水晶振動子による加速度センサの微動観測への適用性に関する検討

松田　滋夫[1]・中仙道　和之[2]・盛川　仁[3]・飯山　かほり[3]・坂井　公俊[4]

[1]クローバテック株式会社（〒 180-0006 東京都武蔵野市中町 3 丁目 27-26）
[2]セイコーエプソン株式会社 （〒 399-0293 長野県諏訪郡富士見町富士見 281）
[3]正会員 東京工業大学（〒 226-8502 神奈川県横浜市緑区長津田町 4259-G3-7）
[4]正会員 (公財) 鉄道総合技術研究所（〒 185-6540 東京都国分寺市光町 2-8-38）

水晶振動子をセンサとして採用した加速度計 (本稿では水晶加速度計と呼ぶ) は振り子を用いた加速度計と全く異なる動作原理に基づくセンサである．水晶加速度計はその動作原理から理論的にはセンサの大きさによらず高い感度と精度が期待できる．そのため，観測システムについて高感度，低ノイズ，小型，軽量，低消費電力といった相反する性能が要求される微動探査に対して水晶加速度計は高い親和性を有する．本稿では実際に想定される運用環境のもとでの観測を通して水晶加速度計のノイズレベルを評価し微動観測への適用性を検討した．その結果，万能ではないものの，センサ特性を十分に理解したうえであれば，微動観測での利用も十分に可能であることが明らかとなった．

Key Words: *accelerometer, crystal oscillator, microtremor survey, noise floor, sensitivity*

1. はじめに

地震防災を考えるにあたって，特定の場所が将来の地震の際にどのように揺れるかを予測することは極めて重要である．そのためには，対象地域における地盤構造を精度よくモデル化したうえで，適切な震源モデルを与えて地震動を推定することが必要である．地震動の空間変動が地盤構造に強く依存すること，詳細な地盤構造のモデル化の努力によってそれに見合った地震動の推定精度の向上が認められることなどから，地盤構造のモデル化のための物理探査技術の向上は地震防災において極めて重要な意義を持つ．

地盤構造の推定のための物理探査手法には種々の方法が用いられているが，なかでも，いつでもどこでも観測可能な微動を用いた微動探査法は地盤構造の推定に有用な手法のひとつとして，しばしば用いられてきた．微動探査では，対象とする地域において移動観測をしながら地盤震動を高感度で計測する必要がある．そのため微動探査においては，高感度，低ノイズであることはもとより，小型，軽量，低消費電力な観測システムが理想である．ところが，これらは互いに相反する要求性能であり，全てを高いレベルで同時に満足することは容易ではない．これまでは，これらの性能の 1 つまたは複数について妥協して現実的な観測システムを構成して，微動探査を行うことが一般的であった．

近年，MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) と呼ばれる超小型の部品を高度に集積した小型，高性能なデバイスが様々な分野において開発され，実用化されている．地震観測などを目的とした加速度計にも MEMS 技術を用いたセンサが用いられるようになっており，小型，軽量で低消費電力なデバイスが容易に入手可能となっている．しかし，MEMS 技術を用いたセンサにあっても振動計測のためには振り子を用いることが一般的である．高感度かつ低ノイズで地盤震動を測定するためには振り子にある程度の慣性質量がなくてはならないためセンサの小型化が難しい，という MEMS 技術とは相反する本来的な困難が伴っていた．

しかし，水晶振動子をセンサとして用いた加速度計 (本稿では水晶加速度計と呼ぶ) は，その他に類をみない動作原理からこのセンサ用いることで高感度，低ノイズでありながら，小型，軽量，低消費電力という相反する性能を満足する全く新しい小型，高性能な可搬型微動観測システムの実現が期待できる．水晶加速度計の性能については既に筆者らによって基本的な性能の評価が行われている[1),2)]．しかし，観測システムとしてのノイズについて十分な検討が行われていないこと，水晶振動子そのものが衝撃に弱くて壊れやすかった点を改善したうえで信号/ノイズ比 (S/N) を向上させた新型センサが開発されたことから，本稿では以下の検討を行う．すなわち，(1) 新たに水晶加速度計に特化したデータロガーを開発し，(2) 新型の水晶加速度計を用いた観測システムを構築し，(3) 既存の水晶加速度計を含む種々の観測システムとの比較観測を行い，(4) センサのノイズレベル (本稿ではノイズフロアと呼ぶ) に注目

して新しい観測システムの基本性能を評価し，(5) このセンサが微動観測に適しているかどうか検討する．

2. 水晶加速度計を用いた地盤震動観測システムの開発

(1) 水晶加速度計の動作原理と評価対象センサ

水晶加速度計をセンサとして採用する地盤震動観測システムの開発にあたっては，換振器としての水晶加速度計の動作原理を簡単に確認しておく．なお，詳細は既往の研究[2] に詳しい．

水晶加速度計は振り子を用いた従来型の加速度計と全く異なる動作原理に基づくセンサである．水晶振動子はごくわずかな電力を与えるだけで，その個体がもつ固有振動数で極めて安定的に振動を続けるという特性を持つ．その固有振動数は温度と重力加速度に依存して変化するが，その要因 (温度や重力加速度) と固有振動数の変動量との間には明確な関数関係が存在する．このことから，カウンタを用いて固有振動数を計測し，温度による水晶振動子の固有振動数の変動を適切に補正することで振り子を用いることなく加速度の時間変化をリアルタイムに計測することができる．厳密には，カウンタの出力をデシメーションしてから加速度値に変換して外部へ出力するため，群遅延時間の分だけ加速度値の出力が遅れることになる．ただし，群遅延時間はデシメーションフィルタの定数から理論的に決定可能であるため，時間遅れは後処理で補正可能である．

