

データロガー LS7000 の温度特性評価と専用プリアンプの製作

生田領野^{*†}・山岡耕春^{**}・見須裕美^{***}・藤井 巖^{****}

Evaluation of Temperature Characteristics of a Data Logger LS-7000 and Fabrication of Preamplifier Exclusive to the Data Logger

Ryoya IKUTA^{*†}, Koshun YAMAOKA^{**}, Hiromi MISU^{***} and Iwao FUJII^{****}

はじめに

私たちは地殻活動のアクティブモニタリングの手段として、精密に制御した弾性波信号を定常的に送受信する弾性波精密制御定常信号システム(弾性波 ACROSS)を開発中である(Yamaoka *et al.*, 2001, Ikuta *et al.*, 2002 など)。本システムには定常的に弾性波を送信する震源装置と共に、地殻内部を通ってきた弾性波信号を地震計で受信した際、これを正確に記録する記録装置が不可欠である。現在我々は多くの臨時観測点において、低消費電力で機動観測に優れた白山工業製の地震計測用データロガー DATAMARK LS-7000 を採用している(図 1)。LS-7000 を観測に使用するためにあたって、温度特性、自己ノイズの評価と、さらに LS-7000 の AD 精度を補うために専用のプリアンプを製作したので報告する。

白山工業のカタログ(白山工業, 2006)によると、DATAMARK LS-7000 の主な仕様は表 1 の通りである。また以下のような特徴が挙げられている。

1. 24 bit $\Delta\Sigma$ 型 AD コンバータを採用し高いダイナミックレンジ(17 bit)を実現している。
2. GPS による時刻校正により、 $\Delta\Sigma$ のオーバーサンプリングとデシメーションフィルタのタイミングまで厳密な同期を行っている。

2006 年 8 月 25 日受付, 2006 年 10 月 23 日受理。

[†] ryoya@eri.u-tokyo.ac.jp

* 東京大学地震研究所地震地殻変動観測センター(日本学術振興会特別研究員)。

** 地震予知研究推進センター。

*** 気象庁札幌管区気象台。

**** 東濃地震科学研究所。

* The Earthquake Observation Center (JSPS Postdoctoral Fellow)。

** The Earthquake Prediction Research Center, Earthquake, Research Institute, University of Tokyo。

*** Sapporo District Meteorological Observatory, Japan Meteorological Agency。

**** Tono Research Institute of Earthquake Science。

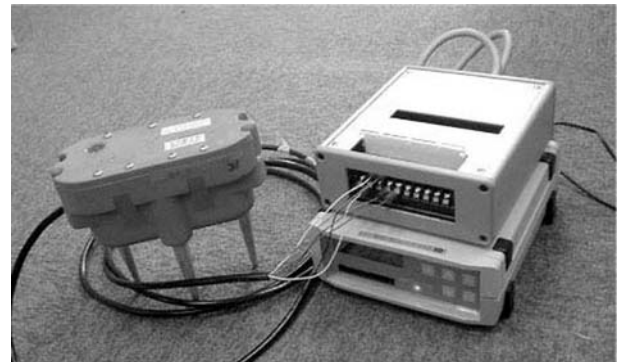


図 1. 白山工業 DATAMARK LS-7000 LS-7000 (右下) と、専用に製作したプリアンプ (右上)、物理探査用地震計 (左, 固有周波数 4.5 Hz, 3 成分)。

表 1. 白山工業 DATAMARK LS-7000 の主な仕様

入力レンジ	$\pm 10V$ (0dB), $\pm 1V$ (20dB)
分解能	24bit ($\Delta\Sigma$ 形 AD)
A/D 精度	100Hz サンプリング 17bit 保証
時刻校正	GPS による (1 衛星でも可)
動作温度	-20 から 50°C

3. 小型で軽量, 低消費電力

これらの特徴は ACROSS システムにおいて, 1. 微弱な信号を長時間送受信してスタックすることでシグナル-ノイズ比を向上させる。2. 送信, 受信の時刻を精密に同期させることにより, 地殻内部の時間変化を監視する。3. 震源設置後, 観測点はさまざまに展開し, 機動的な観測を行う。という要求に応えるものである。

