

最適重みつきスタッキング法による最大 SN 比アクロス受信信号の取得

長尾 大道 中島 崇裕 熊澤 峰夫 國友 孝洋

核燃料サイクル開発機構 東濃地科学センター

Optimum Weighted Stacking Method for Received Signals in ACROSS

Hiromichi Nagao Takahiro Nakajima Mineo Kumazawa Takahiro Kunitomo

Tono Geoscience Center, Japan Nuclear Cycle Development Institute

1. はじめに

小川と熊澤（1996）によって提唱されたアクロス（ACROSS: Accurately Controlled Routinely Operated Signal System）は、振幅および位相を精密に制御した電磁波や弾性波による人工信号を送受信し、送受信点間の周波数領域における伝達関数を解析することによって、地下のスタティックな構造および構造の時間変化を推定しようというものである。得られた送受信点間の伝達関数は、存否イベント解析法を用いて波の走時や減衰の情報を抽出し、地下構造の推定に用いる（Hasada *et al.*, 2001; Yokoyama *et al.*, 2002）。より大きな SN 比を持つ伝達関数を得るために、アクロスでは送信装置や送信技術（例えば、Kunitomo *et al.*, 1998; 中島ら, 2000）、送信信号の設計法（横山ら, 2000）、受信信号のスタッキング処理（例えば、熊澤ら, 1995）等に工夫を行っている。アクロスの概論については、熊澤ら（2000）にまとめられている。

アクロスでは、時間的に連続に得られる受信信号を「セグメント」と呼ぶある単位時間区間に区切ってスタッキングを行う。アクロス信号の繰り返し周期の整数倍の時間をセグメントの時間長さにとると、1 セグメントのデータを Fourier 変換したとき、アクロス信号が存在する周波数と存在しない周波数が現われる。我々は前者を「シグナルチャンネル」、後者を「ノイズチャンネル」と呼んでいる。24 時間連続観測を行うアクロスの場合、受信信号に含まれるノイズレベルの時間変動を考慮せずに単純にスタッキングを行うと、ノイズレベルの大きいデータ（例えば、昼間のデータ）をスタッキングしたときにスタックデータの SN 比が大きくなって下ってしまう。長尾ら（2003）は、受信信号のスタッキング処理法としてノイズレベルの 2 乗に反比例する重みを各セグメントにかけてスタッキングする最適重みつきスタッキング法を導入することにより、どんなに大きなノイズレベルを持つセグメントをスタッキングしても、スタックデータの SN 比が決して下がらないことを Lagrange の未定乗数法を用いて理論的に示した。また、重みを決めるために必要なシグナルチャンネルに含まれるノイズレベルの推定法として、シグナルチャンネル近傍のノイズチャンネルにおける振幅スペクトルの二乗平均平方根を用いることを提案した。

本論文では、長尾ら（2003）の理論をさらに強化する。観測期間中にシグナルレベルが時間変化しないという仮定の下では、特に「スタッキングする」という仮定をしなくても、シグナルレベルの推定法として最適重みつきスタッキング法が最も良いことを、最尤法を用いて示す。また、シグナルチャンネルに含まれるノイズレベルの推定法としては、シグナルチャンネル近傍のノイズチャンネルにおける振幅スペクトルが周波数に依存しないという仮定の下では、その振幅スペクトルの二乗平均平方根が最も良いことを、最尤法を用いて理論的に導出する。さらに、岐阜県東濃地域で 1 年以上にわたって行われている電磁波・弾性波アクロス送受信テストのデータを用いて、最適重みつきスタッキング法の効果を実証する。

2. 最適重みつきスタッキング法

2.1 シグナルレベルの最尤推定

アクロス観測によってセグメント M 個分のアクロス信号が取得できたとする。このとき、 m 番目のセグメント内の k 番目の周波数チャンネルの確率密度関数は、2 変数の正規分布

$$p_{mk}(z) = \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi n_{mk}^2}} \right)^2 \exp \left[-\frac{|z - s_{mk}|^2}{2n_{mk}^2} \right] \quad (1)$$

で与えられる。ただし、 s_{mk} 、 n_{mk} はそれぞれシグナルレベルおよびノイズレベルであり、スペクトルの実部と虚部に含まれるノイズレベルは等しいと仮定した。シグナルレベルに関しては、 k がノイズチャンネルである場合には、当然 $s_{mk} = 0$ である。さらにここでは、観測期間中においてはシグナルレベルは時間的に不変 (m に関して不変) であると仮定する。すなわち(1)式において $s_{mk} = s_k$ とおけば、確率密度関数は

$$p_{mk}(z) = \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi n_{mk}^2}} \right)^2 \exp \left[-\frac{|z - s_k|^2}{2n_{mk}^2} \right] \quad (2)$$