このような原理に基づく水晶加速度計はセイコーエプソン社より製品として出荷されており (以下，A351 と呼ぶ)，筆者らがこれまでの研究でも，A351 を対象として評価を行ってきた．水晶加速度計は，センサ部が水晶によって構成されているため，本質的に衝撃に弱く，衝撃によって壊れやすいという欠点があった．可搬型の地震計や微動計として使う場合，運搬時の多少の衝撃には耐え得る耐衝撃性能が不可欠である．ごく最近になって，耐衝撃性能を改良するとともに，S/N が改善された新しい水晶加速度計のサンプルが同社よりリリースされたため (以下，A352 と呼ぶ)，本稿ではこれを主たる評価対象とする．

(2) 水晶加速度計の仕様

水晶加速度計を可搬型の地震計または微動計として利用するためには，センサを適切なケースに実装し，データロガーによって記録をとることができる観測システムを構築しなくてはならない．

水晶加速度計はその動作原理から，水晶振動子の固有振動数をカウントし，その出力を内蔵の MPU によって加速度値に変換してさらにデシメーションフィルタによってデシメーションを行ったうえで，設定されているサンプリングレートで加速度値を出力する．通常の加速度計はセンサの加速度応答が電圧に変換されてアナログ出力されるため，適切なアナログ/デジタル変換器 (ADC) を通してデータロガーで記録するのが一般的である．しかし，水晶加速度計はセンサ内で演算処理を行っているため出力はシリアル通信によるデジタル出力である．

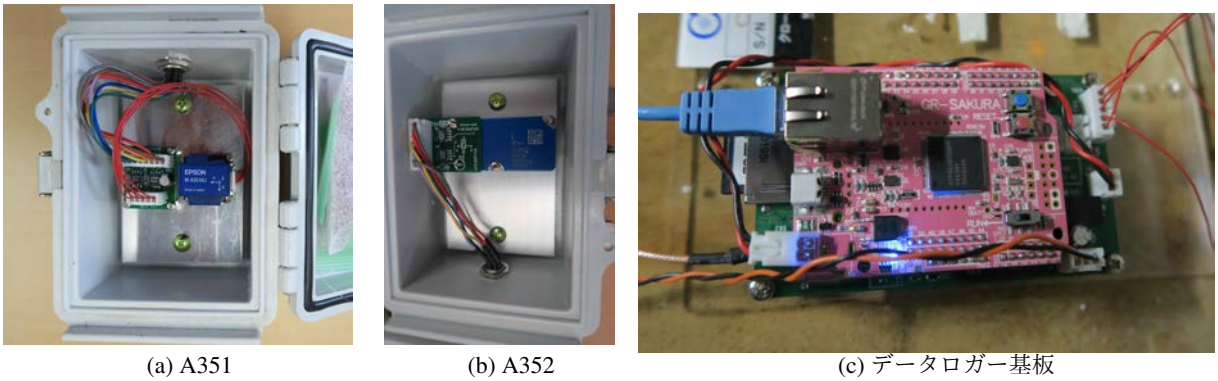
センサ出力はセンサ内蔵のクロックに同期してシリアルに出力されるだけなので，データの受信側であるデータロガーのクロックとは非同期である．そのため，長時間にわたって記録をとるとクロックの相対的な誤差が蓄積されて時刻精度に問題が生ずることになる．このような問題を回避するために，A351 および A352 は外部クロックを接続するための端子を有しており，データの出力タイミングを外部クロックに同期させることができる．これは地震計や微動計として多数のセンサを用いて同時観測を行う際にセンサ間のデータの同期をとるために不可欠な機能である．

(3) データロガーの開発

水晶加速度計の評価にあたって，まず，可搬型地震計として使えるように A351 および A352 の機能を活かすことができる専用のデータロガーの開発を行った．データロガー側でロガーとセンサのクロックを一元管理できるよう，原発クロックとして VCTCXO (電圧制御可能な温度補償型水晶振動子) または OCXO (オーブンコントロール型水晶振動子) を実装可能としている．いずれの場合でも内蔵 GNSS 受信機または外部 NTP での時刻同期が可能である．VCTCXO では GNSS からの 1PPS (pulse per second) 信号を用いて，その発振周波数を制御し時刻精度を確保している．OCXO は周波数制御はしないものの絶対時刻に同期したのち，長期にわたって高精度にクロックが自走できるためトンネルなど電波が届かない場所での単独観測には有効である

本稿で述べる試作機ではセンサ (= 水晶加速度計) の設置の自由度を高めるためにセンサ部分とロガーを別筐体とした．水晶加速度計の出力は 3.3V CMOS レベルでのシリアル出力のため，出力信号の電圧レベルが低いうえにシングルエンドでノイズに弱く信号線を長距離にわたって引き回すことができない．そのため，センサ出力の直近に差動変換回路をつけて RS-422/485 による長距離伝送を可能とした．**図-1**(a), (b) に水晶加速度計のケーシングの状況を示す．青いセンサの直近に見える緑色の基板が差動変換基板である．

データロガーは，CMOS レベルおよび RS-232/422/485 によるシリアル通信が可能であれば記録をとる，という目的を達することができる．また，ロガー内でアナ



