

回路実験レポート（修正版）

05-242628 三田村彰大

January 27, 2026

・「追記」箇所については緑でハイライトしている

・「修正」箇所については赤でハイライトしている

1 理論

1.1 二次 LPF 回路の振幅応答と位相応答

まず、2次 LPF 回路の振幅応答 $G(f)$ 及び位相応答 $P(f)$ の表式を導出する。いま回路図を書くと以下のようになっている。

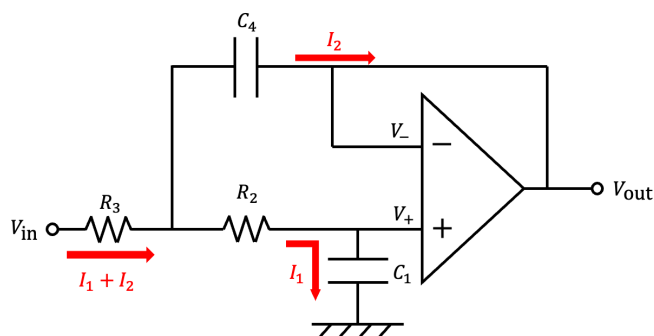


Figure1: 2次 LPF 回路

今 Figure1で抵抗 R_2 に流れる電流を I_1 、コンデンサ C_4 に流れる電流を I_2 と考えている。またオペアンプにほとんど電流は流れないという条件に留意する必要がある。その上でまず、オペアンプについてキルヒホッフの法則から次の式が定まる。

$$V_- = V_{\text{out}} \quad (1)$$

$$V_{\text{out}} = A(V_+ - V_-) \quad (2)$$

特にオペアンプの特性として A が十分大きいという条件を考えると、上の二式から

$$V_+ = V_{\text{out}} \left(1 + \frac{1}{A}\right) \approx V_{\text{out}} \quad (3)$$

が導かれる。これを用いて、Figure2の(1)~(3)の経路に対して回路方程式を立てると(4)~(6)のようになる。

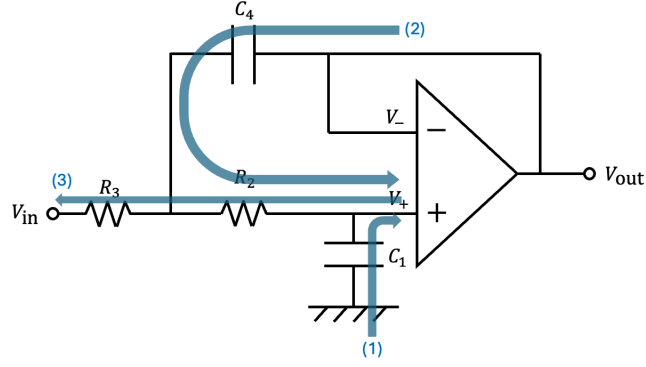


Figure2: 回路方程式を立式する経路を示している。

$$0 + \frac{1}{i\omega C_1} I_1 = V_{\text{out}} \quad (4)$$

$$V_{\text{out}} + \frac{1}{i\omega C_4} I_2 - R_2 I_1 = V_{\text{out}} \quad (5)$$

$$V_{\text{out}} + R_2 I_1 + R_3 (I_1 + I_2) = V_{\text{in}} \quad (6)$$

よって (4)~(6) を解くことで教科書と同様の以下の式を得ることができる。

$$\frac{V_{\text{out}}}{V_{\text{in}}} = \frac{1}{-\omega^2 C_1 C_4 R_2 R_3 + C_1 (R_2 + R_3) i\omega + 1} \quad (7)$$

特に今、複素数 $z = a + bi$ に対し $|z| = (a^2 + b^2)^{1/2}$ であるので、 $G(f) = |V_{\text{out}}/V_{\text{in}}|$ は次のようにも求まる。

$$G(f) = \left| \frac{V_{\text{out}}}{V_{\text{in}}} \right| = \frac{1}{|(1 - \omega^2 C_1 C_4 R_2 R_3) + (C_1 (R_2 + R_3) \omega) i|} \quad (8)$$

$$= \left\{ (1 - \omega^2 C_1 C_4 R_2 R_3)^2 + (C_1 (R_2 + R_3) \omega)^2 \right\}^{-\frac{1}{2}} \quad (9)$$

$$= \left\{ \left(1 - \left(\frac{\omega}{1/\sqrt{C_1 C_4 R_2 R_3}} \right)^2 \right)^2 + (C_1 (R_2 + R_3) \omega)^2 \right\}^{-\frac{1}{2}} \quad (10)$$

よって

$$\omega_c = 2\pi f_c = 1/\sqrt{C_1 C_4 R_2 R_3} \quad , \quad \frac{1}{Q\omega_c} = C_1 (R_2 + R_3) \quad (11)$$

とおけば

$$G(f) = \left\{ \left(1 - \left(\frac{\omega}{\omega_c} \right)^2 \right)^2 + \left(\frac{1}{Q} \frac{\omega}{\omega_c} \right)^2 \right\}^{-\frac{1}{2}} \quad (12)$$

$$\rightsquigarrow G(f) = \left\{ \left(1 - \left(\frac{f}{f_c} \right)^2 \right)^2 + \left(\frac{1}{Q} \frac{f}{f_c} \right)^2 \right\}^{-\frac{1}{2}} \quad (13)$$

として手順書にある通りの振幅応答の式を得ることができる。また位相応答については、いま $P(f) = \arg(V_{\text{out}}/V_{\text{in}})$ であり、 $\arg(1/z) = -\arg(z)$ であることなどに留意すれば

$$P(f) = \arg\left\{\frac{V_{\text{out}}}{V_{\text{in}}}\right\} = \arg\left(\frac{1}{(1 - \omega^2 C_1 C_4 R_2 R_3) + (C_1 (R_2 + R_3) \omega) i}\right) \quad (14)$$

$$= -\arg\{(1 - \omega^2 C_1 C_4 R_2 R_3) + (C_1 (R_2 + R_3) \omega) i\} \quad (15)$$

$$= -\arctan \frac{C_1 (R_2 + R_3) \omega}{1 - \omega^2 C_1 C_4 R_2 R_3} \quad (16)$$

$$= -\arctan \frac{(1/Q)(f/f_c)}{1 - (f/f_c)^2} \quad (17)$$

のようにして手順書と同様の式を得ることができる。^{*1}

1.2 回路の設計

今回は f_c が 500 ~ 2000Hz の範囲に、 Q が $Q > 5$ となるように回路を設計する。具体的には、

$$R_2 = 4.7\text{k}\Omega, R_3 = 22\text{k}\Omega, C_1 = 0.001\mu\text{F}, C_4 = 0.22\mu\text{F} \quad (18)$$

と定める。こうすることで f_c, Q を以下のように設定することができる。^{*2}

$$f_c = \frac{1}{2\pi \sqrt{C_1 C_4 R_2 R_3}} = 1055.23\text{Hz} \quad (19)$$

$$Q = \frac{\sqrt{C_1 C_4 R_2 R_3}}{C_1 (R_2 + R_3)} = 5.648 \quad (20)$$

その上で、この f_c, Q を用いて振幅応答 $G(f)$ と位相応答 $P(f)$ をプロットしたのが Figure3 である。また、Figure4 は f_c, Q のうち一方の値を動かして $G(f), P(f)$ がどう変化するかを見た図である。

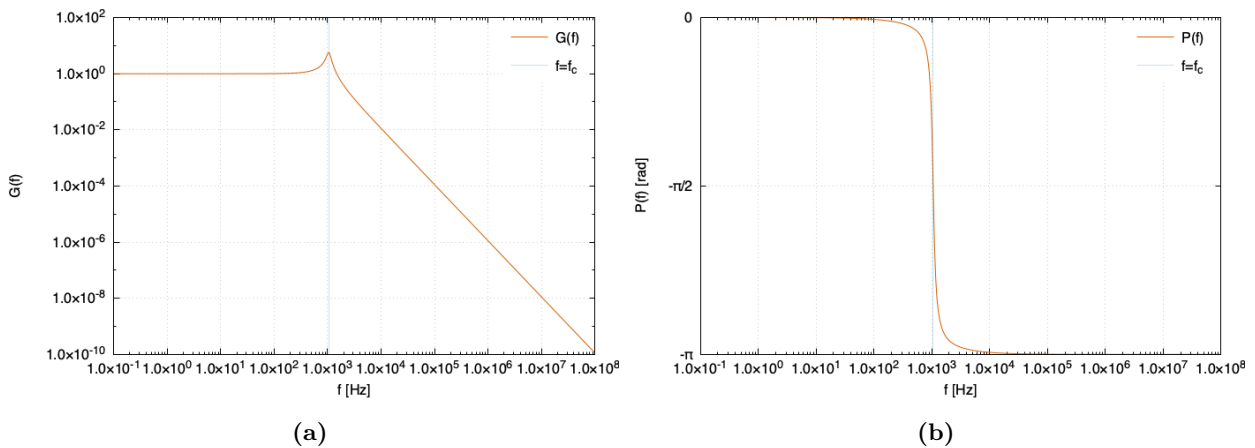


Figure3: (a) 回路設計から導かれる振幅応答 $G(f)$ の理論線。(b) 回路設計から導かれる位相応答 $P(f)$ の理論線。

^{*1} ただし \arctan は値域が $-\pi \sim 0$ となるよう適宜調整する。

^{*2} この時 f_c, Q を何桁まで求めるべきかという問題があるが、ここでの f_c, Q はあくまで回路が満たすべき特性についての理論値であり、 $G(f), P(f)$ の理論線を書くのが唯一の用途である。よってこの f_c, Q を用いて何か物理量を計算するということはないため、実際には計算機が許す限りの桁数を控えている。すなわち $f_c = 1055.2333827703276\text{Hz}, Q = 5.6488539778585380$ である。

