

地磁気キャンセラーの製作

吉田久史, ○豊田朋範

自然科学研究機構 分子科学研究所 装置開発室

1. はじめに

磁気記憶媒体に使用される磁性薄膜を生成する際、物質が地磁気によってあらぬ方向に磁化されてしまう。また、電子分光実験－分子科学研究所の極端紫外光実験施設(UVSOR)などで行われる、光を照射して物質表面から出る電子の状態(エネルギーなど)を解析する実験においても、地磁気の影響で電子の軌道が曲げられてしまう。これらの解決には地磁気を打ち消す機構が必要になる。

我々は、MI センサを用いて空間磁場を測定し、立方体の X,Y,Z 軸に巻かれたコイルに流す電流を制御することで、所定の磁場を発生させてコイルで囲まれた空間の地磁気をキャンセルする地磁気キャンセラーを製作した。本報告では MI センサと磁場制御の原理、装置の全容、プログラミング、並びに磁場制御試験の結果について報告する。

2. 磁場測定と制御の原理

2-1.MI センサ¹⁾²⁾

MI センサは毛利佳年雄・名古屋大学名誉教授(現：名古屋産業科学研究所上席研究員)が発見した MI 効果(Magneto Impedance Effect)を利用した磁気センサの1つである。

MI 効果とは、アモルファス(非晶質)磁性金属ワイヤにパルス電流を通電した時のインピーダンスが微小な外部磁場により極めて大きな変動を示す現象を指す。図1において、アモルファス磁性金属ワイヤの表皮部の電子スピンの配列が周方向に並んでいるという特殊な磁区構造により、表皮部の透磁率 μ は外部磁界 H の関数として表せる。ここに角周波数 ω のパルス電流を通電した際、アモルファス磁性金属ワイヤのインピーダンス Z は、ワイヤの直径を a 、比抵抗を ρ 、直流抵抗を R_{dc} とすると

$$Z = \frac{a}{2\sqrt{2\rho}} R_{dc}(1+j)\sqrt{\omega\mu H} \quad \dots (1)$$

と表せる。 μ は H の関数であるから、 Z の変化から外部磁界の変化を検知することが出来る。

Z は H の極性に対して対称に変化するため、このままでは磁界の方向の検出は出来ない。また、 Z の変化は直線的でない。そこで、ワイヤ周辺にピックアップコイルを巻いて誘導電圧を検知すると式(1)の虚数部のみを検知することになり、 Z の変化、すなわち外部磁界の変化を直線的に検知できる。更に信号処理回路を付加することで、直線性の改善と方向の判定を行っている。

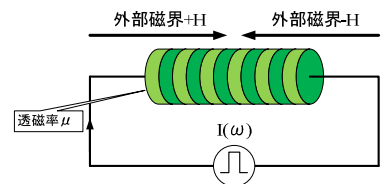


図1: MI 効果の原理

2-2.磁場制御による地磁気キャンセルの手法¹⁾

地磁気など外部磁界を H_0 、コイルに流れる電流を I とすると、外部磁界とコイルが生成する磁界の和 H は

$$H = A \cdot I + H_0 \quad \dots (2)$$

と表せる。 A はコイルの形状や巻き数で決まる定数である。磁界や電流を流すコイルの方向はX,Y,Zの3軸であるから行列を使って表現すると、以下のように表せる。

$$\begin{pmatrix} H_x \\ H_y \\ H_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{00} & A_{01} & A_{02} \\ A_{10} & A_{11} & A_{12} \\ A_{20} & A_{21} & A_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_x \\ I_y \\ I_z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} H_{0x} \\ H_{0y} \\ H_{0z} \end{pmatrix} \quad \dots (3)$$

