

mpms-xl-a, DC, RSO ノイズ比較

山内徹

2024年3月26日

1 測定精度ノイズ評価方法：

前回、前々回とマグネット制御系や信号受信系のデバイスを交換しつつノイズ評価を行ってきたが、既に Report 01, 02 で述べた通り、温度や磁場依存性なども含めてノイズの有り様に有意な変化は見られなかった。これらの評価は全て DC 駆動ヘッドを用いてる。そこで、今回は駆動系を **RSO** ヘッドに変えて、ノイズ評価を行うことにした。前回、前々回と全く同じく、Si 基盤結晶 (平板状 5 mm 角, 0.5 mm 厚) を面直方向に磁場がかかるように配置し、ノイズ評価を行った。その磁化特性は Report 01, 02 に示してあるので、必要な向きはそちらを参照されたい。

信号検出系とマグネット制御系デバイスは 3 軸 co-axial 同軸ケーブルも含めて、全て装置に元々付いていたオリジナルのものである。念の為、それぞれの device の個体識別情報を以下にリストしておく。

Signal Detection System

- SQUID filter board, 3003-004, REV:E-1, S/N:branc
- SQUID digitizer board, 3003-006, REV:未確認, S/N:未確認
- VHF SQUID amplifier model2000 ser.no. 03-823
- TriAxis cable × 2, no code

Magnet Controll System

- I/O control board assembly, 3003-001 REV F, SER # no code, QS1129009
- I/O utility card assembly, 3003-003B-2
- Shunt Amplifier card assembly, 3004-011, 20226-0015, 7004-011 REV F, SA480

まず最初に以下の問題をノートしておく。現在当電磁気室で利用している carbon fiber 製の RSO プロブは、Air sensitive な試料のマウント用チューブに挿入した格好で保管されている。機械的、力学的に安定安全に保管できるからである。しかし残念ながら、これが仇になった。上記チューブを操作する際に使われるマグネットを利用した部品がチューブに組み込まれている。当該物品は 10 年程度の長い期間、特に使われることなく室内の保管スペースに保存されていたが、この部品のマグネット部分が劣化し、機械的にひび割れなどが生じていた。同時にマグネットが非常に細かい粉末状になって、飛散していたようである。その強磁性粉末によって、RSO プロブが磁氣的に汚染されていた。

当該プロブに、前記の Si 結晶試料をマウントして測定を開始したところ、Si 結晶からありえないほどの大きな強磁性信号が観測された。直ちに強磁性汚染が疑われたので、実体顕微鏡で観察したところ、結晶表面にギリギリ認識できる程度の大きさの粉末が付着していることが分かった。試料結晶をその方位なども力学的に安定させるよう、ストローに挿入しているので、結晶をストロー外に取り出すことは憚られる。従って最初は、エアダスターで洗浄を試みたところ、最

初に観測された非常に大きな強磁性信号は大幅に削減されていたが、まだ少し残留していることが確認された。次に、ストロー内にエタノールを流して洗浄してみたところ、信号自身の絶対値はDCヘッドで測定していた時と概ね同程度になったので、そのままノイズ評価用 sequence を走らせるに至った。

測定は Report 01, 02 と同様の以下の sequences を用いて行った。下記の各磁場温度点で、stable 状態になったのち、multiple dc-measure を $n = 100$ で行った。

- 7 T, 300 K, 5 K
- 1 T, 300 K, 5 K
- 0.1 T, 300 K, 5 K
- 0.01 T, 300 K, 5 K
- multiple RSO-measure, 100 times each.

また上の sequence に加えて以下の sequence も加えた。

- -1.0 \rightarrow +1.0 T, 500 Oe step \Rightarrow 1.0 \rightarrow 7.0 T, 1 T step, @ 5 K
- 7.0 \rightarrow 1.0 T, 1 T step \Rightarrow +1.0 \rightarrow -1.0 T, 500 Oe step, @ 300 K
- multiple RSO-measure, 40 times each.