となる。このとき、 M 個のセグメントについての尤度関数は次式で与えられる。

$$L = \prod_{m=1}^M p_{mk}(z_{mk}) = \left(\frac{1}{2\pi} \right)^M \cdot \prod_{m=1}^M \frac{1}{n_{mk}^2} \cdot \exp \left[-\sum_{m=1}^M \frac{|z_{mk} - s_k|^2}{2n_{mk}^2} \right] \quad (3)$$

ただし、 z_{mk} はスペクトルの実現値である。これより、対数尤度関数を次のように計算できる。

$$\begin{aligned} \log L &= -M \log 2\pi - \sum_{m=1}^M \log n_{mk}^2 - \frac{1}{2} \sum_{m=1}^M \frac{|z_{mk} - s_k|^2}{n_{mk}^2} \\ &= -M \log 2\pi - \sum_{m=1}^M \log n_{mk}^2 - \frac{1}{2} \sum_{m=1}^M \frac{(z_{mk}^R - s_k^R)^2 + (z_{mk}^I - s_k^I)^2}{n_{mk}^2} \end{aligned} \quad (4)$$

ここで R および I は、それぞれ実部および虚部を表す。(4)式を最大にする $s_k = s_k^R + is_k^I$ を求めるために、

$$\frac{\partial \log L}{\partial s_k^R} = \sum_{m=1}^M \frac{z_{mk}^R - s_k^R}{n_{mk}^2} = 0, \quad \frac{\partial \log L}{\partial s_k^I} = \sum_{m=1}^M \frac{z_{mk}^I - s_k^I}{n_{mk}^2} = 0 \quad (5)$$

とおき、これを解くと、

$$s_k^R = \frac{\sum_{m=1}^M \frac{z_{mk}^R}{n_{mk}^2}}{\sum_{m=1}^M \frac{1}{n_{mk}^2}}, \quad s_k^I = \frac{\sum_{m=1}^M \frac{z_{mk}^I}{n_{mk}^2}}{\sum_{m=1}^M \frac{1}{n_{mk}^2}} \quad (6)$$

となる。すなわち、(4)式の対数尤度関数を最大にする最適な推定値として

$$s_k = \frac{\sum_{m=1}^M \frac{z_{mk}}{n_{mk}^2}}{\sum_{m=1}^M \frac{1}{n_{mk}^2}} \quad (7)$$

が得られる。これは、あるシグナルチャンネルにおけるシグナルレベルは、シグナルチャンネルに含まれるノイズレベルの2乗に反比例する重み

$$w_{mk} = \frac{1}{n_{mk}^2} / \sum_{m'=1}^M \frac{1}{n_{m'k}^2} \quad (8)$$

を各セグメントにかけてスタッキングして求めるのが最も良いことを示している。ここで、シグナルレベルの最適値を求めるために、「スタッキングする」という仮定をしなかったことに注意したい。(8)式の重みは、ノイズレベルが 0 または無限大といった非現実的な場合を除き、 $0 < w_{mk} < 1$ を満たすので、この最適重みつきスタッキング法によってスタックデータの SN 比は決して減少することはない、スタック回数とともに単調増加することが分かる。

2.2 シグナルチャンネルに含まれるノイズレベルの最尤推定

2.1 節で導出した最適重みつきスタッキング法を適用する際には、各セグメントにかける重みを決めるために、シグナルチャンネルに含まれるノイズレベルを推定しなければならない。しかし、シグナルチャンネル自身のみからこのノイズレベルを推定することはできない。長尾ら (2003) は、このノイズレベルの推定値として、シグナルチャンネル近傍のノイズチャンネルにおける振幅スペクトルの二乗平均平方根を提案した。ここではこれについての理論的正当性を、最尤法を用いて示す。あるノイズチャンネルにおける確率密度関数は、(2)式で $s_k = 0$ とおいた次式で与えられることが分かる。

$$p_{mk}(z) = \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi n_{mk}^2}} \right)^2 \exp \left[-\frac{|z|^2}{2n_{mk}^2} \right] \quad (9)$$

あるシグナルチャンネル k_0 に含まれるノイズレベルを推定するために、ここでは周波数が $k_0 - k' \leq k \leq k_0 + k'$ の範囲に含まれるノイズチャンネルを用いるものとする。このとき、尤度関数は

$$L = \prod_{k=k_0-k'}^{k_0+k'} p_{mk}(z_{mk}) = \left(\frac{1}{2\pi} \right)^{K'} \cdot \prod_{k=k_0-k'}^{k_0+k'} \frac{1}{n_{mk}^2} \cdot \exp \left[-\sum_{k=k_0-k'}^{k_0+k'} \frac{|z_{mk}|^2}{2n_{mk}^2} \right] \quad (10)$$

