Waves, *Geophysics*, **47**, 2, 222-236.
- 森谷武男・茂木透・高田真秀・笠原稔, 2005. 地震の前に観測される VHF 散乱波の観測的研究 (I), 北海道大学地球物理学研究報告, **68**, 161-178.
- 森谷武男・茂木透・高田真秀, 2009. 地震に先行する VHF 帯 散乱波の観測的研究 (II), 北海道大学地球物理学研究報告, **72**, 269-285.
- Torrence, C. and G.P. Compo, 1998. A Practical Guide Wavelet Analysis, *Bull. Ame. Met. Soc.*, **79**, 1, 61-77.