(a) A351　(b) A352　(c) データロガー基板

図–1 水晶加速度計のケーシングとデータロガー基板

ログ信号を取り扱う必要がないため，ノイズに対しても特別な配慮を必要としない．そのため，ロガーの実体は省電力なワンボードマイコンで十分である．しかし，観測システムとしての機能を実現するためには，上述のクロック回路を制御するインターフェースや記録を書き込むためのストレージメディア，設定やデータモニタのための通信に用いるネットワーク・インターフェースなどは必要である．試作機では，ワンボードマイコンとしてルネサスエレクトロニクス社の桜色の基板がかわいい GR-SAKURA を用い，電源回路をはじめとして，シリアル受信器，GPS 受信機，クロック用水晶振動子などの周辺回路を実装した基板を接続している．**図-1**(c) にデータロガー基板を示す．ピンク色の基板が GR-SAKURA，その下の緑色の基板が周辺回路基板である．写真右上のソケットがシリアル通信用コネクタでセンサに接続される．写真左側にはネットワークポートとその下に SD カードソケットが見える．

ADC はセンサ側に内蔵されているため，データロガーはクロック回路を別にすれば簡素な回路で実現できている．なお，試作機では，水晶加速度計のデシメーションフィルタの群遅延時間に起因する時刻遅れ分を補正して，正しい絶対時刻で波形を出力している．

3. ノイズフロアの検討

(1) 観測について

水晶加速度計とデータロガーを用いて観測システムのノイズレベル (以下ではノイズフロアと呼ぶ) を検討する．リファレンスとなるセンサとして，ナノメトリクス社の Titan 加速度計 (以下，Titan) を用いる．また，記録の質はデータロガーのノイズフロアにも依存するため，異なる 2 種類のデータロガーを用意した．ひとつは，aLab 社の AK-002，もうひとつはナノメトリクス社の Centaur である．さらに，高感度での観測が期待できる動コイル型速度計 (近計システム社の KVS-300, 固有周期 0.5 秒) を AK-002 に接続して記録した．

表–1 東丹沢における観測の概要 (サイト:OKG)

日時：　2019 年 8 月 13 日 13:50 – 14:40
場所：　神奈川県相模原市 松茸山自然の森公園
奥野林道 奥野口駐車場
緯度：35°31′31.6″N，経度：139°11′17.2″E
サイトコード：OKG

センサ	ロガー	SF* [Hz]	ゲイン [倍]	備考
A351	試作機	200	–	
A352	試作機	200	–	ノイズ低減フラグ Off
Titan	AK-002	100	1	フルスケール 0.25G†
Titan	Centaur	100	1	フルスケール 0.25G†
KVS-300	AK-002	100	256	ゲイン 1 倍 ‡

*：サンプリング周波数
†：Titan の設定
‡：ステップレスポンス記録時

表–2 KVS-300 の設置状態での動特性 (OKG)

成分	固有周期 [s]	減衰定数
NS	0.504	0.684
EW	0.496	0.640
UD	0.508	0.671

ノイズフロアが明瞭に見えるためには，微動レベルが非常に低い環境であることが必要である．そのため，東丹沢の岩盤路頭の近傍に機材を持ち込んで観測を実施した．この地域は愛川層群最下層の宮ヶ瀬層 (安山岩質火山角礫岩) の路頭があることが知られており，微動レベルは非常に低いものと期待される．観測の諸元を**表-1** に，観測時の状況を**図-2** に示す．

動コイル型速度計 (KVS-300) は設置状態での固有振動数と減衰定数を決定するために，観測に先立ってステップレスポンスを記録している．この記録を用いて後処理で計器補正を行う[3]．得られた定数を**表-2** に示す．

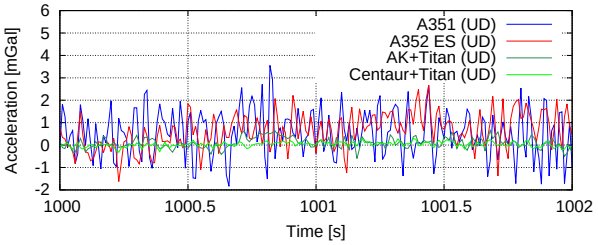
(2) 観測結果

得られた加速度時刻歴波形の例を**図-3** に示す．水晶加速度計はサンプリング周波数を 200 Hz としているが，他の記録と比較しやすいように，隣あうサンプルの移動平均をとってから 100 Hz にリサンプリングした．また，記録には温度変化による大きなドリフトが含まれているため，カットオフ周波数が 0.025 Hz と 30 Hz の

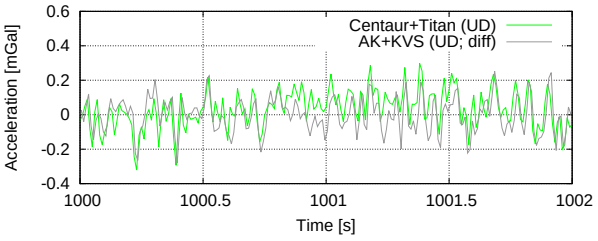
(a) 観測地点遠景

(b) センサおよびロガーの設置状況

図–2 奥野口駐車場 (OKG) におけるセンサの設置状況．(a) の奥に見える看板の先に風化した岩盤路頭がある．センサは (b) の中央部，左上の銀色に光るシャーシから時計回りに KVS-300 (銀色), Titan (緑色) が 2 台，1 つ飛ばして A351, A352 (灰色)．ロガーは (b) の右下から時計回りに水晶加速度計用試作機が 2 台 (透明，灰色)，Centaur (白色)，AK-002 が 2 台 (黒いケースと左上の透明コンテナ内)．