となる。ただし、 K' は用いるノイズチャンネルの個数であり、 \prod' および \sum' はシグナルチャンネルを除いてノイズチャンネルに関する積と和をとることを表す。(10)式より、対数尤度関数を以下のように計算できる。

$$\log L = -K' \log 2\pi - \sum_{k=k_0-k'}^{k_0+k'} \log n_{mk}^2 - \frac{1}{2} \sum_{k=k_0-k'}^{k_0+k'} \frac{|z_{mk}|^2}{n_{mk}^2} \quad (11)$$

ここでノイズレベル n_{mk} に対し、周波数依存性をもつモデル $n_{mk} = n_m(k; \theta)$ (θ はモデルパラメータ) を与える。(11)式に代入し、最適なモデルパラメータを求めるために $\partial \log L / \partial \theta = 0$ とおいて整理すると、

$$\sum_{k=k_0-k'}^{k_0+k'} \left[\frac{|z_{mk}|^2}{n_m(k; \theta)^3} - \frac{2}{n_m(k; \theta)} \right] \frac{\partial n_m(k; \theta)}{\partial \theta} = 0 \quad (12)$$

となる。この式は一般に非線形であり、最適解を求めるためには数値計算に頼る必要がある。セグメントの個数が多い場合にはこの数値計算に要する計算時間が膨大となるため、あまり現実的ではない。そこで、ここではノイズレベルが周波数に依存しない最も簡単なモデル $n_{mk} = n_m$ を採用する。この場合には、(12)式は解析的に解け、シグナルチャンネルにおけるノイズレベルの最適な推定値として

$$n_m = \sqrt{\frac{1}{2K'} \sum_{k=k_0-k'}^{k_0+k'} |z_{mk}|^2} \quad (13)$$

が得られる。すなわち、シグナルチャンネルに含まれるノイズレベルは、近傍のノイズチャンネルにおける振幅スペクトルの二乗平均平方根の $1/\sqrt{2}$ 倍で推定すれば良い。スペクトルには実部および虚部があることを考慮すれば、振幅スペクトル領域におけるノイズレベルは(13)式の $\sqrt{2}$ 倍で推定すれば良いことが分かる。これで長尾ら (2003) が提案した、「シグナルチャンネルに含まれるノイズレベルを近傍のノイズチャンネルにおける振幅スペクトルの二乗平均平方根で推定する」ことの理論的根拠が示された。

なお、ノイズレベルの推定のために用いるノイズチャンネルの幅 k' については、現在の統計学の範疇では最適な値を求めることができない。異なる k' の値に対する尤度関数の比較ができないからである。

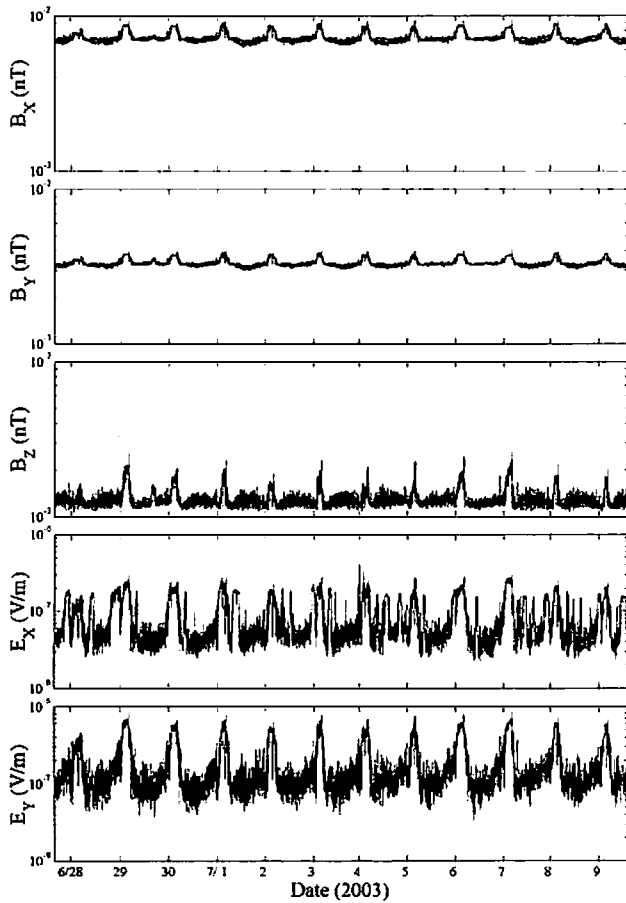
3. 最適重みつきスタッキング法のアクロスデータへの適用

岐阜県東濃地域において 2002 年から 1 年以上にわたり、アクロス送受信テストを行っている。東濃鉦山より電磁波および弾性波アクロス信号を送信し、電磁波信号は正馬様用地に設置された電磁場受信点で、弾性波信号は正馬様用地に設置された地震計アレイや防災科学技術研究所の高感度地震観測網 Hi-net で観測されている。ここでは、正馬様用地で得られた電磁波アクロス信号および Hi-net で得られた弾性波アクロス信号に対し、最適重みつきスタッキング法を適用した結果について述べる。

