

水晶振動子による加速度センサーの 感度特性に関する検討

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センサは振り子による加速度センサとは異なり、その原理から小さなセンサでも高い感度と精度が期待できる。しかし、水晶振動子は温度変化の影響を強く受ける。本研究では、既に実用化されている水晶振動子による加速度センサがどれだけの精度を有するかを確かめるためにセンサ全体をデュワー瓶に入れて高度な温度管理をしながら温度と共に加速度値を記録した。定点における長時間測定および絶対重力値があきらかな多数の重力基準点での測定を実施し、温度と加速度値の関係を定性的、定量的に明らかにしたうえで、簡単な回帰式を用いてモデル化した。得られたモデルを用いて加速度記録を温度を用いて補正することで、2~3 mGal の精度で加速度値を求めることができることを明らかにした。

Key Words: oven controlled crystal oscillator, accelerometer, relative gravimeter, sensitivity, Mt. Tsukubasan

1. はじめに

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るようになってきた。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ーが用いられるようになってきた。振動計測のためには振り子を用いることが一般的であり、高感度な計測には振り子にある程度の質量がなくてはならないため小型化が難しい、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、振り子によらない加速度の計測方法も古くから知られており、そのひとつに弦重力計がある¹⁾。弦重力計は振動子の固有振動数が重力加速度によって変化することを利用して、弦の振動数の変化を測定することで重力加速度を高精度に測定するものである。大きな外乱を受けるため頑丈なセンサを必要とされる船上重力計などで用いられた。この原理は、弦の代わりに水晶振動子を用いることで精密電子天秤において以前から実用化されている。加速度センサについても同じ原理を用いることで実現可能であるが、固有振動数が非常に高い水晶振動子を用いて、高精度の周波数カウンタで安定して振動数の変化を測定し、その出力を適切にデシメーションする必要があるため周辺回路や演算負荷が大きい。近年これらの問題点を解決して、水晶振動子を用いた加速度センサが実用化されている。筆者らは、水晶振動子を用いた小型、軽量の加速度計の

地震計としての性能について検討を行ったが²⁾、非常に高い感度を有しており、地震計以外にも加速度計測のためのセンサとして高いポテンシャルを持つことを確認した。

水晶振動子を用いた加速度センサは振り子を用いたセンサと異なり、原理的には大きさに依存することなく高感度の加速度計測が可能である。その一方で水晶振動子の固有振動数が強い温度依存性をもつという特徴をもつ。そのため、温度変化にともなう固有振動数のゆらぎによってセンサの感度をマスクしてしまうという問題がある。本研究では高精度な温度管理のもとで水晶振動子による加速度センサの感度特性を調べることで今後の応用の可能性を検討しようとするものである。

2. 水晶振動子による加速度センサの温度特性

(1) 加速度センサの構成

既に述べた通り、水晶振動子は温度に対する感度が高く、その固有振動数は振動子の温度に大きく依存する。そのため、温度補償回路を用いたり、オープン内に水晶を封入して温度の影響を受けにくくするということが行われてきた。

検討対象とするセンサ (セイコーエプソン製 A351) は、既に地震計および傾斜計として実用化されている。このセンサは 2 種類的水晶振動子から構成されており、ひとつは加速度センサ、もう一つは周波数カウンタのため

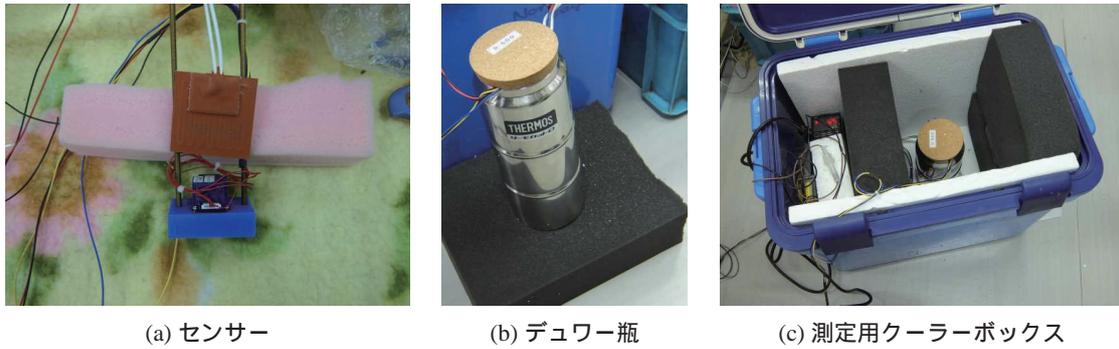


図-1 水晶振動子による加速度センサ (A351) を用いた実験装置

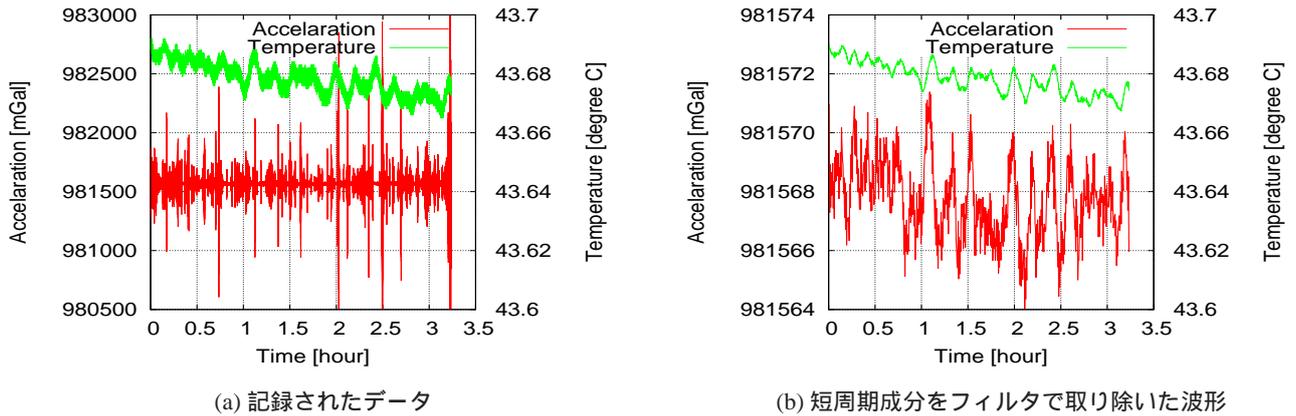


図-2 42.5 °C となるよう制御された恒温槽に入れた水晶振動子による加速度センサの出力 (赤線: 3 成分合成加速度出力 (左目盛 [Gal]), 緑線: 温度 (右目盛 [°C]))

