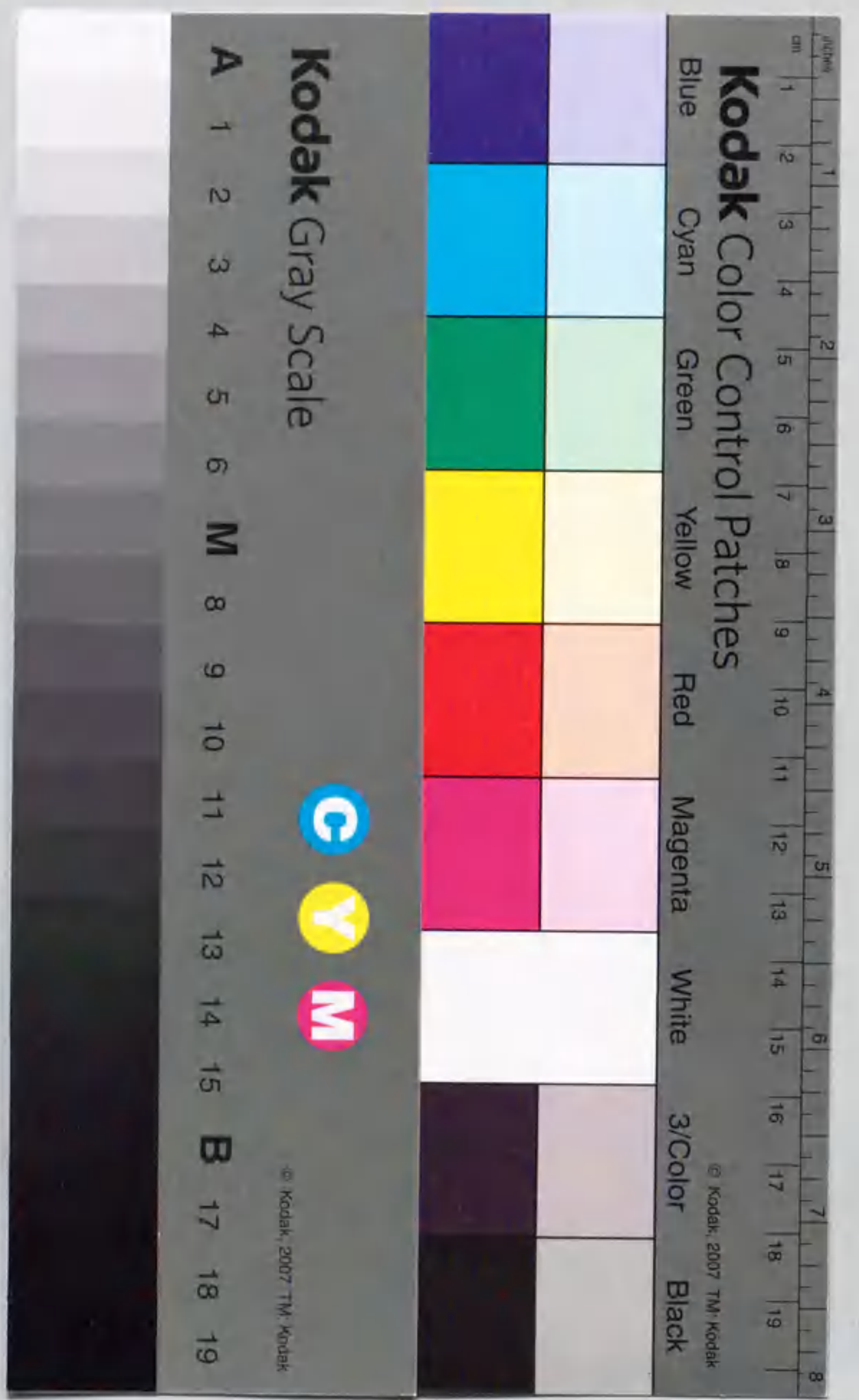


自由振動から潮汐帯域における信号解析による
地球ダイナミクスの研究

名 和 一 成



①

報告番号 甲 第 3878 号

自由振動から潮汐帯域における信号解析による
地球ダイナミクスの研究

名和一成

名古屋大学大学院理学研究科地球科学専攻

博士論文

1998年3月2日

謝辞

名古屋大学地球惑星科学教室の須田直樹博士には、本研究全般に渡ってご指導いただきました。常日ごろから相談に乗っていただき激励していただきました。また主論文執筆中には細かい部分まで批判・指摘していただき、論文を改善することができました。東京大学地震研究所の深尾良夫教授には、名古屋大学での卒業論文・修士論文の指導から始まり、南極観測その出国前、越冬中、さらに帰国に際してまでお世話をかけ通しでした。本研究に関しても副論文の執筆など指導していただきました。何事に対しても誠実に対応する姿勢を身をもって教えていただきました。また深尾教授の結果を見て興奮する姿が研究の励みになりました。本研究の主要な内容である常時地球自由振動の発見は、箱根で行なわれた海半球シンポジウムでの「大気擾乱による地球自由振動の励起」に関する東京工業大学地球惑星科学教室の小林直樹博士との議論がきっかけでした。

第35次日本南極地域観測隊に参加するにあたって、様々な方からご助力、ご支援いただきました。熊澤峰夫名古屋大学名誉教授（元東京大学教授）の「南極に行きたい人はいるか？」という誘いが夢を実現させるきっかけとなりました。国立天文台の佐藤忠弘助教授、田村良明博士、大江昌嗣教授には国立天文台・水沢および江刺潮汐観測施設での超伝導重力計の立ち上げ訓練をはじめとする重力計の操作、データ収録・解析のノウハウを伝授していただきました。帰国後の潮汐解析についてもご指導いただきました。また、江刺の超伝導重力計データを提供していただきました。極地研究所の渋谷和雄教授、神沼克伊教授には観測のみならず、南極での生活に対する心構えを教えてくださいました。第35次日本南極地域観測隊の渡邊興亜隊長、越冬期間中は横山宏太郎越冬隊長はじめとする越冬隊員のみなさんにご支援、激励いただきました。地学部門の船木實（極地研）隊員、石川尚人（京都大）隊員には、激しいブリザードの最中の重力計室の見回りやヘリウム液化作業など大変力になっていただきました。36次越冬隊の青山雄一（総研大）隊員、田中俊行（金沢大）隊員には観測を引き継ぎ、維持していただきました。

世界の超伝導重力計観測点の設置・維持はさらに多くの方の努力によるものです。オーストラリア・キャンベラの観測点は海半球ネットワーク計画によって設置され、国立天文台の佐藤忠弘助教授はじめ ANU の Dr. H. McQueen がその観測・維持にあたっています。フィンランドの観測データは Dr. H. Virtanen と Dr. J. Kääriäinen に、昭和基地のデータと交換で提供していただきました。また、松代の観測データは東京大学海洋研究所の今西祐一博士に提供していただきました。また、IDA ネットワークの観測データのコピーに関して、東京大学地震研究所の阿部勝征教授、鷹野澄助教授、建築研究所の原辰彦博士に大変お世話になりました。超伝導重力計観測グループによる定期的に行なわれたワークショップは、観測の現場に立つ研究者の意見を聞くことができ非常に有益だったうえ、仕事を進める目標にもなりました。

東京大学地震研究所の川勝均助教授、カリフォルニア工科大学の金森博雄教授には副論文等に目を通していただき有益なコメントをいただきました。小川克郎教授、平原和朗教授、山田功教授、志知龍一教授、藤井直之教授をはじめとする名古屋大学地球惑星科学教室のみなさんには、GJ セミナーなどを通じて議論していただき、また日常お世話になりました。研究ばかりではないにしろ“24時間営業”という研究室の雰囲気は、研究意欲を駆り立ててくれました。本研究を行なうにあたって非常に多くの方々のご指導、ご支援をいただきました。観測・研究生活を支えてくださった全ての方々へ深く感謝いたします。本研究に関して研究費の一部を日本学術振興会による特別研究員制度によって援助していただきました。最後になりましたが、合わせて感謝いたします。

主論文

自由振動から潮汐帯域における信号解析による地球ダイナミクスの研究

副論文

1. Incessant excitation of the Earth's free oscillations, Nawa, K., Suda, N., Fukao, Y., Sato, T., Aoyama, Y. and Shibuya, K., *Earth Planets Space*, **50**, in press (1998) (地球自由振動の常時励起)
2. Earth's background free oscillations, Suda, N., Nawa, K., and Fukao, Y., *Science*, accepted for publication (1998) (背景地球自由振動)

参考論文

1. 超伝導重力計記録から得られたサイスミックおよび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, 名和一成・須田直樹・深尾良夫, 月刊地球, **20**, 52-56 (1998)
2. グローバル地震計ネットワークで見た常時地球自由振動, 須田直樹・名和一成, 月刊地球, **20**, 57-61 (1998)
3. Inversion of gravity data to determine the terrain density distribution in southwest Japan, Nawa, K., Fukao, Y., Shichi, R., and Murata, Y., *J. Geophys. Res. - Solid Earth*, **102**, 27703-27719 (1997) (重力データのインバージョンによる西南日本の地殻表層密度分布の決定)
4. Polar motion effect on gravity observed with a superconducting gravimeter at Syowa Station, Antarctica, Sato, T., Nawa, K., Shibuya, K., Tamura, Y., Ooe, M., Kaminuma, K., and Aoyama, Y., IAG Symp., 117, Segawa et al. (Eds.), *Gravity, Geoid and Marine Geodesy*, Springer-Verlag, 99-106 (1997) (南極・昭和基地の超伝導重力計で観測された極運動による重力効果)
5. Long-period tides observed with a superconducting gravimeter at Syowa Station, Antarctica, and their implication to global ocean tide modeling, Sato, T., Ooe, M., Nawa, K., Shibuya, K., Tamura, Y., and Kaminuma, K., *Phys. Earth Planet. Inter.*, **103**, 39-53 (1997) (南極・昭和基地の超伝導重力計で観測された長周期潮汐およびグローバルな海洋潮汐モデルに対する解釈)

6. Gravimetric tidal factors at Syowa Station obtained from three-year observations with a superconducting gravimeter, Tamura, Y., Aoyama, Y., and Nawa, K., *Proc. NIPR Symp. Antarct. Geosci.*, **10**, 1-10 (1997) (超伝導重力計による3年間の観測から得られた昭和基地の重力潮汐ファクター)
7. Attempt to detect combination tones between the Earth's free oscillation and the Earth tide, Tanaka, T., Furumoto, M., and Nawa, K., *Proc. NIPR Symp. Antarct. Geosci.*, **10**, 11-18 (1997) (地球自由振動と地球潮汐の結合振動検出の試み)
8. On the diurnal and semidiurnal tidal factors at Syowa Station, Antarctica, Sato, T., Shibuya, K., Nawa, K., Matsumoto, K., and Tamura, Y., *測地学会誌*, **42**, 145-153 (1996) (南極・昭和基地における日周・半日周潮汐の重力潮汐ファクターについて)
9. Seismological Bulletin of Syowa Station, Antarctica, 1994, Nawa, K. and M. Kanao, *JARE Data Rep.*, **210**(Seismology 30), 1-84 (1996) (1994年南極・昭和基地の地震観測報告)
10. One year observations with a superconducting gravimeter at Syowa Station, Antarctica, 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., *測地学会誌*, **41**, 75-89 (1995) (超伝導重力計を用いた南極・昭和基地における1年間の重力連続観測)

主論文の要旨

地球の表面における重力変化の観測によって、地球の構造やダイナミクスに関する有用な情報を得ることができる。超伝導重力計 (SG) は、周期が分から時オーダーの地震帯域から、日から年オーダーの測地帯域までの広い帯域で観測を行なっている。この長期安定性に優れ、広帯域・高感度・高分解能な SG により、日オーダーでは、地球潮汐とその流体核共鳴効果、年オーダーでは極運動による微弱な重力変化が捉えられ、それらの解析から地球の弾性・非弾性構造やコア・マントル境界の性質などが論じられている。時オーダーでは、内核の並進運動 (シュリヒターモード) や外核中の慣性重力波の存在が理論的に予測されている。その微弱な重力変化を捉えることができれば、内核境界付近や外核の性質についての情報を得ることが可能である。SG 観測の主要なターゲットであるが、現在まで確実な観測はない。また、分オーダーでは地球自由振動の解析が重要であるが、SG のデータを使った地震帯域の研究はほとんどないというのが現状である。

一般に地球自由振動は大地震や大噴火のような大きなイベントによって励起されると考えられているが、それ以外にも地球の流体部分のランダムな運動や固体部分の未知の変動などによって常時微弱に励起されている可能性がある。もしそのような微弱な信号が検出されれば、それは未知の地球ダイナミクスについての重要な情報をもたらすはずである。本研究では、この自由振動帯域を中心に、SG が高感度であることと連続観測であることを活かして、従来ノイズと考えていた記録を全て徹底的に調べた。

南極・昭和基地での越冬観測を行ない、SG などのセンサーによる連続観測記録を取得した。SG、ラコスト重力計 (LR)、STS 地震計の並行観測で得られた記録のうち、昭和基地では SG が最も低ノイズであることを確認した。SG の高分解能・高安定性と連続観測であることを活かした解析として、まず昭和基地の SG 記録を用いて時間-周波数スペクトログラムを作成した。これによって、スペクトルの時間変動を追うとともに時間で連続している微弱な信号を検出することが可能になる。その結果、非常に微弱に常時励起されている地球自由振動を検出することに世界で初めて成功し、これを「常時地球自由振動」と名付けた。

次に、世界の SG 観測点やグローバル地震計ネットワーク (IDA) のデータ解析を行なった。昭和基地以外の SG・IDA の観測点のスペクトログラムにも地球自由振動に対応した信号が見られ、常時地球自由振動がグローバルな現象であることを確認した。また、地震の起きていない静穏期のみを平均して、常時地球自由振動を定量化して各観測点の比較をした。その結果、昭和基地のスペクトログラムで見られた振幅の季節変動や特定の周波数のモードが大きいという特徴は、グローバルな現象ではなくローカルな影響を受けていることがわかった。SG と IDA 観測点の平均スペクトルを比べると、2-5 mHz の周波数帯域では南アフリカ (SUR) などの IDA の観測点

のスペクトルのノイズレベルが最も小さく、SG ではキャンベラのみが IDA と同じレベルで観測されていることがわかった。さらに、静穏期の平均スペクトルを使って常時地球自由振動のピークの合い具合も評価した。その結果、キャンベラ SG・IDA SUR のようにパワースペクトルのノイズレベルが小さいほどピークが理論周波数とよく一致していて、逆にノイズレベルが大きいほど理論周波数と合わないモードが多いことがわかった。昭和基地 SG の常時地球自由振動はノイズに乗って見えている可能性があり、昭和基地周辺の海洋変動、SG の傾斜補償装置に影響を与える観測室ノイズなどが原因として考えられる。

地震による励起を仮定した数値実験を行なった結果、常時地球自由振動は地震では説明できないことがわかった。地震以外の励起源として有力な候補にランダムな大気運動による励起の可能性が挙げられるが、ゆっくり地震などよくわかっていない固体地球の変動による励起の可能性も否定できない。さらなる観測・解析による励起源の特定が課題である。

昭和基地の SG データを用いてシュリヒターモードの検出を試みたが、そのような信号を検出することはできなかった。しかし、自由振動帯域と同様に潮汐帯域のスペクトログラムを作成した結果、従来の理論では説明できない常時振動を検出することができた。これは、固体地球に関する未知の信号を見ている可能性の他に大気と海洋のグローバルなカップリングによる荷重変化を見ている可能性がある。

目次

1 はじめに	3
2 超伝導重力計による観測・研究	6
2.1 超伝導重力計およびそれに関わる研究について	6
2.2 南極・昭和基地での観測	15
2.2.1 超伝導重力計・ラコスト重力計による重力連続観測	15
2.2.2 昭和基地の超伝導重力計連続観測による測地学的研究	17
2.2.3 超伝導重力計と他のセンサーとの比較	20
3 常時励起される地球自由振動	33
3.1 はじめに -地震学的手法による地球ダイナミクスの研究-	33
3.2 常時地球自由振動の観測	34
3.2.1 昭和基地の時間-周波数スペクトログラム	34
3.2.2 国内および世界の超伝導重力計データの解析	39
3.2.3 グローバル地震計ネットワークデータの解析	48
3.2.4 静穏期の平均パワースペクトル	52
3.2.5 ピークの見え方・安定性の比較	54
3.3 自由振動帯域のノイズ源についての考察	59
3.4 常時地球自由振動の励起源についての考察	70
3.4.1 地震による励起を仮定した数値実験	70
3.4.2 大気による励起 -過去の観測と理論的考察-	78
4 サブサイスマックバンドの地球ダイナミクス	80
4.1 はじめに -自由振動帯域と潮汐帯域の狭間で-	80
4.2 シュリヒターモード検出の試み	80
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	90

5	今後の課題	97
5.1	常時自由振動の励起源を明らかにするために	97
5.2	SG観測は何を目指すべきか？	97
5.3	新しい観測システムの構築を！	98
5.4	惑星科学の新しい時代を切り開く可能性？	99
6	付録	100
6.1	SG・IDA各観測点の自由振動帯域のノイズレベル	100
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	120

1 はじめに

地球の表面における重力変化の観測によって、地球の構造やダイナミクスに関する有用な情報を得ることができる。超伝導重力計は、周期が分から時オーダーの自由振動帯域から、日から年オーダーの測地帯域までの広い帯域で精密な重力観測を行なっている。日オーダーでは月や太陽などの引力によって生じる地球潮汐およびその日周潮付近での自由コア章動による流体核共鳴効果、年オーダーでは極運動による微弱な重力変化を捉えることで、地球の弾性・非弾性構造やコア・マントル境界の性質などについての情報を得ることができる。この測地帯域では、海洋潮汐や大気圧変動による荷重変化や地下水のような地下流体の運動などによる重力変化も捉えられる。これらは地球深部の情報を得ようとする場合にはノイズとなるが、それら自体も重要な情報である。また、時オーダーではシュリヒターモードと呼ばれる内核の並進運動やコアアンダートーンと呼ばれる外核中の慣性重力波による重力変化を捉えることで、内核境界での密度差や外核の密度成層構造・成層の安定性に制約を与えることができる。分オーダーでは地震によって励起される地球自由振動を捉えることによって地球の弾性・非弾性構造に関する情報を得ることができ、特に地球深部に敏感な信号を捉えることでコア・マントル境界や内核の構造に関する情報を得ることができる。さらには、今まで考えられてこなかったような未知の微弱な重力変化を捉えることができるかもしれない。それは地球の構造やダイナミクスに関する新しい情報をもたらすであろう。

過去にはラコスト重力計をフィードバック型に改造したセンサーを用いたIDA (International Deployment of Accelerometers) (Agnew et al., 1986 [4]) と呼ばれるグローバルネットワークが展開されていた。およそ20年にわたる観測で蓄積されたデータの解析によって、地球の内部構造に関する知識は飛躍的に増大した。現在、その後継としてSTS地震計など広帯域地震計を用いたグローバルネットワークが展開されているが、IDAや超伝導重力計と比較して長周期側での感度が落ちるため、上記のような目的には適さない。IDAによる観測が終わった今、自由振動から潮汐帯域にお

よぶ広い周波数帯域で重力観測する唯一の手段は、ラコスト重力計よりも高感度・高分解能、高安定性を持つ超伝導重力計である。しかし、観測点はこれまで開発国の合衆国をはじめ、ヨーロッパ、日本など北半球の中緯度地域に限られていた。これは、センサー自体が高価であることと、観測を維持するために液体ヘリウムを移充填するなどのメンテナンスが必要なことが主な理由である。日本では世界に先駆けて、観測空白域であった南半球、しかも高緯度地域での精密重力連続観測を実現すべく、1993年に南極・昭和基地での超伝導重力計観測を開始した。最近になってオーストラリア（キャンベラ）とインドネシア（バンドン）においても、日本人の手によって観測が始められ、超伝導重力計観測点のカバーする領域が経度方向に広がった。

最近、世界の超伝導重力計観測による成果は、長期間の観測データが蓄積されてきたこともあって、測地帯域の研究において特に目覚ましいものがある。しかし、自由振動帯域においては長周期地震計としての可能性を追求する研究例などあるものの、地球内部構造を求めようとする地震学的研究は稀であった。広帯域地震計に比べて圧倒的に観測点が少なく、またデータも自由に手に入る状態ではなかったことが大きな原因だったかもしれない。最近になってGGP (Global Geodynamics Project) (Crossley and Hinderer, 1995 [11]) と呼ばれる世界の超伝導重力計による観測キャンペーンが始まった。今後、それによってデータが流通するようになれば、地震学的研究にもっと活かされるようになるだろう。

本研究では、これまであまり解析されてこなかった自由振動帯域を中心に解析を行なった。地震によって励起された地球自由振動のスペクトルの微細構造を調べることで、地球内部、特に中心核といった地球深部の弾性・非弾性構造に関する情報を得ることが可能である。これは「高感度・高分解能」を活かす1つの方向ではある。しかし、ここではこの超伝導重力計の特長と、さらには「連続観測」であることを活かして、従来ノイズと考えていた記録を全て徹底的に見るという方針で解析を行なった。具体的には、長周期地震学・測地学ではほとんど作られることがなかった「時間-周波数スペクトログラム」を自由振動帯域およびサブサイミックバンドで作成した。本論文では、自由振動帯域より低周波側で潮汐帯域までの連続した周波数帯域のこと

をサブサイミックバンドと呼ぶことにする。スペクトログラムの作成によって、昭和基地での観測で得られた超伝導重力計データの解析から、世界で初めて地球自由振動の常時励起と考えられる微弱な信号を検出することに成功した。これについては、他の超伝導重力計観測点のデータ解析やグローバル地震計ネットワークのデータ解析によっても検出することができ、グローバルな現象であることが確認できた。また、サブサイミックバンドの解析から従来の理論では説明できない信号を検出することができた。これらの信号は地球の未知のダイナミクスを表わしていると考えられる。

以下では、2章で超伝導重力計に関する研究のレビュー、南極・昭和基地の重力観測について、3章で昭和基地他の超伝導重力計およびIDAのデータを使った常時自由振動の解析、常時地球自由振動の励起源についての考察、4章で昭和基地の超伝導重力計データのサブサイミックバンドの解析について述べ、最後の5章で今後の観測・解析で何をすべきかについて述べたい。

2 超伝導重力計による観測・研究

2.1 超伝導重力計およびそれに関わる研究について

超伝導重力計（以後、SGと表記する）の開発は、1960年代後半にカリフォルニア大学サンディエゴ校（UCSD）のグループによって始められた（Prothero, 1967 [81]; Prothero and Goodkind, 1968 [82]; Goodkind and Warburton, 1975 [33]）。現在世界で観測が行なわれている全てのSGは、この開発グループによって設立されたGWR社によって製造されたものである。傾斜補償装置のトップマウント方式からボトムマウント方式への変更、液体ヘリウムのデュワーの小型化といった周辺装置の改良が行なわれてきたが、センサー部については大きな変更は行なわれず現在に至っている。図2-1-1に昭和基地のSGとキャンベラのSGの外観写真を示す。昭和基地の方が大型のデュワーでトップマウント方式の従来型のSGで、キャンベラの方が小型のデュワーでボトムマウント方式の新型のSGである。

SGの基本原理を以下に示す。超伝導コイルに流れる永久電流で安定した磁場を作り、そこに置かれた超伝導球に働く磁気浮上力をスプリングとして使っている。マイスナー効果によって浮上した超伝導球の重力変化に対する位置変化を、静電容量型の位置検出器で検出する。超伝導球が元の位置を保つようにフィードバックコイルに電流を流し磁場を変化させ、そのフィードバックに要した電圧値を出力信号としている。従来の重力計・地震計と比べて大きく違うのは、センサー部が極低温である点で、これによって低雑音・低ドリフトの安定した重力測定が行なうことができる。液体ヘリウム温度付近の極低温状態では、化学反応速度がほぼ0になって物性は安定し、熱雑音も小さくなる。また、超伝導状態では電気抵抗が0になり、一度流れた電流は永久電流として流れ続けるので安定する。ただし、長期間安定した連続観測を行なうためにはヘリウムの充填によって超伝導状態を保ちつづける必要がある。

図2-1-2に、センサー部の概念図を示す。

図2-1-3に現在の観測点分布を、詳しい観測点の緯度・経度を、表2-1-1に示す。フィードバック型に改造されたラコスト重力計（以後、LRと表記する）が展

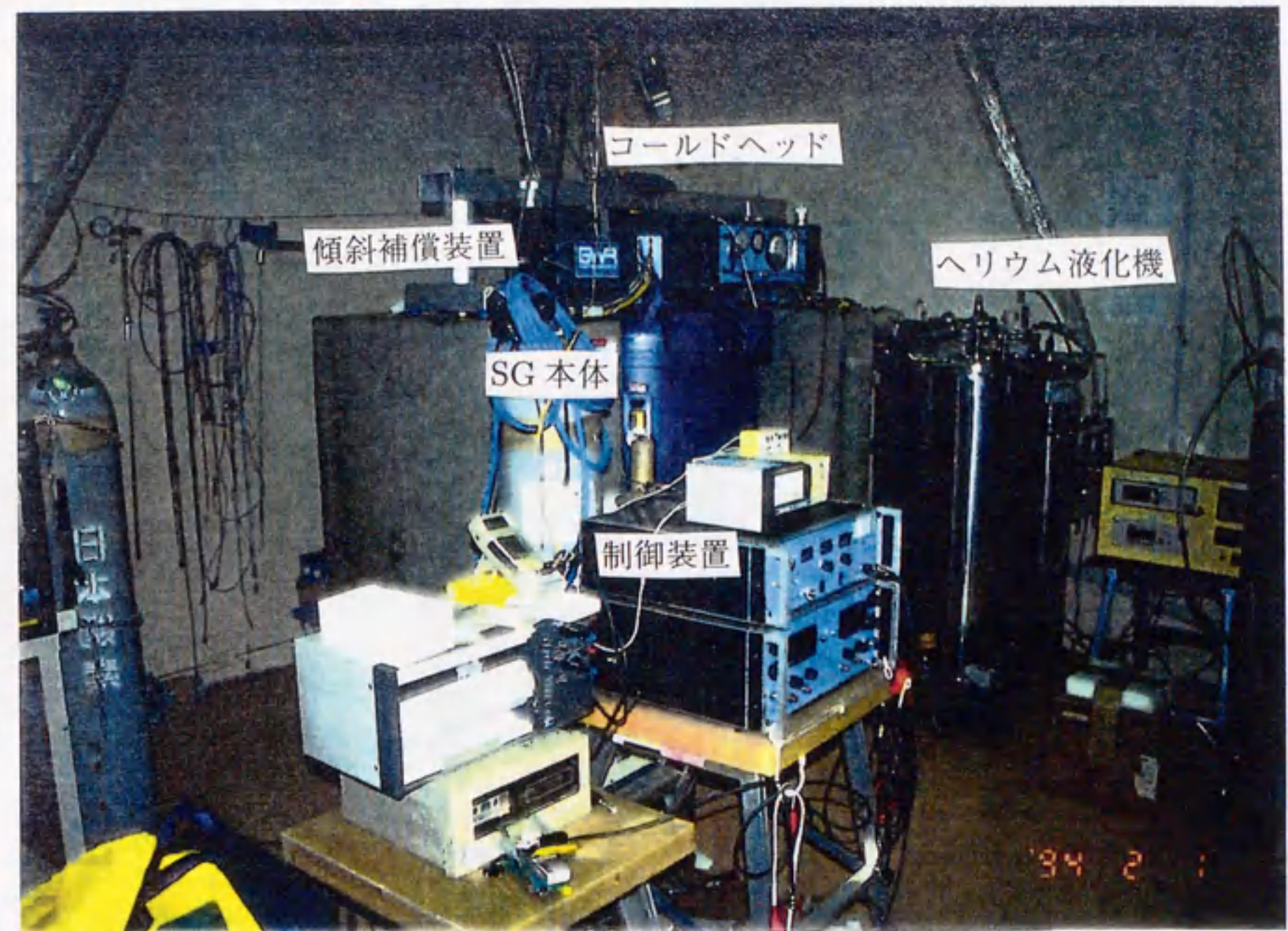


図 2-1-1: 昭和基地 (上: トップマウント方式) と
 キャンベラ (下: ボトムマウント方式) の超伝導重力計

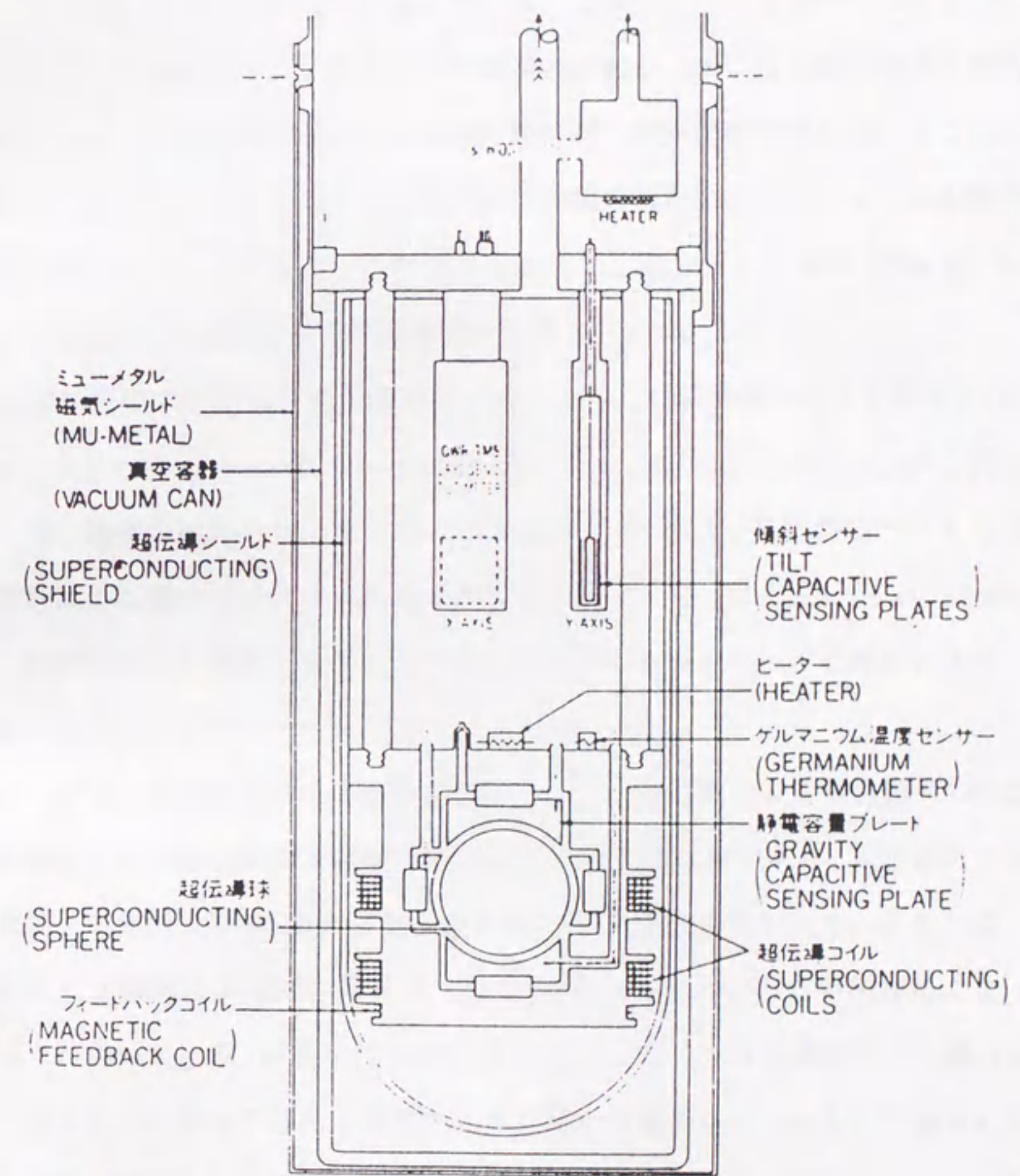


図 2-1-2: 超伝導重力計のセンサー部

このセンサー部がデューワー中の液体ヘリウムに浸っている。

開されていた IDA (図 2-1-4) に比べて地理的偏りがある。特に南半球には東南極の昭和基地と最近設置されたオーストラリアのキャンベラ、赤道域であるインドネシアのバンドンの 3 点しか観測点がない。その他は北半球中緯度地域に集中して観測点がある。南半球への設置・維持は全て日本によって行なわれている。

これまで SG は測地学的研究に多く用いられてきた。月と太陽の引力によって生じる起潮力による固体地球の応答として地球潮汐が起きるが、この地球潮汐を観測することによって、その周期帯における地球の弾性的・非弾性的性質を調べることができる。また、地球深部に存在する流体核の共鳴現象の解析からコア・マントル境界付近の性質を調べることができる。このような目的で、潮汐ファクター (理論値に対する振幅比と位相差) を精密に決定する努力がなされている。

測地学的研究の中でも、地球潮汐については SG の開発者らによる観測をはじめ、現在まで多くの研究がなされている (例えば、Prothero and Goodkind, 1972 [83])。古くから SG 観測が始められたヨーロッパでは、12 年という長期間のデータを用いた潮汐解析による潮汐ファクターの決定が行なわれている (Melchior et al., 1996 [66])。また、世界の中でも観測点密度が大きな日本国内の観測点データの解析により、流体核共鳴の研究が行なわれている (Sato et al., 1994 [91])。

低ドリフト・長期安定性を活かした観測として、極運動による重力効果の検出がある。極運動とは地球の瞬間自転軸の形状軸のまわりの回転であり、430 日のチャンドラー周期・年周および 10 数年変動・極移動による経年変化がある。これらは、過去には光学天文観測によって、現在は VLBI, SLR, GPS といった宇宙技術によって主に観測されている。SG が実用化されたことによって、この極運動による重力変化が捉えられるようになってきた。世界でも最も静かな観測点の 1 つとして知られているドイツ BFO 観測点での観測・データ解析が Richter et al. (1995) [86] によって報告されている。また、柿岡の 3 年間の SG データからも極運動による重力変化が捉えられている (Seama et al., 1993 [101])。データが蓄積してきた最近の測地学的研究は、このようなより長周期の現象に向かっている。