すべての測定時の RSO parameters は以下にリストする。

- Amplitude : 3 cm
- Number of Cycle : 5
- Scan per Measurements : 2
- Position : Center
- Frequency : 1.0 Hz
- EMU Range : Autoranging
- Measure Axis ; Longitudinal
- Algorithm : Iterative Reg

2 評価結果 (評価期間 2024/03/18 - 2024/03/21)

2.1 noise レベル

Report 02 の図 2 を援用する形で、図 1 に、全く同じ信号検出系および magnet 制御系で測定した、DC(#0)とRSO(#07)での測定結果を示す。上下其々のパネルには、磁化 M と信号の Fitting quality を示す Long Reg Fit を時間発展 (a) と磁場依存 (b) の形式で示している。さらに、今回の Report では重要な意味を持たない¹が、磁場制御系デバイスを交換した測定結果 (Report 02 での #05, #06) を併せて示す。測定 sequence は上述の通りで、温度一定下 ($T = 5, 300$ K) の磁化や Long Reg Fit の時間発展は step-wise な振る舞いとして見える。一方、磁場依存性で、4つの磁場 ($H = 0.01, 0.1, 1.0, 7.0$ T) での、測定データのばらつきは縦に分布した点の連なりで表現され、データが稠密な部分は棒状に見える。勿論、磁場依存性のグラフでは4つの磁場に対応して4本の棒として見える。また、それぞれのグラフの色は、図中に示した通り測定温度の違いを示している。今回、測定前の SQUID Tuning は特に行っていない。

