

振動台を用いた気圧測定装置の加速度応答

綿田辰吾*† · 大湊隆雄**

Acceleration Response of a Barometer Using Shake Table

Shingo WATADA*† and Takao OHMINATO**

Abstract

Mechanical sensitivity of a quartz pressure-transducer type microbarogram is examined from simultaneous measurements of vertical motion and barometric pressure change by a co-located seismometer and barometers placed on a shake table. Our measurement confirms that, by simulating the period and amplitude of the Rayleigh waves of the 2003 Tokachi-Oki earthquake, the mechanical sensitivity of the microbarometer does not bias the observed pressure change during the 2003 Tokachi-Oki earthquake.

Key Words : Pressure Change, Microbarogram, Shake Table

はじめに

地震は地面を揺らす。それは同時に地面に接する物質、例えば海水や大気も揺らすことを意味する。海水が揺らされると、海中音波として T-相が遠く伝播し、海底変動が海水表面を変形させ、その擾乱が重力波として津波が伝わる(例えば、宇津, 2001)。地震時発生する高周波の音波は地鳴りとして知覚される。発生する圧力変動が微弱で通常のマイクロフォンの周波数帯域より低いいためか、大気が地震による揺らされる様子の観測例は津波ほど多くない。

2003 年十勝沖地震と同時に、微弱な大気圧変動が日本列島を横断する様子が微気圧計により計測された (Watada *et al.*, 2006)。その微気圧変動は主要周期が約 15-20 sec, 圧力変動振幅が約 2 Pa であり、地震計で計測された表面波の伝播と同じ速度で日本列島を駆け抜けた。

微気圧計はその動作原理から気圧の変化だけではなく、地震計と同じく、機械的な振動そのものにも応答する。そのため十勝地震時の微気圧計の記録は地表の微小な気圧変化を計測すると同時に、地盤の機械的振動の影響を受けているのではないかと、との疑念が生じる。実際、Bedard(1971)

は、理論的考察から、静水圧鉛直勾配と大気中を運動する動圧に加え、機械応答が圧力変動として気圧計の応答中に含まれることを指摘し、実際に気圧計を振動台に載せて静水圧項と動圧や機械応答による圧力変化を比較した。

本論説では、Bedard (1971) や Starovoit, Yu O and P.N. Martysevich (2005) と同様に、振動台に載せた微気圧計と広帯域地震計の同時計測記録から、微気圧計記録に対する地盤振動の影響を実験検証する。

微気圧計と地震計

微気圧は大気圧を応力として検出器に加え発生する歪を精密に計測することで得られる。今回の実験で用いた水晶発振子も、外気圧の変化を水晶に応力として加え、水晶の振動数が加えた応力により変化する性質を利用し、歪による振動数変化を検出する。微気圧計 APDL-1000 S は Nishida *et al.*, (2005) により開発され、低消費電力の水晶式圧力変換器を用いている。大気の絶対圧を 1 Hz サンプリング、最小分解能 0.2 Pa で計測する。絶対圧型であるため、最小分解能は低周波マイクロフォンより劣るが、DC 成分までの長周期の圧力変動を記録することができる。地震計は Nanometrix 社製 Trillium 広帯域地震計を用いた。図 1 に Trillium 広帯域地震計の応答特性を示す。速度入力に対し周期 40 sec までほぼ平坦な振幅特性を持っている。位相特性は周期 20 sec で約 45 度ずれるので、今回の実験では出力電圧記録を変位記録に変換する際、この周波数特性を用いて補正している。

2006 年 9 月 7 日受付, 2006 年 11 月 8 日受理.