潮汐帯域や極運動のようなさらに長周期の現象の微弱な重力変化の検出の際、気

SG stations

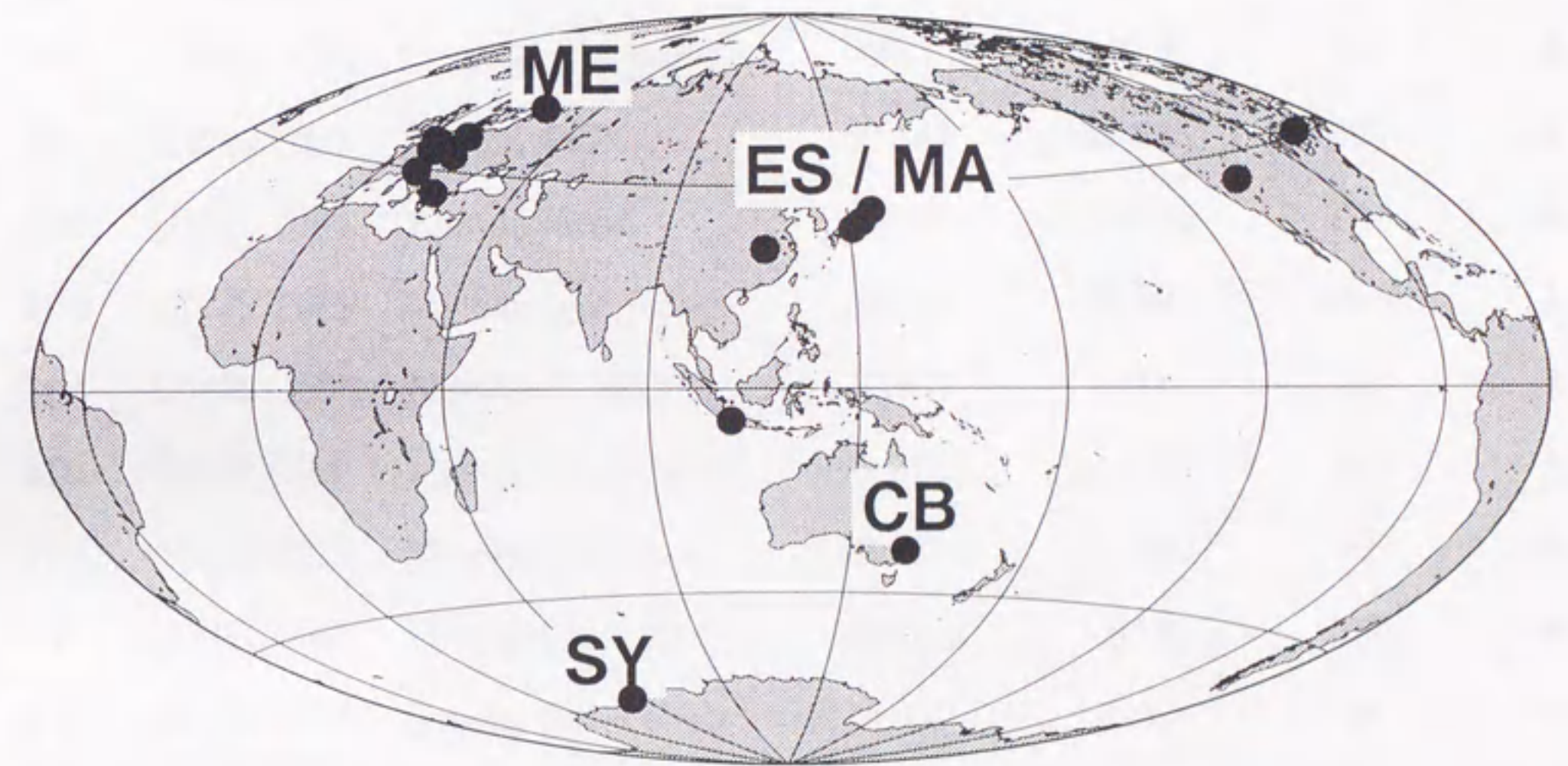


図 2-1-3：世界の SG の観測点分布

観測点の詳しい緯度・経度については、表 2-1-1 を参照。

Code	Instrument	Location	Lat deg N	Long deg E	Height(m)	Status*
BA	GWR T008	Bandung, Indonesia	-6.89638	107.63167	714	A
BE	GWR T003	ROB Belgium	50.7986	4.3581	98	A
BO	GWR CO24	Boulder, USA	40.1308	254.7672	1682	A
BR	GWR T015	Brasimone, Italy	44.121	11.413	840	A
CA	GWR T012	Cantley, Canada	45.5850	284.1929	269	A
CB	GWR CO31	Canberra, Australia	-35.1	149.2	743	A
ES	GWR T007	Esashi, Japan	39.148	141.335	393	A
KY	GWR T009	Kyoto, Japan	35.03	135.786	57.6	A
MA	GWR T011	Matsushiro, Japan	36.543	138.207	405.9	A
MB	GWR CO21	Membach, Belgium	50.617	6.00	250	A
ME	GWR T020	Metsahovi, Finland	60.2172	24.3958	55.6	A
PO	GWR T018	Potsdam, FRG	52.3806	13.0682	81	A
ST	GWR T005	Strasbourg, France	48.6220	7.6840	180	A
SY	GWR T016	Syowa, Antarctica	-69.0	39.6	38	A
VI	GWT CO25	Vienna, Austria	48.2493	16.3579	192.44	A
TH	GWR T017	Thessalonika, Greece	40.38	22.56		B
WE	GWR CO23	Wetzell, FRG	49.1458	12.8794	612	A
WU	GWR T004	Wuhan, China	30.53	114.30	??	A

* Status : A = GGP Site

B = Instrument not operational

表 2 - 1 - 1 : 世界の SG 観測点の位置

IDA stations

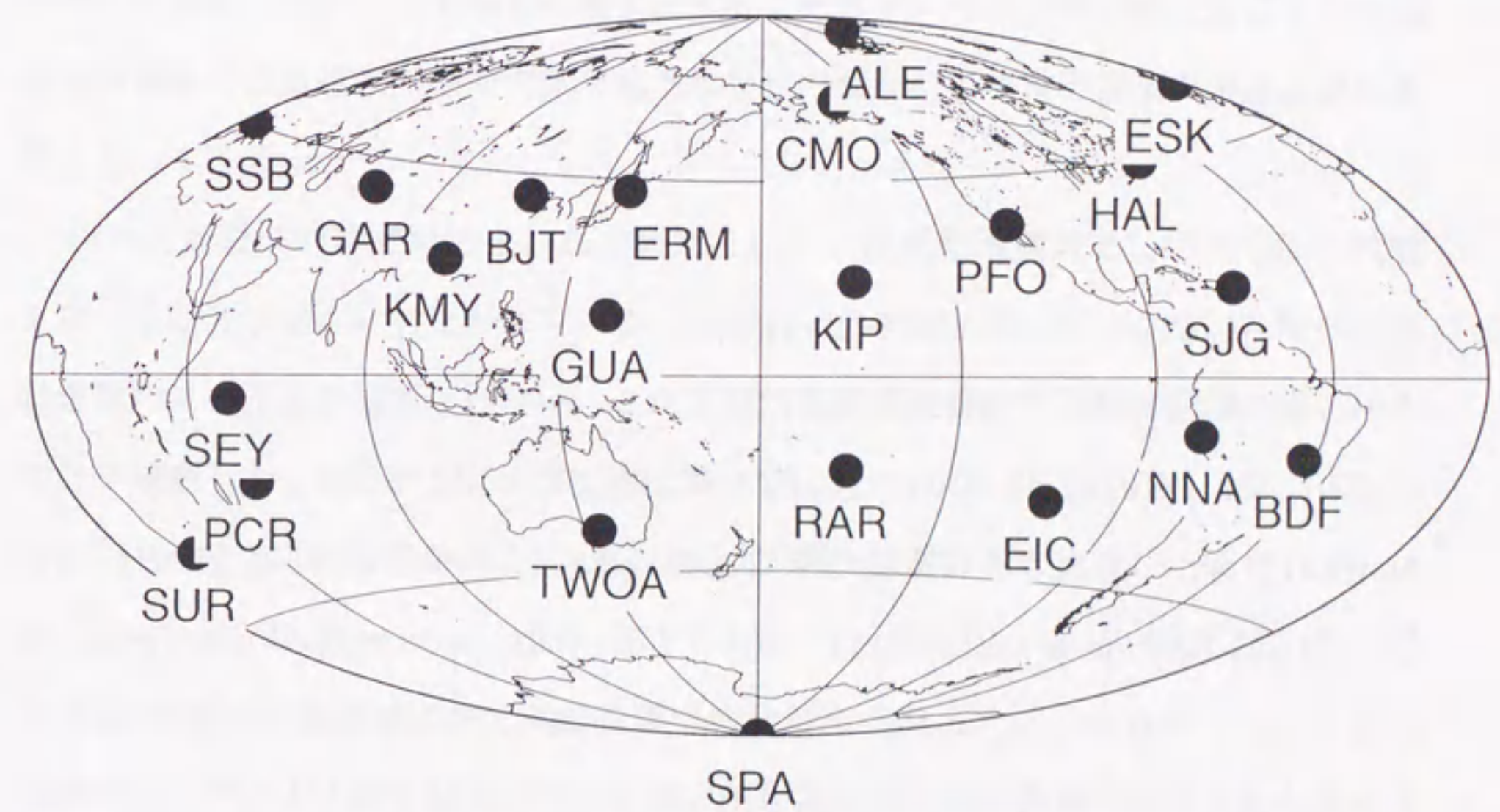


図 2-1-4: IDA ネットワークの観測点分布

圧や地下水位変動による重力変化は無視出来ない。気圧変動が重力変化に与える影響についての研究 (Warburton and Goodkind, 1977 [120]; Spratt, 1982 [109]) や国内の京都グループによって行なわれた大気や地下水の変動による重力効果の研究 (Mukai et al., 1995 [69]; Mukai, 1997 [72]) において、長期安定性に優れた SG が使われている。このような非周期的な重力変化を与える現象の解明は、潮汐などの周期的現象を研究するためにも重要である。

非周期的現象として、地殻変動の検出を目的とした研究がある (Goodkind, 1979 [34]; Goodkind, 1986 [35])。この場合、観測値から周期的成分や他の要因による非周期的成分を取り除いたドリフト成分の解釈が重要であるが、そのためには上記のような潮汐や極運動による重力効果や大気や地下水などの変動による重力効果の精密決定が重要となってくる。

一方、地震学的観点で行なわれた研究として、長周期地震計としての SG の性能を調べる研究が盛んに行なわれている。Kamal and Mansinha, L., 1992 [47] は自由振動帯域のスペクトル解析を行ない、これまでの長周期地震計と同様な記録が得られることを確認した。SG と LR との比較については、Zürn et al. (1991) [126]、Richter et al. (1994) [85] の研究がある。LR に加えて STS 地震計とも比較した研究 (Zürn et al., 1994 [128]; Richter et al., 1995 [86]) もある。Freybourger et al. 1997 [28] は、SG と STS の自由振動帯域に加え潮汐帯域での比較を行なった。これらドイツとフランスのグループによる研究結果については、昭和基地での並行観測の結果とともにあとの節で紹介する。

地球の弾性および非弾性構造を詳しく調べるために、自由振動帯域の微細なスペクトル構造を明らかにしようという試みもある。コアモードは、内核にエネルギーが集中しているため内核の構造に敏感なモードであるが、地表での振幅が非常に小さい。数少ない報告例として、IDA のデータ解析による検出 (Fukao and Suda, 1989 [29]; Suda and Fukao, 1990 [112]) があるが、IDA より高い感度を持つ SG による観測が期待できる。Imanishi et al., 1992 [43] は、国内の江刺の SG データの解析からコアモードの検出を報告した。しかし、得られたコアモードの Q が IDA で得られたものより

低い値であるという結果が得られた。

サブサイスミックバンドはGGPの最も重要なターゲットである。そこでは、コアアンダートーンと呼ばれる流体核中の重力波、シュリヒターモードと呼ばれる重力を復元力とする内核の並進運動の存在が理論的に予測されている。これらの信号を観測することで中心核の構造・ダイナミクスを明らかにすることができる。過去にコア・アンダートーンとシュリヒターモードの検出報告はあるものの、後の研究によっていずれの結果も疑問視されており、今後のデータの蓄積と研究が待たれる。例えば、ヒンズークシュの深発地震後のスペクトル解析によって周期13.89hのコアアンダートーンを検出したとの報告があった(Melchior and Ducarme, 1986 [65])。しかし、後の研究からは否定的な結果が出されている(Zürn et al., 1987 [125]; Mansinha et al., 1990 [61])。IDAネットワークによる検出も試みられたが、検出することはできなかった(Cummins et al., 1991 [12])。また、ヨーロッパのSGデータのスタッキングによってシュリヒターモードを発見したという報告があった(Smylie, 1992 [106])が、この観測についても理論・観測の両面から否定的な研究結果が出されている。

その他には、SGの感度の決定方法についての研究が行なわれている。これまで、理論潮汐と振幅を合わせる、感度の分かっているLRと並行観測して観測された潮汐の振幅を合わせるなどの方法が取られてきた。現在ではFG5型絶対重力計によるキャリブレーション法が世界の標準になりつつある(Hinderer et al., 1991 [40]; Francis, 1997 [27])。日本にも最近、国土地理院と東大地震研究所にFG5が導入され、国内のSGのキャリブレーションが行なわれている(Sato et al., 1996 [94]; Okubo et al., 1997 [78])。FG5型絶対重力計はSGのキャリブレーションのための有力なツールの1つである。今後、長期の観測によって微弱な重力変化を捉えようという場合には、定期的なキャリブレーションが必須になってくるであろう。

2.2 南極・昭和基地での観測

2.2.1 超伝導重力計・ラコスト重力計による重力連続観測

南極・昭和基地は世界に先駆けての南半球における SG 観測点である。世界から見れば地理的な観測空白域を埋めるという意義の他に、日本としては日本列島のような変動帯でなく安定した大陸上で観測できること、また堆積層がなく直接基盤岩上に設置されているため地下水の影響を受けないという利点がある。南極昭和基地の SG は、南極観測第 IV 期 5 ヶ年計画「地殻動態の総合的測量・監視計画」の一環として第 34 次日本南極地域観測隊 (the 34th Japanese Antarctic Research Expedition: JARE34) により設置された。重力計立ち上げまでの経緯・観測概要については、いくつかの報告にまとめられている。(佐藤, 1990 [88]; 佐藤ほか, 1993 [89]; Sato et al., 1993 [90]) また、各隊次の観測状況はそれぞれの観測隊報告に記されている (例えば、国立極地研究所編, 1995 [59])。35 次隊での観測状況については、付録 6.2 を見ていただきたい。南極昭和基地は東南極、リュツォ・ホルム湾東岸宗谷海岸の沖、東オングル島上 (69.0S, 39.6E) に位置する (図 2-2-1)。東オングル島は、7 億年の変成年代を持つ花崗片麻岩の基盤岩からなり堆積層は存在しない。重力観測室は、JARE32 によって 1991 年に直接基盤岩上に建設された。建物の振動・衝撃が直接基台に伝わらないように、床面と基台の間に空隙を設けている。(渋谷, 1991 [102])

重力観測室内部には SG 用の基台と国際絶対重力基準点のある基台がある。後者では通常 LR(D73 型) による連続観測を行なっているが、1995 年には SG のキャリブレーションも兼ねて、FG5 型絶対重力計による同時観測を行なった (山本, 1996 [124])。SG 観測の維持に必要な液体ヘリウムは、南極観測船しらせの安全対策から輸送が困難なため、現地でヘリウムガスから液化する。観測室内には SG 本体・収録装置のほかに、ヘリウムを液化するための機器が置いてある。SG の液体ヘリウムの蒸発量を抑えるため、常時コールドヘッドでデュワー内のガスを再冷却している。このコールドヘッドのコンプレッサーおよびコンプレッサーの冷却器 (チラー) も本体と同一室内にあり、これらの機器からの排熱のため重力計室内は 1 年を通して暖房機器を必要

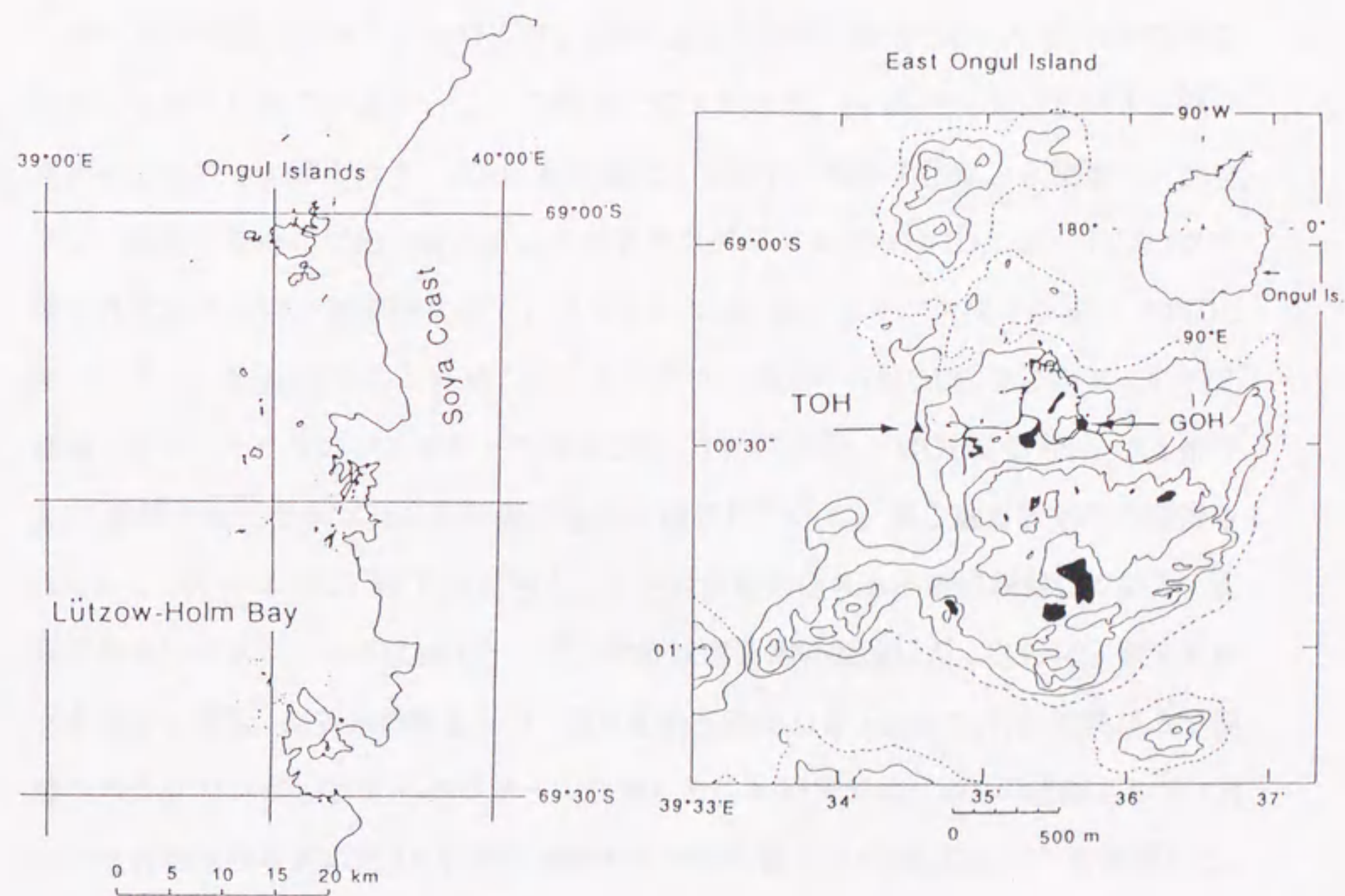


図 2-2-1: 南極・昭和基地 (東オングル島)。
GOH は重力計室の位置、TOH は海洋潮汐観測小屋。

としない。LR およびそのフィードバック回路は、重力計室内の温度変化の影響を抑える目的で、35 次隊観測開始時より発泡スチロールと木製の板からなる箱で覆う工夫をした。当初、33 次隊 (1992 年) より SG と LR の並行観測が始まる予定であったが、SG の立ち上げがうまくいかなかったため、それに先駆けて LR による重力連続観測が始められた。その LR による 1 年間の潮汐と自由振動の観測結果について、Kanao and Sato (1995) [52] が報告している。

データの収録システムについては、Sato et al. (1993) [90], Sato et al. (1995) [92] に詳しく述べられているが、ここで簡単に述べておく。図 2-2-2 にデータ収録システムのブロック図を示す。SG の重力変化に対応する電圧変化は、2 種類のアナログフィルターを介して出力される。このアナログフィルターは IDA ネットワークで使われていたものと同等のもので、カットオフ 50 秒のローパスフィルター (TIDE フィルター) と 50 秒から 1 時間のバンドパスフィルター (MODE フィルター) の 2 種類である。それらのフィルターの出力信号、TIDE 信号と MODE 信号は、7.5 桁で A/D 変換され、サンプリング間隔 2 秒で収録されている。同じ重力計室内に設置されている LR の TIDE・MODE 信号と、気圧計からの信号も同時に収録している。上記の信号はペンレコーダに出力し、重力計の状態を常時監視した。さらに、環境データとして、室温・傾斜補償装置出力・温度制御回路出力を 16bit で A/D 変換後 5 分間隔でサンプリングし、データロガーに収録した。本研究では、SG の感度として LR との並行観測から求めた M_2 分潮の振幅から決めた値 ($-57.965\mu\text{Gal/V}$) を使用した。MODE 記録の感度に換算すると、3 mHz で $2.2915 \times 10^{-14}\text{ms}^{-2}/\mu\text{V}$ になる。

2.2.2 昭和基地の超伝導重力計連続観測による測地学的研究

ここで、これまでの昭和基地 SG 観測で得られた主要な研究成果をまとめておく。Sato et al. (1995) [92] は、1 年間 (1993 年 3 月 22 日-1994 年 3 月 21 日) の TIDE 記録の解析から昭和基地における潮汐ファクターを決定した。従来のラコスト重力計による観測から半日周潮の潮汐ファクターが Dehant-Wahr 理論より 10% 大きいという結果が得られていたが、SG の観測でも同様の結果が得られた。さらに Sato et al.

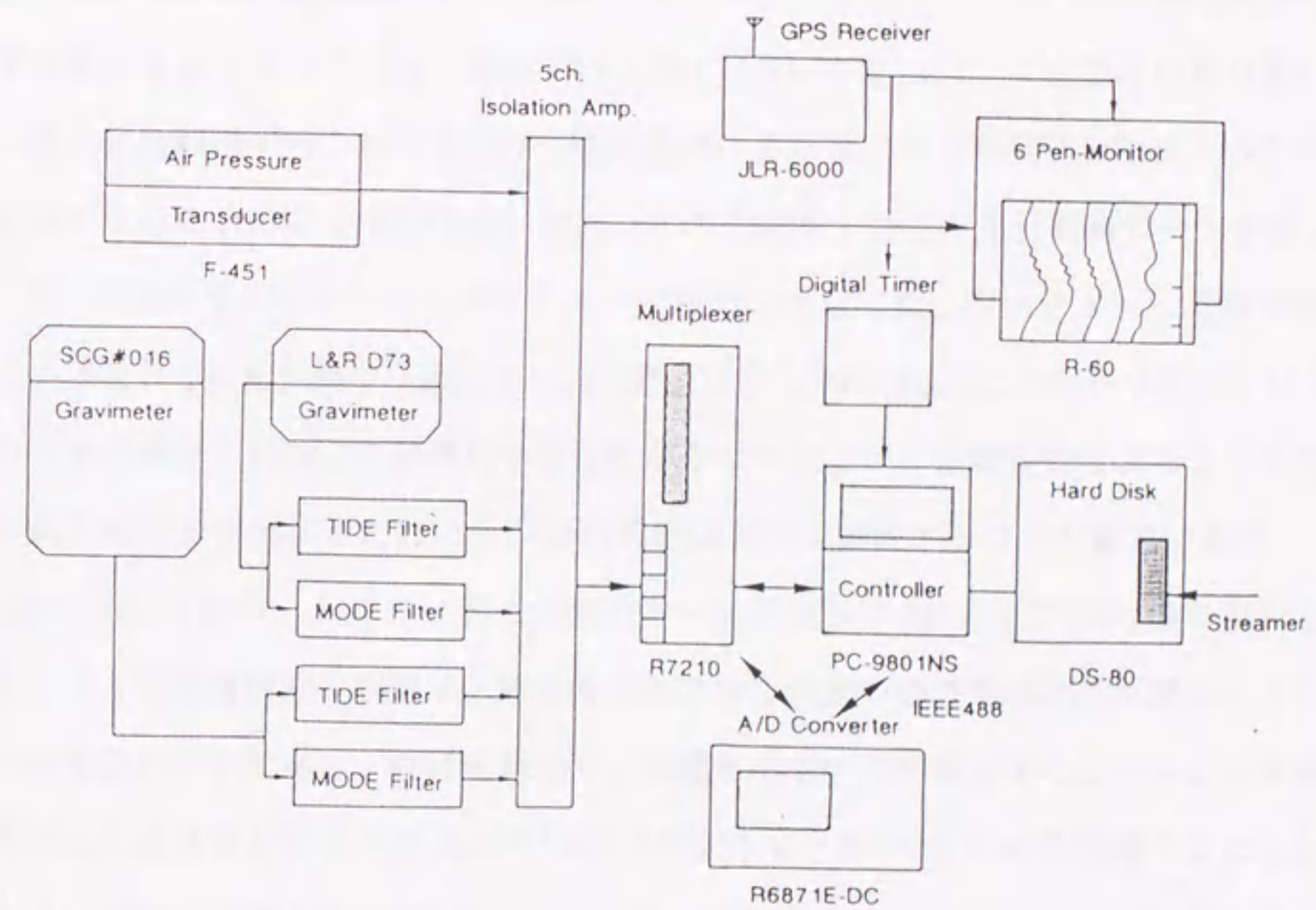


図 2-2-2: 昭和基地・重力計室の SG および LR のデータ収録システム

(1996) [93] は、約 2 年間の TIDE 記録の解析と Matsumoto et al. (1995) [64] による新しい海洋潮汐モデルを使った海洋潮汐の影響の計算に基づいて、日周・半日周潮汐の潮汐ファクターについて調べた。理論から求めたファクターの差は日周潮で約 0.5 %、半日周潮で約 2 %であった。この結果は、これまで指摘されていた半日潮の潮汐ファクターの観測値と理論値との大きな差の原因が主として海洋潮汐補正の誤差に起因していることを示唆している。Tamura et al. (1997) [116] は、3 年間のデータを使い短周期潮汐を再解析した。海洋潮汐の影響を補正した潮汐ファクターの値は 1 %以内で理論値と一致していた。この先、例えば潮汐ファクターの緯度依存性の詳しい議論をするためには、定期的な重力計のキャリブレーションファクターの正確な見積もりが必要であると述べている。1995 年 1-2 月 (JARE36 夏) には FG5 型絶対重力計による重力連続観測が行なわれており、海洋潮汐による重力の時間変化を検出することに成功している (山本, 1996 [124])。最近、この絶対重力計との並行観測データを使って、SG のキャリブレーションファクターの決定を行なった。ファクターは現在使用している値と 1.5 %以内で一致していた (青山ほか, 1997 [2])。このキャリブレーションの方法は世界の観測点の標準的な方法になりつつあるが、地殻変動によるような長期の重力変化を検出するためにも、昭和基地において継続することが重要であろう。

Sato et al. (1997a) [98] は、約 2 年間のデータを使って Mf および Mm 潮の解析を行なった。長周期潮汐の観測は、地球の非弾性的な性質の周波数依存性を調べるうえでの貴重なデータである。中緯度地域では振幅が小さいため観測例の少ないこの長周期潮汐は、高緯度にある昭和基地では振幅が大きく、高い S/N 比で観測することができる。昭和基地の Mf 潮汐は約 $16\mu\text{Gal}$ で、江刺での約 $3\mu\text{Gal}$ に比べて 5 倍以上の大きさがある。また、昭和基地があるオングル島は基盤岩がむき出しの状態、堆積層がないのでしばしば問題となる地下水の影響を考慮する必要がない。そのため高い精度で長周期潮汐の観測が可能である。

極運動による重力変化は 10 数 μGal 程度 (チャンドラー周期は約 435 日) であるが、高感度・長期安定な SG によってその観測が可能となった。昭和基地の 3 年間の観測のデータ解析から、極運動の影響による重力変化の検出とチャンドラー運動の周

期とQ値の推定が試みられている。(Sato et al., 1997b [99]; 青山, 1997 [1]) データ長が短く残差成分に含まれる不規則成分のため推定誤差が大きいものの、周期 435 日、Q値 81 という値が得られている。これは Smith and Dahlen (1981) [105] による理論値と調和的な結果だった。一方、極運動の観測値と予測値の比・位相差は他の観測点(例えば、Richter, 1990 [84]) と大きく食い違っていた。精度を上げるためには、大気および海洋の影響の正確な見積もりと、今後の観測の継続・データの蓄積が望まれる。

これまでに述べた周期的な潮汐成分を除いた残差成分には、永年変動成分が含まれている可能性がある。重力計自身のドリフトとの分離に課題があるが、後氷期リバウンドによる地殻の隆起による重力の永年変化の検出が期待されている (Kaminuma, 1996 [48])。

これまで昭和基地においても測地学的研究が先行しており、自由振動帯域での成果は、大きな地震によって励起された自由振動のスペクトルが示されてはいるものの、ほとんど報告されていないのが現状である。そこで本研究では主に自由振動帯域の解析を中心に行なった。前節でも述べたように、昭和基地では SG、LR のほか、STS1 地震計で自由振動帯域の観測を行なっている。世界でもいくつかの研究例があるように、SG の長周期地震計としての性能を調べるには様々なセンサーの地震記録を使った比較が有効である。まずは、昭和基地において観測された大地震のデータを使ったスペクトルの比較を行なった。その結果、SG でも LR、STS と同様な地震記録が得られていることがわかった。このことについては、次節で詳しく述べる。さらに後章ではスペクトログラムを使ったノイズレベルの比較も行なう。

2.2.3 超伝導重力計と他のセンサーとの比較

第 35 次日本南極地域観測隊の越冬期間中、SG、フィードバック型に改造した LR (Harrison and Sato, 1984 [36]) および STS1 型地震計によって多数の地震の波形記録が得られた(例えば、名和ほか, 1994 [73])。図 2-2-3 に 1994 年 1 年間に観測された地震の震央分布 (Nawa and Kanao, 1996 [74]) を示す。SG の長周期地震計としての性能を調べるため、地震によって励起された自由振動の解析を行ない各センサーと

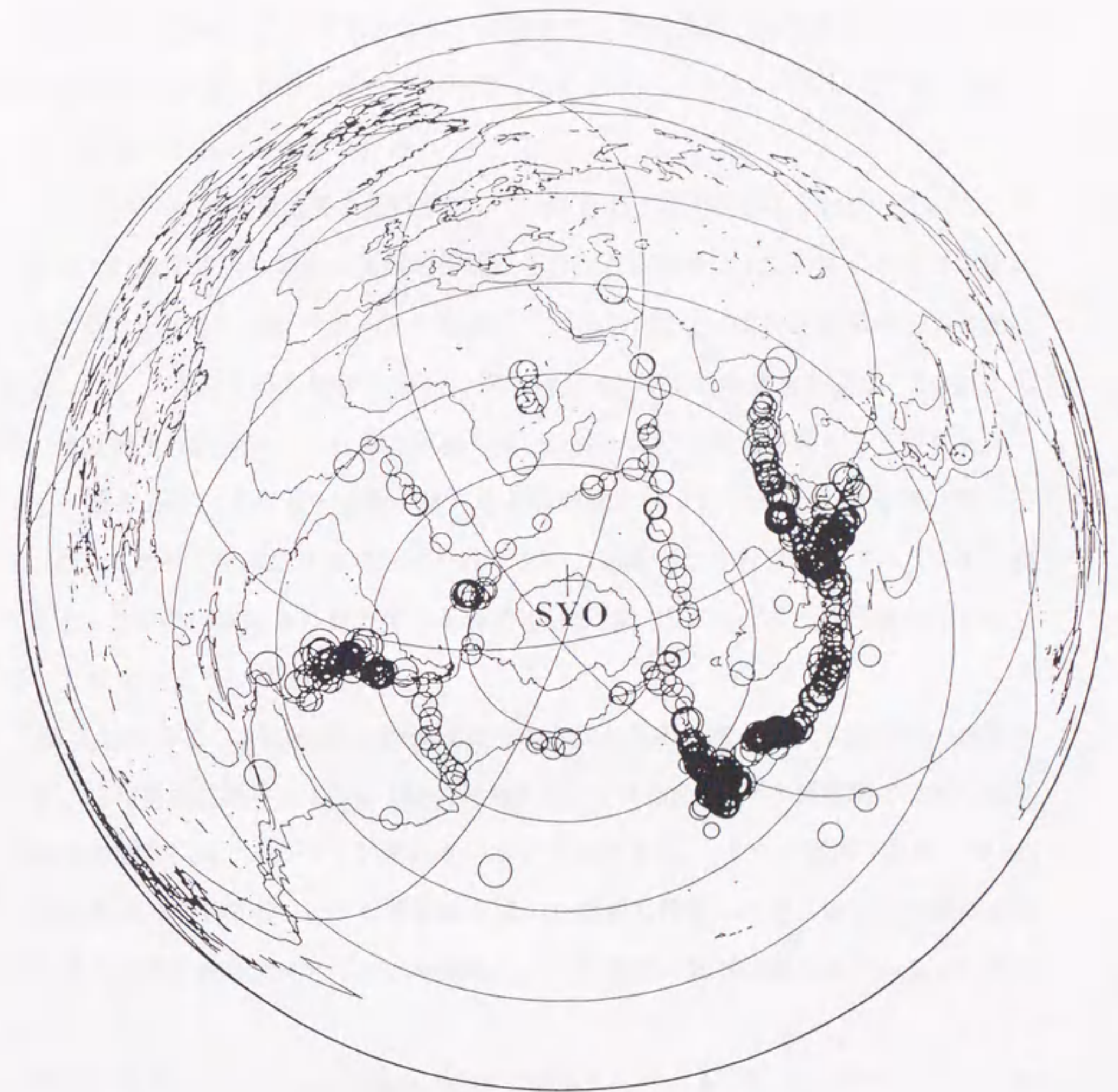
の比較を行なった。その結果、大振幅のモードで比較したとき、SG、LR、STS1それぞれ同様な自由振動記録を得ていること、また、中でもSGが最もノイズレベルが低いことがわかった。以下、SGとLR、SGとSTS1の順で、地震のスペクトルを比較する。

まず、同じ重力計室内に設置されているSGとLR(D73)の地震記録のスペクトルを比較した。解析に用いた地震は1) '94年6月のボリビア深発地震、2) 10月の北海道東方沖地震、3) 11月のフィリピンの地震である。前2つはモーメントマグニチュード (Mw) が8を越える期間中最大の地震で、各センサーともにS/Nの良い記録が得られた。後のは Mw が7程度の地震である (表 2-2-1)。

地震	発震時 (UT)	震源位置	mb	Ms	Mo(Nm)
ボリビア深発地震	94/6/9 00:33:16.4	13.83S 67.56W 637.0km	6.9	6.8	2.63x10 ²¹
北海道東方沖地震	94/10/04 13:22:58.3	43.71N 147.33E 33.0km	7.4	8.1	3.00x10 ²¹
フィリピン地震	94/11/14 19:15:30.7	13.53N 121.09E 33.0km	6.1	7.1	5.12x10 ¹⁹