¹なので、コントラストを下げて表示している

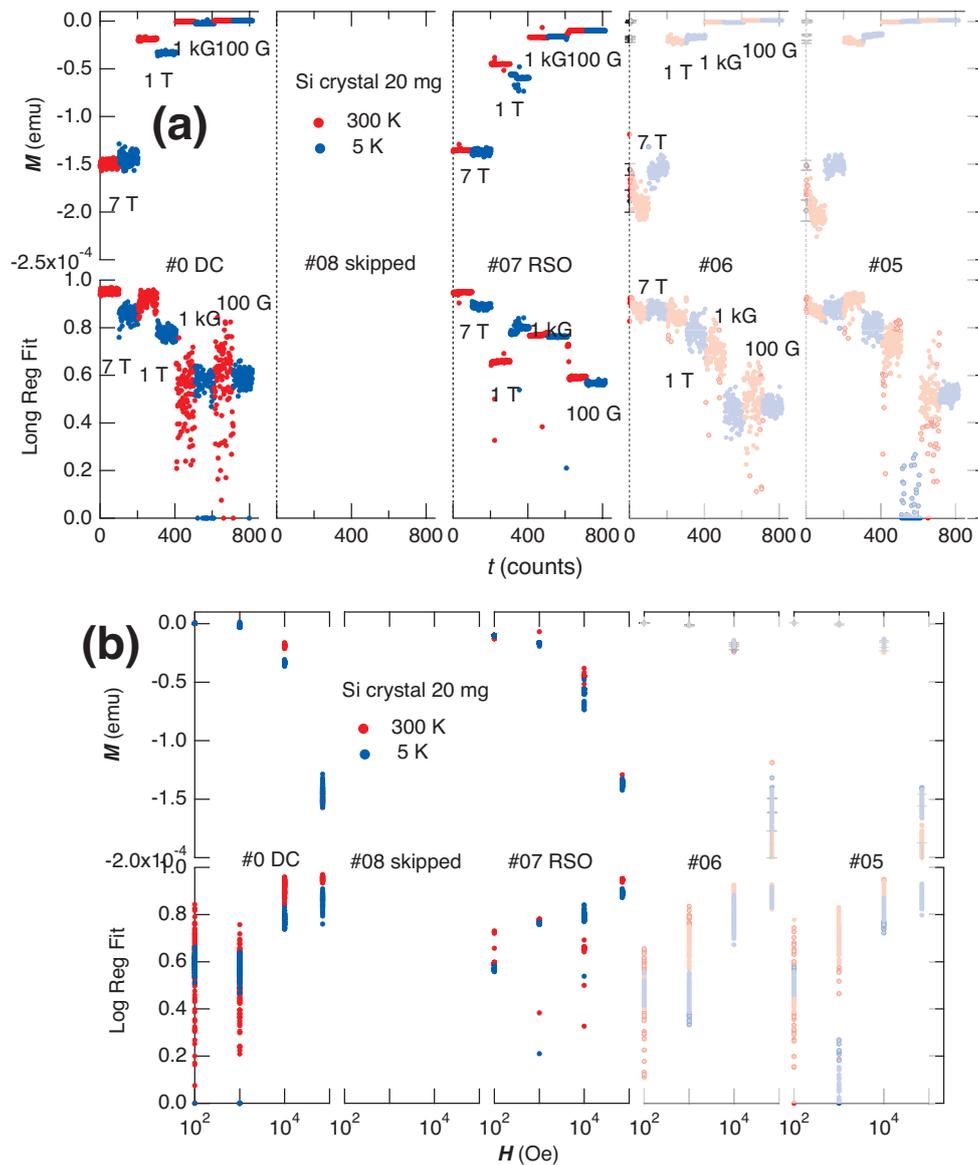


図 1: 3 種類の測定セットアップ (#0 DC, #07 RSO .) 下での、いくつかの磁場 (0.01, 0.1, 1.0, 7.0 T) 温度条件 (5, 300 K) 下の磁化測定値と Long Reg Fit 値の時間発展 (a) と磁場依存性 (b). グラフの色の違いは測定温度の違いによる.

温度, 5 及び 300 K の違いはプロットの色, それぞれ青と赤の違いとして表現されている. 各磁場に対して, 必ず 5 及び 300 K のデータがセットになっていることに注意. 以上は, 過去 2 回の Report と同様である. 一方, 各磁場温度点での測定は, 過去 2 回は multiple dc-measure を使って 4cm scan (scan 数 1, point 数 32) を 100 回行い, 今回は multiple rso-measure を上で示した RSO parameters の元, 100 回行なって統計データとした.

今回の結果として, noise の大きさは温度や磁場などの測定条件によって異なるが, **DC と RSO 測定の間で有意な変化が観測**されて居る. 図 2 に転載して居る, QDJ 社 HP に掲載されている情報²によると, DC と RSO 測定のノイズレベルは, $M = M_0 \pm \delta M$ とした場合, DC が $\delta M \sim 2 \times 10^{-6}$, RSO が $\delta M \sim 6 \times 10^{-7}$ (emu) と読み取れる. この資料は基本的には mpms-3 の商材なので, 旧型の mpms-xl のノイズレベルは大きく見積もられている可能性に, ここでは注意しておくべきである. 元々, メーカー spec でノイズレベルは 3 倍程度 DC の方が大きい. 更に今回の測定から言えることは, RSO と DC 測定を比較すると, DC は常に M の値がばらつく, 一方 RSO の場合 M は

²<https://www.qd-japan.com/products/mpms3/>

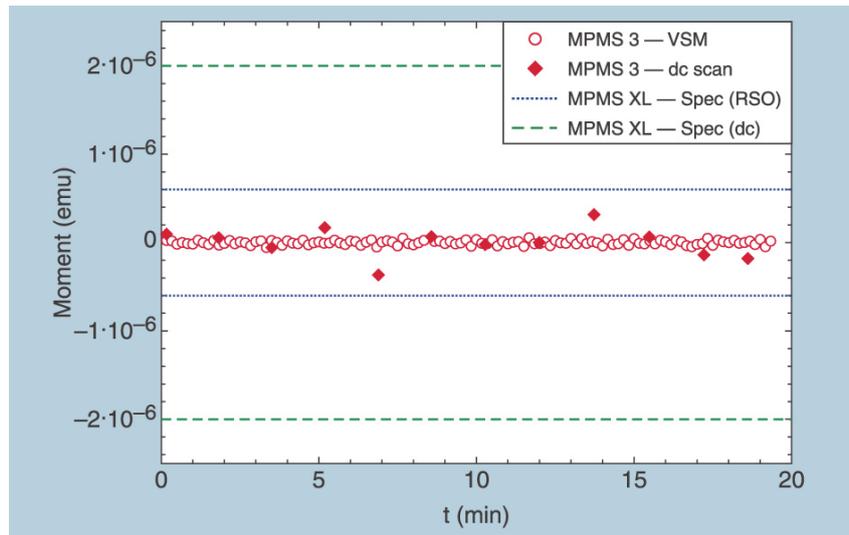


図 2: QDJ 社 HP に掲載されている mpms-xl の dc-と RSO-measure のノイズレベル. 其々緑の破線, 青の点線.