† Email watada@eri.u-tokyo.ac.jp

* 東京大学地震研究所海半球観測研究センター,

** 東京大学地震研究所火山噴火予知研究推進センター.

* Ocean Hemisphere Research Center,

** Volcano Research Center, Earthquake Research Institute, University of Tokyo.

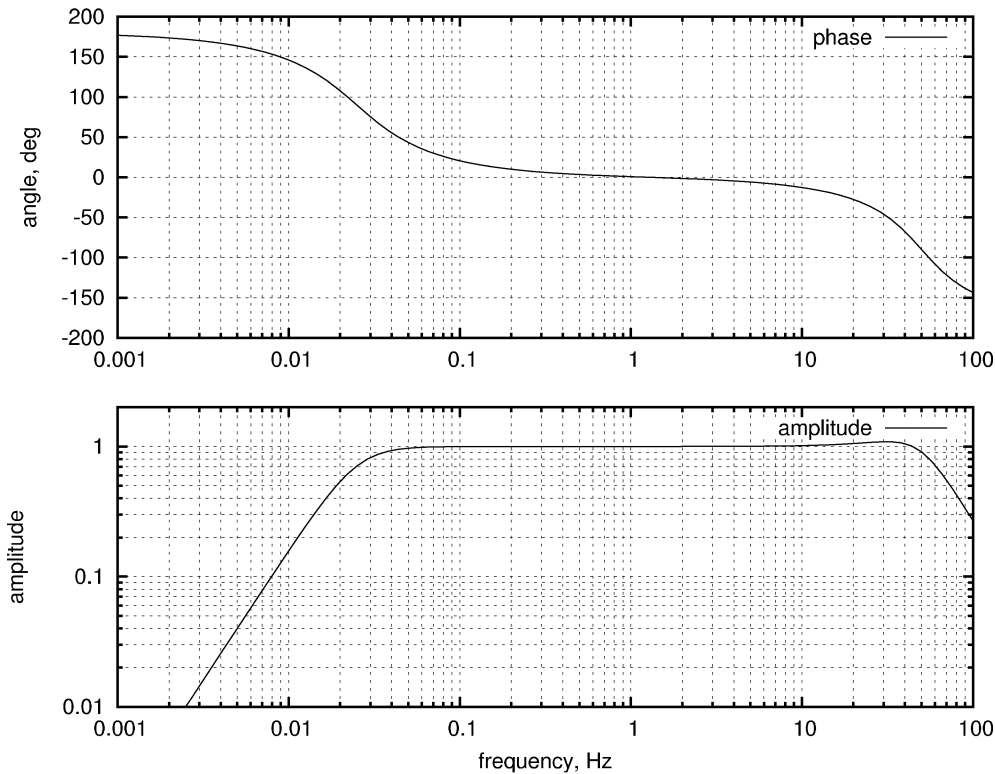


図 1. Nanometrix Trillium 広帯域地震計の周波数応答
 入力速度, 出力電圧. 実際には定数倍 1,500 V/m/sec が加わる. 40 sec 付近まで振幅特性はほぼ平坦だが, 位相特性は 20 sec でおよそ 45 度進んでいる.

実 験

振動台に, Nanometrix 社製広帯域地震計 Trillium と 3 台の APDL-1000S を一度に載せて鉛直方向に振動させた (図 2). マルチメータから振動台のコントロール部に一定の周期と電圧で変化する正弦波状電圧信号を入力して振動台を一定の周期と振幅で上下に振動させた. 3 台の微気圧計は振動台上で異なる向きに置かれ, 振動が微気圧計測機器に及ぼす影響を調べた. Trillium からの出力電圧は白山工業 LS7000XT により 100 Hz サンプリングで記録された. APDL-1000S は本体内蔵のコンパクトフラッシュにデータが書き込まれ, 実験終了後に回収された. LS7000XT は実験中 GPS 時刻同期させ, APDL-1000S の高精度内蔵時計は実験開始前に GPS 時刻同期させた.

今回の実験では, 周期 10 sec, 20 sec で計測した. 周期 40 sec の入力信号では振動台が制御できないため測定をしなかった. 十勝沖地震時に計測された上下動も周期 15 sec を中心とするレイリー波であった (Watada *et al.*, 2006). 振動台の振動振幅はおよそ 1-2 cm であった.

結 果

周期 10 sec, 20 sec で振動台を上下に振動させた場合の結果をそれぞれ図 3, 図 4 に示している. 静水圧大気中で

高度差による圧力変化は

$$\Delta p = -\rho g \Delta h \quad (1)$$

であらわされる. ここに, Δp は生じる圧力変化, ρ は大気密度, g は重力加速度, Δh は上下動変位 (上向き正). 振動台上の地震計記録から変位記録に変換された値は, 振動台の変位振幅の実測値と一致した. また, 式(1)で予測される圧力変化と記録された微小な圧力変化は振幅, 位相ともによく一致している (図 3, 4). 微気圧計は 1 Hz サンプリングであるため, 出力値をつなぐと見かけ上折れ線となる. 異なる方向を向いた微気圧計も同じ記録を書いていることから, 微気圧計はほぼ静水圧変化をそのまま計測したと考えられる. 微気圧計による大気圧計測時この周期帯域での主要な計測誤差要因は計器の分解能であり, 鉛直方向の振動に起因する微気圧計の機械的な応答は計測ノイズすなわち分解能限界 0.2 Pa 以下であった.