の基準信号発生器 (クロック) である。加速度センサは内部の温度センサの出力を用いてあらかじめ検定された温度特性曲線を用いて演算によって温度補償を行った上で加速度値を出力している。一方、周波数カウンタの基準となるクロック信号は加速度センサとは別の水晶振動子によっており、ごく一般的な TCXO (temperature compensated crystal oscillator; 温度補償水晶発振器) が用いられている。そのため、加速度センサとクロック信号の温度変化にともなうゆらぎが合成されて加速度値が出力されることになる。

これらの温度補償の仕組みは一般的な強震動観測には十分な精度であるが、重力や極めて微小な傾斜を測定するような用途では温度変化にともなう出力のゆらぎが測定対象の加速度の変化に比べて非常に大きく、無視できない。

水晶振動子による加速度センサの感度特性を正しく知るためには、温度の影響を可能な限り排除して、センサそのものの出力を得ることが必要である。例えば、重力探査を行う場合、測定される重力値に期待される精度は可能であれば 0.01mGal 以上の精度、悪くても 0.1 mGal 程度は必要である。また、10m の深さの土留め矢板の傾斜を天端の変位で 1mm 程度の精度で測定するためには 100 mGal 程度の精度が求められる。

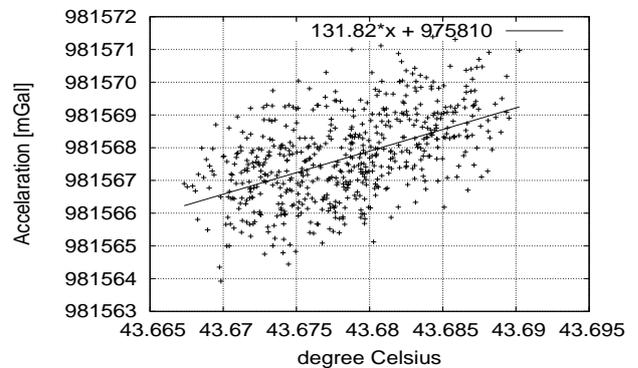


図-3 温度と加速度出力の関係。実線は線形回帰した回帰直線で、 $131.82T + 975810$ [mGal]。ここで、 T は温度 [°C]、決定係数 $R^2 = 0.265$ 。

このように計測の目的によって必要とされる精度は大きく異なるため、センサの精度を精確に知ること、どのような目的の計測に使用可能であるか、また、センサの適用限界を知ることは重要である。

(2) 実験方法と結果

まず最初に、A351 の温度安定性について検討するために、センサ (A351) 全体をヒーターとともにデュワー瓶 (魔法瓶) の中に入れて温度を一定に管理し、温度に

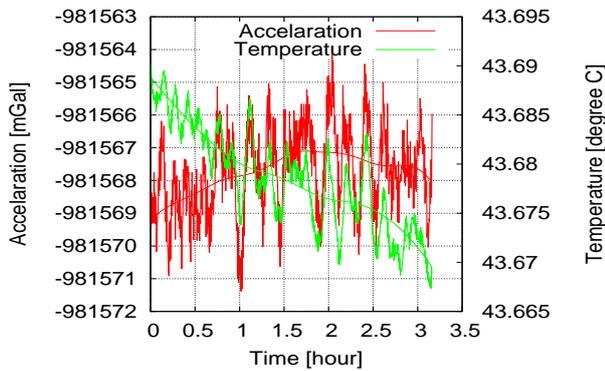


図-4 加速度出力の符号を反転させ、さらに時間軸を 280 秒戻したものと温度変化の比較。実線は HHT によって抽出されたそれぞれの波形のトレンド成分。

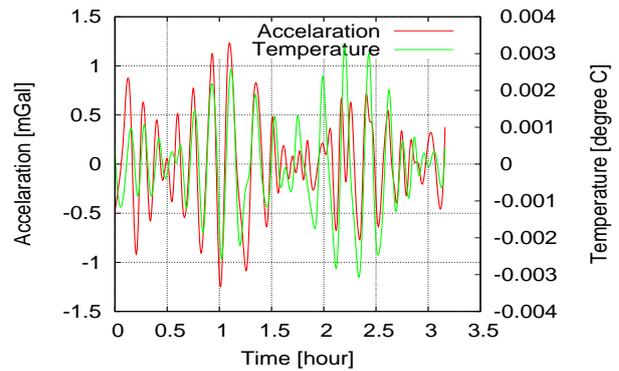


図-5 HHT によって抽出された温度と加速度値の 6 番目の IMF。

対する加速度出力の変動を調べる。

図-1(a)のようにセンサを樹脂ベースにネジ止めして、その上部にヒーターおよび熱電対をスポンジで挟んで、全体をステンレス製のデュワー瓶に入れた(図-1(b))。分解能が 0.1°C の温度コントローラ(オムロン製 E5CH シリーズ)によって、温度を 42.5°C を維持するように制御した。また、フィールドでの測定を考慮して、外気温の影響を受けにくく容易に運搬できるようにデュワー瓶とともにバッテリー等をまとめてクーラーボックスに入れた(図-1(c))。

外気温の影響が少ない室内にクーラーボックスを置いてセンサの出力を記録した。電源を入れて数時間経過し、温度がある程度安定してからの記録の例を図-2に示す。加速度センサの出力は50 サンプル/秒に設定している。なお、温度が安定するまで十分な時間をとったのち、加速度センサの電源を投入するとセンサの温度が急に高くなり、それに伴って加速度値も大きく変化することがわかった。これは、センサ内部の MPU (micro-processing unit) をはじめとするデバイス類が動作を開始することで発熱をはじめセンサ内部の温度が高くなったためであると考えられる。そのため、測定にあたっては、デュワー瓶内の温度の安定だけでなく、加速度センサ内部のデバイスの温度が安定するようセンサの電源を投入してから十分な時間をとっている。

図-2(a)は設置場所が交通量の多い道路に近いため、短周期の振動が多く記録されていることがわかる。データ量を圧縮するとともに短周期成分を除去するために、82 次のハミングウィンドウを用いたウィンドウ法による FIR フィルタでデシメーションをしたうえで、サンプリング間隔を10倍に間引くという処理を3回繰り返して20秒間隔のデータとした。図-2(b)にその結果を示す。この図より、時間の経過とともに温度変化が小さくなって安定していくとともに、加速度出力も安定しているように見える。また、温度の細かい変動にも加

速度出力が追従しており、水晶振動子が温度に対して高い感度を持っていることがわかる。目視でみる限りでは温度変化 0.02°C に対して加速度は6 mGal 程度変動しているようである。

