HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	地震計の周期を長周期化するための負抵抗シャントによる過制振・積分法の評価
Author(s)	森谷, 武男; 岡田, 広; 凌, 甦群 他
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 61, 107-113
Issue Date	1998-03-20
DOI	https://doi.org/10.14943/gbhu.61.107
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/14263
Type	departmental bulletin paper
File Information	61_p107-113.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

北海道大学地球物理学研究報告
Geophysical Bulletin of Hokkaido University, Sapporo, Japan
No. 61, March 1998, pp. 107−113

地震計の周期を長周期化するための負抵抗シャントによる過制振・積分法の評価

森谷　武男・岡田　　広
北海道大学大学院理学研究科
地球惑星科学専攻
凌　　甦群・今　　義豪
日本熱水開発株式会社
中野　　修
株式会社ダイヤコンサルタント
（1997年12月9日受理）

Evaluation for the Over-Damping and Integration Method by a Negative Shunt Resistance to Prolong the Natural Period of Pendulum of the Seismometer

Takeo MORIYA, Hiroshi OKADA
Division of Earth and Planetary, Graduate School of Science, Hokkaido University
Suqun LING, Yoshitake KON
Nippon Nessui Corporation
Osamu NAKANO
DIA Consultant Corporation Limited
(Received December 9, 1997)

We tested the semi-long period seismometers using a negative shunt resistance whether those seismometers have the same characteristics or not. In order to set up the seismometers easily in the field work and obtain the same amplitude and phase characteristics, the over-damping and integration method is applied to short period type seismometers. To obtain a high damping constant, negative resistance which is suggested by Lennartz Co., Ltd. was tentatively applied to the over-damping and integration method. A negative resistance is obtained by the non-inverting operational amplifier with the positive feed back. The secondary low resonance frequency is obtained by a band-pass filter. MTV1C seismometers of Sindogiken Co., Ltd., were used to apply the method. We could obtain the damping constant h to be 84, and change the natural frequency of $f_0=1$Hz to secondary resonance frequency $f_b=0.19$Hz. By selection of the parts of resistance and capacitance to have same values at least three figures, we accomplished the seismometers having almost the same characteristics. By coincident observation of the micro-tremors and noise of the ground by many seismometers at the same place, we calculated and compared the power spectra, ratios of power spectra, phase differences and coherence. Through these procedure, we confirm that the semi-long period seismometers using the over-damping and

integration method by a negative shunt resistance is useful for not only the micro-tremor observation, but general earthquake observation except for the strong motion observations.

I. はじめに

微動探査（岡田他，1990）のための微動アレイ観測では固有周期5秒程度の地震計を4～10台必要としている．しかも地震計には諸特性が同一であることが要求されている．このタイプの地震計の設置には周期の調整など時間を必要とする作業があり，微動観測時間よりも時間がかかることもあり非能率である．設置作業が簡単でしかも特性が同一で安定な地震計の実現が望まれている．短周期地震計出力をアナログフィルターを通過させて，長周期地震計と等価な特性を得る方法（青木，1994）がある．この方法では地震計1台ずつわずかに異なる周期や感度を測定してフィルター定数を決定しなければならず，大量生産や同一特性を得る目的には適さない．一方やや長周期地震計と同じ特性を得る方法として，短周期地震計に過制振積分法を施す方法がある(例えば森谷他，1996)．これは地震計の振子に対する減衰定数hを大きくして加速度計とし，それを積分することで，$f_0/2h \sim f_0 \times 2h$の広い範囲で速度計として使用するものである．この方法では全体の特性には地震計の諸定数の影響が少なく，回路が簡単で特性が安定しているという特徴がある，このときhをどこまで大きくできるかが周波数範囲を決定する．一般にはhを外付けの抵抗で調整し，hを大きくするためには外付け抵抗を小さくする必要がある．外付け抵抗の極限は0オームであるが，この時の全体のシャント抵抗値はコイル抵抗よりも小さくはできないし，このときでもhの値を3～10程度しか得られない．しかし最近Lennartz社が製作した地震計LE3D/5sはMark Products社製L22D地震計を内蔵して，本来f_0が2Hzであった地震計を0.2 Hzに変換している．これは巧妙な電子回路により，見かけ上コイル抵抗より小さいシャント抵抗（つまり負抵抗）が付けられている．そのためhを数10という大きい値に設定でき，二次的な共振回路を付加することでL22D本来のf_0が2 Hzでありながらf_0が0.2 Hzの地震計と同じ特性を得ている．Lennartz社のホームページによれば，この方法はすでにErich Lippmann（The University of Munich）によって開発された．この地震計は設置時に筐体のレベルを合わせるだけで本来の性能が発揮されるため，微動観測などの臨時の観測には機動性が高く大変便利である．