図 1 の構成のまま水平面内で振動台を振動させて, 水平方向の微気圧計機械応答を試験した. 振動周期と変位振幅は, 鉛直方向の振動試験と同じく, それぞれ 10 sec と 20 sec, 1-2 cm とした. 振動台上の微気圧計に大気の圧力変動ノイズ以外の圧力変化は微気圧計では捕らえられなかった. 水平面内の振動に起因する微気圧計の機械的応答は計測ノイズ以下であった.

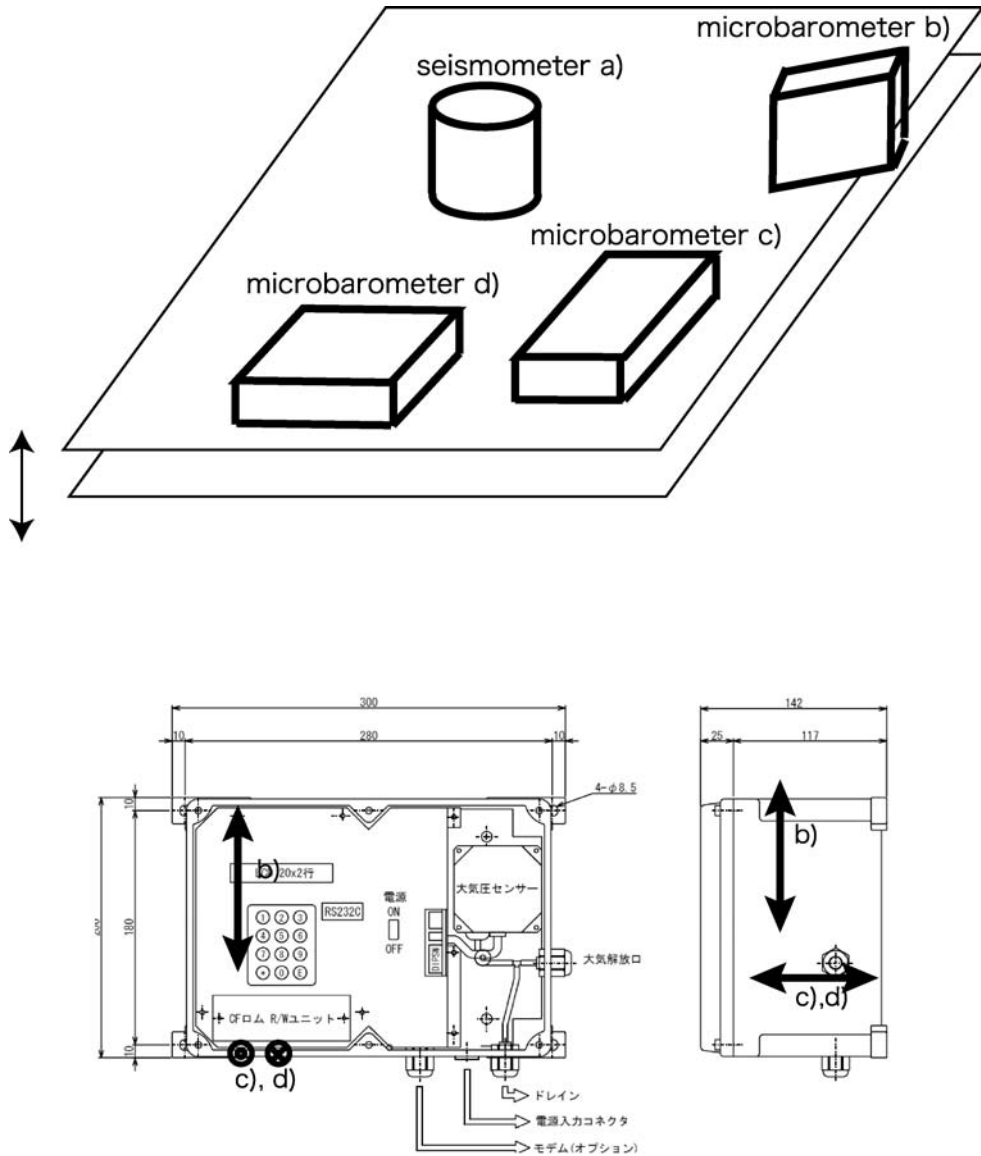


図 2. 上) 鉛直に振動する振動台上に置いた微気圧計 3 台と広帯域地震計の配置図. 広帯域地震計 a) と微気圧計 b), c), d) は図 3 の記録に相当.

