

mpms-xl-a 信号検出系由来ノイズ評価

山内徹

2024年3月9日

1 測定精度ノイズ評価方法：

図1に示した磁化特性を持つ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, 以下に示す条件で繰り返し dc-measurement を行った. 測定は以下の検出系のセットアップを用いた. 以下二つのリストに挙げた検出デバイスは, 2024年1月にQDJから借り受けたものと, 装置に元々付いていたオリジナルのものである. それらを一つづつ装置オリジナルのデバイスと交換しつつ, 以下の操作と測定を繰り返した.

QDJ given devices

- SQUID filter board, 3003-004, REV:E7, S/N:QS17400016
- SQUID digitizer board, 3003-006, REV:K4, S/N:QS16380017
- VHF SQUID amplofier, model2000 ser.no. 03-661

original 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

また, ノイズ評価は以下の sequences を用いて行った. 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 dc-measure, 100 times each.

デバイス交換後, この sequence を走らせる前に, 常に SQUID auto tuning を行った. その時の tuning value は適宜以下に示す.

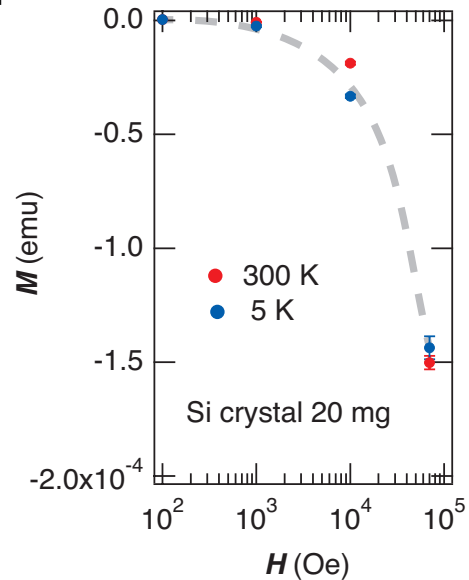


図1: 今回 noise 評価に使用した, 反磁性しか持たない pure-Si 結晶の 5, 300 K での磁化過程. 横軸が対数表示なのに注意.