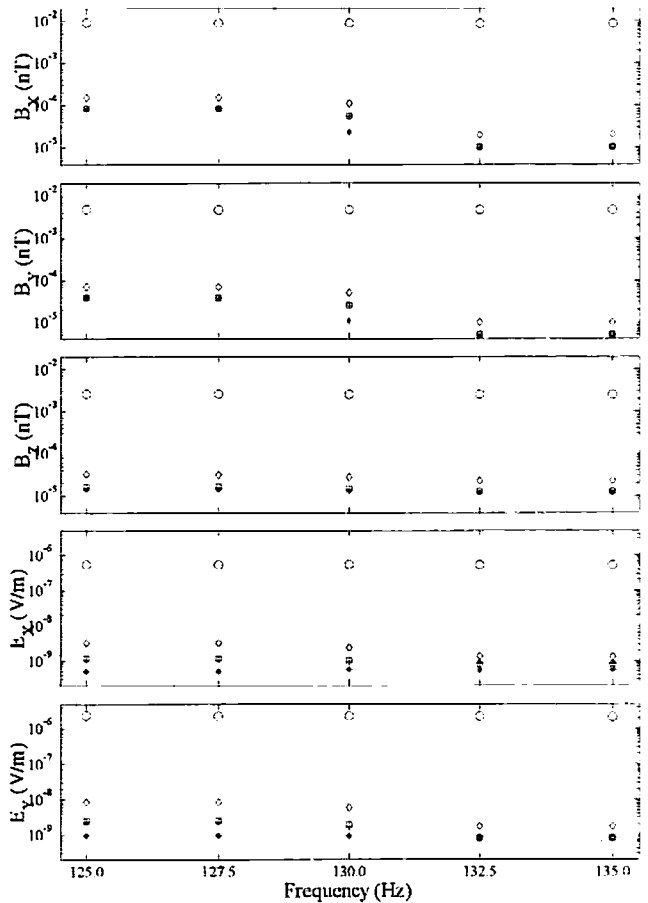
3.1 電磁アクロステスト観測データへの適用

電磁アクロス送受信テストでは、東濃鉦山に設置されたダイポールモーメント約 400Am の電流ダイポールから、125.0、127.5、130.0、132.5、135.0Hz の 5 つの正弦波を重ね合わせた電磁アクロス信号を送信し、受信点の正馬様用地では磁場 3 成分および電場 2 成分を観測している (中島ら, 2004)。送受信距離は 700m 程度であり、ニアフィールド領域となる。本論文では、2003 年 6 月 27 日 16 時から 7 月 9 日 16 時までの 12 日間に得られた 1kHz サンプリングの電磁アクロス受信データを用いる。スペクトル上でノイズ評価を行うために、まず得られたデータを 100 秒ごとのセグメントに区切って Fourier 変換を行い、そして各セグメントのシグナルチャンネルに含まれるノイズレベルを 2.2 節の方法を用いて推定した。シグナルチャンネルの一つである 125.0Hz に含まれるノイズレベルを推定したものを、第 1 図に示す。シグナルチャンネルに含まれるノイズレベルを評価するために用いるノイズチャンネルとしては、シグナルチャンネルの近傍 ± 1 Hz に含まれるもの (200 チャンネル) を用いた。すべての電磁場成分においてノイズレベルの明瞭な日周変化が見られ、夜間のノイズレベルは昼間の数倍程度であることが分かる。正馬様用地におけるこの周波数領域では、電磁探査の通常の常識とは異なり、夜間の方が昼間よりもノイズレベルが大きくなっている。このようなノイズレベルの時間変化を考慮せずに単純にスタッキングを行うと、スタックデータの SN 比を下げてしまうことは容易に想像がつく。

次に、従来の単純な平均操作によるスタッキング法 (以下、単純スタッキング法)、午前 0~6 時の夜間データのみを用いたスタッキング法 (夜間スタッキング法)、セグメント内の最大振幅の逆数を重みとするスタッキング法 (逆数重みつきスタッキング法)、および最適重みつきスタッキング法の 4 種類のスタッキング法により、12 日間分のセグメントを全てスタッキングし、比較を行った。夜間スタッキング法は、ノイズレベ



