—研究ノート—
Scientific Note

超高性能地震計 (STS-1V, -1H) の低温下における動作特性

金尾政紀*・神沼克伊*

Performance Test of STS-Seismograph in Low Temperature

Masaki KANAO* and Katsutada KAMINUMA*

Abstract: Seismological observations by a set of three-component Streckeisen seismometers (STS-1V, -1H) have been carried on at Syowa Station (69.0°S, 39.6°E), East Antarctica since April 1989. Some troubles have occurred during the deployment of the STS seismographs. First, there is a relationship between temperature change and the drift of POS (position) and LP (long period) outputs of STS. Second, pulse-like noises (referred to as 'shift-noises' in this paper) have been observed on the vertical component of a rapid change in temperature greater than 3℃/day or immediately after arrival of a large earthquake. In order to investigate the mechanism of occurrence of shift-noises, a simultaneous observation by use of two vertical sensors was conducted during the 33rd Japanese Antarctic Research Expedition (JARE-33). It was revealed that the noises were generated not by poor attachment of the glass plate to the ground but by the behavior of the electric feed-back circuit and/or of the leaf-spring of the vertical sensor under low temperature.

We performed some tests of the STS seismograph in the low temperature laboratory of National Institute of Polar Research to find the relationship between the drift of POS and temperature change. It was found by the experiments that there is a positive correlation between temperature change and drift; about 0.75V/°C for the vertical component and 0.15 V/°C for the horizontal component. Shift noises similar to those at Syowa Station were also observed in the experiment in the low temperature laboratory. For the purpose of obtaining the response of the seismometer to the temperature variation at Syowa, LP digitized records in 1992 were decomposed into the drift component, tidal component, response to temperature variations, and noise series by making use of the BAYTAP-G program. The maximum addmittances to the temperature change are −1.3 V/°C for the vertical component and −0.003 V/°C for the NS component, respectively.

要旨：昭和基地における STS (Streckeisen seismometer) による地震観測は，1989年に開始されて以降4年が経過した．順調に地震波形が記録されているかたわら，ノイズの混入や長周期地震計に特有なドリフト現象など，いくつか観測上の問題点が発生している．本稿では，特殊な気象条件下である昭和基地でのこれらの問題について，1989年から1992年の観測状況を報告する．上下動成分に頻繁に起こるパルス状ノイズの個数は，低温の時期に多発し3°C／日以上の温度の急激な変化

* 国立極地研究所．National Institute of Polar Research, 9-10, Kaga 1-chome, Itabashi-ku, Tokyo 173.

南極資料，Vol. 38, No. 3, 199-231, 1994
Nankyoku Shiryô (Antarctic Record), Vol. 38, No. 3, 199-231, 1994

に対応している．また，1992年においては，上下動センサー2台を比較観測することで，パルス状ノイズの原因の調査を行った．その結果，センサー部の設置不備ではなく，フィードバック回路またはセンサー部の低温での動作不良が原因と考えられた．

これと共にSTSの低温下での動作特性を調べる目的で，国立極地研究所低温室で短期間のテスト観測を実施し，温度変化に対する応答と地震計の性能限界について考察した．超低温室実験（−30°C）におけるPOS（position）の応答量は，数時間の温度変化に対して上下動で0.75 V/°C，水平動で0.15 V/°Cであった．またパルス状ノイズは，地震計が動作不良になる直前で発生することを確認した．さらに，1992年のLP（long period）加速度出力のデータを用いて，上下動と水平動各1台についての地震計ドリフト成分，温度変化に対する応答成分，潮汐成分，および地震や人為的作業によるノイズ成分の分離を行い，温度変化に対する出力電圧の応答係数の定量的な解釈を試みた．その結果上下動保温箱の温度変化に対するLPの応答係数は，上下動，水平動ともタイムラグ1時間で最大値をとり，それぞれ1.3 V/°C, 0.003 V/°Cと求められた．

1. はじめに

グローバルな地球内部構造や震源過程の研究のデータを取得するため，近年広帯域・高感度・広ダイナミックレンジを持つフィードバック型地震計（Streckeisen seismometer; STS-1V, -1H, 以下STSと略記する）による観測が推進されている（黒磯，1990; 渋谷ら，1990; 山田ら，1989; 島崎ら，1992)．この超高性能地震計はフィードバック回路によるみかけの固有周期20秒を持ち，感度2400 Vs/mの速度出力（BRB; broad bamd, 以下BRBとする）が主として解析に使用されている．BRBには，0.1-20秒および0.1-360秒においてフラットな振幅特性を持つ二つのモードが選択できる（Streckeisen and and Messgeraete, 1987)．また，広いダイナミックレンジ（140 dB）を持つことから，24 bit相当の性能の良いAD変換器（Quanterra, 1988）を用いることで，良質なデジタルデータが取得される．

このSTSが有する広いダイナミックレンジの特性を生かすためには，ほかの地震計より以上に雑音となる信号（ノイズ）の低い場所での観測が望まれる．しかし，これまでの地震計よりも長周期帯において高感度な地震計であるため，気温・気圧・湿度などの気象条件の影響をより敏感に受ける．国内の気温変化の少ない良好な地震観測点に設置した場合においてさえ，特に水平動成分に気圧変化による長周期ノイズが発生することがこれまでにも報告されている（松浦ら，1990; 三上ら，1989; 渋谷ら，1990; 山田ら，1989)．

STS以外の長周期地震計については，すでにいくつかの研究が行われている．Umeda (1977) がプレス・ユーイング型地震計の長周期ノイズを解明するためにいくつかの実験を試みている．その結果次のようなことが確かめられた．上下動成分は風速，気圧の影響が大きいが，気温変化の影響は少ない．ただし，地震計のケースを小型にしてその内側に温度勾配をつければ，ノイズ発生率が増加する．また，水平動成分は主に風速の影響を受ける．地表の風の強さが水平動成分の長周期ノイズと一般的に関係することが，Peterson

and ORSINI (1976) により指摘されている．さらに，STS (-1V, -1H) を小型軽量にして3成分を一体型にしたSTS-2 (STRECKEISEN and MESSGERAETE, 1990) の場合には，周期120秒程度の長周期ノイズが卓越して発生し，そのノイズレベルがSTS-1の100倍にも達することが報告されている (石原ら，1991; 佐々木ら，1991)．気圧変動の影響を軽減する対策を施した結果，その周期でのノイズレベルは約10分の1に減少した (佐々木ら，1992)．

STS (-1V, -1H) において，温度変化によるドリフトとノイズ発生メカニズム解明のための観測報告は，これまであまりなされていない．しかも，現在稼働中の観測点の中で，昭和基地のように年間の気温の大部分が氷点下で観測している例は極めて少なく，南極大陸上の他国の観測点においても気温変化に伴うSTSの挙動の研究はこれまでになされていない．昭和基地では，1989年4月に第30次日本南極地域観測隊 (JARE-30) によりSTS 3成分が設置されて以来，広帯域・高感度地震観測が継続されており (村上・神沼，1991)，日本を中心に推進されているグローバル地震観測網 (POSEIDON計画) の一観測点としての役割も担っている．

そこで本論文では，昭和基地において観測される気温変化に伴うSTSのドリフト現象と，急激な温度変化に伴い発生するパルス状ノイズの観測例とその原因の調査結果を報告する．また国立極地研究所低温室で行った低温下での動作テストによる結果を合わせて報告することで，STSの温度特性に関しての詳細な議論を加える．さらに，JARE-33 (1992年2月-1993年1月) で得られた10カ月間の加速度出力 (LP; long period, 以下LPとする) のデジタルデータを用いて，地震計のドリフト成分，温度変化に対する応答，潮汐成分，地震や人為的作業に伴うノイズ成分とを分離する試みを行い，温度変化に対する応答係数の定量的な解釈を試みた．

2. 昭和基地におけるSTS観測の現状と問題点

2.1. 観測の現状

STSは，短周期地震計 (HES, 固有周期1秒) 3成分，および長周期地震計 (PELS, 固有周期12秒) 3成分とともに昭和基地の地震計室に設置されている．図1には昭和基地における地震観測関係の諸施設の配置を示す．現在の地震計室は，傾斜地を削り取った岩盤 (花崗岩質片麻岩) 上に建てられ，その後埋め戻した半地下構造をもつため，海氷起源の脈動やブリザードなどの強風による地動ノイズも少なく地震観測に良好な環境である．しかし，現在では老朽化に伴う内部アスベストの剥落，夏期間の地震計室内への浸水・凍結や冬期間の積雪による入り口の埋没など，保守上の種々の問題が生じている (金尾・神沼，1993)．

STSを含む3種類の地震計は，基盤岩に固定されたコンクリート基台に設置されてい

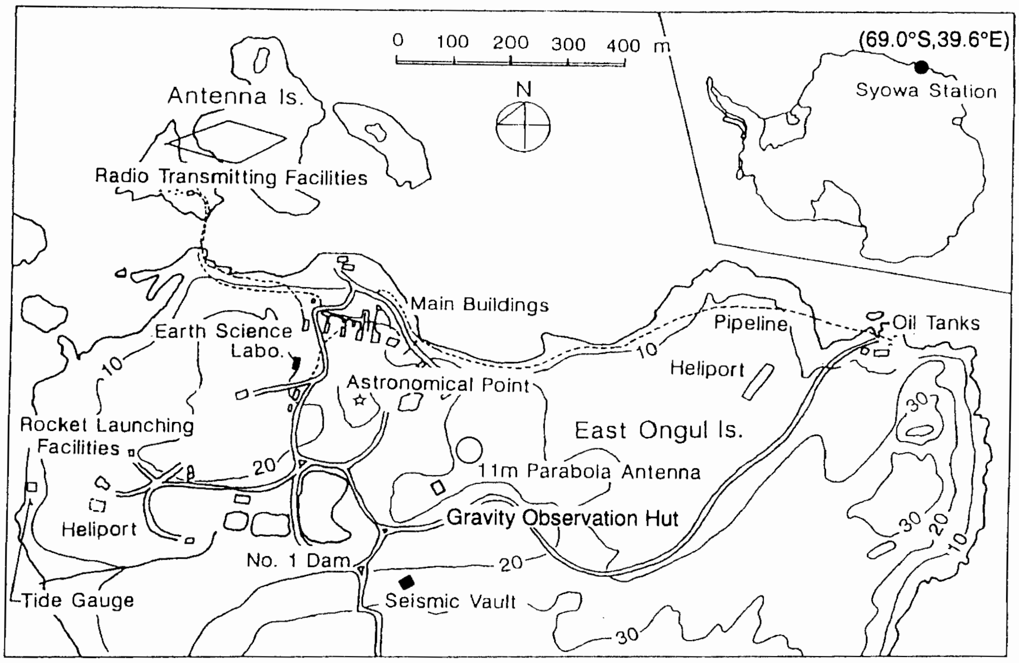
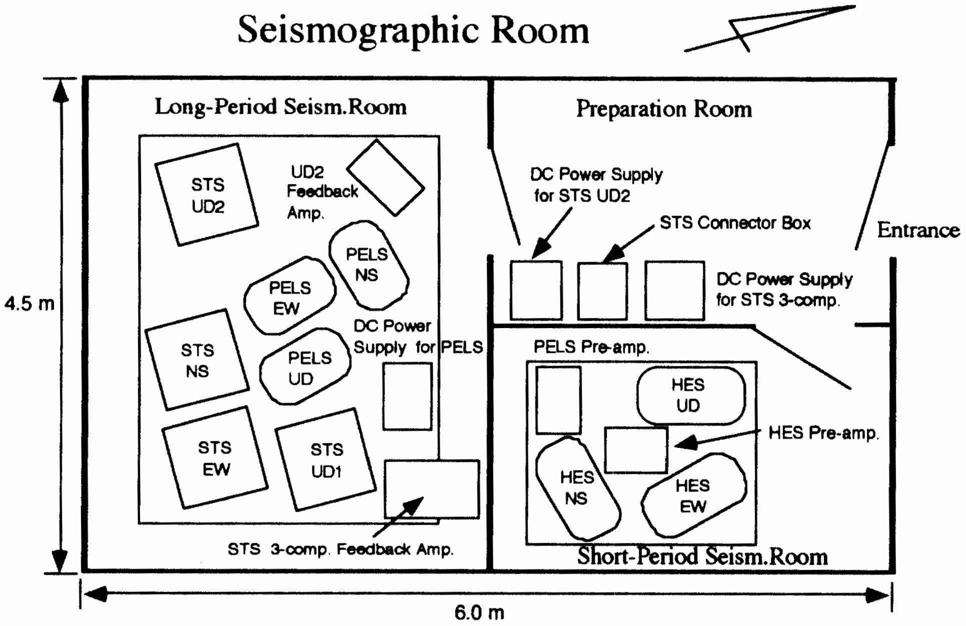


図 1 昭和基地の地震観測諸施設

Fig. 1. Map showing the locations of construction projects concerning seismological observation at Syowa Station.

る．図 2（上）には，地震計室における各地震計のセンサー部とアンプ類の配置を示す．この図では上下動成分 2 台を含む STS 3 成分 4 台が記載されいるが，JARE-33 の観測期間中に限り，上下動センサーの比較観測を行っていたためである（第 2.4 章に詳述）．表 1 には JARE-30～-33 において昭和基地で使用していた 4 台の STS について，その感度と本論で使用した記号を明記した．上下動成分については，JARE-30 に設置したものを UD 1（または単に UD），JARE-33 で新たに比較観測用に設置したものを UD2 として区別して扱う．STS のセンサー部は各フィードバックアンプ部や PELS 3 成分と共に，南側の長周期地震計室内の基台に設置されている．前室には，STS 3成分の電源と中継ボックスが置かれている．UD2 は，他の 3 成分と同様に長周期地震計室内に設置されている．

図 2（下）には，センサー部の固定・保温状況を示した．STS は通常，センサーケースの外側に電磁場の影響を除くためのシールドが施されており，さらにその外側にガラス製のベルシャーをかぶせて観測する．空気抵抗や対流などの大気圧の影響を除くため，ベルシャー内の真空度を上げて観測するように設計されている（STRECKEISEN and MESSGERAETE, 1987）．昭和基地における観測は，ベルシャー内の真空度を外気圧比 10% 程度で行っている．ベルシャーの外側は，温度変化を低減するために発泡材による二重の保温箱で覆っており，その保温箱内部を電気ヒーターで保温している．フィードバック回路についても，センサー部と同じ断熱材の保温箱で覆い電気ヒーターにより保温している．温度の年変化は，数°C のオフセットを除いてセンサー部の変動と同じ傾向を示す．センサー部の



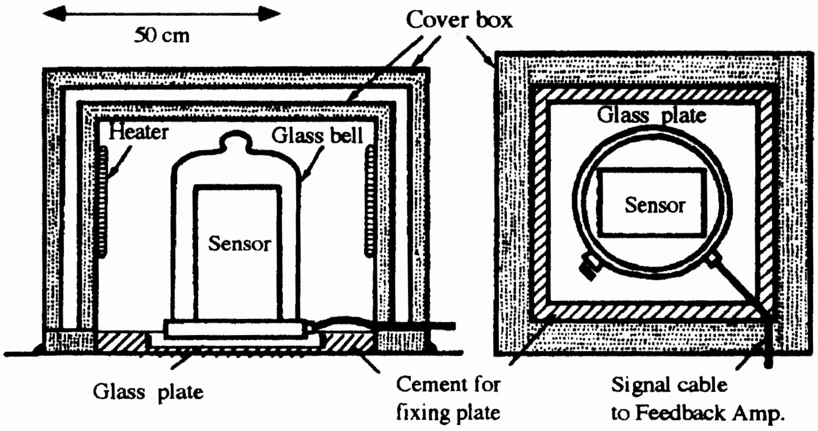


図2 地震計室内センサー配置図（上）とセンサー部の固定・保温状況（下）

Fig. 2. Upper figure: Locations of seismometers (HES, PELS, STS) in the seismographic room. Lower figure: A schematic illustration of the installation and the temperature conditions for the STS seismometers.