これより、定性的には 0.1 mGal の精度は当面は難しくそうであるが、温度管理を厳密に行うことで 1 mGal 程度の精度での測定の可能性が期待される。

(3) 考察

温度と加速度出力の関係をより詳しく検討するために、同時にサンプリングされた温度と加速度値を散布図として図-3に示す。温度と加速度出力の関係は右上りの傾向が見えるものの、直線回帰しても決定係数 $R^2 = 0.265$ で、ほとんど相関がない。図-2から定性的に期待される相関の印象とは異なり、非常に相関が低い。

加速度センサの温度追従は、温度変化に対して時間遅れがあることが予想される。この点に注目して図-2を改めて見ると温度と加速度値の位相はほとんど同じか、むしろ加速度値の変動のほうが温度変化に先んじているように見える。これは現象の因果性を考慮すると起り得ないため、加速度記録の符号を反転させ(-1倍して)、時間軸を280秒戻した結果を図-4に示す。目視で見ると、 $10\sim 15$ 分周期程度の温度変化に対しては温度と加速度値の位相がよくあっているように見える。すなわち、温度が上がると、4分40秒遅れて加速度値が下がっている(加速度値を-1倍して表示しているため、以下同様)。280秒という時間差は目視による試行錯誤で決定しているが、相互相関関数のピークをとることで定量的に決定できる可能性もある。実際に温度と加速度値の相互相関関数を求めると、非常に短周期の変動に相互相関が影響されて両者の相関が高くなる時間差を決定することはできなかった。

ところが、記録区間を通してみると、温度は振動しながらも全体としては緩やかに下がっているが、加速度値は温度の低下にともなって全体としては図中で上っ

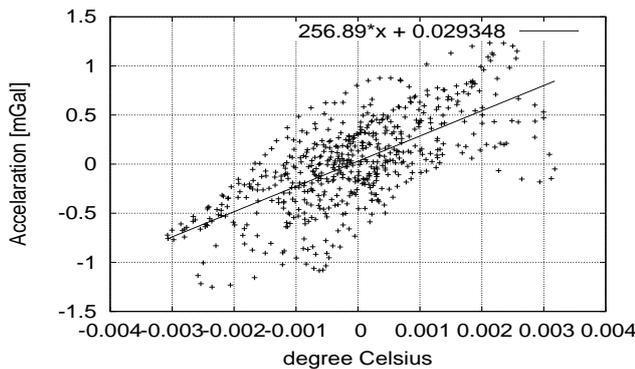


図-6 温度と加速度値の6番目のIMFの同時刻の値を用いた散布図。実線は線形回帰した回帰直線で、 $256.89T + 0.029348$ [mGal]。ここで、 T は温度 [°C]、決定係数 $R^2 = 0.464$ 。

ている(加速度が小さくなっている)ように見える。この傾向を明確にするために、温度および加速度波形にHHT (Hilbert-Huang transform)^{3),4)}を用いて10個のIMF (intrinsic mode function) に分解した。IMFへの分解にあたってはEEMD (ensemble empirical mode decomposition) を用いた。すなわち、rms (root mean square) で10%の白色ノイズを波形に付加して160回の分解(EMD)を行って各モードごとにIMFの平均をとった。図-4の実線は温度および加速度値のそれぞれの非振動成分(トレンド成分)を表わしており、温度の低下にともなって加速度値が小さくなる(図中では上側へ変化する)傾向が見られる。

一方、15分程度の周期の温度の変動に対しては、加速度値の変動はトレンド成分とは逆の傾向を示している。図-5に温度と加速度値の6番目のIMFを重ねて示す。図中では温度と加速度値はほぼ位相が一致しており、温度が上がると加速度値が小さくなる、という目視で述べた傾向をはっきりと示している。ただし、既に述べた通り、加速度波形は280秒戻した波形を用いて比較している。

温度と加速度値の6番目のIMFを用いて同時刻(実際には280秒ずれている)の値の散布図を図-6に示す。図-3に比べると明確に右上りの傾向が見えるが、それでも回帰直線の決定係数は $R^2 = 0.464$ にすぎず、明確な相関があるとは言えない。このことは、振幅の相関が低いことに起因していると考えられる。温度の細かい変動には加速度センサは忠実に追従するものの(=位相がよくあっている)、それにとまって変動する加速度値そのものにはあまりはっきりした傾向がない(=決定係数 R^2 が小さい)ことを示している。

なお、加速度値が温度に対して280秒の遅れで変動しており、かつ温度の上昇に対して加速度値が減少する負の相関があることの妥当性を確かめるために、も

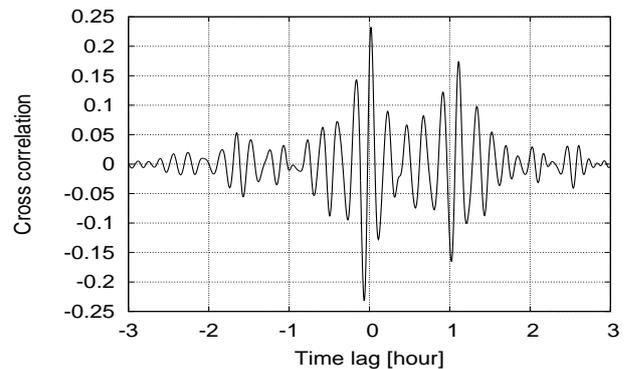


図-7 温度と加速度値(280秒戻す前の元波形)の6番目のIMFの間の相互相関関数。

との加速度波形を用いてEEMDによって6番目のIMFを求め、温度のそれとの間の相互相関関数を求めたものを図-7に示す。時間差0の左右に大きなピークが見られ、両者の絶対値はほぼ同じ値であるが、因果性を考慮すると時間差が正值であることは考えられない。相互相関関数の絶対値の最大値をとる負の時間差は240秒、負のピークをとっているため温度と加速度値の位相が反対であり、目視で判定した温度と加速度値の関係とよく対応している。相互相関関数から得られた時間差は目視で決定したものと2サンプル(=40秒)異なっている。しかし、EEMDによるIMFへの分解の信号依存性を考慮すると2サンプル程度の違いは十分に受け入れ可能な結果であると考えている。

以上より、温度に対して加速度値の出力が周期成分によってまったく異なる応答を示していることがわかった。この理由として考えられるのは、センサがもつ二つの水晶振動子、すなわち、加速度センサと基準クロックの温度特性が異なるうえに、それぞれが、個別に温度補償をした結果が混じりあって出力されていることである。二つの水晶振動子の温度特性の違い、またそれらの温度補償機構の違いとその動作誤差を出力から分離することは不可能である。また、水晶振動子は個体ごとに個別の個性をもっており、データシートが保証する性能の範囲内ではばらつきを持っている。そのため、本研究で用いたA351の個体と同じ結果が別の個体でも得られるとは限らず、温度と加速度値の関係を一般的な形でモデル化することは困難であろう。このことは、精密な加速度値の測定のためには、個々の個体ごとにキャリブレーションが必要であることを意味している。しかし、本実験で得られた結果は、たとえ温度と加速度値の間に周波数成分によってまったく異なる傾向が混在している場合でもHHTを用いることにより、センサの温度特性の精密なキャリブレーションを実施可能であることを示唆している。