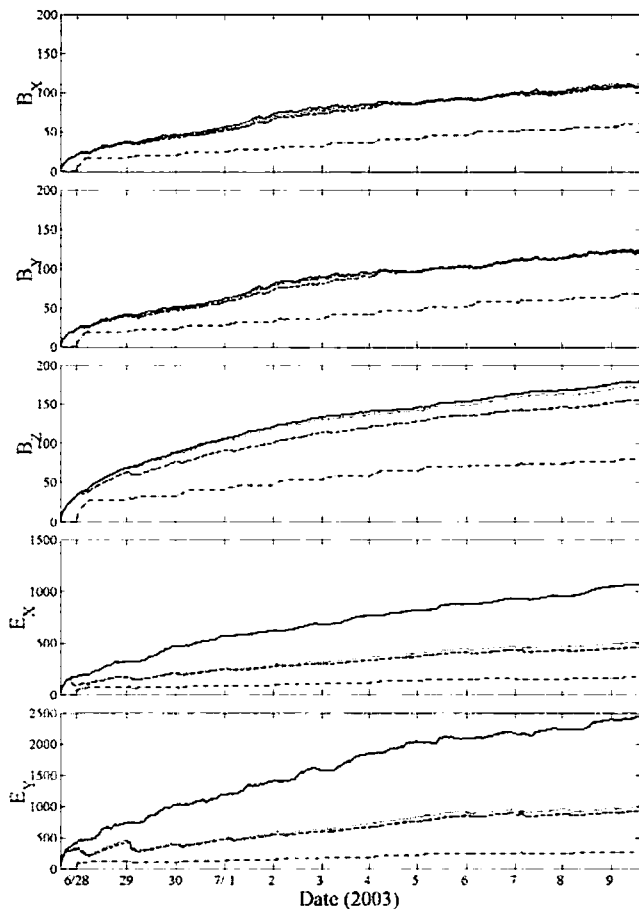
第 1 図: 正馬様用地で得られた 125.0Hz (電磁アクロス信号のシグナルチャンネル) における電磁場ノイズレベルの時間変動。受信信号を 100 秒ごとのセグメントに区切り、2.2 節で述べたノイズレベル推定法で求めた。



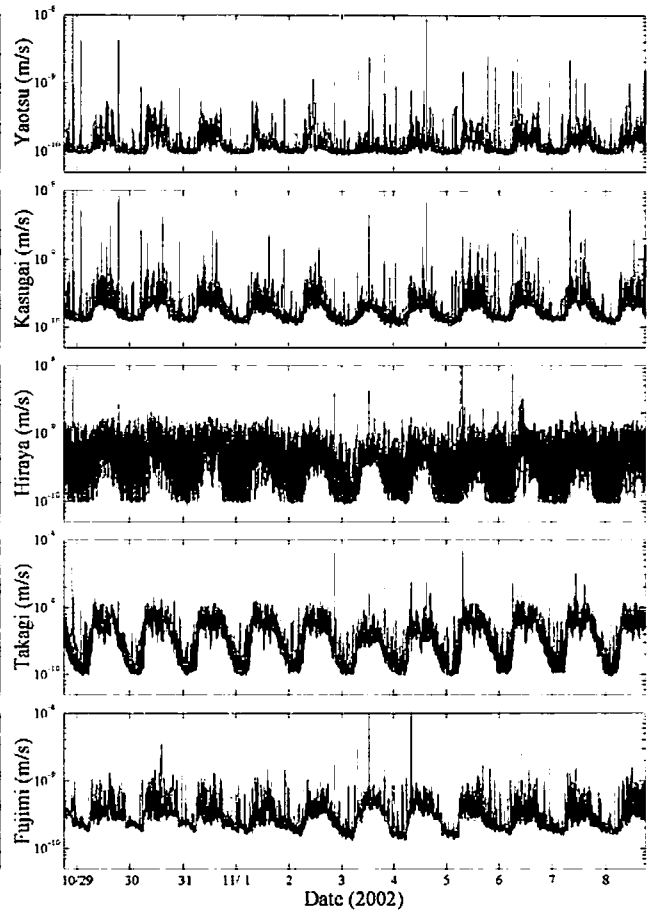
第 2 図: 電磁場 5 成分をスタッキングした結果。シグナルレベル (O)、および 4 種類のスタッキング法 (+: 単純スタッキング法、◇: 夜間スタッキング法、□: 逆数重みつきスタッキング法、*: 最適重みつきスタッキング法) によって得られたノイズレベルを、電磁波アクロス信号のシグナルチャンネルごとに示した。

