

mpms-xl-a マグネット制御系由来ノイズ評価

山内徹

2024年3月9日

1 測定精度ノイズ評価方法：

前回, Report 01 で使用した全く同じ試料, 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. 今一度, 図 1 にその磁化特性を示しておく. ノイズ評価測定は, 以下のマグネット制御系デバイスの交換と, 唯一信号検出系として 3 軸 co-axial 同軸ケーブルを交換しつつ. 繰り返し dc-measurement を行った. 以下二つのリストに挙げた検出デバイスは, 2024 年 2 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.

QDJ given devices

- I/O control board assembly, 3003-001
- I/O utility card assembly, 3003-003B
- Shunt Amplifier card assembly, 3004-011, 20226-0015, 7004-011 REV F
- TriAxis cable × 2, 3047-001N (SQUID detection)

original devices

- 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
- TriAxis cable × 2, no code (SQUID detection)

まず最初に, 上のデバイスを全て交換しノイズを測定した. 測定は Report 01 と同様の以下の 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.

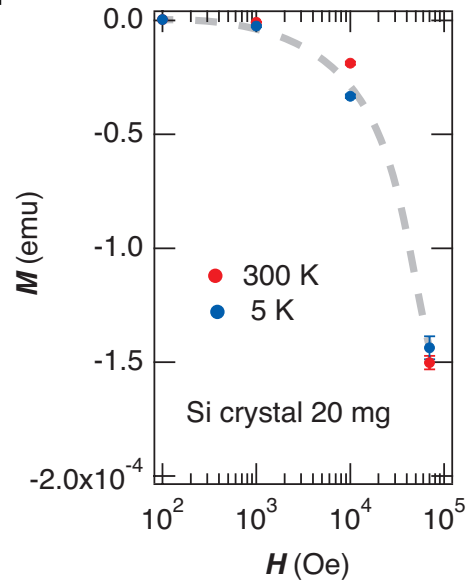


図 1: 今回 noise 評価に使用した, 反磁性しか持たない pure-Si 結晶の 5, 300 K での磁化過程. 横軸が対数表示なのに注意.