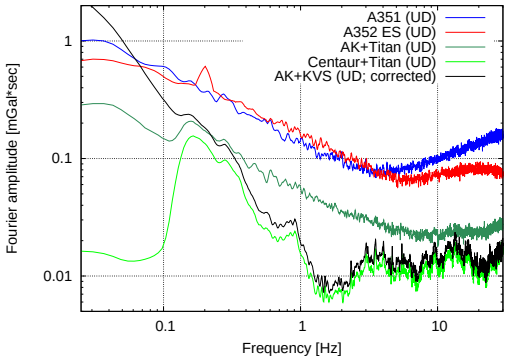


(a) 加速度計の出力



(b) 速度計の出力

図–3 OKG における加速度の時刻歴波形 (UD 成分).



図–4 OKG における加速度のフーリエ振幅の比較 (UD 成分)

バンドパスフィルタを適用して低周波数および高周波数成分を落としている．

図-3(a) から，水晶加速度計の波形は非常に振幅が大きく，かつ互いに相関がないことがわかる．一方，**図-3**(b) では速度計の出力 (計器補正をしていない波形) を前進差分によって近似的に微分して加速度を求め，加速度計 (Centaur + Titan) の出力と比較している．

微分の近似精度がかなり悪いことに配慮をするまでもなく，両者はよく一致している．異なるセンサとロガーの組み合わせによって得られた記録が整合していることから，これらの観測システムによってこの地点での微動が正しく記録されているものと推察される．このことより，**図-3**(a) に見られる水晶加速度計の波形は大きなノイズが含まれており，そのノイズレベルは時間領域で微動信号の 10 倍ほどの振幅であることがわかる．

このことを確かめるために得られた記録を振動数領域で比較する．記録には温度変化に伴う大きなドリフトがあるため，(1) 時間領域でカットオフ周波数が 0.025 Hz と 30 Hz のバンドパスフィルタを適用し，(2) フィルタの影響をうけている記録の最初と終わりの 10 分間を除く 30 分の記録のなかから，(3) 163.5 秒の区間を 12 個切り出して，それぞれの区間をフーリエ変換し，(4) それぞれに Hanning window を 5 回適用して振動数領域で平滑化し，(5) 得られたフーリエ振幅を 2 乗して (パワーで) 算術平均をとって，(6) その平方根に継続時間を乗じてフーリエ振幅スペクトルを求める．このようにして得られたフーリエ振幅スペクトルの例 (UD 成分) を**図-4** に示す．この図において，KVS-300 のフーリエスペクトルは**表-2** に示す定数を用いて 1 自由度系の周波数応答関数の逆数を振動数領域で乗じることで計器補正をし[3]，さらに $2\pi f$ を乗じて地動の加速度のフーリエスペクトルに変換している．ここで f は振動数である．

図-3(b) でみたように，AK-002 + KVS-300 および Centaur + Titan は対象としている周波数帯域のほとんど (0.15 から 30 Hz) においてよく一致している．それに対して水晶加速度計 (A351, A352) および AK-002 + Titan は両対数軸上でほぼ直線的に変化するフーリエ振

(a) 外観　(b) エントランス　(c) トンネル中央のアルコーブ

図–5 東京工業大学すずかけ台キャンパス レーザートンネルの外観と内部の様子 (TUN)

幅を示している．これは，観測システムの回路内で生じている 1/f ノイズだけが記録されていて，肝心の信号である微動はノイズに埋もれていてまったく記録されていないことを示している．このことは Centaur + Titan によるフーリエ振幅が全周波数領域にわたって AK-002 + Titan のフーリエ振幅より小さいことからも理解される．また，AK-002 のノイズフロアは水晶加速度計のノイズフロアの 1/10 程度で，このことは**図-3**(a) において AK-002 + Titan の振幅が Centaur + Titan とほぼ同程度であることと対応している．さらに，A352 のノイズフロアは 5 Hz 以上の高周波数領域で A351 に比べて著しく改善している．

AK-002 + KVS-300 はセンサが速度計であること，ロガーの入力段で 256 倍のゲイン (利得，増幅) をかけていることから，AK-002 + Titan に比べて見かけ上，ノイズフロアが低くなっているが，0.1 Hz よりも程周波数領域ではフーリエ振幅が大きくなって Centaur + Titan のそれから大きく乖離している．また AK-002 + Titan は 0.15 から 0.3 Hz までの周波数領域のみで Centaur + Titan とほぼ同じフーリエ振幅を示している．観測を行った日は，小笠原諸島近海に台風 10 号が停滞しており，太平洋を震源とする脈動 (0.1 から 1 Hz 程度の周期帯域の微動で，海洋における波が海底を打ち付けることで生ずると考えられている微動のこと) レベルが特に大きかったと考えられ，脈動レベルが AK-002 のノイズフロアよりも大きくなっているためにこの周波数領域でのみ，微動が記録されていると考えられる．

このように，時間領域で片振幅 0.2 mGal に満たないような極めて微動レベルが低い環境では，観測システムのノイズフロアを明確に知ることができ，水晶加速度計のノイズフロアを明らかにすることができた．また，Centaur + Titan および AK-002 + KVS-300 の組み合わせは極めて微小な微動レベルにあっても適切な設定と必要に応じて後処理を施すことでリファレンスとして信頼に足ることがわかった．

