

4 サブサイスミックバンドの地球ダイナミクス

4.1 はじめに -自由振動帯域と潮汐帯域の狭間で-

自由振動帯域よりも長周期側のサブサイスミックバンドには、重力を復元力とする内核の並進運動であるシュリヒターモードや流体核中の慣性重力波であるコアアンダートーンといった地球の核に関する情報をもたらす重要なモードが存在すると考えられている (Hinderer, 1997 [42]; 今西, 1998 [44])。この章では、これから SG データを使ってより精力的に研究がなされるであろうサブサイスミックバンドのシグナルの検出について予備的な解析を行なった。以下では、1) 南極・昭和基地の SG データを用いたシュリヒターモードの検出の試みと、2) サブサイスミックバンドの時間-周波数スペクトログラムの作成による常時シグナルの検出について述べる。

4.2 シュリヒターモード検出の試み

シュリヒターモードの検出は、SG 観測の 1 つの大きなターゲットになっている。Slichter[104] は 1960 年 5 月 22 日のチリ地震のときの重力計のスペクトルから、内核の並進運動に起因すると考えられる周期 86 分 (0.1938 mHz) の信号を検出したと報告した。しかし、その後の理論的研究から、この内核の並進運動であるシュリヒターモードの周期は、もっと長い 3~5 時間程度の周期を持つと考えられている。

その振幅が非常に微弱なために長い間観測の報告はなかったが、Smylie (1992) [106] は、ヨーロッパの SG データのスペクトルのスタッキングによってシュリヒターモードの検出に成功したと報告した。そのピークはノイズレベルぎりぎりではあるが、理論値と一致している [107] ことを示した。ところが、Crossley らは理論周波数の計算には自転の効果などを加えたダイナミックな Love 定数を使うべきだと主張し、Smylie (1992) の用いた理論が間違っていることを指摘した (Crossley et al., 1992 [9])。

その後、いくつかの SG 観測を行なっている研究グループによってシュリヒターモードの検出が試みられた。全く同じデータを使った検証も行なわれたが、シュリヒター

モードの検出には否定的である (Hinderer et al., 1995 [41]; Jensen et al., 1995 [46])。島 (1992) [100] は柿岡の SG データのスペクトル解析およびカナダのカントレー・フランスのストラスブルグの SG データのスペクトル解析からシュリヒターモードの検出を試みた。Smylie (1992) が使ったデータよりノイズレベルが低いデータからも検出することができず、彼の報告は誤認であったと結論している。このようにシュリヒターモードについては、これまでのところ確実な観測はないと言える。

自由振動帯域のスペクトログラム (図 3-2-1) を見てもわかるように、第 35 次南極観測隊 (JARE35) の越冬期間中 ('94.2~'95.1) において、ほとんど欠測なくデータを取得することができた。そこでこの昭和基地で得られた 1 年間の SG/TIDE 出力データを使って、Smylie (1992) が検出したというシュリヒターモード検出を試みた。

TIDE 出力は 50 秒より長周期の帯域ではフラットな特性を持っていて、データは 7.5 桁で A/D 変換され、2 秒サンプリングされている。図 4-2-1 にステップ未補正の 1 年間の TIDE 記録を示す。日周潮・半日周潮汐のほかに、地震などによるスパイクや停電などの人工的な擾乱によるステップがあることがわかる。

解析では、「残差重力データ」を作成し、それから異常値を除去した後の時系列のスペクトルを求めた。次に、得られた時系列には非定常成分が残っていたので、その除去を行なった後のスペクトルも求めた。

まず、残差重力データ作成について説明する。2 秒サンプリングの生データをから人工的な擾乱、また、5.5 mHz 付近にある超伝導球の固有振動の影響を除去するため、ローパスフィルタリングした後リサンプリングし、1 分サンプリングデータとする。これをさらにリサンプリングした 1 時間サンプリングデータを使って BAYTAP-G (Tamura et al., 1991 [115]) による潮汐解析を行い、潮汐ファクター、気圧アドミッタンスを決定する。これらを使って 1 分サンプリングデータから潮汐成分、気圧効果を除去した残差重力データを作成する。次に述べる異常値の除去の後、1 分ずつスタート時間をずらした 60 セットの 1 時間サンプリングデータを作成した。

この残差重力データには、作業や停電によるステップあるいは自然地震や収録システムのトラブルなどによるスパイクが混入している。そのため Hinderer らや Crossley

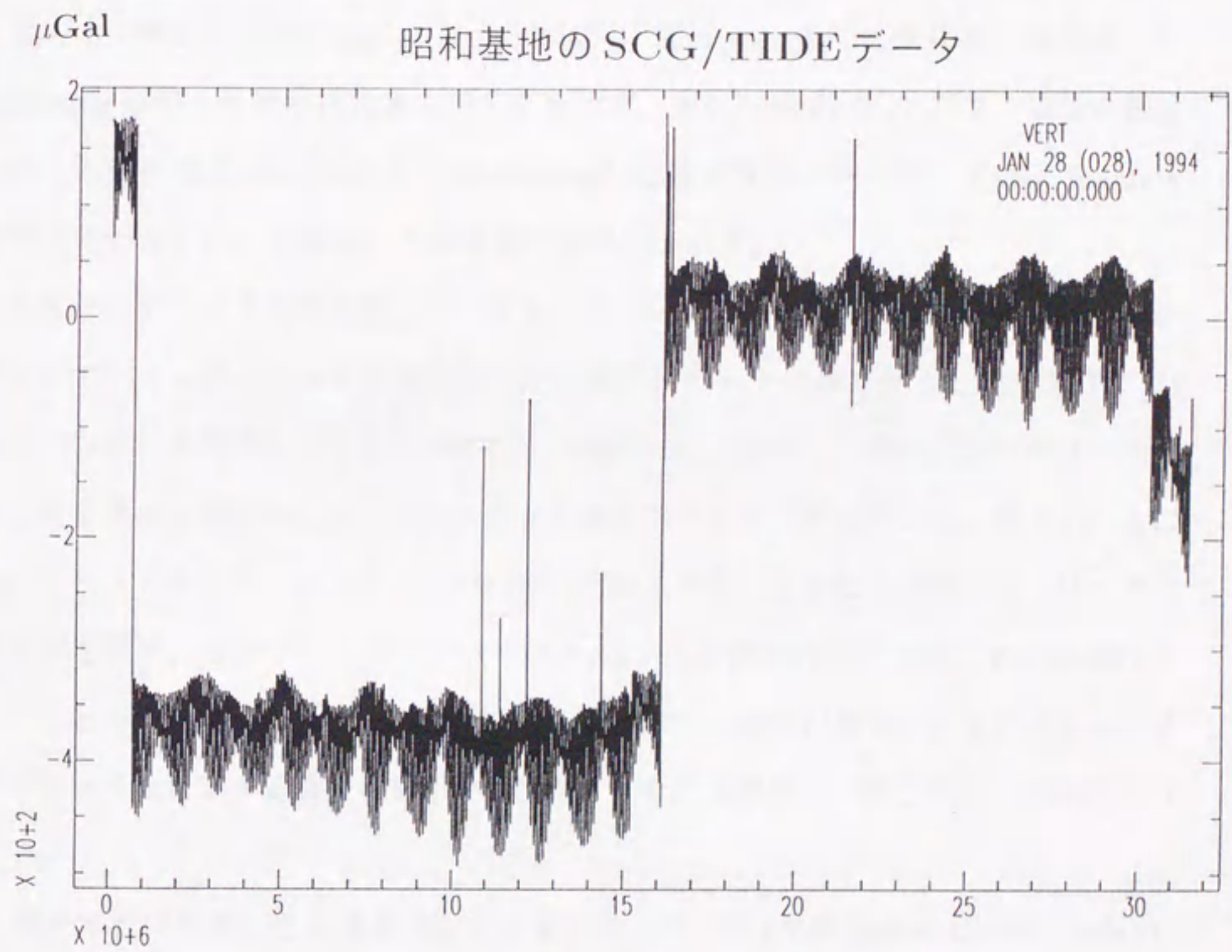


図 4 - 2 - 1 : 昭和基地 SG の TIDE 記録 (1994/2-1995/1 : 1 年間)

らが提唱している deslewing procedure を適用し異常値の除去を行った。スパイクを除去するために、ある振幅以上の値を異常値とみなす方法はよく用いられるが、この deslewing procedure とは、異常値の判断をある1つの値の振幅ではなく、値の変化率を用いて行なうという方法である (Crossley et al., 1993 [10])。変化率を見ることによって、スパイクだけでなくステップも補正できるのが特徴である。彼らは数値実験を行なって手法の有効性を確認するとともに、実際のデータ解析においてもこの手法が単なるスパイク除去と比較してノイズレベルを下げるのに有効であることを示している (例えば、Hinderer et al., 1995[41])。図 4-2-2 に、変化率の値を変えた deslewing 後の1年間の残差重力データを示す。また、図 4-2-3 には、以後の解析で用いる変化率 $5 \mu\text{Gal/h}$ として deslewing した残差重力データおよび slew function と呼んでいるそのとき抽出した異常値の時系列を示す。

1分サンプリングの残差重力データを、リサンプリングによって1時間サンプリングにしてパワースペクトルを求める。その際に、データは全て使うという方針で、1分ずつスタート時間をずらした60セットのデータについて、それぞれのパワースペクトルを求め、最終的にすべてのスペクトルのスタッキングを行った。図 4-2-4 に (a) 60セットをスタッキングしたパワースペクトルと (b) 1セットのみのパワースペクトルを示す。それぞれのパワースペクトルに S_6 の潮汐のピークがきれいに現れていることがわかる。3本の白抜きの矢印が、Smylie (1992) が検出したというシュリヒターモードと対応する周波数を示す。しかし、その周波数に一致したピークは見られない。

彼が解析に使用した3基のSGは、全てヨーロッパ (中緯度地域: $48.6\text{N}-50.8\text{N}$) に集中している。それに対して昭和基地は高緯度のために自転の影響が小さく、ピークが分裂しないことが期待される。Smylie (1992) の主張する3本のピークは見えていないものの、彼が検出したという3本のピークの中心周波数 ($73.1 \mu\text{Hz}$) の近くに、 $73.3 \mu\text{Hz}$ のピーク (p) が見られることは、注目すべきことである。ピーク (p) に注目して (a) と (b) を比較してみると、(a) の方がピークが強調されていて、スタッキングによる効果が現れていることがわかる。 S_6 より長周期側に見られる大きなピークは

μGal

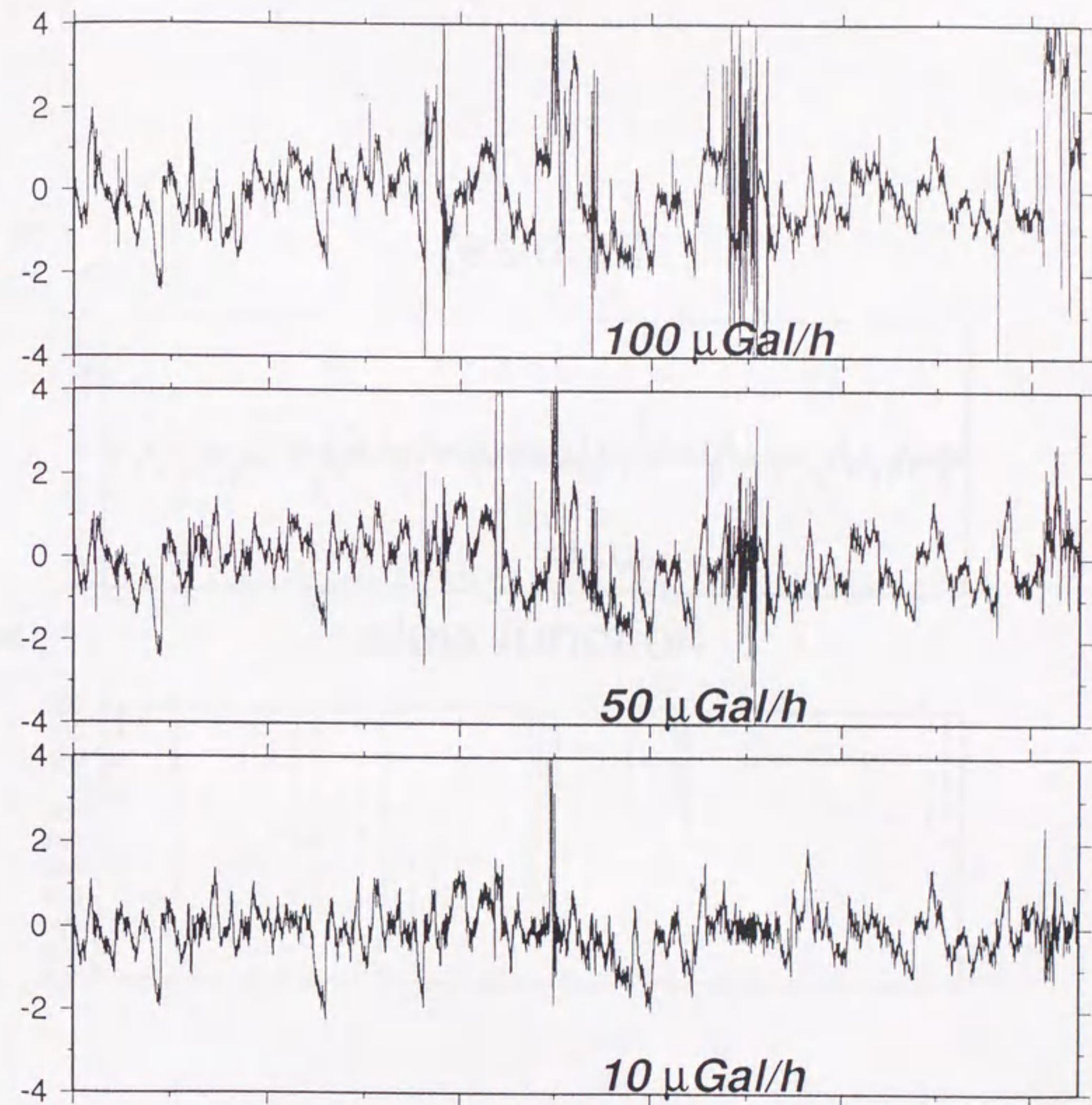


図 4 - 2 - 2 : 昭和基地 SG の残差重力時系列 (1994/2-1995/1: 1 年間),
上からそれぞれ変化率 $100\mu\text{Gal/h}$, $50\mu\text{Gal/h}$, $10\mu\text{Gal/h}$ で補正した時系列。

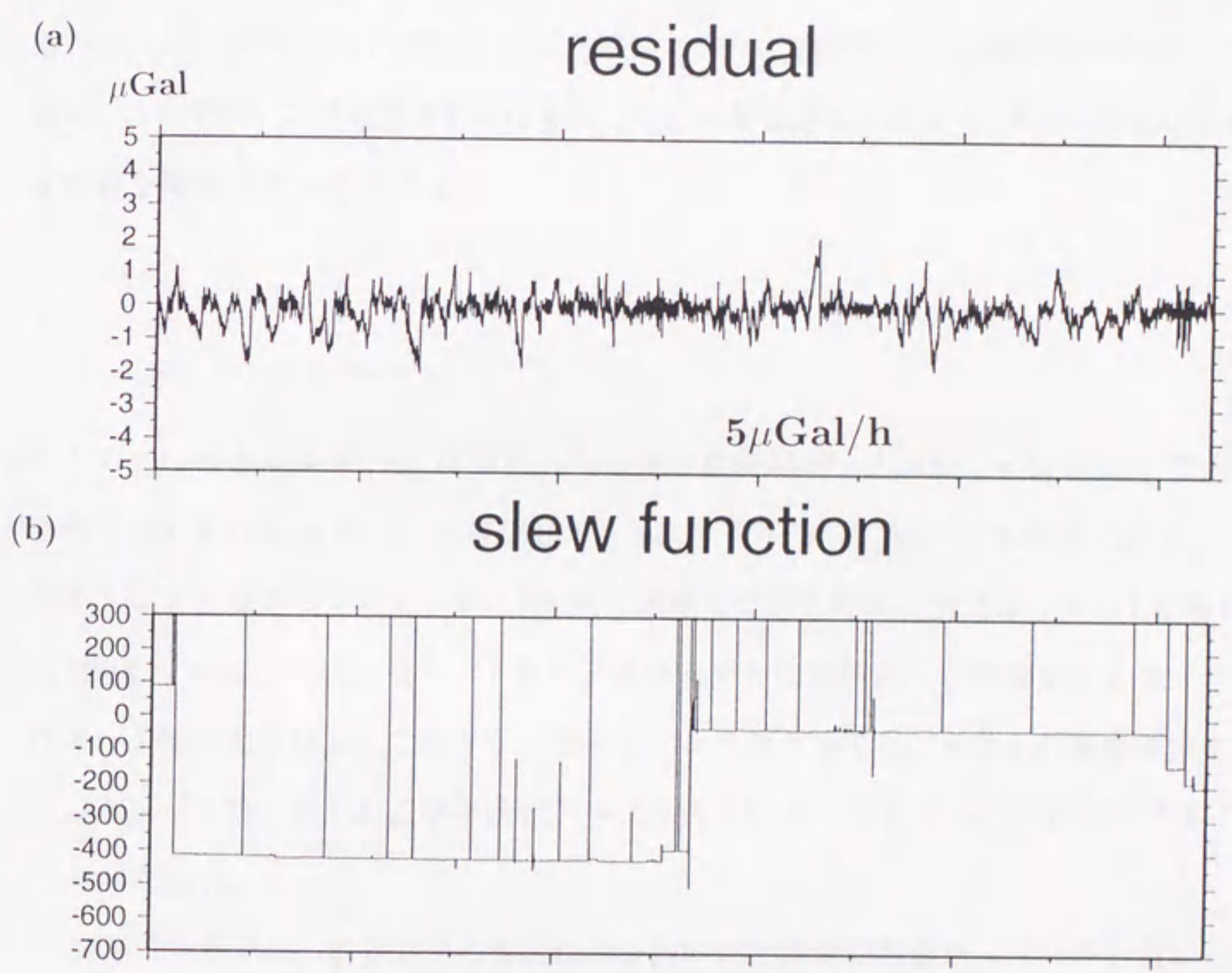
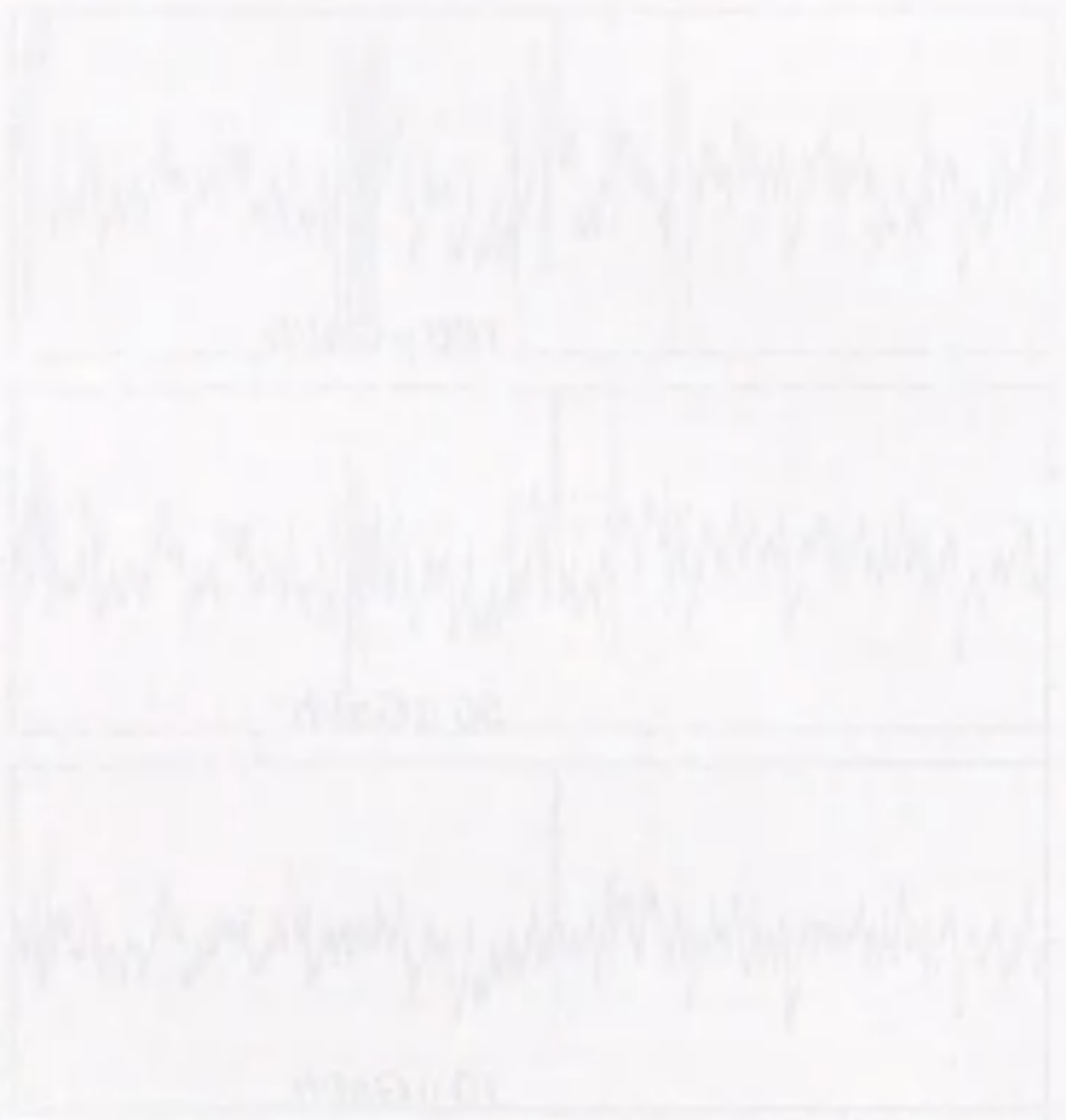


図 4 - 2 - 3 : 昭和基地 SG の残差重力時系列 (1994/2-1995/1 : 1 年間) ,
 (a) が補正後の残差時系列で (b) がそのときの補正量を示す.