本論ではまずLennartz社の4台のLE3D/5s地震計を同じ場所に設置し，微動の同時観測を行ってパワースペクトル，位相差，コヒーレンス等を計算して比較を行い，特性の同一性を調査した．次に8台の振動技研社製MKTV-1C型地震計に負抵抗および二次共振回路を設計製作し，周期を1秒から約5秒に増大させて同一の特性が得られているかLE3D/5sと同様の方法で調査した．

II. 負抵抗を得る回路

この地震計が採用している方法は，Fig. 1に示すように負帰還を施した反転型OP-AMP増幅回路に，入力インピーダンスが0となる非反転入力端子に地震計のコイルを接続し，さらに全体に正帰還を施している．これにより入力端子にコイルに生じた電圧の逆方向の電圧が現れ，コイルには常に強い制振力が生ずるようになる．これを固有周波数f_0より低い共振周波数f_0を持つバンドパスフィルターを介して速度計としている．バンドパスフィルターの中心周波数は地震計の2次的な固有周波数となる．Fig. 2に示すように入出力電圧－抵抗ダイヤグラムから，このときの見かけの増幅率G_pは次のように表せる．

$$G_p = \frac{R_f(R_1 + R_2)}{R_c R_2 - R_f R_1} \qquad (1)$$

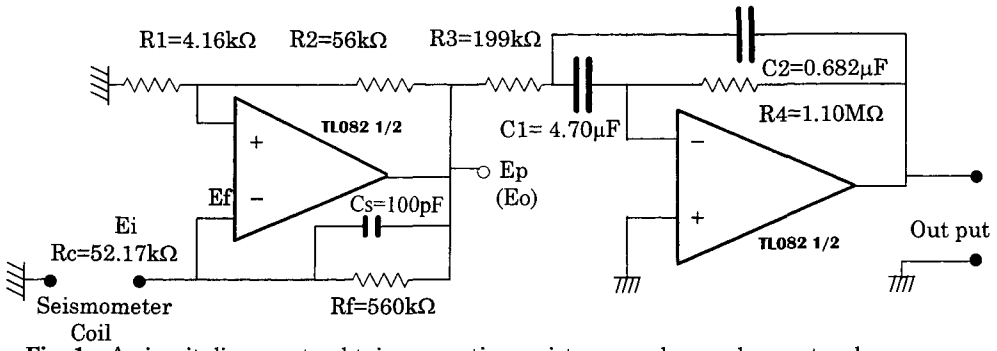

Fig. 1. A circuit diagram to obtain a negative resistance and secondary natural resonance frequency.

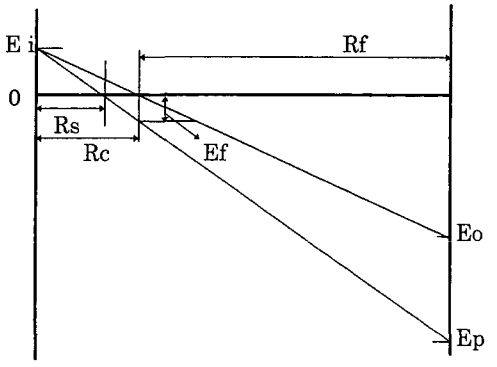

Fig. 2. A diagram showing a relation among in-put, out-put voltages and resistance. Note that positive feed -back makes the in-put impedance lower than Rc.