ルが比較的小さい夜間のデータを用いるもので、MT 法等でよく用いられている。また逆数重みつきスタッキング法は、突発的なノイズを避けるために有効な方法であると考えられる。スタックデータの各シグナルチャンネルにおけるシグナルレベル、および各スタッキング法によって得られたノイズレベルを第 2 図に示す。全ての成分、および全てのシグナルチャンネルにおいて、最適重みつきスタッキング法によって得られたノイズレベルが最も小さいことが分かる。第 1 図でも見たように、夜間の方が昼間よりもノイズレベルが大きくなっており、かつ夜間スタッキング法ではスタッキング回数が他のスタッキング法よりも少なくなるため、最適重みつきスタッキング法と夜間スタッキング法で得られる SN 比には大きな差が出た。MT 法の場合にはこの夜間の「ノイズ」は地下探査に重要なシグナルとなる可能性があるが、アクロスにおいてはあくまでノイズであるので、夜間のデータのみを用いることは非常にもったいないことであることが分かる。特に、電場に含まれる夜間のノイズレベルは昼間の 10 倍近くに達し、第 2 図に見られる通り、最適重みつきスタッキングの効果が非常に大きい。

第 3 図に、スタックデータの 125.0Hz における SN 比が、スタッキング時間とともに変化する様子を示す。やはり最適重みつきスタッキング法で得られた SN 比が常に最も大きいことが分かるが、磁場に含まれるノイズレベルは昼夜でそれほど差がないために、最適重みつきスタッキング法で得られる SN 比は単純スタック



第3図: 電磁場5成分の125.0HzをスタッキングしたときのSN比の変化。それぞれ、単純スタッキング法(点線)、夜間スタッキング法(鎖線)、逆数重みつきスタッキング法(破線)、最適重みつきスタッキング法(実線)。



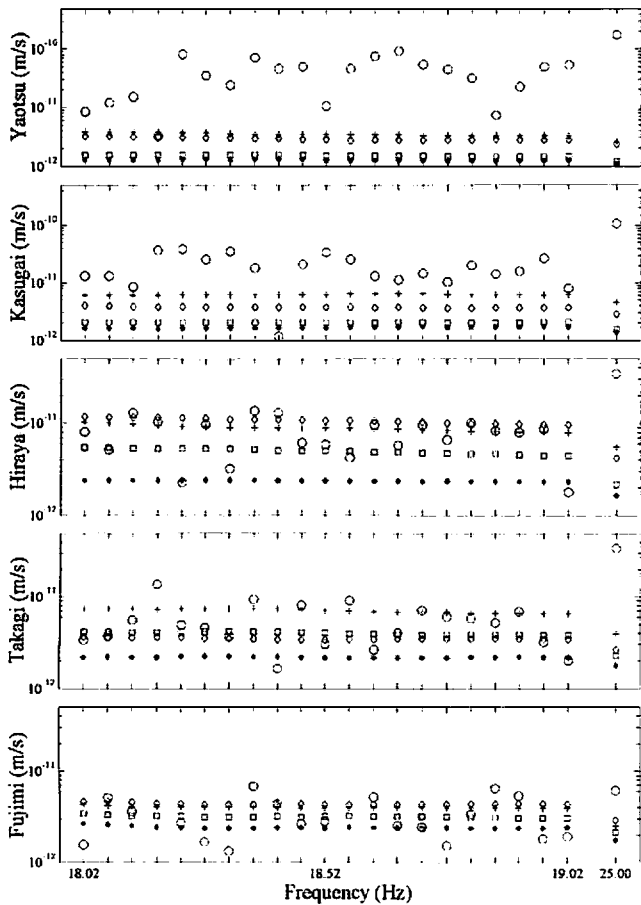
第4図: Hi-net観測点(八百津、春日井、平谷、喬木、富士見)における速度場上下成分の18.37Hz(弾性波アクロス信号のシグナルチャンネル)に含まれるノイズレベル。受信信号を100秒ごとのセグメントに区切り、2.2節で述べたノイズレベル推定法で求めた。

キング法や逆数重みつきスタッキング法と比べてそれほど差がない。しかし、昼夜のノイズレベルの差が1桁近くに達する電場の場合には、最適重みつきスタッキング法が他のスタッキング法と比べても圧倒的にSN比を稼いでいることが分かる。