除去しきれない潮汐成分と考えられるが、同定はできていない。

図 4-2-3-a で見られるように、残差重力データには気圧データからだけでは除去しきれない温度変化などによる非定常成分が残っている。そこで、1 階の階差がランダムなトレンドモデルによる非定常成分の除去を試みた。この解析は、トレンドモデルの分散を仮定して、時系列データをトレンド成分と残差成分に分離するもので、今得ようとしている信号は残差成分に残ることが期待される。

トレンドモデルによって、どのようにして非定常成分を分離するかについて説明する。トレンドモデルというのはトレンド成分モデルと観測モデルを組み合わせたものである。ここでトレンド成分モデルは多項式などの関数近似ではなく、BAYTAP-G [115] と同様な階差モデルで与える。

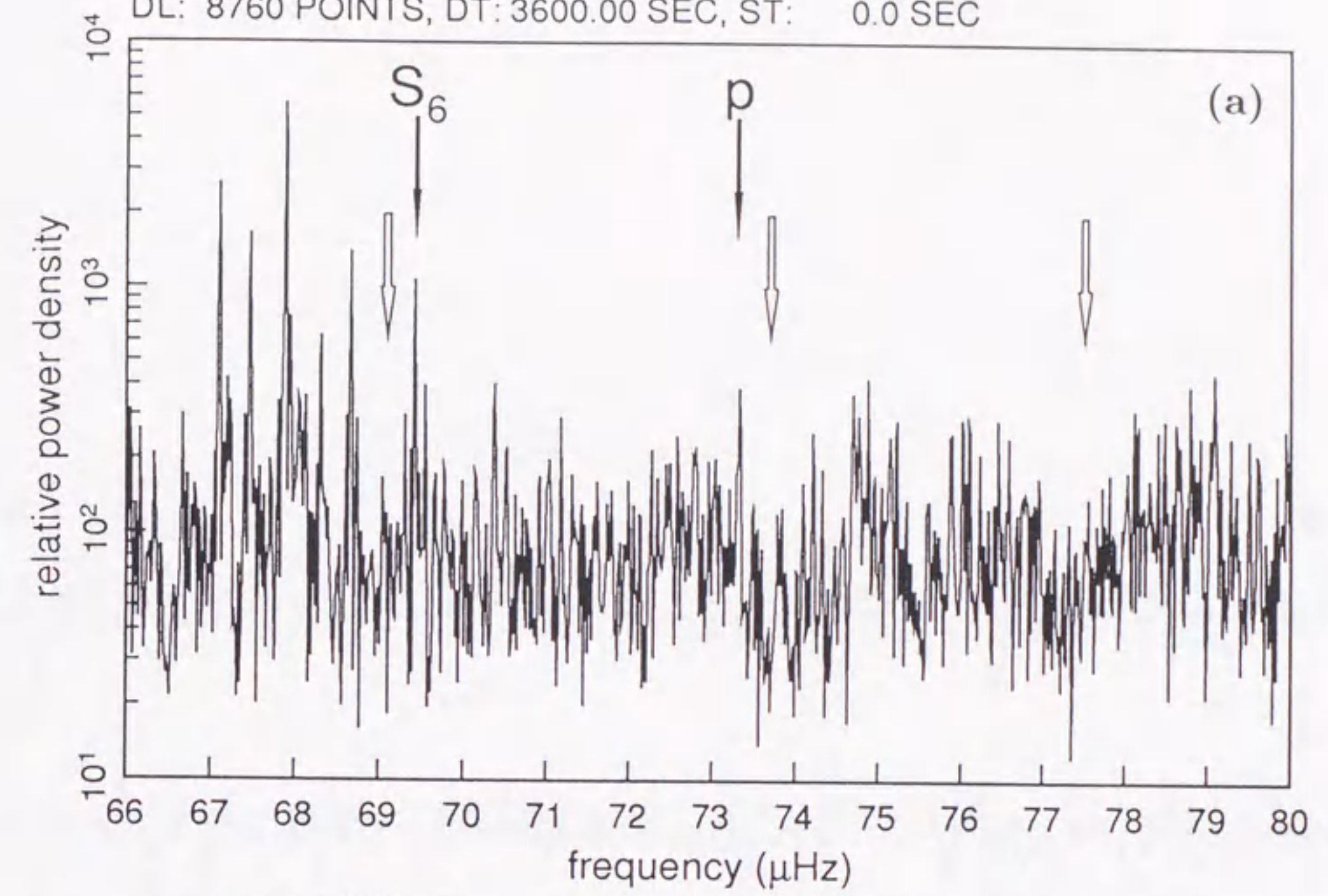
$$\Delta^k t_n = v_n \quad (1)$$

$$y_n = t_n + w_n \quad (2)$$

ここで、 t_n がトレンド、 v_n は $N(0, \tau^2)$ に従う白色雑音、 Δ は $\Delta t_n = t_n - t_{n-1}$ で定義される差分オペレータ、 y_n が観測値で、 w_n は $N(0, \sigma^2)$ に従う白色雑音である。(1) 式をトレンド成分モデルといい、(2) 式を観測モデルと呼ぶ。例えば、 $k=1$ の場合、(1) 式は $t_n = t_{n-1} + v_n$ となり、トレンド成分モデルは局所的に一定値をとるランダムウォークモデルとなる。このガウス型のトレンドモデルでは、 τ と σ の値を仮定すると、カルマンフィルタおよび平滑化アルゴリズムによって t_n と w_n が決定できる(北川, 1993 [56])。

実際の計算では、観測値から得られる分散の最尤推定値を観測ノイズの分散 σ として用いる。そして、システムノイズの分散 τ を与えることによってトレンドを推定する。図 4-2-5-a に示すように、システムノイズの分散が小さいほど高周波成分が抜けた滑らかなトレンドが求まることがわかる。図 4-2-5-b に推定したトレンドを差し引いた残差成分を示すが、 $\tau = 10^{-3}$ では非定常成分が取り去りきれない。分離したトレンド成分と残差成分のスペクトルを比較すると、与える τ を大きくするにつれて図 4-2-4(a) で見えているピーク (p) がトレンド成分の中にも現れると

1994 SG94_average, GGPJ, SYO, Z+
DL: 8760 POINTS, DT: 3600.00 SEC, ST: 0.0 SEC



ST: 1994 01/28 01:00 0.00, DL: 8760 POINTS, DT: 3600.00 SEC, OFF: 0.0 SEC

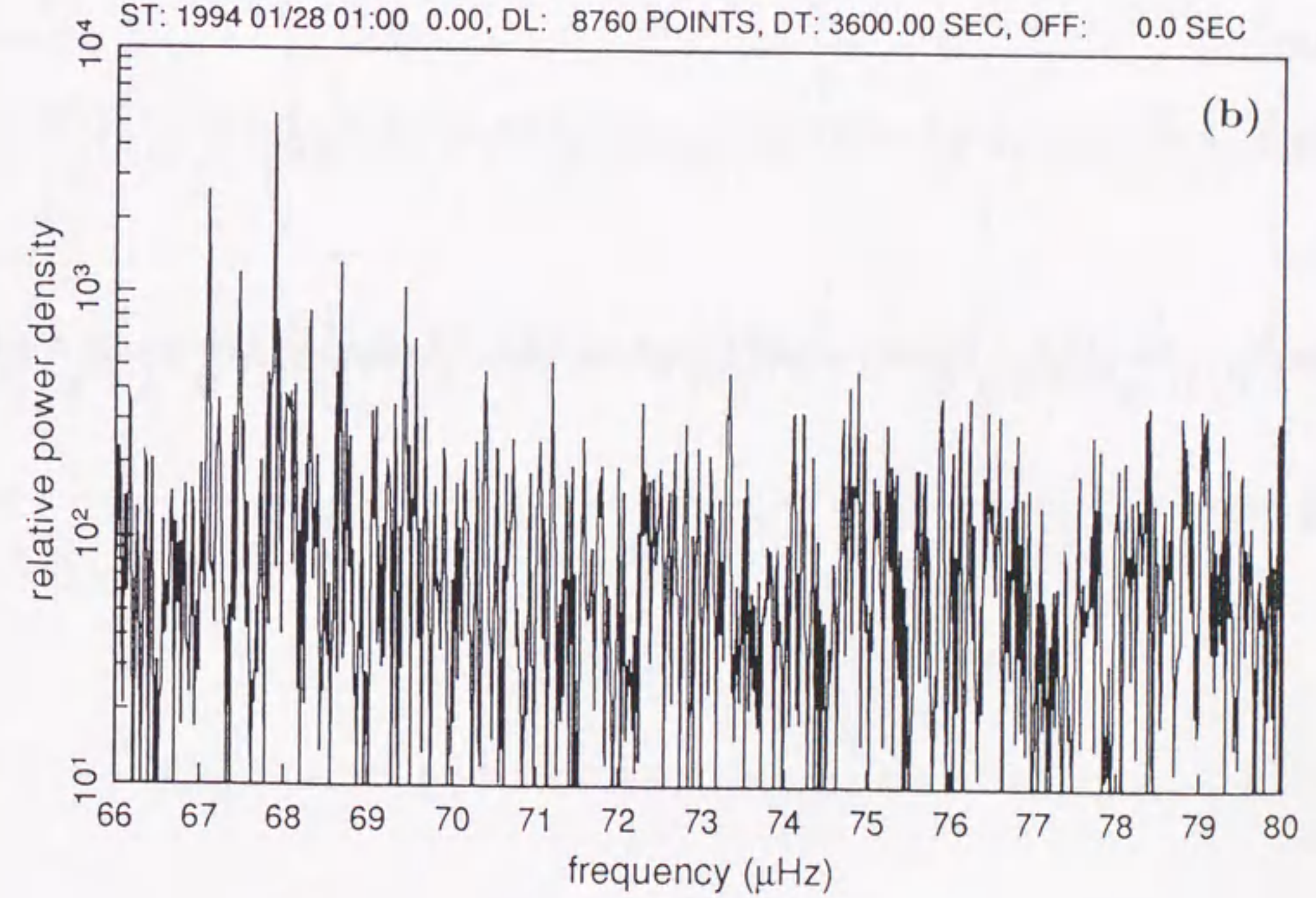


図 4-2-4: 昭和基地 SG の残差スペクトル,
(a) スタッキングしたパワースペクトル、(b) 1 セットのデータのパワースペクトル.

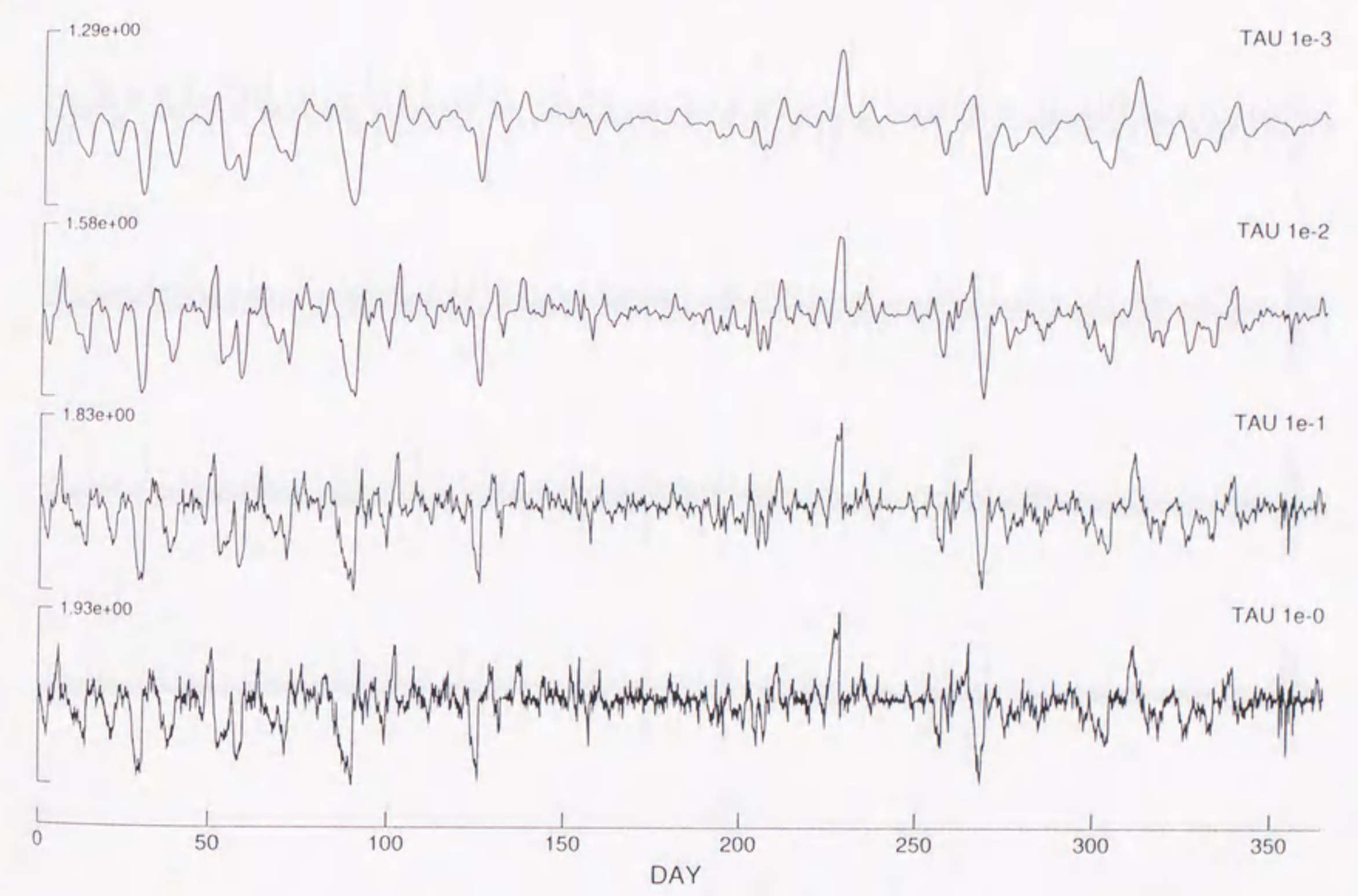


図 4-2-5-a: トレンドモデルを用いて推定したトレンド

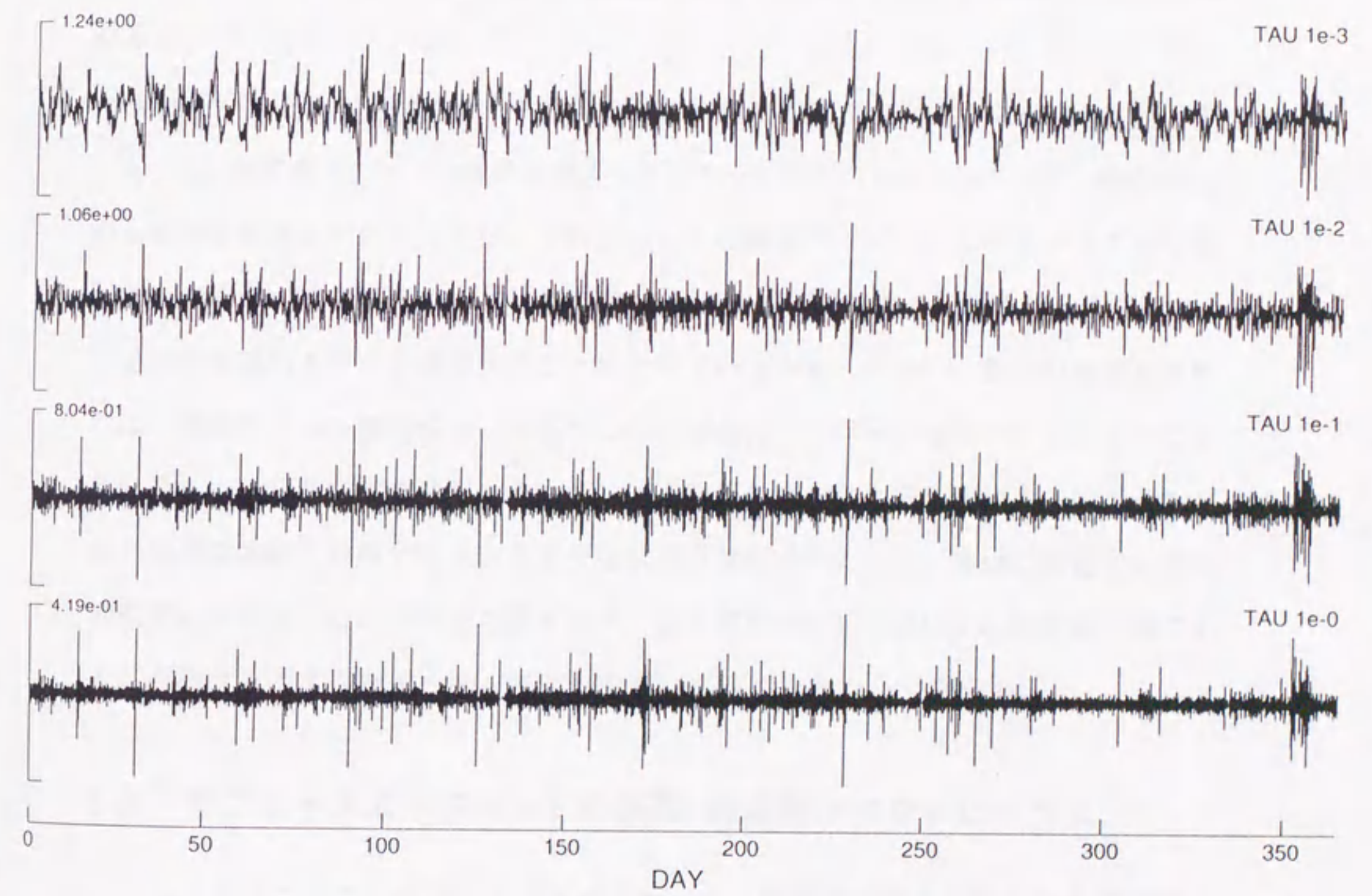


図 4 - 2 - 5 - b : トレンドモデルを用いて推定したトレンドを差し引いた残差

いう結果を得た。ピークは $\tau = 10^{-2}$ の場合から現れる。これは、トレンドつまり非定常成分を分離することで残差成分だけに信号が残るという期待に反する結果であった。この原因として、(1) ピークはもともと非定常成分による見掛けのものであった、(2)トレンド成分にシグナルまで取り込まれてしまった、などが考えられる。

今回の解析では、Smylie (1992)の検出したような信号は、昭和基地の1年間のデータからは検出できなかった。中心周波数付近にピークが見えていたが、トレンドモデルによるトレンド成分と残差成分との分離の結果からは、そのピークの安定性に疑問がある。

今回行なった解析では、データ処理のそれぞれの段階でパラメータを設定する必要がある。残差重力データ作成時の潮汐ファクターと気圧のアドミッタンス、deslewingのときの変化率、それからトレンド推定のときの観測ノイズ、システムノイズの分散がそれであり、その都度あいまいさが生じる。全体を通しての解析を考えたときに、不適当な時系列モデルを適用したことになっているかもしれない。最近の時系列解析では、潮汐のような調和成分、気圧などの応答成分、スパイクやステップあるいはトレンドのような非定常成分をも含んだ、状態空間モデルによる解析によって、それぞれの成分を同時に分解するというような試みがされてきている。地震に関連する地下水位変化の検出のための状態空間モデルによる解析(松本, 1995 [63])がその一例である。今後はそのような統一的なモデルを用いて解析を行なう必要がある。

4.3 サブサイスマックバンドの時間-周波数スペクトログラム

シュリヒターモードやコアアンダートーンは、理論的に考えられている周波数にばらつきがある。周波数のわかっていない、また励起のされ方もわからない未知の信号を検出するのに、スペクトログラムの作成は有効な方法である。そこで、自由振動帯域と同様な解析をサブサイスマックバンドでも試みた。

サブサイスマックバンドの解析には、前節で用いたのと同じ、JARE35で取得したTIDE記録1年分を用いた。まずサンプリング間隔2秒のTIDE記録を1分にリ

サンプリングした。1分データをステップ補正した後、BAYTAP-Gによる潮汐解析で決めた潮汐ファクター、気圧アドミッタンスを使って理論潮汐の除去および気圧補正を行ない、スパイクノイズの除去を行なった。このように処理した残差重力データから、スタート時を1日づつずらした10日長の時系列355本作成し、それぞれの振幅スペクトルを求めてスペクトログラムを作成した。

図4-2-6に結果を示す。自由振動帯域と同様に、縦軸に通日を、横軸に周波数を取り、振幅を濃淡で示している。図の上側には、周波数(cycle/day)と潮汐の次数を示してある。スペクトログラムを見てまず気がつくのは、9次までの潮汐の縦筋がはっきりと見えていることである。またそれより高次の筋が見えていないのが特徴的である。さらに、潮汐帯と自由振動帯の間の0.18 mHzと0.2 mHz付近に、潮汐の筋に比較して振幅が小さく、ややブロードな2本の筋が確認できる。これらの2本の筋はMODE記録では感度が落ちるためほんやりとしか検出できなかったが、TIDE記録からは明瞭に検出することができた。

自由振動帯域のノイズ源の考察においても述べたが、約1時間より低周波側では気圧の影響が大きくなるので、特にこの帯域では気圧補正が重要である。図4-2-7に気圧変化の応答成分を補正していないときのスペクトログラムを示す。図4-2-6に見える2本の筋はほとんど確認することができない。不適切な補正による見掛けの筋が見えている可能性を考えて、気圧変化そのものにそのような周期的な成分が入っていないか確認するため、気圧データを使って、重力データと同様なスペクトログラムを作成した。図4-2-6に結果を示すが、5 cycle/dayより短周期の成分を確認することはできなかった。したがってこれらの筋は気圧補正による見掛けの信号ではないと言える。