G_pが安定であるためには，

$$(R_cR_2 - R_fR_1) > 0$$

でなければならない．安定指数Sは：

$$S = \frac{R_cR_2}{R_fR_1} \qquad (2)$$

と書ける．Sが1より小さいと不安定になる．ここでコイル抵抗R_cは実際にはインダクタンスを含んでいるので高周波ではインピーダンスが増大して，不安定になる可能性がある．また見かけのシャント抵抗値R_sは次のように表せる．

$$R_s = \frac{R_c}{1 + \dfrac{G_pR_1}{R_1 + R_2}} \qquad (3)$$

R_sは増幅率G_pと正帰還率$[R_1/(R_1+R_2)]$で決まる．実際にhを決定するパラメータは，R_c+R_sのほかに慣性能率K，電磁感度Gがある．Kが小さいほど，またGが大きいほどhを大きくし易い．

実際にMKTV-1Cを用いてテストした実験回路では，$h=80$程度，f_bはf_0の5倍の$f_b=0.2$ Hzと設定した．そのために負抵抗発生回路では$R_1=4.16$ kΩ，$R_2=56.0$ kΩ，$R_c=52.17$ kΩ，$R_f=560$ kΩ，を，二次共振周波数を作るためにバンドパスフィルター回路では，$R_3=199$ kΩ，$R_4=1.10$ MΩ，$C_1=4.7$

μF, C_2=0.682 μF をそれぞれ採用した．したがって，G_p=56.9, R_s=10.6 kΩ, S=1.25 が得られた．なお，C_sは高域での位相調整用である．コイル抵抗が52.17 kΩのMKTV-1Cはシャント抵抗が1200 kΩのときh=0.707 が得られるので，R_s=10.57 kΩのときはh=83.7 という大きなhが得られる．従って理論的に平坦な加速度特性が得られる周波数範囲は，$f_0/167 \sim f_0 \times 167$ となる．バンドパスフィルターの中心周波数f_bは，

$$f_b=\frac{1}{2\pi\sqrt{R_3 R_4 C_1 C_2}} \qquad (4)$$

であるから，

$$f_b=0.190 \text{ Hz}$$

が得られ約5倍周期が増大したことになる．なおFig. 1に示した，C_s以外の抵抗，コンデンサーの値は3桁まで同一となるように選択，あるいは組み合わせて使用した．このために初めの設定値とは少し異なる結果となった．

III. 微動スペクトルの測定による特性の比較

実験回路を付加した8台のMKTV-1 Cと4台のLennartz社のLE3D/5s地震計によって同一地点で同時微動測定を行い，そのパワースペクトルなどを比較して地震計の同一性を検査した．Fig. 3には