表 2-2-1: 解析に用いた地震 (Harvard CMT カタログより)

具体的な解析方法は以下のとおりである。サンプリング間隔2秒のオリジナルデータを移動平均によって20秒にリサンプリングし、DC成分、直線トレンドおよび潮汐成分を最小自乗法によって除去した。1日長のデータにハニングテーパーをかけ、FFTによってフーリエ変換しパワースペクトルを求めた。その際に、アナログフィル



1994 (JARE-35)
N=727

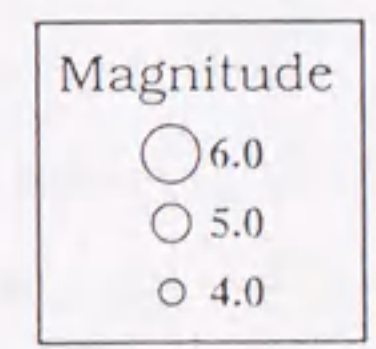


図 2 - 2 - 3 : 1994 年 南極・昭和基地で観測された地震の震央分布

タ (MODE フィルタ) のレスポンスを補正した。図 2-2-4 に結果を示す。いずれの場合も、 $10^{-16} \text{m}^2/\text{s}^3$ より大きなピークはよく一致するが、同程度か小さなピークは LR の S/N が悪くなり、ピークが一致しなくなる。ノイズレベルは SG の方が LR より一桁以上小さいことがわかる。

次に、ボリビア深発地震の記録を用いて SG と上下動の STS1 を比較した。ここでは STS1 の感度が落ち始める長周期帯域に注目した。解析は LR の場合とほぼ同様な方法で行なったが、360 秒モードで観測している STS1 の BRB 速度記録を加速度に換算した。スタート時を地震発生後 4 時間後と 52 時間後の結果を図 2-2-5 に示す。地震発生 4 時間後の 1 日間の記録では、2mHz よりも短周期側ではスペクトルはよく一致するが、もともと感度が落ちる長周期側では STS1 の S/N は非常に悪くなる。SG の方が二桁以上ノイズレベルは小さい。地震発生 3 日目のスペクトルを比較すると、SG でははっきり見えている信号も、STS1 ではノイズと見分けがつかなくなってしまうように見える。

図 2-2-6 に、2 mHz 以下の長周期での SG と LR のスペクトルの比較の結果を示す。昭和基地における SG と LR の比較からは、2 mHz 以下の長周期では微小振幅の信号の観測には、SG の方が優れているように見える。また、国内 (江刺) の SG と昭和基地の SG のボリビア地震記録を用いた比較も行なったが、安定な大陸にある昭和基地の SG の方がノイズレベルが低く、S/N の高い記録が得られていることがわかった。

世界の観測点における比較観測の結果が報告されている。ドイツのグループは、理想的な状態の LR は SG なみに観測できると主張している。Richter et al., 1995 [86] は、BFO 観測点で SG、LR、STS1、STS2 の同時観測を行ない、ボリビア深発地震の自由振動の解析から、LR、STS でも SG と同等かそれより良い S/N で観測できることを示した。15 min から 1 day までの SG と LR のノイズスペクトルを比較してみると、SG よりも LR の方がやや低いという結果が得られた。ただし、0.2 cycle/day 以下の周波数帯域では、LR より SG の方が優れているという。

また、フランスのグループ (Freybourger et al., 1997 [28]) は自由振動帯域から潮

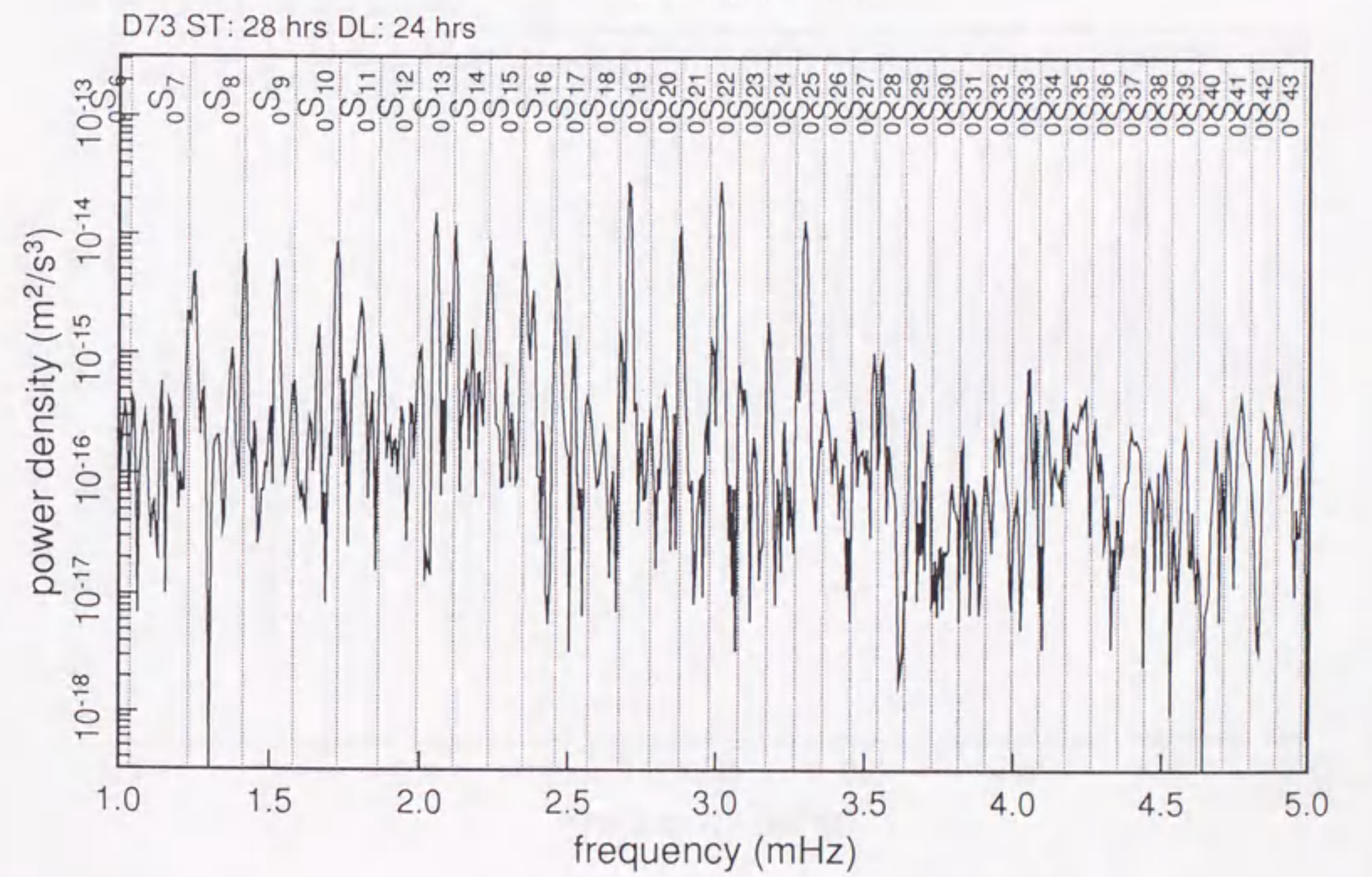
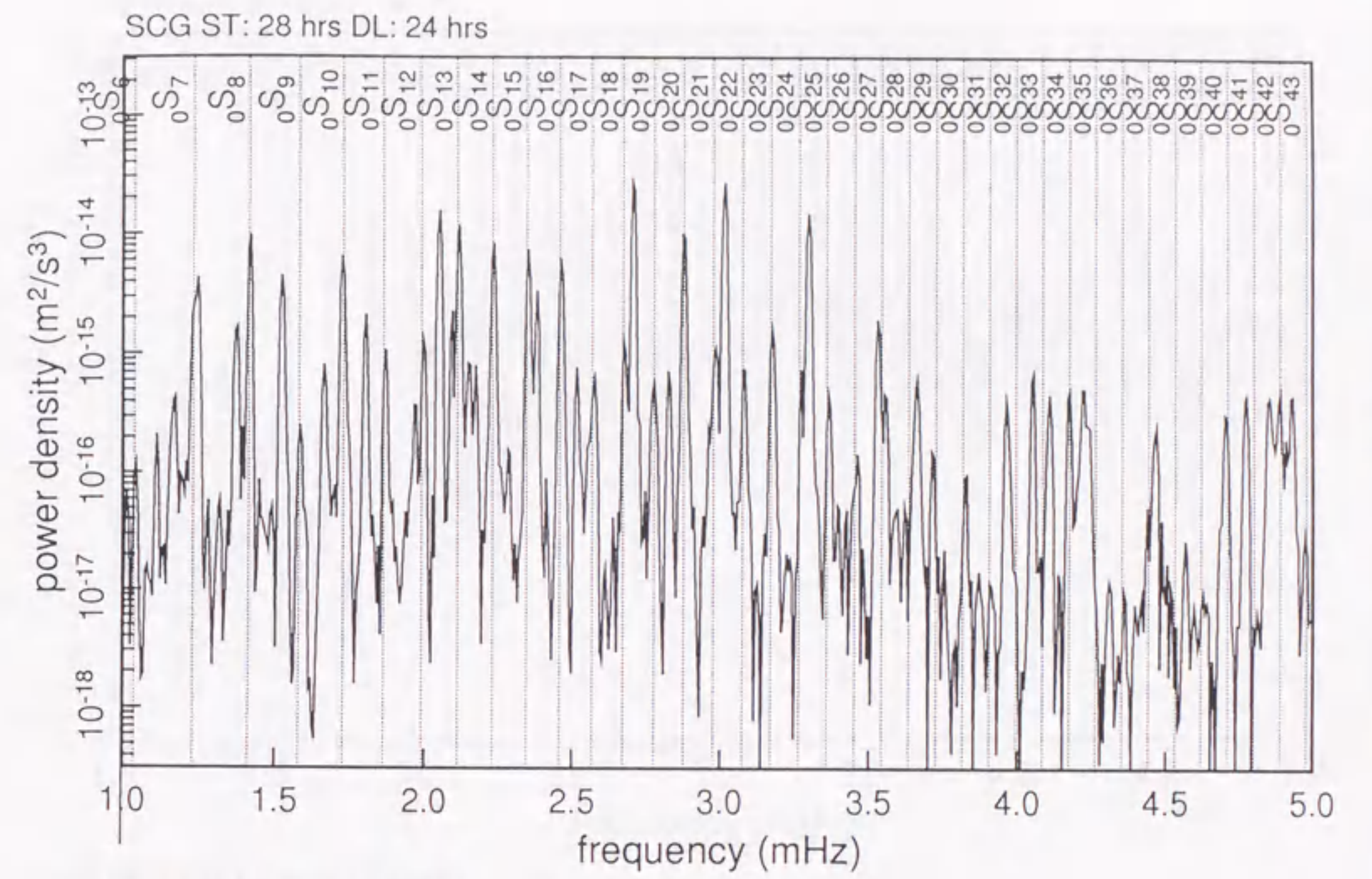


図 2 - 2 - 4 - a : SG と LR の比較 (1994 年 6 月ボリビア地震)

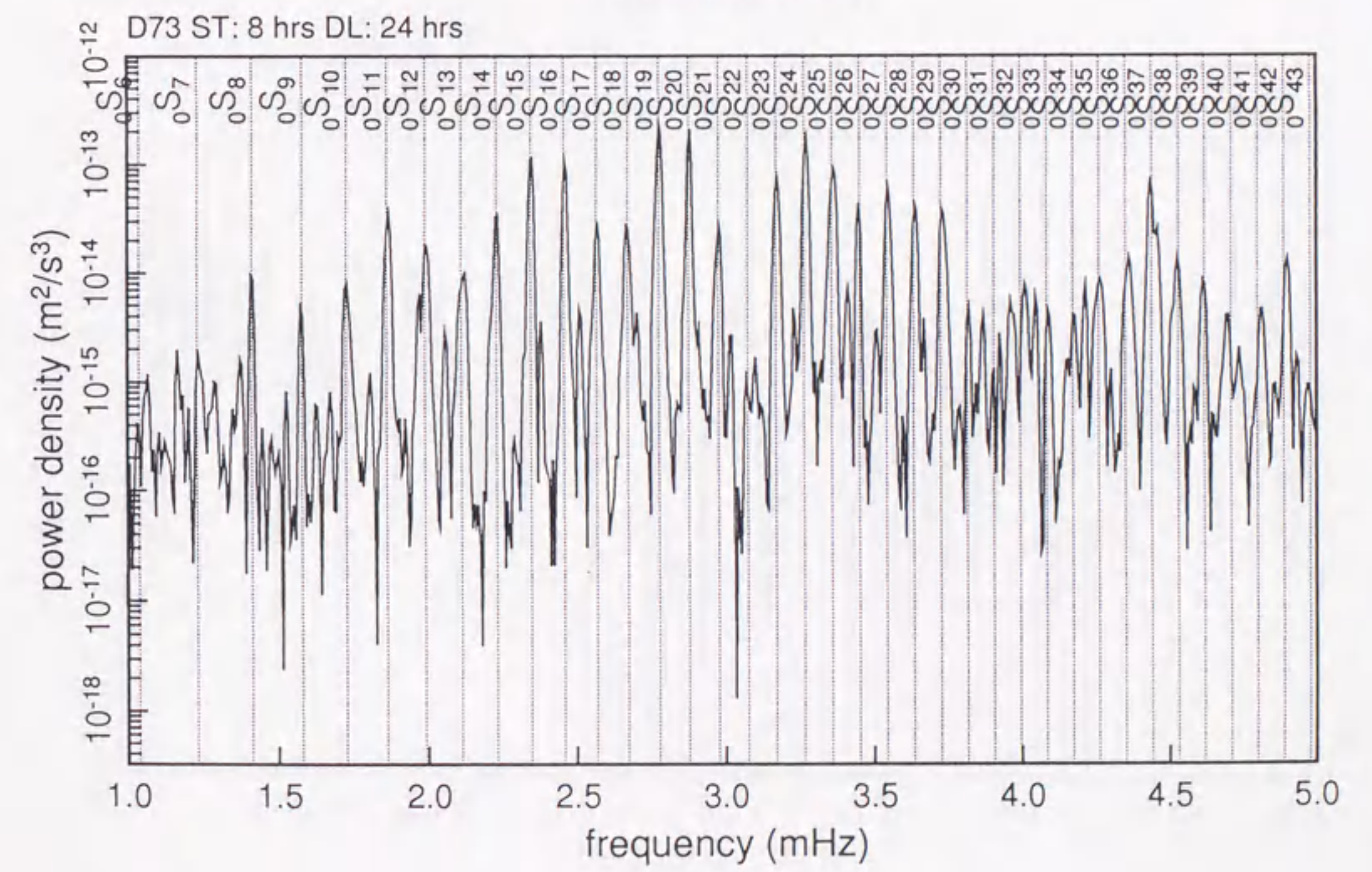
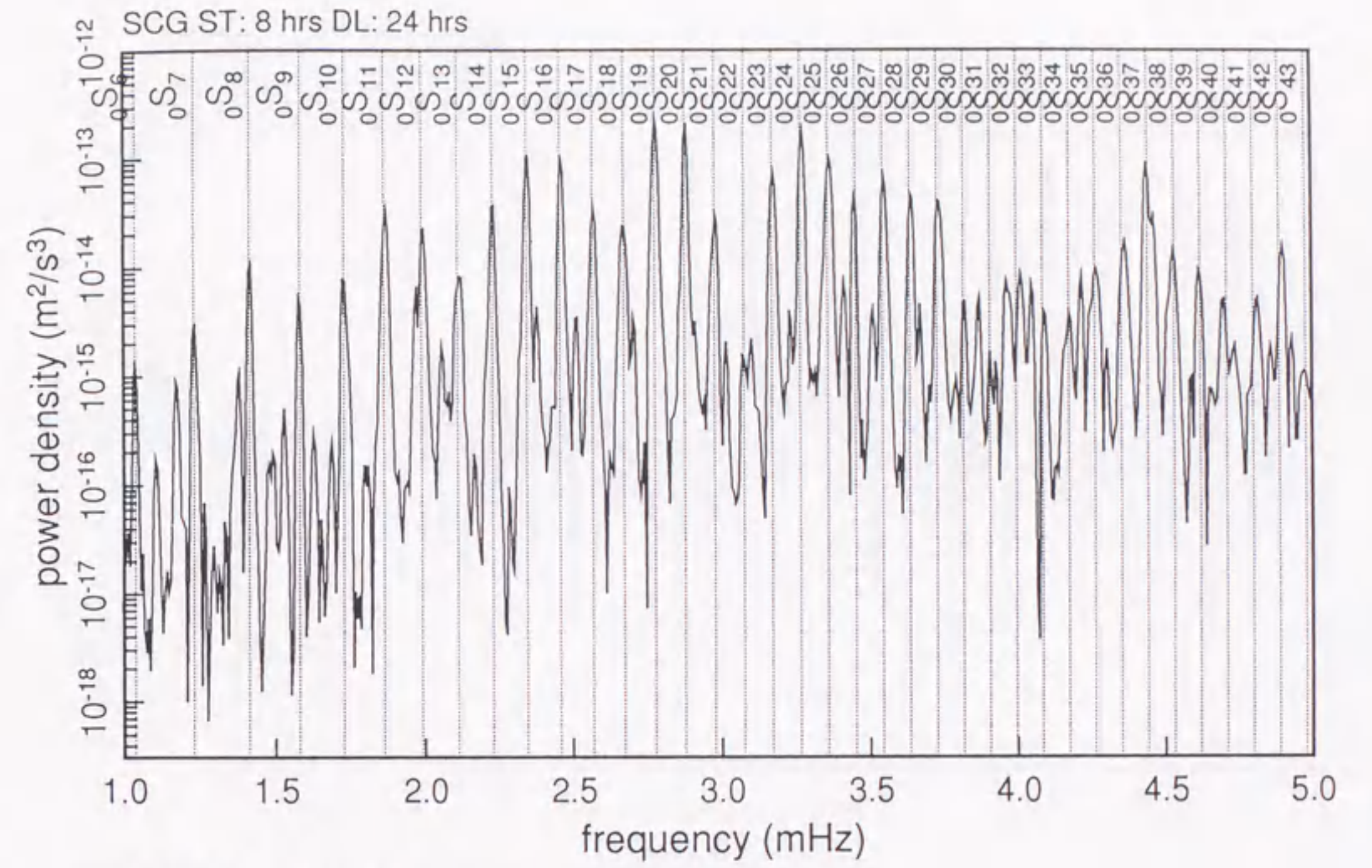


図 2 - 2 - 4 - b : SG と LR の比較 (1994 年 10 月北海道東方沖地震)

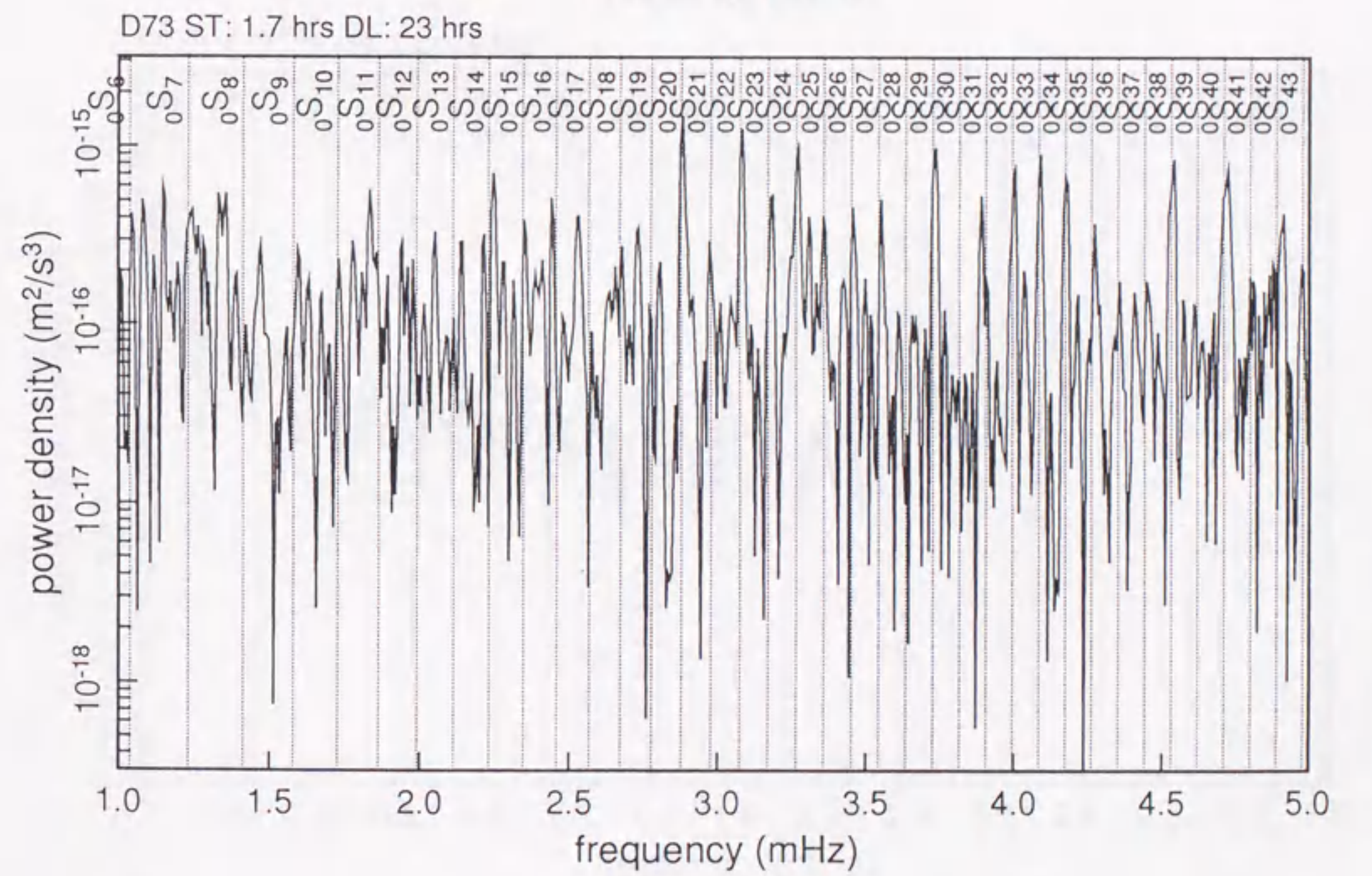
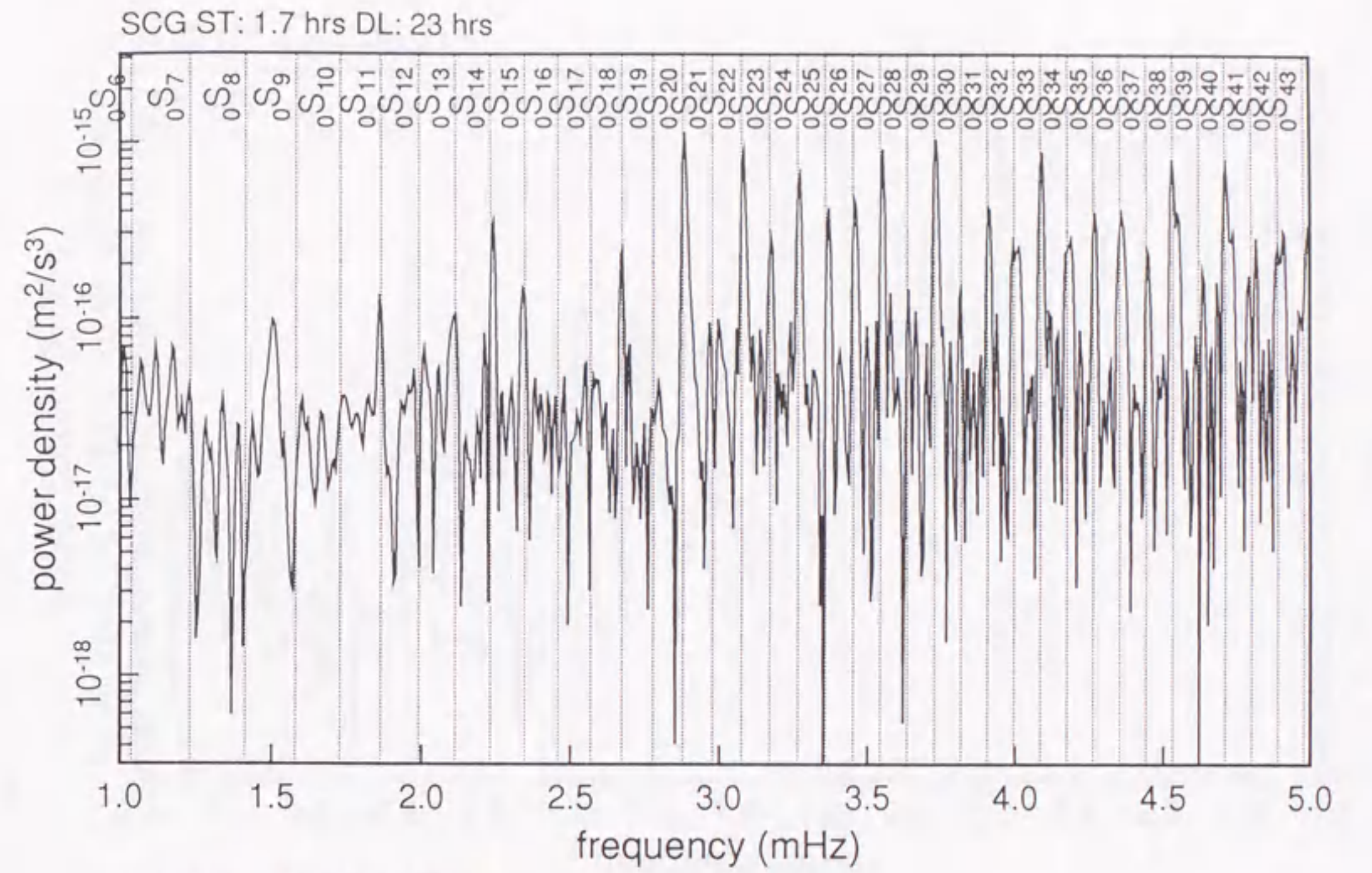


図 2-2-4-c: SG と LR の比較 (1994 年 11 月フィリピン地震)

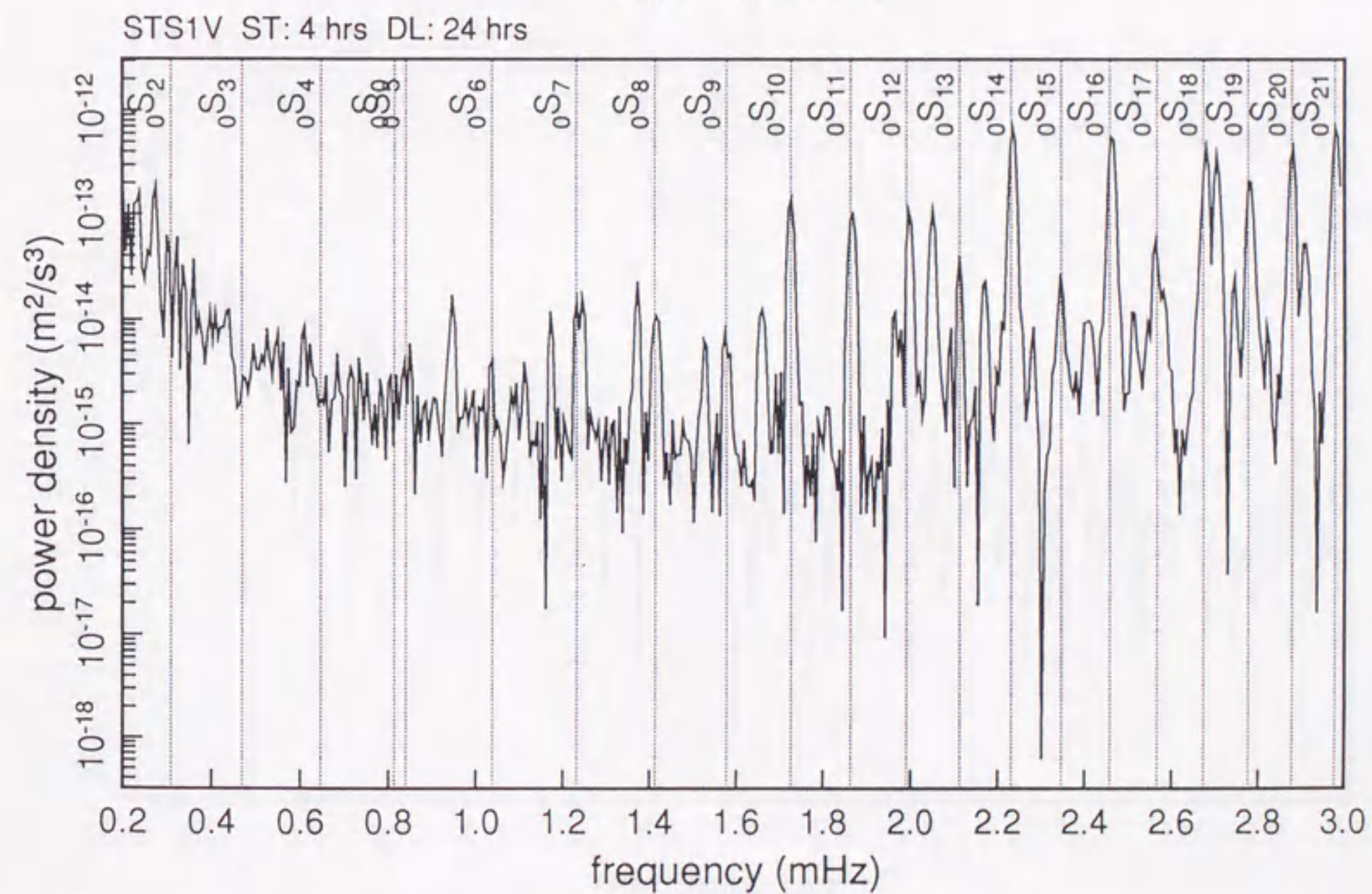
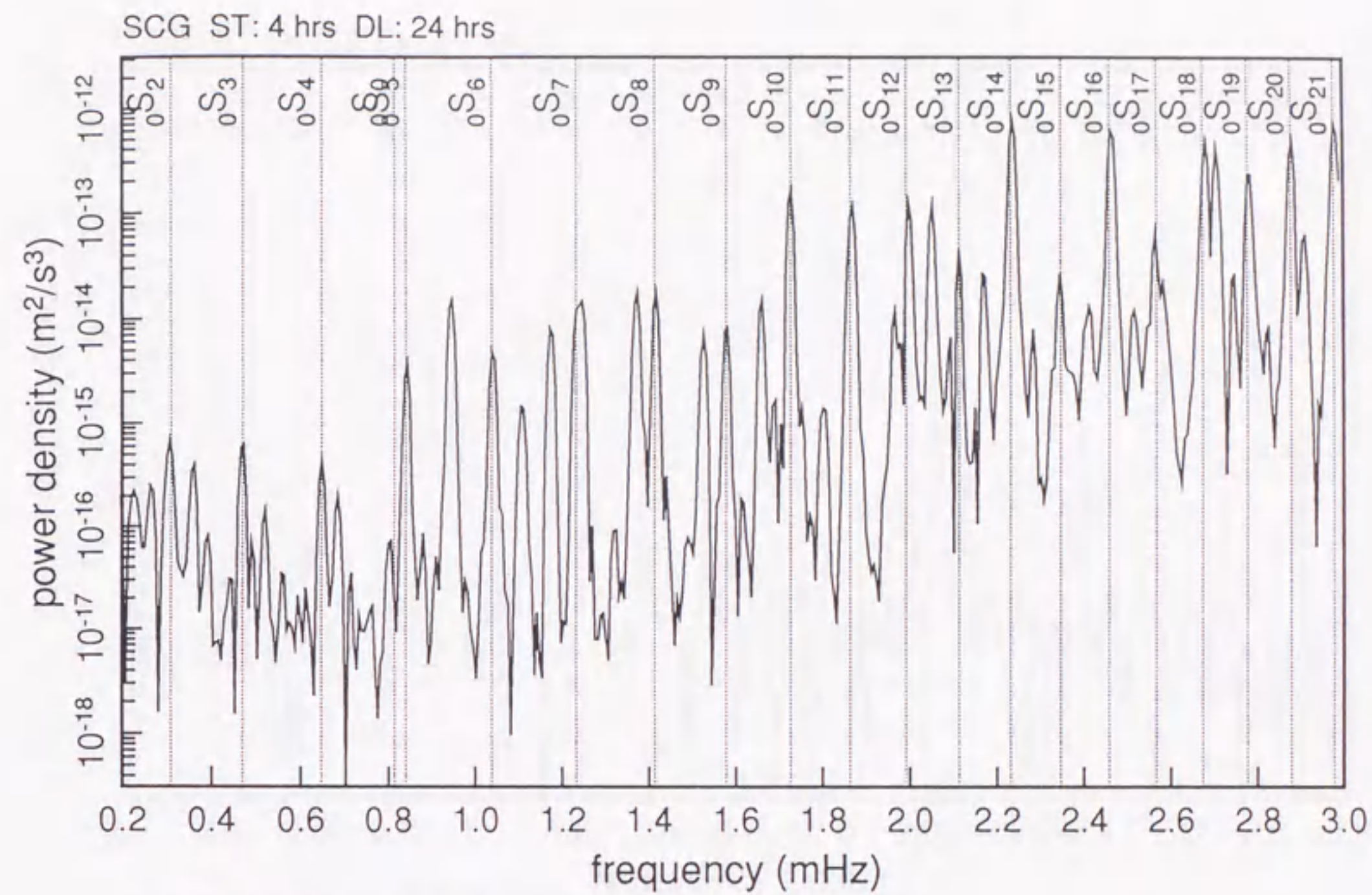


図 2 - 2 - 5 - a : SG と STS1 上下動の比較

(1994 年 6 月ボリビア地震発生、4 時間後)