間欠的に外れ値を観測し, それが大きな標準偏差を与えることがある. 特に目立つのは, $H = 1$ T, $T = 5$ K の時, 時間依存性の図 panel (a) で見れる様に, 100 回の測定のうち 5 ~ 7 回程度外れ値を与え, それが磁場依存性 panel (b) で棒状に見える. その棒の長さは δM として換算すると $\sim 2 \times 10^{-5}$ emu という値である. 一方, その $H = 1$ T, $T = 5$ K 時の 100 回測定から与えられる標準偏差は $\sim 3 \times 10^{-6}$ emu で, グラフから直感的に読み取れる数値と乖離があることを指摘しておく. その上で, 観測された δM の特徴的な値を抜粋すると以下の通りである.

- 最良の場合 (40 回測定, 0.01 ~ 1 T, 5 K), $\delta M \sim 5 \times 10^{-8}$ (emu)
- 最悪の場合 (40 回測定, 7 T, 300 K), $\delta M \sim 5 \times 10^{-6}$ (emu)

つまり最悪の場合, **カタログ値の 8.3 倍のノイズ**が観測される場合がある. 一方, 外れ値の観測回数がたまたま少ない場合は $H = 7$ T に於いても, **カタログ値の 0.8 倍程度**で収まることもある. 以上は, 磁場が 7 T の場合必ずカタログ値を数倍以上上回るノイズを観測した DC 測定と対照的である.

もう少し RSO と DC 測定で観測されるノイズの違いを定量的に取り扱うために, 図 3 に Report 02 の図 4 に重ねる形で, 今回観測された $n = 100$ や $n = 40$ での multiple RSO-measure から得られた標準偏差 δM (ndat file 中の StandardError) を, panel (a) に測定時外部磁場の絶対値 $|H|$ と, panel (b) に測定された磁化の絶対値 $|M|$ に対してプロットして居る. この panel (a) と (b) は, 共に両対数であることに注意されたい.

濃いコントラストで青や赤の \times と $+$ symbol で示して居るのが其々, multiple RSO-measure を $n = 100$ と $n = 40$ で行った結果の標準偏差である. 青赤の色の違いは測定温度 $T = 5$ と 300 K の違いによる. 一方, 薄いコントラストで示したものは, 過去の DC 測定で得られたもので, それらは Report 02 の図 4 の再掲である. この図に太い緑色の点線で示したのは RSO 測定のカタログ値で, 6×10^{-7} (emu), DC 測定のカタログ値, 2×10^{-6} (emu) は細い緑色の点線で表示して居る.

まずここから, DC および RSO 測定でのノイズの現れ方に, 有意な違いがみて取れる. 多くの場合, RSO 測定の方がノイズが小さい. 特に注目値するのは, $H = 7$ T の磁場下でも 6 回中 3 回が RSO カタログ値以上, 1 回が DC カタログ値以上である. さらには $H > 1$ T で見ても, DC カタログ値を上回ったものは 2 回に止まり, RSO カタログ値を上回るのは 4 回のみ. DC 測定時に問題になった, δM が磁場に比例するかのように大きくなる傾向は, RSO 測定では相当程度抑えられて居る. とはいえ, その増加傾向が, DC 測定のそれに比べると小さいが, やはりある様に