表–3 レーザートンネルにおける観測の概要 (サイト:TUN)

日時：　2019 年 8 月 22 日 11:00 – 9 月 2 日 9:00
場所：　神奈川県横浜市緑区
東京工業大学すずかけ台キャンパス
レーザートンネル中央アルコーブ
緯度：35°30′58.3″N，経度：139°29′4.3″E
サイトコード：TUN

センサ	ロガー	SF* [Hz]	ゲイン [倍]	備考
A352	試作機	200	–	ノイズ低減フラグ On
Titan	Centaur	100	1	フルスケール 0.25G†

*：サンプリング周波数
†：Titan の設定

4. 微動観測

(1) 観測について

水晶加速度計によって一般的なレベルの微動を観測可能かどうかを検討する．堆積層が厚い場所では一般には微動レベルが非常に大きく，十分な感度と性能を有するセンサの性能を知るには大雑把すぎてあまり意味がない．そこで，本節では軟弱な堆積層があまり厚くなく，かつ，自動車等の往来による外来震動がほとんどない堆積層を有する地盤としては微動レベルが非常に低い場所をでの観測を行う．このような場所で正しく微動を観測できれば，通常の微動探査で問題が生じることはほとんどないはずである．

そんなに都合のよい場所があるのか，あったとしてそれを簡単に見つけることができるのか，という問題があるが，幸いにも東京工業大学すずまけ台キャンパス内にあるレーザートンネルはまさにそのような場所の 1 つであると考えている．**図-5** にレーザートンネルの外観および中央部のアルコーブを示す．トンネルは RC のトンネル用規格品を半地下に埋めたもので，**図-5**(a) の左半分にみられる盛り上がりの部分がトンネル躯体を覆う表土である．(b) に見られる階段で地下へおりて前室を通り抜けると (c) のようなトンネルとなっている．トンネル中央部にはアルコーブがあり，その部分にセンサを設置している．トンネル内は 1 年を通して気温が摂氏 16 から 17 度程度で安定していて温度に敏感な

(a) ベースプレート

(b) センサおよびロガー

図–6 レーザートンネル (TUN) におけるセンサの設置状況．アルコーブのコンクリート床にアンカーを打って 20mm 厚のアルミ板を固定し，その上にセンサをねじ止めしている．(b) の右奥，右から Titan, A352．ロガーは左列の一番手前 (下) が A352 用試作機，一番奥 (上) が Centaur.

センサの評価に適している．しかし，夏は結露が酷く，冬は非常に乾燥するため，特に夏季は試作機のようなむき出しの電気回路等の取り扱いには注意が必要である．

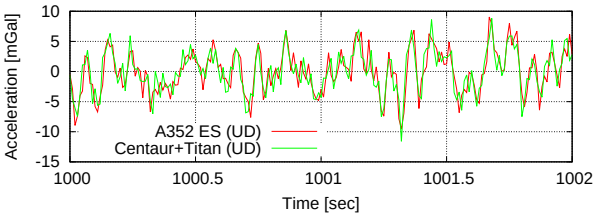
すずかけ台キャンパスは，関東平野の西端に近く，工学的基盤が比較的浅いところに存在している．トンネルのある場所も例外ではなく，表土を取り除いて置かれたトンネル躯体は安定した地盤上にある．

観測にあたっては，トンネル中央のアルコーブのコンクリート床にコンクリートアンカーを打って 20mm 厚のアルミ板を固定し，センサを格納したシャーシをアルミ板にネジで固定している．前節の OKG における観測から Centaur + Titan をリファレンスとすることができることがわかったので，この観測では Centaur + Titan と A352 を比較することとする．

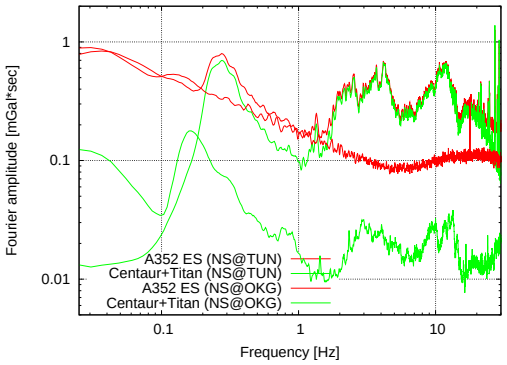
表-3 に観測の諸元を，**図-6** にアルミ板の固定状況とセンサの設置状況を示す．本稿で言及しないセンサもあわせて置かれているが，本稿で解析および考察に用いたセンサは**図-6** のキャプション中に記載している．

(2) 観測結果

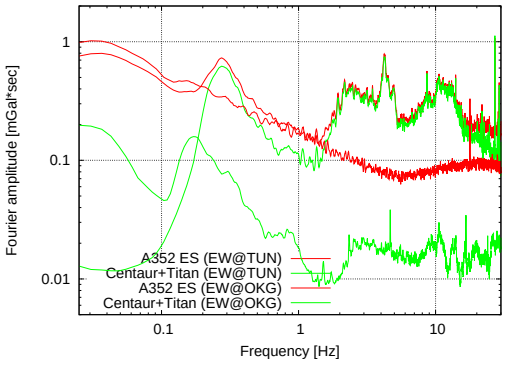
得られた加速度波形の例を**図-7** に示す．図に示した波形は 2019 年 8 月 24 日未明の 1:00 から 1 時間の記録