表-1 筑波山重力検定路線の重力基準点

Site Name	Longitude [deg.]	Latitude [deg.]	Altitude [m]	Gravity [mGal]
No.0	140.122783	36.216050	532.442	979860.210
No.1	140.094900	36.209200	185.228	979930.954
No.2	140.092583	36.256450	48.079	979961.186
No.3	140.098750	36.251167	104.583	979949.740
No.4	140.100700	36.247067	167.007	979936.645
No.5	140.101317	36.242983	233.620	979921.907
No.6	140.102517	36.239117	303.660	979907.706
No.7	140.103550	36.237300	344.936	979899.130
No.8	140.102100	36.234767	411.728	979885.408
No.9	140.102617	36.232850	450.719	979877.443
No.10	140.104167	36.232933	476.298	979871.110
No.11	140.105117	36.231350	557.936	979853.077
No.12	140.109967	36.222200	875.394	979770.010
No.100	140.073450	36.254317	31.000	979962.951

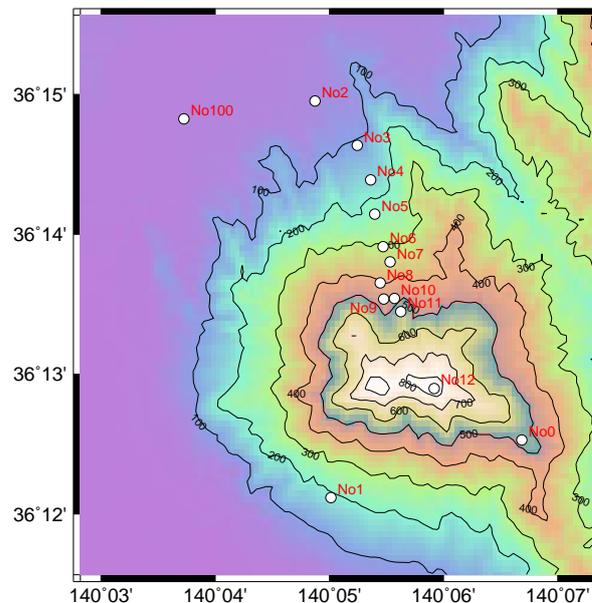


図-8 筑波山重力検定路線の重力基準点の位置と周辺の標高

3. 重力検定路線における重力測定

前節において、水晶振動子による加速度センサの温度と加速度出力の間には二つの水晶振動子の温度特性によって、複雑な関係があることが示唆された。そのため、1 mGal 以下の精度で加速度値を測定することは容易ではない。そこで、本節ではおおまかな温度特性の補正をおこなうことでどの程度まで加速度値の測定精度が期待できるかについて検討する。

(1) 筑波山重力検定路線

加速度値の測定において極めて高い精度を要求されるものの一つに重力測定がある。地下の密度の違いが地表面におけるごくわずかな重力の差となって現われ、標高や地形によっても重力値は異なる⁵⁾。重力の変化量はごく僅かであるため、絶対重力値が分かっている複数の場所で加速度値を測定し、その差がどの程度かを調べることで、加速度センサの精度を検証することができる。

センサの性能を検定する目的には、絶対重力値にある程度の幅があり、かつ、測定を行う場所が狭い範囲に集中していることが測定の効率からも望ましい。このような目的のためには、標高差が大きい場所で標高をかえて測定すればよい。すなわち、高い山の麓から山頂にかけて絶対重力値がわかっている場所があればよいことになる。一般に、そのような都合のよい場所はないが、本研究では筑波山の山麓に駒澤が独自に整備した重力検定路線を利用する⁶⁾。この検定路線は四半世紀以上に渡って維持されており、重力も繰り返し測定されているため、絶対重力値についても非常に信頼できる。重力検定路線の重力基準点の位置と絶対重力値を表-1に、基準点の位置を周辺の標高とともに図-8に示す。筑波山山頂から麓の平地までの間にまんべん



図-9 筑波山重力検定路線の重力基準点 (No.8) における観測の様子。右奥の青いケースがデューワー瓶をおさめたクーラーボックス。左の白いセンサは LaCoste & Romberg 製の G 型相対重力計。

く重力基準点が設置されており、標高差は 840 m 以上、重力差は 192.941 mGal に及び、加速度値を検定する目的には非常に有効である。

本研究ではこの検定路線において前節で作成したデューワー瓶入りの水晶振動子による加速度センサを用いて加速度値を観測し、その精度を検証する。

(2) 観測方法と記録

別の重力計の検定を行う際にあわせて観測を実施した。表-2に示すように 2017 年 7 月 16 日の朝から日没までの間に重力基準点で観測を行った。天候はくもり、最高気温は約 33 度、風もなく、観測を行うにはよい条件であった。表-2からわかるとおりいくつかの地点では、時間をかけて複数回の観測を行っている。これは、一般にセンサ出力は時間とともにドリフトするため、同じ場所の絶対重力値は同じである、ということを利用