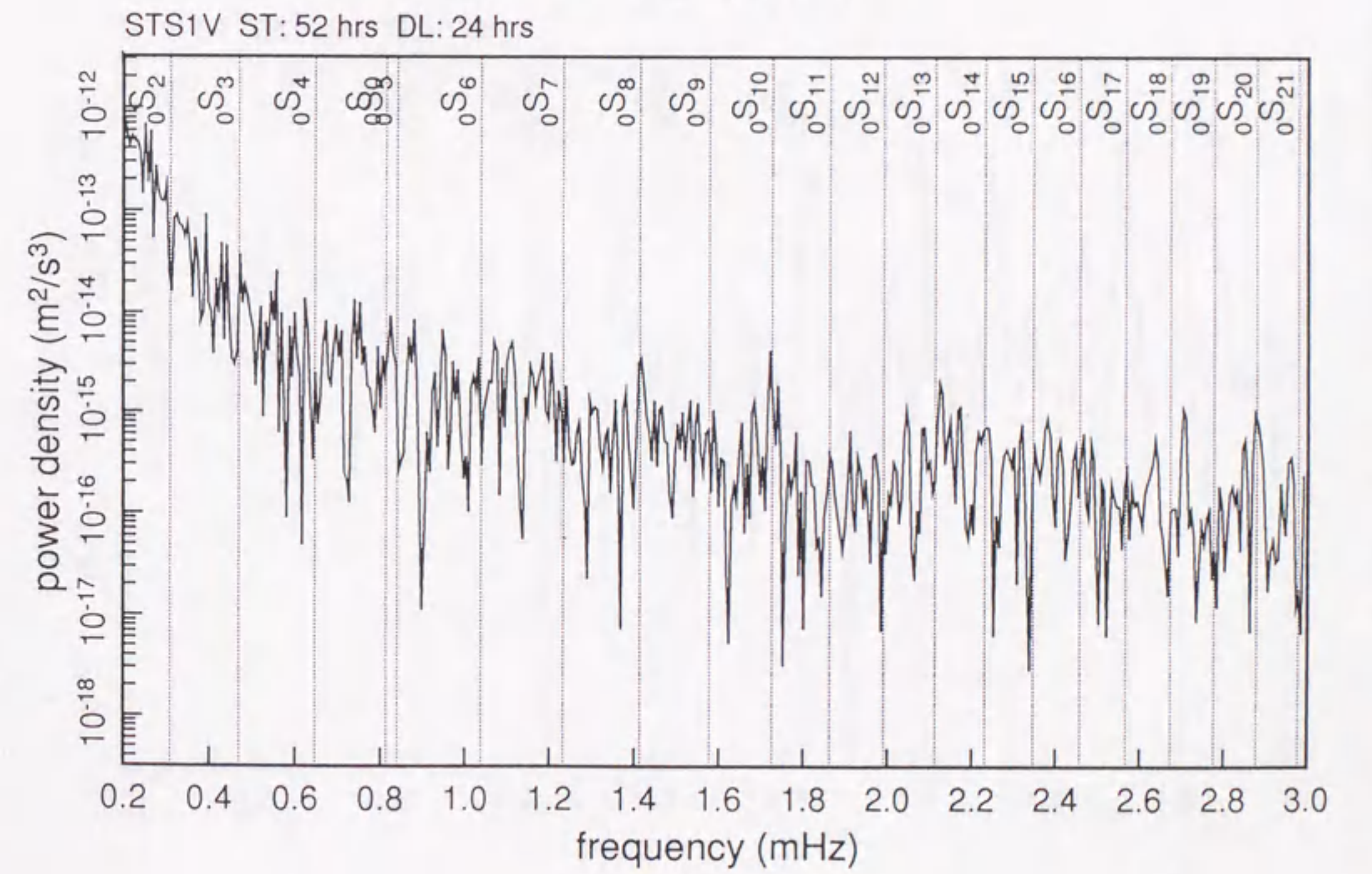
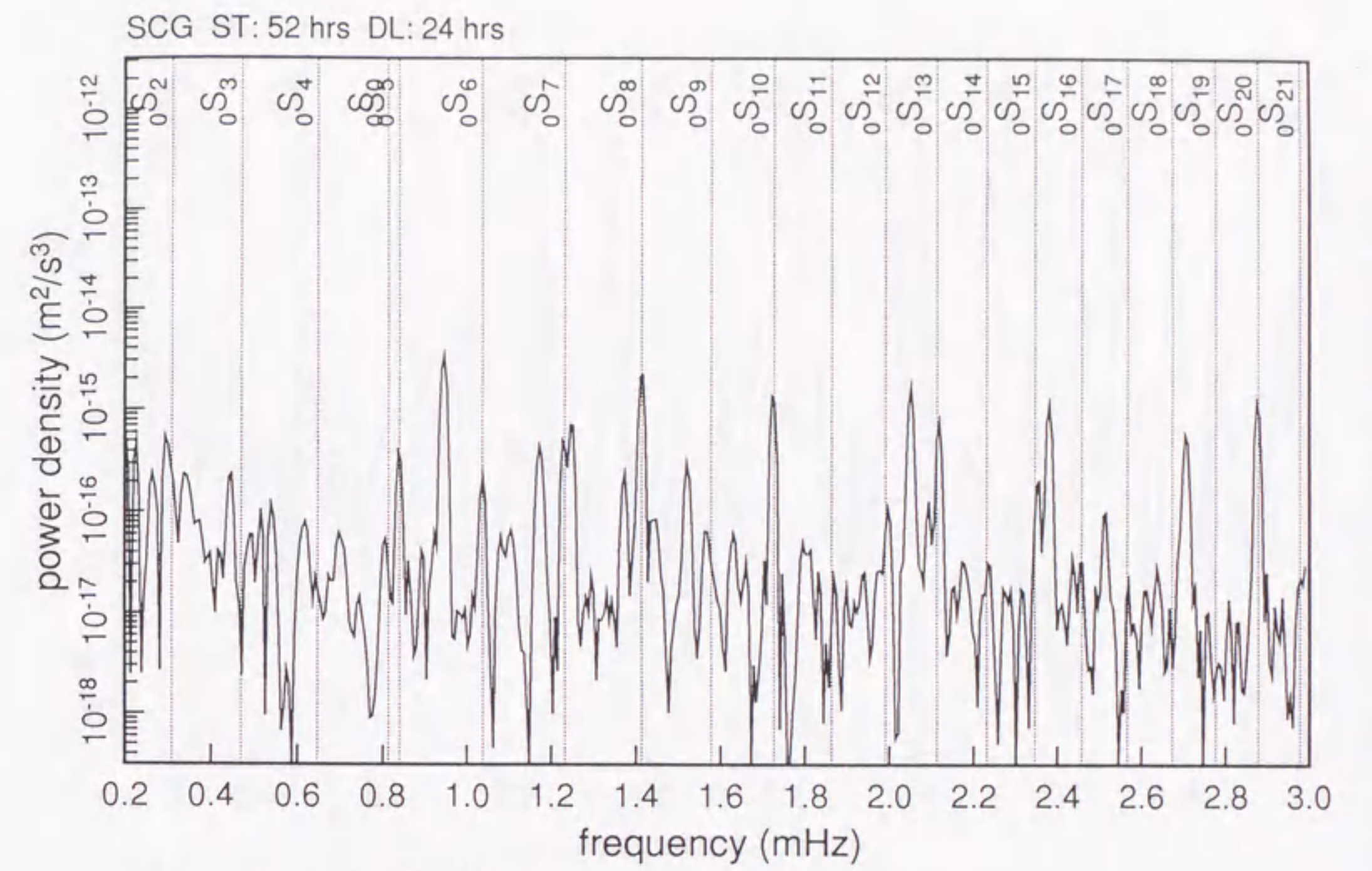


図 2 - 2 - 5 - b : SG と STS1 上下動の比較

(1994年6月ボリビア地震発生、52時間後)

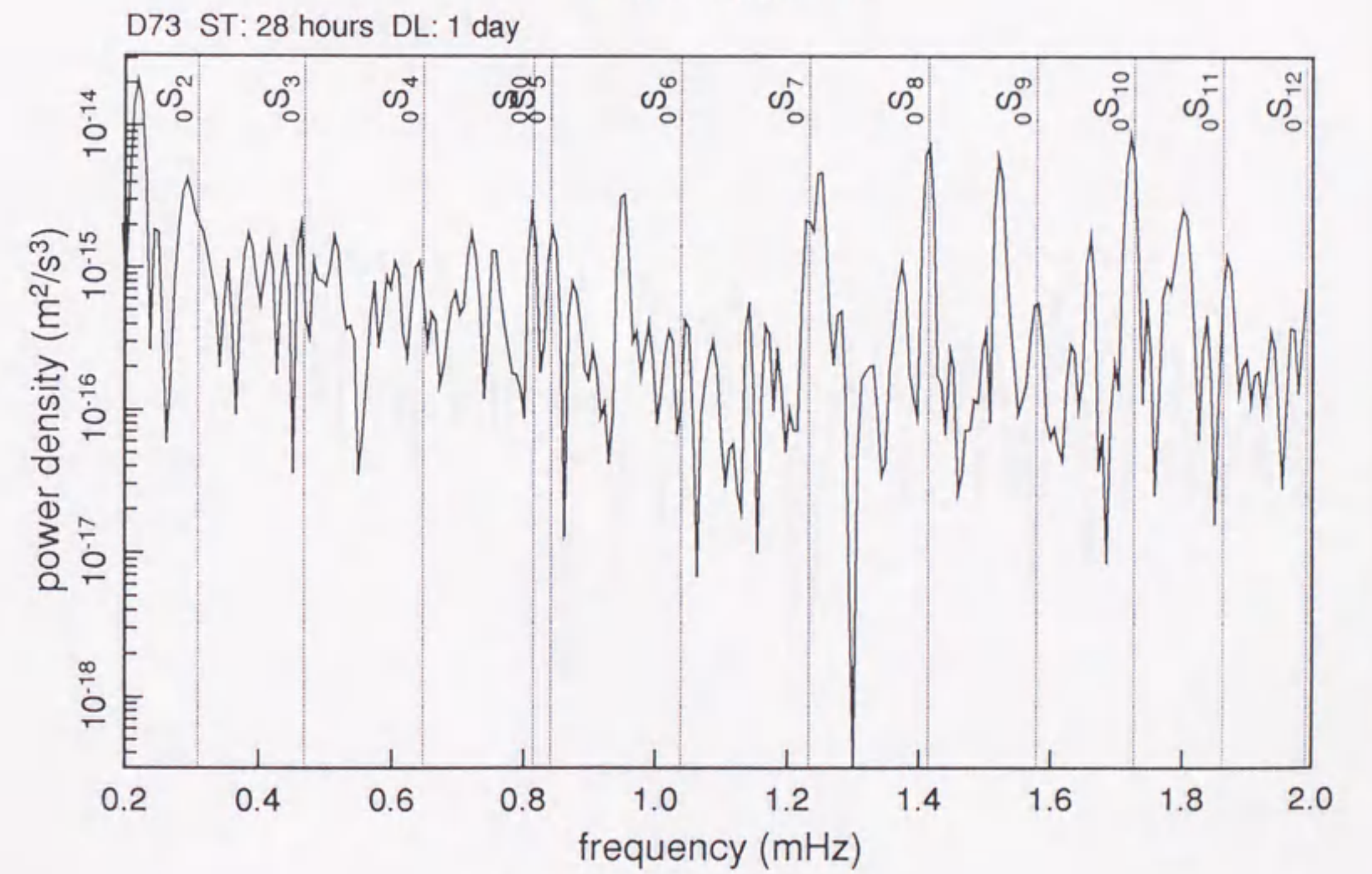
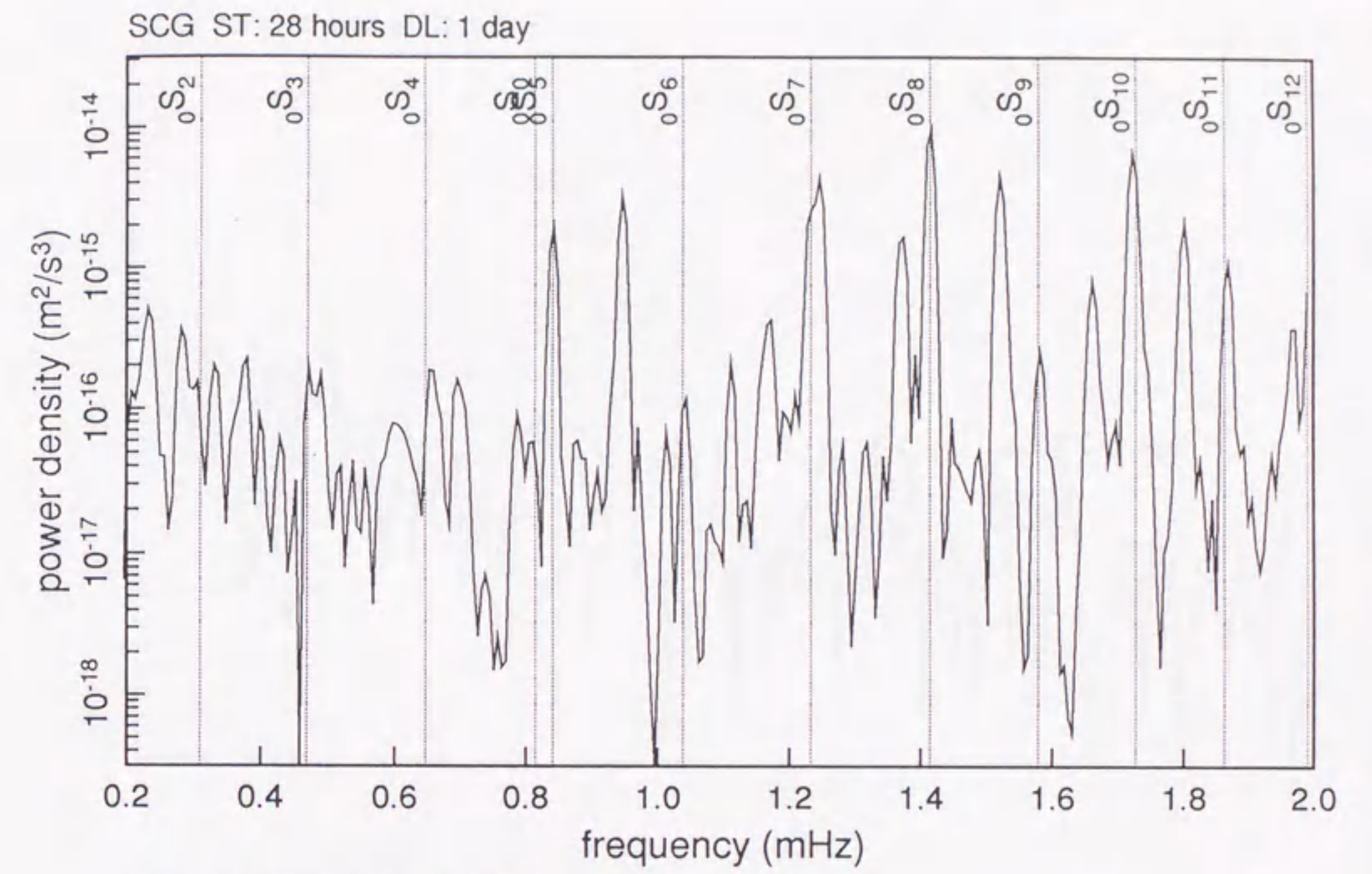


図 2 - 2 - 6 - a : 長周期帯域の SG と LR の比較

(1994 年 6 月ポリビア地震発生、28 時間後)

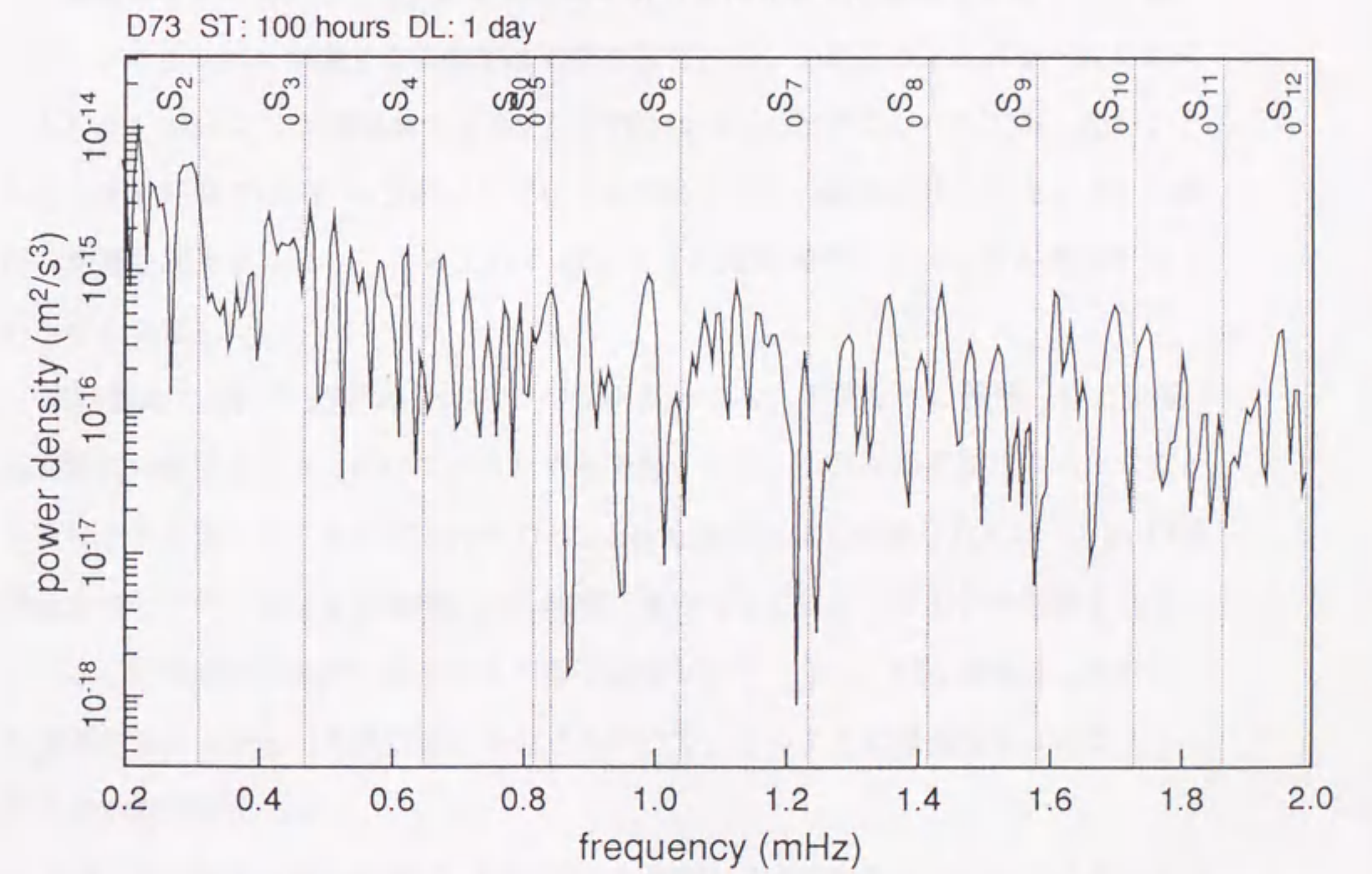
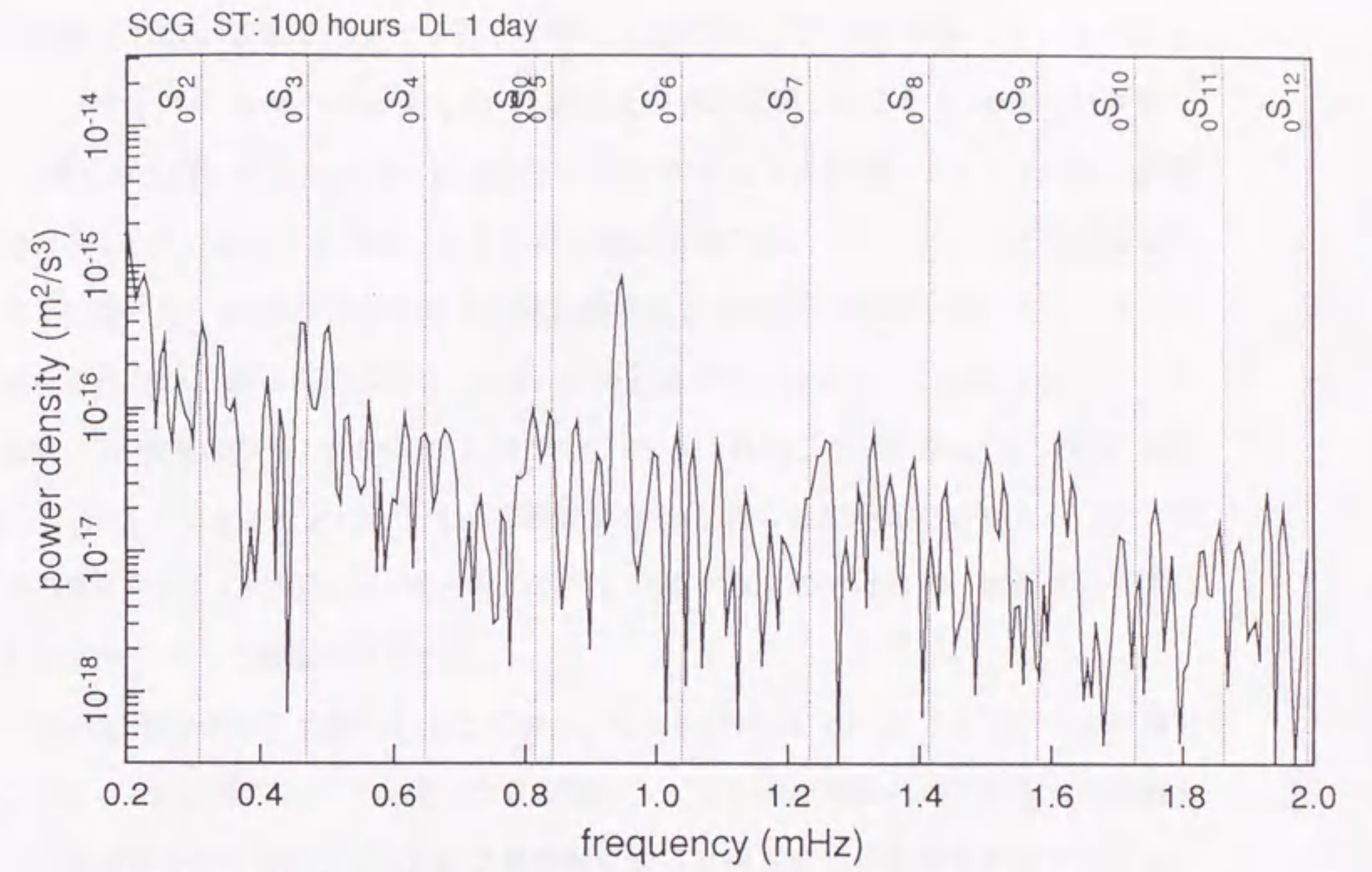


図 2 - 2 - 6 - b : 長周期帯域の SG と LR の比較

(1994 年 6 月ポリビア地震発生、100 時間後)

汐帯域まで広い帯域で SG と STS1 との比較を行なっている。使ったデータセットは、フランスの Strasbourg 近くの J9 観測点の SG 記録、そこから 70 km 程度離れた GEOSCOPE の Echery(ECH) 観測点の STS1 の上下動記録、ドイツの BFO 観測点の SG と STS1 上下動記録である。自由振動帯域ではドイツのグループと同様な比較を行なった。1994 年のボリビア深発地震後の 80 時間分の記録を用いてスペクトル解析を行ない、得られたスペクトルの S/N を調べて各センサーの比較をした。その結果、J9 観測点の SG の S/N が ECH の STS1 より低いことがわかった。同時に解析した BFO では SG と STS1 ではほぼ同等な S/N が得られていることから、フランスの SG と STS1 との差はセンサーそのものに起因するものではなく、観測点の影響によるものであると結論づけている。

彼らは潮汐帯域の比較も行なっており、STS1 が SG に比べてノイズレベルが高いことを、1 か月長のデータを使った日周潮から 1/4 日潮の理論スペクトルとの比較および潮汐解析から示した。STS1 は長周期になると温度変化の影響を受けやすくなるため、ノイズレベルが高くなるのではと推察している。1 か月のノイズレベルを比較すると 0.3 mHz より短周期側では SG と STS1 はほとんど同じレベルであったが、それより長周期側では SG の方がノイズレベルが低いという結果が得られた。また、気圧の影響を補正することによって 0.4 mHz より長周期側でノイズレベルがさがるということを示した。

昭和基地の LR や STS のノイズレベルが高いのは、気象などの環境、特に気温・室温変化の影響を大きく受けているためと予想される。STS は温度変化によって大きなドリフトを起こすことが知られている。LR も温度変化に敏感なために、IDA の観測点ではセンサー自体を恒温槽にいれ地中に埋めるなどして温度変化の影響を低減している。昭和基地の観測ではそのような工夫はされていない。STS は最近、老朽化した地震計室から新しい地震計室に移設されたので、そのような環境変化によるノイズの低減が期待できる。

南極・昭和基地で得た記録は、LR・STS と比較して SG がもっとも低ノイズで S/N が高かった。次章で、最初に昭和基地の SG 記録を使って、低いノイズレベルと長期

安定性、さらに連続記録であることを活かした新しい解析を行なう。

3 常時励起される地球自由振動

3.1 はじめに -地震学的手法による地球ダイナミクスの研究-

最近、短周期実体波の走時解析から内核の差動回転を示唆する結果が得られた (Song and Richards, 1996 [108]) ように、今後は、地震学的手法を用いたダイナミクスに直接的に関わる研究が増えてくると思われる。例えば実体波を用いた研究としては、コア・マントル境界の反射波である ScS 波の解析によって異方性軸の方位が日本列島の下で 10 年周期で回転していることを示した研究 (古本, 1996 [30]) がその一例である。

大地震によって励起された地球自由振動の解析は、実体波の解析と同様、地球内部構造の解明に大きく貢献してきた (須田, 1991 [110] など)。最近は大噴火の際に大気と固体地球のカップリングにより自由振動が励起されることが明らかになっており (Watada, 1995 [119])、静的な構造に関する研究ばかりでなく、ダイナミクスに関する研究においても自由振動解析は重要になりつつある。最近ではモードの固有周波数の時間変動の検出などが試みられている (須田, 1995 [111]) が、まだ確定的な結果は得られていない。

一般には地球自由振動は大地震や大噴火のような大きなイベントによって励起されると考えられているが、それ以外にも地球の流体部分のランダムな運動や固体部分の未知の変動などによって常時微弱に励起されている可能性がある。もしそのような微弱な信号が検出されれば、それは未知の地球ダイナミクスについての重要な情報をもたらすはずである。

1993 年から 1995 年までの 3 年間に南極・昭和基地で得られた SG 連続記録を使って、自由振動帯域の時間-周波数スペクトログラムを作成した。その結果、地球自由振動の、主に伸び縮み基本モードとよく対応する、微弱な連続した信号を検出することに成功した [75]。我々はこれを「常時地球自由振動」と名付けた。これは、Beroza and Jordan (1990) [7] が検出した Silent earthquakes よりも“頻繁に”自由振動を励起する未知のダイナミクスの存在を示唆するものであった。その後、IDA ネットワーク

データの解析からも、昭和基地の SG と同様な信号を検出することに成功した [113]。しかしながら、昭和基地の SG と比較すると、時間-周波数スペクトログラムの見え方の特徴に違いがあった。

この章では、新たに解析を行なった世界の他の SG 観測点データの結果等と合わせて、1) 常時地球自由振動の観測について、2) 自由振動帯域のノイズ源について、3) 常時地球自由振動の励起源についてという順で、この新しい観測について述べていきたい。

3.2 常時地球自由振動の観測

3.2.1 昭和基地の時間-周波数スペクトログラム

前章でも述べたように、SG は自由振動帯域から潮汐帯域までの広い周波数帯域の加速度を高感度・高分解能で観測している。SG の出力には、約 1 分から 1 時間までフラットな周波数特性を持つ MODE と、DC までフラットな周波数特性を持つ TIDE の 2 チャンネルがある。まず最初に、1993 年から 1995 年までの約 3 年間の観測で得られた昭和基地 SG の MODE 記録を用いて自由振動帯域の解析を行なった。

連続記録を全てを使って情報を抽出することを目的として、長周期地震学や測地学ではこれまであまり作られることがなかった「時間-周波数スペクトログラム」を作成した。この時間-周波数スペクトログラム（以後、スペクトログラムと呼ぶ）とは、スペクトルの時間変動を見るため、それらを時間軸に沿って並べたものである。こうすることによって、スペクトルの単一のプロファイルではノイズと区別がつかない微弱な信号でも、時間的に連続していれば、時間軸に並行する筋として検出することが可能となる。

具体的な解析方法を以下に述べる。サンプリング間隔 2 秒のオリジナルの MODE 記録のうち、人為的擾乱、地震による記録の飽和、非線形な応答の部分に補間し、潮汐成分を除去後、0 に置き換えた。潮汐成分は最小自乗法で振幅と位相を求めて除去した。10 秒にリサンプリングした後、スタート時を 1 日づつずらした 3 日長の時系

列を約 1000 本作成した。これらの時系列データのそれぞれに 0 次の 4π prolate テーパー (Park et al., 1987 [79]) を掛けた。このテーパーはハニングテーパーに比べてサイドローブが小さいことから採用した。これらから FFT を用いて振幅スペクトルを求めた。それぞれを時間軸に沿って並べて、0-5 mHz のスペクトログラムを作成した。なお、スペクトルの計算に用いた MODE 記録の感度は、2.2.1 節で述べたように、LR との並行観測によって決めた $2.2915 \times 10^{-14} \text{ms}^{-2}/\mu\text{V}$ を用いた。

図 3-2-1 に、この昭和基地 SG データから得られた 3 年分のスペクトログラムを示す。横軸が周波数 (Hz)、縦軸が観測開始日の 1993 年 3 月 22 日からの通日で、振幅が濃淡で表してある ($1 \times 10^{-11} \text{m/s}^2 = 1 \text{nGal}$)。また、図の上側に PREM (Dziewonski and Anderson, 1981 [14]) から計算された伸び縮み基本モードの理論周波数とその次数、右側にハーバード CMT 解 (Dziewonski et al., 1994a [15]; 1994b [16]; 1994c [17]; 1994d [18]; 1994e [19]; 1995a [20]; 1995b [21]; 1995c [22]; 1996a [23]; 1996b [24]; 1996c [25]; 1997 [26]) の地震モーメント (単位は Nm) の対数を示している。横筋は主に地震によるモードの励起に対応している。規模の大きな地震ほど、多くのモードを大振幅で励起するので、より赤っぽい横筋として確認することができる。この期間で特に規模が大きかった 1994 年 6 月 9 日 Bolivia 深発地震 (445 day) では基本モードに加え多くの高次モードが励起されているのが分かる。一般に、これらのモードは減衰が早いため、このスケールでは縦筋として見ることはできない。しかし、 ${}_0S_0$ はモードの中で例外的に Q の大きい、つまり減衰しにくいモードである。1994 年 10 月 4 日 Kuril Islands 地震 (北海道東方沖) (562 day) では 0.815 mHz の周波数を持つ ${}_0S_0$ モードが 40 日間以上振動しているのがはっきりと見えている。

一方、時間軸に並行に縦の筋が多数見えている。例えば、2 mHz よりも低周波側、2.5 mHz 付近の 2 本の筋、3-4 mHz の筋は明瞭に見えている。これらに比べてはっきりとはしないが、その間にも縦筋が見えていることがわかる。これらは主に地球自由振動の伸び縮み基本モードに対応しており、また大きな地震の起こり方とは無関係に連続して見える。得られたスペクトログラムでは、nGal レベルの振幅を持つ連続した筋を少なくとも 40 本確認することができた。それらのうち 30 本は、標準地球モデ

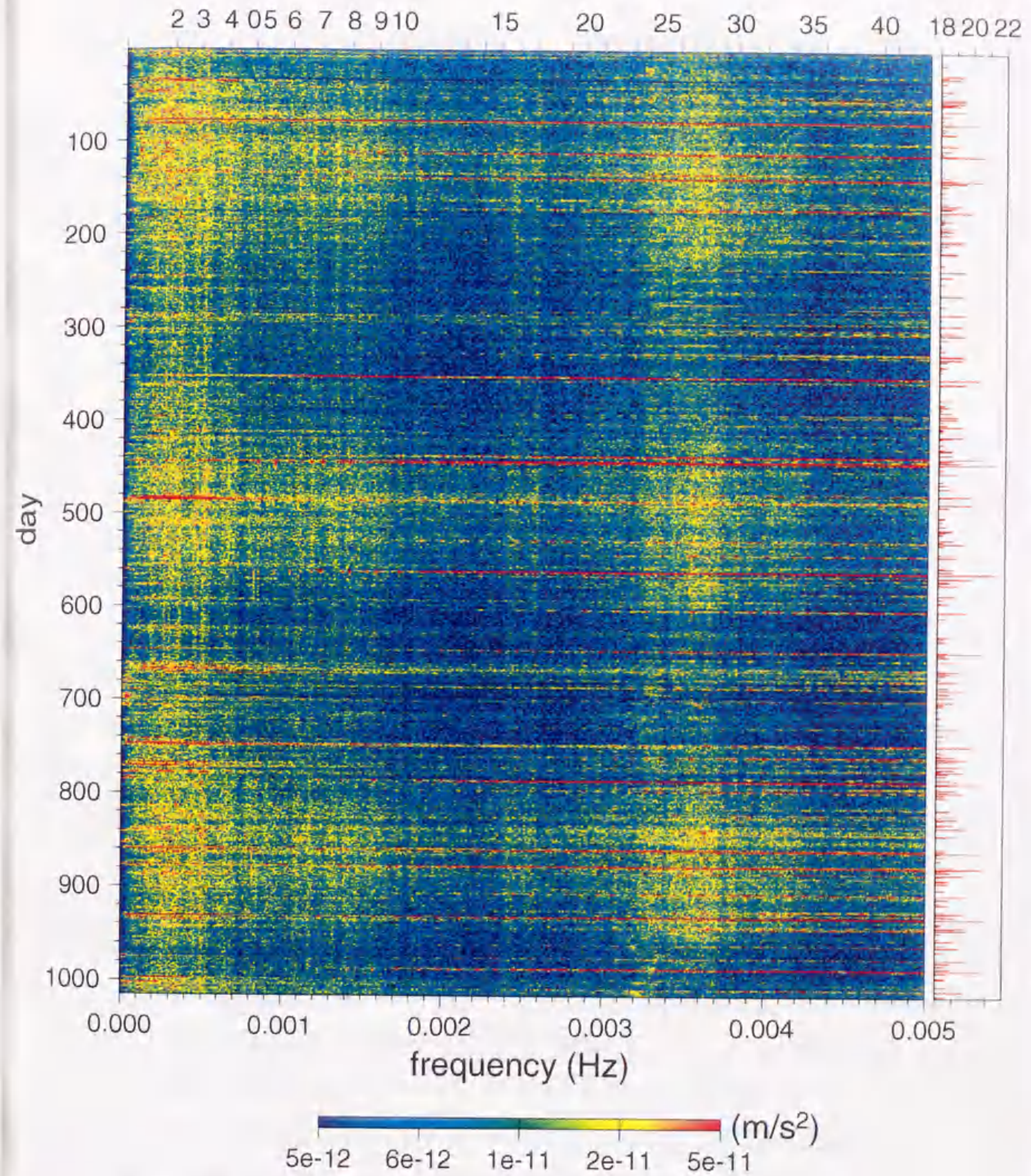


図 3 - 2 - 1 : 昭和基地 SG/MODE データ 3 年分の時間-周波数スペクトログラム

ル PREM から計算される伸び縮み基本モードの理論周波数と 0.02 mHz 以内で一致していることがわかった。その中でも 25 本のモードは 0.01 mHz 以内で一致していて、これらの筋が地球自由振動のモードを表わしていることを強く示唆している。表 3-2-1 にスペクトログラムから検出した筋の周波数および対応するモードの理論周波数をまとめた。

表 3-2-1 を見てわかるように、1-2 mHz には基本モードに対応しない筋が何本か見えている。また、高次モード ${}_3S_2$ と ${}_1S_4$ に対応する筋も見えている。2 mHz よりも低周波側のモードがそれより高周波側のモードと同程度の振幅で見えていること、3-4 mHz でも振幅がその両脇の周波数帯より大きくなって見えていること、さらには、これらの帯域の振幅が明瞭に季節変化していることが特徴的である。南極の冬 (6 月-10 月: '93, 70-225; '94, 435-590; '95, 800-955) に振幅が大きくなっていて、この期間はバックグラウンドノイズが大きくなるだけでなく、モードの振幅も大きくなっているように見える。

昭和基地 SG のスペクトログラムは従来の地震学では説明が難しい特徴を持っている。最も低周波の ${}_0S_2$ 付近の未同定の筋は、 ${}_0S_2$ と同定した筋とは 0.03-0.04 mHz の差があり、地球の非球対称性による分裂というには幅が広過ぎる (Buland et al., 1979 [8])。また、 ${}_3S_2$ と ${}_1S_4$ は、地球深部に振動エネルギーを持ち、基本モードに比べて励起されにくいモードである。もしこの励起が事実ならば大変興味深い、他の高次モードと比べて特にこれらのモードだけが励起されるメカニズムは非常に考えにくい。

昭和基地の重力計室では SG と LR を並行観測している。前章で述べたように、大地震の予備的な解析からは LR のノイズレベルが SG より高いことがわかっているが、JARE35 の観測期間中 ('94/2 - 12) のデータを全て使って時間-周波数スペクトログラムを作成し、SG と同様な信号を捉えているか確認した。図 3-2-2 に昭和基地の LR の記録から得られたスペクトログラムを示す。SG のスペクトログラム (図 3-2-1) と比べてわかるように、1 年を通してノイズレベルが高く、伸び縮み基本モードに対応する筋は全く見えていない。振幅のスケールを変えてみたが、SG のような筋が見えることはなかった。このように LR では、SG で捉えたシグナルを確認するこ

Observed mHz	Identified		Observed mHz	Identified	
	PREM	mode		PREM	mode
0.25-0.26			2.88	2.8785	${}_0S_{20}$
0.29	0.3093	${}_0S_2$	3.08	3.0754	${}_0S_{22}$
0.35			3.18	3.1714	${}_0S_{23}$
0.45	0.4686	${}_0S_3$	3.22-	3.2660	${}_0S_{24}^{**}$
0.50			-3.38	3.3595	${}_0S_{25}^{**}$
0.65	0.6471	${}_0S_4$	3.45	3.4520	${}_0S_{26}$
0.78			3.53~3.54	3.5438	${}_0S_{27}$
0.84-0.85	0.8405	${}_0S_5$	3.64~3.65	3.6349	${}_0S_{28}$
1.02~1.03	1.0383	${}_0S_6$	3.82	3.8157	${}_0S_{30}$
1.09~1.10	1.1063	${}_3S_2^*$	3.90~3.91	3.9056	${}_0S_{31}$
1.17~1.18	1.1729	${}_1S_4^*$	4.00	3.9952	${}_0S_{32}$
1.32			4.09	4.0847	${}_0S_{33}$
1.40~1.41	1.4136	${}_0S_8$	4.18	4.1741	${}_0S_{34}$
1.46~1.47			4.26	4.2635	${}_0S_{35}$
1.57~1.58	1.5783	${}_0S_9$	4.35	4.3528	${}_0S_{36}$
1.72~1.73	1.7266	${}_0S_{10}$	4.44~4.45	4.4421	${}_0S_{37}$
1.82~1.83			4.53	4.5315	${}_0S_{38}$
2.23	2.2315	${}_0S_{14}$	4.62	4.6209	${}_0S_{39}$
2.29			4.72	4.7104	${}_0S_{40}$
2.43	2.4583	${}_0S_{16}$	4.80	4.8000	${}_0S_{41}$
2.57	2.5672	${}_0S_{17}$	4.89	4.8897	${}_0S_{42}$

Bar (-) and tilde (~) indicate a sharp band and a smeared band, respectively. * suspected identification.
 ** identification within the mutually unseparable band.