表1 昭和基地で使用した STS-1V, -1H の規格

Table 1. Serial number, sensitivity and notation used in this paper for the STS-1V/VBB and -1H/VBB seismometers at Syowa Station.

Type	Serial number	Sensitivity BRB (Vs/m)	Sensitivity LP (V/Gal)	Notaion
Vertical	28709	2 × 1081	2 × 36.4	UD1 (or UD)
Vertical	28737	2 × 1194	2 × 40.5	UD2
Horizontal	18739	2 × 1232	2 × 41.5	EW
Horizontal	18740	2 × 1225	2 × 41.2	NS

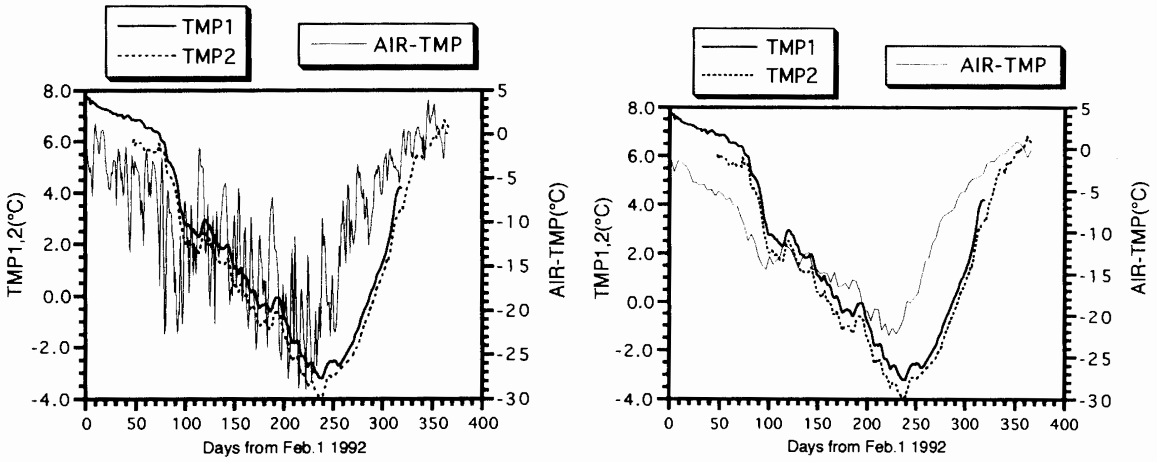


図 3 昭和基地の外気温（左；1サンプル／日，右；5日間の移動平均）と上下動センサー保温箱内温度の年変化（JARE-33）

Fig. 3. Relationship between air temperature (AIR-TMP, thick line) and the temperatures in two sets of boxes covering the STS-1V seismometers from February 1, 1992 to January 31, 1993. TMP1 (bold line) is for UD1 and TMP2 (broken bold line) is for UD2, respectively. Air temperature is after Japan Meteorological Agency (JMA) (left; daily mean, right; averaged over 5 days).

保温箱内部温度はアナログ出力を持つ温度センサーにより常時モニターしているが，アンプ部の保温箱内部温度の測定については水銀温度計を使用しているため，地震計室入室時に野帳に記録した程度である．センサー部は基台上に専用のガラス製プレートを置き，その上に設置してある．ガラスプレートの基台への接着方法は，既設の3台はシリコン充てん材と油粘土により，またUD2はモルタルにより固定したが，その設置状況の違いによる比較については第2.4章で述べる．

昭和基地におけるSTS観測においては，上記のように保温対策を施しているにもかかわらず，年間の外部の温度変化（気温・地温・室温）のため観測に大きな影響が現れている．STSの長周期ドリフトに影響を与える気象条件としては，昭和基地では気圧変化よりもむしろ気温（とそれに伴う地温，地震計室内温度，保温箱内部温度）の変化である．図3（左）は，JARE-33において昭和基地の気温の年変化（AIR−TMP；1日1サンプル）と，2台の上下動成分の保温箱内温度（TMP1；UD1，TMP2；UD2）との関係を示している．図3（右）には，気温の日平均値として5日分の移動平均をとった値を示した．この平均化の操作は，地震計室内のセンサー保温箱内温度が，外気温の短周期変動（日変化を含む）には影響されず数日分のローパスフィルターを受けていると考えられるからである．図3から，年間の気温の変動量20°Cに対し上下動保温箱内部温度の変動が約10°Cもあること，保温箱内の温度の変動が外気温のそれに比べて20日余り遅れる傾向にあることが分かる．

地震計室からの信号は，約600 mのアナログケーブルを経て収録システムの設置され

ている地学棟まで送られている．上下動成分は主に20-sモード，水平動成分は360-sモードにより観測を行っている（長坂ら，1991）．収録システムについては，金尾・神沼（1993）に詳述しているので省略する．

2.2. 地震計の長周期ドリフトと温度変化

STSには，BRBのほかにLPとブームポジション出力（POS; position）とを持つ（Streckeisen and Messgeraete, 1987）．この3出力のうちLPとPOSには，温度変化が原因の一つと考えられるドリフト現象が起こる．このPOSとLPの温度変化に伴う推移はJARE-30で設置されて以降毎年観測されており，地学棟内では遅い送り（2 cm/hour）のチャート式レコーダーでPOSの変動を常時モニターしている．本章では，POSについて報告する．

JARE-31～-33における観測結果を図4a-cに示す．JARE-31（1990年5月-1991年1月，図4a（長坂ら，1991）から分かることは，POSのUD成分とNS成分の出力が地震計室内部温度と共に低下し，その低下量は室温が7°C程度変化した場合にUDで約4 V，NSで約1.3 Vである．UDが温度変化に敏感に反応していることが分かる．EWには他の2成分に比べて気温の影響があまり現れていない．

JARE-32（1991年2月-1992年1月，図4b（山本，1992））によると，UDと水平動2

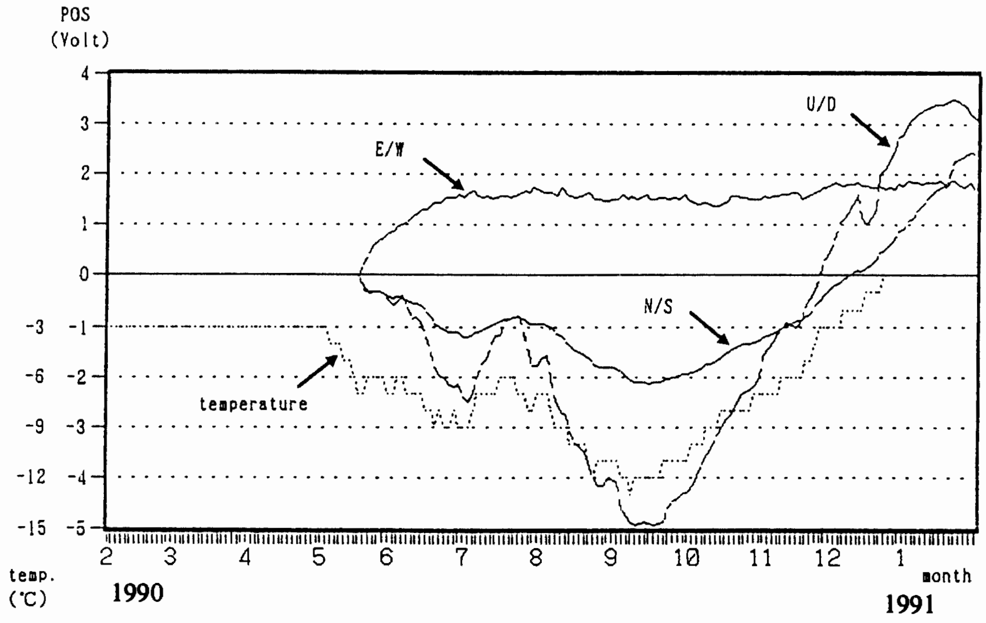


図4a POSのドリフト量と地震計室内温度との関係（JARE-31）

Fig. 4a. Relation between cumulative POS outputs and daily mean of temperature in the seismograhic room from May 1990 to January 1991 at Syowa Station (after Nagasaka et al., 1991).

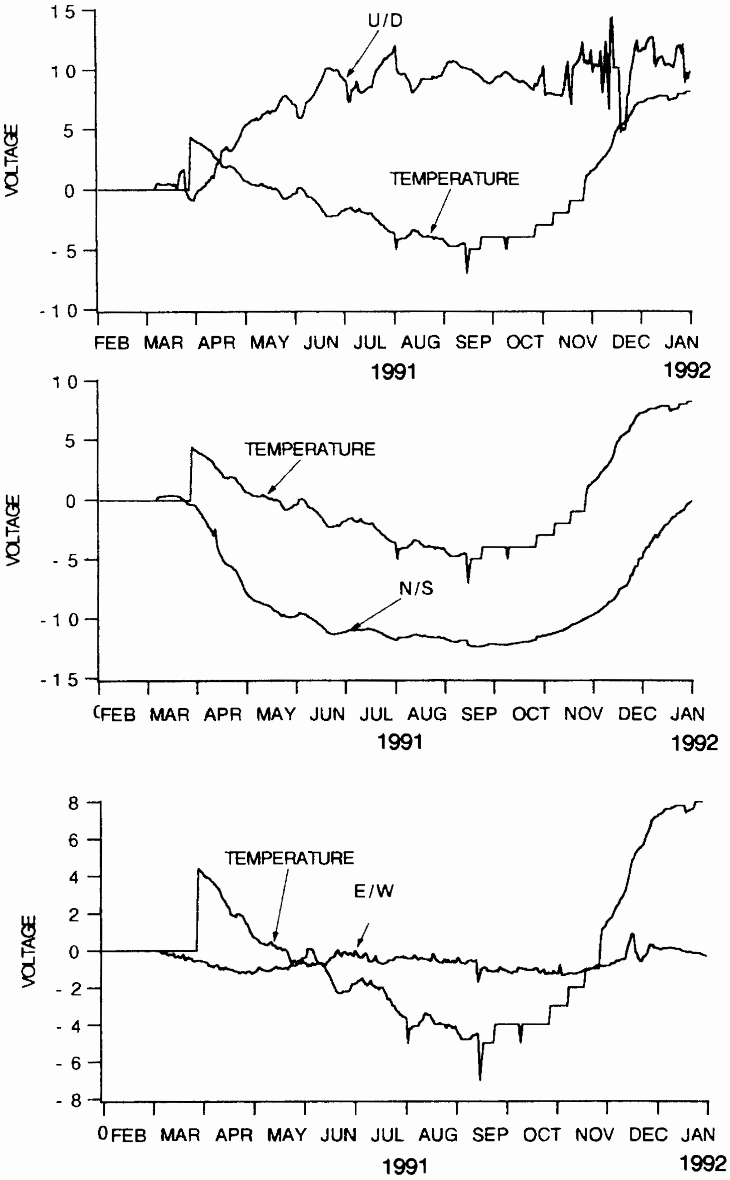


図 4b POS のドリフト量と上下動センサー保温箱内温度との関係 (JARE-32)

Fig. 4b. Relation between cumulative POS outputs and temperature in the covering box of the STS-1V seismometer (UD1) from February 1991 to January 1992 (after YAMAMOTO, 1992).

台の POS 変動量自体は JARE-31 の結果と調和的である．ただし，図 4b において上下動成分は変動方向（センス）が逆であることに注意されたい．これは，他の年次の結果と照らし合わせると JARE-32 の結果のみが方向が反転して記録されているためと考えられる．センサー部自体に問題があったわけではない．また，JARE-32 から UD の保温箱内部温度の測定を開始したので，室温の代わりに表示してある．8 月以降は，温度計の不良でアナログ出力電圧の AD 分解能が低下したため，temperature 表示にビットが現れていることがわかる．

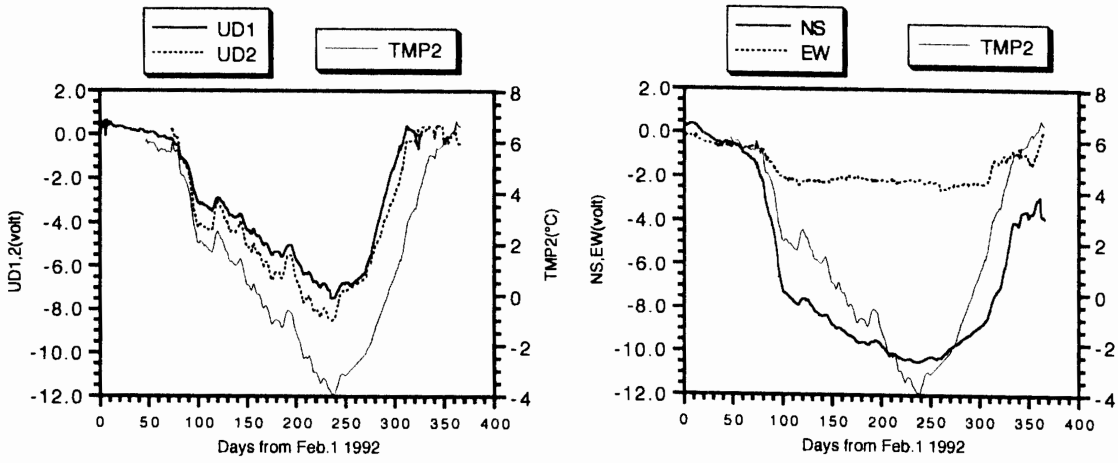


図 4c POS のドリフト量と上下動センサー保温箱内温度との関係 (JARE-33)

Fig. 4c. Relation between cumulative POS outputs and temperature in the covering box of the UD2 seismometer (TMP2: thick line) from February 1992 to January 1993 at Syowa Station; (left) STS-1V seismometers (UD1: bold line and UD2: broken bold line), and (right) STS-1H seismometers (NS: bold line and EW: broken line) (after KANAO and KAMINUMA, 1993).