係数行列 A の各要素は、各軸のコイルに 2 種類の単位電流を流して生成される磁界を測定することで算出できる。

ここで、A の逆行列を A⁻¹ とすると、式(2)は以下のように変形できる。

$$I = A^{-1} \cdot (H - H_0) \quad \dots (4)$$

地磁気など外部磁界の影響をキャンセルするには、式(4)で H=0 とすることで算出した I_{H=0} をコイルに流せば良い。

H=0、すなわちコイル電流 I_{H=0} が流れて外部磁界の影響をキャンセルしている状態で外部磁界が ΔH だけ変化した場合、それを打ち消す電流 ΔI は、式(4)より以下ようになる。

$$\Delta I = A^{-1} \cdot \Delta H \quad \dots (5)$$

この ΔI を I_{H=0} と逆方向に流す、すなわち I_{H=0} から減算することで ΔH を打ち消すことが出来る。

$$I = I_{H=0} - \Delta I \quad \dots (6)$$

初期状態から式(2)～式(4)の過程を経て I_{H=0} を算出し、以降は外部磁界の変動に応じて式(5)～式(6)を経て I を算出してコイルに電流を流すことで外部磁界の変動をキャンセルすることが出来る。

3. 製作した装置

3-1. 装置の全容

今回製作した地磁気キャンセラーのブロック図を図 2 に示す。

MI センサにはアイチ・マイクロ・インテリジェント社の AMI302(写真 1)を用いた。AMI302 の特性表を表 1 に示す。AMI302 は CH1,CH2 の 2 入力 で X,Y,Z の 3 軸から 1 軸を選択して磁場を計測し、アナログ電圧値として Vo から出力する。

ワンチップマイコン dsPIC30F4013(以下 dsPIC)は AMI302 による磁場測定と測定結果の LCD 表示、コイルに所定の電流を流すための DA 変換器の設定、ホストとなる PC とのコマンド・データ通信を行う。前節で説明した地磁気キャンセルの演算処理は PC で行い、コイル電流に相当する DA 値のみを dsPIC に転送する。

dsPIC による磁場測定は、10 μ sec 毎に Vo を A/D 変換して、1 軸ごとに所定回数のアベレージングを行う。積算終了後は AMI302 の測定対象磁場を X→Y→Z→X…と切り替える。

また、PC とのコマンド・データ通信では PC の要求に応じて X,Y,Z 軸のアベレージング結果を電圧値若しくは Gauss 換算値で送信すること、X,Y,Z 磁場生成コイルの電流値を設定する D/A コンバータ(DAC8512)にデータをセットすることを行う。他に、現在の磁場強度を 1 秒毎に LCD 表示する。dsPIC の制御プログラムは Microchip Technology 社の IDE であ