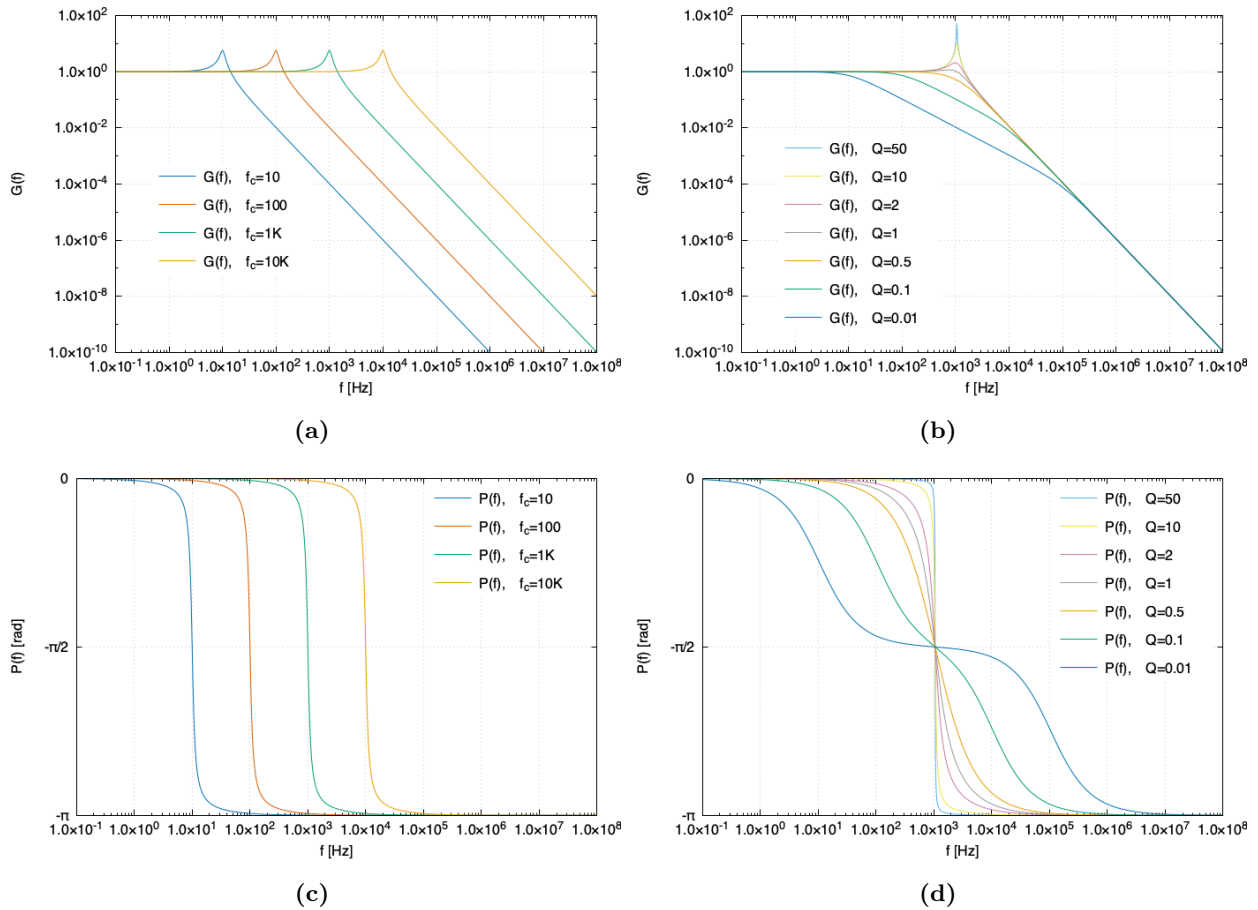


Figure4: 回路設計で求めた f_c, Q のうち一方の値を動かして $G(f), P(f)$ がどう変化するかをみた図。(a) f_c のみを 10 ~ 10KHz の間で変化させた時の振幅応答 $G(f)$ の変化の様子。(b) Q のみを 0.01 ~ 50 の間で変化させた時の振幅応答 $G(f)$ の変化の様子。(c) f_c のみを 10 ~ 10KHz の間で変化させた時の位相応答 $P(f)$ の変化の様子。(d) Q のみを 0.01 ~ 50 の間で変化させた時の位相応答 $P(f)$ の変化の様子。

2 測定

2.1 テスターによる f_c, Q の推定

次に、テスターを用いて R, C を測定することで f_c, Q の値の範囲を求める。まず、 R, C に関する測定値は Table1 のようになった。その上で、今回の実験では求めた R, C の不確かさ込みの範囲から f_c, Q が取りうる値の範囲を推定し、それぞれに対して数直線を用いて示す必要がある。しかし、数直線を用いて f_c, Q の値を示すということは f_c, Q のとりうる値の範囲が f_c, Q 平面で長方形の形をしていると仮定しているに等しく、これは正確ではない。より厳密には R, C をとりうる値の範囲内で動かしながら f_c, Q の実現値を計算し、それを f_c, Q 平面にプロットすることで f_c, Q がとりうる値の範囲に関する二次元図形を得るべきである。よってこれを行ったのが Figure5 である。^{*3}

またこの場合、テスター測定から求まる f_c, Q の不確かさは f_c, Q 平面上の図形としてもとまってしまい、 f_c, Q の有効桁が何桁なのか非常にわかりにくい。よって今回は、得られた $\Delta(f_c, Q)$ の図形から $\Delta f_c, \Delta Q$ の桁数を読み取り、そこから f_c, Q の有効桁を推定した。

例えば f_c についてなら以下のように考えることができる。まず Figure5 を見ることでおおよそ $f_c \in [1000, 1150]$ で

^{*3} 計算機上で R_2, R_3, C_1, C_4 を 4 重 do loop を用いて動かしながら f_c, Q の値を計算した。

あることがわかる。また R, C の測定値から f_c の推定値が 1072.10 ともたまっている。よって $\Delta f_c \approx 75\text{Hz}$ とわかり、 f_c の有効桁は 10 の位まで、すなわち f_c の推定値は $f_c = 1.07\text{kHz}$ となる。

	測定値	測定値 (計算用・丸め前)
R_2	$(4.69 \pm 0.03)\text{k}\Omega$	$(4.698 \pm 0.027)\text{k}\Omega$
R_3	$(22.1 \pm 0.1)\text{k}\Omega$	$(22.05 \pm 0.13)\text{k}\Omega$
C_1	$(1.0 \pm 0.1)\text{nF}$	$(0.96 \pm 0.12)\text{nF}$
C_4	$(222 \pm 5)\text{nF}$	$(221.6 \pm 4.9)\text{nF}$
f_c	1.07kHz	1072.10Hz
Q	5.8	5.78121

Table1: R, C についての測定値及びそこから求まる f_c, Q の推定値。有効数字は不確かさの桁まで報告している。また最右列には丸め前の値を示しており、計算ではこちらを用いる。

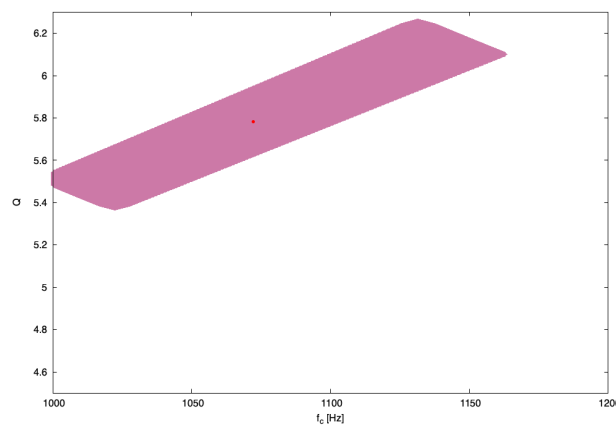


Figure5: R, C のテスターによる測定から求まる f_c, Q のとりうる値の範囲。ピンクの図形が f_c, Q のとりうる値の全体である。また赤点はテスター測定から求まる f_c, Q の推定値。

2.2 sinAMP 測定

次に、回路に正弦波を入力しオシロスコープから回路の V_{in}, V_{out} を読み取ることで $G(f)$ を測定する。ただし不確かさの算出方法については動画で示された通りなので割愛する。その結果が Figure6 のよう。