表-2 加速度値の観測結果と温度の影響を補正した加速度値

Site Name*	Reference Value [mGal]	Time	Earth Tide [mGal]	Averaged Accerlation [mGal]	Averaged Temperature [°C]	Difference** [mGal]	Corrected Value (1) [mGal]	Error_1 [mGal]	Corrected Value (2) [mGal]	Error_2 [mGal]
No.0_1	979860.210	08:42:12	0.007	981705.102	42.35	1844.885	979859.533	0.677	979860.210	0.000
No.12	979770.010	09:40:44	0.018	981614.788	42.29	1844.760	979767.567	2.443	979767.841	2.169
No.0_2	979860.210	10:13:38	0.020	981707.259	42.33	1847.029	979861.212	-1.022	979861.260	-1.050
No.1_1	979930.954	11:11:05	0.018	981779.079	42.31	1848.107	979932.509	-1.555	979932.162	-1.208
No.100	979962.951	12:08:36	0.009	981807.632	42.43	1844.672	979964.541	-1.590	979963.799	-0.848
No.2_1†	979961.186	12:38:07	0.001	981811.528	42.65	1850.341	979974.897	-13.711	979973.952	-12.766
No.3	979949.740	13:12:48	-0.008	981781.132	42.75	1831.400	979947.549	2.191	979946.366	3.374
No.4	979936.645	13:46:44	-0.018	981766.845	42.77	1830.217	979933.829	2.816	979932.413	4.232
No.5_1	979921.907	14:07:09	-0.023	981755.077	42.79	1833.193	979922.647	-0.740	979921.090	0.817
No.6	979907.706	14:37:47	-0.030	981736.470	42.82	1828.795	979904.848	2.858	979903.080	4.626
No.7	979899.130	15:02:51	-0.035	981730.871	42.89	1831.776	979901.289	-2.159	979899.350	-0.220
No.8	979885.408	15:27:35	-0.039	981713.242	42.92	1827.873	979884.436	0.972	979882.326	3.082
No.9	979877.443	15:49:59	-0.041	981705.382	42.93	1827.979	979876.846	0.597	979874.582	2.861
No.10	979871.110	16:12:32	-0.041	981702.173	42.95	1831.105	979874.324	-3.214	979871.905	-0.795
No.11	979853.077	16:39:46	-0.040	981680.989	42.95	1827.952	979853.016	0.061	979850.410	2.667
No.5_2‡	979921.907	17:02:56	-0.037	981746.710	42.84	1824.840	979915.587	6.320	979912.822	9.085
No.2_2‡	979961.186	17:23:54	-0.033	981788.095	42.76	1826.942	979954.547	6.639	979951.638	9.548
No.1_2	979930.954	17:58:14	-0.024	981766.881	42.62	1835.952	979929.332	1.622	979926.187	4.767
No.0_3	979860.210	18:29:07	-0.014	981700.510	42.64	1840.314	979863.568	-3.358	979860.210	0.000
							RMS‡	2.000		

- *: “_#,” where # is 1, 2, or 3, denotes repeated number of observations at a same site.
- **: Difference D is defined as $D = G_{ave} - G_{ref} - G_T$, where G_{ave} , G_{ref} , and G_T are averaged value of observed accerlation, reference value of gravity, and earth tide, respectively.
- †: Dataset observed at these sites are not used for any statistical analysis such as regression analysis.
- ‡: Root mean square of error except for error at three sites marked by †.

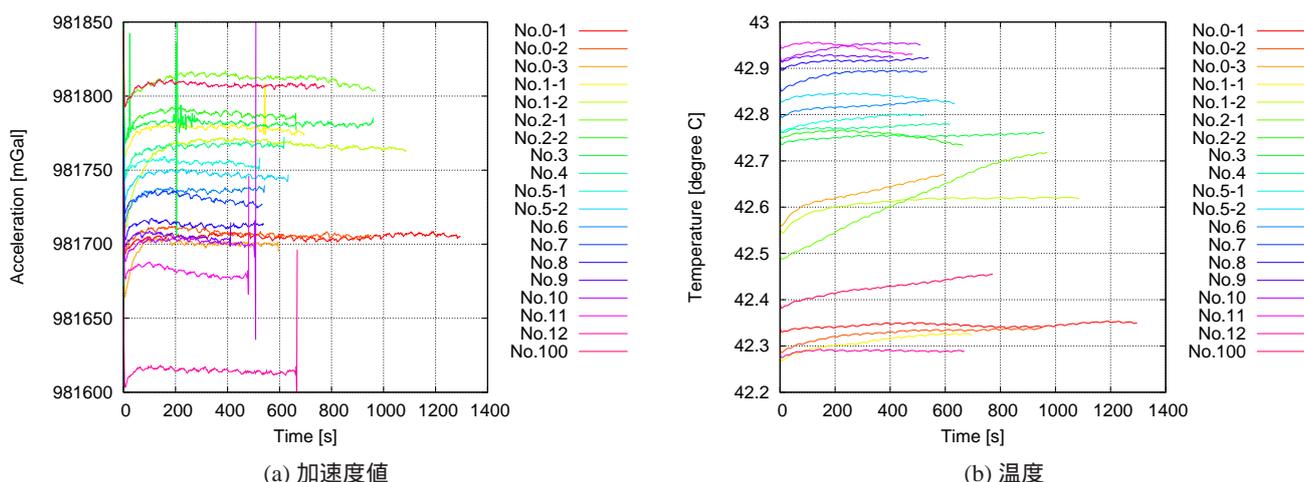


図-10 各重力基準点において得られた記録．FIR フィルタを用いてデシメーションを行いサンプリング間隔を 2 秒としたもの．凡例のサイト名の後の数字は表-2 の“Site Name”と同様に同じ地点での観測の繰り返し回数である．

して後処理でドリフトを補正することを考慮しているためである．

図-9 に観測の様子を例を示す．前節で示したように、水晶振動子による加速度センサ (A351) をデュワー瓶に入れて、さらにそれをバッテリーなどとともにクーラーボックスにいれたものを重力基準点に置いて 10～15 分程度連続して記録をとった．記録は 50 サンプル/秒で出力し、シリアル通信でノートパソコンで受けて記録した．クーラーボックスの底にネジで調整可能な足を取りつけて水平をとれるようにして、A351 の水平動成分の出力がゼロに近くなるように設置した．しかし、実

際には地心方向の重力に比較して水平方向の重力の影響は無視できるほど十分に小さいため、三成分の加速度値のベクトル合成のノルムを重力と見做すことができる．そのため、センサ設置の際の水平の精度にはあまり神経質にならずに測定を行った．また、温度が安定するように、センサ、デュワー瓶のヒーターとともに移動中も含めて常時電源を投入しておいた．

各重力基準点において得られた記録を図-10 に示す．短周期のノイズを取り除くとともに、データ量を圧縮するために 50 サンプル/秒で記録されたデータを前節と同様の FIR フィルタによってデシメーションしてサ

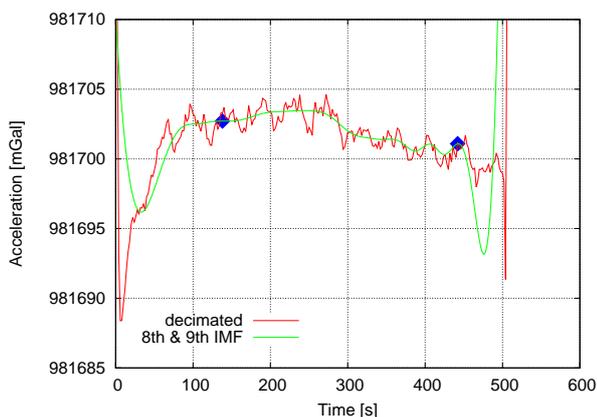


図-11 観測された加速度値の平均をとる区間の決定例(サイト No.10)．赤線：デシメーションされた加速度波形，緑線：HHT によって抽出されたトレンド成分ともっとも周期の長い成分の和，青菱形：データ端から2つめの極値．青菱形の間の加速度値を平均してその地点の代表値とする．