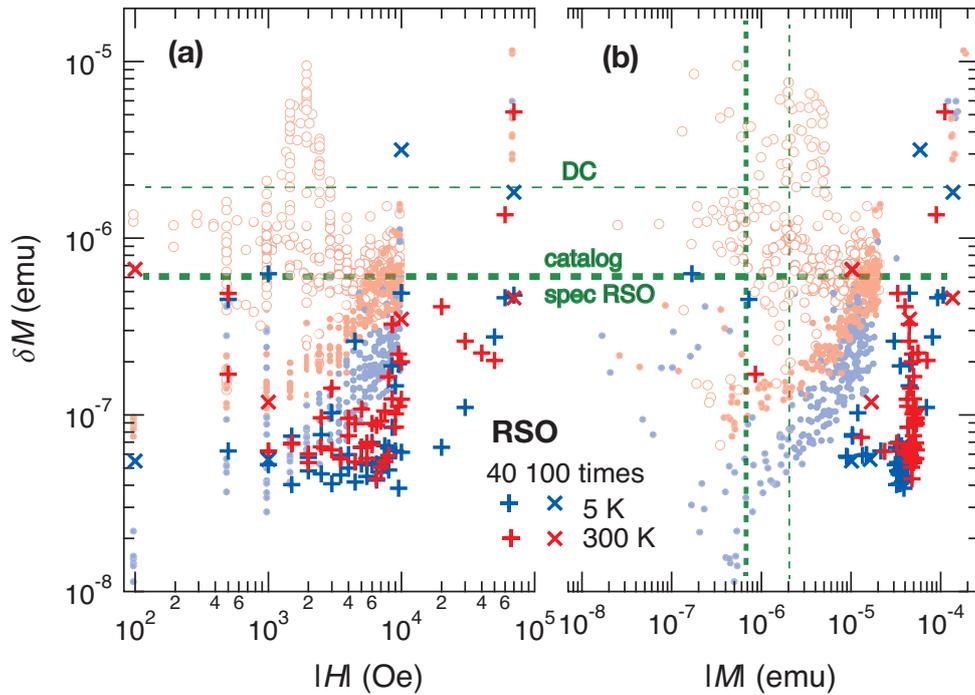


図 3: multiple RSO-measure を $n = 100$ (\times symbol) と $n = 40$ ($+$ symbol) で行った結果, その標準偏差 (ndat file 中の StandardError) を, (a) 測定時の外部磁場の絶対値 $|H|$ と, (b) 測定された磁化の絶対値 $|M|$ に対して両対数でプロットしたもの. グラフの色の違いは測定温度の違いによる. 薄いコントラストで示したものは過去の DC 測定で得られたものである.

見える. この辺りの所見に関しては, 今現在の RSO 測定のデータ蓄積量が DC 測定のそれに比べてかなり少ないので, 確定的ではないと言うべきである. 一方, $H < 0.1$ T の低磁場側では δM は DC と RSO で殆ど優劣が無いが, 若干 RSO の方が大きい様にも見える. $0.1 < H < 1$ T の中間磁場付近では, RSO の場合 DC に比べて δM は, 300 K でも 5 K でも, 1/3 ないし 1/6 程度に抑えられている.

実は, 先に述べた RSO プローブの強磁性粉末汚染の影響が, 図 3 panel (b) に現れて居る. 濃いコントラストの \times と $+$ symbol が $|M| \sim 5 \times 10^{-5}$ emu に confine して, それより小さい $|M|$ でのプロットが, DC の場合に比べて極端に少ない. このことの δM への影響はあまりないようにも思えるが, 次の目標として, 汚染の無いプローブと新しい Si 結晶基盤を用いて, RSO 測定の更なるデータ蓄積の意味も合わせて, 測定を行なっていくつもりである.

2.2 まとめ

特に磁化曲線などで細かい構造が得られる可能性がある場合, その構造がどの辺りの外部磁場下で発現するかで, RSO/DC 測定の選択を考えるべきである. $H > 0.1$ T での高精度測定を所望するのであれば, RSO 測定を選択した方が有利で, $H < 0.1$ T であれば, 微妙ではあるが, やや DC 測定の方が有利と言える. また両測定とも, $T = 300$ K と 5 K の比較で, 高温で δM がやや大きくなる傾向がある. 更には, RSO 測定プローブからの強磁性粉末汚染のリスクを完全に払拭できるかは, まだこれからである. 以上本 Report を, mpms-xl-a ユーザに参考にしてもらえたら本望である.