表 3 - 2 - 1: 昭和基地 SG の時間-周波数スペクトログラムから読み取った周波数と
 対応するモードの理論周波数。

とはできなかった。

スペクトログラムに見られた特徴をまとめておくと、1) 地震では励起されにくい長周期のモードも含み、主に伸び縮み基本モードが見えていること、2) 南半球の冬に振幅が大きくなること、3) 3-4 mHz の周波数帯域で振幅が大きいこと、という3点が挙げられる。また昭和基地のLRデータはノイズが大き過ぎてSGと比較することができなかった。

地球自由振動ならば地球上のどこにおいても同様な信号が検出できるはずである。また、グローバルに観測できれば、どの地域で励起されるのか、その励起源を特定することができるに可能性がある。次節では、他のSG観測点のデータ解析について述べる。

3.2.2 国内および世界の超伝導重力計データの解析

まず国内の江刺地球潮汐観測施設(39.1N,141.3E)のSG記録の解析を行なった。江刺のSGは、傾斜補償装置が昭和基地と同じトップマウント方式で、A/D変換器など収録システムも全く同じ機器を使用して観測している。解析には昭和基地と同じMODE出力データを使用した。解析は昭和基地と同様な方法で行なった。ただし、江刺の記録には(1)ローカルな地震、(2)10-15分ごとに入る絶対重力測定による電気的あるいは機械的スパイク、(3)SGに起因する電気的スパイク、などが多数含まれており、それらもできる限り0に置き換えた。スペクトログラムは昭和基地の場合と全く同様に作成した。

図3-2-3に'94年1年分のスペクトログラムを示す。ボリビア巨大深発地震(B)前後の'94年5、6、7月ころを除いて、江刺の方が昭和基地SGに比べて全体的にノイズレベルが高いことがわかる。しかし、江刺ではノイズレベルの比較的低い期間でも、昭和基地と同様な自由振動のモードに対応する縦の筋は見られなかった。

江刺は昭和基地に比べてノイズレベルが高い期間が多かった。沈み込み帯に位置する日本では、ローカルな地震の影響は避けられないが、それ以外にも観測環境が原因と考えられる記録の乱れがあった。江刺でも昭和基地より小さい常時地球自由振動

D73, SYOWA, 1994 1/28 - 12/18

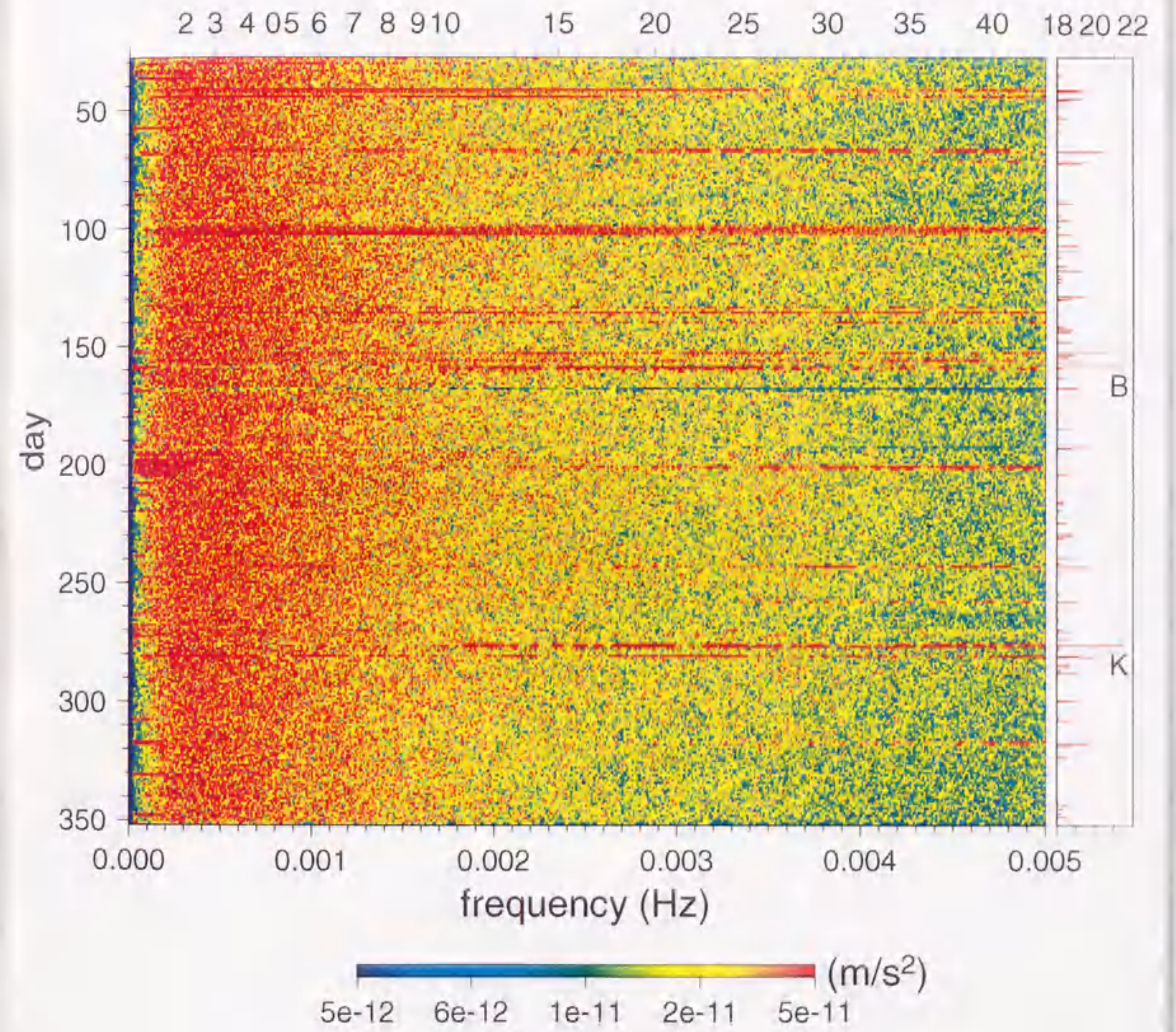


図 3-2-2: 昭和基地 LR(D73)/MODE データ 1 年分の
時間-周波数スペクトログラム

SG, ESASHI, 1994 1/1 - 12/31

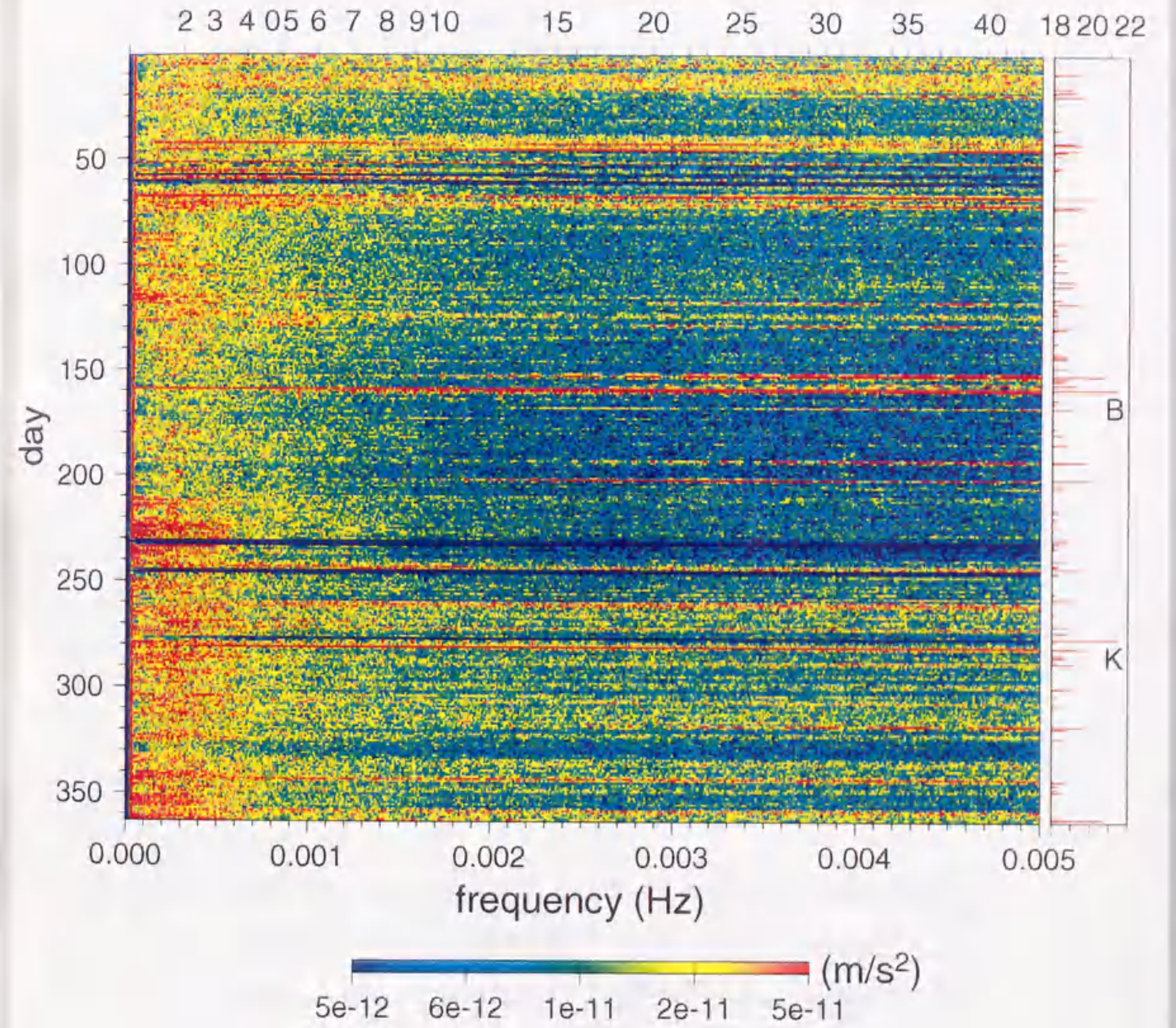


図 3 - 2 - 3 : 江刺 SG/MODE データ 1994 年 1 年分の時間-周波数スペクトログラム

があるが、ノイズレベルが高いため検出できなかった可能性もある。微弱な信号を検出するためには長期間安定した観測が必要であり、もっと環境ノイズを抑える必要がある。最近、ボトムマウント方式へ改造されており、それによるノイズの低減が期待される。

データの期間が短いので、ここでスペクトログラムは示さないが、柿岡から移転した松代のSG(Imanishi et al., 1997 [45])は、IDAや海外のSG観測点と同等のノイズレベルを達成しており(付録6.1)、日本国内でも条件を整えば、大陸と同等な観測が可能であると考えられる。

1997年7月よりGGPによる世界のSGの観測キャンペーンがスタートし、それから6年に渡って世界のSG連続データの交換が行なわれる。本研究では、それに先だって個別に手に入れることができたオーストラリアとフィンランドのデータ解析を行なった。

オーストラリアのキャンベラのSG観測点は、海半球ネットワーク計画の一環として設置された(佐藤, 1997 [95]; 佐藤ほか, 1997a [96]; 佐藤ほか, 1997b [97])。最近、京都大学が所有するSGのうち1台がインドネシアへ移転しており、現在南半球にある観測点は昭和基地、バンドンとこのキャンベラの3点である。観測点は、オーストラリア国立大学・ストロームロ山天文台(35.320S, 149.1E)にある。ここに設置されている重力計は、昭和基地および江刺にある従来タイプのSGと違い小型のタイプで、傾斜補償装置はボトムマウント方式を採用している。観測は、1997年1月に開始された。

1997年1月から7月まで半年分のデータを使って常時地球自由振動の検出を試みた。データの処理・解析方法は、昭和基地、江刺の場合と同じである。図3-2-4にキャンベラのSGのスペクトログラムを示す。重力計の感度は、理論潮汐との比較から得られた暫定値を用いているので1%程度変わる可能性があるが、昭和基地、江刺に比べると明らかにノイズレベルが小さい。このスペクトログラム(図3-2-4-a)の振幅スケールを小さくしてグレースケールで示したのが図3-2-4-bである。昭和基地のように低周波側のモードに対応する明瞭な筋は見えていないが、約2 mHz

SG, CANBERRA, 1997 1/27 - 7/26

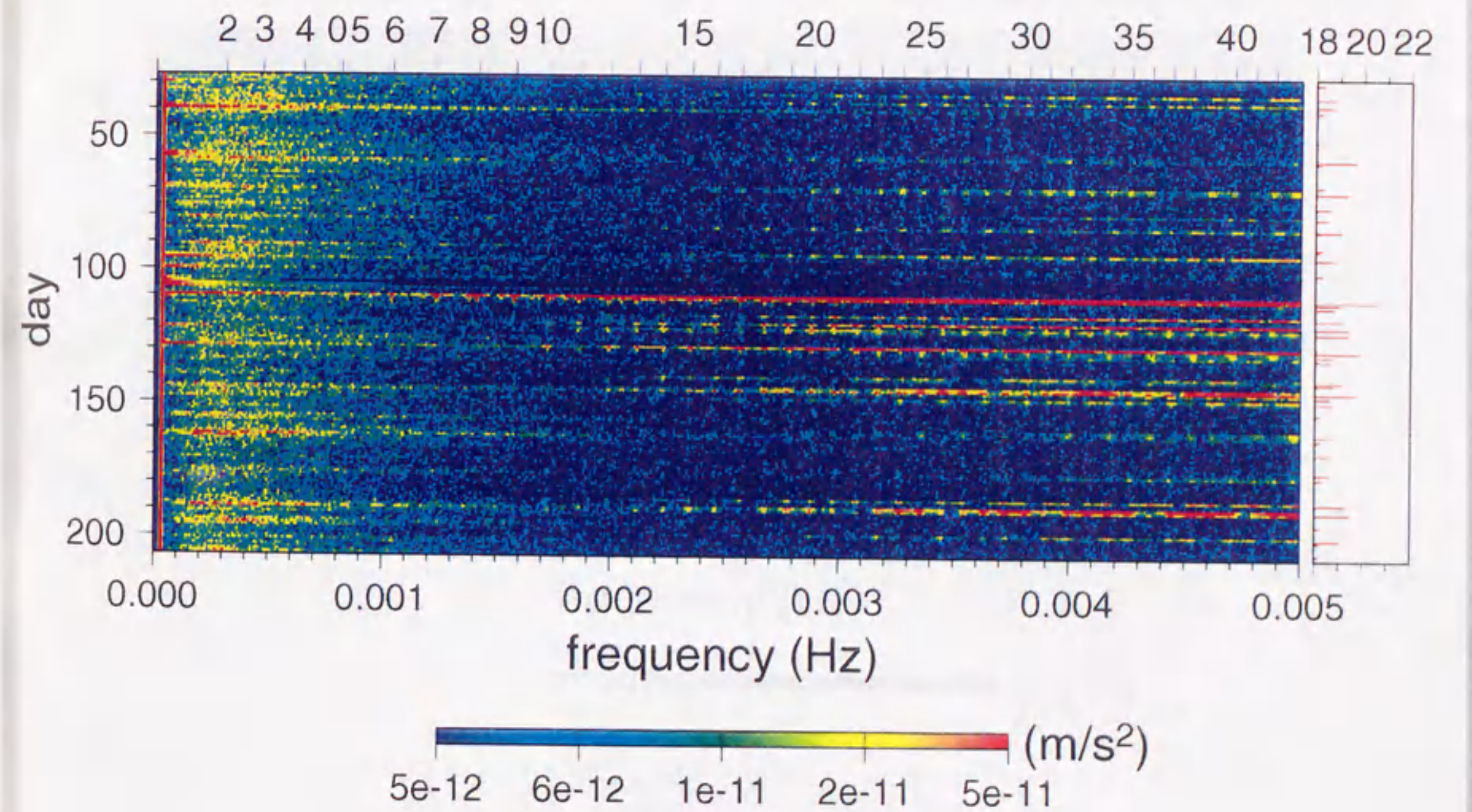


図 3-2-4-a: キャンベラ SG/MODE データ 1997 年半年分の
時間-周波数スペクトログラム (カラースケール)。

SG, CB, 1997 1/27 - 7/26

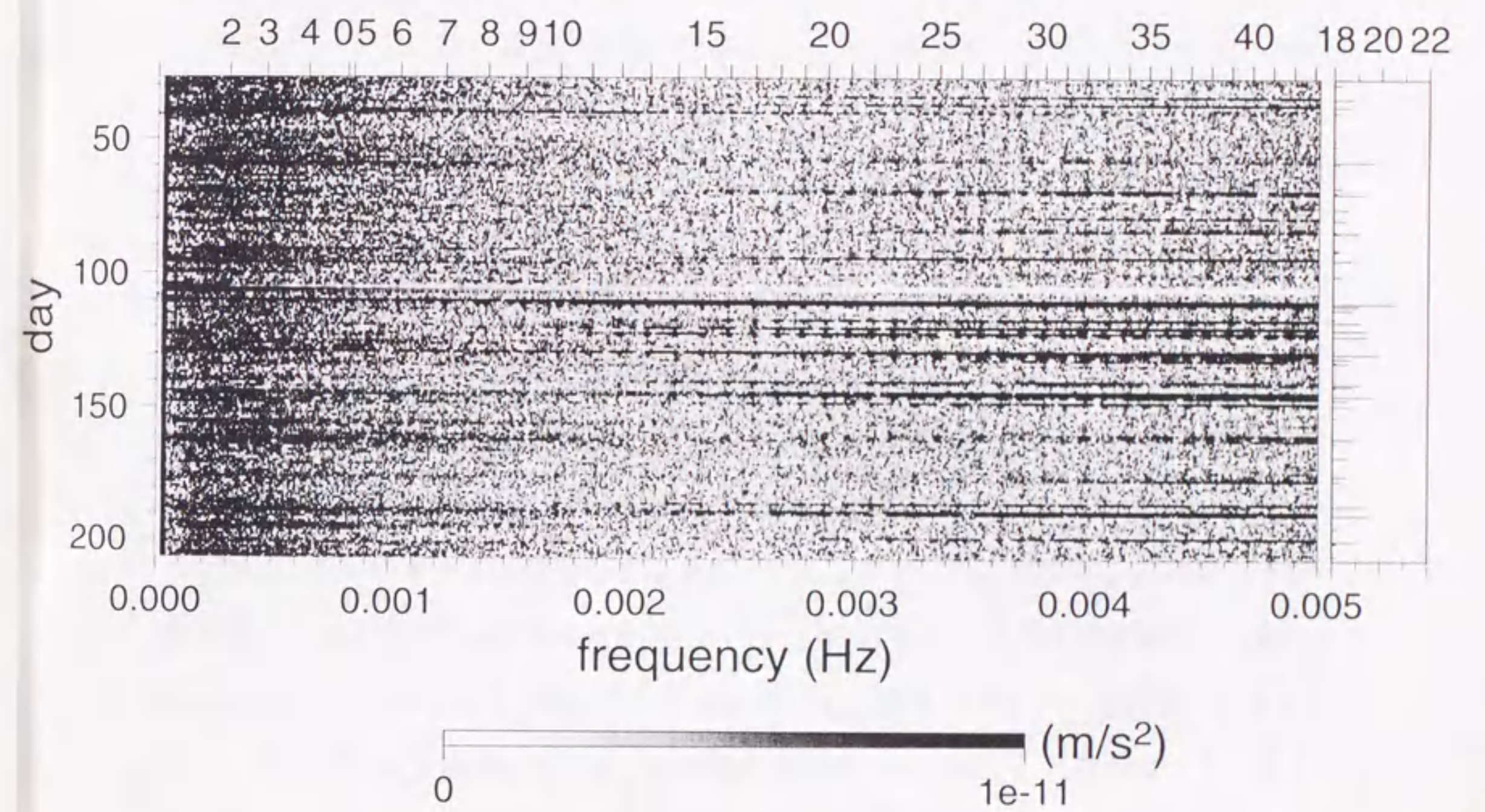


図 3 - 2 - 4 - b: キャンベラ SG/MODE データ 1997 年半年分の
時間-周波数スペクトログラム (グレースケール)。

より高周波側では、伸び縮み基本モードに対応した筋が見えているのがわかる。半年のデータではあるが、振幅が季節変化しているようには見えず、また、3-4 mHzの振幅の高まりが見えないことが、昭和基地SGのスペクトログラムと大きく違っている。

次にフィンランドのSGの解析について述べる。現在稼働中の世界のSG観測点のうち、フィンランドは北半球の最も高緯度にある観測点である。南半球・高緯度地域の昭和基地で見られたようなスペクトログラムの特徴が、北半球・高緯度地域のフィンランドでも見られるのかどうか興味のあるところである。フィンランドでの観測は、JARE35期間中の1994年8月から始まっており、その9月から1996年1月までのTIDEデータを、昭和基地の観測データとの交換によって入手することができた。

フィンランドの重力計は、従来の大型のタイプであるが、傾斜補償装置を使わずに観測していることが特徴である。傾斜補償装置を使わないことで、温度変化の影響を避けることを目的としている (Virtanen and Kääriäinen, 1997 [118]) らしいが、同じ場所で使った観測を行っていないので、実際にノイズレベルがどの程度変わるのかはわかっていない。あとの節で議論するが、自由振動帯域の観測を行なう場合、傾斜補償装置を使うか使わないかによって、ノイズレベルが大きく変わる可能性がある。

図3-2-5にフィンランドのSGの時間-周波数スペクトログラムを示す。キャンベラのスペクトログラムと比較してみると、フィンランドの方が全体の振幅レベルが若干高いように見える。昭和基地と同じスケールのカラーの図では筋が明瞭ではないが、キャンベラと同様に、振幅スケールを小さくしたグレースケールの図3-2-5-bでは、約2 mHzより高周波側では、伸び縮み基本モードに対応した筋がはっきり見えていることがわかる。低周波側では、210日あたりからはチリ北部およびソロモン諸島の地震によって励起された ${}_0S_0$ モードの筋がはっきり見えているが、昭和基地のような他の基本モードに対応する明瞭な筋は見えていない。0.3 mHzあたりから急激に振幅が大きくなっているが、フィルタのレスポンスが低周波側で落ちているMODE記録ではなく、DCまでフラットなTIDE記録を用いているためである。フィンランドでも振幅が季節変化しているようには見えず、また、3-4 mHzの振幅の高まりも見えなかった。

SG, ME, 1995 1/1 - 12/28

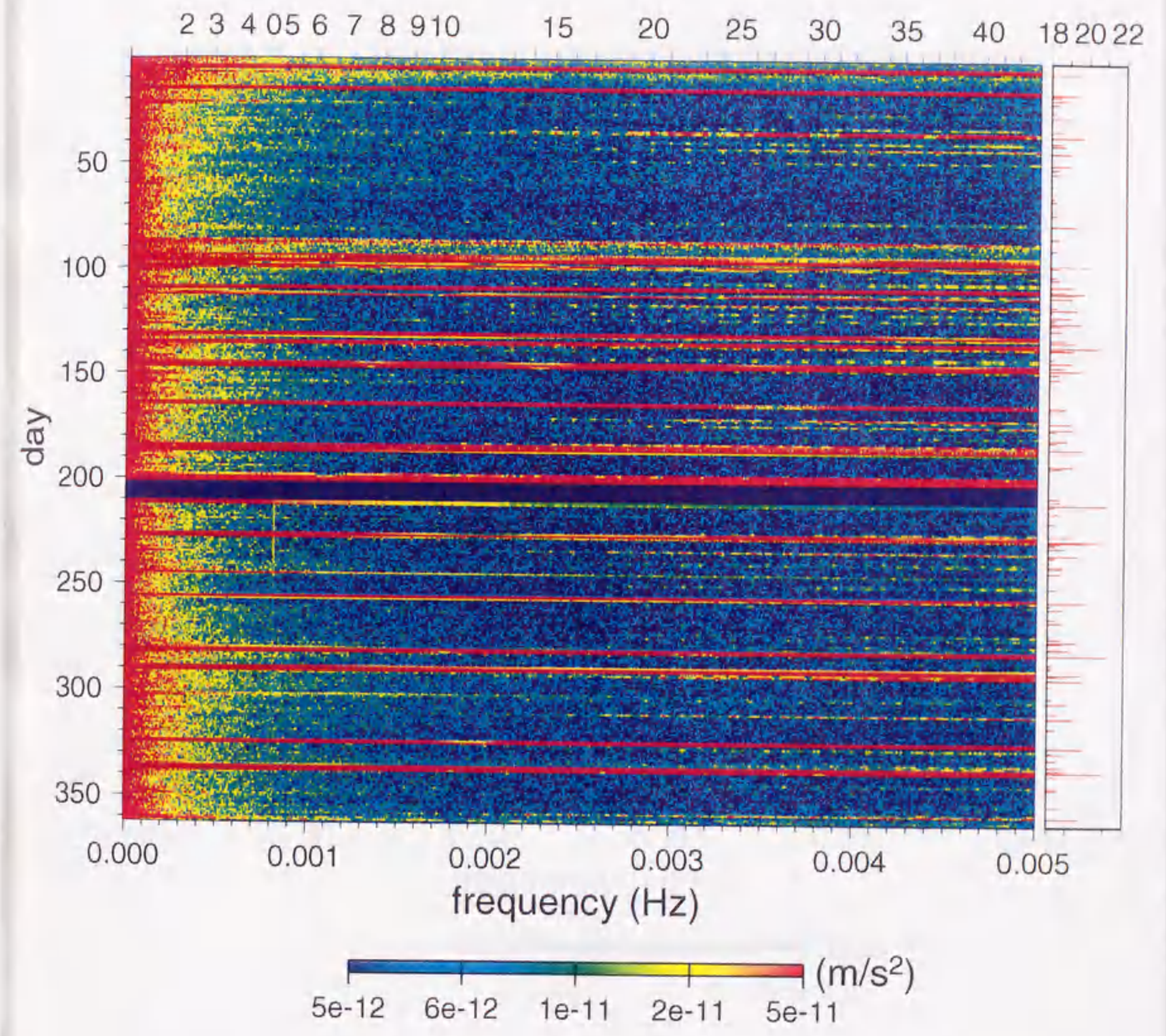


図 3-2-5-a: フィンランド SG/TIDE データ 1995 年 1 年分の
時間-周波数スペクトログラム (カラースケール)。

SG, ME, 1995 1/1 - 12/28

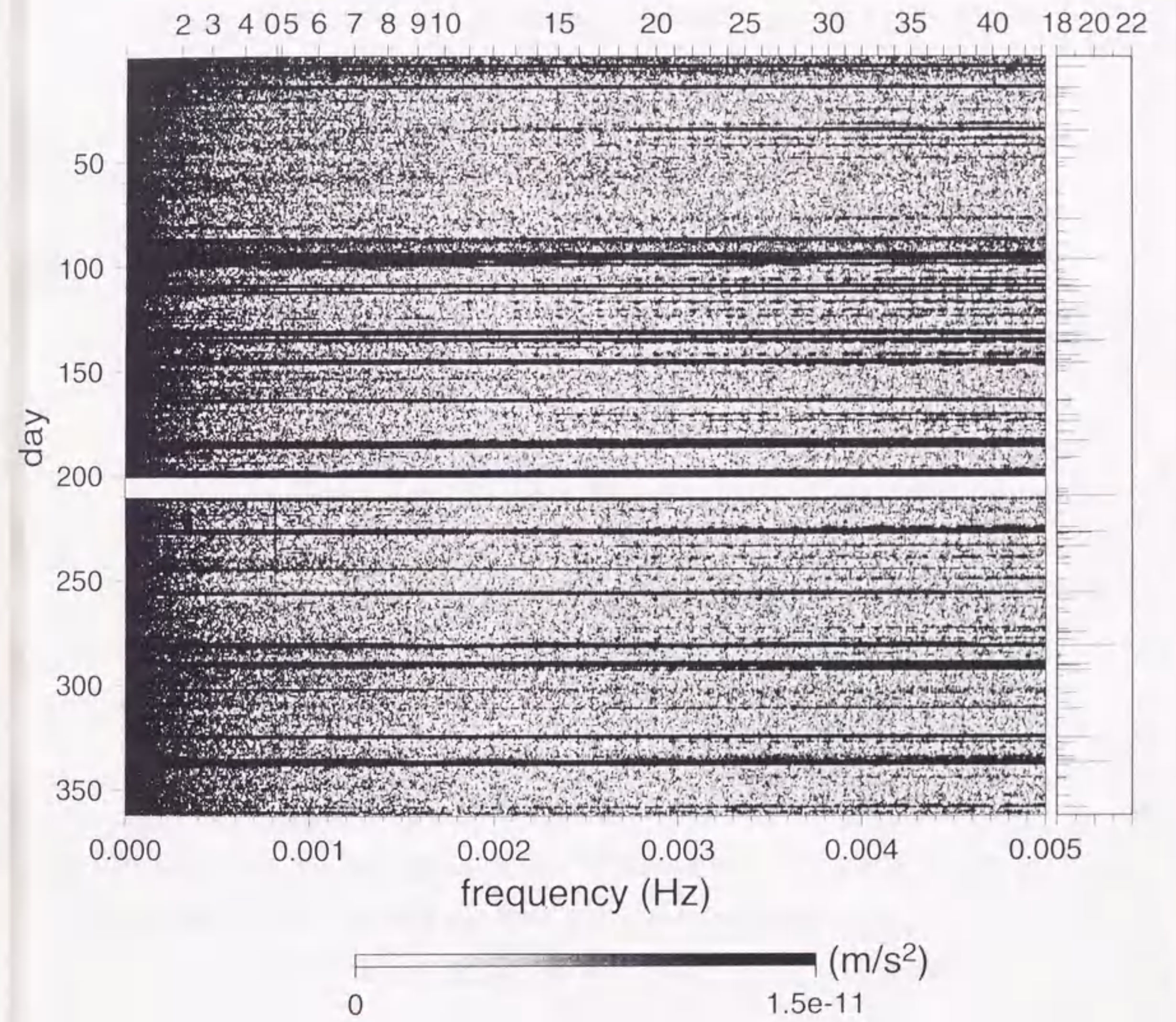


図 3-2-5-b: フィンランド SG/TIDE データ 1995 年 1 年分の
時間-周波数スペクトログラム (グレースケール)。

これまで見てきたように、スペクトログラムの作成によって自由振動モードに対応する連続した筋が、地理的に離れたキャンベラとフィンランドでも確認することができた。ただし、昭和基地で得られたスペクトログラムと「筋」の見え方が大きく異なっており、昭和基地に比べて全体の振幅レベルが小さく、筋が主に見えていたのは2 mHzよりも高周波側のモードであった。表3-2-2に、SGデータの解析で得られたスペクトログラムについてまとめておく。