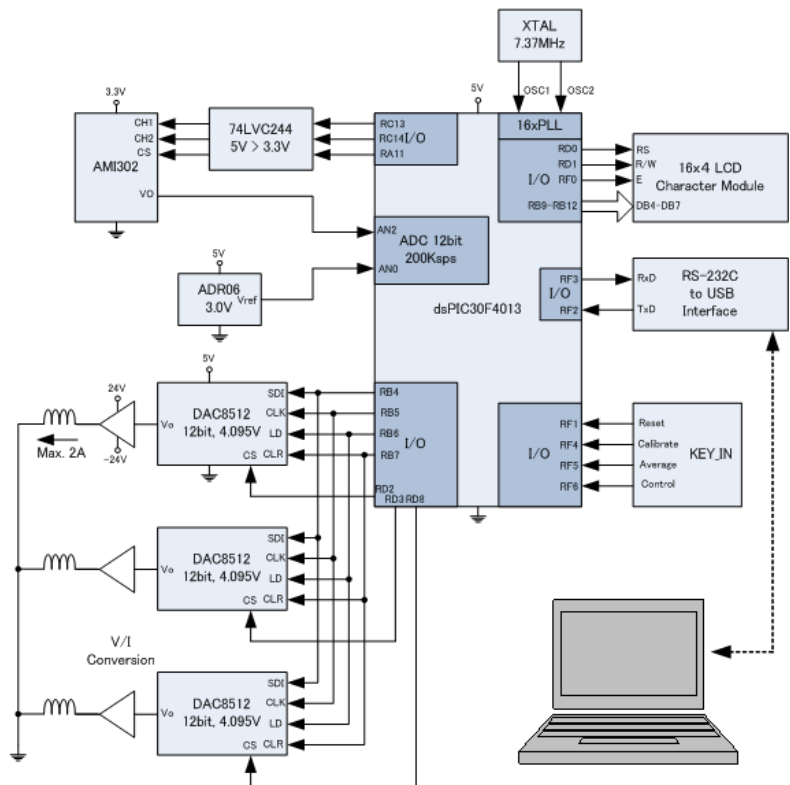


図 2 : 地磁気キャンセラーのブロック図

る MPLAB 上の MPLAB C Compiler を用いてプログラミングした。

PC と装置は RS232C で通信する。近年はノート PC を中心に RS232C などレガシーインターフェースとして搭載しない機種が増えている。そこで、FTDI 社の FT232BM を用いて RS232C と USB を相互変換して USB インターフェースで PC と接続する。

PC 制御アプリケーションは WindowsXP 上の Visual Basic 2005(以下 VB2005)で製作した。装置と PC を接続した全容を写真 2 に示す。

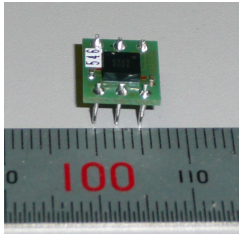


写真 1 : MI センサ AMI302

(動作条件 : $T_a = +25^{\circ}C$ 、 $V_{DD} = +3.00V$ 、 $V_{DD} - GND$ 間に $10\mu F$)

項目	記号	条件	Min.	Typ.	Max.	単位
動作範囲	Rm	CS="H"	± 2	—	—	G
出力直線性	Lin	CS="H"、 $\pm 2G$	—	1.6	—	%FS
ゼロ磁場での出力電圧	Vofs	CS="H"	800	1500	1900	mV
感度	deltaV	CS="H"	160	240	380	mV/G
周波数応答	Fr	CS="H"	—	—	1	KHz

表 1 : AMI302 の特性表

dsPIC のフローチャートを図 3 に示す。ホスト PC から送られるコマンドには積算回数 ADCount の設定と現在の値の送信要求、磁場測定結果(電圧値か Gauss 換算値のいずれか)の送信要求、並びにコイルに流す電流の DA 換算値データがある。UART 通信周期は常時一定ではないため、UART 割り込みを用いた。

dsPIC は各種初期化の後、まず UART 受信の有無を調べる。UART 受信があればコマンドを識別してそれに応じた処理を行う。DA 値設定コマンドであれば、X,Y,Z 軸の設定値に分割して、DA コンバータにデータをセットする。

UART 受信処理が終わる、若しくは UART 受信がなかった場合、A/D を実行するフラグ ad_flag が 1 にセットされているかを調べる。セットされていれば軸での最初の測定時のみ AMI302 の出力安定に必要な 1msec 待機し、A/D を行い、積算する。ADCount が規定回数に到達したらアベレーシングして測定軸を変更する。

A/D と積算・アベレーシングの処理が終わる、若しくは ad_flag がセットされていない場合、LCD 表示フラグを検証し、セットされていれば LCD 表示処理を行い、UART 受信の検証に戻る。

制御アプリケーションのフローチャートを図 4 に示す。ウィンドウと変数の初期設定後、通信条件、制御回数やログファイル記録、一定回数の制御の後自動終了させるかどうかを記録した設定ファイルの存在を調べる。存在すればそれらを制御条件に反映させ、存在しない場合はアプリケーションが保有する初期条件を適用する。また、係数行列からコイル電流算出に必要な逆行列 A^{-1} を算出する。