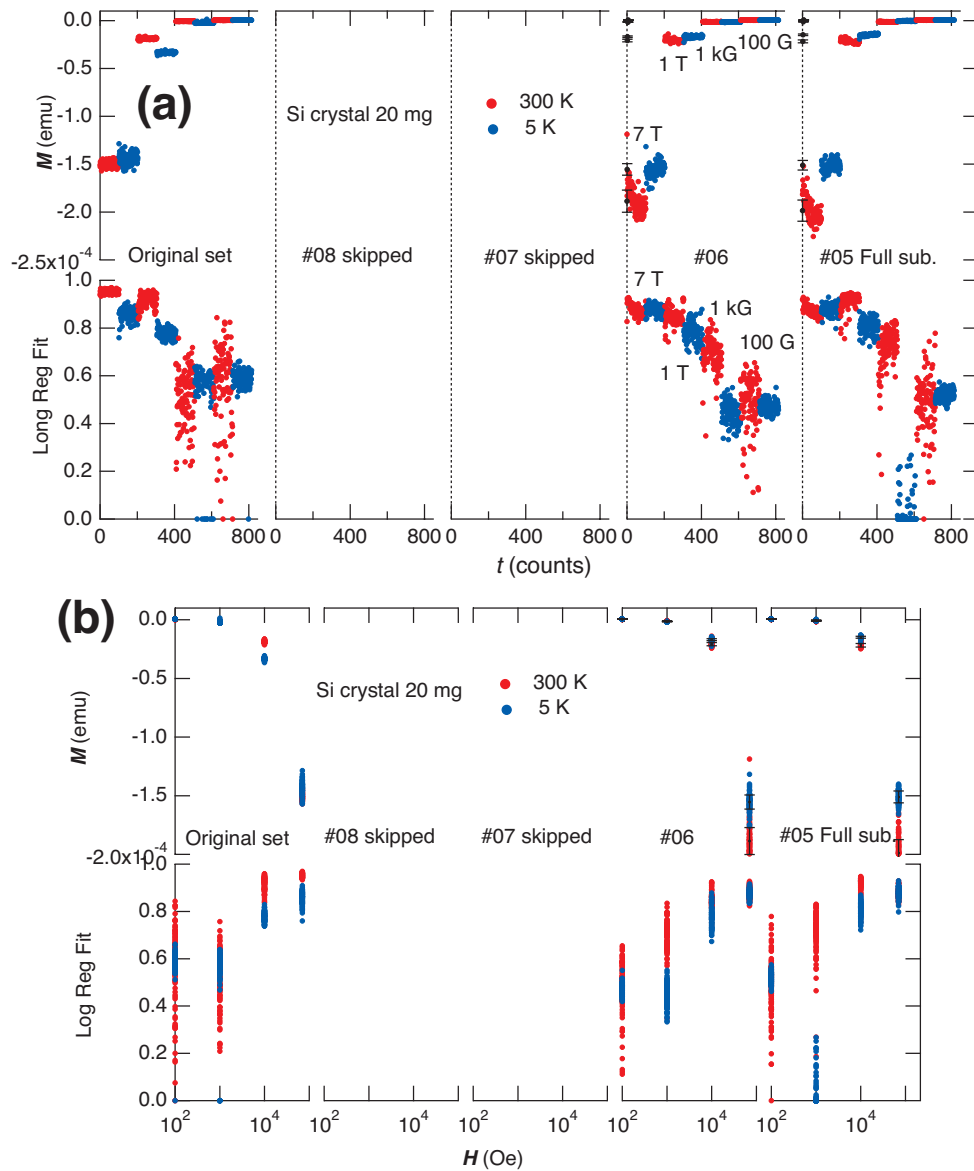


図 2: 3 種類の測定セットアップ (original set, #06, #05 Full sub.) 下での、いくつかの磁場 (0.01, 0.1, 1.0, 7.0 T) 温度条件 (5, 300 K) 下の磁化測定値と Long Reg Fit 値の時間発展 (a) と磁場依存性 (b). グラフの色の違いは測定温度の違いによる.

また上の sequence に加えて、熊本大原グループによる測定時現れた ± 2000 Oe を中心に現れるノイズをも評価するため、下記の sequence での測定も加えた.

- -1.0 \rightarrow +1.0 T, 500 Oe step, @ 5 K
- +1.0 \rightarrow -1.0 T, 500 Oe step, @ 300 K
- multiple dc-measure, 40 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.

2 評価結果（評価期間 2024/02/13 - 2024/02/17）

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(左端)と、2種類のパターンで磁場制御系デバイスを交換しての測定結果を、時間発展(a)と磁場依存(b)の形式で示す。また、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。各 notation の詳細なデバイスセットと、その時の SQUID Tune value は以下の通り。

- 「Original set」は何も交換していない状態, Current Tune Value 0.67,
- 「#05 Full sub.」は上述デバイス全ての交換。Current Tune Value 0.67,
- 「#6」は Shunt Amplifier card 以外全て交換。Current Tune Value 0.66,

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。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。

今回送付された4つ全てのデバイスを置換した結果、**noiseの大きさに有意な変化は生じておらず、磁場制御系が今の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は、 $M = M_0 \pm \delta M$ とした場合、 $\delta M \sim 2 \times 10^{-6}$ (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, 300 K), $\delta M \sim 30.5 \times 10^{-6}$ (emu)

つまり、上記の**カタログ値の3.5～15.2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、前回のReport 01と同様である。

2.2 $H = \pm 2000$ Oe 付近の特異的 noise

今回のnoise評価について、デバイスの交換で全く何も変化が無かった訳ではない。前回のReport 01では見られなかった $H = \pm 2000$ Oe付近の特異的noise成分が、デバイス交換でかなり削減され $-1.0 < H < 1.0$ Tの範囲で比較的高いS/Nが実現した。

先ず図3に今回観測された特異的noiseについての概要と、それがデバイス交換と共にどのように振舞ったかの概略を示す。panel (a)には、2024/02/05～09にかけて熊本大学原グループが行った、 $T = 300$ Kで磁場を $-1.0 < H < 1.0$ Tの範囲で500 Oe stepで刻みながらmagnet stableの状態で $n = 40$ でのmultiple dc-measureの結果を示そう。その磁化曲線を、ndatファイル中の