JARE-33 においても，3 成分の POS のドリフトする方向およびその変動量は前次隊までの結果と同様の傾向を示している．図 4c (左) には，上下動成分 2 台の POS の変動 (UD1, UD2) と UD2 の保温箱内部の温度 (TMP2) との関係を示した．JARE-33 では，2 台の上下動の保温箱内部の温度変化を同時に収録した．図 3 より分かるように，数日以上の長周期の POS 変動の議論においてはほとんど関係ないので，簡略化のため TMP2 のみ表示している．POS の変動量は，JARE-31, -32 の結果と調和的で，温度変化との相関は明瞭である，UD1 と UD2 の変動量の極端な差は認められなかった．図 4c (右) には，水平動 2 台 (NS, EW) の POS と TMP2 との関係を示した．水平動センサー保温箱内の温度は直接には測定していないため，図 4c (左) と同様に TMP2 を比較対象としている．

2 台の上下動共に保温箱内部の温度変化に対する応答係数はおよそ 0.7-0.8V/°C, NS と EW の応答係数は各々 1.0 V/°C, 0.2 V/°C 程度であることが図 4c よりわかる．JARE-32 の応答量の結果とは調和的であるが，JARE-31 の結果 (UD1 において 0.6 V/°C 程度; 長坂ら，1991 (図 4a を参照)) と比較すると大きく見積もられている．応答を求めた対象となる温度が JARE-31 では地震計室内部の温度であり，JARE-32, -33 では保温箱内温度であるための違いが原因である．JARE-32, -33 においても地震計室内部の温度との応答量を求めて JARE-31 の結果と比較すれば，同程度の応答量が得られると推定している．しかし，保温箱内部温度をデジタルで連続収録し，室温は連続測定していなかったため比較・検討はしなかった．水平動についても，JARE-33 の結果は JARE-31 の結果 (NS: 0.1-0.2 V/°C, EW: 相関が不明瞭なため求めていない) と NS について差が大きい．UD の

場合と同様に対象となる温度の差が原因と考えられる．ドリフトの温度変化についての定量的な検討は第4章で詳述する．

以後の観測では，JARE-34（1993年2月-1994年1月），JARE-35（1994年2月以降）においても同様にPOSの長周期ドリフトの傾向が報告されている．また上記の現象は，フランスのデュモン・デュルビル（Dumont d'Urville）基地のSTSにおいても確認されている．

以上のことから，年間のPOSの推移は温度変化に密接に関係していることが確認され

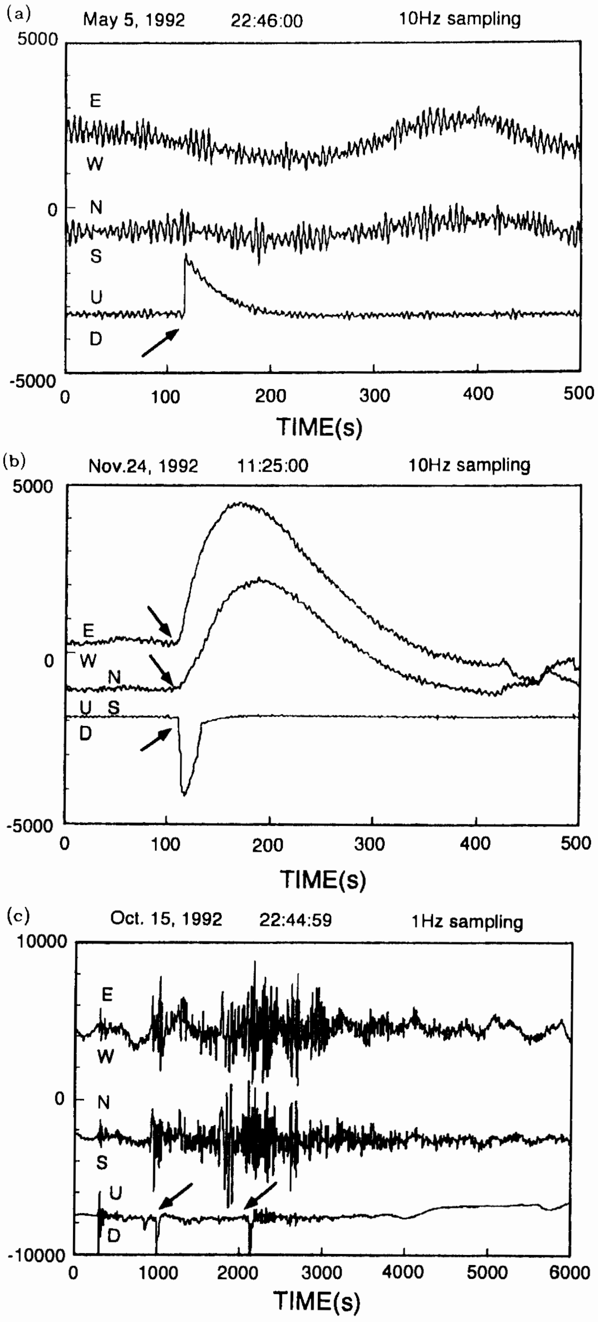


図5　シフトノイズ例．(a)上下動センサーのみ，(b)3成分共に発生，(c)地震と重なった場合

Fig. 5. An example of the shift noise that occurred at the UD1 seismometer (a), simultaneously in three-components (b) and simultaneously at the arrival time of a teleseismic event (c), 20s-mode for vertical component and 360s-mode for horizontal components, respectively. The noise is frequently observed in vertical component.

た．温度変化以外の原因として気圧の変化が，POS のドリフトに影響を与えることが考えられる．水平動成分においては，第 1 章で報告したように気圧変化が重要である（山田ら，1989；渋谷ら，1990）．しかし，ラコストに代表される重力計と異なり昭和基地の STS の場合，長周期のドリフトには気温の影響のほうがはるかに大きいと考えられる．

2.3. パルス状ノイズの混入

第 2.2 章で述べたドリフト現象のほかに，昭和基地の STS 上下動成分には特徴的なパルス状ノイズの混入が観測されている．本論では，このパルスの混入を‘シフトノイズ’と呼ぶことにする． JARE-33 で観測された BRB デジタル記録の典型的なシフトノイズを図 5 に示す． UD（UD1)のみに発生した例（図 5a），3 成分同時に発生した例（図 5b），および地震と重なって発生した場合（図 5c）である．3 成分共に発生する場合は極めてまれであり，過去の隊次では報告されていない．同時に起こる原因として考えられることは，UD1 のノイズ発生時の急激な電圧変化がアースラインのつながっている他の 2 成分に影響を与えていることである．また，地震計室への入室時や地震・氷震などの着震時に同時

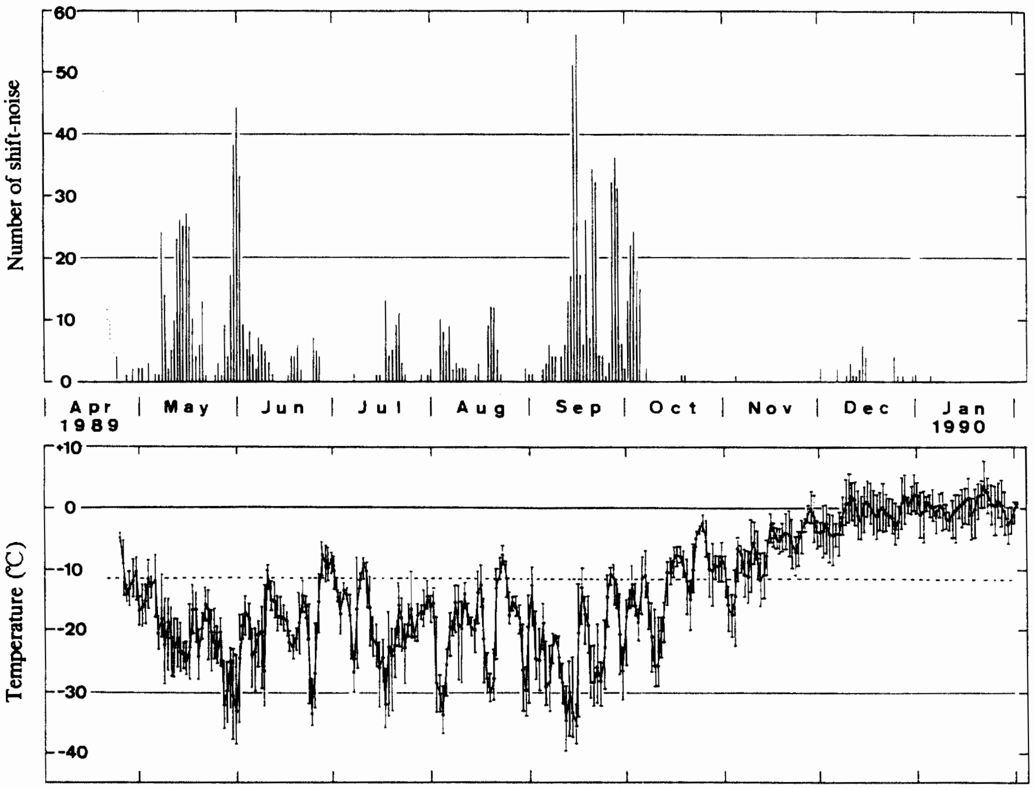


図 6a　シフトノイズの発生回数と外気温との関係 (JARE-30)

Fig. 6a.　*Relation between the daily number of shift noises (upper figure) and daily mean air-temperature (lower figure) from April 1989 to January 1990 (after* M*URAKAMI and* K*AMINUMA, 1990). Air temperature is after JMA.*

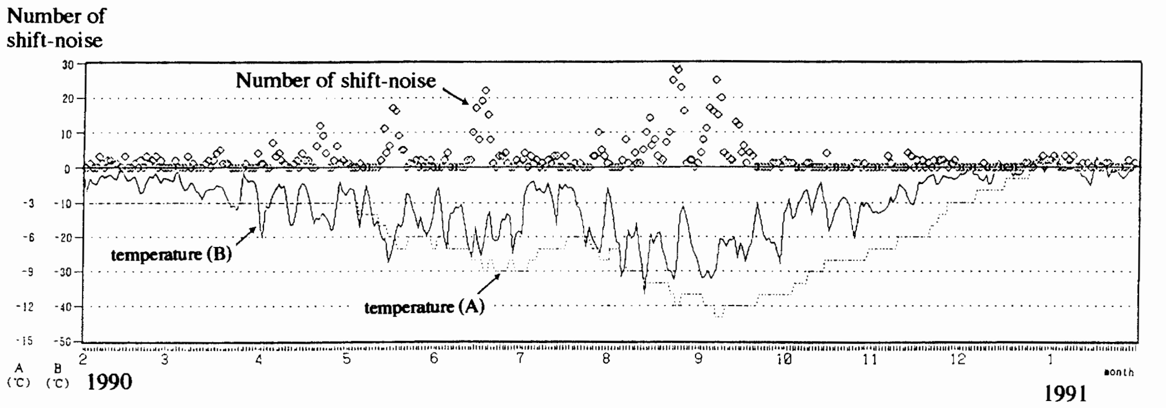


図 6b シフトノイズの発生回数と地震計室内温度，および外気温との関係 (JARE-31)

Fig. 6b. Relation between the daily number of shift-noises and temperature change from February 1990 to January 1991 at Syowa Station (after N*AGASAKA et al., 1992). (A) temperature in seismographic room, (B) daily mean air-temperature.*

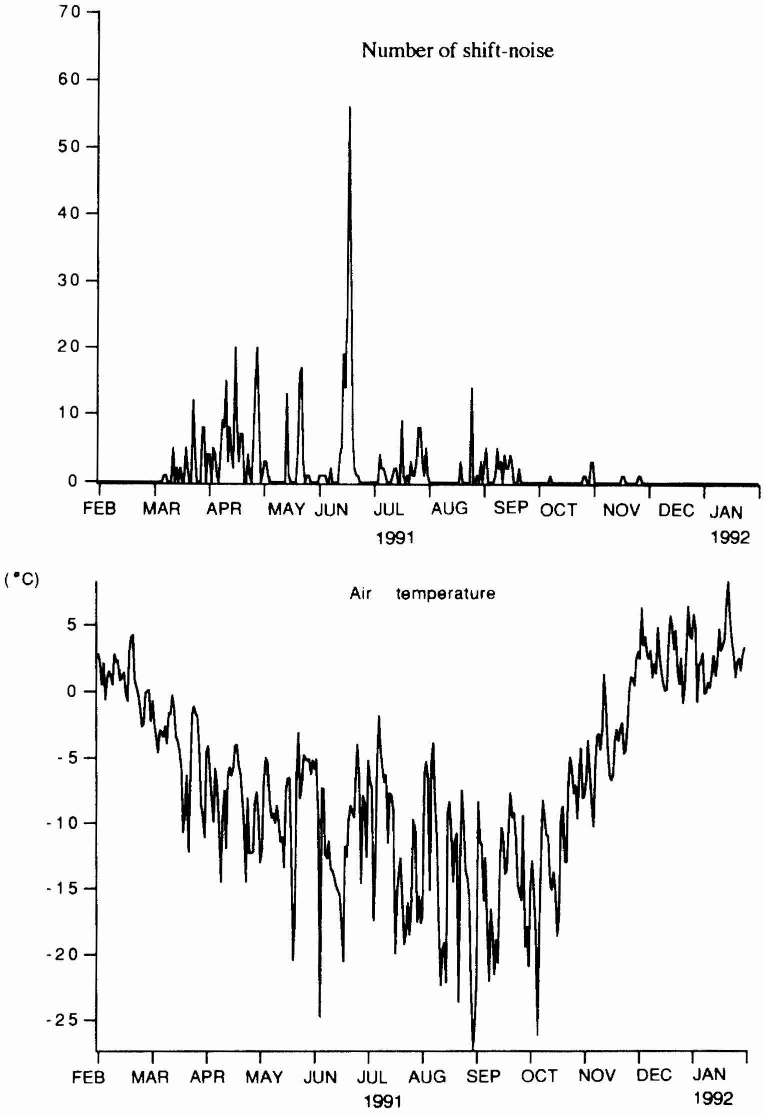


図 6c シフトノイズの発生回数と外気温との関係 (JARE-32)

Fig. 6c. Relation between the daily number of shift-noises (upper figure) and daily mean air temperature (lower figure) from February 1991 to January 1992 (after Y*AMAMOTO, 1992).*

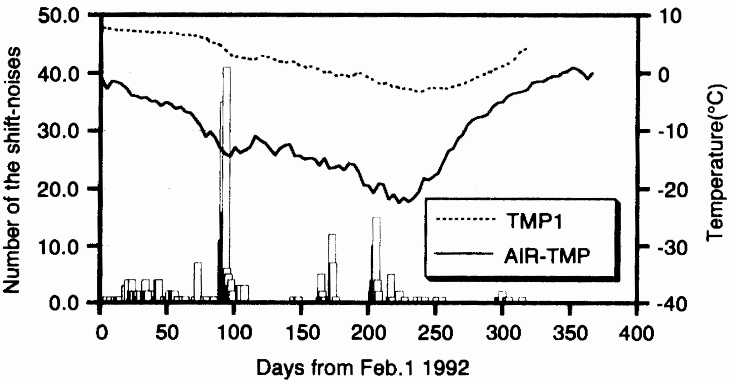


図 6d　シフトノイズの発生回数と外気温，および上下動センサー保温箱内温度との関係 (JARE-33)

Fig. 6d. Relation between the daily number of shift-noises (bar) and daily mean air temperature (AIR-TMP, bold line), the temperature in the box covering the UD1 seismometer (TMP1, broken bold line) from February 1992 to January 1993 (after KANAO and KAMINUMA, 1992).