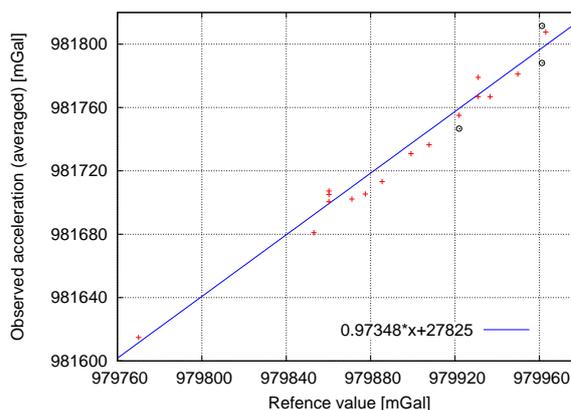


図-12 絶対重力値と観測値の平均から求められた加速度値．実線は赤色のデータのみを用いて線形回帰した回帰直線で、 $G_{ave} = 0.97348G_{ref} + 27825$ ．ここで、 G_{ave} 、 G_{ref} はそれぞれ観測から得られた平均加速度値，絶対重力値，決定係数 $R^2 = 0.9748$ ．

ンプリング間隔を 100 倍 (すなわち、2 秒間隔) に間引いた．図-10 から直ちにわかるとおり、温度を厳密に管理しているにも関わらず温度がサイトによって大きく異なっている．しかも、サイトによっては温度が安定するまでに測定が終了している．前節の検討から明らかになった周期が約 15 分の温度の変化量は $1/100^\circ\text{C}$ に満たないため、図-10 に見られる $1/10^\circ\text{C}$ のオーダーの温度の違いはむしろ外気温の影響によるものと考えられる．測定中はセンサ出力をパソコンに送るためにクーラーボックスの蓋を少しあけてシリアルケーブルを通さなくてはならない．そのため、観測中に外気とクーラーボックス内の温度差が安定するまでセンサ温度も安定しなかったのであろう．

(3) 記録の解析

前節で温度から加速度値を補正する可能性について検討したが、前節のような室内での測定の場合と異なり、温度の変動量が大きいため前節で検討したような細かい補正を適用するには変動のオーダーが異なっていてそのまま適用できそうにもない．本節の目的が水晶振動子による加速度センサの感度と精度を知ることにある、ということを出して、以下のような方法で検討をすすめることとする．すなわち、a) 各重力基準点での加速度値の代表値をなんらかの方法で決定し、b) 絶対重力値を用いてその代表値を補正する方法を検討し、c) その補正を代表値に改めて適用し、d) 補正値が絶対重力値とどのくらい近い値を得られるか、を調べる．

そもそも、絶対重力値にあうように記録を補正するのであるから補正後の結果が絶対重力値と整合して当然である．しかし、センサの安定性が不十分で、かつ、

重力値の違いに対する感度がなければいくら補正をおこなったとしてもその補正結果は大きくばらつくであろう．したがって補正後に残る誤差がセンサの精度を知るひとつの指標となるものと期待される．このような方針のもとで、いかにも粗雑な解析であることを十分に承知のうえでセンサの精度についての検討をおこなう．

a) 重力基準点における加速度の代表値の決定

図-10 からわかるように、観測された加速度値と温度は 10 分程度の短い間に大きく変動している．そのため、観測を行った重力基準点での観測値としてどのような値を採用すべきか単純には決められない．記録の平均をとることでそれを代表値とすることが適切であろうが、記録の時間変動は白色ノイズのような振動ではないため、平均をとる区間によって結果が大きく異なることは容易に推測される．

相対重力測定では、一般に加速度値の場所ごとの相対的な違いが正しく測定できさえすれば、絶対重力値が既知の特定の地点での測定値を用いて、絶対重力値の未知の地点の重力値を決定できる、という考えに基づいている⁵⁾．したがって、機械的に代表値を決定する方法を決めれば、たとえ平均をとる区間によって加速度値にオフセットがのっていたとしても、そのオフセットが各地点で同様に付加されるのであれば、各地点間での加速度値の相対的な差は正しいことが期待される．そこで、各観測値にたいして一定のルールで平均をとる区間を決定し、その区間での平均値をもって代表値として採用することとする．

観測値をデシメーションして 2 秒間隔に間引いた加速度波形は図-11 の赤実線に見られるとおり、温度の変化にともなって周期 50 秒程度の変動をしている．また、

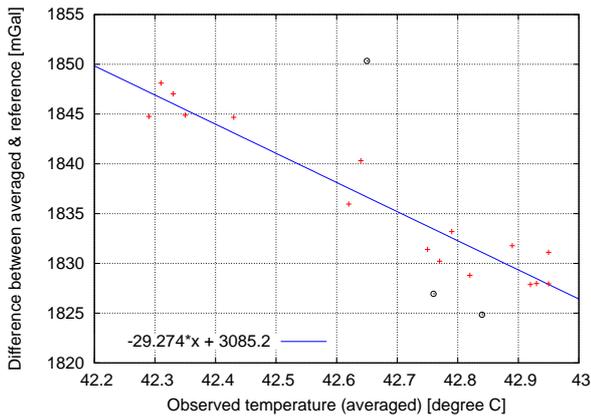


図-13 観測された温度 (平均) に対する観測加速度値 (平均、地球潮汐補正済) と絶対重力値の差。実線は赤色のデータのみを用いて線形回帰した回帰直線で、 $D = -29.274T + 3085.2$ 。ここで、パラメータは図-3、12と同じ。決定係数 $R^2 = 0.9264$ 。

データの両端 (データによっては片端) には記録の開始時や終了時の大きな振動を記録していたり、や端部でのフィルタ処理が適切に行われないことによる大きなパルス状の振幅が含まれることがある。そこで、端部のデータの乱れの影響をうけないよう、波形のおおまかなトレンドを抽出したうえで端から少し離れた特徴的な点を選んで平均をとることとする。

トレンドを抽出するには、80回のアンサンブル平均をとるEEMDによってIMFに分解した⁴⁾。デシメーションした波形によく追従するようにトレンド成分ともっとも長い周期成分をもつIMFの和を求め (図-11の緑実線)、両端から2つめの極値 (図-11の青菱形) の間の平均を求めた。このときデシメーションをした波形 (赤実線) ではなく、EEMDによって分解されたトレンドと最長の周期を持つIMFの和の曲線 (緑実線) を用いて平均した。なお、細かい変動のあるデシメーション波形 (赤実線) を同じ区間で平均をとってもほとんど結果は変わらない。端部にパルス状のノイズがない場合は、記録端までのデータを使って平均する。また、図-10(a)に見られるように、記録の途中に大きなパルス状のノイズが入っている場合があるが、パルスの前後で記録長が長い方の区間を選んで上と同様にパルスから2つめの極値を平均をとる区間の始点 (または終点) とした。