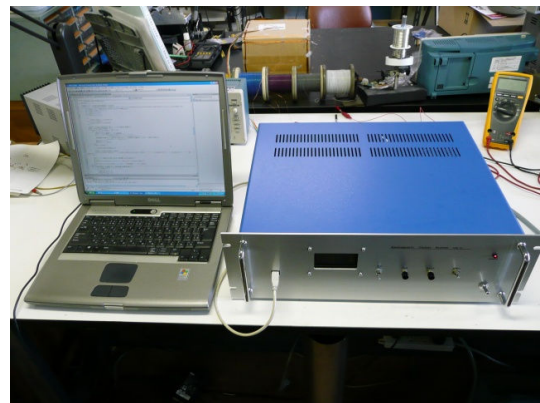


写真 2 : PC と接続した地磁気キャンセラーの全容

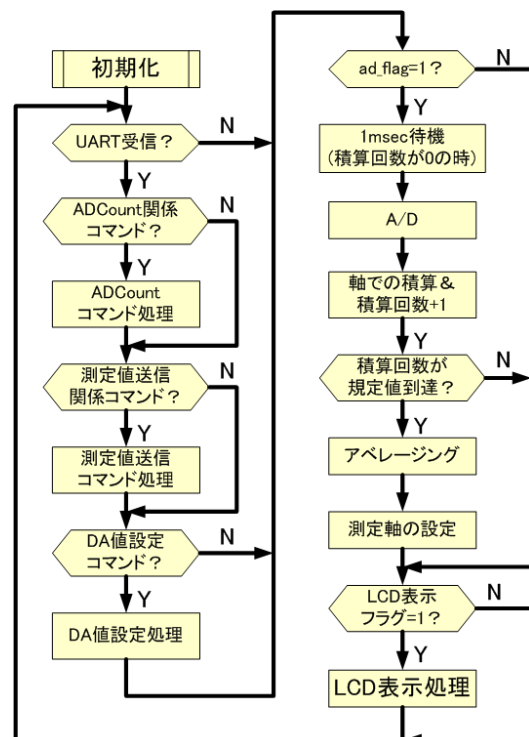


図 3 : dsPIC のフローチャート

制御開始がボタンのクリックかメニューから選択されると制御を開始する。まず所定の周期で dsPIC に磁場測定値の送信を要求する。データを受信したら測定値データであることを確認し、前掲 2-2 の要領でコイル電流を算出し、DA 値に換算して dsPIC に送信する。

ウィンドウの表示を更新した後、自動終了が有効であればその条件を満たしたかどうかを検証し、満たしていれば制御を終了する。アプリケーションの終了がメニューから選択されたら、制御条件を設定ファイルに保存してアプリケーションを終了する。

次項では dsPIC と制御アプリケーションの開発の中で特に苦心した、dsPIC による高速 A/D 変換プログラムと Visual Basic によるシリアル通信制御プログラムに絞って述べる。

3-2.dsPIC による高速 A/D 変換プログラム

dsPIC30F4013 による磁場測定はタイマ 3 の割り込みを用いた。タイマ 3 の初期化においてクロックソースをシステムクロック(今回は 7.3728MHz 水晶発振器を内部 PLL で 4 倍した 29.4912MHz)、プリスケアラを 1、分周値を 295 とすると

OpenTimer3(T3_ON & T3_GATE_OFF&T3_PS_1_1 &T3_SOURCE_INT, 295-1)

とすることで、割り込み周波数を $29.4912\text{MHz} \div 1 \div 295 = 99.97\text{kHz}$ と出来る。周期は $1 \div 99.97\text{kHz} \approx 10 \mu\text{sec}$ であり、この周期でタイマ 3 の割り込み処理が行える。

実際の割り込み処理は、次のように行う。

まず、タイマ 3 の割り込み関数をリスト 1 のように記述する。ad_flag が磁場測定値の A/D 変換を行うフラグである。この関数がタイマ 3 の割り込みによって $10 \mu\text{sec}$ ごと呼び出され、フラグがセットされる。なお、タイマ 3 の割り込み実行を示す内部レジスタである IFS0bit の T3IF ビットをクリアしておく必要がある。メインルーチンにおいて ad_flag がセットされていれば A/D 変換と積算処理を行う。