に発生しやすいことが確認されている．

シフトノイズの起こる方向（センス）は，POSが温度変化に伴いドリフトする方向（センス）とは逆である．すなはち，POSが低下する際にはシフトノイズはその立ち上がりが上向きに起こる．反対にPOSが上昇する際には，立ち上がりが下向きに起こる．また，BRBの観測モードの違いにより，シフトノイズの固有周期がそれぞれ20秒（20-sモードの場合），36秒（360-sモードの場合）と異なる．フィードバック回路が関与していると考えられる．図5の波形はすべて，UD（UD1）のみ20-sモード，水平動2台は360-sモードで記録されている．これに類似したノイズ現象が，京大防災研究所地震予知研究センター附属鳥取観測所のSTS水平動成分においても確認されている（渋谷ら，1990）．また，STS-2型においても，振幅や頻度は器械によって異なるが同様なノイズの発生が報告されている（佐々木ら，1992）．

図6a－cには，JARE-30（1989年4月－1990年1月，村上・神沼(1990)），JARE-31（1990年2月-1991年1月，長坂ら(1991)），およびJARE-32（1991年2月-1992年1月，山本(1992)）により観測されたシフトノイズの発生回数と気温（または室温）との相関の年間の推移を示す．シフトノイズの個数は1日の発生回数を記録している．これらの観測結果から分かることは，この現象が気温変化約3°C／日を目安として，その発生頻度が高くなる．特に，－20°C以下の低温の時期や，急激な温度変化があった場合に起こり易い．JARE-30～-32の発生回数の結果は類似した傾向を示しており，厳冬期（7月-8月）へ向かう時期と，厳冬期から僅かに気温が上昇する時期に発生回数のピークが見られる．

JARE-33でのシフトノイズ発生回数については，前次隊までの報告と同様に特に粘土固定したUD1に多く現れた．また，上述した3成分共に発生する以外にも，2成分（UD1とNS，またはEW）に発生する場合があることも確認された．一方，年間を通し

て UD2 にはシフトノイズは全く確認されなかった．図 6d には，JARE-33 における外気温（AIR—TMP）と UD1 の保温箱内温度（TMP1），UD1 のシフトノイズ発生回数（棒表示）とを示した．ノイズ発生回数は，JARE-30～-32 の結果と同様に気温の急激な変化が起きた時期に対応している．ただし，ノイズ発生回数の総計は年次とともに漸次減少している．JARE-33 では 5 月上旬に多数発生した後，厳冬期以降には発生数の増加は見られたものの最大数には至らなかった．地震計のレベルの調整状態や保温状態，システム全体のアースラインの取り方などの工夫が年々重ねられてきた結果，徐々にではあるがノイズの個数が減少していると考えられる．

こうした UD1 に顕著に現れるシフトノイズの発生原因として，JARE-32 までは以下の種々のことがらが考えられた．1）急激な温度変化に伴う STS センサー部のバネ（リーフスプリング）の形状変化，2）アンプのフィードバック機構が急激な温度変化に追随できない，例えばコンデンサーの低温による動作不良などである．シフトノイズの現れる方向が，温度変化と共に POS がドリフトする方向と逆であることも，フィードバック機構がブーム位置のずれを補正しようと機能していることを示唆している．別の原因としては，地震計の設置状況が不十分でガラスプレートが基台に確実に固定されておらず，温度変化に伴う地震計室全体の歪がシフトノイズ発生に影響していることも考えられる．実際に，気圧の変化が地面の傾動にも影響を及ぼしていることが観測・報告されており（山田，1991），地震や氷震の到着時にシフトノイズの発生が多いのも，設置状況が不備であるという理由を示唆している．

2.4. 上下動 2 台の比較観測によるノイズ発生原因の追求

第 2.3 章で考察したシフトノイズの発生の原因が，センサー部の設置状況に問題があるのか，それとも STS のスプリング機構に必ず付随して表れる現象であるのか，あるいはその他の原因であるかを解明するため，JARE-33 では新たに上下動 1 台（UD2）を持ち込み，既設の UD1 との比較観測を実施した．

1992 年 3 月上旬，長周期地震計室のコンクリート基台に UD2 を設置して 20-s モードで観測を開始した．図 2 に示したように，基台の南東の隅に UD1 と直行する方位となるよう UD2 を据え付けた．また，アナログ出力をもつ温度センサーを UD2 の保温箱内に取り付け常時モニターした．ガラスベルシャー内は，既設 3 成分と同様に大気圧比 10%以下の真空状態で観測を行った．

既設 3 成分のガラスプレートは，その周囲に油粘土を盛りコンクリート基台に固定されている（長坂ら，1991）．これらとの対比のため UD2 のガラスプレートはモルタルによる固定を試みた．粘土を使用した場合，真空引きの際にプレートがたわむことも予想される．イタリアのテラノバ・ベイ（Terra Nova Bay）基地でもモルタルによる固定方法が取

られている（MELONI *et al*., 1991）．デュモン・デュルビル基地の場合は，プレートの下に砂を敷いているが，ここでは夏期間でさえ気温がプラスにならず砂中の水分の凍結によりプレートがずれる懸念がないためである．固定方法の手順は，気象庁地震観測所の STS の設置方法（黒磯，1990）に従った．

保温については，既設 3 成分と同様に断熱材（アルミコーティングをした発砲スチロール製）で二重の保温箱を作成し，内部をサーモスタット付きラバーヒーターにより保温した．フィードバックアンプ部も同じ断熱材の保温箱とラバーヒーターにより保温した．年間を通じて長周期室温度の変化が−13°C～＋1°C であるのに対し，センサー部保温箱内が−4°C～＋7°C，フィードバックアンプ部が＋15°C～＋18°C であった．

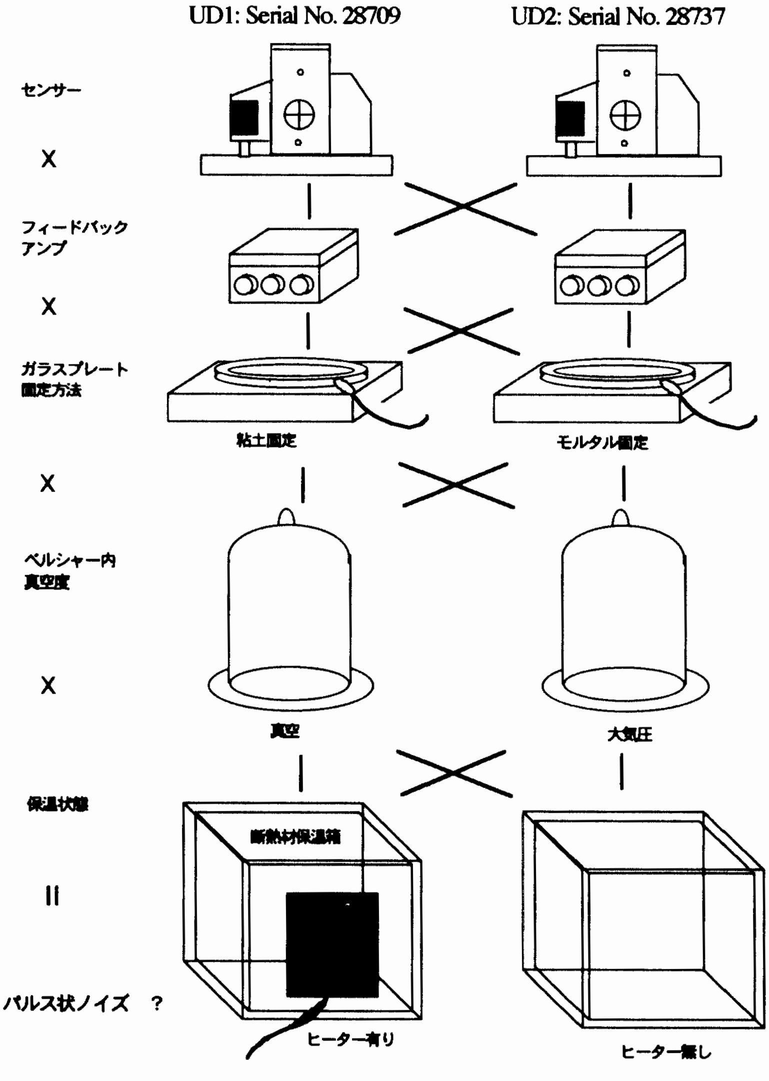


図 7　上下動センサー 2 台の比較観測によるシフトノイズの原因追求

Fig. 7.　*A schematic illustration of the research procedure for studying the nature of characteristic shift-noises by the comparison of two vertical sensors under different installation conditions.*

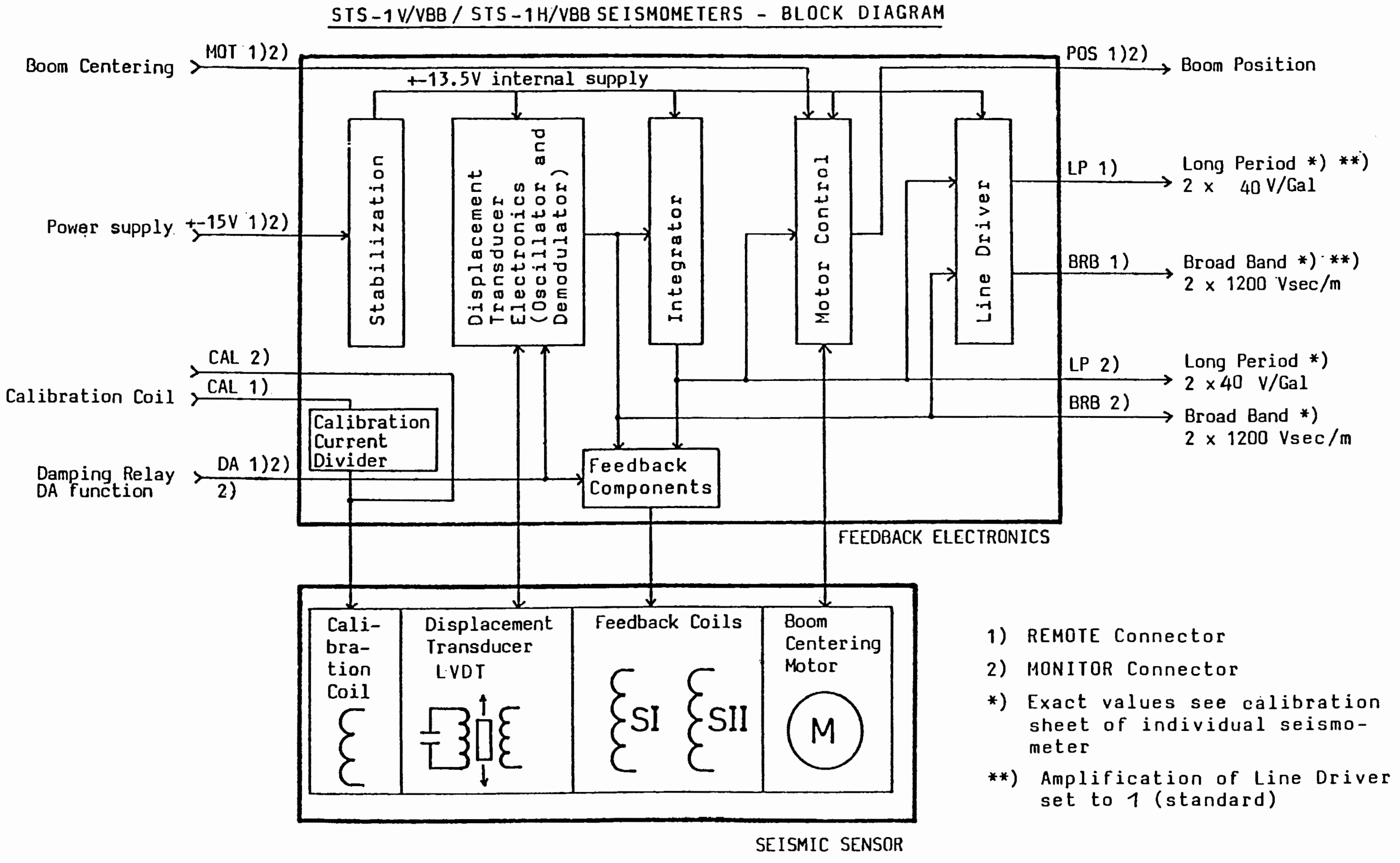


図8 センサー部とエレクトロニクス部のブロックダイアグラム

Fig. 8. Block diagram of seismic sensor and feedback electronics of STS-1V/VBB, and/or STS-1H/VBB seismometer (after STRECKEISEN *and* MESSGERAETE, *1987).*