温度については、加速度値の平均をとるのに使った区間でデシメーション波形の平均をとった。このようにして得られた加速度値と温度をそのサイトでの代表値とする。結果を表-2のAveraged...の欄に示す。得られた代表値は絶対重力値に比べて1800 mGal以上大きな値であるが、これはたんに加速度センサのキャリブレーションの精度の問題であり、相対的に正しい加速度値が得られるならばあまり大きな問題ではない。図-12に絶対重力値と観測から得られた代表値の関係とともに

両者の回帰直線を示す。なお、回帰にあたっては黒丸で示した三つのデータは後に述べる理由により用いていない。

センサのキャリブレーションに起因するオフセットを別にすれば、記録はおよそ直線上に載っており決定係数 R^2 も0.975で悪い値ではない。しかし、回帰直線からはずれている測定値も少なくなく、そのずれは1 mGalをはるかに超え、サブ10 mGalのオーダーである。

b) 加速度の代表値の温度補正法の検討

次に、センサのオフセットも含めて温度による加速度値の違いを簡単な方法で補正する方法について検討する。表-2のDifferenceの欄に絶対重力値と各地点の代表値の差 D を示している。このとき、地球潮汐の影響を理論的に求めて⁵⁾、記録から取り除いている。すなわち、各地点の加速度の代表値を G_{ave} 、絶対重力値を G_{ref} 、地球潮汐を G_T とすると、測定値のずれ D は以下のように求められる。

$$D = G_{ave} - G_{ref} - G_T \quad (1)$$

D が温度の変動に伴って生じたとすれば、温度と D の間にはなんらかの強い相関があるはずである。温度の代表値 T と D の関係を図-13に示す。黒丸で示した三つのデータを別にするとう温度が高くなるほど差 D が小さくなるという明確な傾向を示している。言い換えると、温度が高いほど加速度値が小さくなる傾向を示しているということであり、前節の図-5で見られた15分程度の周期の温度と加速度値の関係と同様の特徴を示している。図-5では、温度と加速度値の間にはあまり明確な線形関係を見出すことはできなかったが、ここでは、非常に安直であるが D と温度 T の関係を直線回帰する。図-5は各サンプリングごとに温度と加速度値の相関を見ているが、本節では各地点の加速度値と温度を平均化して代表値として取り扱っているため、データの細かなゆらぎは平滑化されていることになり、大局的には相関がある、と見ることができるのではないか、という期待を根拠としている。

図-13を見ると、三つのはずれ値を別にするとう、ある程度期待に応える線形関係がみられ、回帰直線の決定係数も0.9を超えており、けっして良くはないが受け入れられないほど悪いわけでもない。そこで、代表値と絶対重力値の差 D と温度 T の間の回帰式

$$D = -29.274T + 3085.2 \quad (2)$$

を用いて、各地点での加速度値を

$$G_{corr1} = G_{ref} + 29.274T - 3085.2 - G_T \quad (3)$$

によって補正することにする。ここで G_{corr1} は温度特性を補正した加速度の代表値である。

なお、図-13に黒丸で示した三つのはずれ値は、いずれも観測時間中に温度が安定していなかった。図-10(b)

からは読み取りにくい、No.2.1 は温度が単調に増加し続けており、No.5.2 と No.2.2 は一度温度がゆるやかに上昇した後、5 分ほど経過してからゆるやかに下降をはじめて最初と同じくらいの温度になったところで観測終了、という正弦波の半周期分のような形になっている。このような形の温度変化ではいくらルールを決めて平均値をとったとしても、その地点における観測中の温度を代表する値とは考えにくく、はずれ値として解析から除外することは不自然ではないと考えている。

c) 温度補正法の適用とドリフト補正

式 (3) によって求めた各地点での加速度値を表-2 の Corrected Value (1) の欄に、絶対重力値との差を Error_1 の欄に示す。当然であるが、絶対重力値にあうように記録を平均して求めた代表値を補正をしたので絶対重力値に近い値となっている。ここまでの解析により、温度補正と潮汐補正ができたことになる。

同じ地点で複数回おこなった記録で、はずれ値となっていない No.0.1, No.0.2, No.0.3 および No.1.1, No.1.2 をそれぞれ比較すると 3~4 mGal の違いが生じている。しかも、No.0 と No.1 で朝と夕方間のずれ量の符合が反対となっており（前者は増加、後者は減少）、一貫性がない。通常の重力測定では、観測の最初と最後に同じ場所で観測をおこなって、その間の観測値の差をドリフトとみなし、時間に対して線形にドリフトする、という仮定のもとでドリフト量を途中の観測点に比例配分することが一般的である⁵⁾。

No.0 と No.1 でのドリフトの発生が正負反対であり、経過時間に対して線形的にドリフト量を配分すると一方はよく補正されるが他方はうまく補正できずに誤差が増大する。現時点では水晶振動子による加速度センサのドリフト特性がよくわかっていないため、便宜的に最初と最後の観測である No.0.1 と No.0.3 の差をドリフトと見做して両者の値が等しくなるようドリフトを経過時間に比例して配分することとする。その結果を表-2 の Corrected Value (2) の欄に、また、絶対重力値との差を Error_2 の欄に示す。Error_2 を見ると Error_1 に比べてその絶対値が大きくなった地点も少なくないことがわかる。これは予想通りの結果であるが、現時点では水晶振動子の温度特性と違って、そのドリフト特性を知る方法がないため、適切な補正が難しい。

d) 補正值と絶対重力値の比較

既に述べた通り、表-2 の Error_1 や Error_2 がどの程度の値をとるか、がセンサの精度を考える上で重要な指標となる。温度の代表値を適切に決定できなかった「はずれ値」の三ヶ所（表-2 の Site Name の欄に † をつけた地点）を別にするると誤差がもっとも大きい地点で 5 mGal ほどである。重力測定としては受け入れることが難しいレベルの誤差であるが、Error の欄の二乗平均平

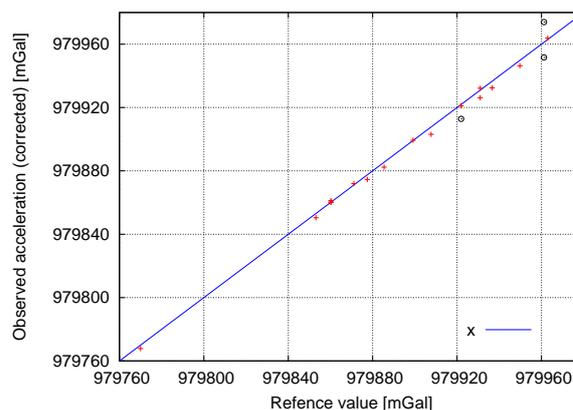


図-14 絶対重力値と温度特性とドリフトを補正した加速度の観測値。実線は $G_{corr2} = G_{ref}$ の直線。ここで G_{corr2} 、 G_{ref} はそれぞれ、ドリフトまで補正された加速度の観測値および絶対重力値である。回帰直線は赤色のデータのみを用いて求め、決定係数は $R^2 = 0.9980$ 。