一方、dsPIC 内部の A/D モジュールを設定しておく。AN0 を基準電圧源、AN2 に MI センサの出力 Vo を接続し、リスト 2 のように記述することで内部レジスタ ADCON1、ADCON2、ADCON3 を設定する。

ここで、A/D 変換時間を T_{CONV} 、A/D 変換クロック周期 T_{AD} とすると、

$$T_{\text{CONV}} = 14T_{\text{AD}} \quad \dots (7)$$

で定義される時間が A/D 変換に必要である³⁾。T_{AD} は ADCON3 レジスタの ADCS ビット(6bit)で選択できる。T_{AD} と ADCS

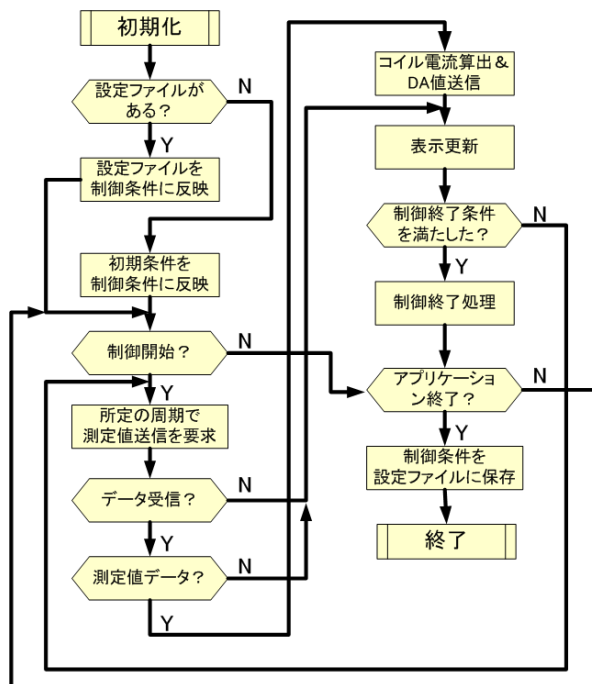


図 4：制御アプリケーションのフローチャート

```
void __attribute__((interrupt, auto_psv)) _AltT3Interrupt(void)
{
  ++Usec10; //Count '10usec'
  ad_flag=1; //Set A/D flag
  if(Usec10>=100){
    Usec10=0;
    ++Msec; //Count 'msec'
    if(Msec>=1000){
      Msec=0;
      ++sec; //Count 'sec'
      lcd_flag=1; //Set LCD display flag
      if(sec>=60){
        sec=0;
        ++minute; //Count 'minute'
        if(minute>=60){
          minute=0;
          ++hour; //Count 'hour'
          if(hour>=100){
            hour=0;
          }
        }
      }
    }
  }
  IFS0bits.T3IF=0; //Clear TIMER3 Interrupt
}
```

リスト 1：タイマ 3 の割り込み関数

ビットが表す数値 ADCS には以下の関係式が成立する。

$$T_{AD} = \{T_{CY}(ADCS+1)\} / 2 \quad \text{ただし } T_{CY} \text{ は命令サイクル} \dots (8)$$

T_{AD} の最小値は 334nsec と規定されているので、式(7)(8)より T_{CONV} の最小値は $334\text{nsec} \times 14 \approx 4.7 \mu\text{sec}$ となる³⁾。