観測点（地域）	SG	マウント方式	スペクトログラム
昭和基地（大陸）	大型	トップマウント	0.3-5 mHz で常時自由振動を検出*
江刺（島弧）	大型	トップマウント	ノイズレベル高
キャンベラ（大陸）	小型	ボトムマウント	2-5 mHz で検出 昭和に比べ振幅小
フィンランド（大陸）	大型	サーマルレベラーなし	2-5 mHz で検出 昭和に比べ振幅小

表3-2-2：超伝導重力計データ解析で得られた時間-周波数スペクトログラムについてのまとめ（*昭和基地については、振幅の季節変化や周波数による振幅の大きさの違いが明瞭である）

次の節では、SG以外のセンサーの記録ではどのように見えているかを調べる目的で、IDA ネットワークの記録からスペクトログラムを作成した。IDA は SG よりも感度が落ちるものの、SG 観測点に比べてよりグローバルに観測点が配置されており、さらに長期間のデータが利用可能なことが利点である。

3.2.3 グローバル地震計ネットワークデータの解析

IDA は LR をフィードバック型に改造したセンサーをグローバルに展開したネットワークである [4]。現在では観測を終了しているが、1976 年から 1995 年までの 20 年分の上下動加速度の連続デジタル記録が利用できる。サンプリング間隔は 10 秒ま

たは 20 秒、分解能は 12 bit、感度は約 10^{-10} (m/s^2)/DU である。常時地球自由振動の振幅は 10^{-11} m/s^2 のオーダーなので 1 DU 以下であるが、同時に存在するランダムノイズの振幅が 1 DU を越えていれば、確率共鳴の効果で検出は可能である。従来の地球自由振動の解析では、ほとんどこの IDA の記録が用いられている。IDA の観測点分布 (図 2-1-2) は、SG の観測点分布 (図 2-1-1) と比較して、グローバルに均等な配置になっていることがわかる。

スペクトログラムの作成については、SG 記録の場合と同様なのでここでは省略する。図 3-2-6 に世界中で最も静かな地震観測点の 1 つとして知られている SUR (南アフリカ) の 1994 年のスペクトログラムを示す。データは MODE 記録を使ったがフィルタのレスポンスは補正してあるので、低周波側の振幅レベルが大きくなっている。オーストラリアのキャンベラやフィンランドの SG のように、2 mHz より高周波側で時間軸に並行に縦の筋が見え、それらは伸び縮み基本モードに対応しているように見える。SUR のほかにも TWO (オーストラリア)、ESK (イギリス)、PFO (カリフォルニア)、SPA (南極点) の記録と、過去の '77-'80 年の BDF (ブラジル)、CMO (アラスカ)、HAL (カナダ)、KIP (ハワイ)、NNA (ペルー)、PFO、RAR (クック諸島)、TWO (オーストラリア) の記録を解析して、スペクトログラムを作成した。その結果、RAR 以外のすべての観測点で、これと同様な常時地球自由振動を検出した。ただし、いくつかの観測点では SUR よりもノイズが大きいため、筋は明瞭でなかった。SUR 以外の観測点のスペクトログラムの例として、図 3-2-7 に南極点 SPA のスペクトログラムを示す。全体の振幅レベルは SUR と同等である。昭和基地のスペクトログラムよりはむしろキャンベラやフィンランドに似ていて、若干のノイズレベルの変動があるものの、スペクトログラムは全体的にフラットであることがわかる。150 日前後の 1.7 mHz 付近にある筋はなんらかの原因で発生したと思われるノイズによるピークが見えている。原因は不明である。なお、RAR で検出できなかったのは、全体のノイズが大きいに原因がある。

最近、Kobayashi and Nishida (1997) [58] による IRIS のデータ解析でも、IDA と同様な結果が得られている。また、Tanimoto et al.(1997) [117] による IDA データの

IDA, SUR, 1994 1/1 - 12/31

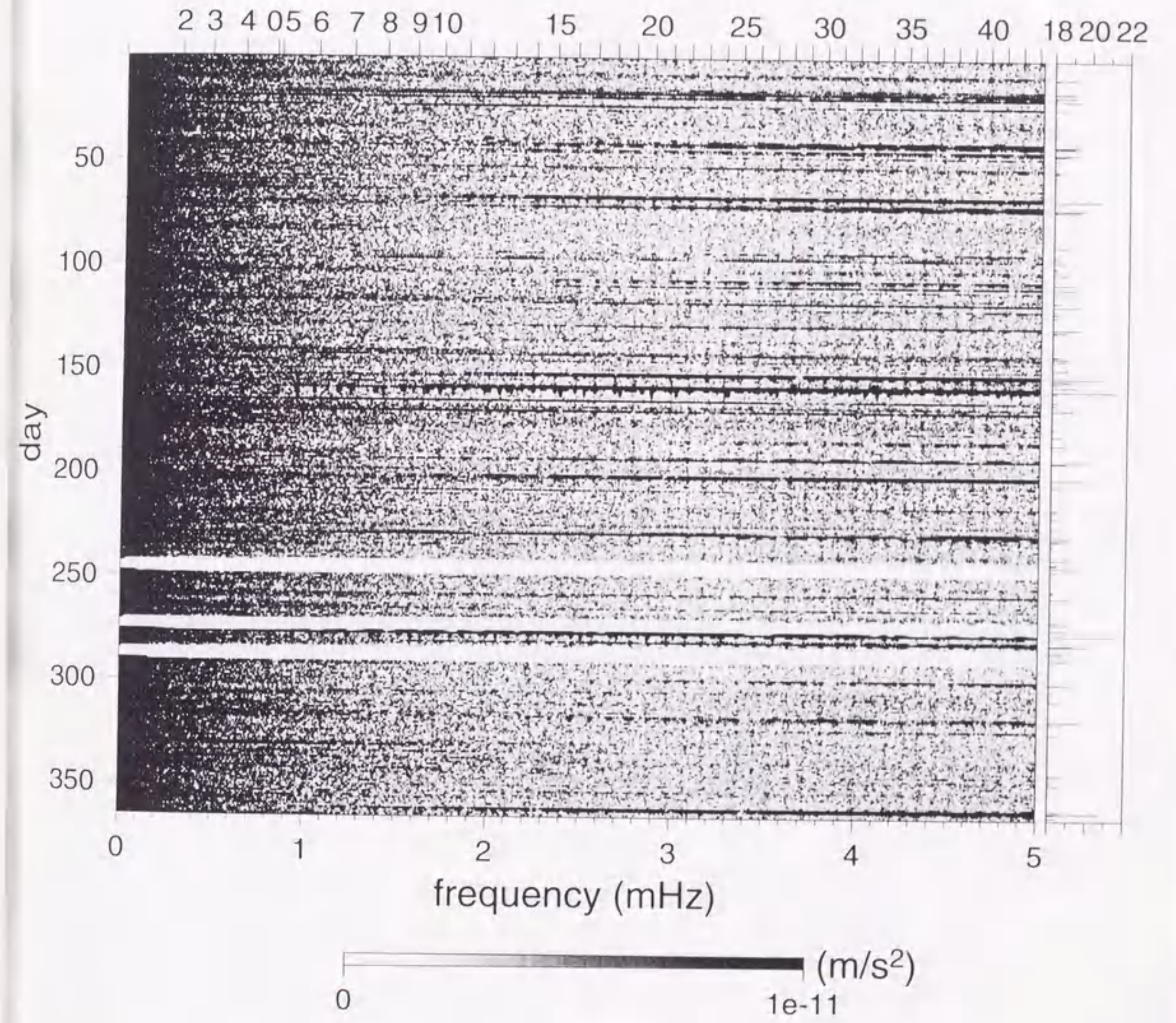


図3-2-6: IDA SUR/MODEデータ 1994年1年分の時間-周波数スペクトログラム

IDA, SPA, 1994 1/1 - 12/31

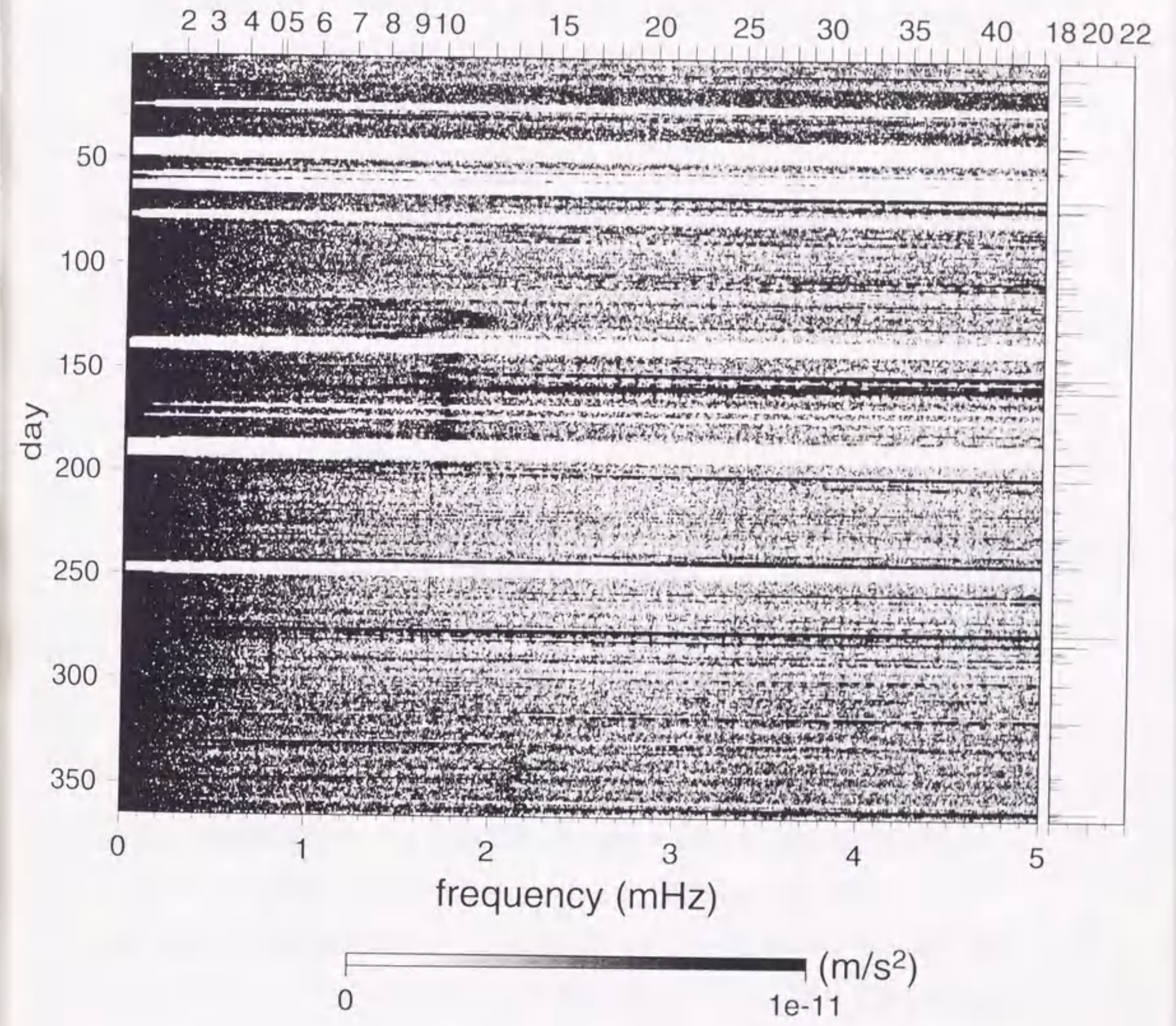


図 3 - 2 - 7: IDA SPA/MODE データ 1994 年 1 年分の時間-周波数スペクトログラム

解析、Kikuchi (1998) [55] による IRIS データを使った解析によっても、常時地球自由振動の検出が確認されている。このように常時地球自由振動は SG ばかりでなく、LR や STS でも観測することができる。

先に述べたように、昭和基地 SG の場合には、筋には (1) 2 mHz 以下の低周波帯にも見られる、(2) 特に振幅の大きい筋や周波数帯 (3-4 mHz) がある、(3) 振幅が明瞭に季節変動している、という特徴があった。しかしながら、他の地域の SG 観測点や IDA 観測点の解析結果でも、昭和基地のような特徴は見られなかった。これらの特徴は昭和基地の SG での観測に限られる現象で、グローバルな現象ではないことがわかった。

これまでは常時地球自由振動をスペクトログラムの筋として定性的に見てきたが、次の節では、定量的に扱って観測点ごとの違いを評価する。

3.2.4 静穏期の平均パワースペクトル

スペクトログラムの筋の見え方は、観測点によって違っていた。特に昭和基地は他の観測点・センサーと比べると、振幅レベルが大きく見えていた。より定量的な比較のため、ハーバード CMT 解を参照して地震モーメント (M_0) が 5×10^{17} Nm を越える地震を含まないような静かな期間を選び、それらに対応する 3 日長データのパワースペクトルの平均 (平均 PSD) を取って比較した。

これまで見てきたうち 1994 年の昭和基地の SG、江刺の SG、IDA の代表として最も静かな観測点の 1 つである SUR と 1995 年のフィンランドの SG、1997 年のキャンベラの SG の平均 PSD を比較する。このとき、比較する平均 PSD は、スタッキングによる平滑化の効果を等しくするため、データ数が一番少ないキャンベラに合わせて、26 本のスペクトルを平均したものをを用いる。このとき、1994 年の昭和基地と江刺については、振幅レベルの年変動が大きいので、それぞれ比較的振幅レベルの小さい夏の期間から、26 本のスペクトルを選択した。図 3-2-8 に、各観測点の平均 PSD を示す。使用したデータの期間が短い場合は、スタッキングの効果が現れにくいので、平均 PSD は周波数で 11 点の移動平均したものを示している。

1994年の同一期間のデータを解析した昭和基地、江刺、SURを見てみると、全体のパワーは、江刺 SG、昭和基地 SG、SUR IDA の順に大きく、江刺 SG と SUR とではおよそ一桁違っている。また、周波数によって差があるものの、江刺は昭和基地の2~3倍のパワーであることがわかる。キャンベラとフィンランドの SG は観測期間が違うが、その傾向は比較することができる。これらの観測点は昭和基地、江刺よりも全体の振幅レベルが小さい。中でもキャンベラがもっとも静かで、IDA SUR と同じ程度である。

全体のパワーが小さいほど、モードの理論周波数との対応が良いように見える。2 mHz よりも高周波側でキャンベラ・SUR のピークが理論周波数とよく一致しているのがわかる。また、2 mHz よりも低周波側ではキャンベラが IDA SUR より振幅レベルが小さく、 ${}_0S_9$ など SUR では見えていないピークも見えている。この中で、昭和基地の平均 PSD のみが 3.5 mHz 前後でパワーが大きくなっているが、このことはスペクトログラムの印象と同じである。

同じ期間で観測される常時地球自由振動の振幅が、地域によってこれ程違うとは考えにくい。自由振動ならば励起される平均的な振幅が、観測点によって桁で変わることはないであろう。付録 6.1 に本研究に用いた SG および IDA の各観測点の静穏期のノイズスペクトルを示してあるが、ここで平均 PSD で見たのと同様、江刺と昭和基地のノイズレベルが非常に大きいことがわかる。また、これらのノイズスペクトルを見ても昭和基地以外の SG および IDA の観測点では、3-4 mHz の振幅の高まりが見えていない。したがって、江刺や昭和基地の SG は、ローカルな影響を受けていると考えられる。特に、昭和基地では 3-4 mHz の周波数帯および低周波側でパワーが大きいという特徴が見られたが、その特徴はローカルな影響を受けた結果のもので、地球自由振動の励起の強さそのものを反映しているわけではないと考える。

3.2.5 ピークの見え方・安定性の比較

昭和基地のようなノイズレベルが上がっている観測点の平均 PSD を見たときに、モードによっては対応関係が不明瞭な場合があるものの、伸び縮み基本モードの理論

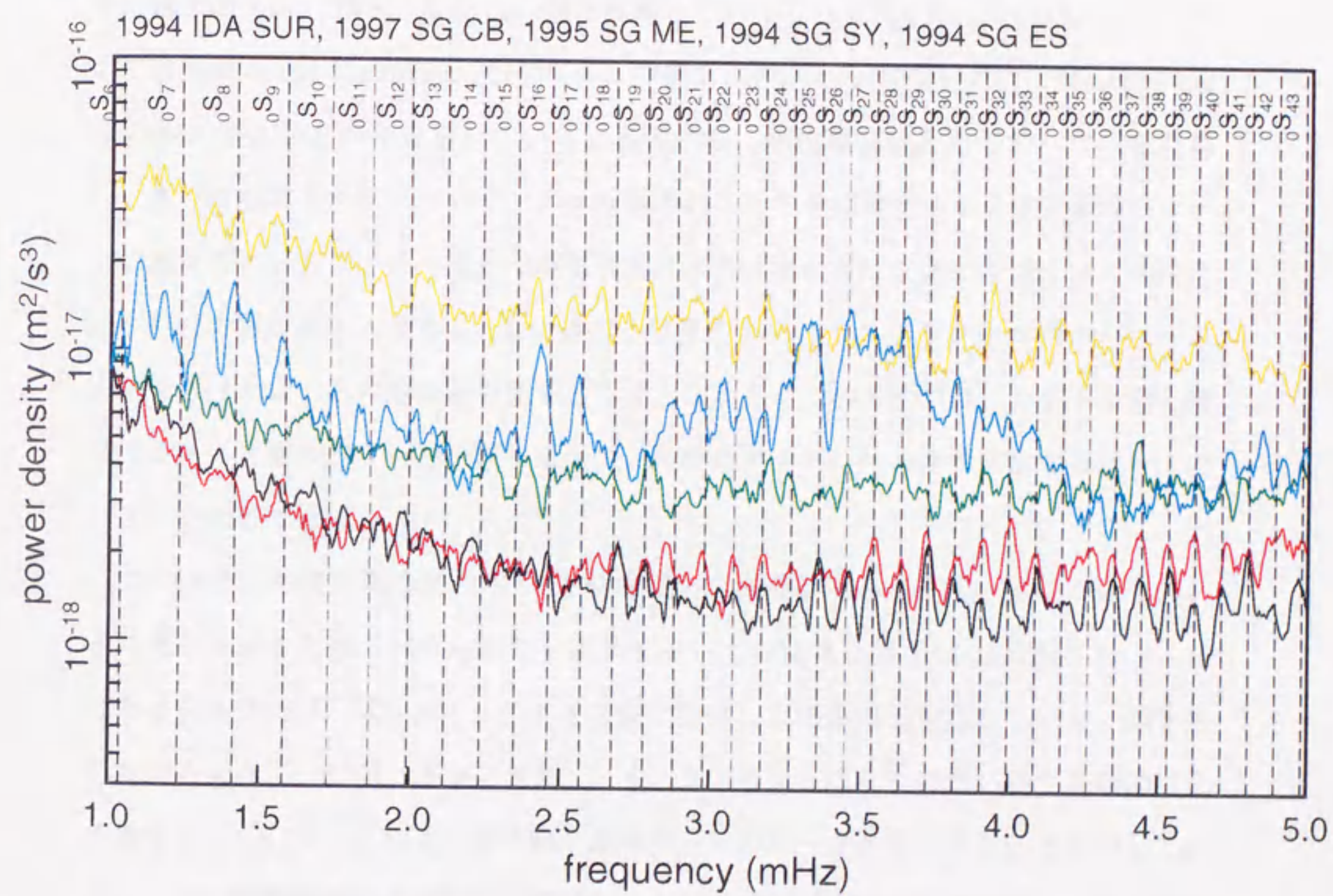


図 3 - 2 - 8 : 静穏期の平均 PSD(26 本分) の比較 (黒、IDA SUR 1994;
赤、SG CB 1997; 緑、SG ME 1995; 青、SG SY 1994; 橙、SG ES 1994)

周波数と対応しているピークも見えていることは確かである。ここで、なんらかの理由で生じたバックグラウンドノイズに乗ってピークが見えていると考えて、各観測点の平均 PSD を次のような方法で定量的に比較してみる。見えているピークは伸び縮み基本モードと考えて、先験的にシグナル帯とノイズ帯を仮定する (図 3-2-9)。各モードのシグナル帯の中心周波数とバンド幅は、Beroza and Jordan (1990)[7] が伸び縮み基本モードの検出に用いた値を使用した。彼らは、 l 次のモードのシグナル帯の中心周波数を ω_l 、幅を $\sim 0.3 \times \omega_l / Q_l$ と定義している。 ω_l と Q_l として、 ${}_0S_2 - {}_0S_7$ については Sailor and Dziewonski (1978)[87] の値を、 ${}_0S_8 - {}_0S_{43}$ については、Masters and Gilbert (1983)[62] の値を用いている。各帯域毎に単位周波数あたりのパワーを計算し、各々の基本モードについてシグナル帯のパワーとその隣接するノイズ帯のパワーとの差を取る。もし、スペクトルが局所的にフラットならばシグナル帯とノイズ帯とのパワーの差はほとんどなく、0 に近づかずである。もし、シグナル帯のパワーの方が大きければ、その差は正の値をとることになる。この方法では、シグナル帯と隣接するノイズ帯のパワーと比較するので、純粋にノイズレベルから突出するピークのパワーを比較できる。

このようにして、先ほどの平均 PSD を用いて各伸び縮み基本モードについてのノイズ帯とシグナル帯のパワーの差を計算する。その結果を図示したのが図 3-2-10 である。エラーバーは、ジャックナイフ法で計算した標準誤差を示している。図を見てわかるように、SUR、キャンベラ、フィンランドは、ばらつきが小さく系統的に正の値を示している。これは、伸び縮み基本モードのピークが存在することを示している。一方、昭和基地は全体的に正側にシフトしているが、モード毎のばらつきが非常に大きい。江刺については、一部対応しているピークもあるが、平均的に見えているとは言い難い。

各観測点で、全体的にピークが良く見えている ${}_0S_{15}$ から ${}_0S_{43}$ までの短周期側のモードについてパワーの差の平均を計算した (図 3-2-11)。エラーバーは標準偏差である。この図が示すように、平均的には江刺以外の各観測点ではピークが見えていると言える。また、各観測点のスペクトルのノイズレベルの大きさが、ピークの見え具合

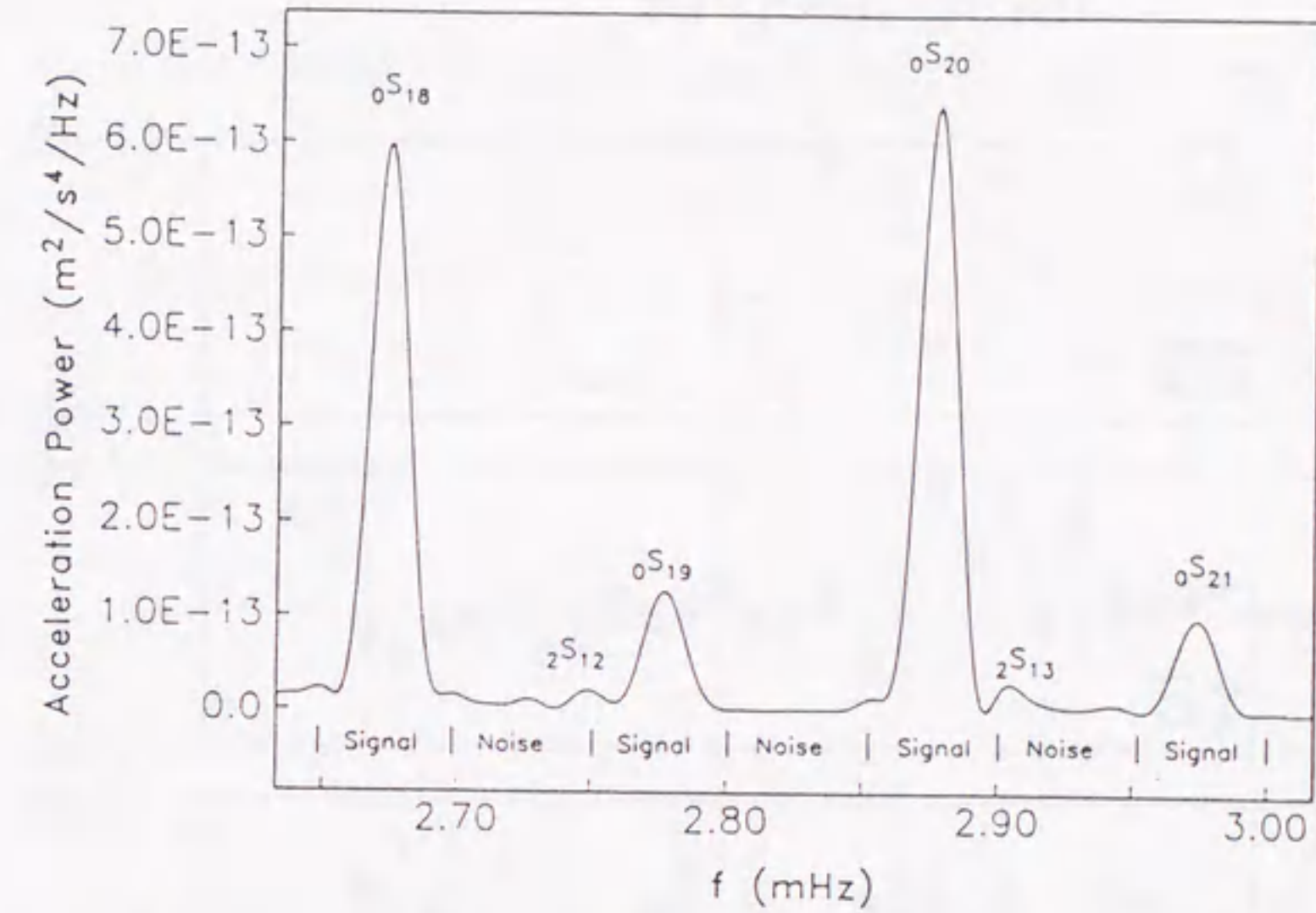


Fig. 6. Power spectral density for a 24-hour time window following the 1979 Peru-Columbia earthquake for IDA station BDF. Frequency is shown in millihertz (mHz) on the horizontal axis. The prominent spectral peaks correspond to the fundamental spheroidal modes ${}_0S_l$ for the range $l = 18-21$. The peak shape is influenced by lateral heterogeneity and attenuation. As Q_l decreases, the widths of the resonance peak increases. Splitting due to rotation and asphericity will also broaden the peak. We adopt a simple model in which the spectrum is divided into signal and noise bands. The signal bands are centered on the fundamental mode resonance peaks and have a width proportional to the attenuation parameter $\alpha_l = \omega_l/2Q_l$. The noise bands are located between the resonance peaks. At higher angular orders the resonance peaks leak into the noise band and decrease the snr. Overtones such as ${}_2S_{12}$ and ${}_2S_{13}$ generally have much smaller amplitude than the fundamental modes for events in the crust and upper mantle over the frequency band 0-5 mHz.

図 3 - 2 - 9 : シグナル帯とノイズ帯

(Beroza and Jordan, 1990[7]: Fig.6 を引用)

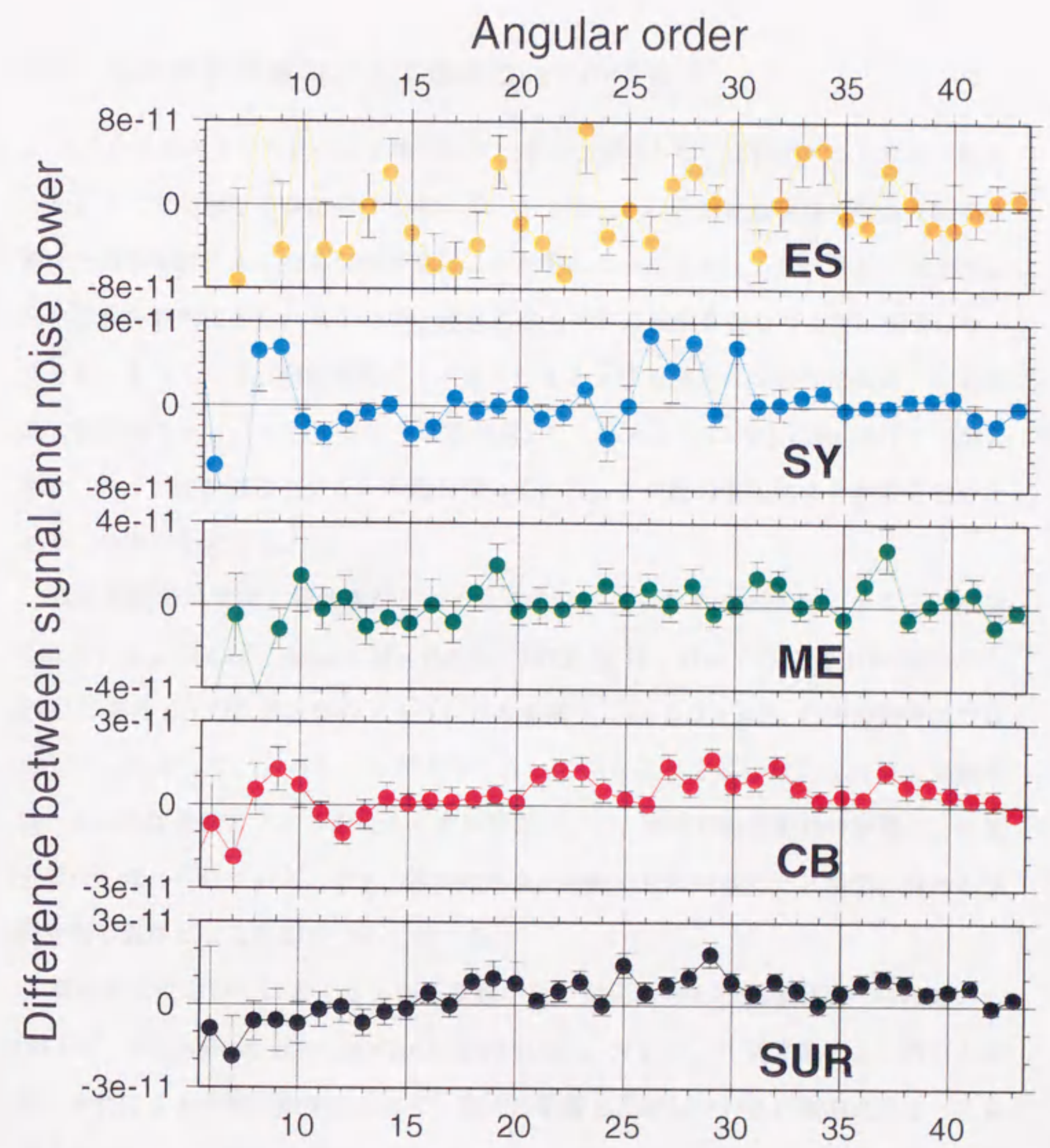


図 3-2-10: 伸び縮み基本モード毎のシグナル帯とノイズ帯のパワーの差

のばらつきの大きさを反映しているようである。SG 観測点の中ではキャンベラが、基本モードが最も安定して見えていて、その程度は IDA の静かな観測点である SUR と同等であることがわかる。

3.3 自由振動帯域のノイズ源についての考察

スペクトルのノイズレベルをあげるローカルな原因としては何が考えられるであろうか。ここで問題を 2 つに分けて考える。1 つは一般に自由振動帯域ではより低周波側でその寄与が大きくなる気圧変動による影響についてである。これはどの観測点においても一般的にみられることで、超低周波モードの検出を行なうときに重要になってくる。もう 1 つは、昭和基地のノイズレベルを上げる要因についてである。昭和基地は低周波モードに対応するような筋が見えていたとともに 3-4 mHz のパワーが大きいという、他の観測点にない特徴を持っていた。1 つ目の気圧による影響も含めた上でこの原因を考える。

自由振動帯域では、周波数が小さくなるほどノイズレベルが大きくなることが知られている。例えば、Agnew and Berger (1978) [3] は、IDA の LR や IDA 観測点の PFO にある SG の低周波側のノイズレベルを調べ、1 - 0.001 mHz の周波数帯域では $f^{-2.7}$ にしたがってノイズレベルが大きくなっていることを示した。この自由振動帯域、主に低周波側でノイズを大きくする原因として、気圧や海洋変動の影響による重力変化が考えられている。まず、常時地球自由振動の超低周波モード検出に関わる低周波側の気圧による影響について述べる。

潮汐帯域においては古くから気圧変動が重力変化に与える影響が調べられている(例えば、Warburton and Goodkind, 1977 [120])。大気は、大気質量による引力の効果とそれによる荷重の効果によって、重力に影響を及ぼしている。観測点によっても違うが、1 hPa の気圧の増加に対して、重力はおよそ $3 \times 10^{-9} \text{ms}^{-2}$ 減少することが知られている。現在、どの SG 観測点においても重力と並行して気圧が観測されており、一般に、潮汐解析を行なうときには、その気圧データを使って大気による重力効