下) 振動台に置いたときのそれぞれの微気圧計の向きと鉛直振動方向の関係を示す. 一つの振動台に 3 つの気圧計の向きを変えて置いている. b) は微気圧計の形状のため, 少し台からはみ出して置いた. c), d) は水平成分方向の振動に対して調べるため二つ設置しているが, 鉛直振動方向は同じ向き.

考 察

大気などの弾性体と弾性体中の剛体物質を考える. 剛体が弾性体の音波速度 c に比べて十分遅い速度 v で移動し, 剛体の大きさが音波の波長より大きいとすると, 剛体の運動により, 剛体近傍の弾性体中に発生する圧力は

$$\Delta p = \rho c v = i \rho c \frac{2\pi}{T} \Delta h \quad (2)$$

とあらわされる. ここに ρ は弾性体密度, T は移動する剛体の振動周期, Δh は剛体の振動振幅, i は虚数単位である. 地面が地震動により揺れるときなど(2)により地表に

大気の圧力変動が生じる. ただし, 実際の振動台は音波の波長よりもはるかに小さいため, 振動台上では動圧変化(2)は期待できない.

表 1 に 1 cm の振幅で周期 10 sec, 20 sec で仮想的に台の大きさが (周期×大気音速) より大きな巨大な振動台が鉛直方向振動したとき, 静水圧項と動圧項を比較した. この周期帯では動圧項が一桁大きくなる. 2003 年十勝沖地震時に観測された表面波の波長は, 周期 10-20 sec でおよそ 30-60 km となり, 巨大な振動台が大気を揺らした場合に相当する. 十勝沖地震時に発生した微気圧変動は約 2 Pa であり, 地震計記録から振幅およそ 1 cm の表面波が通過した

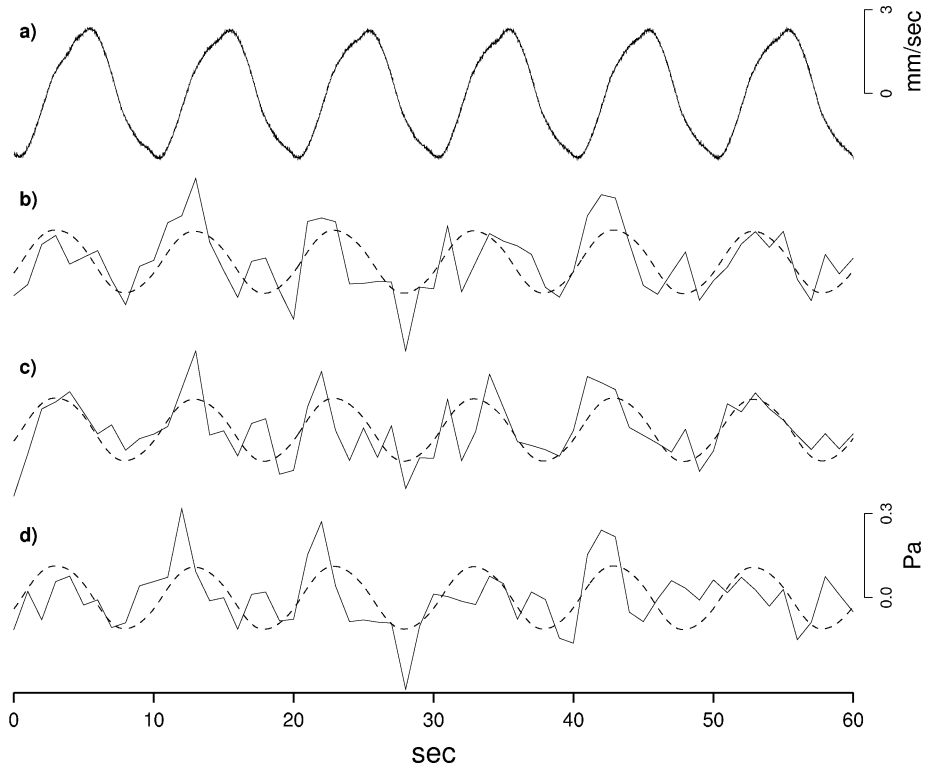


図 3. 周期 10 sec で鉛直に振動している振動台上での、a) 地震計速度記録、b), c), d) 実線は異なる方向を向いた微気圧計の微気圧記録。気圧は実験中にも変化するので、微気圧記録から長周期のドリフトを時間に関する 3 次の多項式近似で除いた。波線は式(1)から予測される静水圧下の密度成層大気中を動くことによる圧力変化。位相振幅ともに、予測値と観測値は良くあっている。