Figure6a を見ると、まず特筆すべき事項として f が大きい領域で測定結果が理論モデルから乖離していることがわかる。これは 1 次 LPF 回路でもみられた現象であり、オペアンプが高周波領域で理想的な振る舞いを行えないことが原因だと推察される。またこの高周波領域では Figure7 のように、 V_{out} の波形が正弦波ではなくなるという明らかにおかしい挙動が見られた。

また Figure6b を見ると、 $f = f_c$ 付近で測定結果が理論線から乖離していることがわかる。ただし先ほどと違い理論線から予想される振る舞いから大きくそれているということではなく、よってこれは f_c や Q の推定値のズレに起因する現象であると予測される。具体的には Figure4b を見ることで、 Q の実際の値がテスターから推定される値よりも小さいのではないかと推察される。

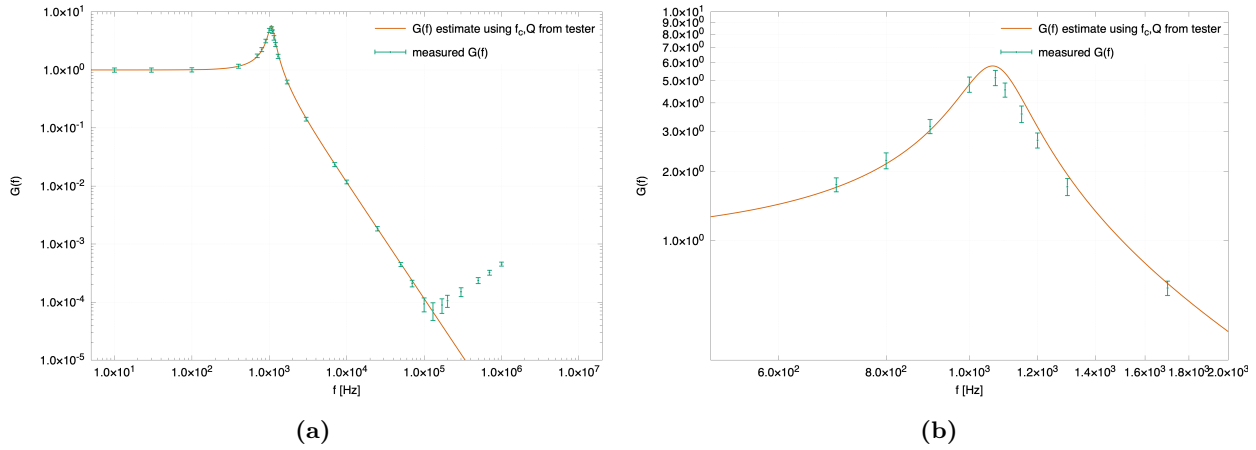


Figure6: (a)sinAMP 測定の結果。緑のプロットが $G(f)$ のエラーバー付きの測定結果であり、オレンジの線はテスターの測定から得られる f_c, Q を用いて $G(f)$ の理論線を描いた結果である。(b) $f = f_c$ 近傍で a の図を拡大したもの。この周辺で、測定結果がテスターから求まる理論線からずれていることがわかる。

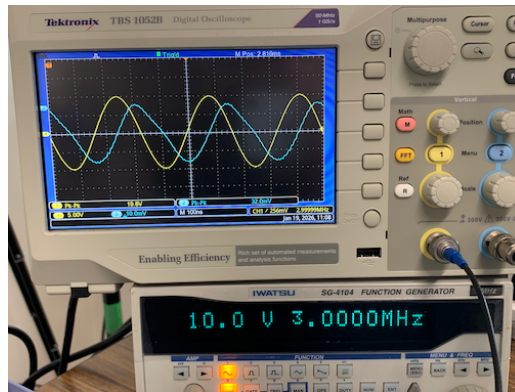


Figure7: $f = 3\text{MHz}$ での測定の際のオシロスコープの出力の様子。青線が V_{out} に対応しているが、これを見ると正弦波からずれたおかしな挙動をしていることがわかる。

次に、sinAMP 測定から f_c, Q を推定する。ただし手順書に示された方法よりもより良い精度での推定を行うため、今回は最小二乗推定を行う。このとき、測定された振幅特性を $\hat{G}(f)$ としたとき、目的関数は (13) の $G(f; f_c, Q)$ を用いて次のようになる。^{*4}

$$E = \sum_{f \in (\text{測定周波数})} \left\{ G(f; f_c, Q) - \hat{G}(f) \right\}^2 \quad (21)$$

ただし先に述べたように、今回の測定においては高周波で理論モデルからの乖離が見られるので、推定のために用いる $\hat{G}(f)$ は特定の周波数 $f = f_{\text{max}}$ で打ち切る必要がある。いま Figure6a を見ると、 $f = 1.0 \times 10^5 \text{Hz}$ あたりから不確かさが大きくなり始め、 $f = 1.7 \times 10^5 \text{Hz}$ あたりから観測が理論線から有意に離れ始めている。よって安全をとり、 $f_{\text{max}} = 0.9 \times 10^5 \text{Hz}$ とする。^{*5}

*4

本来は観測誤差で重み付けしてから二乗和を考えるべきであるが、完全に失念していた。時間がないためこの点の修正は行わないが、得られた観測誤差にそこまで大きなブレはないと考えれば重み付けしていない最小二乗推定でも問題はない。

*5 より定量的な解析をするためには、 f_{max} も定量的な手法で推定すべきであろうと思われる。具体的には、最小二乗推定から得られた理論線 $G(f; f_c, Q)$ と採用した測定点との残差がカイ二乗分布に従うと仮定することで観測結果の理論モデルからの乖離を p 値として算出すること

よってこのようにして定めた目的関数を最小にするような f_c, Q を求めた結果が以下。

$$f_c = 1054.4\text{Hz}, Q = 5.2668 \quad (22)$$

ただしこのとき数値計算において f_c, Q の分解能は

$$\Delta f_c = 0.4\text{Hz}, \Delta Q = 0.0036 \quad (23)$$

であった。^{*6} また、このときの目的関数の振る舞い (contour) を Figure8に示した。これを見ると目的関数は最小二乗推定を極小に持つような二次曲面を描いており、問題のある振る舞いも特段見られない (局所解が現れたりしていない) 為、最小二乗推定値は妥当であろうと判断できる。

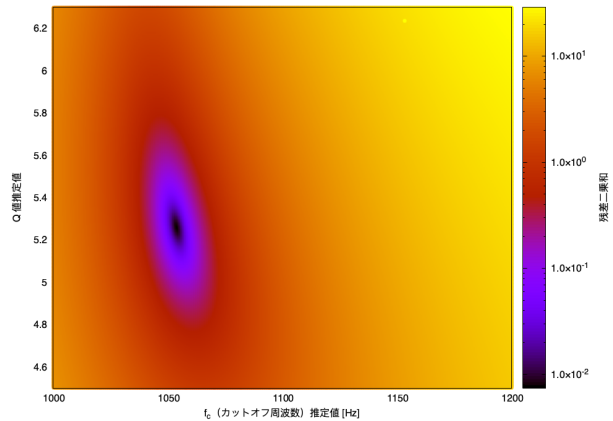


Figure8: sinAMP に対する最小二乗推定における目的関数の振る舞い。極小をただ一つ持つ曲面を描いており、特定の次元に対して不確かさが大きかったり局所解を持ったりといった問題のある振る舞いは特に見られない。

また最小二乗推定値 f_c, Q に対して理論線 $G(f)$ を書き直したものが Figure9である。特に拡大図である Figure9bを見ると、最小二乗推定を行ったことで理論線の測定点に対するフィット具合が改善していることが見て取れる。また先ほど「実際の Q の値はテスターによる Q の測定値よりも小さいのではないか」という考察をしたが、実際テスターによる Q の測定値は $Q = 5.8$ であり今回の最小二乗推定による Q の推定値は $5.25\dots$ であるからこの考察は正しかったことがわかる。

次に、この推定における f_c, Q の不確かさの範囲を求めることを考える。手順書では f_c, Q の一方を固定してもう一方を理論線が測定のエラーバーから出ないように動かすことで f_c, Q の値の範囲を求めることが可能としているが、今回は計算機を用いて精度を上げることを試みる。

具体的には、 f_c, Q について走査しながら理論線 $G(f)$ を動かし、各測定点において理論線がエラーバーからはみ出さないような f_c, Q の範囲を描画する。ただし先ほど述べたように高周波では測定結果は理論モデルから乖離しているため、解析に用いる測定点は $f = f_{\max}$ で打ち切っている。

このようにして得られた f_c, Q の推定範囲が Figure10である。この図を見ると、 f_c はおおよそ 1040 ~ 1080 程度の範囲に収まっており、また Q は 4.8 ~ 5.8 程度の範囲に収まっているから、それぞれの有効桁が $f_c : 10$ の位 $Q : 0.1$ の位ということが分かる。(これは (23) で述べた数値計算の分解能よりいずれも 2桁大きいので、数値計算分解能が