IDA & SG stations

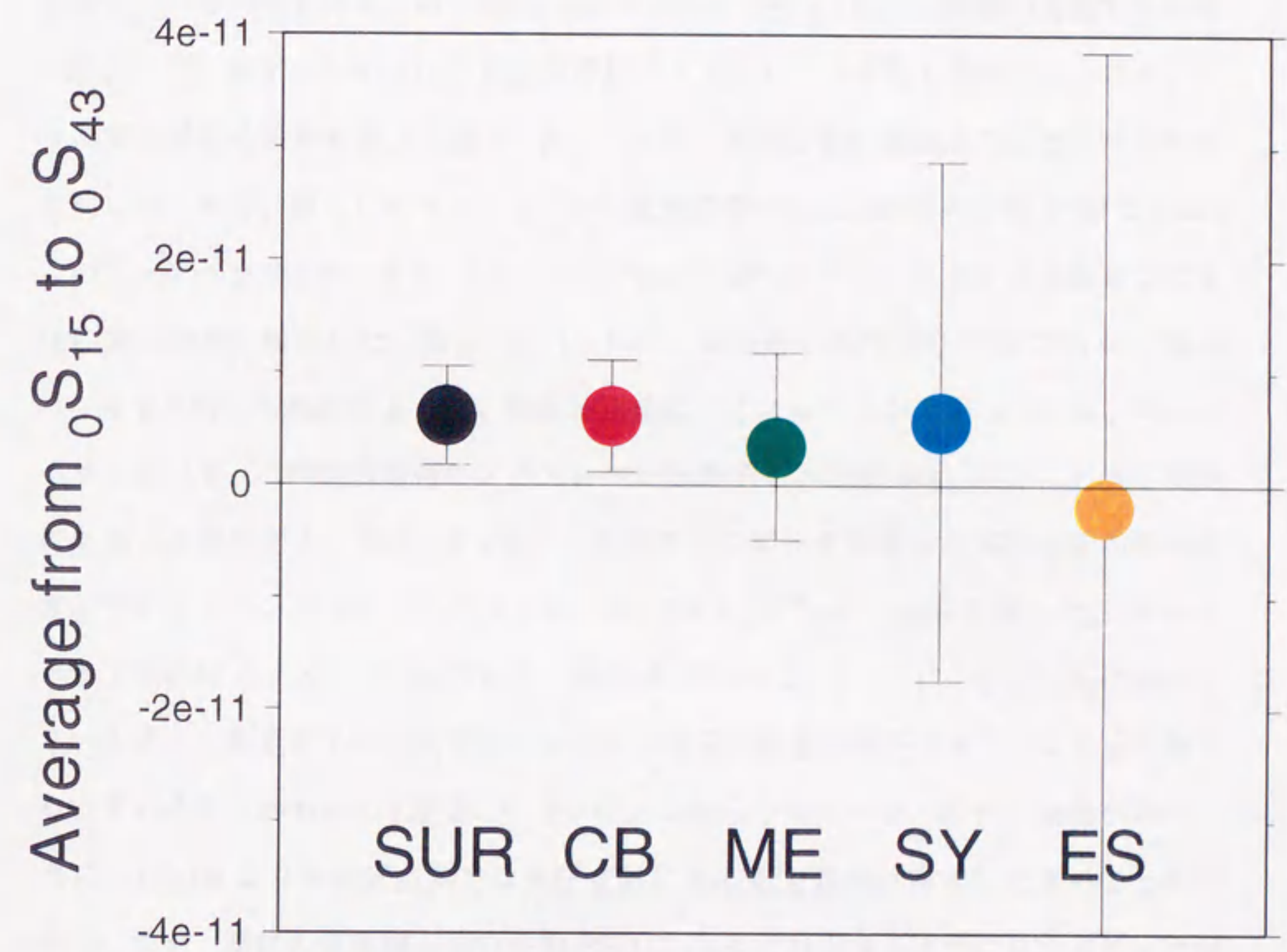


図 3-2-11: シグナル帯とノイズ帯のパワーの差の平均と標準偏差

果が補正される。これまで自由振動帯域では気圧の補正はほとんどされてこなかったが、Zürn and Widmer (1995) [127] は、ドイツの BFO の LR で記録された地震データを気圧補正をすることによって、2 mHz より低周波側のノイズレベルが下がることを示した。補正は、一般に潮汐解析で行なわれているのと同様、重力の時系列からあるファクター倍（以後、アドミッタンスと呼ぶ）した気圧の時系列を引き去るという単純な方法で行なった。

本研究で用いた SG スペクトルの 1 mHz よりも低周波側で、どの程度気圧の影響が効いているのかを見るため、Zürn and Widmer (1995) [127] と同様の方法で気圧補正を試みた。まず、1-5 mHz の周波数帯域のノイズレベルが最も低かった、キャンベラの気圧補正の結果を示す。図 3-3-1-a は、先ほど他の観測点の比較に用いたのと同じデータで計算したキャンベラ SG の低周波側 (0.2-1 mHz) の平均 PSD である。このキャンベラ SG データを、 $-3.4 \times 10^{-9} \text{ms}^{-2}/\text{hPa}$ のアドミッタンスを仮定して気圧の重力効果を補正した。図 3-3-1-b が、気圧補正後の平均 PSD である。図 3-3-1 を比較してわかるように、気圧補正後はノイズレベルが下がっている。キャンベラにおいて、この周波数帯のノイズレベルをあげている原因は、ほとんど気圧変動にあることがわかる。図 3-3-2 に、松代の SG データを使った気圧補正の例を示す。アドミッタンスはキャンベラと同じ値 $-3.4 \times 10^{-9} \text{ms}^{-2}/\text{hPa}$ を用いた。キャンベラと同様にノイズレベルが下がり、補正前 (図 3-3-2-a) に、 $0S_2$ や $0S_3$ に対応しているようにも見えていた大きなピークも、気圧の影響を補正することによって無くなっていることがわかる (図 3-3-2-b)。これらキャンベラ・松代の結果が示すように、1 mHz よりも低周波側では気圧変動による重力効果が非常に大きいことがわかる。なお、松代の気圧補正後の平均 PSD に、 $0S_2$ と対応するよう見えるピークが残っているが、常時励起されている信号なのか、本研究の段階では判断できない。

では、昭和基地の低周波側もキャンベラや松代と同じように、気圧によってノイズレベルが上がっているのだろうか。昭和基地のスペクトログラムでは、1 mHz よりも低周波側で明瞭な筋が見えていた。昭和基地でも同様に気圧補正を行ない、気圧変動で説明できるのか確認した。他の SG 観測点と同様に昭和基地の重力計室では気圧観

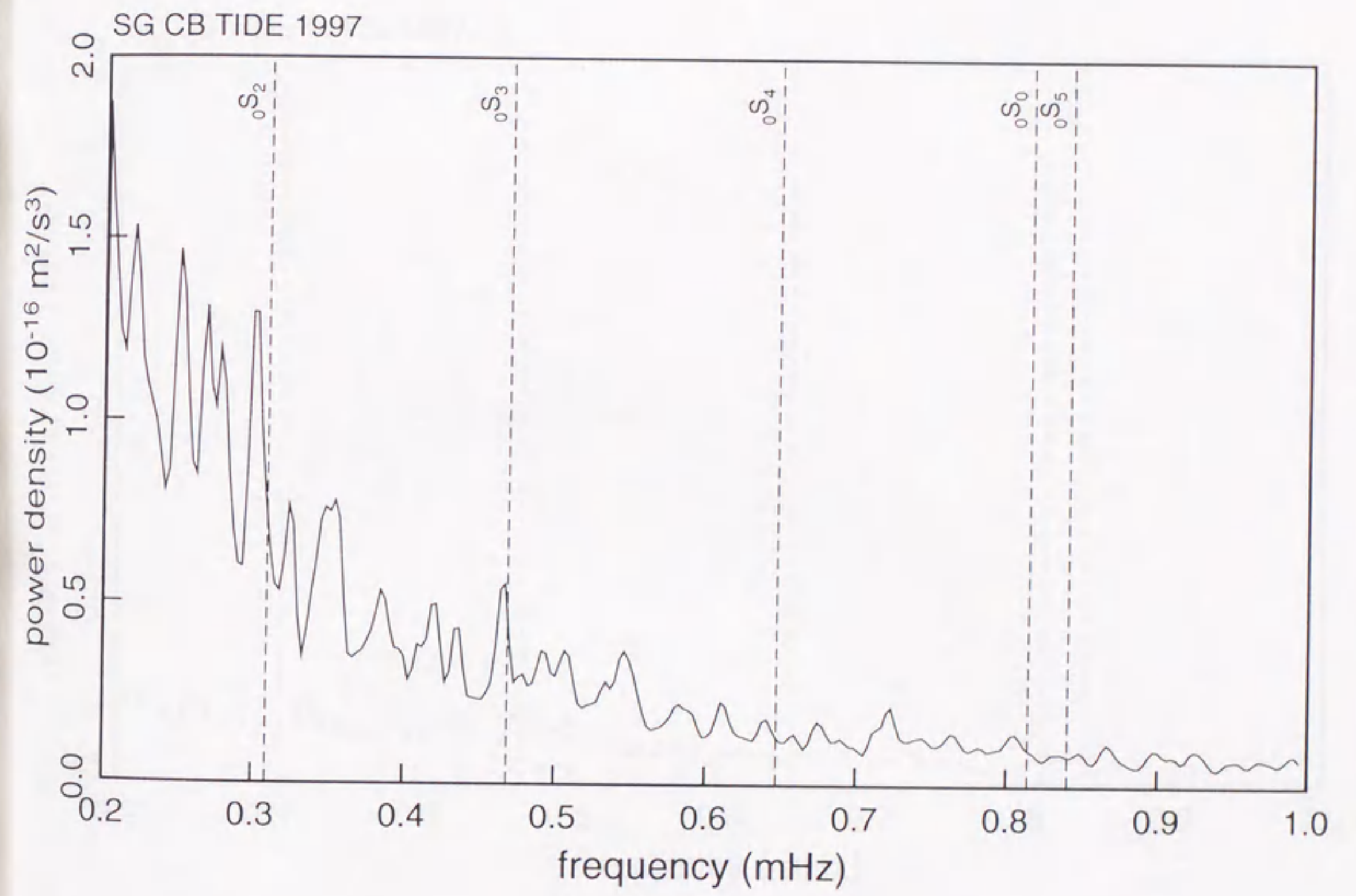


図 3 - 3 - 1 - a. CB TIDE 平均スペクトル

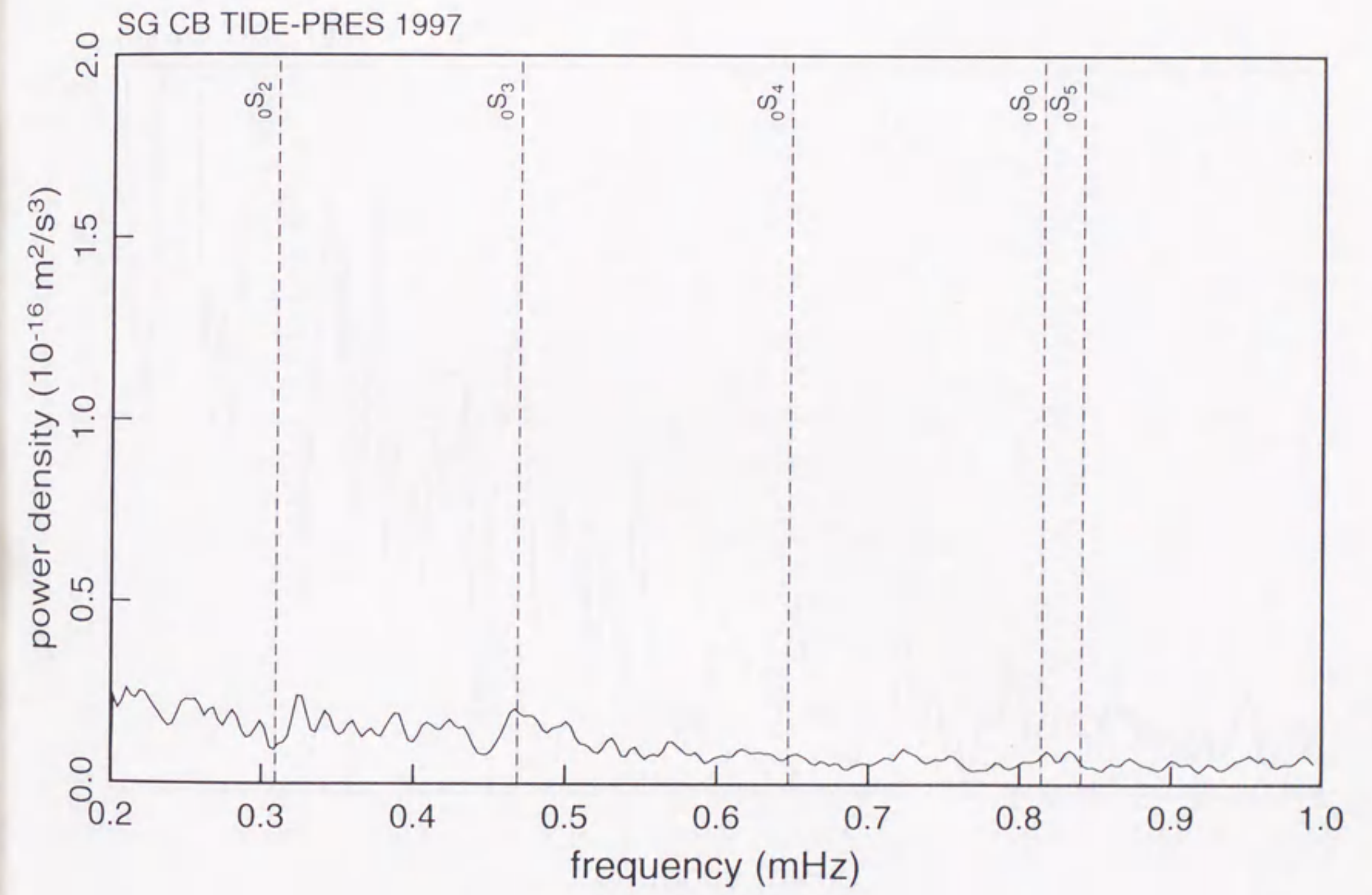


図 3 - 3 - 1 - b. 気圧補正後の CB TIDE 平均スペクトル

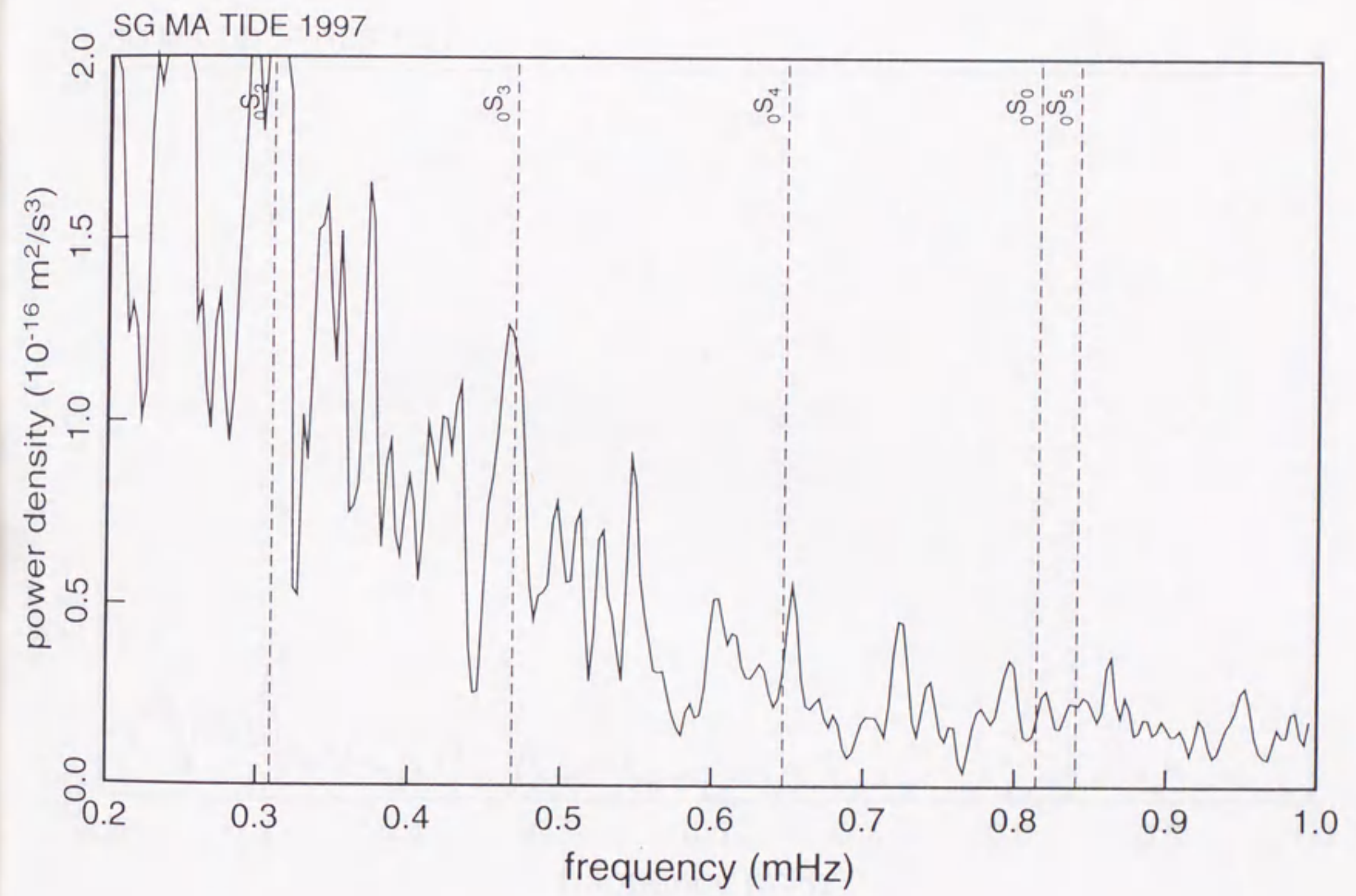


図 3 - 3 - 2 - a. MA TIDE 平均スペクトル

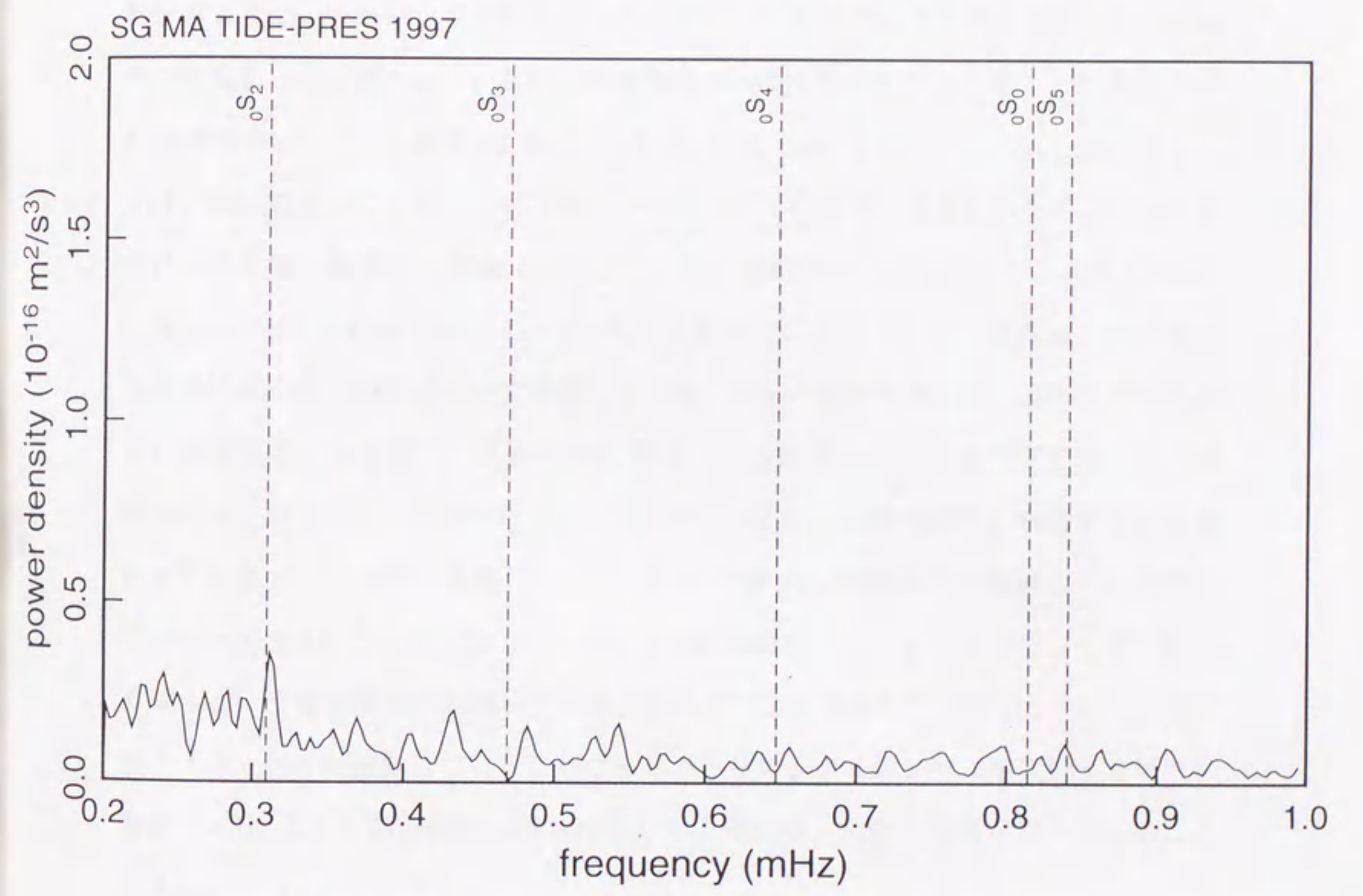
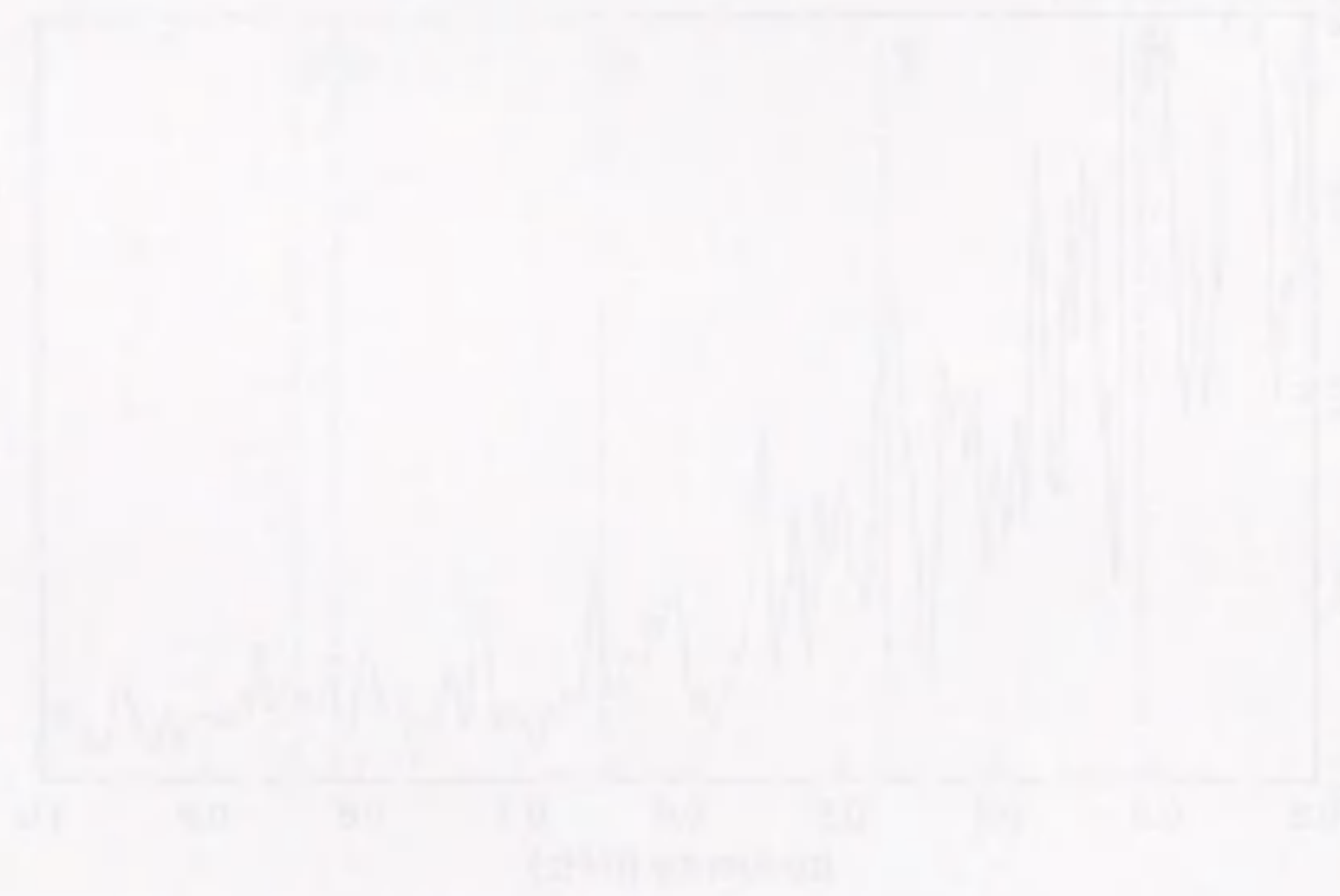


図 3 - 3 - 2 - b. 気圧補正後の MA TIDE 平均スペクトル

測を同時に行なっているが、この気圧データから求めたスペクトログラムを、図 3-3-3 に示す。この図を見てわかるように、重力のスペクトログラムで見られるのと同じように、低周波側の振幅が季節変化している。気圧のスペクトログラムには 1995 年の 3.3 mHz 付近のピークを除いて、重力のスペクトログラムで特徴的だった 3-4 mHz 付近の高まりは見えていない。この気圧データを使って補正を行なった。アドミッタンスは、潮汐解析の結果から得られている値 $-3.67 \times 10^{-9} \text{ms}^{-2}/\text{hPa}$ (Tamura et al., 1997 [116]) を用いた。結果を図に示す。昭和基地の補正前後の平均 PSD を比較してわかるように、キャンベラや松代のように、ノイズレベルは下がらなかった。ピークの形もまったく変わっていない。昭和基地のスペクトログラムで筋として見えていた周波数 (表 2-2-1 参照; 0.25, 0.29, 0.35, 0.45, 0.50, 0.65, 0.78, 0.84 mHz) のピークは、気圧補正後も残っているが、キャンベラと松代では見えていないことから海洋による影響や観測室の環境ノイズなど、気圧変動以外の要因によると考えられる。

Agnew and Berger (1978) [3] は、気圧変動以外の要因として、海岸線に打ち寄せる波浪による重力効果について考察している。大気の場合と同様に、盛り上がった海面の過剰質量による引力による効果と荷重による効果によって重力が変化する。海岸線の近くほど引力の効果が大きく、300 m 以遠では荷重の効果が卓越すると見積もっている。この海洋の影響によって、IDA の静かな観測点と海岸線近くの観測点 (Rarotonga:RAR と La Jolla:LJC) の自由振動帯域のノイズレベルがパワーで二桁近く違うという観測事実を説明している。注目すべきは RAR で、時期によって一桁程度ノイズレベルが変動していることである。さらに、ノイズレベルが変動する周波数帯が 3 mHz よりも高周波側に限られていて、それは、地形の効果が現れていることによるという。

昭和基地 SG があるオングル島は、海氷に覆われている時期が長いものの、まわりは海に囲まれている。最も近い海岸線までは 200 m 程度なので、RAR と同様なメカニズムで海洋変動の影響を受ける可能性がある。南極昭和基地周辺の海域では、潮位変動が他の地域の平均的な潮位の季節変動より、振幅がかなり大きいことが知られている (Ohshima et al., 1996 [77]; Odamaki et al., 1997 [76])。海洋による擾乱がノイ

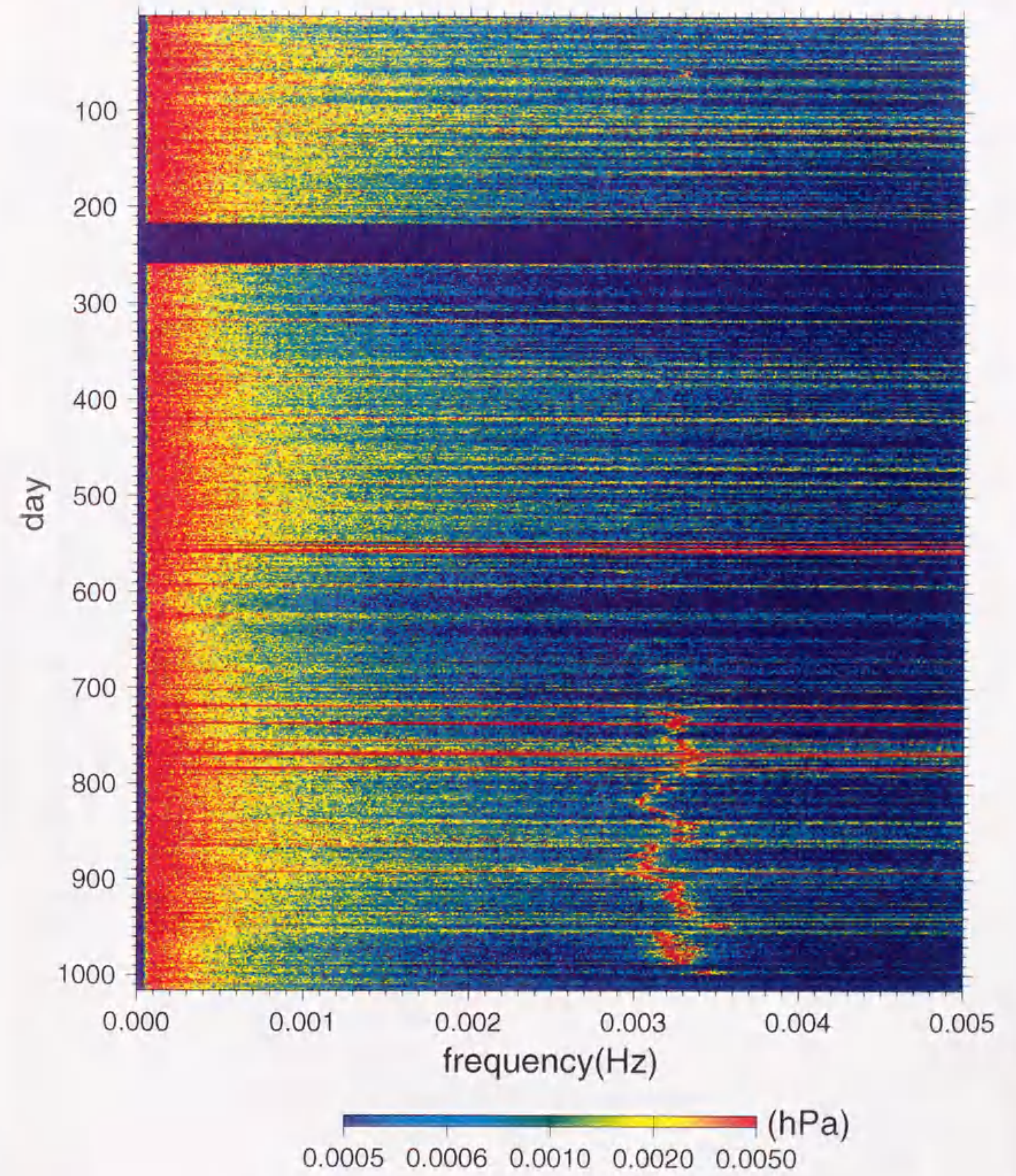


図 3 - 3 - 3 : 昭和基地の気圧計データ 3 年分の時間-周波数スペクトログラム。

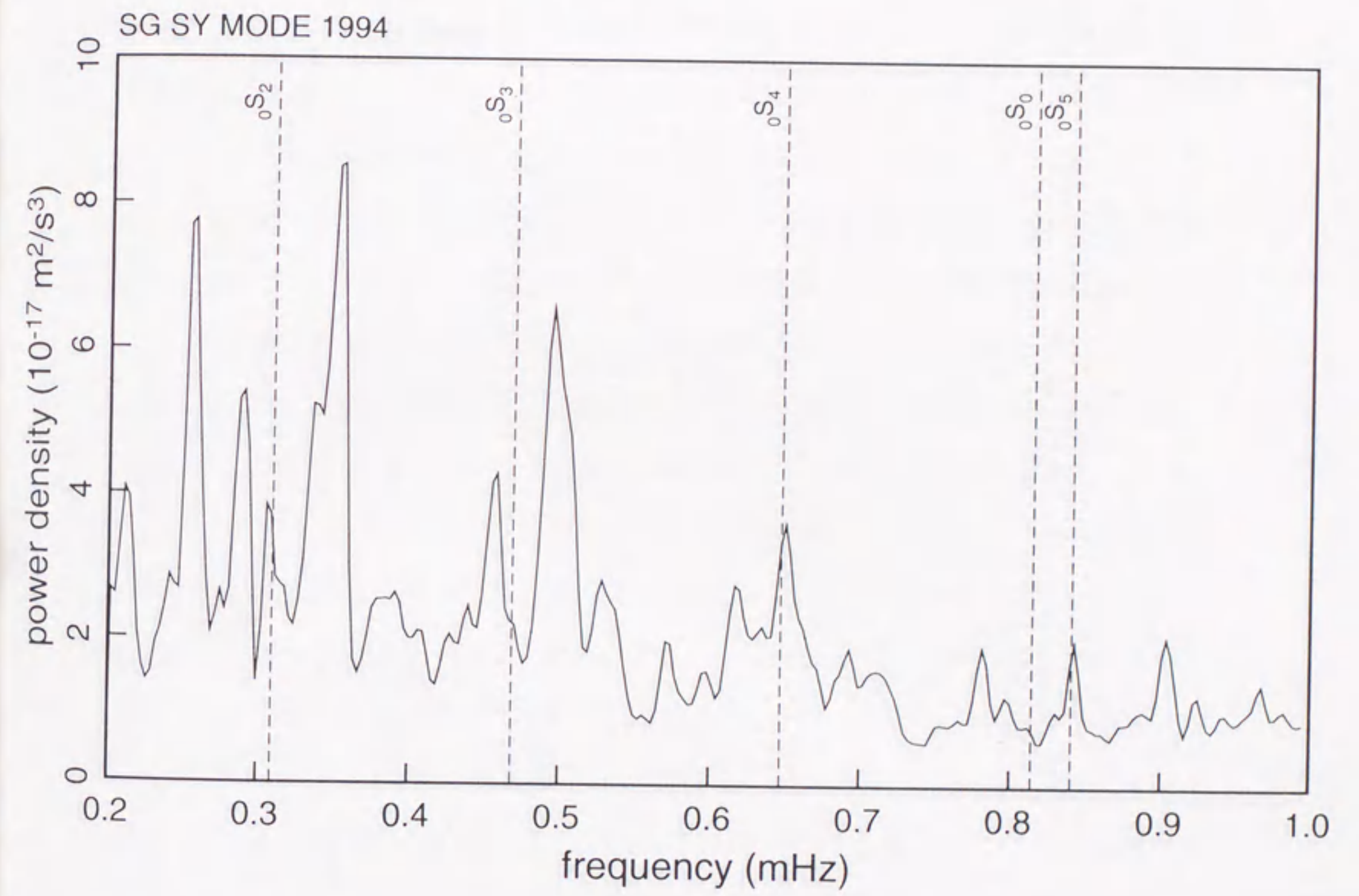


図 3 - 3 - 4 - a. SY MODE 平均スペクトル

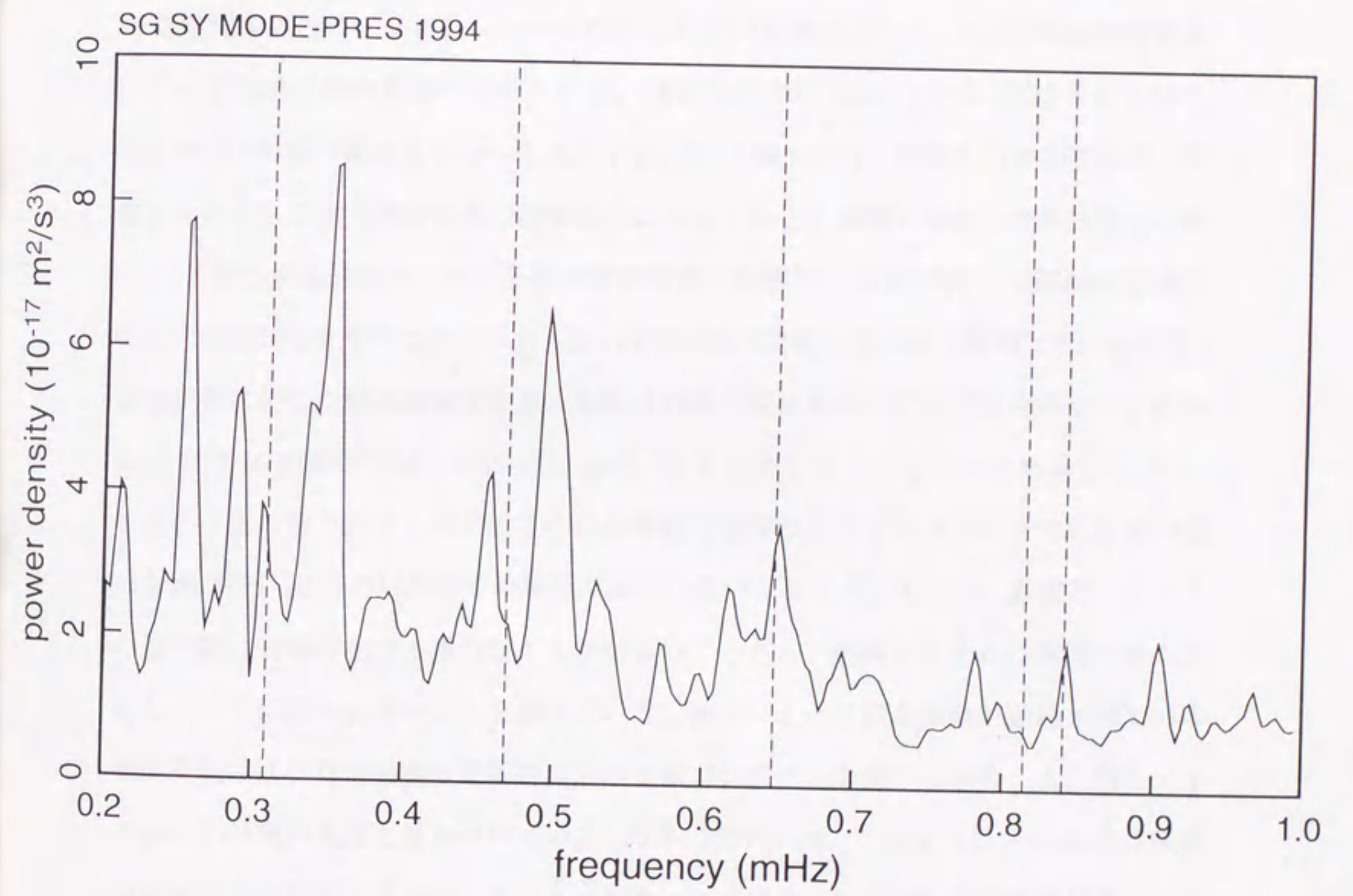


図 3-3-4-b. 気圧補正後の SY MODE 平均スペクトル

ズレベルをあげている原因ならば、重力のスペクトログラムの季節変動を説明できるかもしれない。また、リュツォ・ホルム湾やオングル島付近の複雑な地形を考慮することで、3-4 mHzのパワーの高まりも説明できるかもしれない。