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

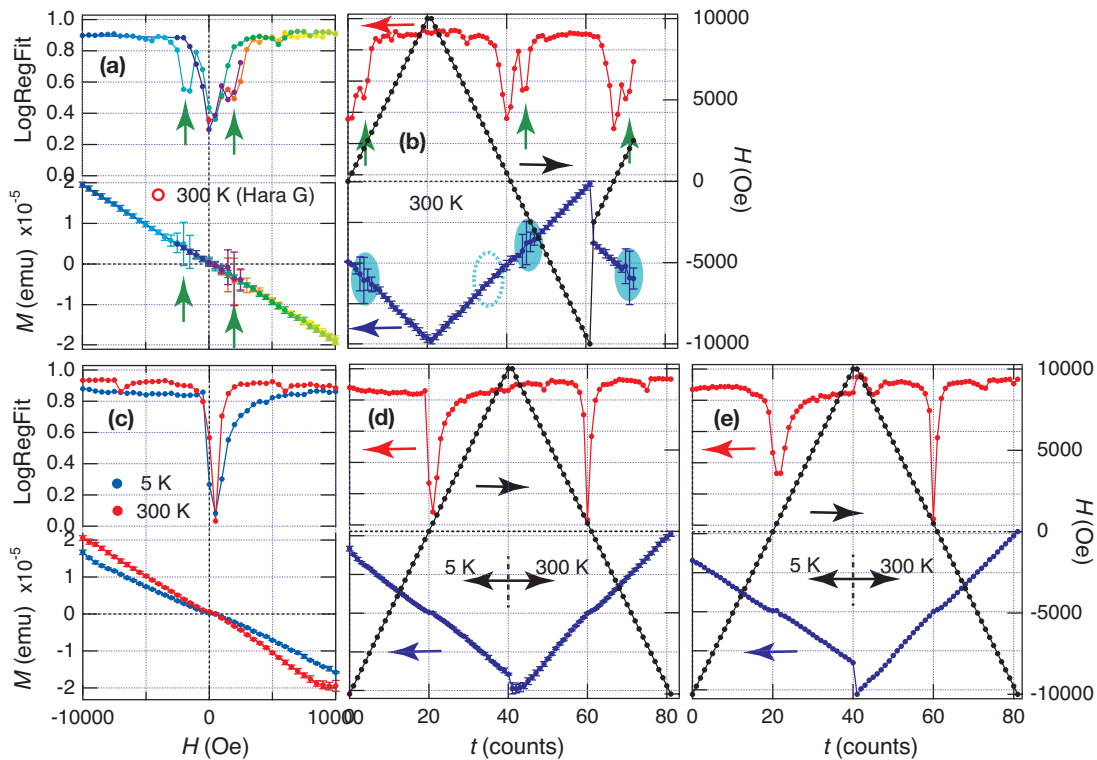


図 3: (a) 2024/02/05~09 の熊本大学原グループが行った, $T = 300$ K で磁場を $-1.0 < H < 1.0$ T の範囲で 500 Oe step で刻みながら magnet stable の状態で $n = 40$ の multiple dc-measure の結果. (c)(d) 2024/02/13~16 に # I/O control board assembly, 3003-001, # I/O utility card assembly, 3003-003B, # Shunt Amplifier card assembly, 3004-011, 20226-0015, 7004-011 REV F, # TriAxis cable $\times 2$, 3047-001N (SQUID detection) 全てを交換した状態で測定したもの. (e) 2024/02/17 に再び全てのデバイスを original に戻しての測定結果.

Avg_Moment_emu の Field_Oe 依存性, エラーバー (標準偏差) を StandardError としてプロットした. ここで磁化曲線そのものは, Si が反磁性物質であることに対応して, 磁場に対して負の傾きをもつ直線として観測され, これは特に問題のある振る舞いではない. 一方, そのエラーバーは panel (a) で緑色の矢印で示している様に, $H = \pm 2000$ Oe 付近で特異的に増大し, 最大でカタログ値の 5 倍, $\delta M \sim 1.0 \times 10^{-5}$ emu に達する. 奇妙なのは, 同じ $H = \pm 2000$ Oe の条件下でも必ず大きなエラーバーが出現する訳ではなく, 磁場の絶対値が大きくなる過程 (magnet charge process) での $H = \pm 2000$ Oe では出現し, それが小さくなる過程 (magnet dis-charge process) では出現しないことである. これは明らかに $H = \pm 2000$ Oe 付近で特異的 noise は magnet 或いはその制御系由来であることを示している.

以上の状況を端的に示すため, 上のデータを時間依存性に焼き直した図を panel (b) に示す. このグラフでは, 赤と青 symbols が其々 Long Reg Fit と磁化の $n = 40$ 回の平均を, 更には磁化の平均値に対してのエラーバーとして, その $n = 40$ 回測定から計算される標準偏差を示し, それらは左軸にスケールしている (赤, 青矢印). そして, 黒 symbol は測定時の外部磁場を示し右軸にスケールしている (黒矢印). 図中, 緑矢印と水色楕円の背景で強調した部分が, 件の magnet charge process での $H = \pm 2000$ 付近に特異的に出現する noise である. 一方, 白抜き水色楕円背景で強調した部分は, magnet dis-charge process での $H = -2000$ Oe になった時に, 上で述べた特異的 noise が現れていないことを示している. 後に示すが, これは全く noise が現れていない訳ではなく, このスケールでは目立たないということは指摘しておくべきであろう. 結論としてこの図では, 外部磁場とその磁場制御 sequence に依存する, カタログ値の 5 倍程度のかかなり大きな noise の出現を見ることができる.