上下動2台は20-sモード，水平動2台は360-sモード，そして上記の設置と真空状態のまま3月から10月上旬まで連続観測を行った．粘土とモルタルによる固定方法の差異は，シフトノイズが発生するか否かを除いて収録上の顕著な違いとして現れなかったが，地震計室内での作業時に粘土固定したセンサーにのみノイズが発生するなどで識別できた．また，地震や氷震の到着時にはUD1にのみ，まれにではあるがノイズの発生が確認された．しかし，すべての地震に対して発生しているわけではないので，系統だった理由付けは困難であった．

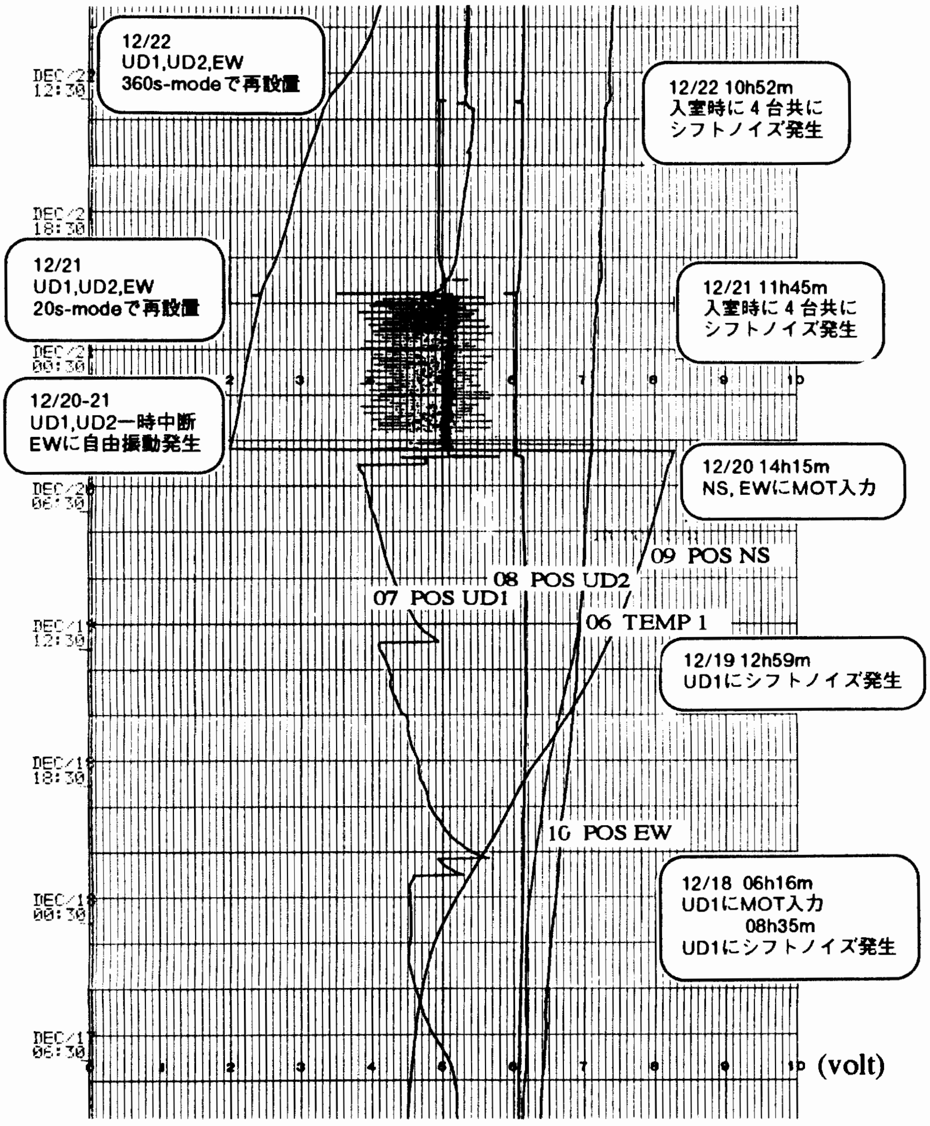


図9 シフトノイズと発振現象を記録したPOSモニター記録

Fig. 9. Analog monitor of POS outputs and temperature in the box covering the UD1 seismometer by dot-type recorder from December 15 to 23, 1992. Some shift-noises appeared, particularly in the UD1 sensor. A free oscillation of period about 360 s was revealed in the EW component on December 21.

1992年10月中旬以降，上下動2台のセンサー部とアンプ部，さらにガラスプレートの組み合わせを色々と交換することにより，UD1のシフトノイズ発生原因が何処にあるのかを調べた（図7）．その結果以下のことが判別した．モルタル固定した場合にも粘土固定の場合と同様に，UD1に顕著にシフトノイズが発生したがUD2には全く発生しなかったため，通常の観測状態ではガラスプレートの設置方法による差異は見られず，固定方法に問題はない．従ってSTS本体（センサー部とアンプ部）に問題があると結論できる．JARE-31以降の観測状況の報告と地震計メーカーからの助言によると，フィードバックアンプ部のリレー等（damping relay）の低温下における劣化による接触不良か，またはセンサー部のブーム・センタリングモーター（boom centering moter）の駆動部分の劣化に原因があるのではないかと推定される．図8には，そのセンサー・アンプ部内での位置を示した（STRECKEISEN and MESSGERAETE, 1987）．

JARE-32での観測終了時には，UD1は20-sモード，水平動2台は360-sモード，そして両者ともガラスベルシャー内は真空状態で観測を行っていた．UD1のみ20-sモードである理由は，360-sモードの場合にかぎり周期300秒程度の自由振動を呈する発振現象が現れるためである．この発振現象はJARE-31，-32においても確認されている．この現象についても，シフトノイズと同様にアンプ内部のリレーの劣化による接触不良が原因と考えられる．特にベルシャー内部を真空に引いた状態では，リレーの接点がふらつき発振現象が顕著に現れることが今回の比較観測で確認された．12月中旬には，上下動2台共に360-sモードに再度切り替えてテスト観測をしてみたが，UD1にのみ自由振動現象が起こることを確認した．しかし，このときUD2には現れなかった．図9はPOSのアナログ紙記録を示したが，この時期にはEWに発振現象が起こり，UD1にはシフトノイズが記録されている．

最終的にはJARE-33では，UD1を12月下旬で観測を終了し国内に持ち帰った．その後の連続観測用にはUD2を使用しており，現在では3成分共に360-sモードで観測を行っている．

3. 低温室実験による動作テスト

3.1. 国立極地研究所地下低温室と実験概要

1991年9月13日より19日まで，国立極地研究所の低温実験室において，JARE-33で昭和基地に設置したUD2と株式会社アムコより借用した水平動成分1台のテスト観測を行った．また，JARE-33の帰国後，1993年5月25日から28日まで同実験室において，持ち帰ったUD1についても同様の実験をした．

低温室における実験の主な目的は，以下の通りである．

1）氷点下の低温状態においてSTSが正常に動作するか．

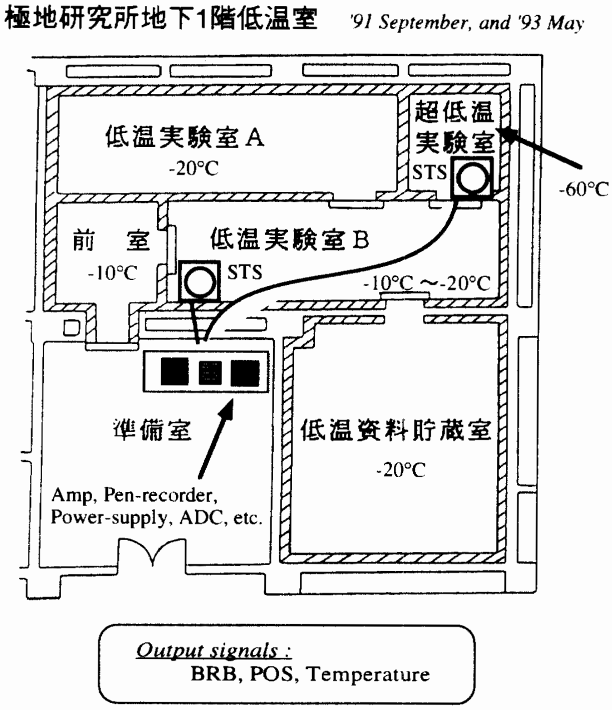


図 10 国立極地研究所地下低温室における設置状況

Fig. 10. Map showing the installation of the STS-1V/VBB seismometer in the low temperature laboratory of NIPR.

2) 低温での温度変化に対して昭和基地の STS 上下動 (UD1) に見られるシフトノイズが現れるかどうか.

3) 低温下での POS のドリフト量はどのくらいか, またその室温の変化量, 変化の速度との関係はどうか.

低温室内は通常昼間は－20°C に保たれているが, 17 時以降は冷却用コンプレッサーが停止するため, 翌日 9 時には－10°C にまで上昇する. 9 時より約 2 時間を要し－20°C 近くまで室温を低下させ, その後 17 時までは一定温度に保たれる. さらに, 低温室に隣接した超低温室では, 他の低温室と隔離することで－60°C にまで強制冷却させることができる. 実際の昭和基地で観測されている厳冬期の気温が－30°C 前後であることを考えると, 本実験は実際に行われている観測以上に過酷な温度環境下に STS を設置した場合を想定することになる.

具体的な実験としては, 大きく以下の二つに分類できる.

(A) 約 2 時間を要しての－10°C から－17°C までにおける緩やかな冷却過程

(B) －17°C の定温状態から－30°C 以下にまで, 超低温室における急激な冷却過程

図 10 には, 低温室における設置状況を示した. STS は超低温実験室のコンクリートの床上にガラスプレートを直接置き, 固定はしていない. 収録装置の置かれている準備室ま

で10m程度離れているため，フィードバック回路を低温実験室B（−20℃）に置き，保温箱で覆いその中を40Wのラバーヒーターで+15〜+20℃に保温した．1993年度に実施したUD1を用いた実験では，準備室に近い低温実験室B内にセンサー部を設置し，実験（A）の緩やかな冷却過程の考察のみを行った．観測したBRBのモードは上下動成分，水平動成分共に20-sモードのみである．水平動成分はPOSのみを，上下動成分はPOSとBRBをそれぞれペンレコーダーでアナログ可視記録を得ると共に，16bitのAD変換器を用いたパソコン収録装置に1秒サンプリングで記録した．同時にデジタル電圧計にて一定時間間隔での各出力値を読み取り参考とした．

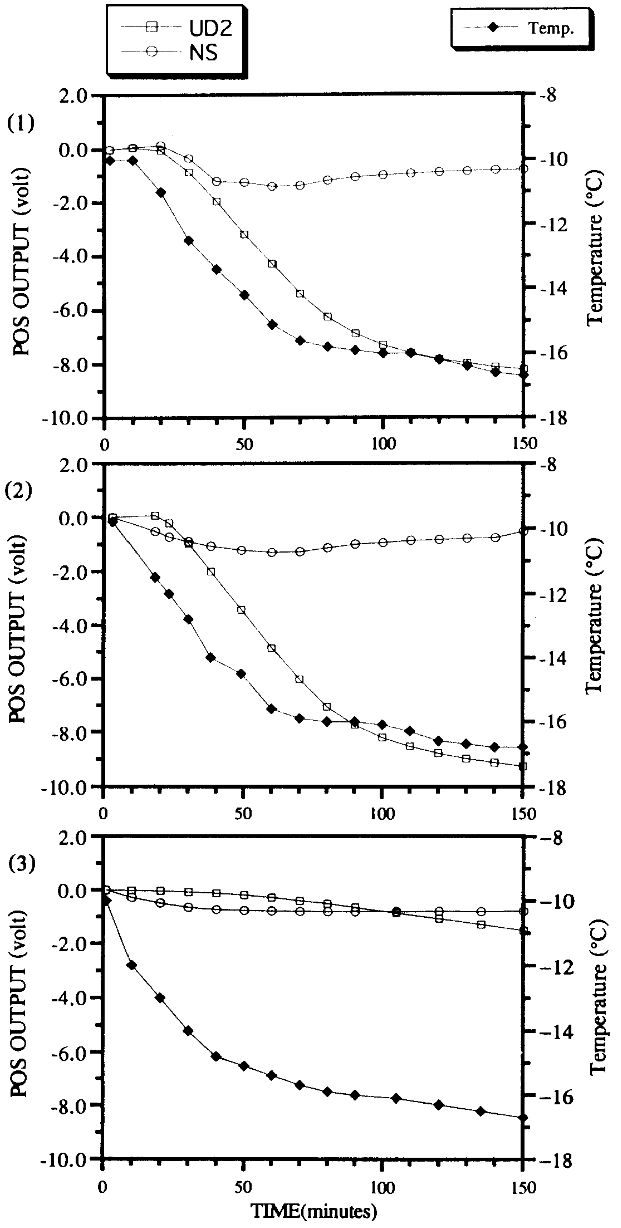


図11a 緩やかな冷却過程の結果．(1)，(2) センサーケースのみ覆った場合，(3) 電気磁気シールド，ベルシャーも使用した場合

Fig. 11a. Drift of the pendulum (POS output) and temperature change in the low temperature laboratory of NIPR during performance tests of gradual change in temperature. (1) and (2), show the results of two experiments in which the seismometers were covered only by a sensor case, and (3) shows the result of a experiment in which the seismometer was covered by a sensor case, aluminum shield, parmalloy shield (only for vertical sensor) and glass bell. Open squares and circles show the outputs of UD2 and NS components, respectively. Solid diamonds show room temperature.