得られたスペクトログラムのうち、まず多くの筋が見えている潮汐帯域に注目する。残差重力データ作成の際に、田村ポテンシャル(1200分潮)(Tamura, 1987 [114])から計算した理論潮汐を除去したので、4次までの潮汐は除去されるはずであったが、筋として見えていた。理論潮汐を計算するときには、1年間潮汐ファクターは不変であるとしているので、潮汐ファクターや重力計の感度の時間変動があると、実際の

SG, SYO, 1994 1/28 - 1995 1/17

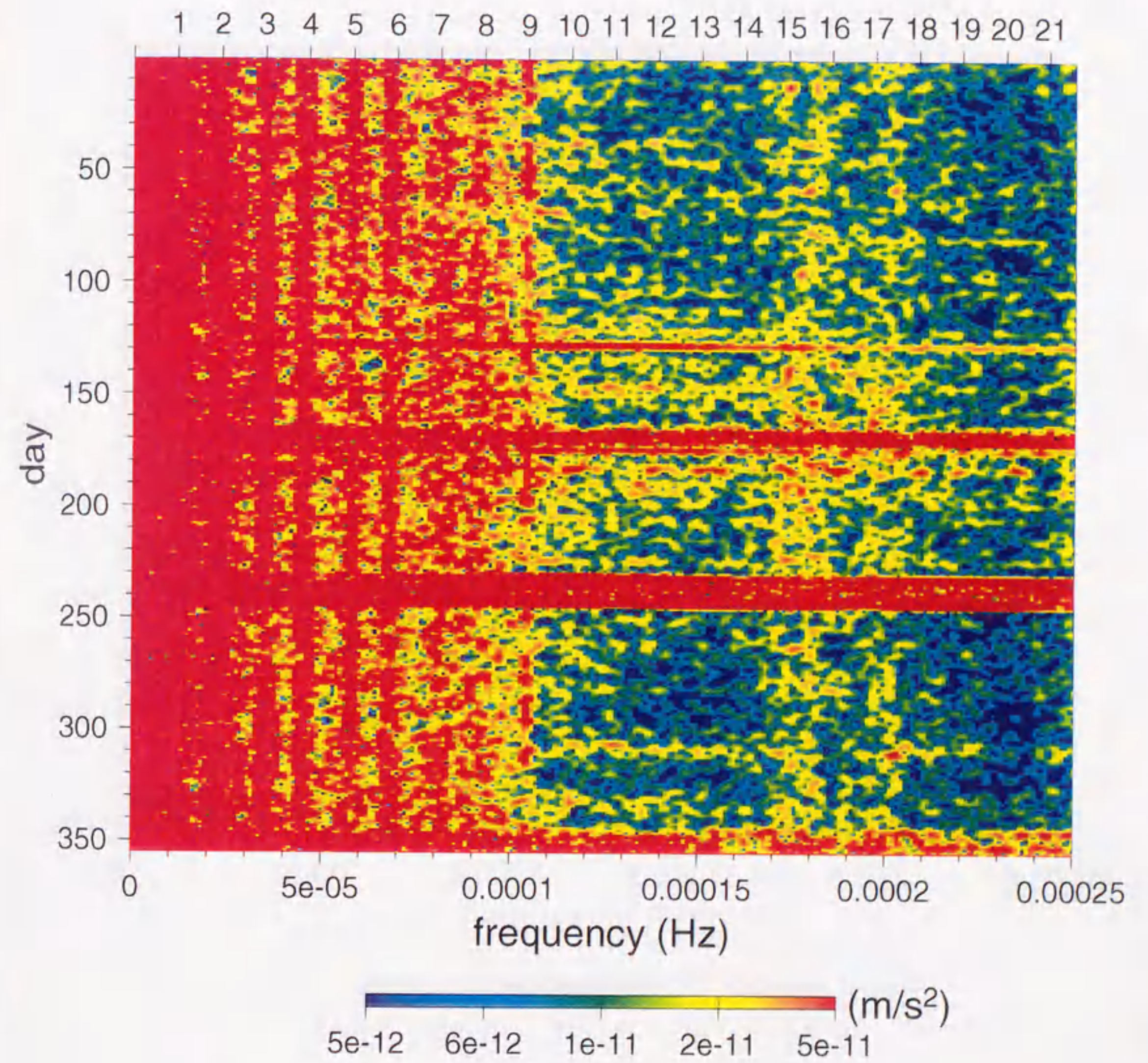


図 4-2-6: 昭和基地 SG 1 年分のサブサイスマックバンドの
時間-周波数スペクトログラム

SG, SYO, 1994 1/28 - 1995 1/17

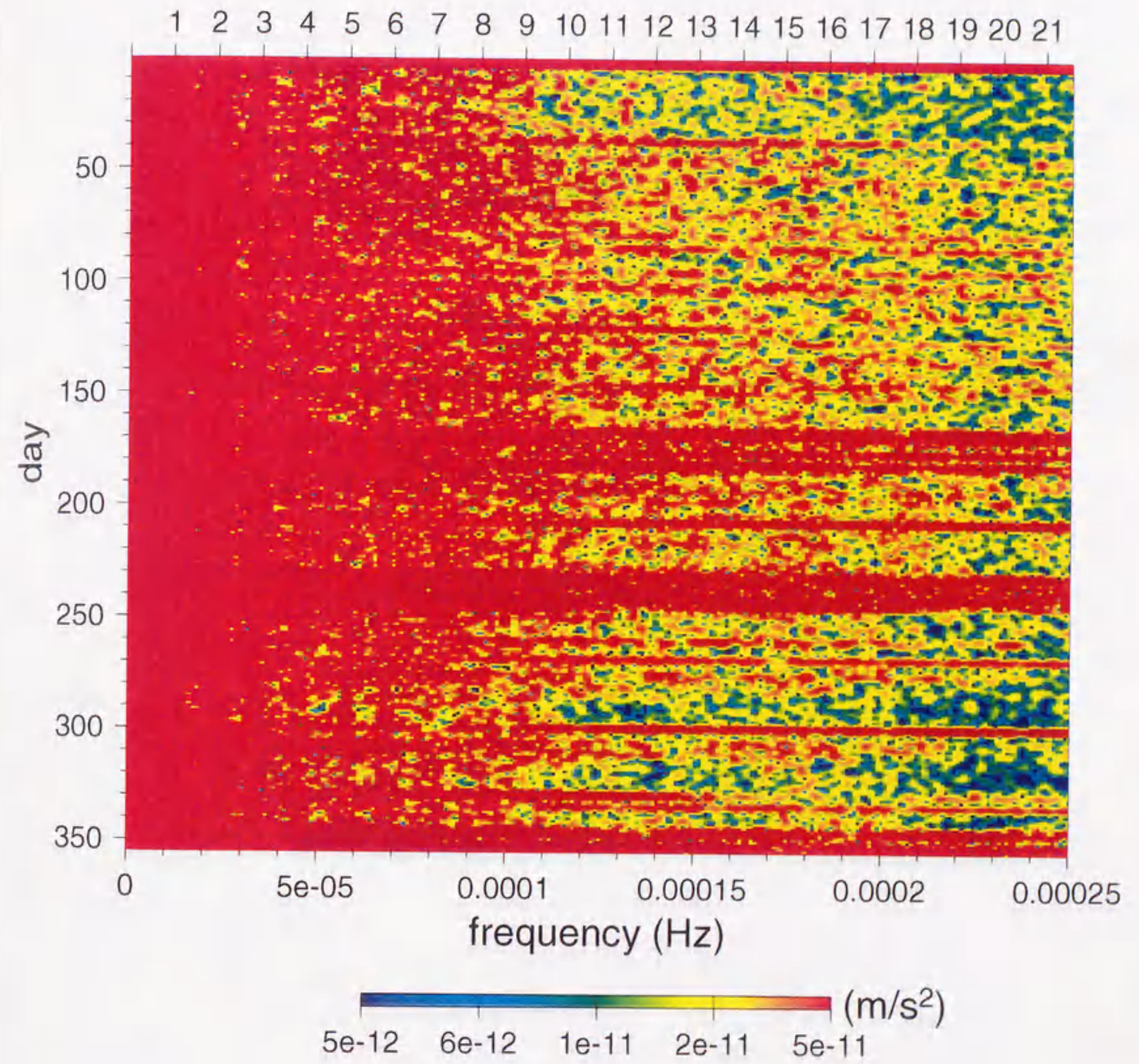


図 4 - 2 - 7: 昭和基地 SG 1 年分のサブサイスミックバンドの
時間-周波数スペクトログラム (気圧応答未補正)

AIR PRESSURE, SYO, 1994

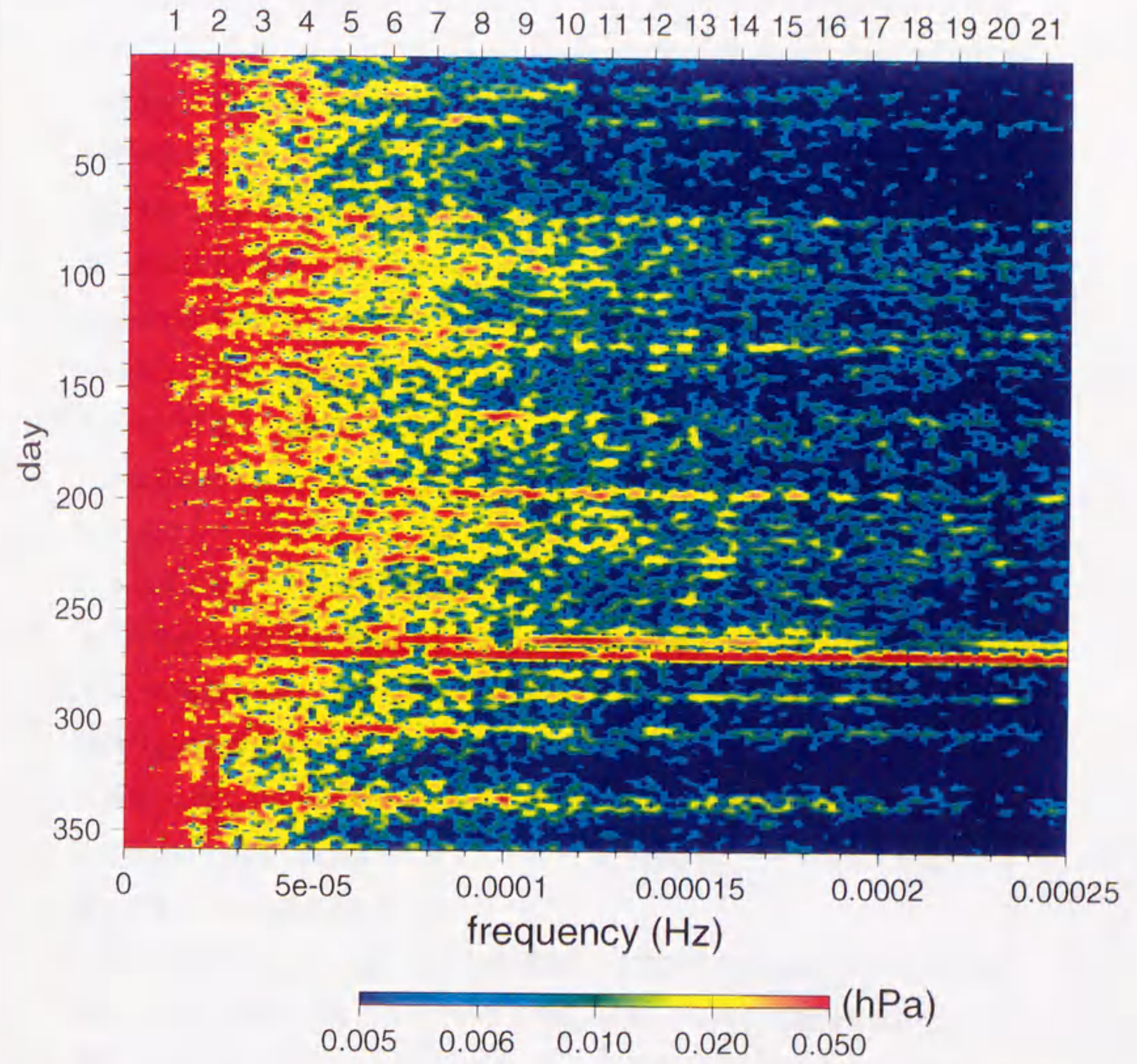


図 4 - 2 - 8 : 昭和基地気圧データ 1 年分のサブサイズミックバンドの
時間-周波数スペクトログラム

データに合わない部分が出てくる。

フィッティングの悪さだけでは説明できないのが、それより高次の筋である。理論的には高次の地球潮汐の振幅は6次以上では $pGal$ 以下となり、このスペクトログラムの検出レベルには達しないはずである。しかし、実際は9次までの筋がはっきりと見えている。気圧のスペクトログラムには、4次の潮汐より短周期で対応する筋はみられなかった。大気による効果が見えているのでないとすれば、原因としては海洋の影響が考えられる。例えば、カナダのカントレーのSGによる潮汐観測において、地形の複雑な浅い海 (Fundy 湾) における非線形な海洋潮汐荷重が観測された重力に影響を及ぼしているということがわかっている (Merriam, 1995 [67])。この湾における非線形な海洋潮汐荷重は、半日周潮など低次の潮汐にも影響を及ぼしているという。このような効果も昭和基地周辺でも考える必要があるだろう。見えている潮汐の筋が9次までで、10次より高次のものが見えていないという事実は特徴的であるが、グローバルに見られる特徴なのか、またどのようなメカニズムを反映したものなのかはわからない。

スペクトログラムの高周波側に見られる約90分周期の2本の筋は、シュリヒターモードというには周期が短か過ぎる。しかしながら、これらの筋は、Slichterが1960年のチリ地震で検出したピーク (周期86分) とよく一致している。もしかしたら、内核の並進運動以外の原因で生じた、今まで考えられてこなかった固有振動の可能性もある。ただし、この常時シグナルが地球深部に起因する信号であるかどうか確認するためには、大気・海洋間のカップリングなど地球表層部のダイナミクスが重力に及ぼす影響も知る必要がある。

最近の研究によると、昭和基地の検潮記録 (1時間データ) から9次までの海洋潮汐に対応する信号が確認されている (青山, 私信)。これらの観測事実を受けて高根澤・青山らは、グローバルな大気変動に対する海洋の応答が重力に影響を及ぼしているのではないかと説明しようと試みている。約90分周期の2本の筋もそのようなメカニズムで説明できるのかもしれないと考えている。しかし、グローバルな気圧と海洋潮汐ともに、1時間より高周波帯域のデータがなく、モデリングの際にはサ

ンプリングの粗いデータ(グローバルな気圧は12時間データ)を内挿して使うことになるので、今のままでは現実的なモデリングができるかどうか疑問である。しかし、地球深部からの信号を捉えるためには、このような大気と海洋のカップリングによる重力効果の研究は今後重要になろう。

「時間-周波数スペクトログラム」を作成することによって、従来、ノイズと区別がつかなかったような微弱な常時信号を、サブサイミックバンドでも検出することができた。この潮汐帯と自由振動帯の間にある筋は、従来の理論では説明することができない。昭和基地の自由振動帯域のスペクトログラムでは、主には地球自由振動の伸び縮み基本モードと対応していたが、理論周波数に対応しない筋も何本か見えていた。常時地球自由振動と同様に、自然のシグナルなのか人工のシグナルなのか、また自然のシグナルならばグローバルな現象なのかローカルな現象なのか区別するためにも、今後グローバルなSG観測点のデータを使った解析を早急に行なうことが課題である。

これからもSG観測は、この潮汐帯域と自由振動帯域の間を埋める周波数帯域のダイナミクスを解明する鍵となる基礎データを提供するであろう。しかしながら、その観測を検証するのに必要な昭和基地をはじめとするグローバルな気圧観測や海洋潮汐観測などの時オーダーから短い周期帯の観測データが圧倒的に不足しているのが現状である。サブサイミックバンドにおける地球深部ダイナミクスの研究を進めていくにあたって、地球表層の流体のモニタリングの重要性も今後訴えていくべきであろう。

5 今後の課題

5.1 常時自由振動の励起源を明らかにするために

常時自由振動の励起源については、まだ良く分かっていない中央海嶺、トランスフォーム断層、沈み込み帯でのゆっくりした変動 (Kawasaki et al., 1995 [54]; 日置, 1997 [37]; Heki et al., 1997 [38]) などの固体地球における変動が原因である可能性も否定はできない。励起源が気体か固体地球かを調べるのに、水平動成分の解析は重要である。水平動成分には上下動成分には記録されない地球自由振動のねじれ振動が記録される。ねじれ振動は励起源が気体ならばほとんど励起されないはずであるが、固体地球ならば効率よく励起されるはずである。もし水平動成分の解析から常時地球自由振動として伸び縮み振動のみ検出されれば、気体が励起源である可能性は非常に高くなる。しかし、一般に水平動成分は低周波部分に大きなノイズを伴う (Widmer et al., 1992 [122]) ので、常時自由振動のような微弱な信号を検出することは非常に困難と考えられる。それよりは高感度伸縮計の記録を解析する方が検出の可能性もあるかも知れない。IRIS など最近のグローバル地震計ネットワークは IDA よりも観測点分布が密なので、多くの上下動成分を同時に解析して時間的空間的な相関を調べることにより、励起源が押さえられる可能性がある。

5.2 SG 観測は何を目指すべきか？

本研究の結果を見ると、2 mHz より短周期側において静かな観測点どうしを比較するうえでは、SG と LR のセンサーとしての違いはほとんどないと言える。その場合、メンテナンスの手間やコストを考えると、SG の長周期地震計としての有用性に疑問が出てくる。しかし現在、LR によるグローバルな観測は終了しており、SG によるグローバルネットワークがそれにとって代わることが期待される。SG は、その測定原理の違いから、最適化すれば LR を越える性能を発揮する可能性を持っている。その最適化のためには、最低限、本当に静かな観測点を選ぶ必要がある。

SGについては、センサー・システムそのものに起因する自由振動帯域への影響について、まだ不明な点が多い。傾斜補償装置の挙動による影響がその1つである。本論でも述べたが、向井ら、1995 [70] は、観測室内の温度変化の影響が重力変化にどのような影響を及ぼすかを調べている。また、この実験に用いた京都における2基のSG 並行観測の結果から自由振動帯域では相関が落ちることが示されている（向井ほか、1997 [71]）。これらについて、傾斜装置に原因があることが示唆されていたが、彼らの最近の研究では、傾斜装置自身もなんらかのノイズによって乱されている可能性があることを示唆している。環境に起因するノイズの分離のためには、室温などの環境データの取得に加え、ドイツやフランスのグループのような、SG と異センサーとの並行観測が必要であろう。

SG が狙うべきは、IDA・IRIS では性能が不十分な超低周波の自由振動モードやサブサイスマックバンドでの未知のモードなど 2 mHz から低周波側の帯域であると考えられる。これまで 1 mHz 前後の周波数帯は、IDA は不安定と言われており、また IRIS はもともとの感度が低くきちんと地動が捉えているのかという疑問がある。また、低周波側では大気による引力の効果が大きくなっていくので、気圧の観測を並行して行なっている SG の利用価値は大きい。世界の SG による観測キャンペーンが始まり、データ交換によって他の観測点の連続記録が利用可能となりつつある。サブサイスマックバンドの地球ダイナミクス解明のために、これらのデータを解析して昭和基地と同様な信号が検出できるのか確かめる必要がある。本研究のような解析を行なうためには、質の高い観測を長期にわたって継続してデータを蓄積することが重要であることは言うまでもないが、観測された現象を解明するためには、グローバルな気圧・海洋データの取得が重要である。

5.3 新しい観測システムの構築を！

現在あるツールに頼るだけでなく、新しい観測システムの構築も考えていくべきであろう。常時地球自由振動は地球の未知のダイナミクスを表しているが、現在のグ

ローバル地震計ネットワークは、このような微弱な地球自由振動の観測には必ずしも適していない。それらの収録システムは、基本的に大振幅の表面波を飽和せずに記録するのに適した設計になっている。微弱な地球自由振動を高いS/N比で観測するのに最適化したシステムが望まれる。SGは高精度ではあるが、液体ヘリウム補充が必要なためIDAで用いられていたセンサーのように手軽に設置することはできない。小型で設置とメンテナンスが容易な超長周期上下動センサーを開発してネットワークを構築することを、ポスト広帯域地震計ネットワークのプロジェクトとして考えていく必要がある。また、振子を用いた水平動センサーでは水平加速度と傾斜の区別がつかないので、低周波部分の大きなノイズは本質的に避けがたい。水平動で常時自由振動を観測するためには、レーザー干渉を利用した高感度の伸縮計が最適であろう。

このように、常時地球自由振動をさらに精度よく観測するには新しいシステムを用いた観測を行なう必要がある。そのようなシステムは常時自由振動ばかりでなく、サブサイスマックバンドのコアアンダートーンやシュリヒターモードの観測にも適しているはずである。それらに加えて、未知の信号を発見する可能性もある。今後は、このような観測に基づいた測地学と地震学を融合するような新しい地球ダイナミクスの研究を強力に推し進めていくべきであろう。

5.4 惑星科学の新しい時代を切り開く可能性？

励起源を断定するまでにはさらなる証拠がためが必要であるが、もし、常時地球自由振動の励起が大気起源であるなら、テクトニックに不活発な火星や金星においても自由振動の観測の可能性はある。小林[57]の見積もりでは、大気擾乱によって地球と同程度の振幅で自由振動が励起されることが期待される。高感度な重力計（あるいは広帯域地震計）を設置して惑星の自由振動が観測できれば、惑星内部構造に関する新しい知見をもたらすであろう。これが実現したとき、惑星および太陽系進化の研究は飛躍的に進歩するに違いない。