などが考えられる。(そうすることで p 値が極端に小さくなり始める f_{\max} を打ち切り周波数として採用することができる) ただし、今回は時間の都合で割愛する。

^{*6} 二次元なので特にアルゴリズムは用いず、愚直に二重 do loop を回して f_c, Q の値を変えながら目的関数が最小となる f_c, Q を求めた。その際の f_c, Q の走査のメッシュ幅が (23) である。

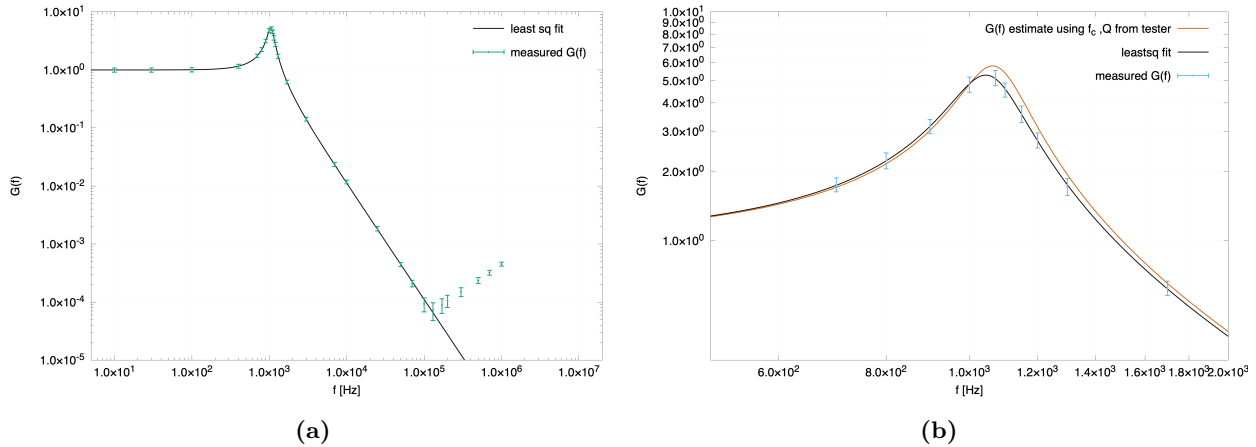


Figure9: (a) 最小二乗推定により得られた f_c, Q から得られる $G(f)$ と測定結果の比較。黒線が最小二乗推定により得られた f_c, Q から得られる $G(f)$ の理論線で、緑が sinAMP 測定の結果。(b) a を $f = f_c$ 近傍で拡大した図。Figure6bの「テスターから求まる f_c, Q から得られる $G(f)$ の理論線」を比較として載せている。

有効桁の議論に効くことはない。) よって最終的な sinAMP 測定における f_c, Q の推定値は

$$f_c = 1.05\text{kHz}, Q = 5.3 \quad (24)$$

となり、その不確かさは Figure10となる。

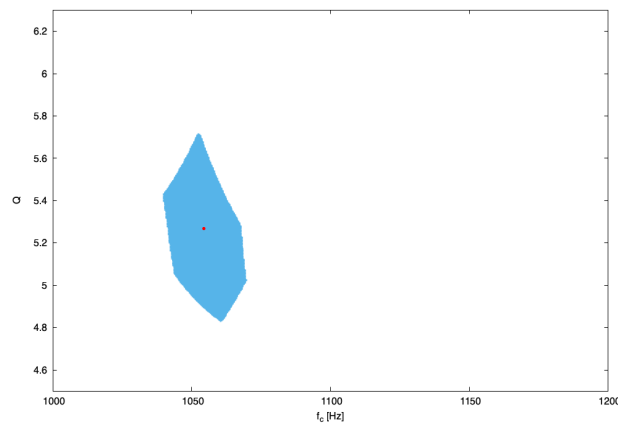


Figure10: 数値計算的手法により求めた f_c, Q の範囲。赤点が最小二乗推定値。

2.3 sinPhase 測定

次に、位相について同様の解析を行う。まずオシロスコープから読み取った V_{in}, V_{out} の時間差から $P(f)$ を求めプロットすると Figure11のようになった。ただし不確かさの推定方法については動画で示された通りなのでここでも割愛する。

Figure11を見るとまず特筆すべき事項として、sinAMP 測定と同様 f が大きい領域で測定結果が理論モデルから乖離していることがわかる。これは 1 次 LPF 回路で見られた現象であり、その原理については sinAMP の項で述べた通りだと考察される。

また、 $f = f_c$ 付近で測定結果が理論線から乖離しているのも sinAMP と同様である。今回もこれは f_c, Q の推定値のズレに起因する現象であると予想されるが、Figure4を見ると今回は Q ではなく f_c のズレであることが予想され

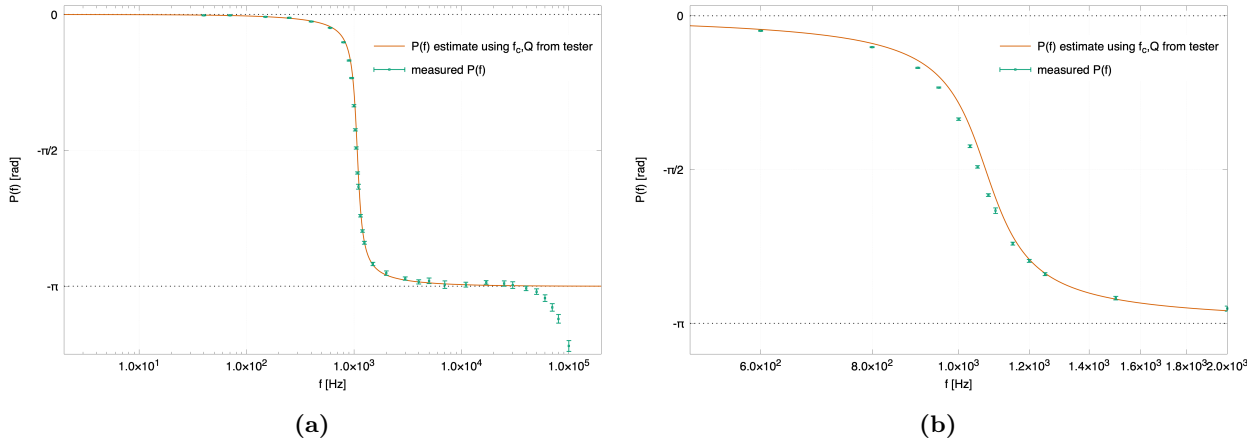


Figure11: sinPhase 測定の結果。緑のプロットが $P(f)$ のエラー付きの測定結果であり、オレンジの線はテスターの測定から得られる f_c, Q を用いて $P(f)$ の理論線を描いた結果である。(b) $f = f_c$ 近傍で a の図を拡大したものの。sinPhase 測定においても、この周辺で測定結果がテスターから求まる理論線からずれていることがわかる。

る。すなわち Figure4c を見ることで、 f_c の実際の値がテスターから推定される値よりも小さいのではないかと推察できる。

次に sinPhase 測定から f_c, Q を推定する。今回も sinAMP 測定と同様、最小二乗推定を行うこととする。ただし sinPhase 測定における最小二乗推定の目的関数は、測定された位相応答を $\hat{P}(f)$ としたとき (17) の $P(f; f_c, Q)$ を用いて次のようになる。

$$E = \sum_{f \in (\text{測定周波数})} \left\{ P(f; f_c, Q) - \hat{P}(f) \right\}^2 \quad (25)$$

ただし今回も f_{\max} を適切に定め一定以上の高周波での測定結果を棄却する必要があるが、いま Figure11a を見ると今回は $f = 1.7 \times 10^4 \text{Hz}$ から測定データが理論線からずれ始めていることがわかる。よって安全をとって $f_{\max} = 1.0 \times 10^4 \text{Hz}$ とする。^{*7}

よってこのようにして定めた目的関数を最小にするような f_c, Q を求めた結果が以下。

$$f_c = 1053.6 \text{Hz}, Q = 5.3100 \quad (26)$$

ただしこのとき数値計算において f_c, Q の分解能は sinAMP と同様で、

$$\Delta f_c = 0.4 \text{Hz}, \Delta Q = 0.0036 \quad (27)$$

を用いた。また、このとき目的関数の振る舞いを Figure12 に示した。これを見ると目的関数は変な局所解は持たずただ一つの極小を持っているが、 f_c に対して相対的に Q の推定精度が悪い (図でいうと、黒いエリアが縦方向に伸びてしまっている) ことがわかる。この可能性としてはさまざまに考えられるが、いま Figure11a を見ると今回の測定では結果的に $f = f_c$ 近傍での測定回数が非常に多くなっており、このせいで f_c の推定精度が (Q に比して) 大きくなり過ぎている可能性がある。