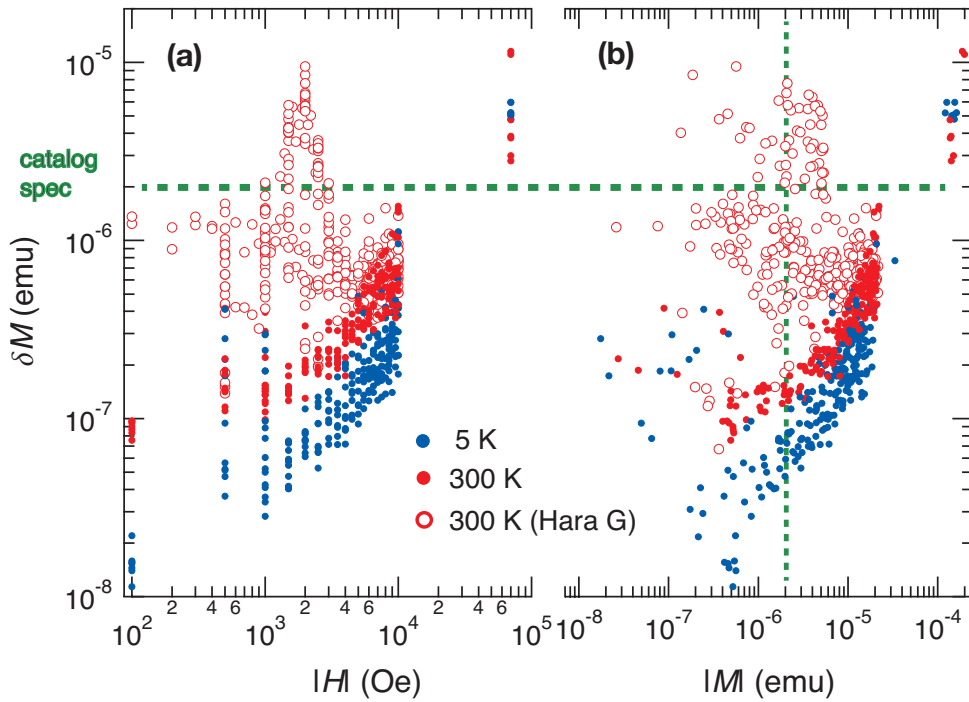


図 4: multiple dc-measure を $n = 100$ と $n = 40$ で行った結果, その標準偏差 (ndat file 中の StandardError) を, (a) 測定時の外部磁場の絶対値 $|H|$ と, (b) 測定された磁化の絶対値 $|M|$ に対して両対数でプロットしたもの. グラフの色の違いは測定温度の違いによる. デバイス交換以前の $H = \pm 2000$ Oe 付近での noise が現れた測定 (全て 300 K で観測) は白抜き symbol で表現している.

この状況を観測したのち, 3日間別のユーザ(広井研池野辺君)の利用を経て, 私自身が2024/02/13から QDJ から送付された I/O control board などを取り替えて, 磁場を $-1.0 < H < 1.0$ T の範囲で 500 Oe step で刻み, magnet stable の状態で $n = 40$ で multiple dc-measure を $T = 5$ と 300 K で行った結果を panel (c) (d) (e) に示す. 先ず panel (c) と (d) には, 送付された4つのデバイス, # I/O control board assembly, 3003-001, # I/O utility card assembly, 3003-003B, # Shunt Amplifier card assembly, 3004-011, 20226-0015, 7004-011 REV F, # TriAxis cable $\times 2$, 3047-001N (SQUID detection) 全てを交換した状態で測定したデータを示す. panel (a) と (b) 同様に, 其々, 磁場依存と時間依存性方式で測定データを示している. 但し panel (c) には, (a) に無かった $T = 5$ K のデータも加え, 温度の違いは青と赤で示している. 一方 panel (d) では, 色の違いは単に磁化と Long Reg Fit の違いを示し, 横軸 $t = 40$ counts 前後で其々 $T = 5$ K と 300 K のデータを示している. 黒 symbol で磁場 sequence を示しているのは, panel (b) と同様である. 明らかに, (a) や (b) で観測された noise は消失している. 更に panel (e) には, 4つのデバイスを全て original の物に戻して測定したデータを, 時間依存性で (b)(d) と同じ方式で示している.