6 付録

6.1 SG・IDA 各観測点の自由振動帯域のノイズレベル

各観測点の静穏期の記録を用いて、ノイズレベルの比較を行なった。

方法

SG 観測点についてはそれぞれの観測点で入手できたデータの期間が異なるため、それぞれの観測期間でもっとも静かな日を選んだ。IDA 観測点については、地震の影響の少ない共通の日を選んだ。具体的には、SG 観測点の場合、スペクトログラムから 2 から 5 mHz の周波数帯域でのパワーが小さいスペクトルを 5 本程度選び、さらに時系列を見てデータが地震や欠測などによって乱されている場合はそれを除去した。静穏期の 10 秒サンプリングで 3 日長のデータから計算したパワースペクトルを移動平均 (101 点平均) によってスムージングしたものをプロットした。IDA 観測点の場合、 5×10^{17} Nm 以上の地震モーメントを持つ地震のない共通の期間 (1978 年 11 月 20 日-24 日) を選び、SG と同様にスムージングしたパワースペクトルをプロットした。ただし、時系列が乱れている場合は、その日は除いた。

SG 観測点のノイズスペクトル

図 6-1-2~12 に各観測点のノイズスペクトルを示す。SG 観測点は昭和基地、江刺、キャンベラ、松代、フィンランド、また IDA 観測点は SUR(南アフリカ)、PFO(カリフォルニア)、KIP(ハワイ)、NNA(ペルー)、TWO(オーストラリア) である。各観測点、New Low Noise Model (NLNM) (Peterson, J., 1993 [80]) (図 6-1-1) と比較するためログスケールで示したスペクトル (IDA については SUR のみで、レスポンスの補正済) と、自由振動帯域 (1-10 mHz) を拡大して、パワーをリニアスケールで示したスペクトルを示す。なお、昭和基地と江刺については MODE 記録を用いていて、フィルタの補正は行っていない。

昭和基地 (1994) : 約 5.5 mHz の超伝導球の固有周期とその両サイド (約 3.5 mHz と約 7.5 mHz 付近) の高まりが目立つ。最も静かなとき、2-3 mHz あたりで $2 \times 10^{-18} \text{m}^2 \text{s}^{-3}$ である。

NLNM

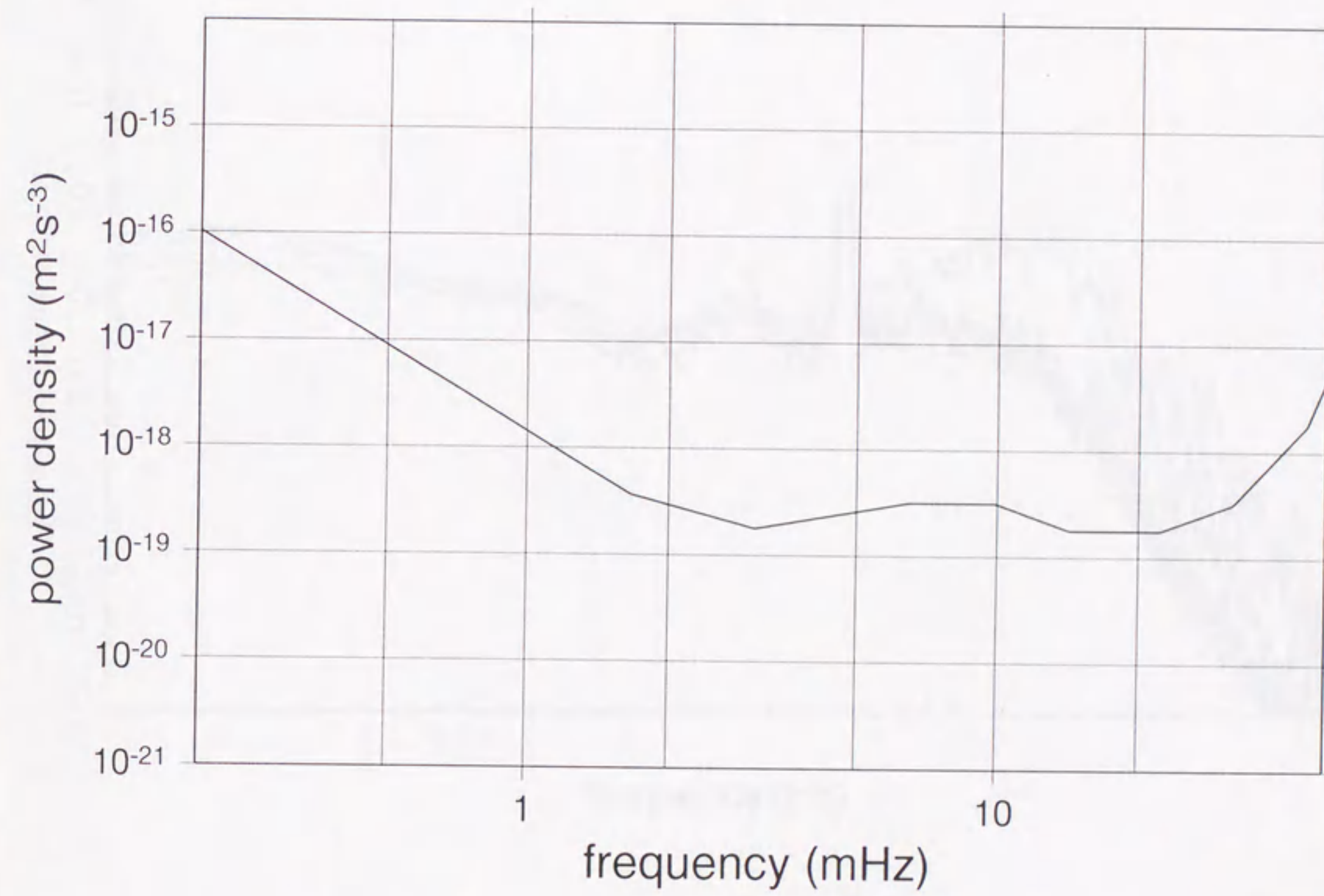


图 6 - 1 - 1 : New Low Noise Model (Peterson, J., 1993 [81]).

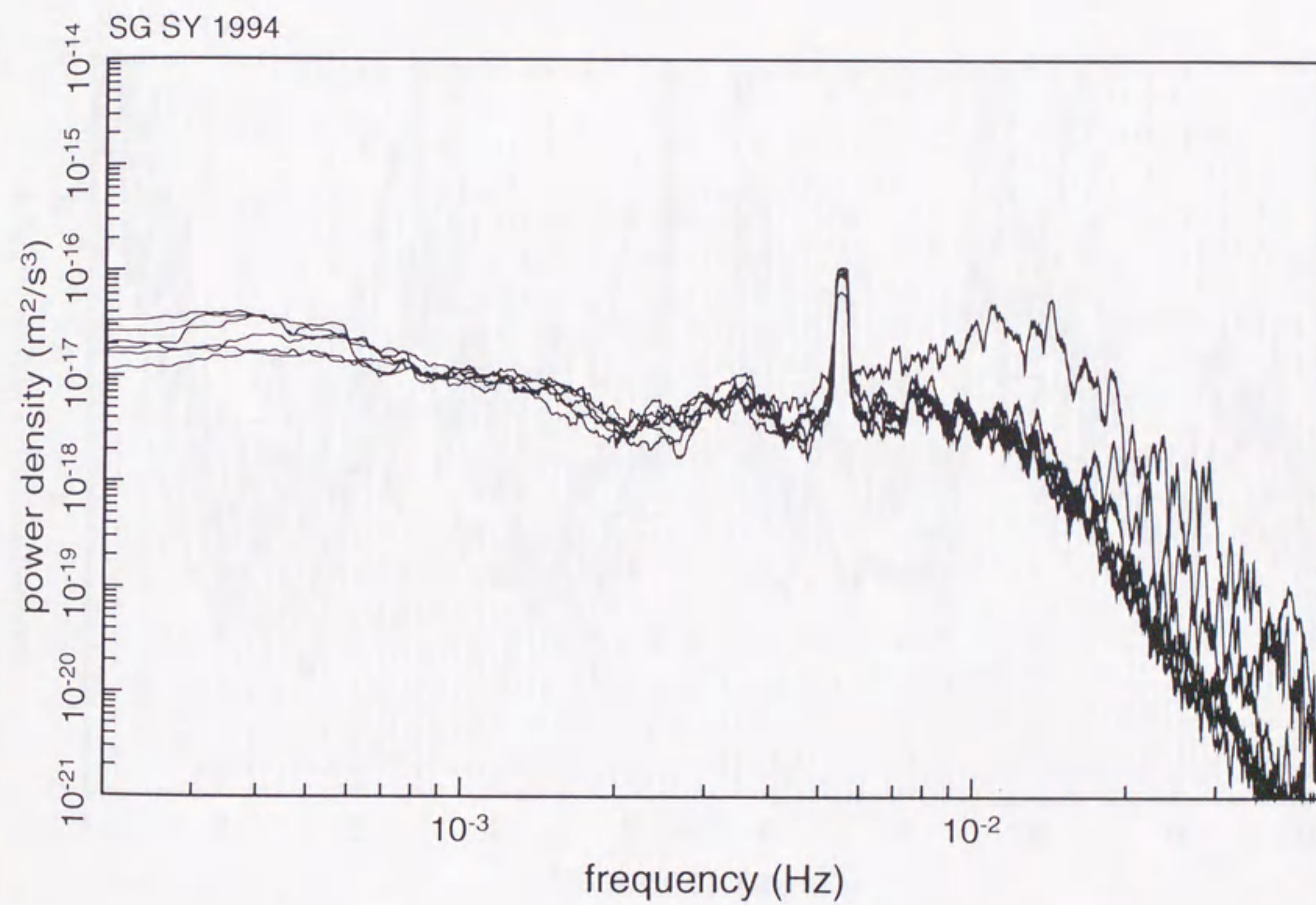


図 6 - 1 - 2 - a : SG SY 1994 静穏日のスペクトル (ログスケール)。
 静穏日は 1994/1/26, 1994/1/27, 1994/1/28, 1994/1/29, 1994/2/23, 1994/2/24.

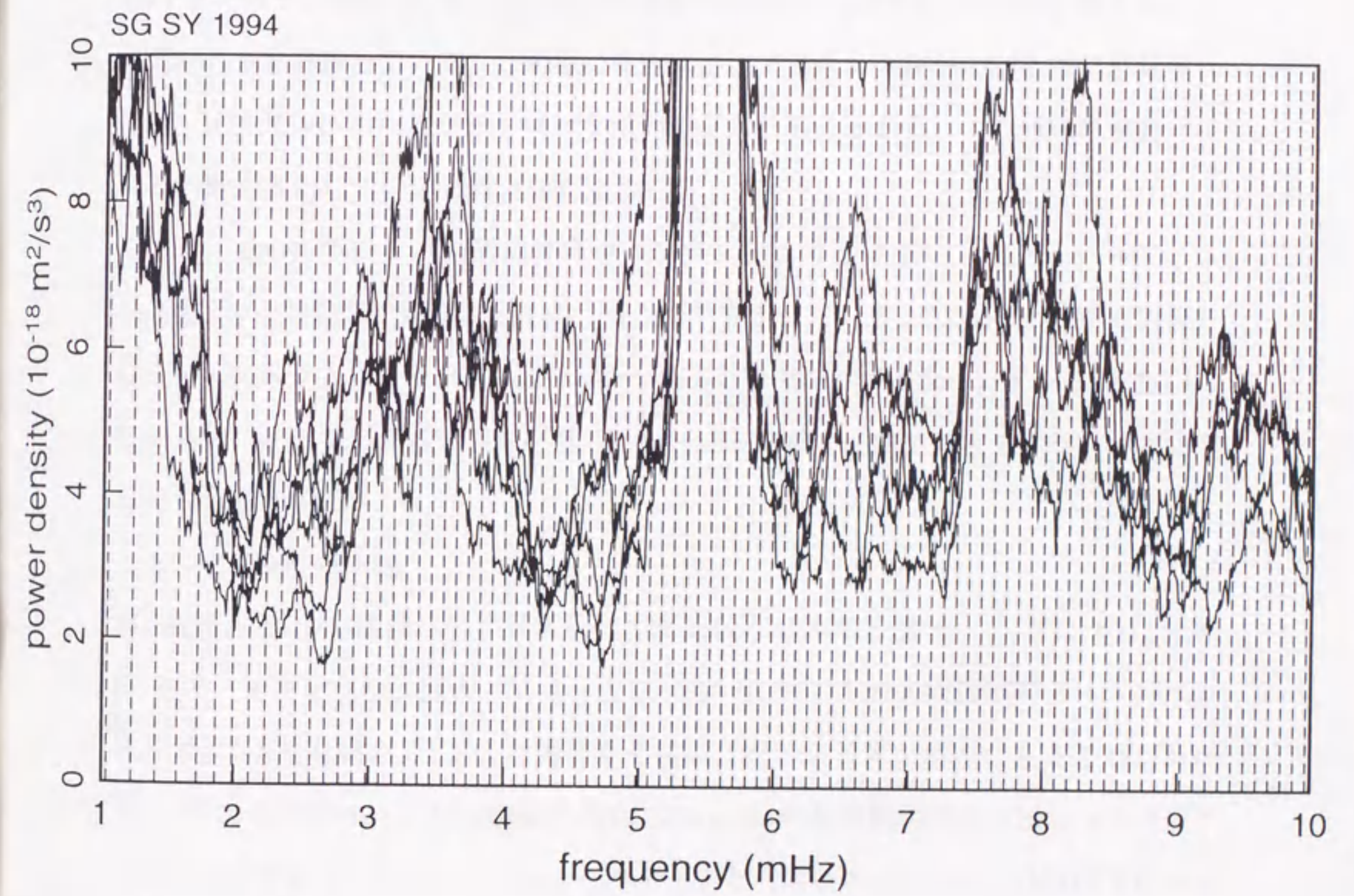


図 6 - 1 - 2 - b : SG SY 1994 静穏日のスペクトル (リニアスケール)。
 静穏日は 1994/1/26, 1994/1/27, 1994/1/28, 1994/1/29, 1994/2/23, 1994/2/24.

江刺 (1994) : 昭和基地のような系統的な高まりは見られないが、最も静かなときでも 2-10 mHz の周波数帯で約 $3-4 \times 10^{-18} \text{m}^2 \text{s}^{-3}$ と昭和基地よりもノイズレベルが高く、またプロファイルのばらつきを見てわかるように安定していない。

フィンランド (1995) : 昭和基地・江刺は MODE 記録を用いたが、このフィンランドと、あとのキャンベラ、松代については TIDE 記録を解析した。2-10 mHz の周波数帯で約 $2-4 \times 10^{-18} \text{m}^2 \text{s}^{-3}$ で安定している。

キャンベラ (1997 1-7) : 2-5 mHz の周波数帯で $2 \times 10^{-18} \text{m}^2 \text{s}^{-3}$ 程度で最も低いノイズレベルを達成している。短周期になるほど、ノイズレベルがあがる傾向が見られるが、IDA TWO の解析からも同様な傾向が見られることから、この地域の地動ノイズの特性を表わしていると考えられる。

松代 (1997 7-9) : この期間ではフィンランドよりやや低いノイズレベルで、2-10 mHz の周波数帯で約 $2-3 \times 10^{-18} \text{m}^2 \text{s}^{-3}$ で安定している。2-5 mHz の周波数帯では、キャンベラよりもやや高い。フィンランド、キャンベラ、松代いずれの観測点も、昭和基地に比べてノイズレベルが低く、3-4 mHz で特に振幅が大きくなるという傾向は見られなかった。

SG と IDA の比較

SG 観測点と IDA 観測点のノイズレベルと比較してみる。図 6-1-7 に 1994 年の SUR のノイズレベル、図 6-1-8~12 に 1978 年の IDA の各観測点のノイズレベルを示す。NNA を除いて、SG と同等かそれより低いノイズレベルであることがわかる。特に、SUR(1994)、PFO(1978) では 2-10 mHz の周波数帯で $2 \times 10^{-18} \text{m}^2 \text{s}^{-3}$ 以下であった。先に述べたようにキャンベラの SG と TWO の LR では、ほぼ同等なノイズレベルであり、この周波数帯ではセンサーとしての差はあまりないように見える。

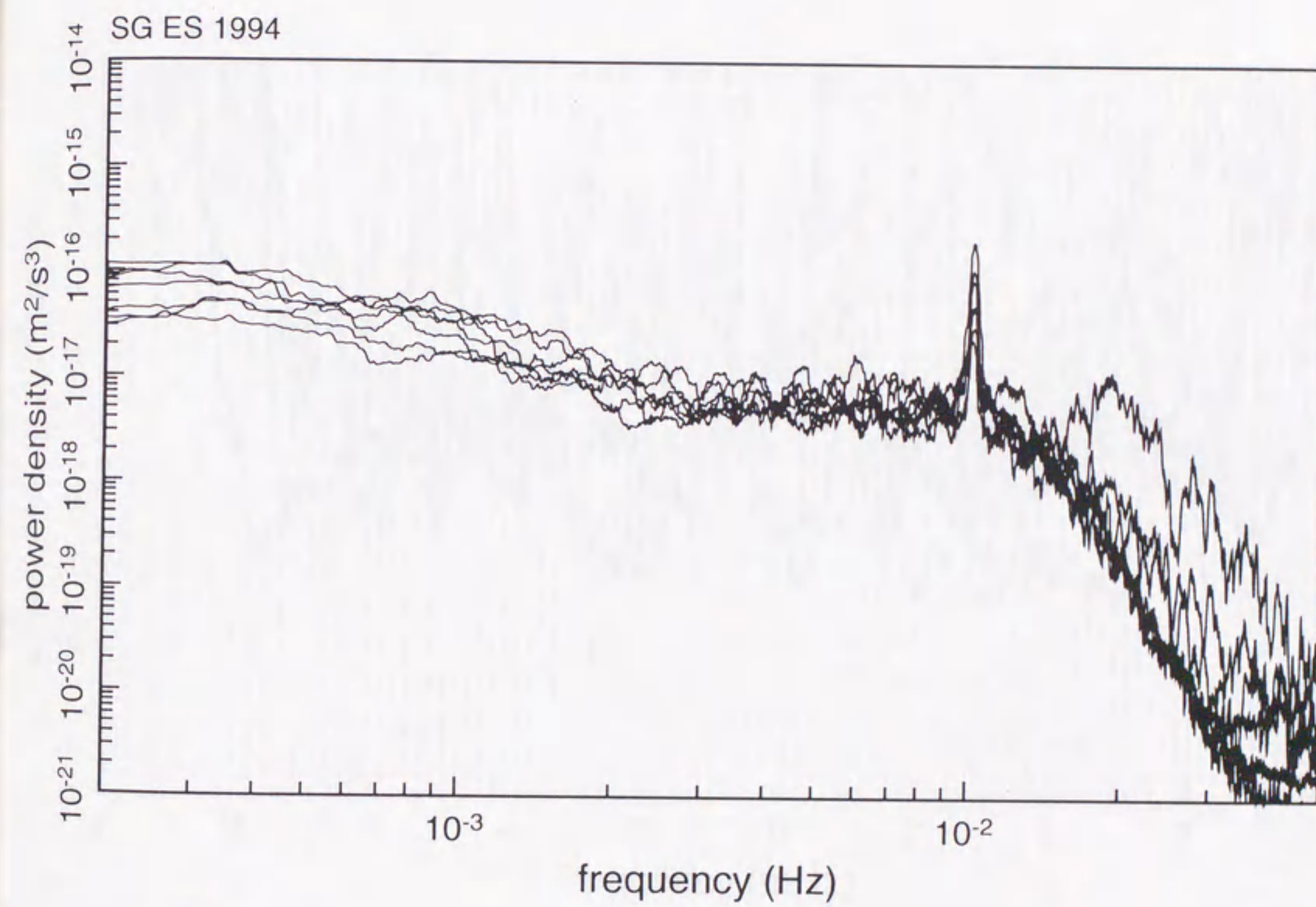


図 6 - 1 - 3 - a : SG ES 1994 静穏日のスペクトル (ログスケール). 静穏日は
1994/6/19, 1994/6/20, 1994/6/24, 1994/7/15, 1994/7/16, 1994/7/17, 1994/7/19.