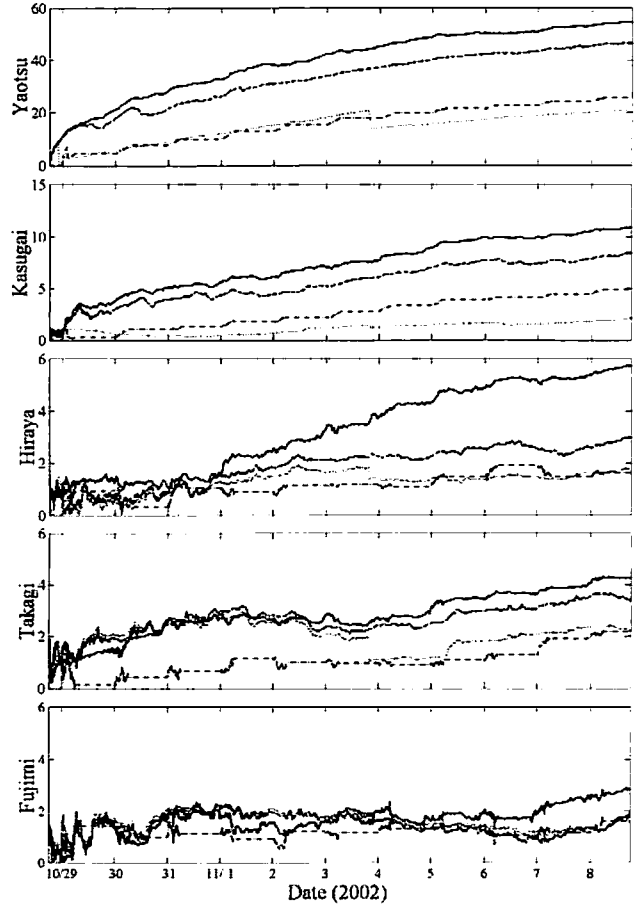
3.2 Hi-net で得られた弾性波アクロス信号への適用

東濃鉦山に設置された3台の弾性波アクロス震源FIT (Fixed Illumination Tool) は、100kgを越す偏心した錘を回転させることにより、地下に弾性波アクロス信号を送信する(例えば、Kunitomo *et al.*, 1998)。2002年10月28日18時から11月8日18時までの11日間にかけて行われた連続送信テストでは、このうちの2台(FIT No.1 および FIT No.3)を同時に稼働させ、FIT No.1は周波数が20秒周期で変動する18.52Hz±0.5Hzの周波数変調信号(FM信号)を、FIT No.3は25Hzの単一周波数正弦波信号を送信した。この送信テストでは、100km以上遠方のHi-netの観測点や気象庁の地震観測点でも、受信信号のスタッキングによってアクロス信号が捉えられたことが報告されている(上野ら, 2003)。

本論文では、Hi-net観測点の八百津(送信点からの距離11.1km)、春日井(17.0km)、平谷(38.6km)、喬木(61.7km)、富士見(115km)で得られた速度場上下動成分を用いる。3.1節同様、各観測点で得られた11日分の100Hzサンプリングデータを100秒ごとのセグメントに区切ってFourier変換を行い、各セグメント内の



第5図: Hi-net観測点における速度場上下成分をスタッキングした結果。シグナルレベル (○)、および4種類のスタッキング法 (+: 単純スタッキング法、◇: 夜間スタッキング法、□: 逆数重みつきスタッキング法、*: 最適重みつきスタッキング法) によって得られたノイズレベルを、弾性波アクロス信号のシグナルチャンネルごとに示した。



第6図: Hi-net各観測点における速度場上下成分の18.37HzをスタッキングしたときのSN比の変化。それぞれ、単純スタッキング法 (点線)、夜間スタッキング法 (鎖線)、逆数重みつきスタッキング法 (破線)、最適重みつきスタッキング法 (実線)。

FIT No.1 信号のシグナルチャンネルの一つである 18.37Hz に含まれるノイズレベルを、2.2 節で述べた方法を用いて推定した結果を第4図に示す。すべての観測点においてノイズレベルの明瞭な日周変化が見られ、電磁場データとは逆に昼間のノイズレベルの方が夜間よりも大きく、昼間のノイズレベルは夜間の数倍程度であることが分かる。また、何回か全観測点で同じ時間帯に突発的なノイズが見られ、例えば 11 月 3 日 19 時 36 分 40 秒–38 分 20 秒のセグメントに含まれる突発的なノイズは、19 時 37 分 52.5 秒に起きた静岡県西部を震源とする地震 (M3.7) の影響である。

次に、3.1 節で用いた 4 種類のスタッキング法により、11 日間分のセグメントを全てスタッキングしてみた。スタックデータの各シグナルチャンネルにおけるシグナルレベル、および各スタッキング法によって得られたノイズレベルを第5図に示す。全ての観測点、および全てのシグナルチャンネルにおいて、最適重みつきスタッキング法によって得られたノイズレベルが最も小さいことが分かる。八百津および春日井においては、ほぼ全てのシグナルチャンネルにおいてシグナルレベルがノイズレベルを上回っており、したがってアクロス信号が検出されたと言えるが、平谷および喬木においては、最適重みつきスタッキング法を用いて初めて FIT No.1 信号が検出されたと言える。送信点から 100km 以上離れた富士見においても、シグナルチャンネルによってはアクロス信号が検出されていることは、特筆すべきことである。FIT No.3 信号はすべての