*7 やはり今回も、時間の都合で打ち切り周波数 f_{\max} についてはやや定性的に決めてしまっている。

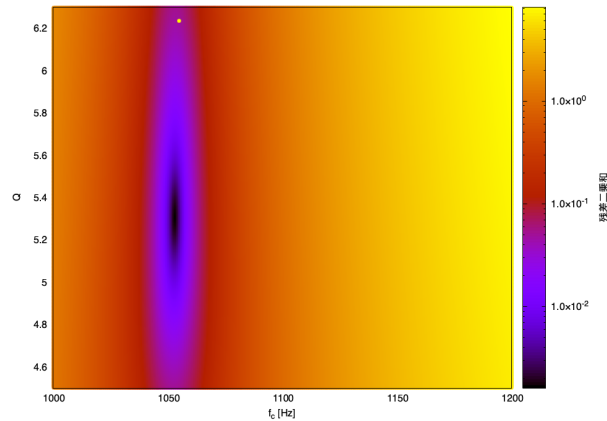


Figure12: sinPhase に対する最小二乗推定における目的関数の振る舞い。極小をただ一つ持っており局所解が存在していないという点では問題ないが、極小値付近で曲面が Q の方向に平べったく伸びてしまっており、推定が Q に対しては相対的に弱いことが推察される。

また最小二乗推定値 f_c, Q に対して理論線 $P(f)$ を書き直したものが Figure13 である。特に拡大図である Figure13b を見ると、最小二乗推定を行ったことで理論線の測定点に対するフィット具合が改善していることが見て取れる。また先ほど「実際の f_c の値はテスターによる測定からとまった f_c の測定値よりも小さいのではないか」という考察をしたが、実際テスターによる f_c の推定値は $f_c = 1.07\text{kHz}$ であり今回の最小二乗推定による f_c の測定値は $1.053\dots\text{kHz}$ であるからこの考察は正しかったことがわかる。

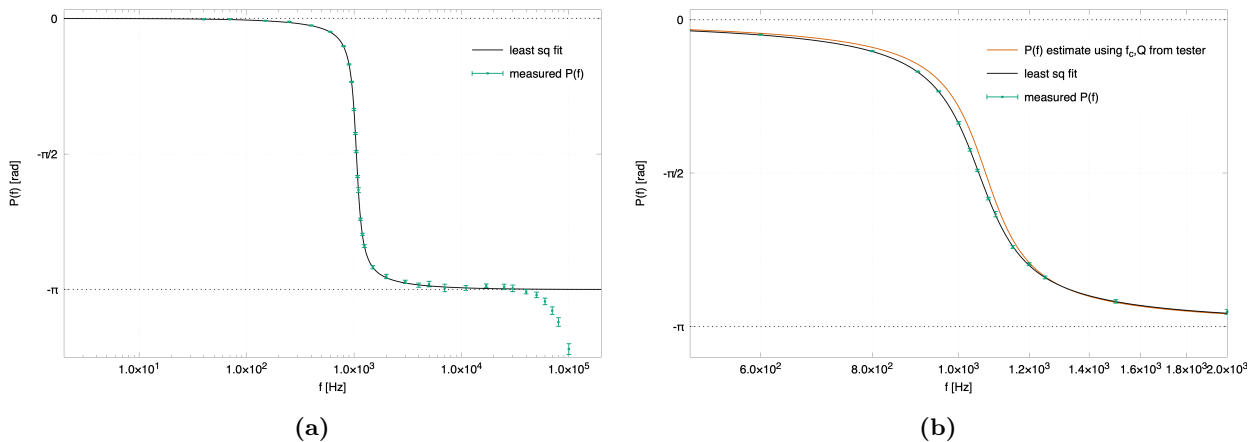


Figure13: (a) 最小二乗推定により得られた f_c, Q から得られる $P(f)$ と測定結果の比較。黒線が最小二乗推定により得られた f_c, Q から得られる $P(f)$ の理論線で、緑が sinPhase 測定の結果。(b) a を $f = f_c$ 近傍で拡大した図。Figure11b の「テスターから求まる f_c, Q から得られる $P(f)$ の理論線」を比較として載せている。

次に、この推定における f_c, Q の不確かさの範囲を求めることを考える。sinAMP と同様に、 f_c, Q の値を動かしながら $P(f; f_c, Q)$ の理論線が各測定点においてエラーバーから飛び出さないような範囲を求めれば良さそうである。^{*8} しかしこれを実際に行うと、すべての有効な測定点においてエラーバーの内側に理論線が収まるような f_c, Q は存在しないことがわかる。これはすなわち f_c, Q の不確かさが 0 であることに等しい。だがこれは f_c, Q が非常に良い精度で推定できたから不確かさが 0 となっているわけでは決してなく、「 f_c, Q の不確かさの範囲の算出条件が厳しすぎたため、条件を満たす f_c, Q が現れなかった」だけである。よって不確かさの算出を何か別の条件で行う必要がある。

^{*8} ただし sinAMP と同様、 $f \leq f_{\max}$ を満たす測定点のみを有効な測定点として解析に用いる。

そこで自然な発想として、「すべての有効な測定点においてエラーバーの内側に理論線が収まる」という条件を緩めることを考える。すなわち今 f_c, Q の不確かさの範囲 $\Delta(f_c, Q)$ を次のように定義する。

$$\Delta(f_c, Q) : \left\{ n \text{ 点以上の測定点で理論線 } P(f; f_c, Q) \text{ がエラーバーの内側に収まるような } f_c, Q \text{ の範囲} \right\} \quad (28)$$

この $\Delta(f_c, Q)$ は n をパラメタに持つような範囲であり、この $\Delta(f_c, Q)_n$ をさまざまな n に対して計算した結果が Figure14 である。

また各 $\Delta(f_c, Q)_n$ の中で f_c, Q を動かした時に理論線 $P(f; f_c, Q)$ が掃くエリアを表したのが Figure15 である。(手順書と逆の作業をやっていると思えばわかりやすい。手順書は「理論線を動かす」→「不確かさの範囲を決める」という指示だったが、ここでは「数値計算により不確かさの範囲を求める」→「理論線が動く範囲を観察する」ということをしている。)

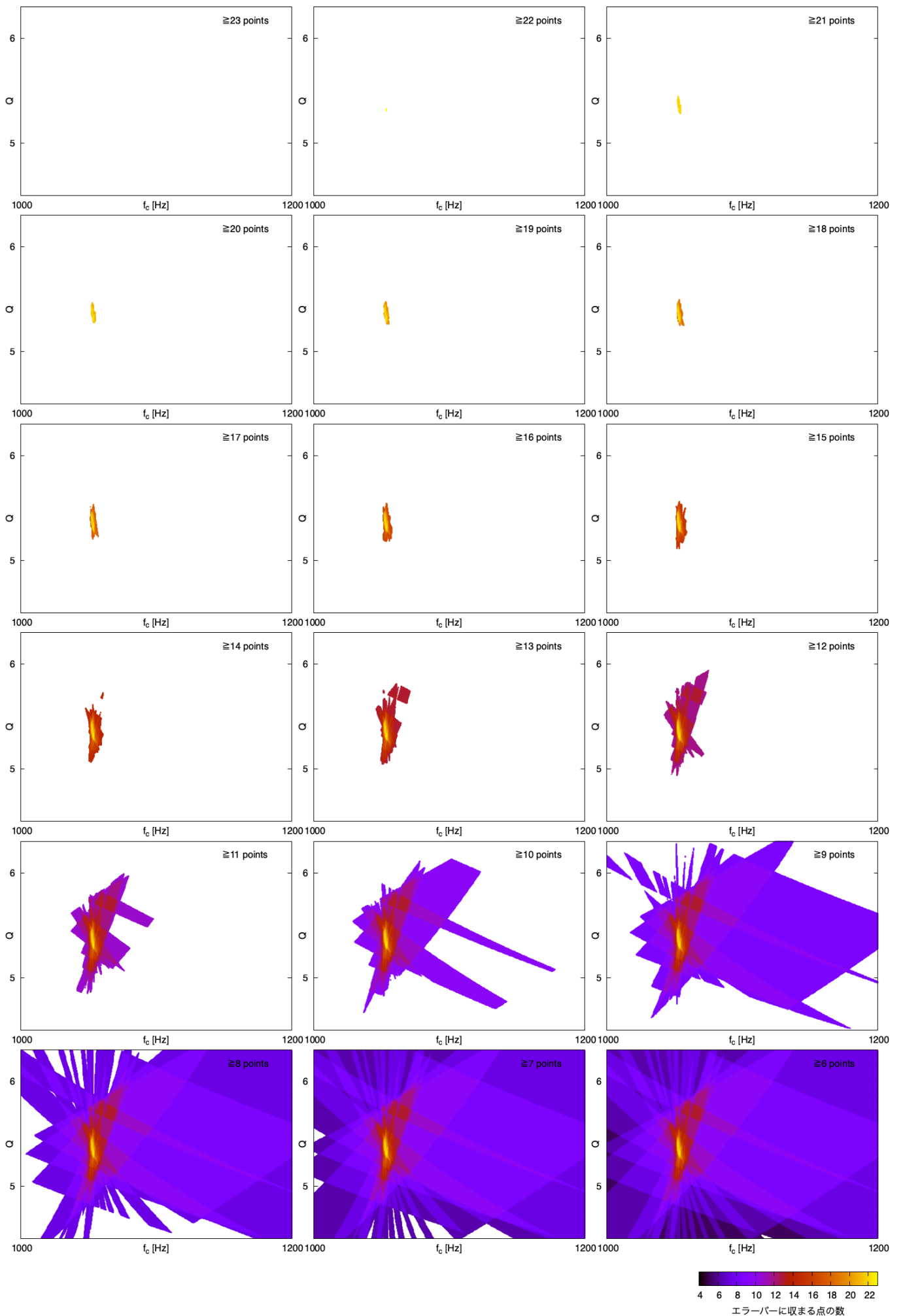


Figure14: 理論線 $P(f; f_c, Q)$ が n 個以上の観測点でエラーバーに収まるような f_c, Q の範囲を図示したもの。閾値 n は図に示した通り。例えば 4 行 3 列目の図形は $n = 12$ 個以上の実測点で理論線がエラーバーの内側に収まるような f_c, Q の範囲を表している。