温度特性評価

最初に LS-7000 の温度特性の評価実験を行った。本実験は 2002 年 11 月に行った。温度特性評価は, 基準となる安

定信号を入力し、ロガーの温度環境によってこの記録がどのように変化するかを調べる。この際重要なのは入力信号の安定性である。信号源としてファンクションジェネレータ (FG; Agilent 33120A) を使用した。FG は一日の温度変化幅が $\pm 1^{\circ}\text{C}$ と安定した観測壕内 (名古屋大学, 瑞浪地殻変動観測壕) に設置し, 小さな気温変化が FG に及ぼす影響も考慮するために壕内の気温も監視した。FG からの信号は矩形波で, GPS 受信機からの 1 秒パルス信号をリファレンスにして信号タイミングを精密に制御している。またこの際 LS-7000 の内部時刻も GPS に同期し, 1 秒毎に時刻補正を行っている (これはアクロス用ファームウェア特有の仕様)。FG からの信号は別室で温度を精密に制御したインキュベータ内の LS-7000 に入力, 記録した。図 2 に計測条件の概略図を示す。また実験パラメータは表 2 のとおりである。

図 3 はファンクションジェネレータからの波形をオシロスコープで収録したものである。このような矩形波を入力しながら, LS-7000 を入れたインキュベータの内部温度を約 5 時間毎に 5°C 刻みで変化させ, 波形を記録した。LS-7000 による収録波形の一例を図 4-a に示す。図 3 と比べて矩形波の立ち上がりにオーバーシュートが見られるのは LS-7000 内部のローパスフィルタのためである。図 4-b に

表 2. 温度特性実験のパラメータ

実験パラメータ	採用値
FG の発振周波数	1.01 Hz
FG からの入力電圧	100 mV
LS-7000 の温度	-5 から 40°C
サンプリング周波数	100 Hz
LS-7000 の入力レンジ (増幅率)	10 V (0dB)

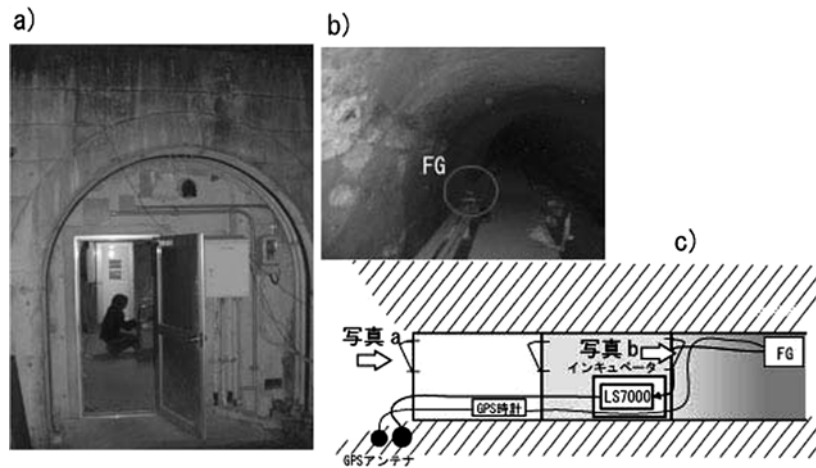


図 2. 計測セッティング, サイト写真
 a) 観測壕入り口から内部を見た写真。奥に見える扉の更に奥にインキュベータが設置されている。
 b) 観測壕内。気温 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ の安定した壕内に FG が設置されている。c) 観測壕内実験室の概略図。

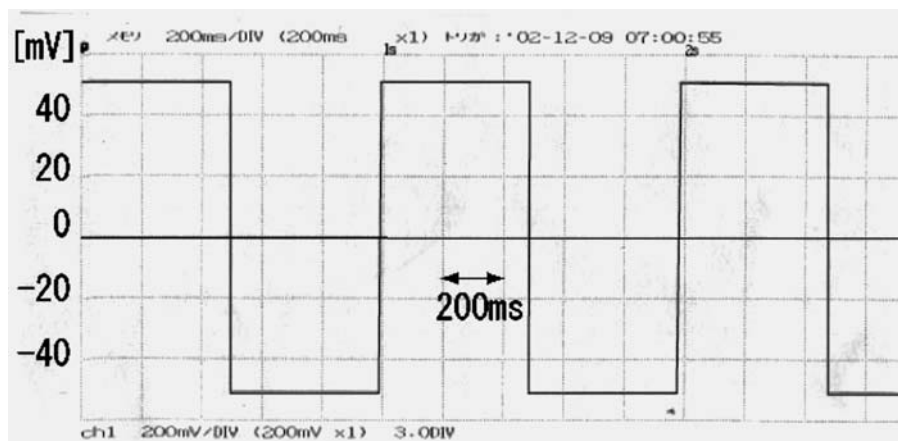


図 3. ストレージオシロスコープで収録したファンクションジェネレータからの波形。デューティ比 50%, $\pm 100\text{ mV}$ の矩形波を入力している。