3.2. 緩やかな冷却過程（A）の結果

UD2 と水平動センサー 1 台について，−10°C から冷却開始後 150 分間の POS と室温の変化を図 11a に示す．(1)，(2) はセンサーケースのみ覆った例で，同じ実験を二度繰り返した結果である．(3) は電気シールド，磁気シールド（上下動成分のみに有り）およびガラスベルシャーを被せた場合である．POS は，各実験開始時点を 0 V として示している．また，いずれの場合も実験の技術上の都合により，ベルシャー内は大気圧のままで真空状態にはしていない．(3) は真空でないことを除いて，昭和基地と同一の設置状態である．昭和基地の場合と同様に，POS と温度変化との間に明瞭な関係が見られた．センサーカバーのみをした (1)，(2) の場合には，温度が約 7°C 低下すると UD2 で約 9 V，水平動成分で約 1.3 V 低下している．UD2 の応答は室温の低下に対して 20 分以上遅れる傾向にある．また水平動成分は一度低下し最小値を過ぎた後，やや上昇する傾向にある．(3) の電気，磁気シールドとガラスベルシャーを被せた場合，POS 出力に対する温度変化の影響は上下動成分で 1／5，水平動成分で 1／2 以下に抑えられている．上下動成分は 150 分経過した後も引き続いて低下する傾向にある．

1993 年度に行った UD1 のみ（図 11b)については，(4) のセンサーケースのみ使用し

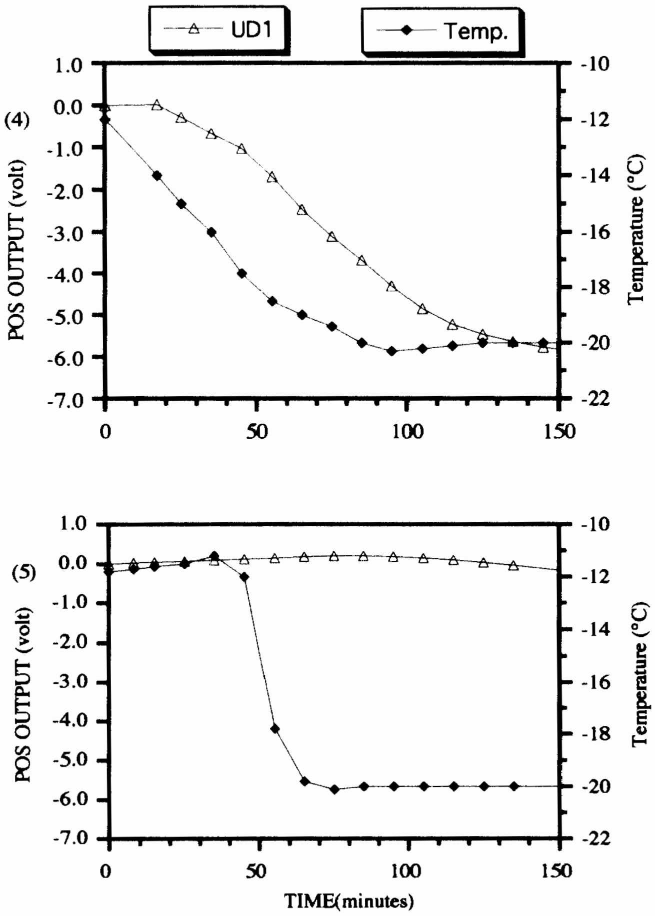


図 11b 低温実験室 B における緩やかな冷却過程の結果．(4) センサーケースのみ覆った場合，(5) 電気磁気シールド，ベルシャーも使用した場合

Fig. 11b. Same as Fig. 11a but for the UD1. (4) is the same as in (1), (2), and (5) is the same as in (3). Open triangles show the output of UD1 component.

た場合は (1), (2) の結果と, (5) の電気磁気シールド, ベルシャーを同時にかぶせた場合については (3) の結果と, POS の変位量と温度変化に対する応答がそれぞれ同様の傾向が見られる.

3.3. 急激な冷却過程 (B) の結果

(B) の超低温室においての急激な冷却実験では, センサーケースのみ被せて行った. これにより温度変化に対する影響が顕著に現われ, 考察がより容易になる事が期待され

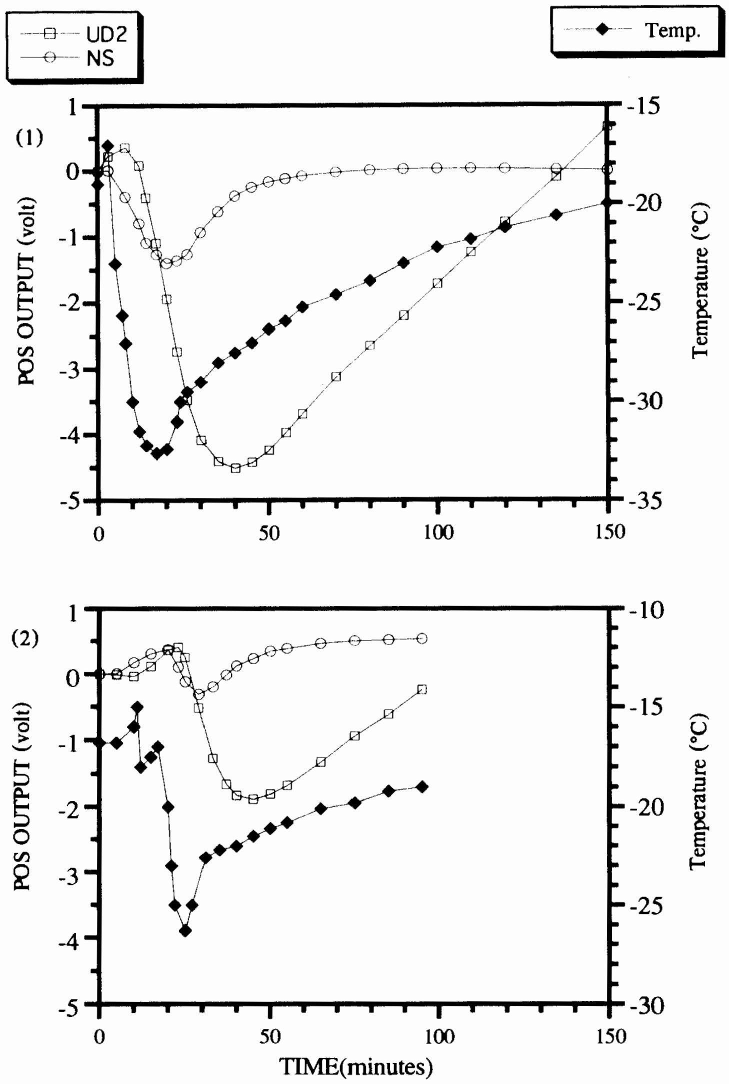


図 12a 超低温実験室における急激な冷却過程の結果. (1), (2) 共にセンサーケースのみ使用

Fig. 12a. Drift of the pendulum (POS output) and temperature change in the low temperature laboratory of NIPR during tests of rapid change in temperature. Symbols are the same as in Fig. 11a. Seismometers were covered only with a sensor case.

た．図12aには，－17°C付近から（1）－32.6°Cまで低下させた場合，および（2）－26.3°Cまで低下させた場合を示す．室温を低下させた後は，自然に－20°Cに上昇するまで放置しておく．実験（A）と同様に温度の低下量とPOSの変動量には関係が見られるが，その様子は少し異なっている．水平動成分ではPOSが室温と時間の遅れなく応答しているのに対し，UD2は20分以上遅れて反応している．しかも，その変動量は（A）の場合と比較して上下動成分では1／4以下である．水平動成分の変動量は，（A）の結果の温度変化量から推定される値よりやや少なめで，約10°Cの変化で1.5 V程度である．

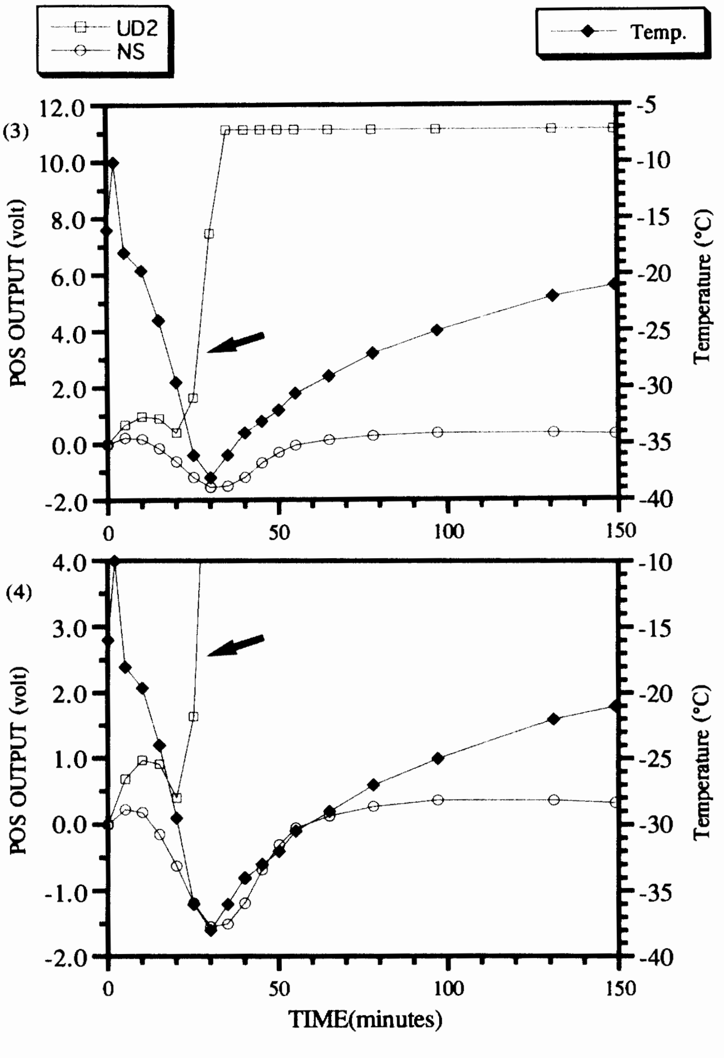


図12b 超低温実験室における急激な冷却過程によりシフトノイズが発生した例．(3)，(4) は同じ実験結果，縦軸のスケールが異なる．センサーケースのみ使用

Fig. 12b. Same as Fig. 12a but for more rapid change in temperature than those in Fig. 6. Seismometer was covered only with sensor case. (3) and (4) are similar, but the vertical axis of the lower figure, (4), is enlarged to the same scale as those in Fig. 6 for comparison. Arrow heads show the occurrence time of shift-noises. Symbols are the same as in Fig. 11a.

室温が最低温度を通過後すぐに上昇しているため，POSの温度変化に対する応答時間を考えた場合，室温の最低温度に対応する変動量にまで追従できないまま再び上昇していることが考えられる．言い替えると室温の変動量の速さにPOSのそれが追いついていないと思われる．

実験（B）において，さらに急激に温度を低下させた例を図12bに示す．(3)，(4) 共に同一の実験結果であるが，(4) は (3) のPOS軸のスケールを7／3倍に拡大し図12aのスケールに揃えてある．−17°Cから−38°Cまで冷却させたところ，水平動成分は最大1.5V程度シフトし，図11と同様に温度変化と良い相関が得られた．しかしながら，UD2はPOSが20分後から急激に上昇し始め，30分後には振り切れた状態になってしまった．低下開始後20分あたりから出力が振り切れていく途中（図中，黒矢印），昭和基地で観測されたシフトノイズと思われる現象が3回観測された．実験開始直後には一度−10°Cにまで室温が上昇しており，それを含めると30分間に30°C近くも変化した．こうした急激な温度変化には，STSの上下動成分のPOSの応答が温度変化に追従出来ないようである．

3.4. 温度変化に伴うPOSの変動

ここで，POSのドリフトする方向（センス）に関して一考察を行う．大気圧から真空に引いた場合には，UDのブーム（mass）に働く浮力が減少する．その結果，ブームが下がりPOS出力が約6V低下する（Streckeisen and Messgeraete, 1987）．実際にはブームは空間的に移動せず，電気的にフィードバックをかけてmassを静止させるための電圧が変化する．このためUDのPOSは真空に引く際にあらかじめ約+6Vに設定し，真空にした後に外部モーターにより強制的にオフセット調節を行い，100mV以内に調節を行う．これに対して，水平動成分には浮力の影響はほとんど現れないので，真空に引く際にPOSにオフセットを与えておく必要はない．

上記は気温が一定と考えた場合の考察である．本章で議論しているのは，低温室という密閉された場所で温度を強制的に低下させた場合である．各実験の途中には外部からの低温室への空気の移動がなく，低温室全体の体積が一定であったと仮定できる．その場合，温度の低下に伴い圧力が低下するため，浮力が減少しPOSも低下するであろう．

POSが変動する原因として気圧差以外に考えられることは，センサーケースの収縮やセンサーフレームの変形が挙げられる（山田，1991）．上下動センサーには，STS特有のリーフスプリングを使用した機構があり，その温度変化に伴う歪，変形が主な原因ではないかと思われる．POSの温度変化に対する応答時間の遅れにも，スプリング機構の影響があるのではないかと考えられる．STS-2にもこのリーフスプリングが使用されており（Streckeisen and Messgeraete, 1990），2型についても今後，気圧のみならず温度変化

に対する影響の検討が望まれる．

水平動成分に関しては，低温室実験からPOSの変化が気温の低下に対して遅れることなく応答している．気圧変化に伴う浮力の減少はあまり影響しておらず，気温の変化やそれに伴う気圧変化から引き起こされるセンサーケースやセンサーフレームの変形，または地面の傾動（低温室の歪み）が直接に影響していると思われる．正確な原因がどこにあるのかは，これまでの考察のみからは明らかではない．

昭和基地の観測結果からいえるPOSのドリフトは長周期変動に対するものであり，低温室実験の結果は，数十分から数時間という短時間の変化に対する応答である．この長時間のドリフトと短時間の応答を定量的に考察することが課題の一つであるが，これについては次の第4章で検討する．

4. 温度変化に対するドリフト応答量の定量的評価

4.1. 加速度出力（LP）

第2.1章や第3章で既述したように，STSのPOSのドリフトの原因の一つとして，地震計のバネ固有のドリフト以外にも，気象条件の変化，特に温度変化が強い原因であることが分かってきた．この章では，この温度変化に対するドリフト応答の定量化を試みる．解析にはJARE-33の昭和基地での観測期間に得られた加速度出力（LP）のデジタルデータを使用した．LPを利用した理由としては，LPがPOSの2倍の電圧として出力されており，上下動成分についてのみPOSと出力センスが逆で，水平動は同じセンスを持つことが知られている．このLPデータはJARE-33より連続収録を開始したため（金尾・神沼，1993）使用可能になり，これを解析することでPOSの挙動が同時に得られるからである．