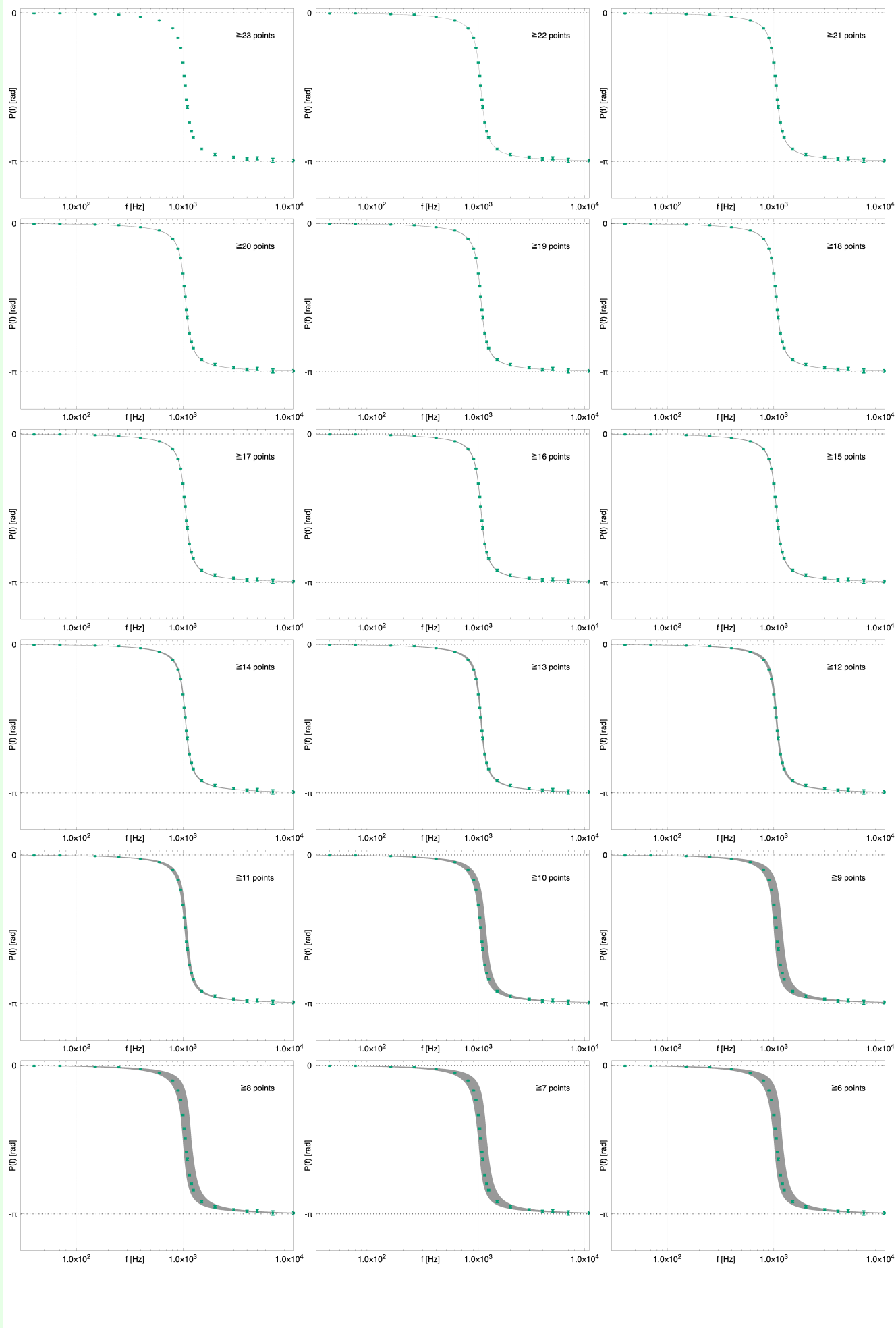


Figure15: Figure14のそれぞれの n の f_c, Q の範囲に対して、その中で f_c, Q を動かした時に理論線が掃く領域を図中灰色の領域として図示している。ただし緑の点は観測データ。例えば4行3列目の図の灰色の領域は $n = 12$ 個以上の実測点で理論線がエラーバーの内側に収まるような理論線全体の集合を表している。

さて、実際に不確かさを推定する上では n を適当に決める必要がある。いま Figure14を見ると、 $n = 22$ から $\Delta(f_c, Q)_n$ が大きさを持ち始めるが、 $n = 14$ を下回ると不確かさ領域が「飛び地」のようなものを持ち始め、それ以下の n においては $\Delta(f_c, Q)_n$ が非常に歪な形をしていることがわかる。よって今回は「 $\Delta(f_c, Q)_n$ のサイズが最も大きく取れ、かつ形が不自然にならない」ような n を採用する。Figure14から、自分はこれを $n = 15$ と判断した。よってこうして得られる不確かさの領域が Figure16。

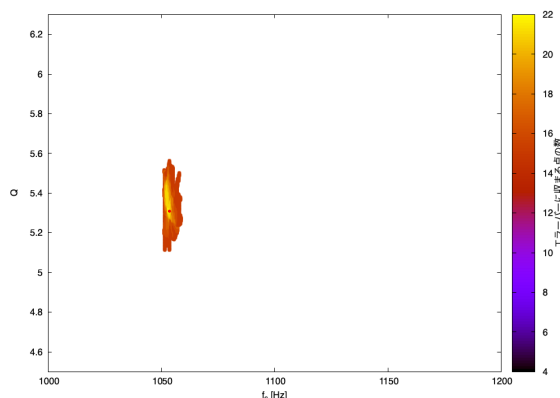


Figure16: 今回の解析で定まった、 f_c, Q の取りうる値の範囲。具体的には $n = 15$ 点以上の有効な測定点で理論線 $P(f; f_c, Q)$ がエラーバーの内側に収まるような f_c, Q の範囲 $\Delta(f_c, Q)_{15}$ を図示している。また、赤点が最小二乗推定値。

特に今 Figure16を見ると、 f_c はおよそ 1050 ~ 1060 程度の値を取り、 Q はおよそ 5 ~ 5.6 程度の値を取ることがわかる。よってそれぞれの有効桁が、 $f_c : 1$ の位・ $Q : 0.1$ の位ということがわかる。^{*9} (これは (27) の数値計算の分解能^{*10}に比べていずれも桁で大きいので、数値計算分解能が有効桁の議論に効くことはない。) よって最終的な sinPhase 測定における f_c, Q の推定値は

$$f_c = 1.054\text{kHz}, Q = 5.3 \quad (29)$$

となり、その不確かさが Figure16となる。^{*11}

※ 今回の sinPhase に対する f_c, Q の不確かさの算出方法は恣意的であることが否めない。より現実的には、しっかりと観測誤差で重みをつけた最小二乗推定を行い、その二乗残差 $E(f_c, Q)$ に対して

$$\frac{E(f_c, Q) - E(f_c^{\text{best}}, Q^{\text{best}})}{E(f_c, Q)} \cdot \frac{n-2}{2} \sim F(2, n-2) \quad (30)$$

のような近似から F 検定を行い 95% 信頼領域を描画するのが理想であると考えられる。([1] を参考にした。そこまでしっかり読んでいないが、信頼領域の描き方についてとても詳しく書いてある。)

^{*9} f_c が 1050 ~ 1060 に収まる時、およそ $f_c = 1055 \pm 5$ であるから f_c の有効桁は ± 5 の 1 の位となる。

^{*10} f_c, Q 走査のメッシュサイズ

^{*11} f_c がやけに精度良く求まっている原因については先に議論した通りで、やはり $f = f_c$ 近傍で多くの測定を行った結果と考えられる。

※今回は、不確かさの範囲についての条件を「すべての観測点で理論線がエラーバーの内側に収まる f_c, Q の範囲」から「少なくとも $n \geq 15$ 以上の観測点で理論線がエラーバーの内側に収まる f_c, Q の範囲」へと『緩めた』のであった。この時、条件を緩めたことでどのような f_c, Q が許されるに至ったのかを考察する必要がある。具体的には、条件を緩めたことでどの観測点がフィッティングから外れたのかを見る必要があり、その参考となるのが Figure17である。