は収録波形のスペクトルを示す。入力は 1.01 Hz の矩形波であるので 1.01, 3.03, 5.05, … と基本周波数の奇数倍の離散スペクトルとなる。2.02, 4.04, 6.06 に見られる小さな振幅スペクトルは高調波である。温度特性の評価のためにこれらの中から基本周波数である 1.01 Hz のスペクトル振幅のみに着目して時間変化を調べた。

図 5 に a) LS-7000 で記録した 1.01 Hz のスペクトル振幅、b) インキュベータ内気温、c) 10 分毎の FG 設置壕内の気温を示す。本来 LS-7000 の記録振幅 a とその温度 b のみの関係を見たいところが、a と c の間にも何らかの相関があるように見られる。本来安定であるべき FG からの出

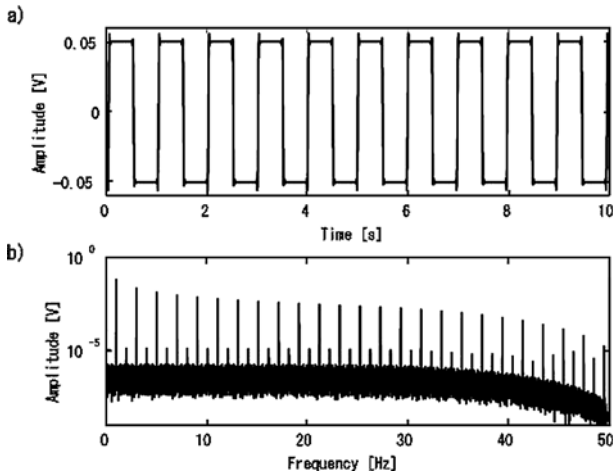


図 4. LS-7000 で収録した波形の例
a) 10 秒間の時系列信号、b) 100 秒間の記録を逆フーリエ変換したスペクトル。

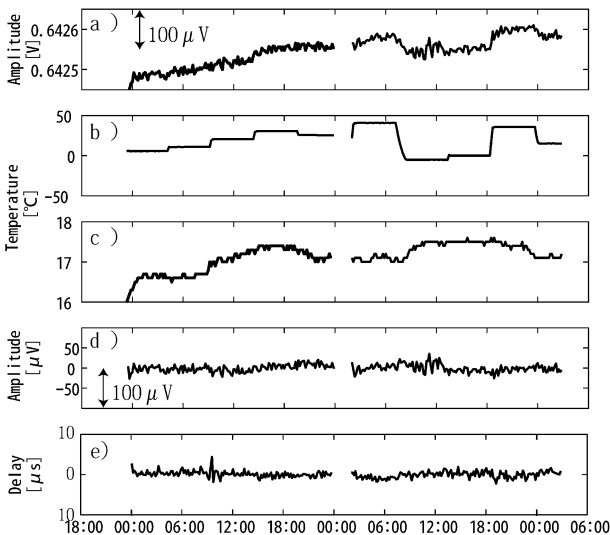


図 5. LS-7000 による 1.01 Hz の記録振幅と温度
a) LS-7000 による 1.01 Hz 成分の記録振幅。b) LS-7000 が設置されたインキュベータ内の気温。c) FG が設置された観測壕内の気温。d) LS-7000 の 1.01 Hz 成分の振幅を、式(1)に従って FG、LS-7000 周囲の気温変化の一次結合でフィッした際の残差。e) 1.01 Hz の信号の時刻遅れ。