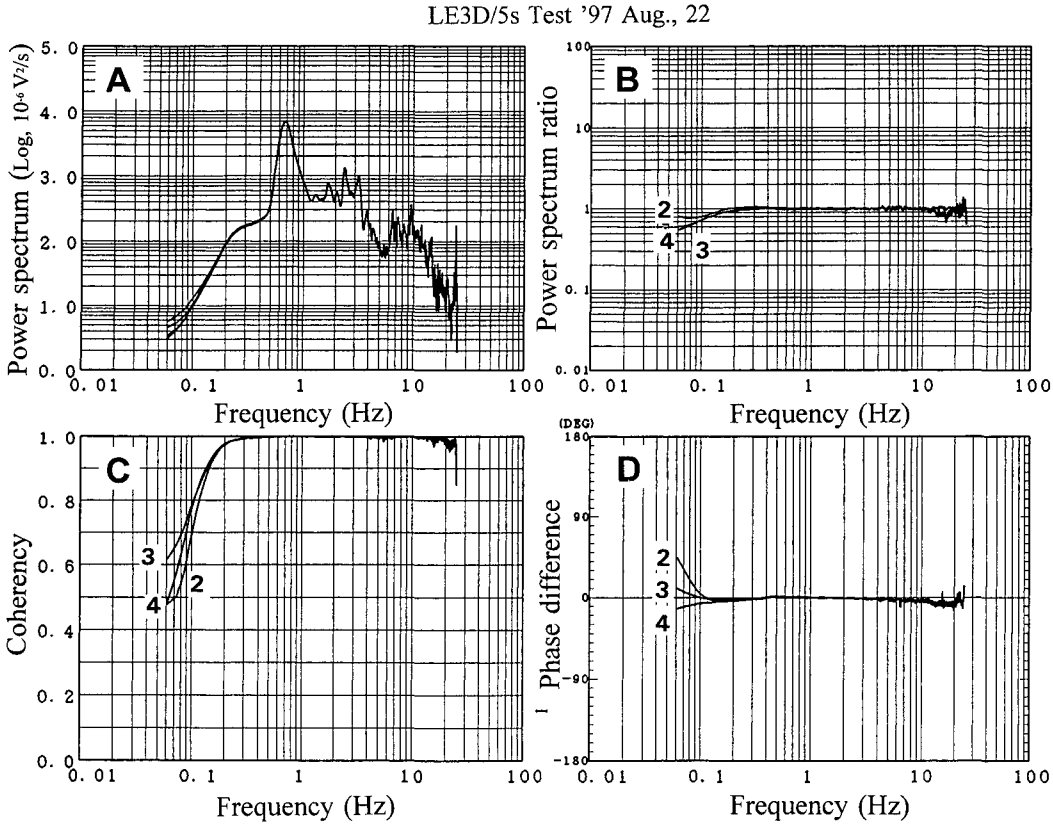

Fig. 3. Comparisons of characteristics of four semi-long type seismometers (LE3D/5s of Lennartz Co., Ltd.) by coincident micro-tremor observations at the same site. Power spectra (A), power spectra ratios (B), coherence (C), phase difference (D) are shown. The first seismometer is selected as a standard.

LE3D/5s 4台で測定した微動のパワースペクトル，パワースペクトル比，位相差，及びコヒーレンスが示されている．測定に使用したデータロガーは白山工業社のLS 8000である．得られたパワースペクトル等から低周波数域をのぞいてほとんど同じ特性が得られていることがわかる．低周波数域での違いは微動のパワーが非常に弱いためと，増幅回路出力にわずかな直流成分があって，この電圧が1台ずつ異なっているためである．Fig. 4にはMKTV-1C地震計8台による測定結果が示されている．LE3D/5sと同じように，8台共にほとんど同じ特性であることがわかる．従来使用してきたPELS 73地震計とADPCM型データロガーで観測した同一地点における同時微動測定の例をFig. 5に示してある．データロガーのサンプリングが独立であるために，位相差が大きくなっている（森谷他，1996）．また感度に多少ばらつきがある．このように，電子回路部品を3桁まで同じ値にそろえて負抵抗・積分方式の回路を組み立てると，ほとんど同じ特性の地震計となることがわかった．従来のPELS73を使った観測より設置作業が大幅に短縮されること，振幅・位相両周波数特性の同一性が改善されることが示された．

Fig. 6には同一地点における8台のMKTV-1Cによる微動記録を示した．図中，矢印でしめした4番目の地震計(V4)の記録にはスパイク状の孤立した波形が見られる．このような原因不明の電気的なノイズはLE3D/5sの観測時にも見られた．また測定中に大振幅で高周波の振動が発生した場合や，近い場所での交流電源スイッチの開閉で生ずる電磁波ノイズに対しては，長周期の大振幅のパルス状の波