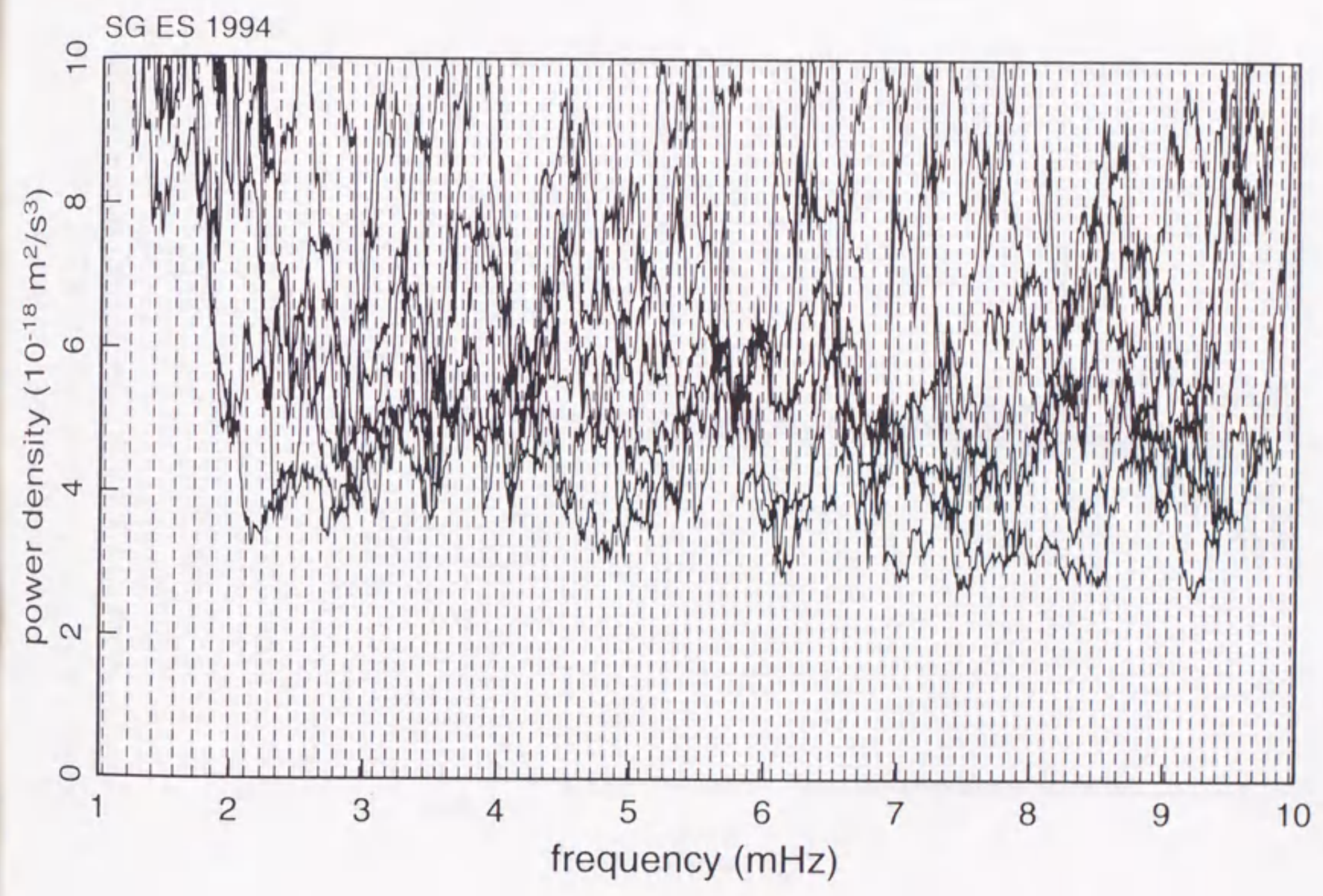


図 6 - 1 - 3 - b : SG ES 1994 静穏日のスペクトル (リニアスケール) . 静穏日は
1994/6/19, 1994/6/20, 1994/6/24, 1994/7/15, 1994/7/16, 1994/7/17, 1994/7/19.

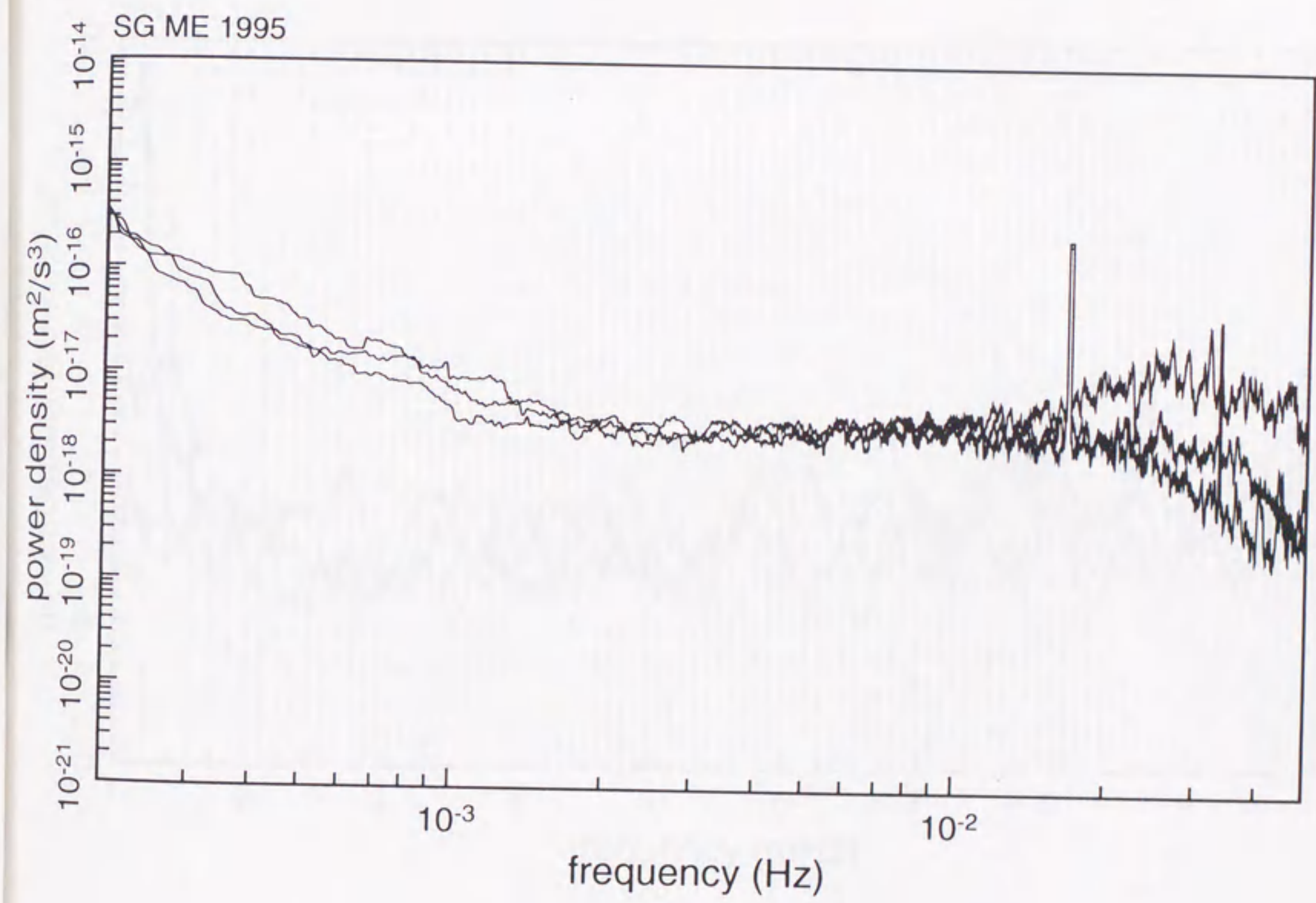


図 6 - 1 - 4 - a : SG ME 1995 静穏日のスペクトル (ログスケール).
静穏日は 1995/6/5, 1995/8/20, 1995/9/11.

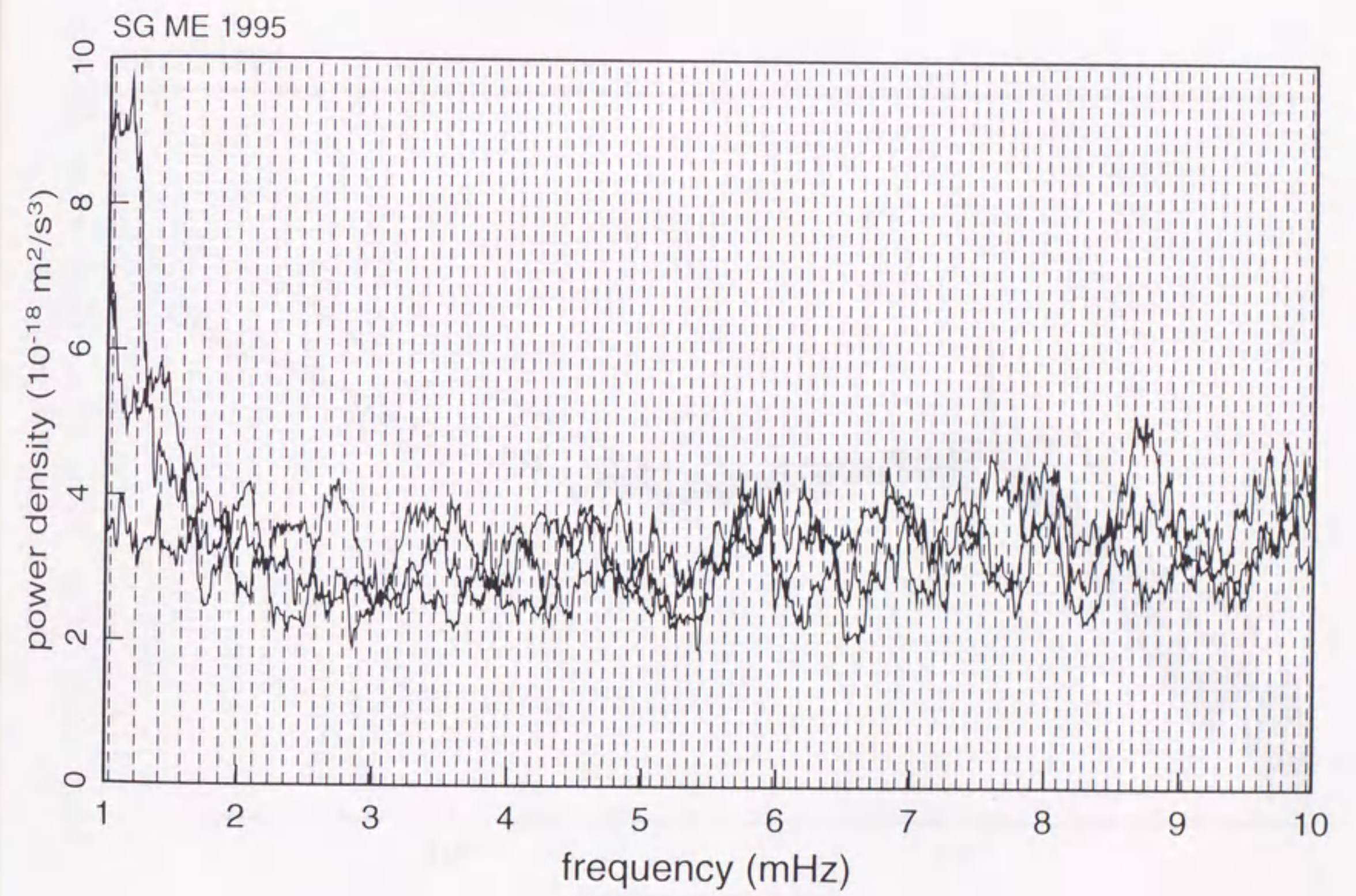


図 6 - 1 - 4 - b : SG ME 1995 静穏日のスペクトル (リニアスケール) .

静穏日は 1995/6/5, 1995/8/20, 1995/9/11.

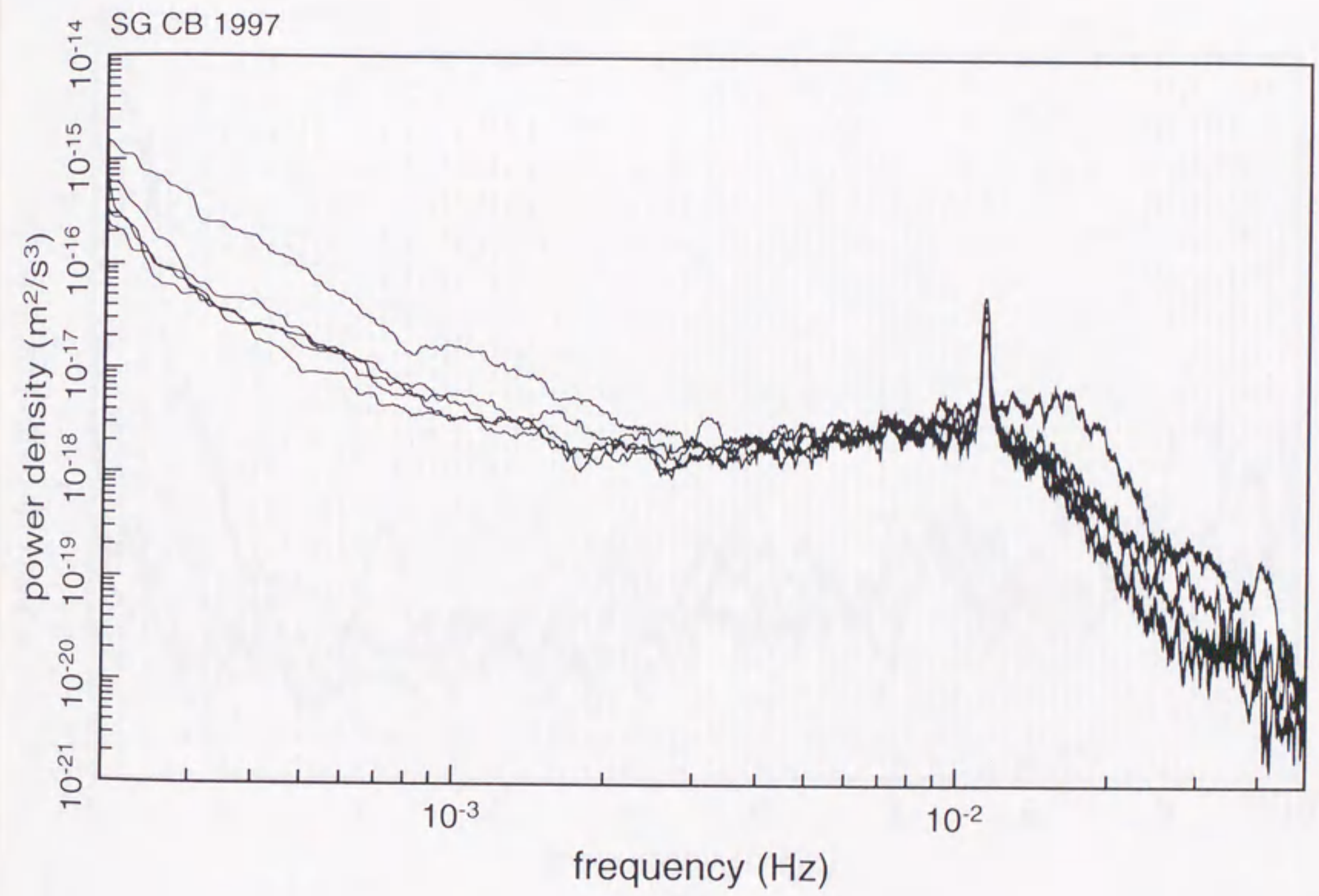


図 6 - 1 - 5 - a : SG CB 1997/1-7 静穏日のスペクトル (ログスケール) .

静穏日は 1997/5/18, 1997/6/5, 1997/6/18, 1997/7/11, 1997/7/12.

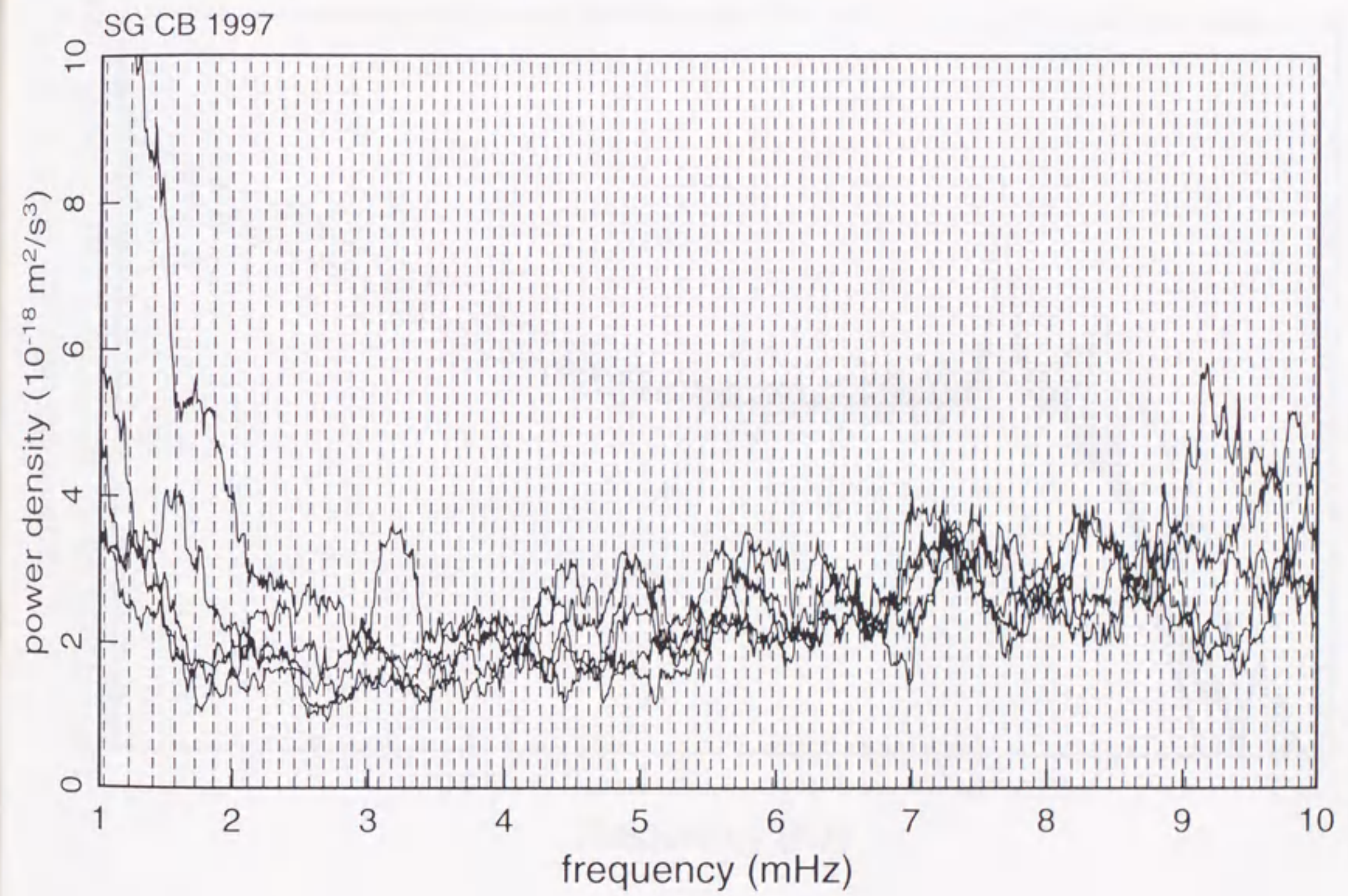


図 6 - 1 - 5 - b : SG CB 1997/1-7 静穏日のスペクトル (リニアスケール) .

静穏日は 1997/5/18, 1997/6/5, 1997/6/18, 1997/7/11, 1997/7/12.

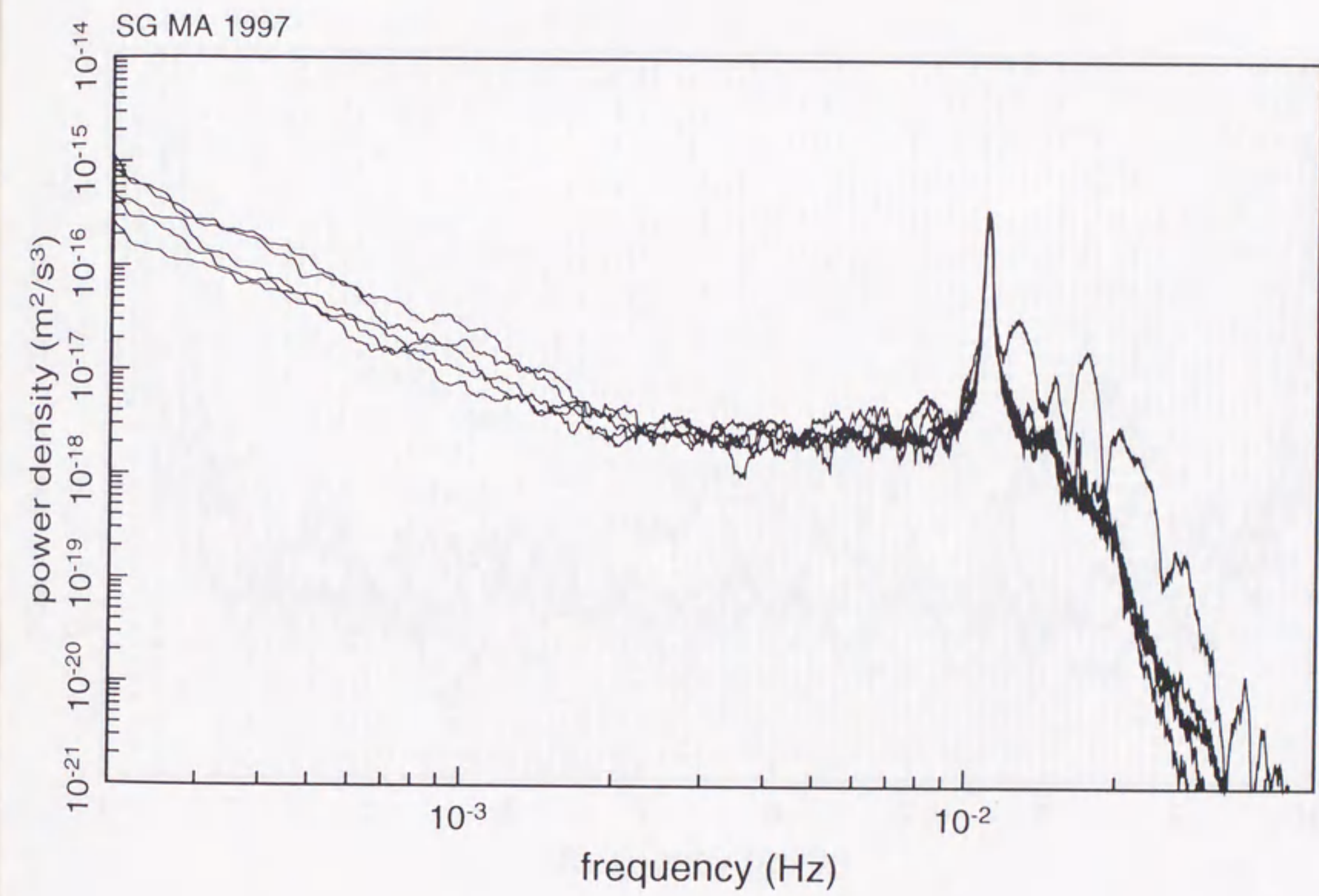


図 6 - 1 - 6 - a : SG MA 1997/7-9 静穏日のスペクトル (ログスケール) .