力に温度依存性があるためである。よってこの際、LS-7000 の記録振幅の変化分 $\Delta Y(t)$ は、温度係数 a, b を用いて以下のように書き下せると考えた。

$$\frac{\Delta Y(t)}{Y_I} = aT_I(t) + bT_F(t) + c + \varepsilon \quad (1)$$

ここで Y_I は理論上の入力振幅、 $T_I(t)$ 、 $T_F(t)$ はそれぞれインキュベータ内、FG の壕内の気温。c は定数、 ε はその他の誤差である。全ての時刻についてのデータを式 1 として連立し、温度係数 a, b と定数 c を最小二乗法を用いて推定した。こうして求めた LS-7000、FG それぞれの温度係数 a, b は、それぞれ 1.6×10^{-6} 、 1.6×10^{-5} [K⁻¹] と求めた。

FG の温度係数が非常に大きかったために純粋に LS-7000 の温度係数だけを計測することができなかった。このような実験には十分に安定した信号源を使用すべきであった。ともあれ壕内の温度を計測することで FG の温度係数を同時に推定し、LS-7000 の温度係数を推定することができた。実際の屋外でのアクロス信号計測時においては一日で 10 数度、季節変化は場合によっては 30°C 程度もあることが予想されるが、1K あたり 1.6×10^{-6} の温度特性では最大でも 10^{-4} 未満の変化となり、これは実際に淡路島のアクロスサイトなどで観測されている信号振幅の変化が数%から時には数 10% もあることを考えると十分小さい。

LS-7000 の振幅特性は上記のとおりであったが、加えて 1.01 Hz スペクトルの位相を同時に調べ、LS-7000 の変換タイミングの温度依存性も計測した。図 5-e のとおり、最大 5 マイクロ秒のバラつきを超えて有意な温度依存性は見られなかった。

自己ノイズ

次に、LS-7000 データロガーの自己ノイズの計測を行った。LS-7000 で設計されている二つの増幅率設定 20 dB (最大 ±1 V)、0 dB (最大 ±10 V) 両方について、入力端子をショートして記録を行った。

図 6a, b と c, d はそれぞれ増幅率 20 dB と 0 dB 時の入力換算記録の時系列、周波数系列でのノイズ振幅である。20 dB 時には ±約 5 μV の自己ノイズが記録されている。0 dB 時には自己ノイズの振幅は ±約 200 μV となり、20 dB 時に対して増幅率が 1/10 であるのに自己ノイズは 10 倍ではなく 40 倍となっている。この原因は 28 Hz 付近に卓越したモノトニックなノイズである (図 6-d)。28 Hz 付近以外の帯域では、0 dB 時のノイズ振幅は概ね $10 \mu\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$ 以下であり、20 dB 時のノイズ振幅が約 $1 \mu\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$ 程度であることと調和的である。

白山工業によると (表 1) 有効ビット数は 17 bit (=約 102 dB) 保証とされている。0 dB 時のダイナミックレンジはモノトニックなノイズのために最小 200 μV 最大 10 V の