また，LPは20秒以上で平坦な周波数特性を持つ（Streckeisen and Messgeraete, 1987)ため，数時間から数日の時間スケールでは地球潮汐を記録している可能性もある．実際，中伊豆におけるSTSによる観測では，潮汐成分が鮮明に記録されており傾斜計との比較がなされている（岡田・石田，1993）．また最近，GEOSCOPEの5観測点のSTS(-1V, -1H）のPOSデータを用いて，潮汐解析の試みがなされている（Pillet *et al*., 1994）．本章では，精密な潮汐解析用のプログラムを利用して，温度変化に対する数時間の応答係数を求めると共に，長周期の地震計のドリフト（トレンド成分）と潮汐成分（地球潮汐と海洋潮汐を含む），温度変化に対する応答成分，および地震や人為作業によるノイズ成分との分離を行った．

4.2. データと解析方法

LPの収録システムについては金尾・神沼（1993）に詳述されており，1994年8月現在

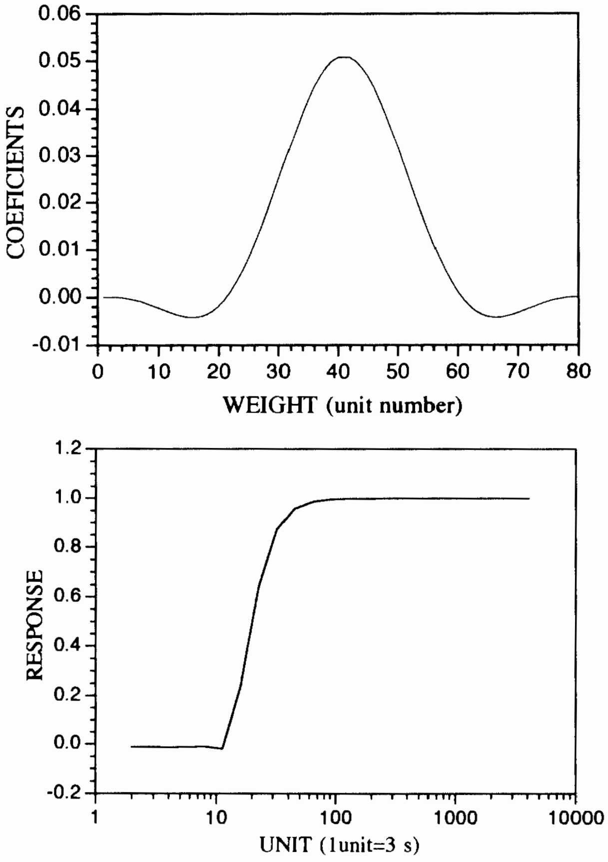


図 13 潮汐帯域でフラットな特性を持つ重みフィルター．上；重み係数，下；周波数特性

Fig. 13. Response of the digital filter for the BAYTAP-G analysis in order to generate 1 hour re-sampled data. The upper shows the weighting function for 80 points of data, corresponding to 240 s for a 3 s digitization interval. The lower shows the summation of the weighted points shown in the upper.

も順調に稼働中である．またこのシステムは昭和基地で同時に観測されている超伝導重力計（superconducting gravimeter）と規格・構成が同じ（SATO *et al*., 1993）であり，広いダイナミックレンジと安定した連続収録が可能である．オリジナルデータは 20 bit 相当に AD 変換された 3 秒サンプリングであるため，毎正時前後の 240 秒（データ数 80 に相当）に図 13（上）で示した重み（weight）をかけて和をとり，1 時間サンプルデータに換算した．この重み関数は，30 秒（10 unit）以上の帯域を通すデジタルフィルターとして機能する（図 13（下））．この 1 時間リサンプルデータを用いて潮汐解析用プログラム BAYTAP-G（TAMURA *et al*., 1991）を使用して行った．

温度変化に対する応答係数を見積もるための並行観測用気象データとしては，UD1 の保温箱内温度（TMP1）を使用した．この温度データも LP 収録システムに同時に 3 秒サンプリングで AD 変換されている．解析期間は，昭和基地で LP 収録を開始した 1992 年 2 月 22 日から，1992 年 12 月 18 日までとした．全期間を約 1 カ月ごとに分割して，2，3 日程度重なるように解析区間をずらしながら行った．上下動センサーとしては UD1 を，水平動センサーとしては NS を，それぞれ代表のサンプルデータとして解析した．

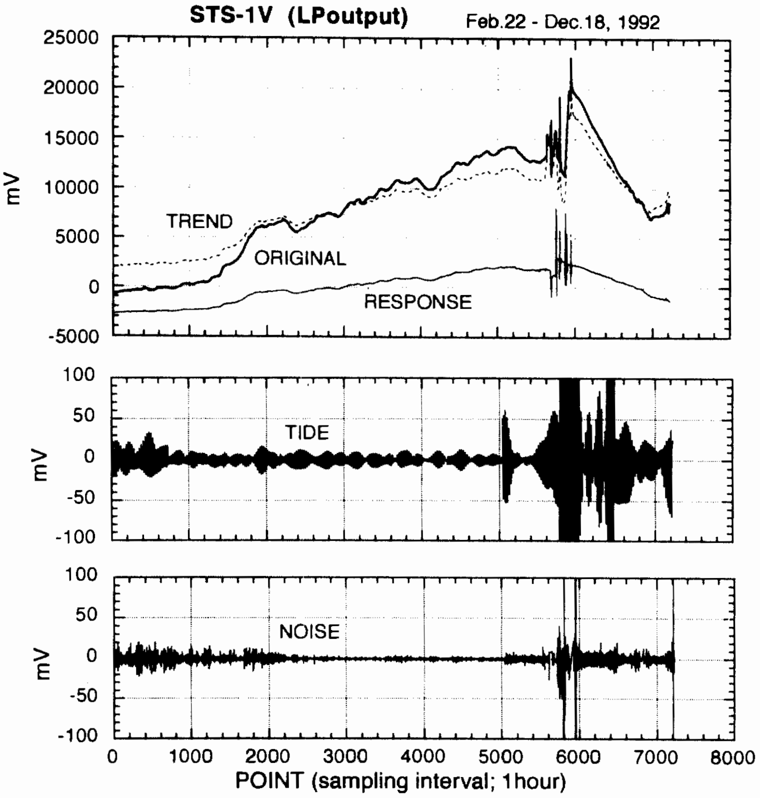


図 14a STS-1V (UD1) について，BAYTAP-G により分離した各成分．上；オリジナル，ドリフト（トレンド），および保温箱内温度に対する応答，中；潮汐成分，下；ノイズ成分

Fig. 14a. Decomposition of the LP acceralation records obserbed by STS-1V seismometer (UD1). The BAYTAP-G processing successfully decomposed the original records (original) into the step-corrected drift (trend), the response to the temperature variations in the box covering the seismometers (response), tidal component (tide), and the noise series (noise). The data sampling interval is 1 hour. The period for the analysis was from February 22 to December 18, 1992. The number of data is 7224.

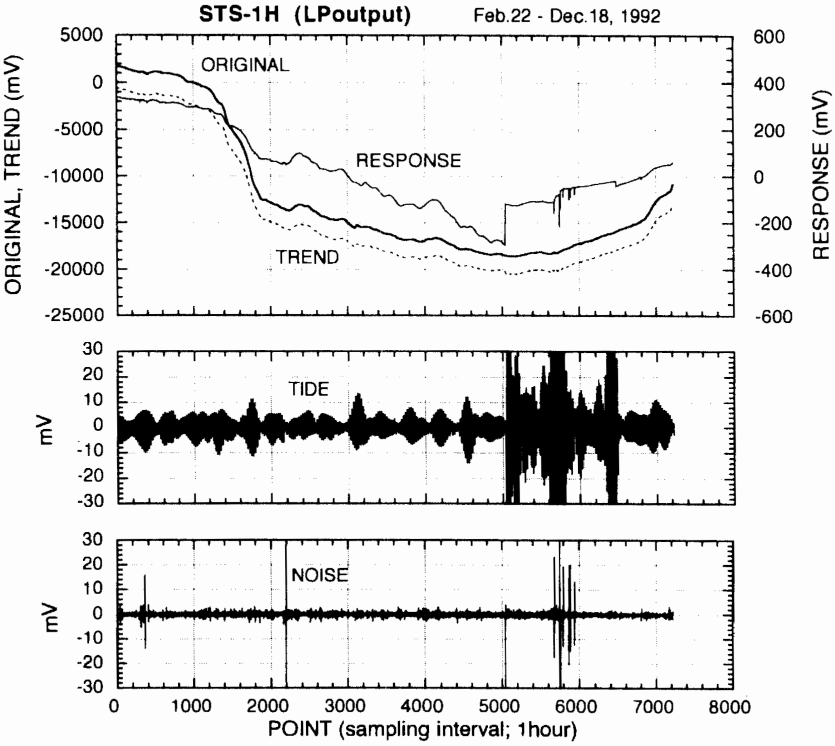


図 14b STS-1H (NS) について

Fig. 14b. Same as Fig. 14a but for as the NS-component of the STS-1H seismometer.

4.3. 解析結果と考察

図14には，オリジナルのLPデータとBAYTAP-Gにより分離した各成分の年変化を示す．UD1（図14a）の結果から言えることは，温度に対する応答量（response）はセンサー固有のドリフト（トレンド：trend）よりは小さいが，その方向（センス）はドリフトと同符号であり年周変化の様相を呈していることが分かる．また，潮汐成分（tide）とノイズ成分（noise）とが同じ程度の振幅であること，厳冬期（3000-5000 point）にノイズレベルが減少していること，春秋の時期に多く発生する急激な温度変化に伴うシフトノイズ（第2.3章）の増加とノイズのレベルの増大が関連していることなどが分かる．なお，9月下旬以降（5000 point以上）については，センサー部の調整を頻繁に行ったことがノイ

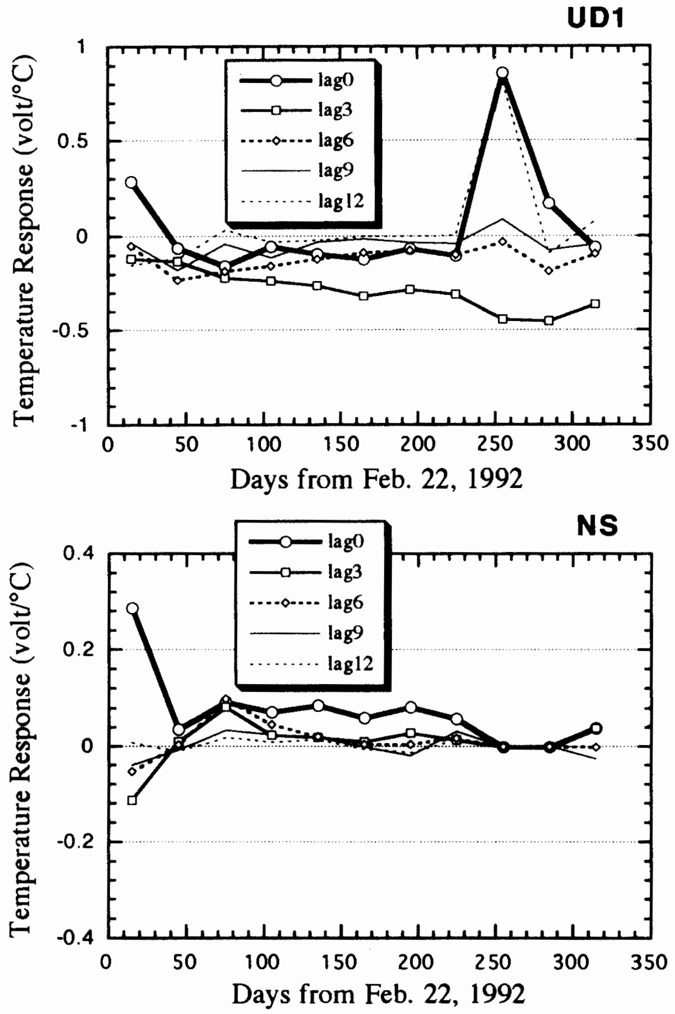


図15 0-12時間のタイムラグについて，保温箱内温度に対するLPの応答係数の年変化．上；上下動センサー（UD1），下；水平動センサー（NS）

Fig. 15. Temperature responses obtained from the one-month period of LP acceleration variations for time lag from 0 to 12 hours by BAYTAP-G analysis (upper; UD1, lower; NS).

ズ成分の増大の主な原因であり（第 2.4 章参照），その影響が他の tide，trend にも及んでいる．NS（図 14b）についても UD1 と同様に，trend，response 共に年周変化の傾向が得られている．JARE-33 における POS の年変化（図 4c）と比較すると，LP（original）が上下動ではそのセンスが逆に，水平動ではセンスは同じで，それぞれの電圧値が 2 倍になっていることが確認できる．

図 15 には，1992 年の 10 カ月間の LP データに対して並行観測データ（温度）のレスポンスを取るときの最大のラグ数を 12 時間と固定した場合の，温度に対する応答係数を 3 時間単位で区切って表示したものであり，各タイムラグについて年間の推移を示している．数時間のみならず半日のタイムラグ（lag12）についても影響が残っていることがわかる．図 15 において，UD1 の 250 日前後の応答係数の短時間ラグでの増加は，第 2.4 章で述べたセンサー部の調整・交換の影響である．また UD1，NS 共に越冬交代前後の夏期間は応答係数が若干増加しているが，これは夏作業に伴う人工的な擾乱が大きく影響していると思われる．

また図 16 には，全期間を同時に解析した場合の，各ラグ数（lag number）に対する応答係数を示した．上下動，水平動共に 6 時間程度までの影響が大きい．応答係数の大きさについては，2 成分共にラグ数 1 時間で最大値をとり，それぞれ 1.3 V/°C, 0.003 V/°C である．上下動の保温箱内の温度を平行観測データとして解析したため，全区間で解析した場合に水平動には上下動に比べて応答係数が 1／200 程度小さく求められた結果となった．センサー部の熱伝導の違いが原因の一つと考えられるが，3 成分による応答係数の差を正確に見積り比較するためには，水平動の温度を並行して測定することが必要である．ま

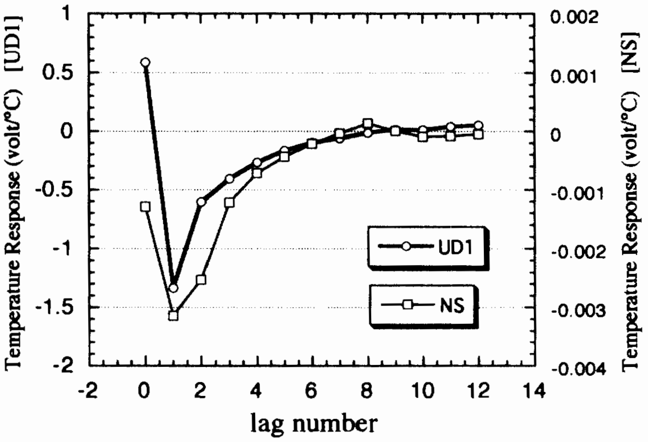


図 16　1992 年 2 月-12 月の LP の温度に対する応答係数の，0-12 時間のタイムラグについての結果

Fig. 16.　The average admittance to temperature variation for the whole observation period from February 22 to December 18, 1992 (UD1; bold line with open circles, NS; thin line with open squares).