静穏日は 1997/7/2, 1997/7/16, 1997/7/22, 1997/7/30, 1997/9/13.

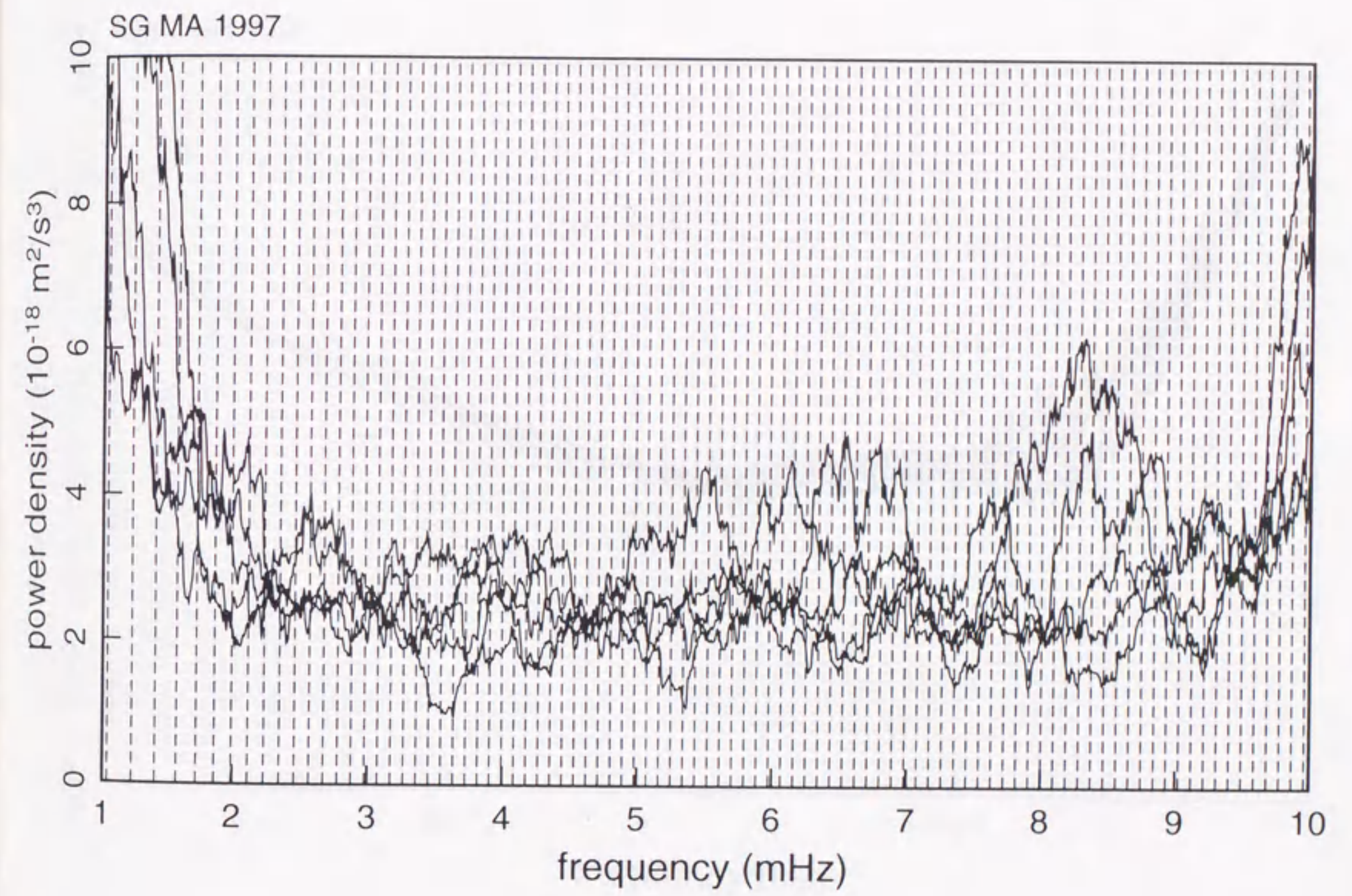


図 6 - 1 - 6 - b : SG MA 1997/7-9 静穏日のスペクトル (リニアスケール) .

静穏日は 1997/7/2, 1997/7/16, 1997/7/22, 1997/7/30, 1997/9/13.

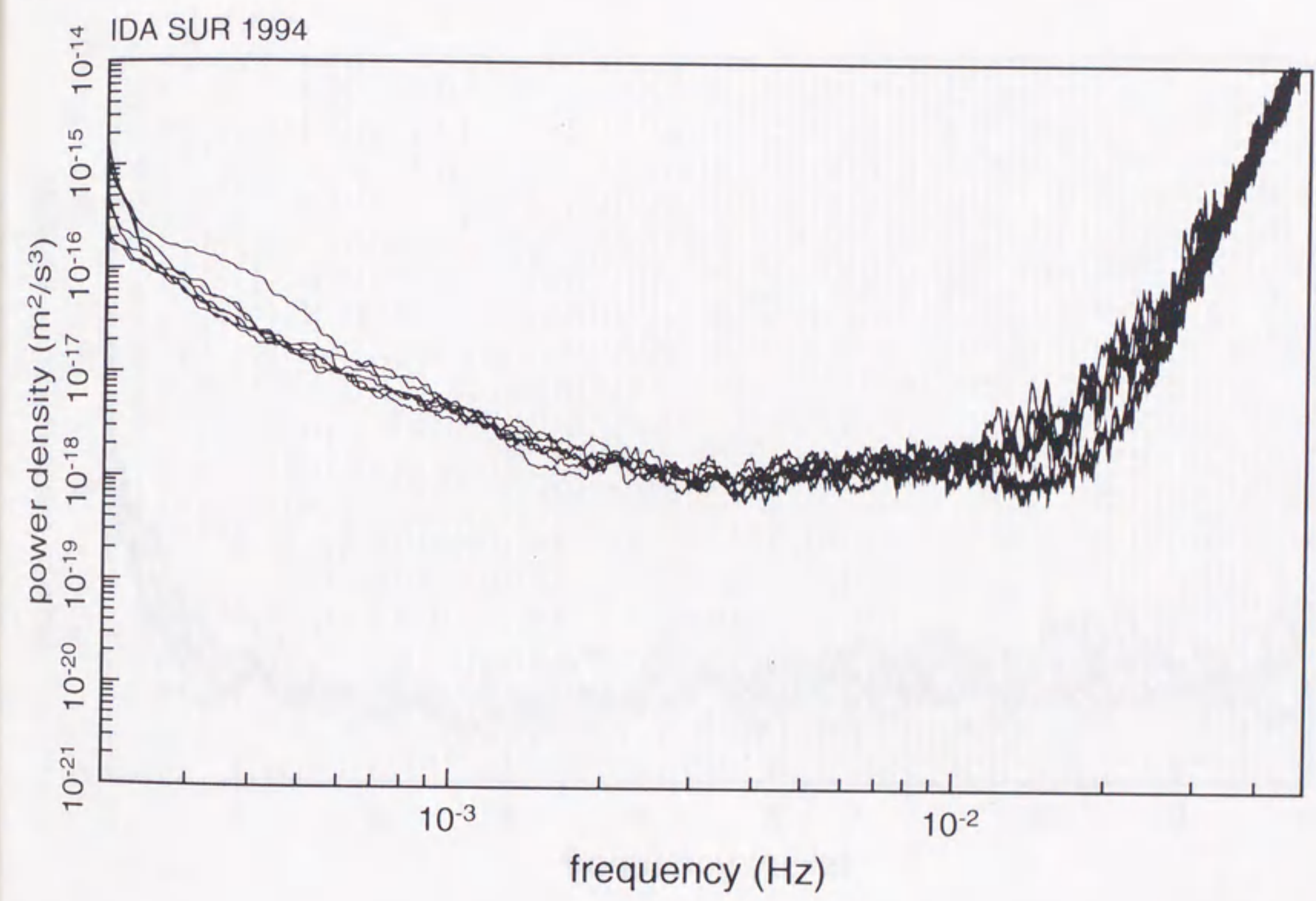
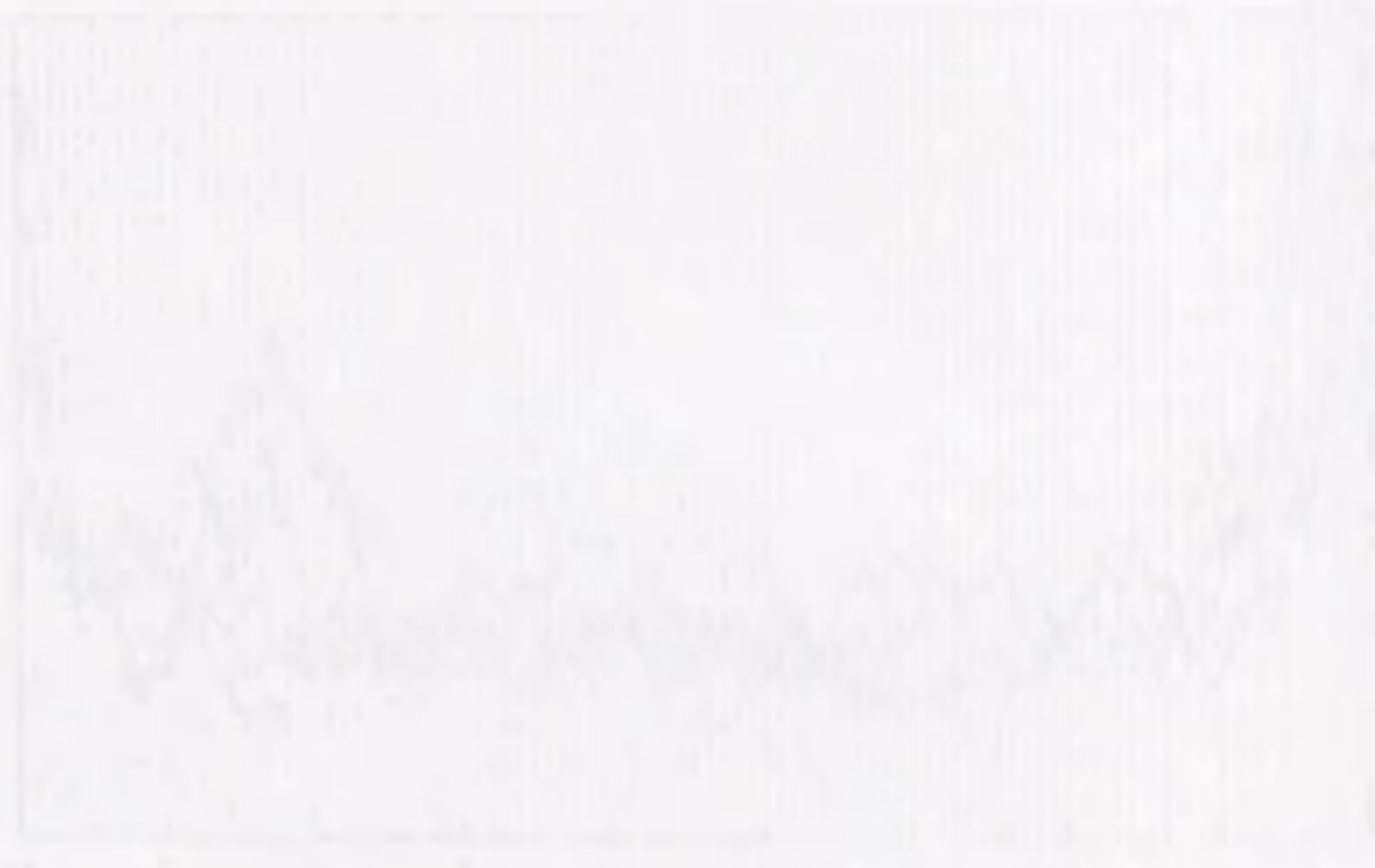


図 6 - 1 - 7 - a : IDA SUR 1994 静穏日のスペクトル (ログスケール). 静穏日は
1994/3/27, 1994/3/28, 1994/3/29, 1994/3/30, 1994/4/2, 1994/4/9, 1994/4/10.

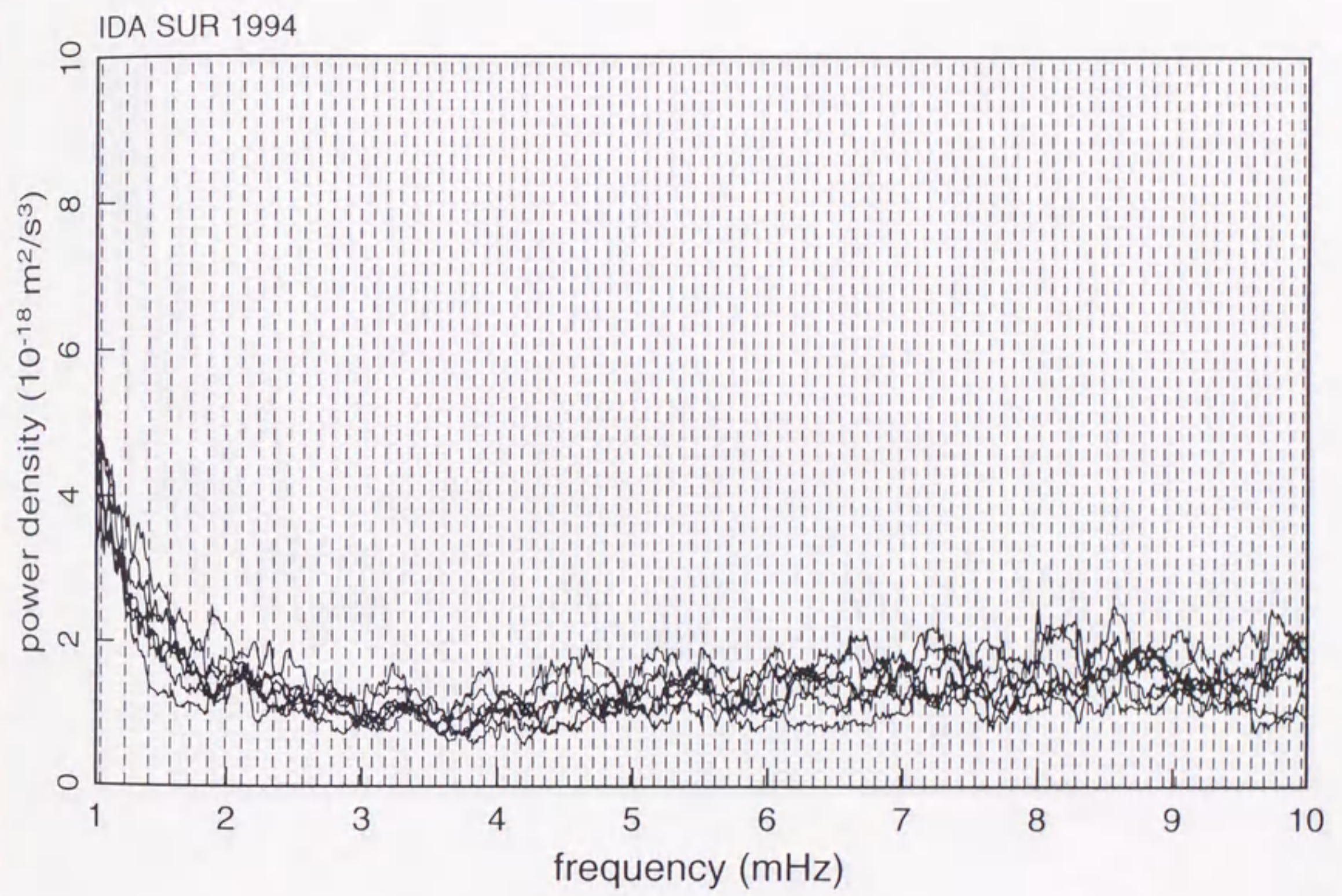


図 6 - 1 - 7 - b : IDA SUR 1994 静穏日のスペクトル (リニアスケール). 静穏日は 1994/3/27, 1994/3/28, 1994/3/29, 1994/3/30, 1994/4/2, 1994/4/9, 1994/4/10.

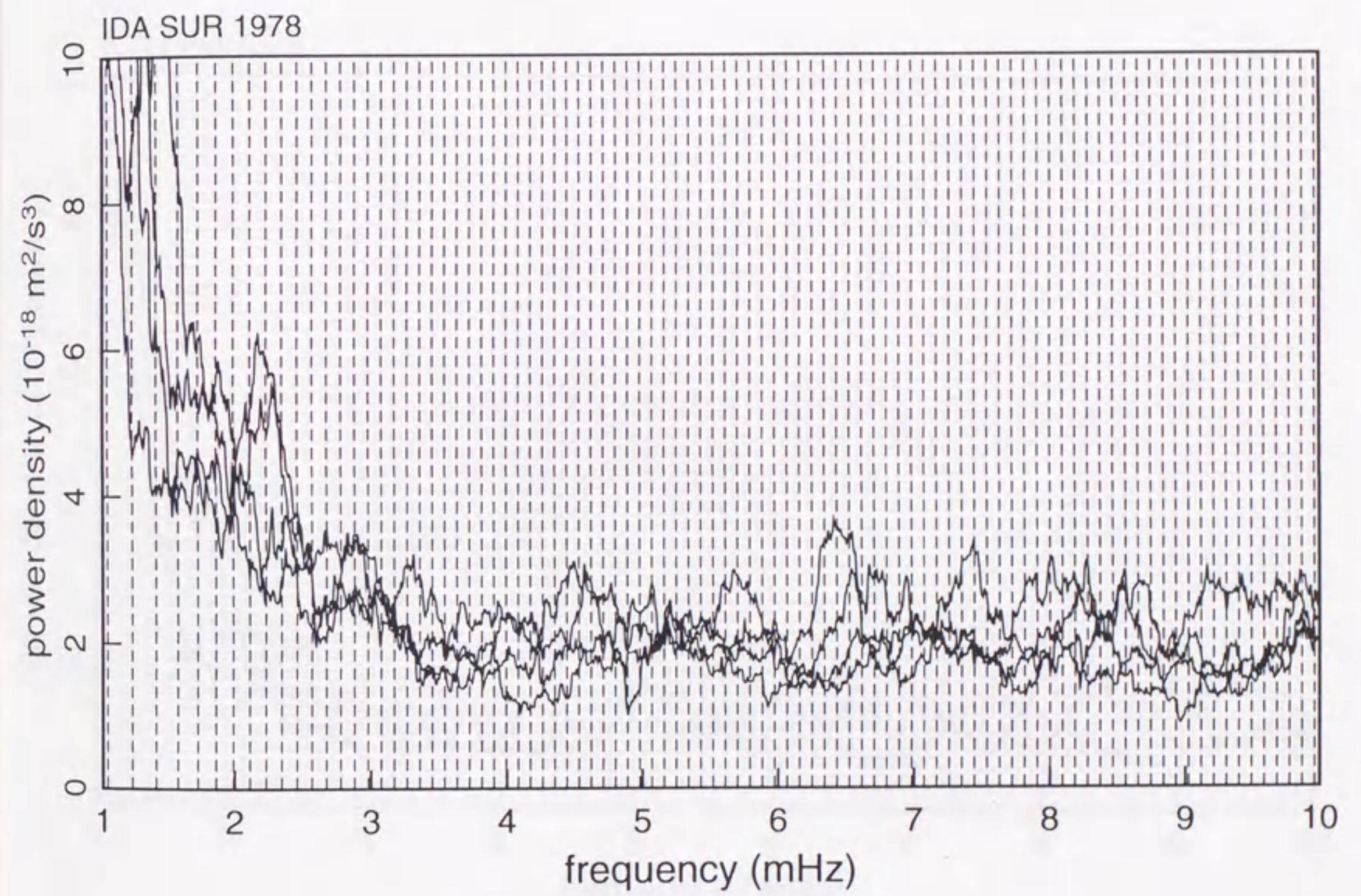


図 6 - 1 - 8 : IDA SUR 1978 静穏日のスペクトル.

静穏日は 1978/11/21, 1978/11/22, 1978/11/23, 1978/11/24.