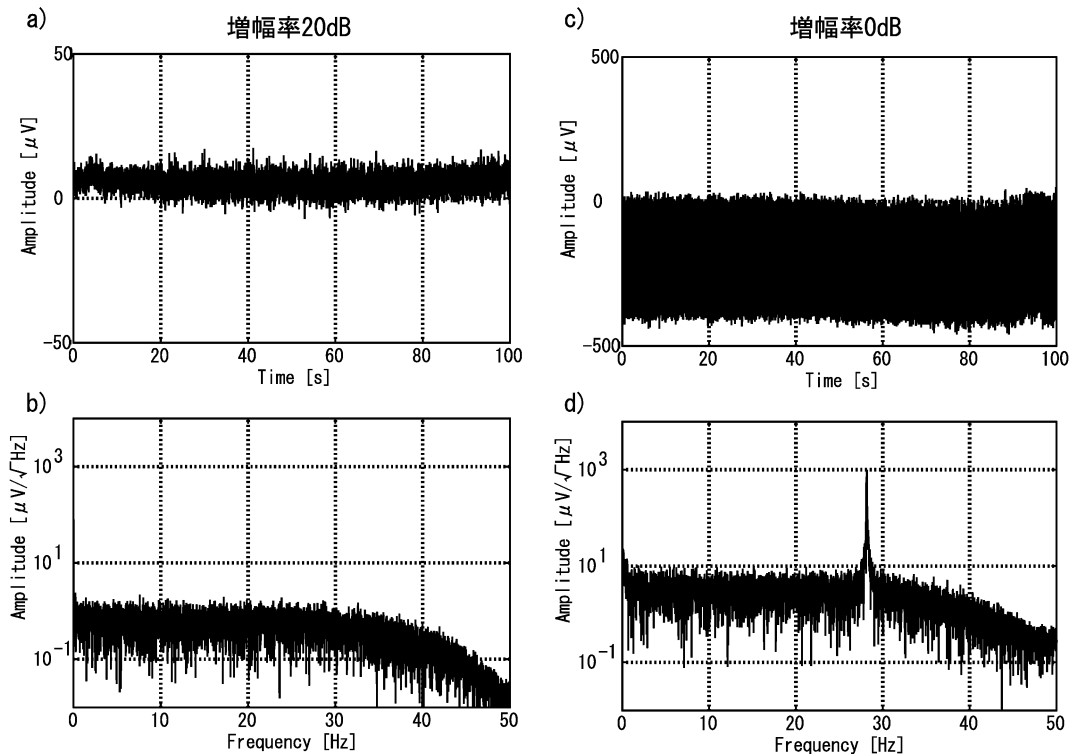


図 6. LS-7000 の自己ノイズ
 a) 増幅率 20 dB 指定時の 100 秒分の時系列信号. b) a) のノイズ密度. c) 増幅率 0 dB 指定時の 100 秒分の時系列信号. d) c) のノイズ密度. 28 Hz に特徴的なノイズが見える.

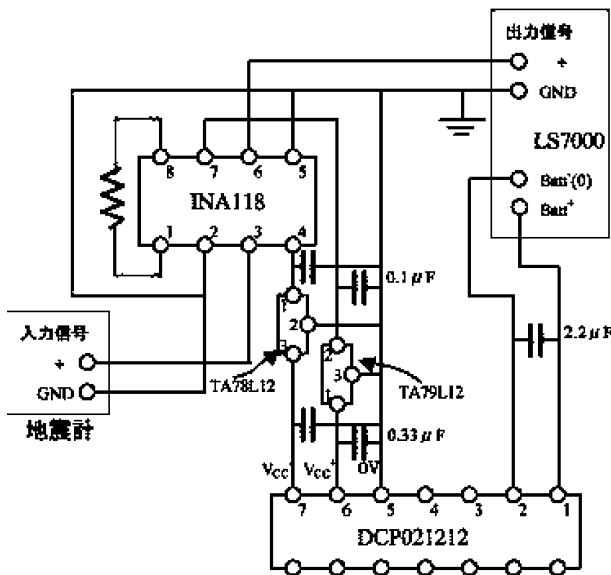


図 7. LS-7000 専用アンプ回路図
 実際のアンプでは、電源部分 (DC-DC コンバータと三端子レギュレータ) を共通にして 6Ch としている。

約 94 dB でカタログ値より悪いが、20 dB 時は最小 $5\mu\text{V}$ 最大 1 V で約 106 dB となっておりほぼカタログ通りである。モノトニックなノイズは後になって $\Delta\Sigma$ 型 AD チップ特有のトーンノイズであることが判明した。これは信号がゼロ

を横切る時に発生するため、これを避けるためには入力に最大レンジの半分のオフセットを与える対策が有効である。ただし以下に紹介する専用アンプではこの点は考慮されていない。

専用アンプの作製

上で述べたように LS-7000 の最高精度は増幅率 20 dB 時で $5\mu\text{V}$ である。高感度速度型地震計、例えば 100 Vs/m のものを用いて計測をした場合には、 $0.05\mu\text{m/s}$ 以上の地動を記述できる。これは非常に静かな場所 (例えば野島曳浦における 800 m ポアホール; Tadokoro *et al.*, 2000) で地動ノイズに相当する振幅である。

アクロス観測では地動ノイズの中に隠れた微弱な信号をスタックして検出するため、地動ノイズをなるべく高い精度で記述することが肝要である。私たちは常に高感度の地震計を多数用意できるわけではないので、LS-7000 での観測用に安価で扱いやすいプリアンプを作製した。この際考慮したのは利便性と低消費電力である。倍率は 10 倍、100 倍の 2 レンジで可変とした。

IC は消費電流 $350\mu\text{A}$ のインスツルメンテーションアンプ INA118PB (Burr-Brown) を用いた。電源は増幅段の安定性を考慮するとバッテリーから取るのが最適と思われるが、観測の際の利便性を考慮して LS-7000 の端子盤に出て