た，図 14 において，上下動，水平動共に trend と response に細部に渡って良い相関があることから，BAYTAP-G により温度変化に対する応答成分がまだ完全に取り除かれていない可能性が考えられる．これを確かめるには，さらに外気温や気圧との相関を調べることが必要となる．後者の場合，影響するタイムラグが今回の保温箱温度を使用した場合と比べて遅れることが予想される．また，第 2.2 章で既述した POS の温度変化に対する長時間のドリフト応答と比較すると，上下動成分についてはオーダーとして同程度であることがわかる．

BAYTAP-G で分離された潮汐成分のうち，ノイズ混入の少ない期間（5000 point まで）を抜粋・拡大したものを図 17（上；UD1，中；NS）に，また UD1 において越冬観測中の静穏な時期（3000–3200 point）のノイズ成分を図 17（下）に示した．一見して STS でも潮汐成分を描いているようにみえる．しかし，BAYTAP-G の解析で得られる日周潮・半日周潮の潮汐常数は，通常の精密重力潮汐観測で得られる値とはかけ離れており，意味のある値ではない．今回 LP データより求められた潮汐常数の標準偏差は，JARE-33 の同じ期間に昭和基地の重力計室（図 1）で観測されたラコスト重力計による結果（Kanao and Sato, 1993）と比較して，一桁以上精度が悪いことがわかった．重力計のように定期

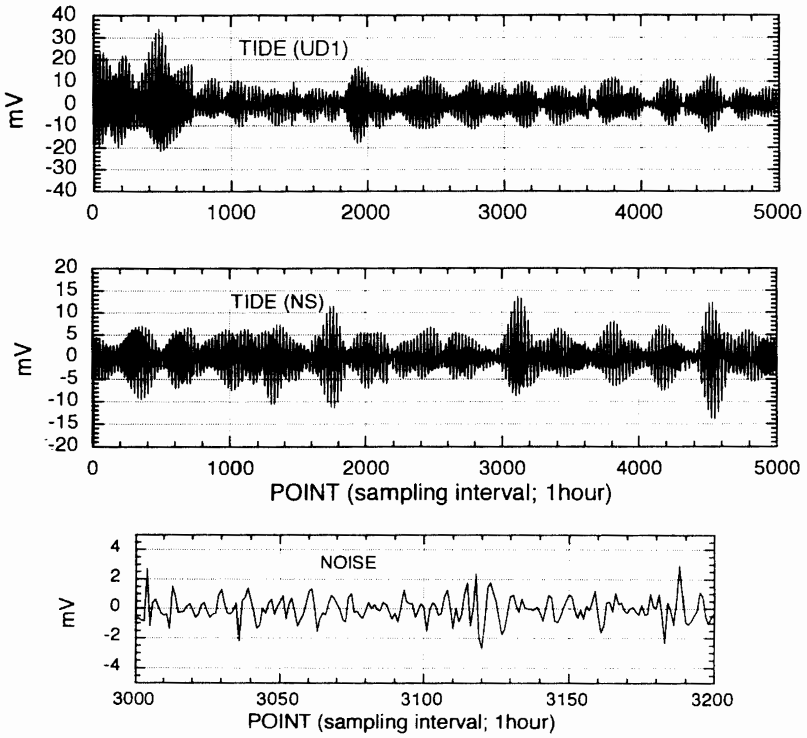


図 17 静穏期間における潮汐成分（上；UD1，中；NS）とノイズ成分（下；UD1）

Fig. 17. Tidal components for the first 5000 points generated by the BAYTAP-G analysis (upper; UD1, lower; NS) and the noise series of UD1 sensor for the period from 3000 to 3200 points. Data sampling interval is 1 hour.

的に感度の検定を行っていない事もあるが，潮汐の周期帯はこの地震計の長周期側の限界を越えていると考えられる．少なくとも特別に設置状況を工夫したり，気象変化の低減などの改善がなされなければ，昭和基地でのSTSにおいてこの限界を越えることは難しいと考える．

また，静穏時期のノイズレベルは，電圧値で±1 mV程度（図17（下））であり，表1のLPの感度より計算すると10 μGal程度である．これは，ノイズレベルとしてはIDAの観測点網の精度に納まっている（AGNEW, 1986）．昭和基地という地震観測に良好な観測点での超長周期地震計として，STSは重力計の計測範囲に迫るものであることが分かる．ノイズ成分には，5，6時間周期の長周期脈動が主に描かれている．人工的なノイズや地震イベントによる影響を除けば，海氷流動の影響，潮汐の影響，温度の日変化の影響などいくつかの原因が考えられる．

5. ま と め

以上により，本論で考察した昭和基地の観測状況の報告とデータ解析の結果，ならびに低温室実験におけるテスト観測の結果をまとめると以下の通りである．

1）JARE-30に始まる昭和基地におけるSTS観測では，POSとLPの長周期ドリフトが温度変化と関連があり年周変動を持つ．上下動の保温箱内部温度に対する長周期の応答係数を見積もると，UDで0.7-0.8 V／°C，またNSとEWで各々1.0 V／°C，0.2 V／°C程度である．また，上下動に卓越して起こるシフトノイズの発生個数は，低温の時期に多発しており，また3°C／日以上の温度の急激な変化に対応していた．

2）JARE-33においては，上下動2台の比較観測を行うことでシフトノイズの原因追求を行った．その結果，地震計基台への設置不備が問題ではなく，フィードバック制御の機構，またはセンサー内部の低温での動作・接触不良が原因と考えられた．

3）低温室実験からは，氷点下の低温状態でも正確に設置すればSTSは正常に動作することが確認された．POSの変動と室温の変化についての考察を行い，超低温室実験において応答量は数時間の変化に対して上下動成分が0.75 V/°C，水平動成分は0.15 V/°Cであった．また急激な温度変化に対するシフトノイズは，地震計が出力低下による動作不能状態の直前で発生することを確認した．

4）1992年度のデジタルデータ（LP加速度出力）を用いて，上下動と水平動各1台についての地震計の長周期ドリフト成分，温度変化に対する応答量，潮汐成分，および地震や人為的作業によるノイズ成分の分離を行い，短時間の温度変化に対する出力電圧の応答係数の定量的な解釈を試みた．その結果，LPの温度変化に対する応答係数は，通年のデータで解析した場合には上下動，水平動ともタイムラグ1時間で最大値をとり，それぞれ1.3 V/°C，0.003 V/°Cであることが分かった．

本論では特に，STSのかなり特殊な観測条件下での動作特性に関する試験と考察を行った．特に，ノイズの原因追求とドリフトの温度応答を中心として議論してきた．今後さらに検討するべき課題としては，STSの傾斜計，歪計としての特性限界について実験を交えて考察すると共に，気温変化のみならず重力計の場合に特に影響を及ぼす気圧変化に対する応答を同時に見積もることが必要である．また，温度変化に対するリーフスプリングの素材の変形量の推定やセンサーフレームとスプリングの熱伝導のシュミレーションなどを併用した研究が望まれる．さらに，将来における観測計画として，温度や気圧などの気象変化によるじょう乱の少ない良好な観測坑内において同様な観測・解析を行い，本論で扱った昭和基地という非常に気温の年変化の大きい観測点の結果と比較・検討することが望まれる．

謝　辞

本稿をまとめるにあたり，様々な助言やご指導を頂いた皆様に感謝します．名古屋大学理学部の山田功夫氏，気象庁地震観測所の黒磯章夫氏，小林昭夫氏ならびに三上直也氏にはSTS設置の方法について有益な助言を頂きました．国立極地研究所の渋谷和雄氏と本山秀明氏には低温実験の際に便宜を図っていただき，また議論をして頂きました．地球物理定常隊員の村上寛史氏（JARE-30），長坂健一氏（JARE-31），山本正人氏（JARE-32）には昭和基地観測の状況について多くの情報提供をして頂きました．特に村上氏にはSTSの設置方法とノイズの状況に関して入念な助言を頂きました．また，岡野憲太氏（JARE-34），名和一成氏（JARE-35）には，現在の昭和基地の観測状況を定期的に報告して頂きました．アムコ株式会社の菅沼一代氏には，ノイズ発生の原因について有益な情報を提供して頂きました．国立天文台水沢の佐藤忠弘氏と田村良明氏，東京大学理学部の金嶋　聡氏，および東京大学海洋研究所の今西祐一氏には，BAYTAP-Gによる潮汐解析について様々な助言を頂きました．京都大学防災研究所附属地震予知研究センターの伊藤潔氏，梅田康弘氏，渋谷拓郎氏，片尾浩氏，渡辺晃氏，安藤雅孝氏には昭和基地における観測の準備段階において有益な助言を頂き，また結果について議論をして頂きました．

なお，越冬期間中は福地光男第33次観測隊長をはじめとし，諸隊員の方々に協力を頂きました．また，気象庁からは昭和基地の気温データを快く提供して頂きました．以上の皆様に記して感謝の意を表します．

文　献

AGNEW, D. C., BERGER, J., FARRELL, W. E., GILBERT, J. F., MASTERS G. and MILLER, D. (1986): Project IDA: A decade in review. EOS; Trans., **67**, 203-212.

石原　靖・山田功夫・佐々木透・深尾良夫・青木治三 (1991): 広帯域地震計（STS2型）のテスト観測　その2—地震波による機器特性の検定—．地震学会講演予稿集，No. 1, 61.

金尾政紀・神沼克伊 (1993)：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.

KANAO, M. and SATO, T. (1993): Observation of the Earth tide and free oscillation of the Earth by LaCoste&Romberg gravity meter at Syowa Station, East Antarctica. to be published in Proceendings of the 12th International Symposium Earth Tides, Beijing.

黒磯章夫 (1990): IRIS システムの紹介. 地震火山技術通信, **67**, 43-69.

松浦紳二・石原 靖・山田功夫・深尾良夫・青木治三 (1990): STS 地震計の長周期ノイズの特性. 地震学会講演予稿集, No. 1, 16.

三上直也・長田芳一・石川有三・安藤雅孝 (1989): STS 地震計の長周期ノイズについて. 地震学会講演予稿集, No. 1, 129.

MELONI, A., DE SANTIS, A., MORELLI, A., PALANGIO, P., ROMEO, G., BOZZO, E. and CANEVA, G. (1991): The Geophysical Observatory at Terra Nova Bay. Abstracts: Sixth International Symposium on Antarctic Earth Sciences, Tokyo, Natl Inst. Polar Res., 404.

村上寛史・神沼克伊 (1991): 南極昭和基地における STS 地震計による広帯域地震観測. 地震学会講演予稿集, No.1, 62.

長坂健一・神沼克伊・渋谷和雄 (1991): 南極・昭和基地での超高性能地震計による観測. 南極資料, **35**, 335-354.

岡田義光・石田瑞穂 (1993): 中伊豆における STS 地震観測—観測方式および傾斜計との比較—. 防災科学技術研究所研究報告, **51**, 1-22.

PETERSON, J. and ORSINI, N. A. (1976): Seismic Research Observatories: Upgrading the Worldwide Seismic Data Network. EOS; Trans., **57**, 548-554.

PILLET, R., FLORSCH, N., HINDERER, J. and ROULAND, D. (1994): Performance of Wielandt-Streckeisen STS-1 seismomoters in the tidal domain-preliminary results. Phys. Earth Planet. Inter., **84**, 161-178.

QUANTERRA, INC. (1988): CCU3/VBB Integration Guide: CRSX1/Q52K Version Manual.

佐々木透・石原 靖・山田功夫・深尾良夫・青木治三 (1991): 広帯域地震計 (STS2 型) のテスト観測. その1—ノイズに対する特性—. 地震学会講演予稿集, No. 1, 60.

佐々木透・山田功夫・青木治三・深尾良夫・石原 靖 (1992): 広帯域地震計 (STS2 型) のテスト観測 その4. 地震学会講演予稿集, No. 1, 116.

SATO, T., SHIBUYA, K., OKANO, K., KAMINUMA, K. and OOE, M. (1993): Observation of Earth Tides and Earth's Free Oscillations with a Superconducting Gravimeter at Syowa Station (Status Report). Proc. NIPR Symp. Antarct. Geosci., **6**, 17-25.

渋谷拓郎・尾池和夫・平原和朗・西上欽也・和田博夫・中尾節郎・平野憲雄 (1990): 超高性能地震計 (STS) による地震観測—観測システムと地震波形例の紹介—. 京都大学防災研究所年報, **33**, B-1, 1-18.

島崎邦彦・宮武 隆・坪井誠司・鷹野 澄・阿部勝征・武尾 実 (1992): ポセイドンデータセンターの構想. 地震学会講演予稿集, No. 1, 120.

STRECKEISEN, G. and MESSGERAETE, A. G. (1987): Very-broad-band Feedback Seismometers STS-1V/VBB and STS-1H/VBB Manual.

STRECKEISEN, G. and MESSGERAETE, A. G. (1990): Very-broad-band Triaxial Seismometer STS-2 Manual.

TAMURA, Y., SATO, T., OOE, M. and ISHIGURO, M. (1991): A procedure for tidal analysis with a bayesian information criterion. Geophys. J. Int., **104**, 507-516.

UMEDA, Y. (1977): The predominant noises of long period seismographs and their generating mechanism. J. Phys. Earth, **25**, 103-116.

山田功夫 (1991): 最近の地震観測. 地震2, **44** (特集号), 3-14.

山田功夫・深尾良夫・石原 靖・青木治三 (1989): STS 地震計による広帯域・広ダイナミックレンジ地震観測. 地震2, **42**, 21-33.

山本正人 (1992): STS センサーの保温箱内の温度変化, 外気温変化による不安定性. 第12回南極地学シンポジウムプログラム・講演要旨. 東京, 国立極地研究所, 18.

(1994年8月16日受付; 1994年9月20日改訂稿受理)