今回は A/D 変換クロックをシステムクロックにしたため、リスト 2 における ADCON3 の設定と T_{CY} が $1 \div 29.4912\text{MHz} = 33.9\text{nsec}$ であることから、 $T_{AD} = 10T_{CY} = 33.9\text{nsec} \times 10 = 339\text{nsec}$ となり、 T_{CONV} は $14 \times T_{AD} = 14 \times 339\text{nsec} \approx 4.75 \mu\text{sec}$ となる。また、A/D モジュールのサンプル時間 T_{SMP} が最大 $3.74 \mu\text{sec}$ であることから³⁾、A/D 変換に必要な時間の総和 $T_{CONV} + T_{SMP}$ は $4.75 \mu\text{sec} + 3.74 \mu\text{sec} = 8.49 \mu\text{sec}$ と算出できる。タイマ 3 の割り込み周期を $10 \mu\text{sec}$ としたのは、この算出結果に基づくものである。

T_{CONV} を不必要に長くするとホールド・コンデンサからの漏れ電流により電圧降下が生じ、変換精度が低下する。また、高速 A/D 変換と積算を組み合わせることで精度の向上とノイズの低下が可能である。

```

//*****A/D Initialization Function*****//↓
void InitADC12()↓
{↓
  //Confirm Turning-off A/D module↓
  ADCON1bits.ADON=0;↓
  //Initialization A/D module↓
  _ADCHS= ADC_CHO_POS_SAMPLE_AN2 &↓
  ADC_CHO_NEG_SAMPLE_NVREF;↓
  SetChanADC12( _ADCHS);↓
  ConfigIntADC12(ADC_INT_DISABLE);↓
  _ADCON1=ADC_MODULE_ON &↓
  ADC_IDLE_CONTINUE &↓
  ADC_FORMAT_INTG &↓
  ADC_CLK_AUTO &↓
  ADC_AUTO_SAMPLING_ON &↓
  ADC_SAMP_OFF;↓
  _ADCON2=ADC_VREF_EXT_AVSS &↓
  ADC_SCAN_OFF &↓
  ADC_SAMPLES_PER_INT_1 &↓
  ADC_ALT_BUF_OFF &↓
  ADC_ALT_INPUT_OFF;↓
  //Tad={Tcy(ADCS+1)}/2>334ns, Then ADCS>18.7, Tad=10*Tcy↓
  _ADCON3=ADC_SAMPLE_TIME_1 &↓
  ADC_CONV_CLK_SYSTEM &↓
  ADC_CONV_CLK_10Tcy;↓
  _ADPCFG=ENABLE_AN2_ANA;↓
  _ADCSSL=SCAN_NONE;↓
  OpenADC12(_ADCON1, _ADCON2, _ADCON3, _ADPCFG, _ADCSSL);↓
}↓

```

リスト 2 : A/D モジュールの設定

3-3. Visual Basic によるシリアル通信制御プログラム

VB2005 は仮想 COM ポートを用いたシリアル通信制御をサポートしている。まず装置と PC を接続して電源を投入し、装置に割り当てられた仮想 COM ポート番号を確認する。次に VB2005 のソースの冒頭で以下のように定義する。

```
Public WithEvents _com As New System.IO.Ports.SerialPort
```

通信条件がたとえば「921600bps, 8bit, パリティなし, 1 ストップビット」であるなら、_com のプロパティとしてリスト 3 のように記述し、_com.Open()関数で仮想 COM ポートを開くと通信できるようになる。本装置では利便性を向上するため、初めて制御アプリケーションを起動した際にリスト 3 の条件で仮想 COM ポートを開き、設定ファイルに記録する。設定ファイルはアプリケーション終了時に設定を反映して更新されるので、起動のたびに通信条件を設定する必要はない。

本装置では最短 1sec ごとに通信を行う。まずタイマによるイベントハンドラで装置に積算済みの 3 軸の磁場測定値を要求する。仮想 COM ポートの受信バッファにデータが入力されることによるイベントハンドラ内で、データを文字列変数 strReceivedData に格納する(リスト 4)。通信エラーが発生した場合も strReceivedData にエラーメッセージを格納する。次に前述 2-2 の要領でコイル電

```

'シリアルポート(COM)初期設定
With _com
  .BaudRate = 921600
  .DataBits = 8
  .Parity = IO.Ports.Parity.None
  .PortName = "COM6"
  .StopBits = IO.Ports.StopBits.One
End With