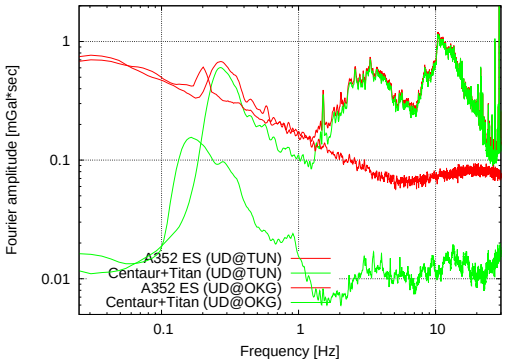
図–7 TUN における加速度の時刻歴波形 (UD 成分)



(a) NS 成分



(b) EW 成分

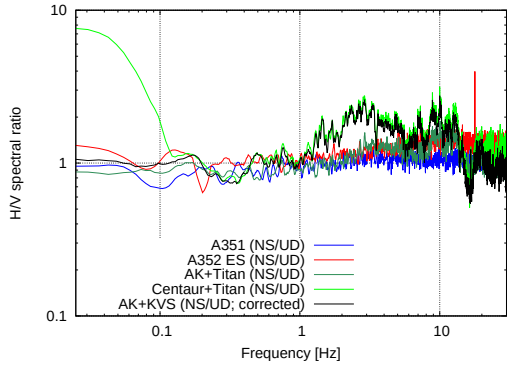


(c) UD 成分

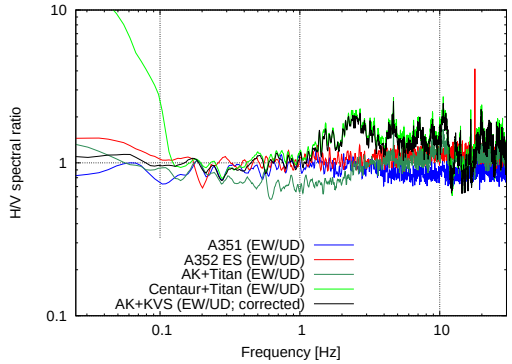
図–8 加速度記録のフーリエ振幅の比較 (OKG, TUN)

から 2 秒間を切り出したものである．時間領域でのデータ処理 (リサンプリング，バンドパスフィルタ) は OKG で得られた記録の場合と同じである．

OKG の観測では A352 はランダムな波形を描いていて Centaur + Titan の波形とまったく相関がみられなかったが，**図-7** からは目視でも両者の波形が振幅，位相ともによく対応していることがわかる．

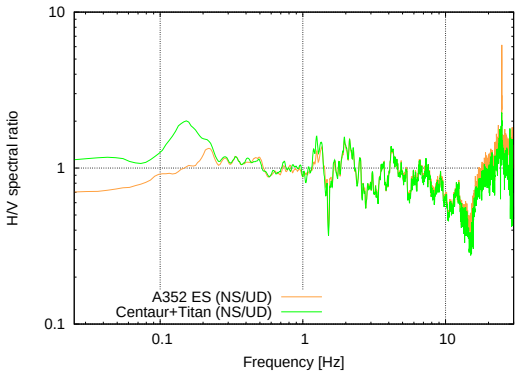


(a) NS/UD

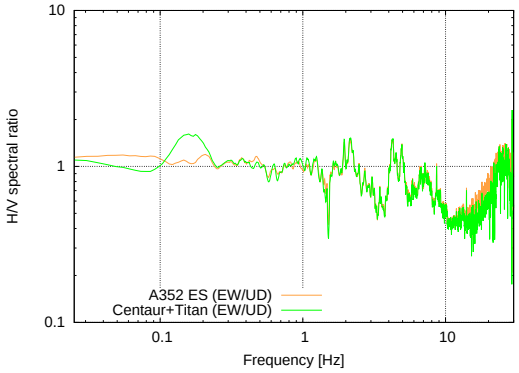


(b) EW/UD

図–9 OKG における H/V



(a) NS/UD



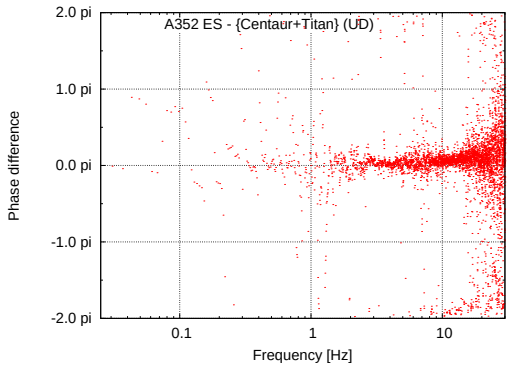
(b) EW/UD

図–10 TUN における H/V

TUN で得られた加速度波形のフーリエスペクトルを OKG で得られた記録のうち同じセンサによる加速度波形のフーリエスペクトルとともに**図-8** に示す．フーリエ振幅の計算方法は OKG の場合と同じであるが，解析に用いた記録長は 50 分ではなく 2019 年 8 月 24 日未明の 1:00 からの 1 時間分を用いて解析区間は 18 個の区間を選んで用いている．図中の同じ色の線は同じセンサの出力であり，それぞれの色でフーリエ振幅のレベルが高い方が TUN における記録 (太線)，低い方が OKG (細線) で**図-4** に示したものと同じである．**図-8** の Centaur + Titan のフーリエ振幅より，TUN の微動レベルは OKG のそれに比べてほぼ 1 桁大きいことがわかる．OKG と TUN の加速度時系列波形 (**図-3**(a), **図-7**) を比較すると TUN の振幅のほうが 1 桁以上大きいこととも整合している．