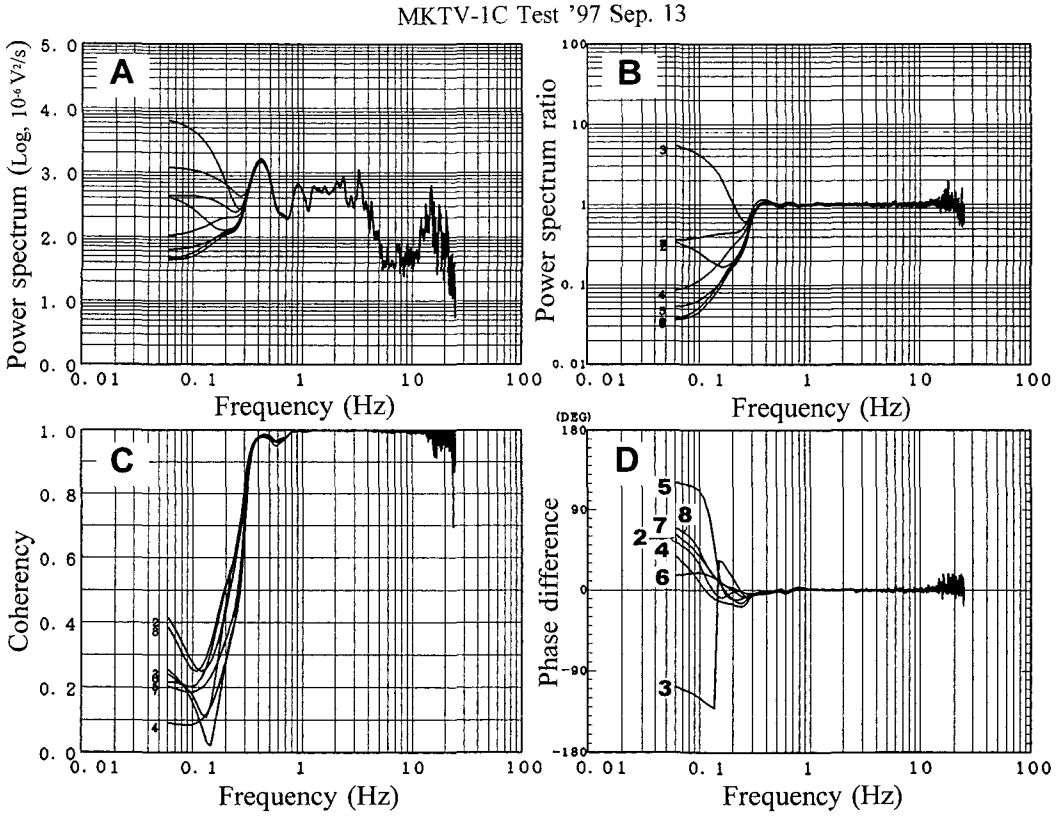

Fig. 4. Comparisons of characteristics of eight semi-long type seismometers (MTV1C of Shindogiken Co., Ltd.) by coincident micro-tremor observations at the same site. Power spectra (A), power spectra ratios (B), coherence (C), phase difference (D) are shown. The first seismometer is selected as a standard.