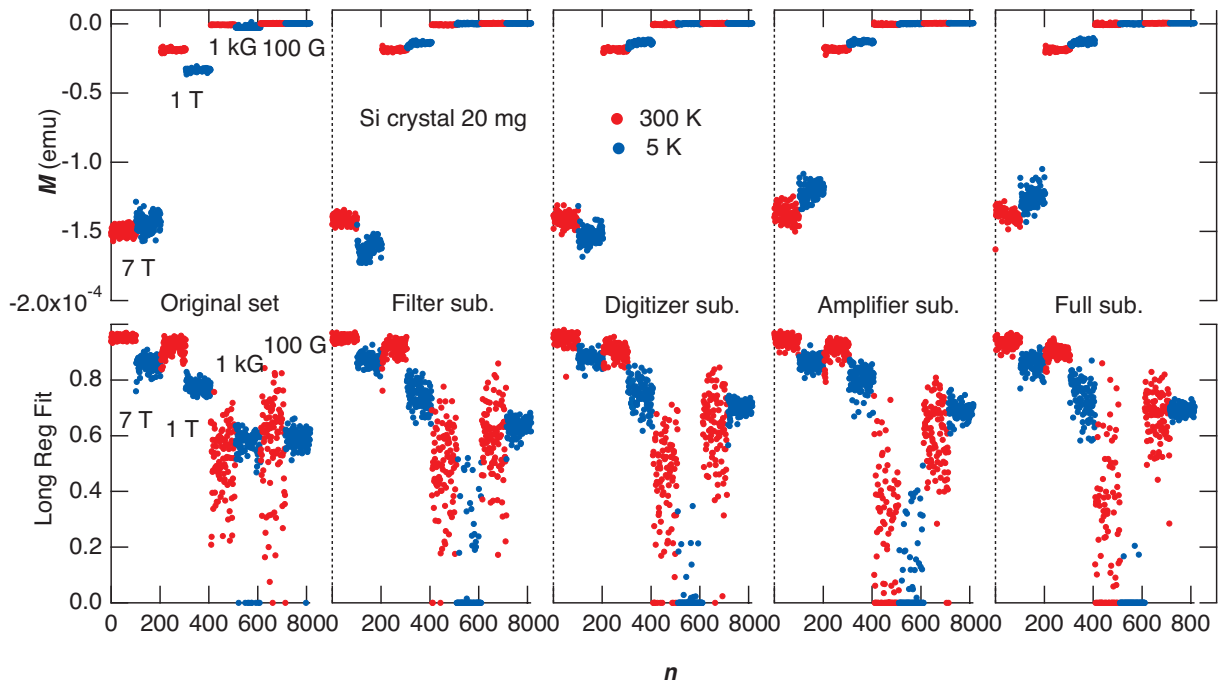


図 2: グラフ中各パネルに表示した様々な測定セットアップ, および各磁場温度条件下の磁化測定値と Long Reg Fit 値の時間発展. 特にグラフの色の違いは測定温度の違いによる.

2 評価結果 (評価期間 2024/01/29 - 2024/01/31)

2.1 noise レベル

図 2 にオリジナルのデバイスセットでの測定結果と, そこから各デバイスを交換しつつ, 最後に全てを交換しての測定結果を時間発展の形式で示す. 各検出セットアップはグラフ中各パネルの notation に記述している. また, 測定 sequence は上述の通りで, 磁場の変化は磁化や Long Reg Fit で step-like な振る舞いとして見え, 其々 notation している. 各 notation の意味は,

- 「Original set」は何も交換していない状態, Current Tune Value 0.67,
- 「Filter sub.」は SQUID filter board のみの交換. Current Tune Value 0.67,
- 「Digitizer sub.」は SQUID digitizer board のみの交換. Current Tune Value 0.66,
- 「Amplifier sub.」VHF SQUID amplifier のみの交換. Current Tune Value 1.01,
- 「Full sub.」は上述デバイス全ての交換. Current Tune Value 1.05,

更に, 温度, 5 及び 300 K の違いはプロットの色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. ここで, 各磁場温度点での測定は「multiple dc-measure」を使って 4cm scan (scan 数 1, point 数 32) を 100 回行っている.

まず, 最初の結論は, **送付された device によっては, noise の大きさに有意な変化は生じておらず, 検出系が今回の noise の原因ではない**と考えられる. 一応, QDJ 社 HP¹に掲載されているノイズレベルを比

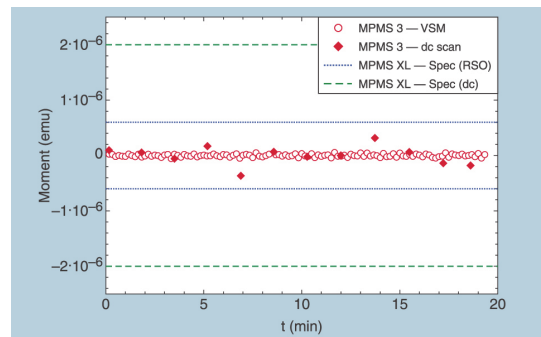


図 3: QDJ 社 HP に掲載されている mpms-xl の dc-measure ノイズレベル (緑の点線)