昭和基地では海底水圧計による海洋潮汐観測を行なっているが、潮汐解析のために1時間サンプリングデータしか残されていない。潮汐帯域では季節変化が知られているが、海洋の変動がどの程度自由振動帯域に影響を及ぼすのか、また周波数によって影響の程度が変わりえるのか、データに基づいて議論することはできない。

自然現象以外に、ノイズレベルを持ち上げている原因として、SGの傾斜補償装置に与える環境変化の影響が考えられる。京都大学では1988年から1997年にかけて2台のSGの並行観測を行なってきた(Higashi, 1995 [39])。向井ら(1995)[70]は、環境ノイズとして重力観測室内の温度変化によって生じる観測システムの特長変化を疑い、13個の水晶温度センサーを重力計の周囲に配置し、10秒間隔で空間的な室温分布とその時間変化をモニターした。SGの傾斜補償装置は熱膨張を利用しているので、室温変化に応じた傾斜補償を生じ、見掛けの重力変化を起こす可能性を考えた。彼らは数10分の周期帯では、1 nGal以上のノイズを生じることはない結論している。また、2台の重力計の1時間以下の自由振動周期帯の重力シグナルに対する応答の違いを調べ、1-10分の周期帯での相関が非常に低いことを示している。原因として、この周期帯に常時存在する重力シグナルが極めて小さく、観測システムに起因する人工的なノイズに乱され易いことを挙げている。地震によって自由振動が励起されている期間を除けば、自由振動の周期帯における重力シグナルを調べる場合、人工的なノイズからの分離が重要と結論づけている(向井, 1997 [71])。このように、1 nGal程度の常時地球自由振動のスペクトルは人工的なノイズによって乱される可能性がある。先に昭和基地の重力計室の気圧計のスペクトログラムを示したが、観測期間のうち3年目の1995年に3.3mHz付近にピークが見えている。この原因として、SG本体のコールドヘッドのコンプレッサーの冷却水を冷やすためのチラーのファンのスイッチングが疑われている。ファンが動作することによって室内の気圧・室温が変化し、それによって傾斜補償装置に影響を与えることがあるかもしれない。

昭和基地のスペクトルのノイズレベルを上げる原因が海洋の影響なのか、傾斜補償装置の影響なのか確定するには、データが不足している。最近江刺とキャンベラでは、1秒サンプリングで傾斜補償装置の出力のモニターを始めたが、観測室内に原因があるかどうか確認するために、今後昭和基地でも、自由振動帯域での温度変化などの環境データおよび傾斜補償装置の出力の高サンプリングレートでの取得が重要であるとする。

微弱な常時地球自由振動の超低周波モードを検出しようという場合、大気や海洋が重力変化に及ぼす影響を考慮することは重要である。Beroza and Jordan (1990) [7] は、このような超低周波のノイズを嫌って、 ${}_0S_8$ より高周波のモードのみを使ってイベントの探索を行なった。今後、1 mHz 前後のモードを使ってスローなイベントを検出しようというような場合、最低、気圧補正が必要である。残念ながら、IDA 観測点には気圧の並行観測データはなく、今となっては気圧の補正はできない。GGP によって SG・気圧データの交換も始められるが、今後のキャンベラや松代のような静かな観測点の SG データおよび気圧データの蓄積が待たれる。常時地球自由振動の超低周波モードの検出については、今後の課題である。

3.4 常時地球自由振動の励起源についての考察

3.4.1 地震による励起を仮定した数値実験

観測された常時地球自由振動の原因として最も考えやすいのは、世界中で起こる多数の地震による見掛け上連続的な励起である。そこで、地震によってスペクトログラムの縦の筋が説明できるのか調べる目的で、理論地震波形を用いた数値実験を行なった。この節では、昭和基地の SG での観測を想定した数値実験、次の節で IDA SUR での観測を想定した数値実験を行なった結果について述べる。

理論地震波形の計算について説明する。まず地球モデルとして PREM を用い地球自由振動モードの固有関数を計算し、地震の震源パラメーターとして 1994 年のすべてのハーバード CMT 解 (Dziewonski et al. 1994e [19]; 1995a [20]; 1995b [21]; 1995c

[22]) を用いて各モードの初期振幅と初期位相を計算した。ハーバード CMT 解が求められているすべての地震について、周波数 10 mHz より長周期の伸び縮みモード 735 個を全て重ね合わせて、それぞれの地震の理論地震波形を計算した (Gilbert and Dziewonski, 1975 [32])。理論地震波形の長さは、最低 10 日間とした。大きな地震については、 ${}_0S_0$ モードの振幅が 0.1 nGal ($= 10^{-12}\text{m/s}^2$) になるまで計算した。Kuril Islands 地震が最長で約 100 日となる。これら全ての地震の重ね合わせによって、1 年間の理論地震波形を作成した。

多数の地震の影響を考える場合、CMT 解が求められていない小さな地震の影響も考慮する必要がある。ハーバード CMT 解は M_0 が約 10^{17}Nm より小さい地震については網羅されていないので、地震の発生頻度を考慮して M_0 が 10^{16}Nm までの地震をランダムに発生させて理論地震波形に追加した。具体的には、以下のような方法で多数の小さな地震の影響を取り込んだ。ハーバード CMT 解は M_0 が $10^{17.2}\text{Nm}$ 以上の地震ならばほぼ網羅しており、それらの頻度分布はゲーテンベルグ-リヒター (G-R) 則に従う。そこで、小さな地震でも G-R 則が成立すると仮定し、さらにそれらの発生がポアソン分布に従うと仮定する。そのような仮定の下で、 M_0 が 10^{16}Nm までの地震をランダムに発生させた。波形はあらかじめ計算しておいた実際の地震の数十個の理論波形からランダムに選び、振幅だけ頻度分布に応じて変化させて、上で作成した理論波形に加えた。ハーバード CMT 解は 1 年につき 700-800 個の地震について求められているが、これによりさらに約 2000 個の小さな地震を追加した。さらに、それらに理論潮汐を加え、実際のノイズスペクトルの形と大きさを考慮して 2 mHz 以下で $1/f$ 、2 mHz 以上でフラットなスペクトルを持つランダムノイズを加えた。なお、理論地震波形は、実際の SG の感度でデジタル化した。

このように作成された理論地震波形を観測記録と同様な方法で解析した。しかし、観測スペクトログラム (図 3-4-1) に見られたような連続した筋が見えることはなかった (図 3-4-2)。

IDA 観測点の多くの観測点およびキャンベラ・フィンランドの SG 観測点では昭和基地 SG に較べて全体的に筋の振幅が小さかったが、この場合、昭和基地 SG ではほ

とんど問題にならなかったような小さな地震の効果が無視できない可能性がある。そこで、最も振幅レベルが小さく長期間のデータ解析が可能な SUR について、昭和基地について行なったのと同様な数値実験を行なう。IDA SUR でも昭和基地と同様な方法で理論波形を計算し、スペクトログラム (図 3-4-3) を作成した。その結果、理論スペクトログラムにも、観測スペクトログラム (図 3-2-6) に示されたような縦の筋がぼんやりと見え、地震の効果がある程度含まれることが分かった。そこで、より定量的に調べるため、前節の比較の際に用いた平均 PSD を、観測と理論とで比較した。

前節と同様、パワースペクトルはスペクトログラムに用いた 3 日長データのパワースペクトルを用いた。図 3-4-4 に SUR の 1986 年から 1995 年の 10 年間から選んだ静かな期間 437 本のパワースペクトルの平均を示す。観測の平均 PSD (図 3-4-4-a) には 2-7 mHz に伸び縮み基本モードに対応する明瞭なピークが見られる。7 mHz より高周波側では、地殻やマンツルの不均質に起因するモード間カップリングの影響で、モードが孤立したピークとしては観測されなくなっている。2 mHz より低周波側でモードのピークが見えなくなっているのは、観測機器に起因するノイズや、前に述べたような気圧や海洋変動に伴うノイズのためと考えられる。

一方、理論の平均 PSD (図 3-4-4-b) には観測のような明瞭なピークは見られない。観測と理論の違いは、数値実験に伴う不確実性では説明できないほど大きい。例えば、理論波形の作成の際に加えるノイズのレベルを小さくしても、理論平均 PSD にピークが見られることはない。また、実際の地球では地殻やマンツルの不均質が自由振動の振幅に影響を及ぼしている (Lay and Kanamori, 1985 [60]) が、そのような振幅の変動は平均化という操作により相殺されて、観測平均 PSD には現れていないと考えられる。以上より、スペクトログラム中の縦の筋として表わされている常時地球自由振動は、通常の地震の効果では説明できないと結論できる。

SG, SYOWA, 1994 1/1 - 12/31

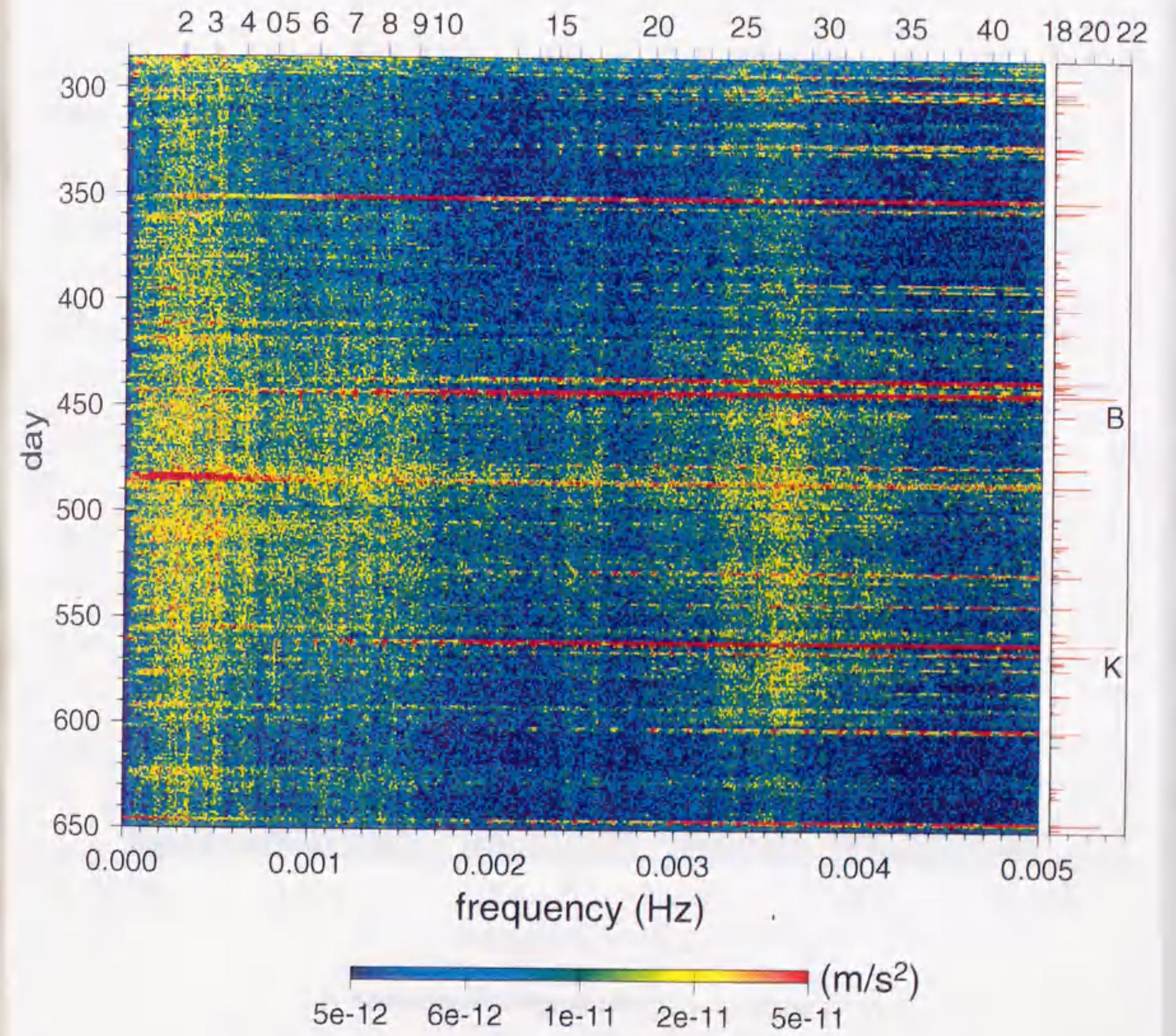


図 3-4-1: 昭和基地 SG/MODE データ 1994 年 1 年分の
観測時間-周波数スペクトログラム

SYNTHETIC, SYOWA, 1994 1/1 - 12/31

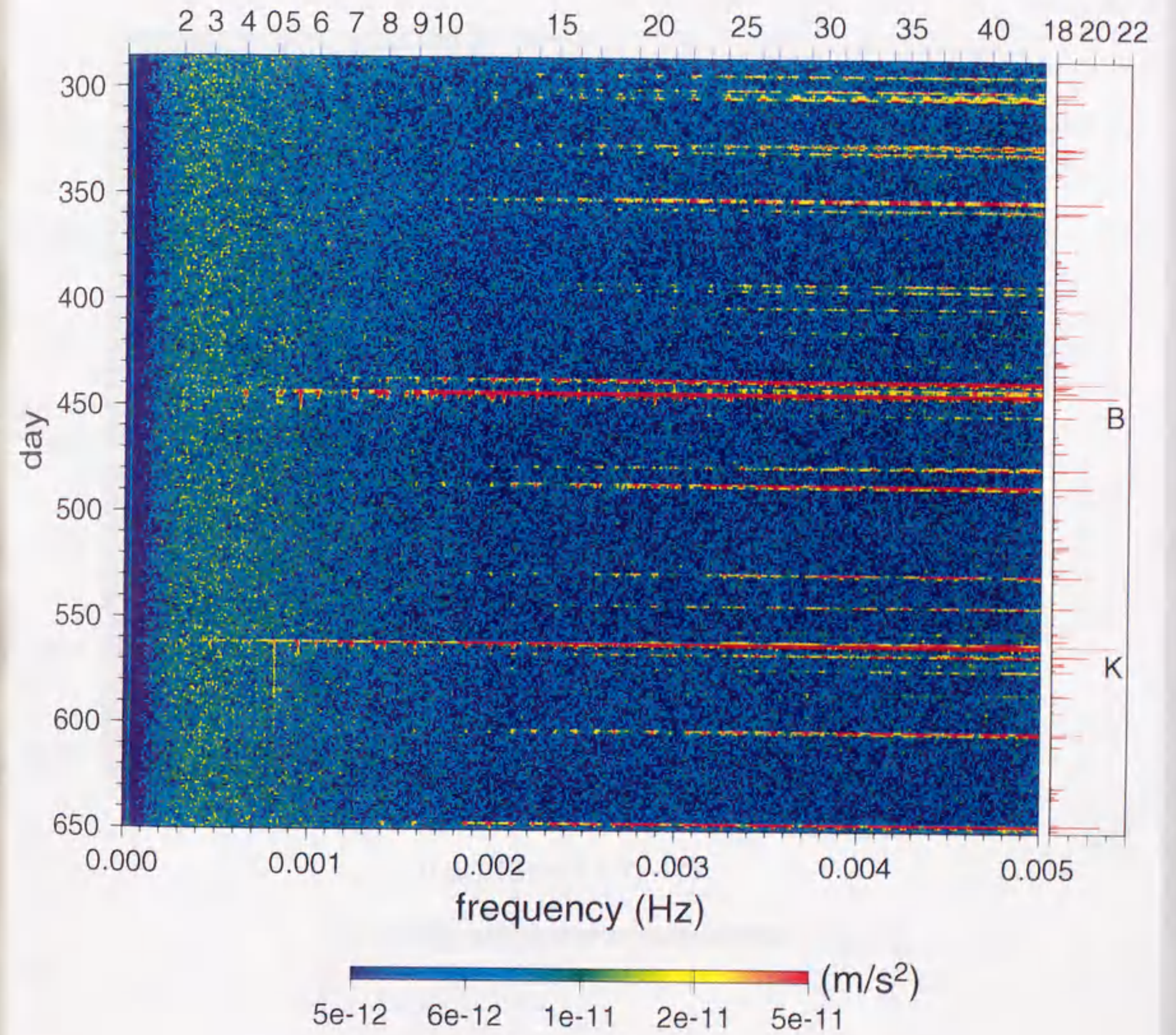


図 3 - 4 - 2 : 昭和基地 1994 年 1 年分の理論時間-周波数スペクトログラム

IDA, SUR, 1994 1/1 - 12/31

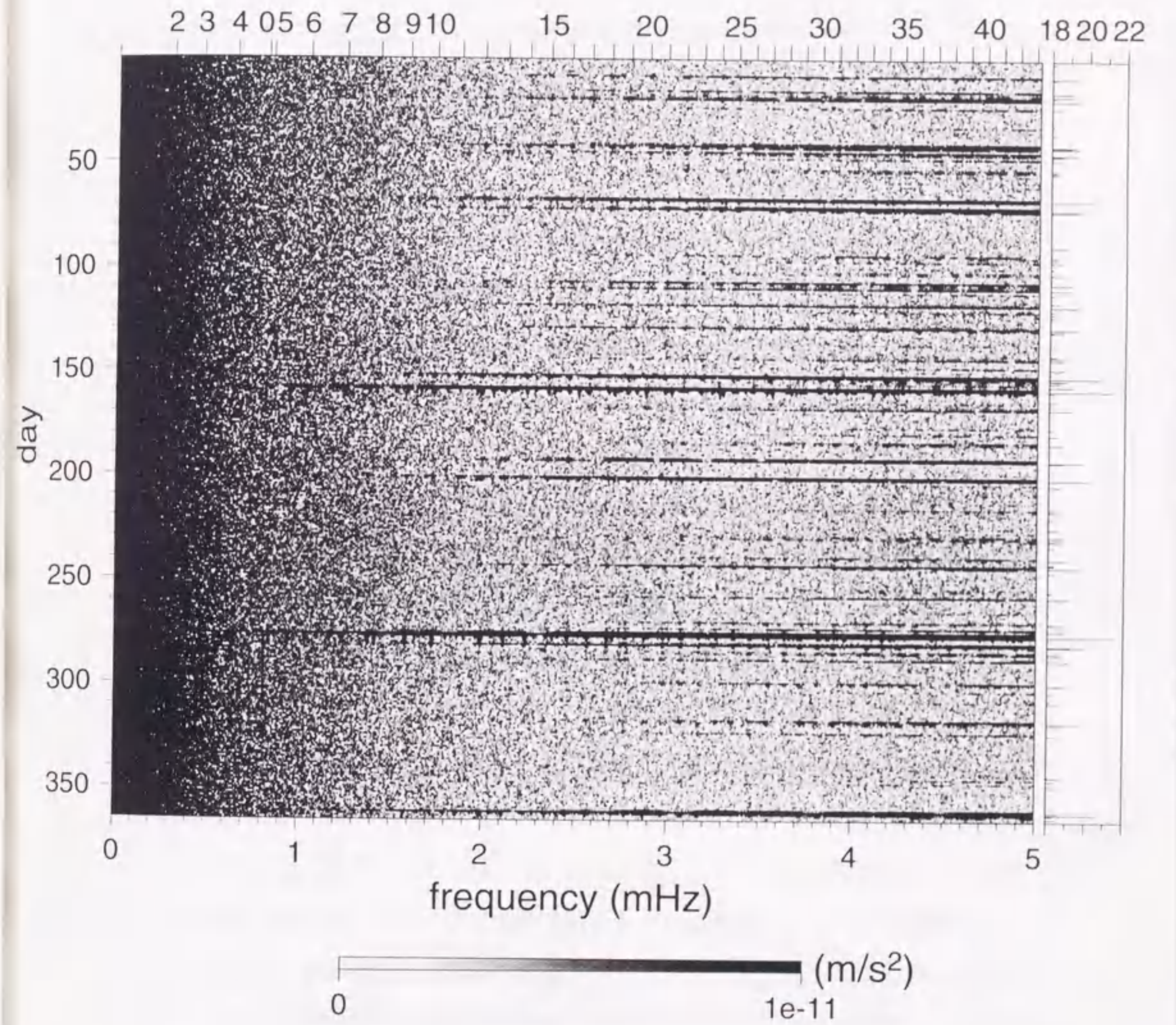


図 3 - 4 - 3 : SUR 1994 年 1 年間の理論時間-周波数スペクトログラム。

3.4.2 大気による励起 -過去の観測と理論的考察-

通常地震で励起されていないとすれば、励起源として何が考えられるだろうか。常時地球自由振動として主に基本モードが観測されていることは、励起源が地表に近いところにあることを示唆している。地震以外の励起源としては、グローバルな大気変動によるランダムな励起および大気振動とのカップリングが考えられるだろう。

過去にも大気運動/振動と地球振動との関係が議論されてきた。1960年チリ地震による地球自由振動の観測 (Benioff et al., [6]) 以前には、地震が起きていない期間の記録を用いた自由振動の検出が試みられたこともあった (Benioff et al., [5])。これは大気や海洋の運動で、自由振動が励起されることを期待したものだ。逆に大地震によって大気振動が励起されたとする研究もある。例えば、アラスカ巨大地震による大気振動が励起されたという Donn et al. (1964)[13]、Mikumo (1968)[68]、その他に Garmash et al. (1989)[31] などがある。これらの観測はいずれも、観測期間の短い記録を用いたイベントの探索が主な目的であった。Silent earthquakes の検出を目的としていた Beroza and Jordan (1990) [7] も大気擾乱による自由振動の励起について、評価しなかったものの、その可能性については言及している。

最近、大気運動と地球自由振動との関係を示した理論的研究として、小林と Watada によるものがある。小林 [57] は次元解析的考察によって、時間的空間的にランダムな大気擾乱による励起により nGal レベルで地球自由振動が励起される可能性を示唆している。このことは SG 記録から常時シグナルを検出してみようという、直接的なきっかけとなった。地震のように局在化した力ではなく、空間的にも時間的にもランダムな力で励起されれば、モードは加速度で同じレベルに励起されることが期待されるが、これは静かな SG 観測点、IDA の観測スペクトログラムで見られる特徴と調和的である。一方、地震のような時間的空間的に局在化された力による励起では、加速度では高周波のモードの励起が大きい。数値実験から得られたスペクトログラムを見ても高周波側ほど振幅が大きくなる右上がりの傾向がみられる。このグローバルな大気擾乱による励起は、いまのところ有力な候補の1つである。

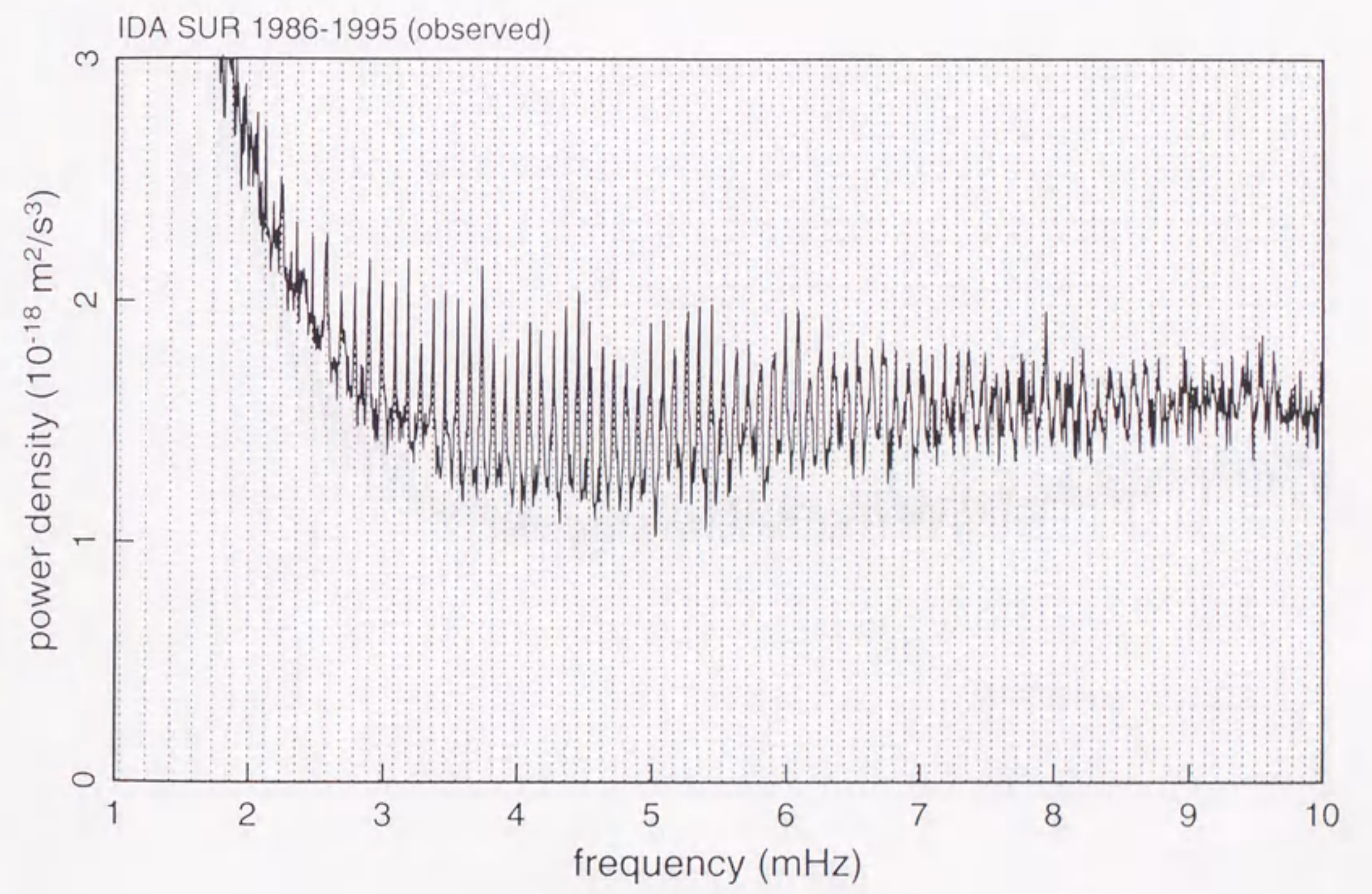


図 3 - 4 - 4 - a : IDA SUR 10 年間の静穏期の平均 PSD (観測)

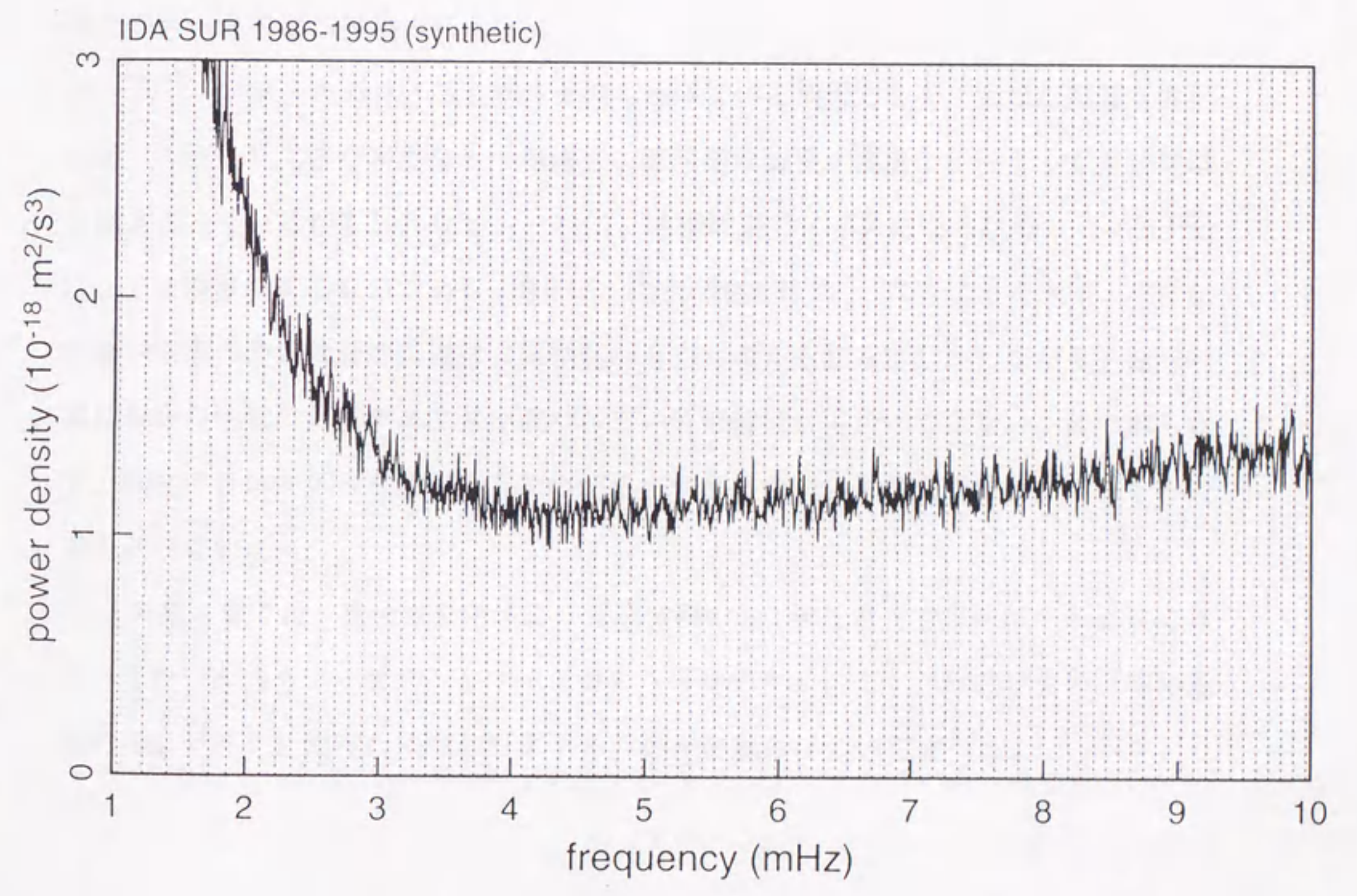


図 3 - 4 - 4 - b : IDA SUR 10 年間の静穏期の平均 PSD (理論)

また、Watada [119] が 3-4 mHz の周波数帯では大気振動と地球自由振動のカップリングが強くなることを示した。これは実際にピナツボ火山の噴火の際に励起された表面波が観測された事実 (Kanamori and Mori, 1992 [49]; Widmer and Zürn, 1992 [121]) に基づいている。昭和基地で 3-4 mHz の周波数帯での振幅の増大が顕著に見られたことは、このようなメカニズムによって説明できるのかもしれない。しかしながら、他の要因によって、その周波数帯域が大きく見えているという可能性は否定できず、環境データの取得によるピークの信頼性の向上と、今後のキャンベラなどの観測点のデータの蓄積が待たれる。

一方、スペクトルのノイズレベルを持ち上げている要因として、海洋の影響も考えたが、大気より大きな密度をもつ海洋も、海洋潮汐荷重、波浪などによって常時地球を揺さぶっているかもしれない。一般に、地震観測でノイズになる脈動 (0.1-0.5 Hz) は、主に波浪によるものである (例えば、山田, 1991 [123])。このような大気・海洋など地球表層の流体部分の変動による励起が有力と考えられる。しかしながら、地球の固体部分の未知のダイナミクスを表わしている可能性も否定はできない。後の第 5 章で、励起のメカニズムを解明するため何をすべきなのか、今後の課題として、その方策を述べたい。

次の第 4 章では、自由振動帯域より低周波側の SG がこれまでターゲットとしてきた、また、今後もターゲットとすべきであろうサブサイスミックバンドでの、昭和基地の SG データを使った未知のシグナルの検出の試みについて述べる。