以上の状況を総合すると恐らく, デバイスの接触やその他ケーブルの取り回しなどで今回の $H = \pm 2000$ 近傍特異的 noise が発生した可能性が考えられる. 一方, この特異的 noise は熊本大原グループの測定時に観測されているが, それ以前, 2024/01/30~31 に私が行ったノイズ測定では恐らく観測されていない. このことは後で示す. 両測定間でデバイスやケーブルの交換脱着は行っておらず, そうするとノイズ源が単なる接触不良的のものであるとの結論は早計であると言える.

2.3 過去3回の noise 評価

図4には、2024/01/30~31に私が行ったノイズ測定、2024/02/05~09での熊本大学原グループが行った観測、そして今回2024/02/13~17に再び私がおこなった測定結果全てをまとめて示している。これらの3回の観測に於いて、 $n = 100$ や $n = 40$ での multiple dc-measure で得られた標準偏差 (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、共に両対数でプロットしている。先ず、filled symbols は私の行った2回の測定分で、その青赤の色の違いは測定温度 $T = 5$ と 300 K の違いによる。また白抜き赤枠の open symbol は全て 300 K で熊本大学のグループによって得られた結果である。

この図では、noise に2成分がある様に見える。

A 青赤の filled symbols で表現された、外部磁場にほぼ比例した底通する noise

B 白抜き赤枠の open symbol で示される $H = \pm 2000$ 近傍特異的 noise

前者は温度が高くなると、 $T = 5$ K から 300 K で2倍程度上ずれる。一方、後者の温度依存性のデータはない。

以下 panel (a) に関して議論する。成分 **A** を示す filled symbols は、熊本大学原グループの測定前後に行った2回の測定を含むが、 $T = 5$ K と 300 K 共に $H = 100$ Oe から 7 T の範囲で universal lines (3倍程度の幅はある) に乗っている。これは、当該2回の測定時に、成分 **B** が現れていないことを示している。成分 **B** の $H = \pm 2000$ Oe での特異性も、panel (a) の外部磁場に対するプロットが鋭いピークをもつので良く判る。また、成分 **B** は磁場絶対値が $H = \pm 1.0$ T と大きくなると成分 **A** に merge していく。成分 **A** は磁場絶対値が $H = \pm 7.0$ T と大きくなると catalog spec である $\delta M \sim 2 \times 10^{-6}$ emu を大きく超えてくる。成分 **A** と **B** の最大値がほぼ同じ程度であるのは、たまたまであろう。外部磁場が $H = \pm 7.0$ T を大きく越えると、成分 **A** が更に大きくなることが予想されるからである。

次に panel (b) を見てみよう。成分 **A** と **B** に関しては、測定磁化が非常に小さいため、見かけ上の noise が大きくなるかもしれないとのシナリオが考えられるので、この図を作成した。この図では、catalog spec である $\delta M \sim 2 \times 10^{-6}$ emu は、図中緑の点線で示す様に縦横に引くことができる。この図の左下で成分 **A** が $|M| \sim 5 \times 10^{-7}$ emu 付近で極小を持っている様に見えるのが、上記のシナリオで与えられる見かけ上の noise である。これは緑の点線で張られる座標の十分左下なので、今回の noise 評価では問題にならない。一方、上の座標で右上にはみでた成分 **B** や、 $H = \pm 7.0$ T で観測される成分 **A** はカタログ値を大きく逸脱していて、問題である。

2.4 まとめ

2024/02/20 現在、QDJ から送付された装置は以下の通り。

SQUID 検出系, 2024/01

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

Magnet 制御系, 2024/02

- I/O control board assembly, 3003-001
- I/O utility card assembly, 3003-003B
- Shunt Amplifier card assembly, 3004-011, 20226-0015, 7004-011 REV F

- TriAxis cable × 2, 3047-001N (SQUID detection)

これら全てを同時に交換したことはないが、SQUID 検出系、Magnet 制御系と銘打った装置群は其々全交換を行って noise 評価を dc-multiple-measure でを行った。その結果成分 **A** に関しては有意な改善は見られていない。一方、装置の脱着に伴い成分 **B** は消失した。今後は、dc ではなく、RSO 測定を使用して noise 評価を行う。