OKG における A352 のフーリエスペクトルは Centaur + Titan のそれとは全く異なるが，TUN における記録の場合は互いによく対応している．しかし，よく見ると，0.5 から 1.5 Hz あたりの周波数領域において，A352 のフーリエスペクトルは Centaur + Titan に比べて 1.5 倍ほど大きく，しかも直線的に変化していることがわかる．

TUN における 1 Hz 前後の A352 のフーリエスペクトルの形状は，**図-8** に重ねて描いている OKG におけるフーリエスペクトルの形状とほぼ一致していること



図–11 TUN における Centaur + Titan と A352 の位相差 (UD 成分，2019/08/24 1:00am)

が直ちに理解される．これは，OKG で明らかとなった A352 のノイズフロアよりも微動の振幅レベルが低いために信号がノイズに埋もれているということを明快に示すものである．

また，15 Hz よりも高周波数領域において A352 のフーリエ振幅が Centaur + Titan に比べてやや大きくなっていることがわかる (特に EW 成分)．この周波数領域では，センサのノイズフロアよりも十分に高い微動レベルが Centaur + Titan によって記録されているため，センサ内部のノイズ以外に高周波数の外来ノイズの影響を受けていることが考えられる．水晶加速度計はセン

サ本体部分の設置条件に非常に敏感であることがわかっているため，ケーシングや接地などにさらなる工夫が必要であることを示唆するものと考えている．

5. 議論

微動探査によって何を知りたいか，という目的に依存するものの，微動観測で得られた波形記録を用いてやることといえば，(1) 単点での微動の 3 成分記録を得て水平動/上下動スペクトル比 (H/V) を求めてそのピーク (または谷) を与える周波数を読み取るか，(2) 多数のセンサを配置して同時観測を行うアレー観測を行って位相速度を推定すること，がほとんどである．

まず，(1) のための検討として，これまでに得られた微動記録を用いて H/V を求めた．得られた OKG および TUN で得られた記録の H/V をそれぞれ**図-9**，**10** に示す．**図-9** より，ノイズフロアが微動レベルに対して十分に低い Centaur + Titan および AK-002 + KVS-300 以外のシステムでは，H/V はほぼ 1 で一定となっている．これは，1/f ノイズはシステム固有の性質であるため，NS, EW, UD 成分のいずれでもほとんど同じであり，結果としてそれらの比をとれば 1 に近くなっているだけで，自明の結果である．一方，Centaur + Titan および AK-002 + KVS-300 は 1 から 10 Hz の周波数領域にいくつかのピークが，15 Hz あたりに明瞭な谷が見えている．

本稿が目的としている本題からはいささか脱線するが，H/V がほとんど一定になっているのでその場所には堆積層がない，という主旨のことを言う人 (書いている論文) を目にすることがある．堆積層が非常に少ない堅固な地盤上で微動を測定した場合，OKG のように微動レベルが極めて低いことが多い．したがって，H/V を求めてもシステムのノイズの比をとっているだけということは十分に考えられる．本稿の検討結果は，ノイズフロアの性状が研究者の間で一般に認知されているような特別な地震計 (たとえば，ブロードバンド地震計の STS-2 など) を用いている場合以外，ノイズフロアがわかる資料を示すか，さもなくば，観測記録のなかでもっとも信号レベルが低いフーリエスペクトルを示してそれがノイズに埋もれていないことを示すことなく H/V だけが示されていてもその記録は一般には信頼に値しないことを意味している．

議論を本題に戻す．**図-10** を見ると，A352 と Centaur + Titan の H/V はよい対応を示していることがわかる．1 Hz 前後では，A352 は明らかに微動レベルがノイズフロアより低く，正しく微動が記録されていないようにみえたが，意外にも細かい H/V の変動が正しく表現されていることがわかる．H/V の山谷を与える周波数を拾うだけであればあまり大きな問題はなさそうに見える．ただし，A352 に見られる 0.25 Hz あたりのピークは，0.2 Hz 以下でノイズフロアに埋もれていく微動信号とノイズのバランスによってピークのように見えているだけで，実際には Centaur + Titan の H/V に見られるように 0.15 Hz あたりのピークが物理的にあるべきピークであると想像される．

以上のことからわかることは，(1) 少しだけであれば微動信号がノイズフロアに埋もれていても比をとる場合には尤もらしい結果が得られるが，(2) 微動信号がノイズフロアに埋もれていく端部では見かけ上のピークが見えることがあり物理的意味があるピークかどうか疑わしい場合がある，ということである．なお，(1) について，どの程度の S/N まで許容できるのかは本稿で得た記録だけでは十分な検討をすることはできなかった．

1 Hz 前後の周波数領域では微動の震源があまり存在しないために，環境や場所によっては TUN のように微動レベルが非常に低くなって S/N が厳しくなることはこれまでの筆者らの経験から少なからずあると考えられる．このような場所でも，地盤構造によっては 1 Hz 前後に H/V のピークが見えることはあり，1 Hz 前後の周波数領域での S/N にあまり余裕がないセンサ (水晶加速度計に限らず一般論として) を用いてそのような場所でも正しく H/V の形状を得られるかどうかを，対象とする観測地域の地盤条件や観測当日の気象条件等に基づいて予備的な検討しておくことは重要である．

本節冒頭に述べた微動探査で行う観測の (2) については，開発中の水晶加速度計のサンプルを多数入手することができないので，直接的な検討は難しい．そこで，TUN での記録を用いて，Centaur + Titan と A352 の位相差を調べた．フーリエ振幅を求める場合と同じ手順でそれぞれのセンサの出力波形のフーリエ位相を求めてその差を求めたものが**図-11** である．