¹<https://www.qd-japan.com/products/mpms3/>

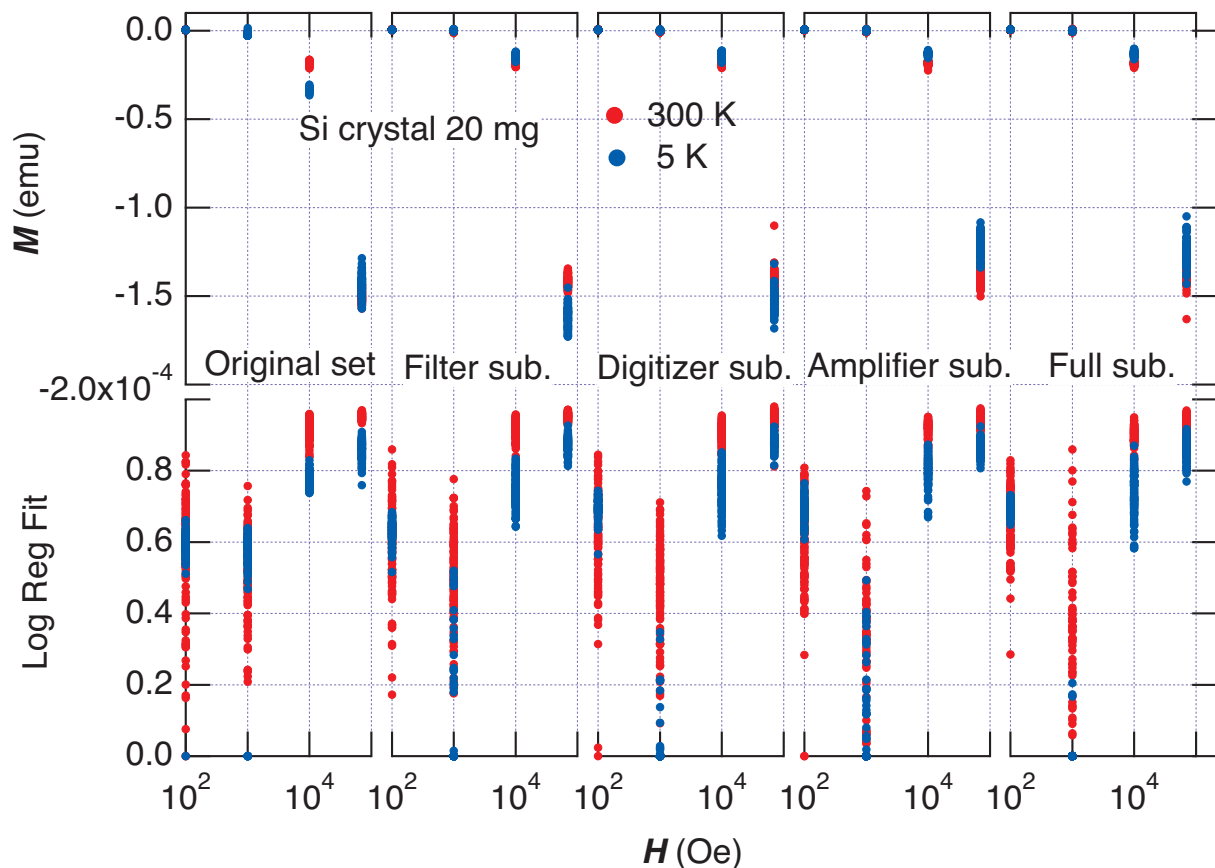


図 4: グラフ中各パネルに表示した様々な測定セットアップ下での磁化測定値と Long Reg Fit 値の磁場依存性. グラフの色の違いは他の図と同様に測定温度を表現している.

較のために図 3 に示しておく. この図 3 からは, $M = M_0 \pm \delta M$ とした場合, 図 3 のノイズレベルは $\delta M \sim 2 \times 10^{-6}$ (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. 一方, 今回の測定でノイズレベルは, $H = 7$ T の時, 即ち Si 結晶が最も大きな信号を与える時に, 以下にリストする数値の通りである.

- 最良の場合 (Original set, 7 T, 300 K), $\delta M \sim 6.8 \times 10^{-6}$ (emu)
- 最悪の場合 (Full sub., 7 T, 5 K), $\delta M \sim 16.3 \times 10^{-6}$ (emu)

つまり, 上記の**カタログ値の 3.5 ~ 8.2 倍の大きさのノイズ**が観測されている. 磁場が 7 T から小さく 1 T, 1 kG となった時, つまり Si 結晶に由来する磁化信号が小さくなれば, それに伴って δM の値は小さくなることが判る. この noise 特性は, 磁場を与える magnet が persistent mode であることと, SQUID の原理を考えると, 一見おかしなことに思えるので以下で今一度考察する.

2.2 noise の磁場特性

図 4 には, 図 2 で示したデータを, 今度は磁場依存性に焼き直して示している. 各 panel の notation の意味は既に示した通り. 各パネル横軸は磁場の対数表示である. 最低磁場は 100 Oe, 最高磁場は 70000 Oe である. 例によって, 5, 300 K の温度の違いはグラフの色で表現されている.

この図からも, 7 T 時の 5, 300 K 共に大きな δM が見て取れる. 因みに, δM や Long Reg Fit 値のばらつきは, グラフ中の縦方向の点のばらつきとして表現される. この図で述べておくべき重要なことは 2 つある.