方根 (rms; root mean square) を「はずれ値」を除いて求めると、Error_1 と 2 はそれぞれ 2.0, 2.6 mGal である。1 mGal の精度には達していないものの、ラフな代表値の決定方法とラフな温度補正法を適用しているにもかかわらず、1 mGal のオーダーの精度が得られることを示唆している。

繰り返すが、絶対重力値にあうように補正したのだから補正值があうのは当然、と言えばその通りである。しかし、センサにそれだけの精度、分解能がなければ観測値はより大きなばらつきを持ち、誤差の rms はより大きなオーダーとなると予想される。

最後にドリフト補正まで行った加速度値 G_{corr2} を絶対重力値と比較した結果を図-14 に示す。図中の実線は傾き 45 度の直線 $G_{corr2} = G_{ref}$ で、この直線でははずれ値を除くデータを回帰すると、その決定係数は $R^2 = 0.9980$ である。当然であるが、図-12 と比較して、観測値が絶対重力値をより高い精度で推定できていることがわかる。

4. まとめ

本研究では水晶振動子による加速度センサの感度と精度を異なる二種類の観測を実施して確認し、センサの温度特性を用いて出力された加速度値を補正する方法について検討した。

まず、定点での長時間記録の解析から以下のことが明らかとなった。

- 温度変化の周期成分によって、加速度値の出力の温度依存性が異なる場合がある。
- この特徴は、センサの個々の個体に固有の性質である可能性があるため、精密な測定を行うためには、個々の個体をそれぞれキャリブレーションす

る必要があることを示唆している。

- 温度変化の周期成分の違いは EEMD (ensemble empirical mode decomposition) を用いて複数の IMF (intrinsic mode function) に分解することで個別に補正を行える可能性がある。
- 安定した加速度出力を得るためには $1/10 \sim 1/100$ °C のオーダーの温度管理が必要である。

次に、筑波山重力検定路線の重力基準点において加速度値を測定し、その値を絶対重力値と比較した。その結果、以下のことが明らかとなった。

- 各観測地点ごとの加速度および温度の代表値をどのようにして決定するか、が結果に大きな影響をもつ。
- 観測値が時間とともに揺らぐことはやむを得ないが、そのゆらぎ方が白色ノイズのような性質を持つものであれば、平均をとるだけでよいので困難はない。しかし、この観測のいくつかの地点で見られたようにデータの変動が非常に長周期で一般に受け入れ可能な観測時間内ではドリフトのように見える変動の取り扱いが難しい。
- しかし、ある程度ルールを決めて統一的な方法で平均値を求めることで相対的な加速度値は実際の重力値の違いを反映するものが得られる。
- 温度変化がある程度安定している場合は、温度から加速度値を補正することができる。補正には、絶対重力値を説明できるよう、簡単な回帰直線を決定して用いることが有効であった。
- 水晶振動子による加速度センサは温度を厳密に管理することで高い性能を発揮する可能性がある。本研究では、補正によって誤差の rms は $2 \sim 3$ mGal 程度となった。重力測定には不十分であるものの、それに準ずる性能をもつことがわかった。
- センサのドリフト特性はあまり単純ではなく、その補正方法も現時点ではよい方法がない。そのため、通常重力測定で行われるドリフト補正を適用すると、かえって誤差を大きくしてしまうことがある。

本研究では、デュワー瓶内で温度を管理して、それを

外気温の影響を受けにくいようにクーラーボックスに置いて測定を行った。しかし、 $1/100$ °C のオーダーの温度管理を行うことは容易ではない。極めて高い精度を必要とするクロック信号発生用の水晶振動子は DOCXO (double oven controlled crystal oscillator) と呼ばれる二重の恒温槽を持つものがある。DOCXO は水晶振動子を格納した恒温槽そのもののが外気温の変化を受けにくいように、恒温槽をさらに別の恒温槽に入れて温度管理をするものである。これにより水晶振動子は外気温の変化からより隔離され、安定した動作が期待されるのである。温度管理がセンサの性能を大きく左右する要素であることはあきらかとなったので、今後は、DOCXO に用いられている仕組みを水晶振動子による加速度センサにも適用することで外気温の影響をより小さくすることを試みる予定である。

また、温度による加速度値の補正についても、長周期の温度の変動は定点でのキャリブレーションによって補正関数を決定し、短周期の変動は平均によっておおまかに平滑化してから補正関数を適用する、といった方法を補正のための適切なキャリブレーション法とともに確立する必要がある、今後の課題としたい。

謝辞: 本研究の一部は科学研究費補助金 挑戦的萌芽研究 (課題番号「15K12481」) の支援を受けた。

参考文献

- 1) 小泉金一郎: 弦重力計の安定性について, 測地学会誌, Vol.29, No.2, pp.94-100, 1983.
- 2) 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.
- 3) Huang, N.E., Shen, Z., Long, S.R., Wu, M.C., Shin, H.H., Zheng, Q., Yen, N.-C., Tung, C.C., and Liu, H.H.: The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis, *Proc. of the Royal Society of London*, Vol.454, pp.903-995, 1998.
- 4) Wu, Z. and Huang, N.E.: Ensemble empirical mode decomposition: A noise-assisted data analysis method, *Advances in Adaptive Data Analysis*, Vol.1, No.1, pp.1-41, 2009.
- 5) 駒澤正夫: 重力探査, 物理探査ハンドブック, 手法編 第 8 章, 物理探査学会, Vol.4, pp.431-471, 1999.
- 6) 駒澤正夫: 筑波山重力検定路線 点の記, 私信による, 2017.

AN EXPERIMENTAL STUDY ON BASIC PERFORMANCES OF ACCELEROMETER WITH CRYSTAL OSCILLATOR

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

An accelerometer, whose sensor adopts a crystal oscillator, can be expected even with higher sensitivity, and smaller and more accurate sensor than a conventional accelerometer which consists of a pendulum. However, the crystal oscillator is strongly affected by fluctuation of temperature. We modify a manufactured product of accelerometer to a kind of oven controlled crystal oscillator (OCXO), and examine its basic performance through two types of observations. A relationship between output values of temperature and acceleration is discussed and modeled using a simple regression expression to correct acceleration with value of temperature. It is found that the accuracy of the modified sensor is less than 3 mGal in root mean square after applying the correction.