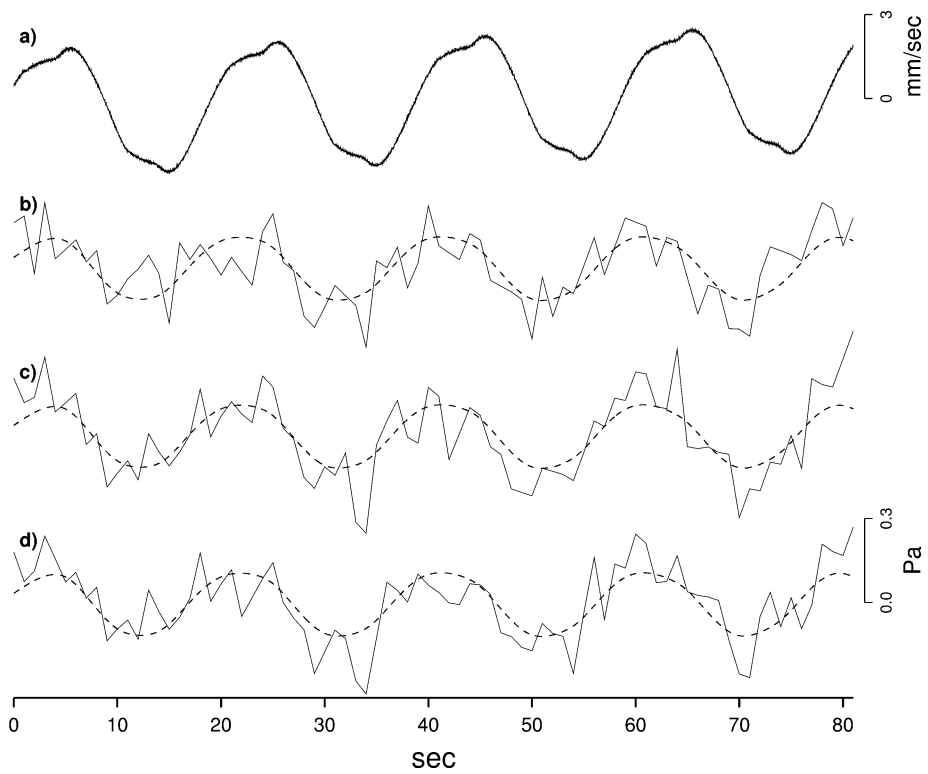


図 4. 図 3 と同じ。周期 20 sec.

表 1. 同一振幅での静水圧と動圧の比較

	10sec	20sec
静水圧変化, 式(1)	0.12Pa	0.12Pa
動圧変化, 式(2)	2.56Pa	1.28Pa

周期 10 sec, 20 sec で仮想的に大きさが音波の波長より長いような非常に大きな振動台で揺らした場合の静水圧の影響と動圧の影響の比較. $g=9.8 \text{ m/s}^2$, $\rho=1.2 \text{ kg/m}^3$, $c=340 \text{ m/s}$ を用いた.

ことがわかっている. すなわち, 十勝沖地震に記録された微小な微気圧変動は地表で大気に接する表面波により発生した地表付近大気中の動圧であり, 静水圧の影響は小さい. 今回の振動台による試験から微気圧計の機械的応答は静水圧の影響よりもさらに小さく, 最大で計測誤差程度であることがわかったので, 微気圧記録中には地動による微気圧計の機械的な応答はほぼ無視できることが結論づけられる.

謝辞: 振動台の操作を教えていただいた新谷助教授と, 丁寧な査読をいただいた, 渡辺教授, 岩崎教授, 飯高助教授に感謝いたします.

文 献

- Bedard, A. J, 1971, Seismic Response of Infrasound Microphones, *J. Res. Natl. Bur. Stand.*, **75C**, 41-45.
- Nishida, K., Y. Fukao, S. Watada, N. Kobayashi, M. Tahira, N. Suda, N. Nawa, T. Oi and T. Kitajima, Array observation of background atmospheric waves in the seismic band from 1 mHz to 5 mHz, 2005, *Geophys. J. Int.*, **162**, 824-840.
- Starovoit, Yu O and P. N. Martysevich, 2005, Different Observed Mechanism of Correlation Between Seismic and Pressure Signals, *Inframatics*, March, 2004, 11-16.
- 宇津徳治, 2001, 「地震学」第3版, 共立出版, 376頁.
- Watada, S., K. Hirata, H. Sugioka, K. Nishida, S. Sekiguchi, J. Oikawa, Y. Tsuji and H. Kanamori, 2006, Atmospheric Pressure Change Associated with the 2003 Tokachi-Oki Earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, in press.