一般に位相特性は振幅特性に比べて劣ることが多いが，位相差が 0 (または $\pm 2\pi$) の周りに集まっている周波数帯域は非常に限られており，微動レベルがノイズフロアに埋もれる 1 Hz 前後の周期帯域では位相差は大きく乱れている．もちろん，リファレンスとしている Centaur + Titan の位相特性も振幅特性ほど安定しているとは限らないので，A352 との位相差の乱れはある程度は (どの程度かは記録の利用目的に依存する) 許容すべきである．しかし，**図-11** に見られる 1 Hz 前後の位相差の乱れは多くの場合，許容できないレベルであると想像される．このことはノイズフロアに信号が埋もれるような低い微動レベルのもとでアレー観測をおこなっても位相速度を正しく推定することはできない，ということを意味している．逆に言えば，用いるセンサ (観測システム) のノイズフロアを正しく理解していれ

ば，記録を利用可能な周波数領域を合理的に選定できるということである．水晶加速度計についてもこのことは当てはまるので，例えば，TUN のような微動レベルの場所でアレー観測をするのであれば，2 から 15 Hz あたりであればある程度は位相速度を推定可能であると期待される．

6. まとめ

本稿では水晶振動子による加速度センサ (水晶加速度計) の微動探査への適用性を検討するために微動レベルが大きく異なる二箇所で他のセンサとともに同時観測することで水晶加速度計の性能評価を行った．本稿で得られた結果を以下にまとめる．

- 時刻歴波形で 0.2 mGal 程度の微動レベルの場所では水晶加速度計のノイズレベルの方が微動レベルよりもはるかに大きい．結果として水晶加速度計のノイズフロアを明確にすることができた．
- 既存の水晶加速度計 (A351) に比べて新しい A352 は短周期領域で顕著にノイズフロアが低くなっている．
- 堆積層がある場所のなかでは微動レベルがかなり低い場所では 1 Hz 前後の微動レベルが特に低い周波数領域においてノイズフロアと微動レベルがほぼ同等あるいは微動レベルのほうが低くノイズが卓越する．そのため，フーリエ振幅はノイズの影響を大きく受ける．
- H/V のようにスペクトル比を取る場合は，ノイズの影響はある程度は相殺されるため，ノイズに対してロバストな結果が得られる可能性がある．
- ノイズフロアに微動信号が埋もれる周波数領域では位相特性は大きく乱れるため，位相速度の推定には適さないと考えられる．
- 水晶加速度計はノイズ特性を十分に理解して使うのであれば，微動から強震動まで広いダイナミックレンジの観測に利用することができる可能性が高い．

水晶加速度計による微動探査は，可搬性や省電力性まで含めたシステム全体としての性能を考慮すると現実的な選択肢の一つでであると言える．特に H/V を目的としていて可搬性や長時間動作などの性能が重視される場合には，既存の観測システムに対してあまり遜色ない精度で (少し劣ることもあるが) 記録を得ることができることは，失うものに比べて得るもののほうが多いと考える場面もあろう．

一方，アレー観測による位相速度の推定を目的とするような場合には十分な微動レベルがあるような環境でなければ位相速度の推定そのものが困難な場合も少なからずあると考えられる．予備調査などによって対象地域の状況を十分に検討した上で適切なシステムを準備すべきである．このような目的では，加速度計に比べて速度計のほうが S/N の観点からは圧倒的に有利であることも念頭に置いたうえで観測計画をたてることが適切であると考えている．

謝辞: 本研究の一部は科学研究費補助金 (課題番号「19H02400」および「17H02064」) の支援を受けた．

参考文献

1) 松田滋夫・中仙道和之・盛川仁: 水晶振動子を用いた加速度計の特性に関する基礎的検討, 日本地震学会 2014 年秋季大会予稿集，S02-P06, p.192, 2014.
2) 松田滋夫・中仙道和之・盛川仁・飯山かほり・坂井公俊 : 水晶振動子による加速度センサーの感度特性に関する一検討, 土木学会論文集 A1 特集号 (地震工学論文集，第 37 巻), Vol. 74, No. 4, pp.I_302–I_312, 2018.
3) 盛川仁・山中浩明 : 地盤と地盤震動 —観測から数値解析まで—，朝倉書店，2019.

(Received September 10, 2019)
(Accepted XXX YYY, 2019)

AN EXPERIMENTAL STUDY FOR APPLICATION OF ACCELEROMETER MADE OF CRYSTAL OSCILLATOR TO MICROTREMOR SURVEY

Shigeo MATSUDA, Kazuyuki NAKASENDO, Hitoshi MORIKAWA,
Kahori IIYAMA, and Kimitoshi SAKAI

An accelerometer that employs a quartz oscillator as a sensor is a sensor based on a completely different operating principle from an accelerometer that uses a pendulum. The quartz accelerometer is theoretically expected to have high sensitivity and accuracy regardless of the size of the sensor. From this reason, quartz accelerometers are suitable for microtremor survey that requires contradictory performance such as high sensitivity, low noise, small size, light weight, and low power consumption. In this paper, the noise level of a crystal accelerometer is evaluated through observation under the actual operating environment, and the applicability to microtremor observation was discussed. As a result, it was clarified that although it is not universal, it can be used for microtremor observation if the sensor characteristics are fully understood.