観測所で検出されているように見えるが、Hi-net データの整数周波数チャンネルには観測系特有のノイズが含まれている可能性が高く、断定的なことは言えない。

第6図に、スタックデータの18.37HzにおけるSN比が、スタッキング時間とともに変化する様子を示す。ここでも、統計的ゆらぎと思われる変動を除いて、常に最適重みつきスタッキング法で得られたSN比が最も大きいことが分かる。特に、地震の突発ノイズによって単純スタッキングによって得られるSN比は急激に落ち込んでいるものの、最適重みつきスタッキング法はそれを避けることができている。

4. まとめ

以上、長尾ら(2003)が提案した最適重みつきスタッキング法、および重みの決定に必要なシグナルチャンネルに含まれるノイズレベルの推定法の理論について、再考を行った。電磁場や地震動は昼夜でノイズレベルが異なることがごく普通にあることであるから、それを考慮した上でスタッキングを行うことが当然重要となってくる。特に電磁場の場合には、3.1節で見たように観測点や周波数帯によっては夜間の方が昼間よりもノイズレベルが大きくなることもあり得る。アクロスの場合には、従来の電磁探査のときのように夜間のデータのみを用いるのは好ましくなく、ノイズレベルを考慮した上でのスタッキングがますます重要となってくる。

さて本論文では、受信信号に含まれているシグナルが時間変化しないことを仮定し、シグナルの最適推定を行ったが、時間変化する場合にもシグナルの最適推定は可能である。簡単に述べると、シグナル s_{mk} に時間依存(セグメント番号 m に依存)するような適当なモデルを与え、(1)式の尤度関数を最大にするようにモデルパラメータを決めれば良い。ただし、最適化に要する計算時間は膨大になることが予想される。またシグナルに対してどのような時系列モデルを与えるかについても、受信信号から先験情報を抽出する目や工夫を要求される。まずはスタッキング時間が小さくしてシグナルの時間変化を求め、それからシグナルに対してどのような時系列モデルが適当かを決めていくよりほかないであろう。

謝辞

本論文中において、防災科学技術研究所の高感度地震観測網(Hi-net)の地震波形データを使わせて頂きました。

参考文献

- Hasada, Y., H. Kumagai, and M. Kumazawa, Autoregressive modeling of transfer functions in frequency domain to determine complex travel times, *Earth Planets Space*, 53, 3-11, 2001.
- 熊澤峰夫, 山岡耕春, 武井康子, 大島宏之, 立石博, 狭帯域多チャンネルスペクトル観測記録装置としての時間区間蓄積記録装置-TS stacker, 地球惑星科学関連学会1995年合同大会講演予稿集, F31-13, 1995.
- 熊澤峰夫, 國友孝洋, 横山由紀子, 中島崇裕, 鶴我佳代子, アクロス: 理論と技術開発, 及び将来展望, 核燃料サイクル開発機構技報, 9, 115-129, 2000.
- Kunitomo, T., K. Yamaoka, S. Inoue, N. Ikeda, S. Watanabe, M. Kumazawa, Micro-hertz control technology of frequency-modulated rotary type transmitter to radiate a set of plural sinusoids with a 20 tonf in amplitude, *Abstracts of International Workshop on Frontiers in monitoring science and technology for earthquake environments*, API-2, 1998.
- 長尾大道, 中島崇裕, 熊澤峰夫, 國友孝洋, 観測時刻によってノイズレベルが異なる場合の最適スタッキング方法 - 電磁アクロスのテスト観測データを例にして -, *Conductivity Anomaly 研究会論文集*, 2003.
- 中島崇裕, 國友孝洋, 熊澤峰夫, 横山由紀子, 電磁アクロスの開発と送信実験, 地震研究所彙報, 75, 378-392, 2000.
- 中島崇裕, 國友孝洋, 長尾大道, 熊澤峰夫, 茂田直孝, 東濃電磁アクロスシステムによる連続観測, *Conductivity Anomaly 研究会論文集*, 2004.
- 小川克郎, 熊澤峰夫, 音波と電磁波のアクロスによる地殻内の水と応力と物理的状態の常時リモートセンシングへむけて, 日本地震学会講演予稿集1996年度秋季大会, 45, 1996.
- 上野寛, 吉田康宏, 松岡英俊, 石川有三, 國友孝洋, 熊澤峰夫, 広域地震観測網によるアクロス信号観測とその解析(その1): 東濃送信所からの地震波信号の気象庁・Hi-net観測網による検出, 地球惑星科学関連学会2003年合同大会予稿集, 2003.
- 横山由紀子, 熊澤峰夫, 國友孝洋, 中島崇裕, 精密に制御された電磁波を用いた3次元精密構造探査のためのデジタル信号波形の設計, 地震研究所彙報, 75, 375-392, 2000.
- Yokoyama, Y., M. Kumazawa, and T. Nakajima, Transfer function measured by electromagnetic sounding with an accurately controlled signal, *Earth Planets Space*, 54, 459-472, 2002.