A 磁場に伴う δM の変化,

B 磁場に伴う Long Reg Fit 値の変化とその $H = 1000$ Oe での特異性.

A は図 2 でも確認できる. 一方, B に関しては少し細述する. まず, 図 4 の横軸は磁場の対数表示で, データ点のあるところは, $H = 100, 1000, 10000, 70000$ Oe の 4 点だけである. 上側パネル, 即ち磁化の磁場依存性, $M(H)$ は単調に減少しているように見える. 一方下側パネル, Long Reg Fit 値の磁場依存性は単調ではなく, $H = 1000$ Oe で特異的に極小値を持っているように振舞っている.

この理由は単純で, 理想的には反磁性物質である純粋な Si 結晶でも, $H = 100$ Oe 程度の磁場下で, 僅かに正の値をもつ. 少し磁場が強くなって $H = 1000$ Oe 程度になると, この僅かな磁化が反磁性とキャンセルして, よりゼロに近い磁化を示す. 当然, 実効的に SQUID の信号はそれに伴い小さくなり, dc-measurement の出力関数は所定の形状を示すことができず, fitting の信頼性を示す Long Reg Fit 値はゼロに近くなる. さらに磁場を $H = 10000, 70000$ Oe と強くしていけば, 系の反磁性的な特性から負の磁化が次第に大きくなり, 実効的な SQUID 信号が増加するため, Long Reg Fit 値は 1 に漸近していくことになる.

Multi-Vu に標準搭載されている便利な機能に「multiple dc-measurement」なる機能がある. 勿論, 前述の通り今回の noise 評価にも使っている. sequence 中でこの機能を利用すると, 当該ソフトが拡張子に“.ndat” とついたデータファイルを, 自動的に生成してくれる. このファイル中には, multiple dc-measurement が繰り返し測定をして得られた, 平均値や標準偏差などの統計データがまとめられている. この統計データは, 各検出セットアップ, 磁場, 温度毎に得られる.

図 5 には, それらの中の平均磁化と標準偏差を, 磁場の関数として両対数表示で示している. 磁化 M は上で述べた通り, $H = 1000$ Oe 程度を境にして低磁場側の僅かな正の値から, 高磁場側の負の値になるため, ここではその絶対値 $|M|$ の磁場依存性として下側のパネルに表示している. また δM に相当する値として標準偏差の磁場依存性も, 上側のパネルに併せて表示している.

この図は, 各検出セットアップ, 各温度, 各磁場毎に $n = 100$ の測定を, その平均値で代表してプロットしていることになる. 特に $|M|$ の磁場依存は上で述べた理由により, $H = 1000$ Oe 付近 Long Reg Fit 値がゼロ近いため, かなり大きくばらけている. ここで得られる最も重要な知見は, 平均磁化の絶対値 $|M(H)|$ の $H = 1000$ Oe で見られる特異性が, 標準偏差の磁場依存性 $\delta M(H)$ に見られず, 磁場 H に対して単調な振る舞いをするように見えることである. このことは, 今回問題になっている測定ノイズ δM が, 試料が与える磁化 M より, 外部マグネットが与える磁場 H に由来している可能性が高いことを示している.

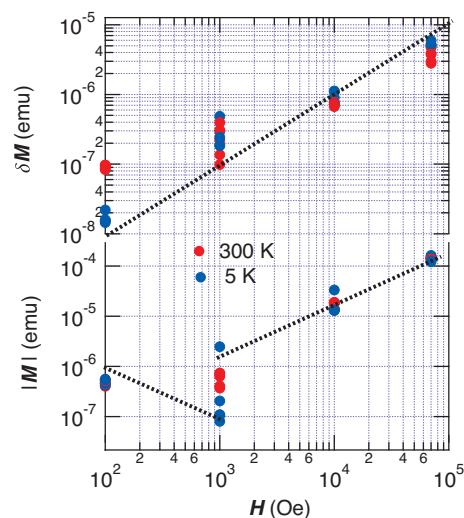


図 5: multiple dc-measurement で自動生成される統計データを利用した平均磁化の絶対値 $|M|$ と, その標準偏差 δM の磁場依存性. 各検出セットアップ, 各温度, 各磁場毎に $n = 100$ の測定を, その平均値で代表して, 両対数表示している