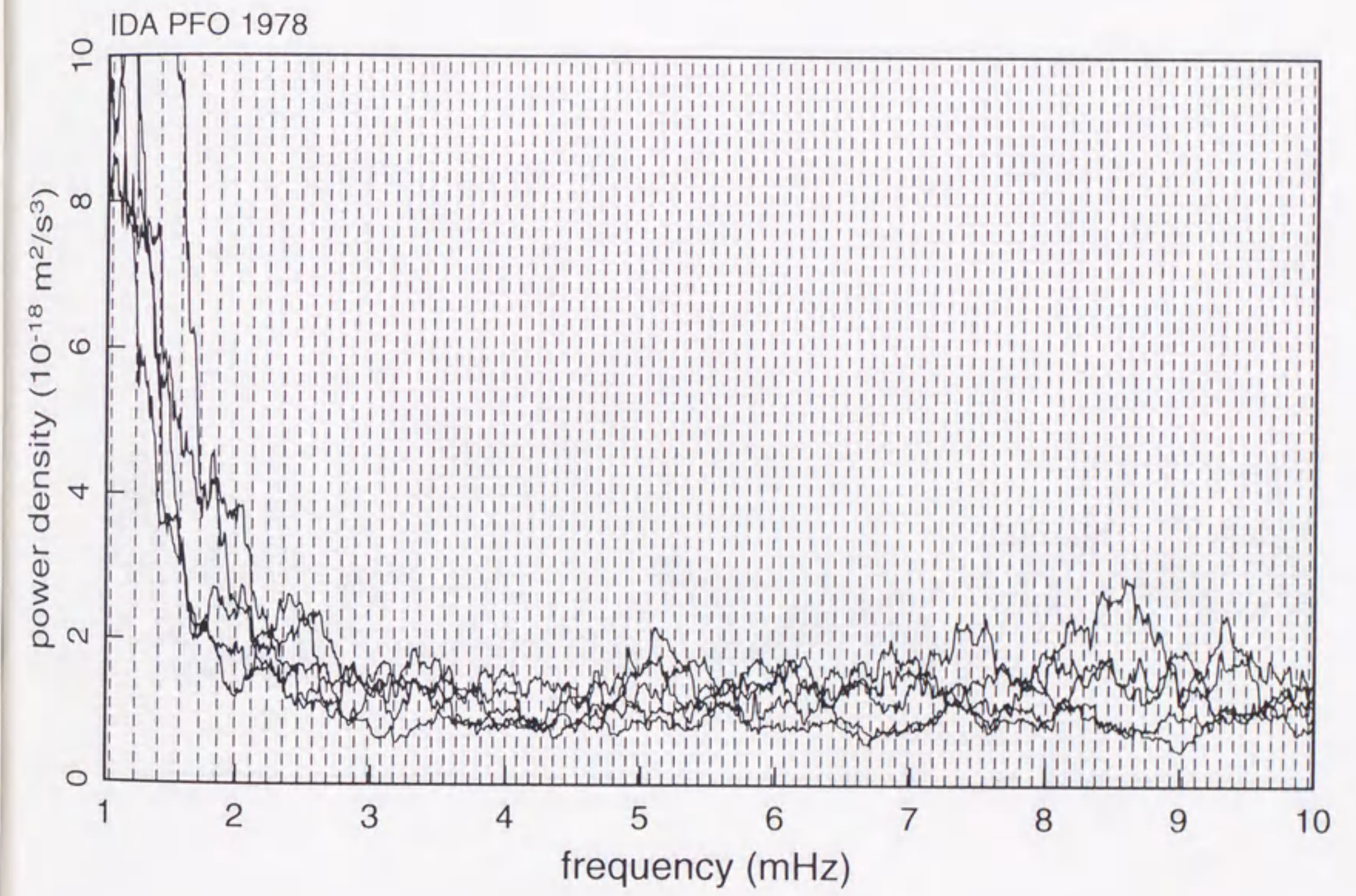


図 6 - 1 - 9 : IDA PFO 1978 静穏日のスペクトル.

静穏日は 1978/11/20, 1978/11/21, 1978/11/22, 1978/11/23, 1978/11/24.

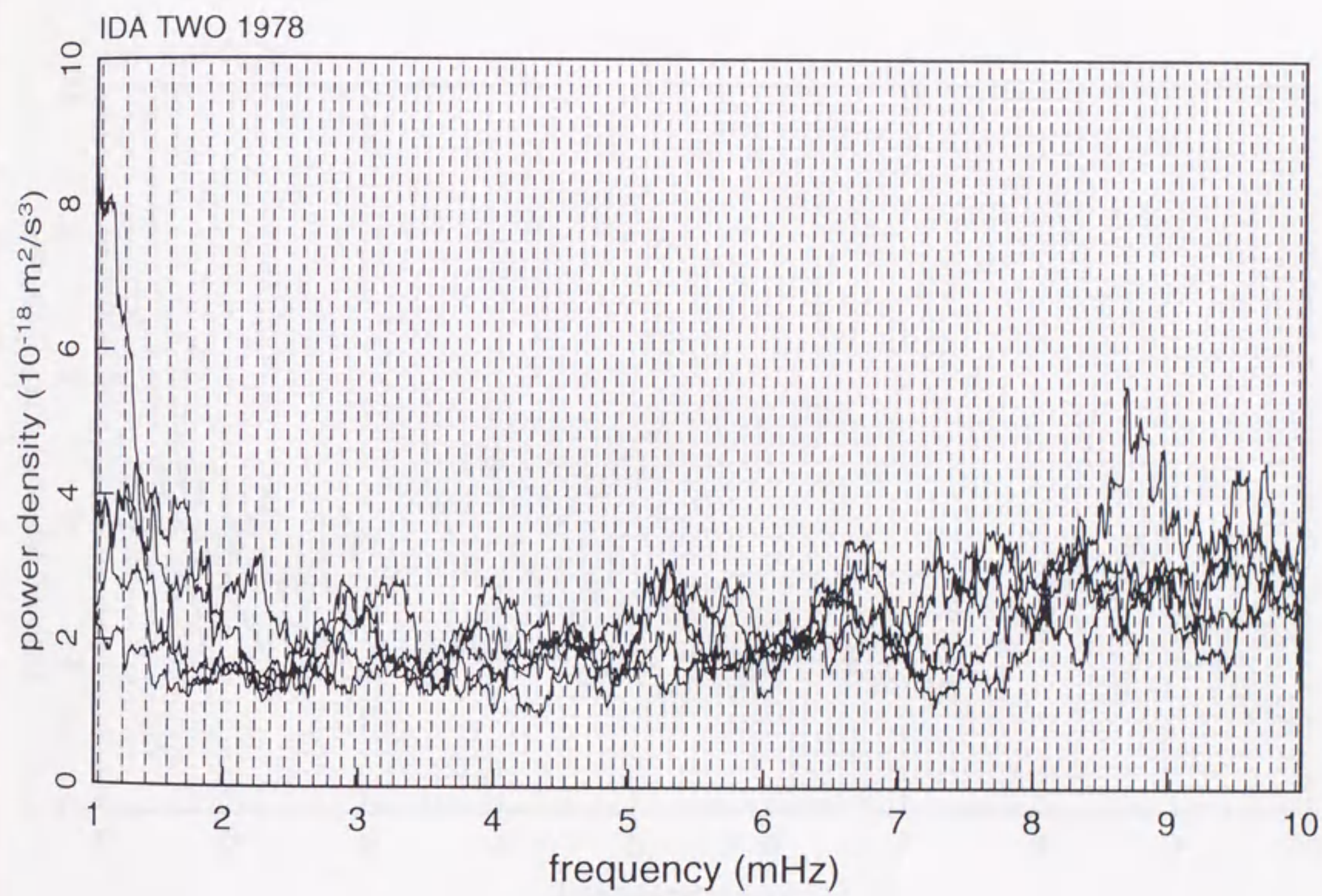


図 6 - 1 - 10 : IDA TWO 1978 静穏日のスペクトル.
 静穏日は 1978/11/20, 1978/11/21, 1978/11/22, 1978/11/23, 1978/11/24.

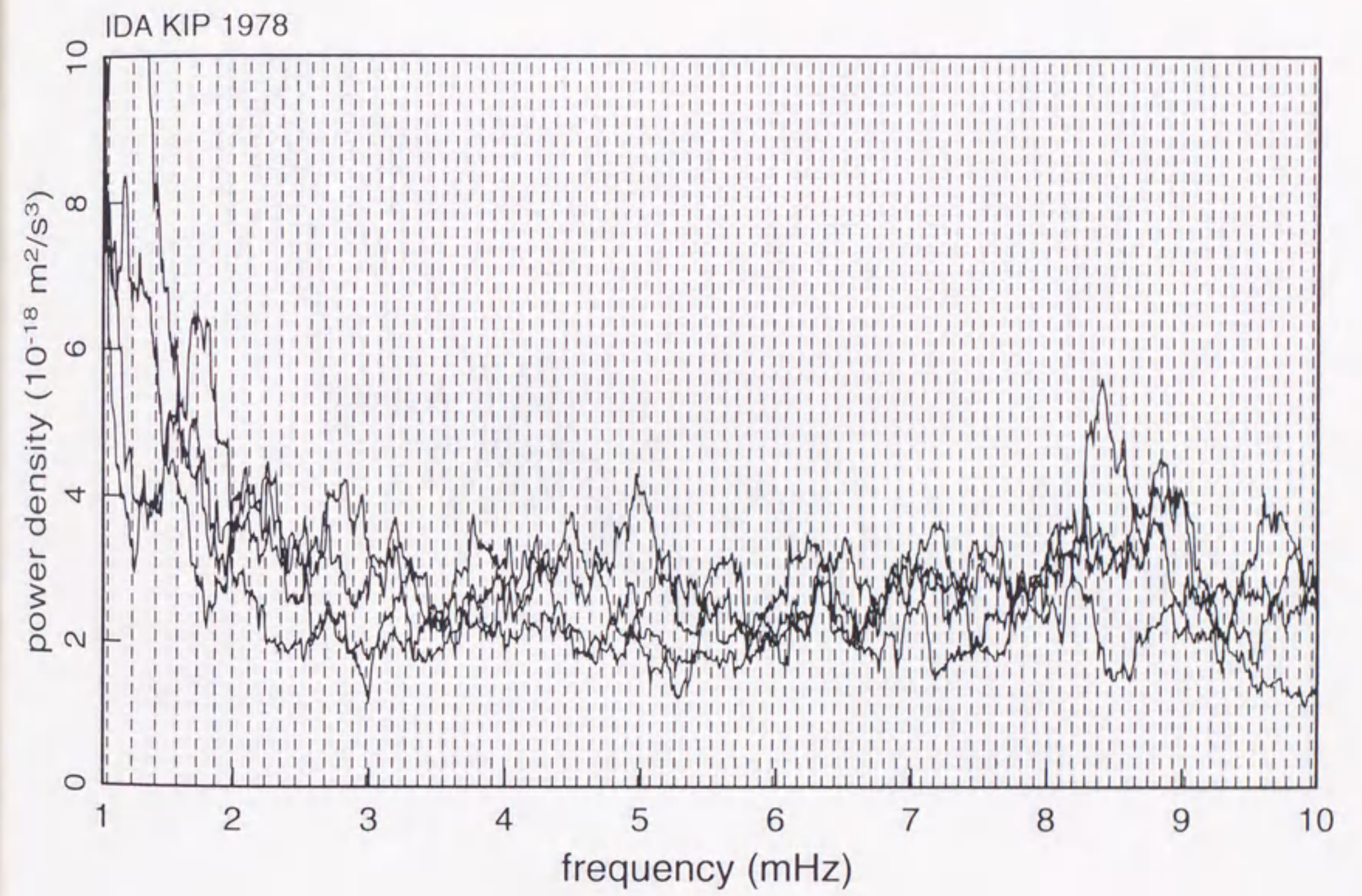


図 6 - 1 - 11 : IDA KIP 1978 静穏日のスペクトル.
静穏日は 1978/11/21, 1978/11/22, 1978/11/23, 1978/11/24.

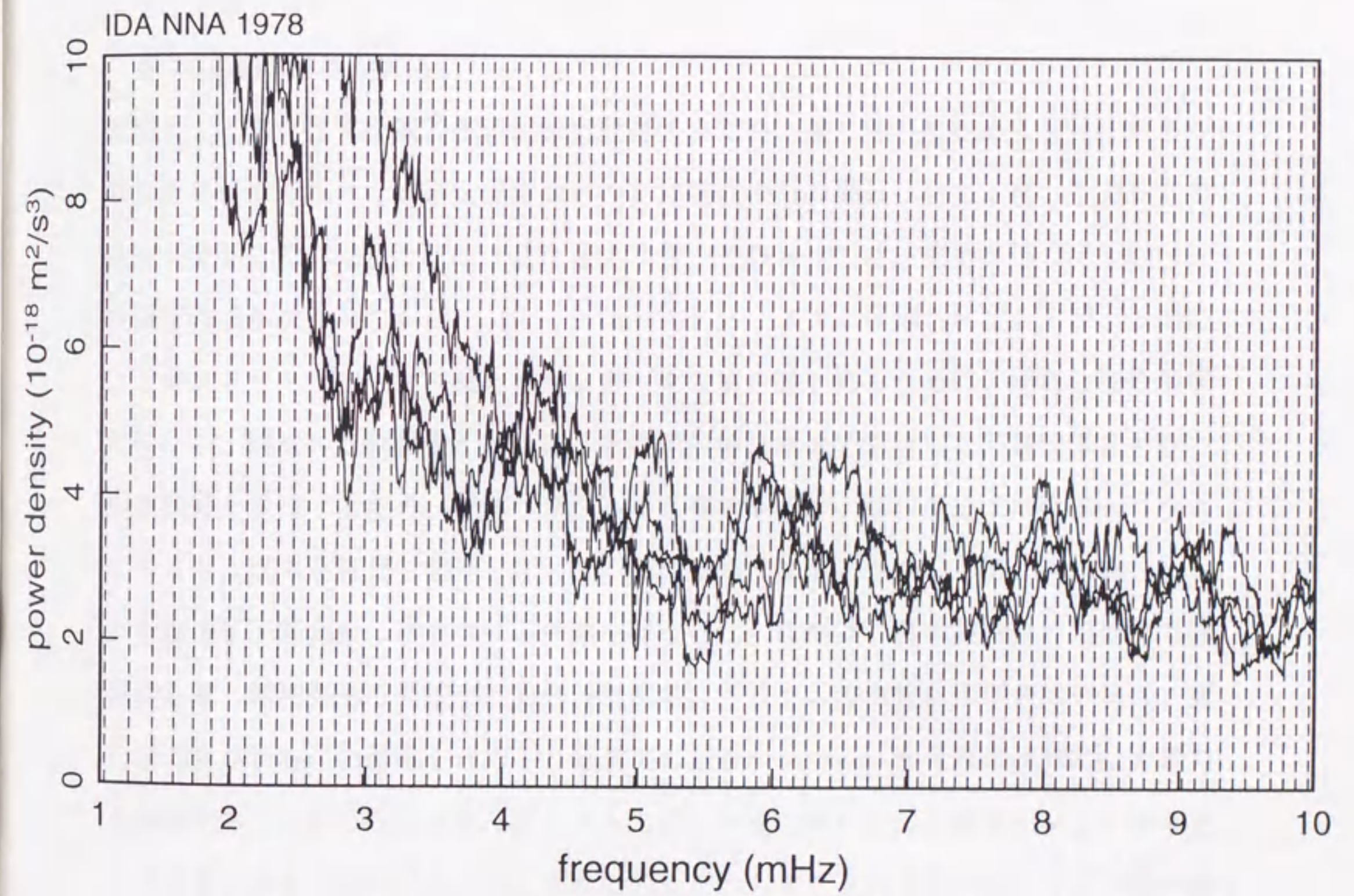


図 6 - 1 - 12 : IDA NNA 1978 静穏日のスペクトル.
静穏日は 1978/11/21, 1978/11/22, 1978/11/23, 1978/11/24.

6.2 第35次日本南極地域観測隊（地球物理部門）での越冬観測

南極観測隊での観測業務

第35次越冬観測については、「日本南極地域観測隊第35次隊報告」[59]に詳しく報告されている。私は地球物理部門を担当し、超伝導重力計およびラコスト重力計という2種類の重力計による重力連続観測、3種類の地震計による地震観測、海洋潮汐観測に従事した。夏期観測として、「しらせ」船上での重力観測も担当したが、ここでは詳しく述べない。

重力観測に関わる業務

欠測なく、また良質な重力連続記録を取得するため、重力計の監視および保守が1つの重要な任務であった。超伝導重力計の動作確認のため最低3日に1度、重力計室の見回りをおこなった。たびたび訪れるブリザード襲来後には、重力計室の出入口付近の除雪作業が欠かせなかった。データはハードディスクに収録されているが、1か月に1度ストリーマテープに落とした。データの質を確かめるために、即時に潮汐解析を行ない、観測の月例報告とともに、その潮汐解析結果を報告した。超伝導重力計の観測状態を維持するため、液体ヘリウムが必要であるが、昭和基地では液体ヘリウムはヘリウムガスを液化し製造している。昭和基地では夏と冬の年2回、約100リットルを製造し、重力計に移充填する作業を行なった。これは、日本国内含めた世界の観測点と違う昭和基地での観測の特殊性である。ヘリウムの液化および充填作業は、液化器の真空引などの準備を含め10日前後の日数がかかる。液化器の運転には大電力を使用する。基地の発電容量は限られるため、衛星受信など他の観測予定などを考慮して作業を行なう必要があった。それにもかかわらず、電力需要が増える夏作業の繁忙期には、液化作業中にブレーカトリップによる停電が起きてしまった。液化作業中、ヘリウム液化装置から大量の熱が排出されるため室温は高温になることがある。この期間、観測データは作業による振動によるノイズに加え、温度変化や室温を下げるための換気による擾乱を受ける。データ解析・結果の解釈の際にはこのことに注意する必要がある。

その他の観測業務

重力観測に関わる業務に加え、STS・PELS・HES 地震計による地震観測、海洋潮汐観測、DORIS ビーコン観測の維持に携わった。地震の定常観測では、STS による広帯域デジタル波形データの取得のほか、毎日 HES・PELS 地震計の波形の紙記録から地震波の到達時刻や継続時間などを読み取り、毎週極地研究で験震報告を行なった。STS・PELS・HES 地震計による地震観測の概要は 金尾・神沼 (1993) [50], Kanao and Kaminuma (1994) [51] に詳しく記されている。35 次隊の地震観測については、STS 波形記録とともに Nawa and Kanao (1996) [74] によって報告されている。また、昭和基地の西の浦に設置されている験潮儀による潮位データからは、毎月、月表を作成し海上保安庁水路部に報告した。重力計室の隣にある 11m 多目的パラボラアンテナを使って VLBI 実験が行なわれたり、36 次隊では GPS 連続観測が開始されるなど、昭和基地は「汎地球現象観測所」としての役割を高めつつある。(渋谷, 1991 [102]; Shibuya, 1993 [103]) 少なくとも日本国内には、1 km 四方にこれだけの観測機器が集中し、また、定常的にデータを取得している観測点はない。

計算機環境の向上とデータ通信実験

35 次隊では地震データ編集用にワークステーション (WS) を持ち込み、計算機システムの拡充を行なった。地学棟内で WS を立ち上げ、これまでデータ編集などに使われていたパソコンとマルチポートトランシーバーを介して IP 接続し、地学棟内 LAN を構成した。STS 地震波形デジタルデータの編集のほか、超伝導重力計・ラコスト重力計のデータ編集や潮汐解析などの計算も UNIX OS 上で行なうことが可能になった。また、データの迅速な流通を目指して、日本国内 (極地研究所) とのデータ通信 (UUCP) 実験にも携わった (金尾ほか, 1995 [53])。'94 年 6 月のポリビア巨大深発地震や '95 年 1 月の兵庫県南部地震といったイベントの波形データの伝送のほか、毎月の重力潮汐記録の伝送、それまで FAX で行なっていた毎週の験震報告に利用することを可能にした。昭和基地から日本へのデータ伝送だけでなく、日本から昭和基地へは USGS による地震速報データが伝送され、験震の見直しや験震精度の向上に役立てることができた。

参考文献

- [1] 青山雄一, 南極昭和基地の超伝導重力計観測データを使った極運動の解析, 金沢大学, 修士論文, 1997.
- [2] 青山雄一・名和一成・山本宏章・村上亮・新田浩・土井浩一郎・渋谷和雄・佐藤忠弘, 南極昭和基地における絶対重力計 (FG-5) による超伝導重力計の検定, 日本測地学会講演要旨, 43-44, 1997.
- [3] Agnew, D. C. and Berger, J., Vertical seismic noise at very low frequencies, *J. Geophys. Res.*, **83**, 5420-5424, 1978.
- [4] Agnew, D. C., Berger, J., Farrell, W. E., Gilbert, J. F., Masters, G. and Miller, D., Project IDA: A decade in review., *EOS* **67** (16), 203-212, 1986.
- [5] Benioff, H., Harrison, J. C., LaCoste, L., Munk, W. H., and Slichter, L. B., Searching for the Earth's free oscillations, *J. Geophys. Res.*, **64**, 1334-1337, 1959.
- [6] Benioff, H., Press, F., and Smith, S., Excitation of the free oscillations of the earth by earthquakes, *J. Geophys. Res.*, **66**, 605-619, 1961.
- [7] Beroza, G. and Jordan, T., Searching for slow and silent earthquakes using free oscillations, *J. Geophys. Res.*, **95**, 2485-2510, 1990.
- [8] Buland, R., J. Berger, and F. Gilbert, Observations from the IDA network of attenuation and splitting during a recent earthquake, *Nature*, **277**, 358-362, 1979.
- [9] Crossley, D. J., Rochester, M. G., and Peng, Z., Slichter modes and Love numbers, *Geophys. Res. Lett.*, **19**, 1679-1682, 1992.
- [10] Crossley, D., Jensen, O., Xu, H., and Hinderer, J., A slew rate detection criterion applied to SG data processing, *Bull. Int. Maréss Terrestres*, **117**, 8675-8704, 1993.
- [11] Crossley, D. and Hinderer, J., Global Geodynamics Project - GGP: Status report 1994. In proc. Second IAG Workshop on non-tidal gravity changes: Intercomparison between absolute and superconducting gravimeters, Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, Luxemburg, 11, 244-274, 1995.
- [12] Cummins, P., Wahr, J. M., Agnew, D. C. and Tamura, Y., Constraining core undertones using stacked IDA gravity records, *Geophys. J. Int.*, **106**, 189-198, 1991.