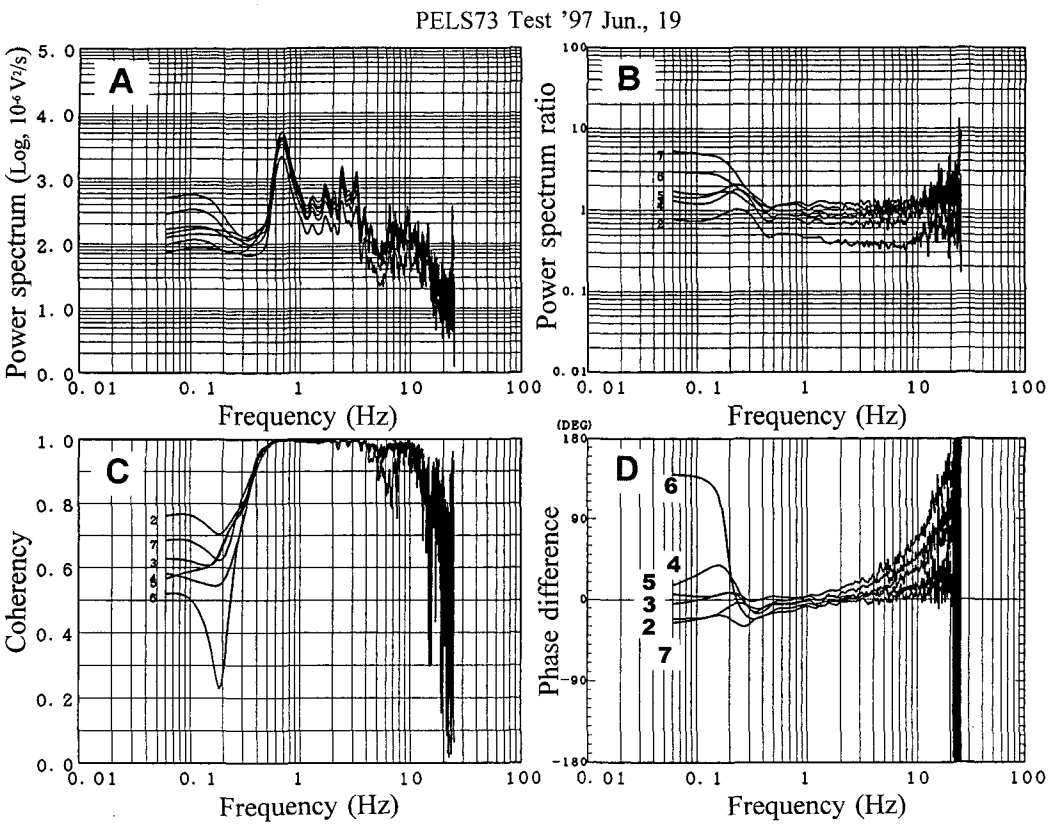

Fig. 5. Comparisons of characteristics of eight semi-long type seismometers (PELS73 of Shindogiken Co., Ltd.) by coincident micro-tremor observations at the same site. ADPCM data recorder have asynchronous sampling frequency of 100Hz, and phase difference is proportional to frequency. Power spectra (A), power spectra ratios (B), coherence (C), phase difference (D) are shown. The first seismometer is selected as a standard.

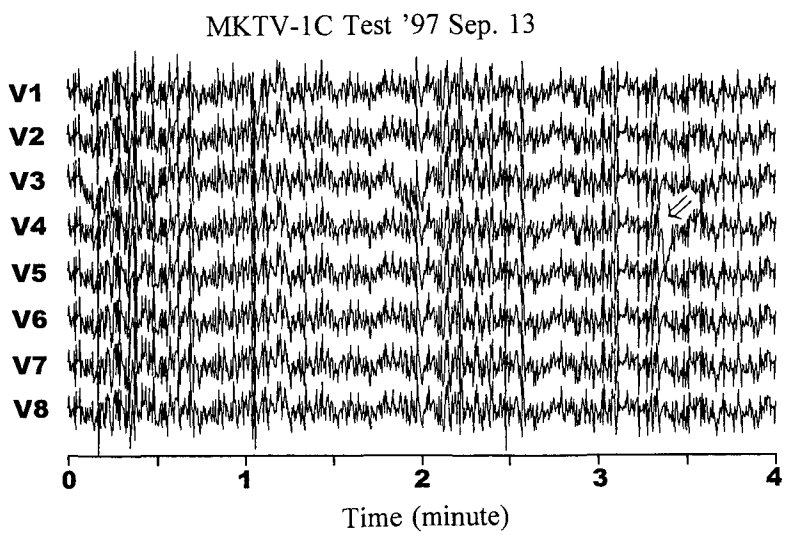

Fig. 6. A record section of micro-tremor coincident observations by eight MKTV-1C seismometers at the same site. An arrow indicates a causeless isolated pulse noise.

を発生し不安定な動作が見られた．大振幅で高周波の振動に対して不安定になるのは，負抵抗を作り出すOPアンプの電流が弱いために，強い振動による外力が地震計の振子に与えられると振子が可動してしまうことによって生ずると考えられる．これらの点が将来の課題である．

IV. おわりに

微動探査では多数の地震計の特性を完全にそろえ，データの信頼性を高めることが重要である．負抵抗による過制振・積分法により地震計の機械的な部分の特性がやや異なっていても全体では振幅・位相特性が同一になることが確認された．この方法で地震計を制御することにより，微動探査の適用範囲が大きく広がると考えられる．高度に訓練された人材の少ない発展途上国での微動探査や，ペネトレータなどによる荒い地震計設置法で，南極や惑星探査に微動探査が可能になるであろう．またL22Dをリング状に配置して地震動や微動の回転成分を測定する試みがある（森谷・丸茂，1997）．これに使われるL22Dは完全に特性が同一であることが必要だが，この場合においても特性をそろえ，長周期化するためには過制振・積分方が適している．

謝辞　北大理学研究科地球惑星科学専攻応用地球物理学研究室の皆様には野外に於ける観測作業を手伝っていただいた．李海源氏には電子回路の組立作業を手伝っていただいた．

文　献

青木治三，1995．地震計測広帯域回路，地震 2，**47**，345－346．

森谷武男・石川　顕・宮腰　研・岡田　広，1996．位相誤差の少ない微動探査の方法，物理探査，**49**，210－217．

森谷武男・丸茂只直，1997．回転成分地震計の試作と感度の検定，北海道大学地球物理学研究報告，**61**，99－106．

岡田　広・松島　健・森谷武男・笹谷　努，1990．広域・深層地盤調査のための長周期微動探査法，物理探査，**43**，402－417．