Figure17のグレーの領域は「Figure16で表される不確かさの範囲内で f_c, Q が動いた時に理論線が掃く領域」を表しているが、これを見るとグラフが下方方向に折れ曲がり始めるあたりで領域が膨らみを持っており、この近傍でエラーバーから外れた理論線が存在していることがわかる。(詳しくは Figure18の拡大図を参照。)特に、このような「折れ曲がり」の変形を生じるのは f_c ではなく Q であるから、不確かさ領域についての条件を緩めたことにより Q について許される範囲が広がっていることがわかる。

また拡大図である Figure18の (a) の図を見ると、すべての理論線が $f = 25\text{Hz}$ の測定点を通っていないことがわかる。よってこの測定点で何がしかの系統誤差が生じていたために、最初の条件では不確かさ領域が大きさを持つことができなかった(すべての観測点でエラーバーの範囲内に理論線が収まるような f_c, Q が存在しなかった)と考えることもできる。

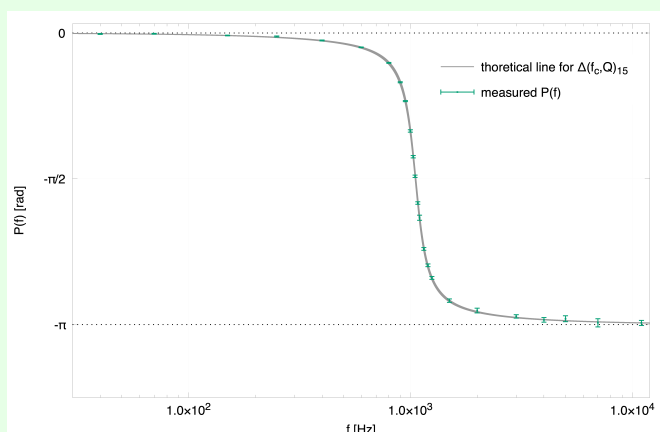
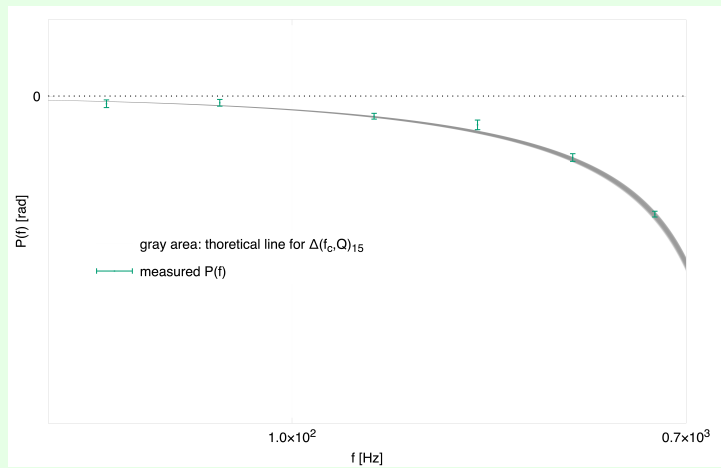
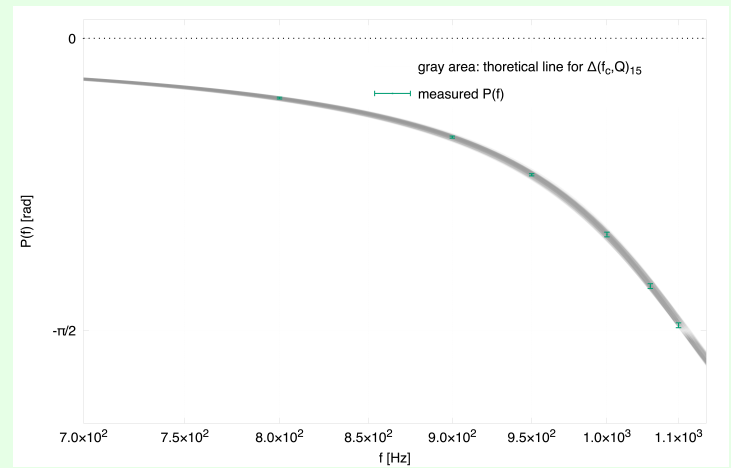


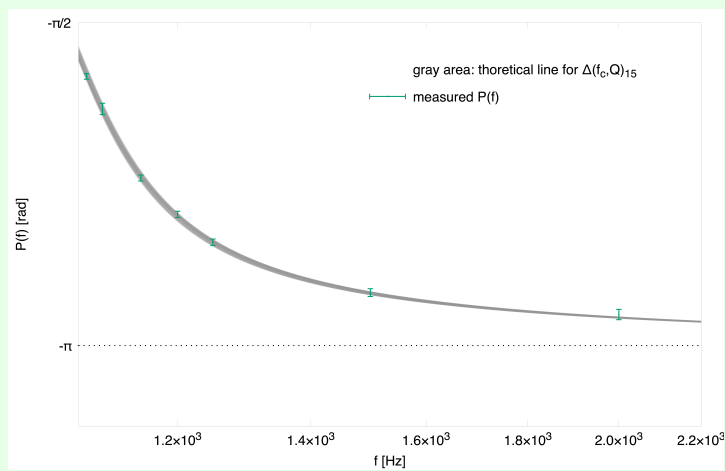
Figure17: Figure16で表される不確かさの範囲内で f_c, Q が動いた時に理論線がどうなるかを表した図。グレーの領域が理論線が掃く領域で緑の点が観測点。



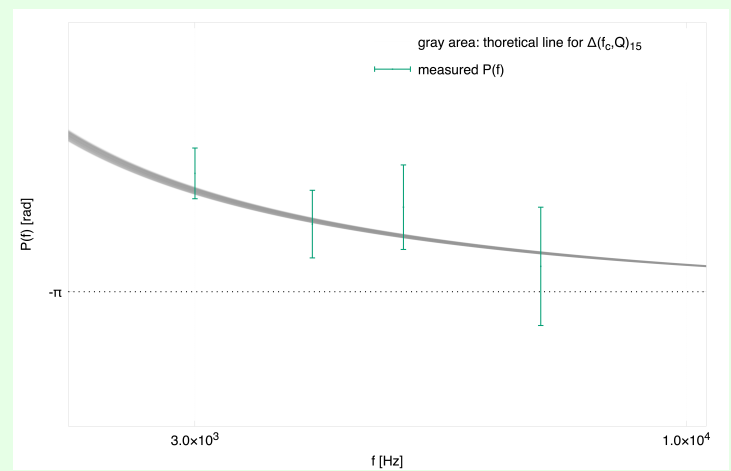
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure18: Figure17の拡大図。(a),(b),(c),(d) は順にそれぞれ Figure17の 30Hz ~ 0.7kHz、0.7kHz ~ 1.1kHz、1.1kHz ~ 2.2kHz、1.1kHz ~ 10kHz の領域の拡大図となっている。

3 考察： f_c, Q の整合性について

ここまで「テスターによる測定から f_c, Q の推定値と取りうる値の範囲を求める」「sinAMP 測定から f_c, Q の推定値と取りうる値の範囲を求める」「sinPhase 測定から f_c, Q の推定値と取りうる値の範囲を求める」というように、3つの手法により f_c, Q の推定をおこなってきた。よって次はこれらの測定が互いに整合しているかを議論する。今、3つの測定により得られた f_c, Q の推定値とそれが取りうる値の範囲を図示したのが Figure19である。

特にいま拡大図である Figure19bを見ると、3つの別々の測定から得られる f_c, Q が取りうる値の範囲は共通集合を持っていることがわかる。^{*12} よって今回の測定は互いに整合性を持っていると考えることができる。

※ただし、sinPhase において f_c, Q の範囲を求めた手法には恣意性が多分に含まれており、 $\Delta(f_c, Q)_n$ の n をどう定めるかによって整合性は簡単に破れたり満たされたりする。あくまで「今回の解析手法においては」 f_c, Q の範囲をテスターで求めた場合と sin 測定によって求めた場合とで整合性が得られたというだけである。