```

リスト 3 : 仮想 COM ポートとの通信条件設定

```

'データ受信本体
Try
  strReceivedData = _com.ReadLine
Catch ex As Exception
  strReceivedData = ex.Message
End Try

```

リスト 4 : 受信バッファからのデータ読み取り

流を算出するため、strReceivedData から X, Y, Z 各軸の磁場測定値を抽出し、コイル電流値の算出を行い、装置に送信する。

4. 測定結果

1 辺約 20cm の立方体の周囲に銅線を巻きつけて X,Y,Z 軸のコイルを各 1 つずつ構成し、中心に MI センサを設置して地磁気のキャンセル制御の様子を測定した。2 秒間隔、64 回積算での制御結果を図 5-1、5-2 に示す。グラフの縦軸は磁場(単位: Gauss)、横軸は制御時間(単位: sec)である。

X,Y,Z 各軸のコイルに測定結果に基づいて算出した電流を流すため、制御開始から 1~3 秒くらいは磁場が大きく変動するが、開始 5 秒ではほぼ全軸の磁場が 0 になり、以降全軸の磁場がほぼ 0 に制御され続ける。



図 5-1 : 2 秒間隔の制御による
地磁気キャンセルの様子(全容)



図 5-2 : 2 秒間隔の制御による
地磁気キャンセルの様子(拡大)

1 秒間隔の制御を行いつつ、無作為に外部磁場として磁気を帯びたドライバーを近づけた際の結果を図 3-3 に示す。外部磁場の接近時に磁場が大きく変動するが、2 秒程度で全軸の磁場が 0 に収束するように制御できた。

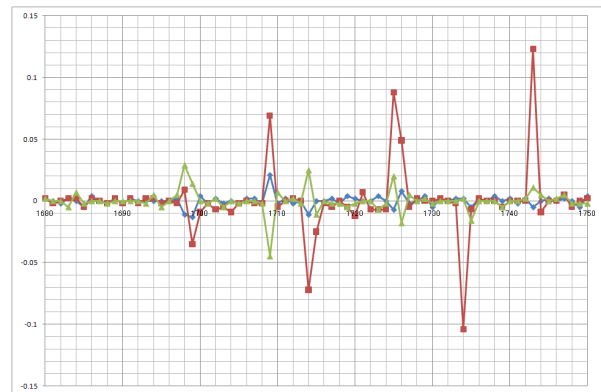


図 5-3 : 1 秒間隔の制御による外部磁場応答の様子

5. まとめ

dsPIC と VB2005 を用いて、小さなハードウェア構成で高速制御が可能な地磁気キャンセラーを製作できた。

USB を用いた通信や制御は難解というイメージがあるが、VB2005 による仮想 COM ポートを介したシリアル通信により予想以上の高速通信が比較的容易に実現できた。PC のインターフェース変遷に対応するために、USB インターフェースを積極的に採用できる道筋が出来た。

各種サンプルプログラムを基に開発を進めたが、コンパイルできてもまったく動作しなかったり、通信エラーが発生して極端に大きなコイル電流が流れたりするトラブルに見舞われた。サンプルプログラムを過信せず、ヘッダファイルやデータシートを丁寧に読み解き、開発に適した修正を怠らないことが必要であると実感した。

参考・引用文献

- 1) 「高感度磁気センサとコイルで作る磁場キャンセラー」 操田浩之 トランジスタ技術 2010 年 2 月号 p179-p188
- 2) アイチ・マイクロ・インテリジェントの Web ページ http://www.aichi-mi.com/5_2_transistor_gijutu/transistor_gijutu.htm
- 3) 「パソコンを使ったデータ記録計を作る」 小野寺康幸 トランジスタ技術 2007 年 9 月号 p114-122