- [13] Donn, William L. and Posmentier, Eric S., Ground-coupled air waves from the great Alaskan earthquake, *J. Geophys. Res.*, **69**, 5357-5361, 1964.
- [14] Dziewonski, A. M. and D. L. Anderson, Preliminary reference Earth model (PREM), *Phys. Earth Planet. Inter.*, **25**, 297-356, 1981.
- [15] Dziewonski, A. M., G. Ekström, and M. P. Salganik, Centroid-moment tensor solutions for January-March 1993, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **82**, 9-17, 1994a.
- [16] Dziewonski, A. M., G. Ekström, and M. P. Salganik, Centroid-moment tensor solutions for April-June 1993, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **83**, 1-11, 1994b.
- [17] Dziewonski, A. M., G. Ekström, and M. P. Salganik, Centroid-moment tensor solutions for July-September 1993, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **83**, 165-174, 1994c.
- [18] Dziewonski, A. M., G. Ekström, and M. P. Salganik, Centroid-moment tensor solutions for October-December 1993, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **85**, 215-225, 1994d.
- [19] Dziewonski, A. M., G. Ekström, and M. P. Salganik, Centroid-moment tensor solutions for January-March 1994, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **86**, 253-261, 1994e.
- [20] Dziewonski, A. M., G. Ekström, and M. P. Salganik, Centroid-moment tensor solutions for April-June 1994, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **88**, 69-78, 1995a.
- [21] Dziewonski, A. M., G. Ekström, and M. P. Salganik, Centroid-moment tensor solutions for July-September 1994, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **90**, 1-11, 1995b.
- [22] Dziewonski, A. M., G. Ekström, and M. P. Salganik, Centroid-moment tensor solutions for October-December 1994, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **91**, 187-201, 1995c.
- [23] Dziewonski, A. M., G. Ekström, and M. P. Salganik, Centroid-moment tensor solutions for January-March 1995, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **93**, 147-157, 1996a.
- [24] Dziewonski, A. M., G. Ekström, and M. P. Salganik, Centroid-moment tensor solutions for April-June 1995, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **96**, 1-13, 1996b.
- [25] Dziewonski, A. M., G. Ekström, and M. P. Salganik, Centroid-moment tensor solutions for July-September 1995, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **97**, 3-13, 1996c.

- [26] Dziewonski, A. M., G. Ekström, and M. P. Salganik, Centroid-moment tensor solutions for October-December 1995, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **101**, 1-12, 1997.
- [27] Francis, O., Calibration of the C021 superconducting gravimeter in Membach (Belgium) using 47 days of absolute gravity measurements, IAG Symp., 117, Segawa et al. (Eds.), *Gravity, Geoid and Marine Geodesy*, 212-219, Springer-Verlag, 1997.
- [28] Freybourger, M., Hinderer, J., and Trampert, J., Comparative study of superconducting gravimeters and broadband seismometers STS-1/Z in seismic and subseismic frequency bands, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **101**, 203-217, 1997.
- [29] Fukao, Y., and Suda, N., Core modes of the Earth's free oscillations and structure of the inner core, *Geophys. Res. Lett.*, **16**, 401-404, 1989.
- [30] 古本宗充, コア・マントル境界の状態が急速に変動している可能性, 日本地震学会講演予稿集, C40, 1996.
- [31] Garmash, S. V., Lin'kov, YE. M., Petrova, L. N., and Shved, G. M., Generation of atmospheric oscillations by seismic-gravity oscillations of the Earth, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, **25**, 952-959, 1989.
- [32] Gilbert, F. and A. M. Dziewonski, An application of normal mode theory to the retrieval of structural parameters and source mechanisms from seismic spectra, *Phil. Trans. R. Soc. London. A*, **278**, 187-269, 1975.
- [33] Goodkind, J.M. and Warburton, R.J., Superconductivity applied to gravimetry, *IEEE Transactions on Magnetics*, MAG-11, 2, 708-711, 1975.
- [34] Goodkind, J.M., Continuous measurements with the superconducting gravimeter, *Tectonophysics*, **52**, 99-105, 1979.
- [35] Goodkind, J. M., Continuous measurement of nontidal variations of gravity, *J. Geophys. Res.*, **91**, 9125-9134, 1986.
- [36] Harrison, J. C. and Sato, T., Implementation of electrostatic feedback with a LaCoste-Romberg model G gravity meter, *J. Geophys. Res.*, **89**, 7957-7961, 1984.
- [37] 日置幸介, プレーートの運動と変形の宇宙測地計測, 測地学会誌, **43**, 1-12, 1997.
- [38] Heki, K., Miyazaki, S., and Tsuji, H., Silent fault slip following an interplate thrust earthquake at the Japan Trench, *Nature*, **386**, 595-598, 1997.

- [39] Higashi, T., Simultaneous observations of time change of gravity by means of two superconducting gravity meters at Kyoto, Japan, *測地学会誌*, **41**, 227-237, 1995.
- [40] Hinderer, J., Florsch, N., Makinen, J., Legros, H. and Faller, J. E., On the calibration of a superconducting gravimeter using absolute gravity measurements, *Geophys. J. Int.*, **106**, 491-497, 1991.
- [41] Hinderer, J., Crossley, D., and Jensen, O., A search for the Slichter triplet in superconducting gravimeter data, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **90**, 183-195, 1995.
- [42] Hinderer, J., Relative gravimetry and the study of the Earth's structure and dynamics, IAG Symp., 117, Segawa et al. (Eds.), *Gravity, Geoid and Marine Geodesy*, 75-84, Springer-Verlag, 1997.
- [43] Imanishi, Y., Sato, T., Kumazawa, M., Ooe, M. and Tamura, Y., Observation of seismic core modes from a superconducting gravimeter record, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **72**, 249-263, 1992.
- [44] 今西祐一, コア・アンダートーン, *月刊地球*, **20**, 35-41, 1998.
- [45] Imanishi, Y., Segawa, J., Furuya, I., Kashiwabara, S., Takayama, H., and Nishimae, Y., Gravity observation by means of a superconducting gravimeter at Matsushiro, Japan, IAG Symp., 117, Segawa et al. (Eds.), *Gravity, Geoid and Marine Geodesy*, 115-122, Springer-Verlag, 1997.
- [46] Jensen, O., Hinderer, J., and Crossley, D., Noise limitations in the core-mode band of superconducting gravimeter data, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **90**, 169-181, 1995.
- [47] Kamal and Mansinha, L., A test of the superconducting gravimeter as a long-period seismometer, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **71**, 52-60, 1992.
- [48] Kaminuma, K., On the possibility of detecting absolute crustal uplift at Syowa Station, Antarctica, *Proc. NIPR Symp. Antact. Geosci.*, **9**, 16-23, 1996.
- [49] Kanamori, H. and Mori, J., Harmonic excitation of mantle Rayleigh waves by the 1991 eruption of Mount Pinatubo, Philippines, *Geophys. Res. Lett.*, **19**, 721-724, 1992.
- [50] 金尾・神沼, 南極・昭和基地における超高性能地震計による広帯域高感度地震観測-第33次観測隊報告1992-, *南極資料*, **37**, 291-318, 1993.

- [51] Kanao, M. and Kaminuma, K., Broad-band and wide dynamic-range seismic observations with an STS-seismograph at Syowa Station, East Antarctica, *Proc. NIPR Symp. Antarct. Geosci.*, **7**, 1-13, 1994.
- [52] Kanao, M., and Sato, T., Observation of tidal gravity and free oscillation of the Earth with a LaCoste & Romberg gravity meter at Syowa Station, East Antarctica, *Proc. 12th Int. Symp. Earth Tides*, ed. H. T. Hsu, Science Press, Beijing, 571-580, 1995.
- [53] 金尾・神沼・渋谷・野木, コンピュータ通信ネットワークを利用した昭和基地の固体地球物理学データの伝送, 管理, 公開について, *南極資料*, **39**, 303-320, 1995.
- [54] Kawasaki, I., Asai, Y., Tamura, Y., Sagiya, T., Mikami, N., Okada, Y., Sakata, M., and Kasahara, M., The 1992 Sanriku-Oki, Japan, ultra-slow earthquake, *J. Phys. Earth.*, **43**, 105-116, 1995.
- [55] Kikuchi, Y., Detection of Earth's background free oscillations from IRIS/IDA records, *Bachelor's dissertation*, Nagoya Univ., 1998.
- [56] 北川源四郎, FORTRAN 77 時系列解析プログラミング, 岩波書店, 1993
- [57] 小林直樹, 大気擾乱による固体惑星の振動, 日本惑星科学会秋季大会予稿集, **84**, 1996.
- [58] Kobayashi, N. and Nishida, K., Atmosphere as a clue to planetary seismology, *Nature*, submitted, 1997.
- [59] 国立極地研究所編, 日本南極地域観測隊第 35 次隊報告, 1995.
- [60] Lay, T. and Kanamori, H., Geometric effects of global lateral heterogeneity on long-period surface wave propagation, *J. Geophys. Res.*, **90**, 605-621, 1985.
- [61] Mansinha, L., Smylie, D. E., and Sutherland, B., Earthquakes and the spectrum of the Brussels superconducting gravimeter data for 1982-1986, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **61**, 141-148, 1990.
- [62] Masters, G., and Gilbert, F., Attenuation in the earth at low frequencies, *Philos. Trans. R. Soc. London, Ser. A*, **308**, 479-522, 1983.
- [63] 松本則夫, 地震に関連する地下水位変化の検出, 時系列解析の実際 II, 赤池弘次・北川源四郎編, 第 10 章, 167-180, 朝倉書店, 1995.
- [64] Matsumoto, K., Ooe, M., Sato, T., and Segawa, J., Ocean tide model obtained from TOPEX/POSEIDON altimetry data, *J. Geophys. Res.*, **100**, 25319-25320, 1995.

- [65] Melchior, P. and Ducarme, B., Detection of inertial gravity oscillations in the Earth's core with a superconducting gravimeter at Brussels, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **42**, 129-134, 1986.
- [66] Melchior, P., Ducarme, B., and Francis, O., The response of the Earth to tidal body forces described by second- and third-degree spherical harmonics as derived from a 12 year series of measurements with the superconducting gravimeter GWR/T3 in Brussels, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **93**, 223-238, 1996.
- [67] Merriam, J. B., Non-linear tides observed with the superconducting gravimeter, *Geophys. J. Int.*, **123**, 529-540, 1995.
- [68] Mikumo, T., Atmospheric pressure waves and tectonic deformation associated with the Alaskan earthquake of March 28, 1964, *J. Geophys. Res.*, **73**, 2009-2025, 1968.
- [69] Mukai, A., Higashi, T., Takemoto, S., Nakagawa, I., and Naito, I., Accurate estimation of atmospheric effects of gravity observations made with a superconducting gravity meter at Kyoto, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **91**, 149-159, 1995.
- [70] 向井厚志・竹本修三・福山康弘・東敏博・中川一郎, 超伝導重力計を用いた重力観測に及ぼす室内温度変化の影響, 測地学会誌, **41**, 197-206, 1995.
- [71] 向井厚志・東敏博・竹本修三・能勢弘道, 8年間の観測データに基づく京都 SCG # 8 および # 9 の応答特性の比較, 第6回超伝導重力計ワークショップ集録, 13-17, 1997.
- [72] Mukai, A., Effect of groundwater on gravity observation at Kyoto, IAG Symp., 117, Segawa et al. (Eds.), *Gravity, Geoid and Marine Geodesy*, 123-129, Springer-Verlag, 1997.
- [73] 名和一成・神沼克伊・金尾政紀・渋谷和雄・深尾良夫, 南極・昭和基地で観測されたポリビア巨大深発地震, 日本地震学会講演予稿集, 1994.
- [74] Nawa, K., and Kanao, M., Seismological Bulletin of Syowa Station, Antarctica, 1994, *JARE Data Rep.*, **210** (Seismology 30), 1-84, 1996.
- [75] Nawa, K., Suda, N., Fukao, Y., Sato, T., Aoyama, Y., and Shibuya, K., Incessant excitation of the Earth's free oscillations, *Earth Planets Space*, **50**, in press, 1998.
- [76] Odamaki, M., Michida, Y., Oka, K., and Oikawa, K., Mean sea-level and its seasonal change observed at Syowa Station, East Antarctica, IAG Symp., 117,

- Segawa et al. (Eds.), *Gravity, Geoid and Marine Geodesy*, 659-665, Springer-Verlag, 1997.
- [77] Ohshima, K. I., Takizawa, T., Ushio, S., and Kawamura, T., Seasonal variations of the Antarctic coastal ocean in the vicinity of Lützow-Holm Bay, *J. Geophys. Res.*, **101**, 20,617-20,628, 1996.
- [78] Okubo, S., Yoshida, S., Sato, T., Tamura, Y., and Imanishi, Y., Verifying the precision of a new generation absolute gravimeter FG5 - Comparison with superconducting gravimeters and detection of oceanic loading tide, *Geophys. Res. Lett.*, **24**, 489-492, 1997.
- [79] Park, J., C. R. Lindberg, and D. J. Thomson, Multiple-taper spectral analysis of terrestrial free oscillations: part I, *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, **91**, 755-794, 1987.
- [80] Peterson, J., Observations and modeling of seismic background noise, *US Geol. Surv. Rep.* 93-322, 1993.
- [81] Prothero, W. A., Jr., A cryogenic gravimeter, *Ph. D. thesis*, UCSD, 1-135, 1967.
- [82] Prothero, W. A., Jr. and Goodkind, J. M., A superconducting gravimeter, *The review of scientific instruments*, **39**, 1257-1262, 1968.
- [83] Prothero, W. A. and Goodkind, J. M., Earth-tide measurements with the superconducting gravimeter, *J. Geophys. Res.*, **77**, 926-937, 1972.
- [84] Richter, B., The long period elastic behaviour of the Earth, Variations in Earth Rotation, McCarthy, D. D. and W. E. Carter, ed., IUGG, 9, 1990.
- [85] Richter, B., Wolf, P., Otto, H., Wenzel, H.-G., and Zürn, W., Comparison of a cryogenic and a spring gravimeter between 0.2 and 96 cpd at BFO Schiltach, *Bull. Inf. Marées Terrestres*, **122**, 9163-9172, 1994.
- [86] Richter, B., Wenzel, H.-G., Zürn, W., and Klopping, F., From Chandler wobble to free oscillations: comparison of cryogenic gravimeters and other instruments in a wide period range, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **91**, 131-148, 1995.
- [87] Sailor, R. V., and Dziewonski, A. M., Measurement and interpretation of normal mode attenuation, *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, **53**, 559-582, 1978.
- [88] 佐藤忠弘, 超伝導重力計による南極昭和基地での観測-準備状況-, 重点領域「地球中心核」第4班ワークショップ集録、'nGalで見る地球', 75-78, 1990.
- [89] 佐藤忠弘・渋谷和雄・福田洋一・井田喜明・中川一郎・大江昌嗣, 南極超伝導重力計, 月刊地球, **15**, 102-107, 1993.

- [90] Sato, T., Shibuya, K., Okano, K., Kaminuma, K., and Ooe, M., Observation of Earth tides and Earth's free oscillations with a superconducting gravimeter at Syowa Station (status report), *Proc. NIPR Symp. Antact. Geosci.*, **6**, 17-25, 1993.
- [91] Sato, T., Tamura, Y., Higashi, T., Takemoto, S., Nakagawa, I., Morimoto, N., Fukuda, Y., Segawa, J., and Seama, N., Resonance parameters of the free core nutation measured from three superconducting gravimeters in Japan, *J. Geomag. Geoelectr.*, **46**, 571-586, 1994.
- [92] Sato, T., Shibuya, K., Tamura, Y., Kanao, M., Ooe, M., Okano, K., Fukuda, Y., Seama, N., Nawa, K., Kaminuma, K., Ida, Y., Kumazawa, M., and Yukutake, T., One year observations with a superconducting gravimeter at Syowa Station, Antarctica, *測地学会誌*, **41**, 75-89, 1995.
- [93] Sato, T., Shibuya, K., Nawa, K., Matsumoto, K., and Tamura, Y., On the diurnal and semidiurnal tidal factors at Syowa Station, Antarctica, *測地学会誌*, **42**, 145-153, 1996.
- [94] Sato, T., Tamura, Y., Okubo, S., and Yoshida, S., Calibration of the scale factor of superconducting gravimeter at Esashi using an absolute gravimeter FG5, *測地学会誌*, **42**, 225-232, 1996.
- [95] 佐藤忠弘, オーストラリア SG 設置の経過報告, 第 5 回 SCG ワークショップ集録, 2-11, 1997.
- [96] 佐藤忠弘, Herbert McQueen, 浜野洋三, 浅利一善, 田村良明, オーストラリア・マウントストロームロにおける SG 観測-ノイズ特性-, 第 6 回超伝導重力計ワークショップ集録, 7-12, 1997a.
- [97] 佐藤忠弘, Herbert McQueen, 浜野洋三, 浅利一善, 田村良明, 大江昌嗣, 超伝導重力計 CT#031 によるオーストラリア・キャンベラでの潮汐観測, 日本測地学会講演会要旨, 143-144, 1997b.
- [98] Sato, T., Nawa, K., Shibuya, K., Tamura, Y., Ooe, M., and Kaminuma, K., Long-period tides observed with a superconducting gravimeter at Syowa Station, Antarctica, and their implication to global ocean tide modeling, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **103**, 39-53, 1997a.
- [99] Sato, T., Nawa, K., Shibuya, K., Tamura, Y., Ooe, M., Kaminuma, K., and Aoyama, Y., Polar motion effect on gravity observed with a superconducting gravimeter at Syowa Station, Antarctica, IAG Symp., 117, Segawa et al. (Eds.), *Gravity, Geoid and Marine Geodesy*, 99-106, Springer-Verlag, 1997b.

- [100] 島伸和, 超伝導重力計による地球ダイナミクスの研究, 博士論文, 東京大学, 1992.
- [101] Seama, N., Fukuda, Y., and Segawa, J., Superconducting gravimeter observations at Kakioka, Japan, *J. Geomag. Geoelectr.*, **45**, 1383-1394, 1993.
- [102] 渋谷和雄, 昭和基地における超伝導重力計連続観測, *Central Core of the Earth*, **1**, 353-355, 1991.
- [103] Shibuya, K., Syowa Station: observatory for global geodesy in Antarctica (a review), *Proc. NIPR Symp. Antact. Geosci.*, **6**, 26-36, 1993.
- [104] Slichter, L. B., The fundamental free mode of the Earth's inner core, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, **47**, 186-, 1961.
- [105] Smith, M. L., and Dahlen, F. A., The period and Q of the Chandler wobble, *Geophys. J. R. astr. Soc.*, **64**, 223-281, 1981.
- [106] Smylie, D. E., The inner core translational triplet and the density near Earth's center. *Science*, **255**, 1678-1682, 1992.
- [107] Smylie, D. E., Hinderer, J., Richter, B., and Ducarme, B., The product spectra of gravity and barometric pressure in Europe, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **80**, 135-157, 1993.
- [108] Song, X.-D. and Richards, P. G., Seismological evidence for differential rotation of the Earth's inner core, *Nature*, **382**, 221-224, 1996.
- [109] Spratt, R. S., Modelling the effect of atmospheric pressure variations on gravity, *Geophys. J.R. astr. Soc.*, **71**, 173-186, 1982.
- [110] 須田直樹, 地球自由振動の解析による地球内部構造の研究, 博士論文, 名古屋大学, 1991.
- [111] 須田直樹, 地球自由振動 $_0S_0$ モードの固有周波数の時間変動検出の試み, 日本地震学会講演予稿集, C34, 1995.
- [112] Suda, N., and Fukao, Y., Structure of the inner core inferred from observations of seismic core modes, *Geophys. J. Int.*, **103**, 403-413, 1990.
- [113] Suda, N., Nawa, K., and Fukao, Y., Earth's background free oscillations, *Science*, accepted, 1998.
- [114] Tamura, Y., A harmonic development of the tide-generating potential, *Bull. Inf. Marées Terrestres*, **99**, 6813-6855, 1987.
- [115] Tamura, Y., Sato, T., Ooe, M., and Ishiguro, M., A procedure for tidal analysis with a Bayesian information criterion, *Geophys. J. Int.*, **104**, 507-516, 1991.

- [116] Tamura, Y., Aoyama, Y., and Nawa, K., Gravimetric tidal factors at Syowa Station obtained from three-year observations with a superconducting gravimeter, *Proc. NIPR Symp. Antarct. Geosci.*, **10**, 1-11, 1997.
- [117] Tanimoto, T., Nishida, K., and Kobayashi, N., Tiny terrestrial oscillations, *Eos Trans. AGU*, **78(46)**, Fall Meet. Suppl., F481, 1997.
- [118] Virtanen, H. and Kääriäinen, J., The GWR T020 superconducting gravimeter 1994-1996 at the Metsähovi station, Finland, *Rept. Finnish Geodetic Inst.*, **4**, 26 pages, 1997.
- [119] Watada, S., Near-source acoustic coupling between the atmosphere and the solid earth during volcanic eruptions, *Ph.D dissertation*, Caltech, 1995.
- [120] Warburton, R.J., and Goodkind, J.M., The influence of barometric-pressure variations on gravity, *Geophys. J. R. astr. Soc.*, **48**, 281-292, 1977.
- [121] Widmer, R. and W. Zürn, Bichromatic excitation of long-period Rayleigh and air waves by the Mount Pinatubo and El Chichon volcanic eruptions, *Geophys. Res. Lett.*, **19**, 765-768, 1992.
- [122] Widmer, R., Zürn, W., and Masters, G., Observation of low-order toroidal modes from the 1989 Macquarie Rise event, *Geophys. J. Int.*, **111**, 226-236, 1992.
- [123] 山田功夫, 最近の地震観測, 地震 II, **44** 特集号, 3-14, 1991.
- [124] 山本, 可搬型絶対重力計 FG5 による南極における重力測定, 国土地理院時報, **85**, 18-22, 1996.
- [125] Zürn, W., Richter, B., Rydelek, A., and Neuberg, J., Comment on: Detection of inertial gravity oscillations in the earth's core with a superconducting gravimeter at Brussels, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **49**, 176-178, 1987.
- [126] Zürn, W., Wenzel, H., -G., and Laske, G., High quality data from LaCoste-Romberg gravimeters with electrostatic feedback: A challenge for superconducting gravimeters, *Bull. Inf. Marées Terrestres*, **110**, 7940-7952, 1991.
- [127] Zürn, W. and Widmer, R., On noise reduction in vertical seismic records below 2 mHz using local barometric pressure, *Geophys. Res. Lett.*, **22**, 3537-3540, 1995.
- [128] Zürn, W., Widmer, R., Richter, B., and Wenzel, H. -G., Comparison of free oscillation spectra from different instruments, *Bull. Inf. Marées Terrestres*, **122**, 9173-9179, 1994.