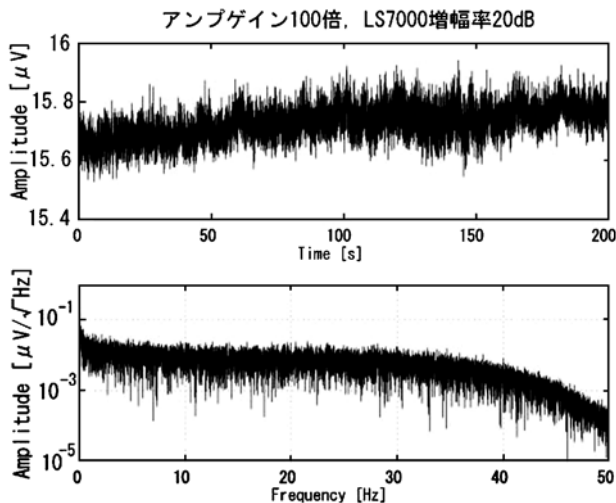


図 8. LS-7000 専用アンプを通した記録波形
上; 200 秒分の時系列波形. 下; 上の図のノイズ密度.

いるセンサ用の電源端子から取った. DC-DC コンバータ DCP021212P (Burr-Brown) を用いてセンサ用電源 12 V を ± 12 V とし, 三端子レギュレータを用いて安定化した. 図 7 に回路図を示す. 基盤は LS-7000 とほぼ同じサイズの筐体に収め, 観測の際に邪魔にならないよう配慮した. また地震計からの入力には LS-7000 に付属の端子盤と同様の仕様とした (図 1 参照; 筐体, 基盤の加工は三弘株式会社にお願した). この際入力は接続の簡便性からシングルエンドとしたが, ノイズ対策の点ではディファレンシャルにするのが正しい判断であった.

図 8 にこのアンプを増幅率 100 倍, LS-7000 を 20 dB で用い, 入力をショートした際の記録波形を示す. $15 \mu\text{V}$ 程度のオフセットはあるものの, 短周期の自己ノイズは入力換算で $\pm 0.1 \mu\text{V}$ 程度となっている. LS-7000 単体で用いた

際の図 6-a の自己ノイズ $5 \mu\text{V}$ に比べて単純に 1/100 になっていないのはアンプの自己ノイズによるものである. しかし $0.1 \mu\text{V}$ (100 Vs/m の速度計を用いて 1 nm/s) は地動ノイズを記述するためには十分な値である.

ま と め

温度が比較的一定な観測壕にて白山工業製の地震計測用データロガー DATAMARK LS-7000 の温度特性試験を行った. 結果振幅の温度依存性は $1.6 \times 10^{-6} [\text{K}^{-1}]$ と非常に小さいことが判った. また自己ノイズ評価を行い, 結果 LS-7000 のダイナミックレンジが 16 ないし 17 bit であり最小で $5 \mu\text{V}$ 程度の信号を検出可能であることがわかった. さらに観測上の必要から, 本ロガー専用の 10 倍, 100 倍可変のプリアンプを製作した. これを用い LS-7000 で $0.1 \mu\text{V}$ の信号まで記録できるようになった.

謝 辞: 本稿をまとめるにあたり, 査読者の武尾 実氏, 森田裕一氏, 飯高 隆氏からは有用なアドバイスをいただきました. 記して感謝いたします.

文 献

- Ikuta, R., K. Yamaoka, K. Miyakawa, T. Kunitomo and M. Kumazawa, 2002, Continuous monitoring of propagation velocity of seismic wave using ACROSS, *Geophys. Res. Lett.*, **29** (13), 5-1-5-4.
- Tadokoro, K., M. Ando and K. Nishigami, 2000, Induced earthquakes accompanying the water injection experiment at the Nojima fault zone, Japan: Seismicity and its migration, *J. Geophys. Res.*, **105**, B3, 6089-6104.
- Yamaoka, K., T. Kunitomo, K. Miyakawa, K. Kobayashi and M. Kumazawa, 2001, Atrial for monitoring temporal variation of seismic velocity with ACROSS system, *Island Arc*, **10**, 336-347.
- 白山工業ホームページ, <http://www.datamark.co.jp/>, 2006