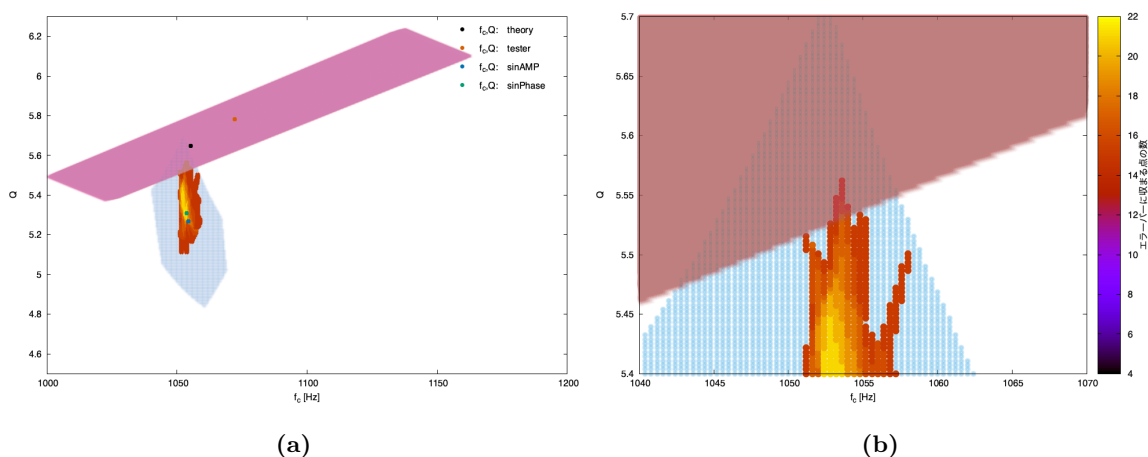


Figure19: (a) 3つの測定により得られた f_c, Q の推定値とそれが取りうる値の範囲。ピンクの図形がテスターによる測定から、薄青の図形が sinAMP による測定から、黄色～オレンジの図形が sinPhase による測定から求まる f_c, Q の範囲に対応している。またそれぞれの測定から求まる f_c, Q の推定値に加えて、回路設計の時点で求まる f_c, Q の理論値 $f_c, Q: \text{theory}$ をプロットしている。(b) a の拡大図。3つの図形の共通集合がよく見えるようになっている。

最後に、一応数直線的な一次元範囲を算出しておく。今 Figure19bを見て、件の共通集合を囲むような最小の長方形型の範囲を求めれば、 f_c, Q が取りうる値の範囲として次を得る。

$$5.53 \leq Q \leq 5.56 \quad (31)$$

$$1053.2 \leq f_c \leq 1054.0 \quad (32)$$

^{*12} 本来の手順書の意図としては、 f_c, Q それぞれについて取りうる値の範囲を数直線として求め「3つの異なる手法から得られる数直線が重なりを持つかどうか」を判断することが求められているが、今回行っている「二次元図形が重なりを持つかどうか」は本質的には同じ作業である。(もっと言うと、数直線を用いるよりも幾分か正確であると考えられる。)

ただしここでの有効桁は、これまでと同様に不確かさが現れ始める桁をその不確かさの範囲から求めることで算出している。^{*13} よって得られた f_c, Q を改めて測定データに重ね合わせてプロットすると Figure20 のようになる。

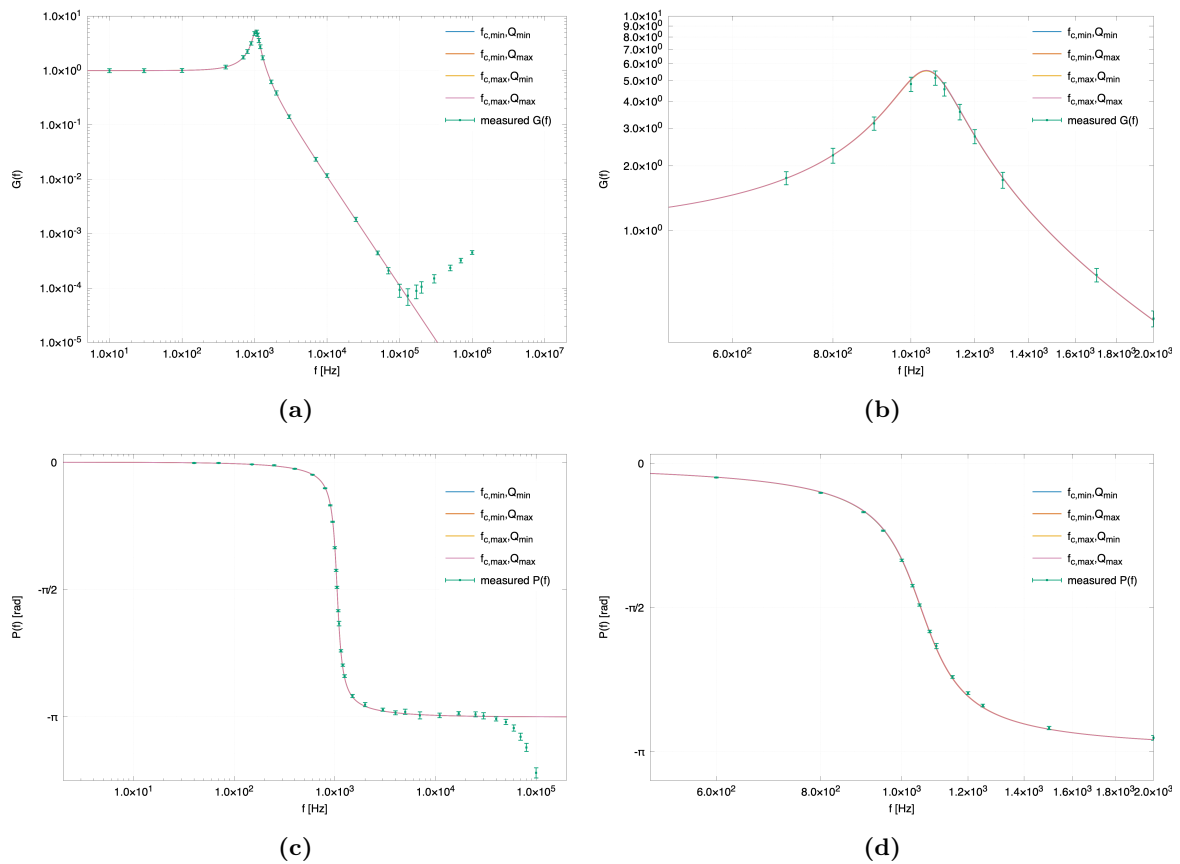


Figure20: (31), (32) の f_c, Q の範囲 $f_c \in [f_{c,\min}, f_{c,\max}]$ および $Q \in [Q_{\min}, Q_{\max}]$ から求まる理論線 $G(f), P(f)$ を測定データとともにプロットした図。それぞれのグラフにおいて、 $(f_{c,\min}, f_{c,\max}), (Q_{\min}, Q_{\max})$ から定まる四通りの理論線をプロットしているが、 f_c, Q の範囲が狭いため完全に重なってしまっている。(a) 振幅応答 $G(f)$ のプロット。(b)a の $f = f_c$ 近傍での拡大図。(c) 位相応答 $P(f)$ のプロット。(d)c の $f = f_c$ 近傍での拡大図。

4 ステップ入力を用いた実験

4.1 DFT を用いた解析

次に、ステップ波形を入力し V_{in}, V_{out} を PC を用いて収録した。さらに、得られた波形に対し Hanning テーパーをかけ、DFT を行った。まず、生の波形のテーパー前後での様子を示したのが Figure21。また DFT

^{*13} 例えば、数値計算の分解能的には $5.533 \leq Q \leq 5.562$ が共通集合における Q の範囲であるが、この場合 Q の不確かさの桁は $(5.562 - 5.533)/2 = 0.014$ から 0.01 の桁であるから、 Q の加減と上限についても小数点第 2 桁までで報告するべきと考えることができる。よって $5.53 \leq Q \leq 5.56$ となる。

により得られた振幅スペクトルと位相スペクトルを示したのが Figure22。

さらに、 V_{in} , V_{out} の振幅スペクトルの比を取ることによって振幅応答 $G(f)$ を得ることができ、これを示したのが Figure23a。また、位相スペクトルの差をとることによって位相応答 $P(f)$ を得ることができ、これを示したのが Figure23b。

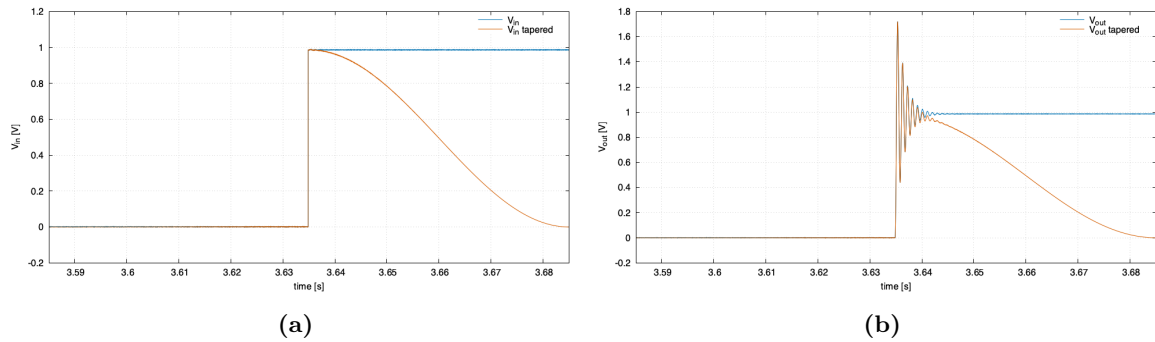


Figure21: (a) 入力電圧 V_{in} のテーパー前とテーパー後の波形。(b) 出力電圧 V_{out} のテーパー前とテーパー後の波形。

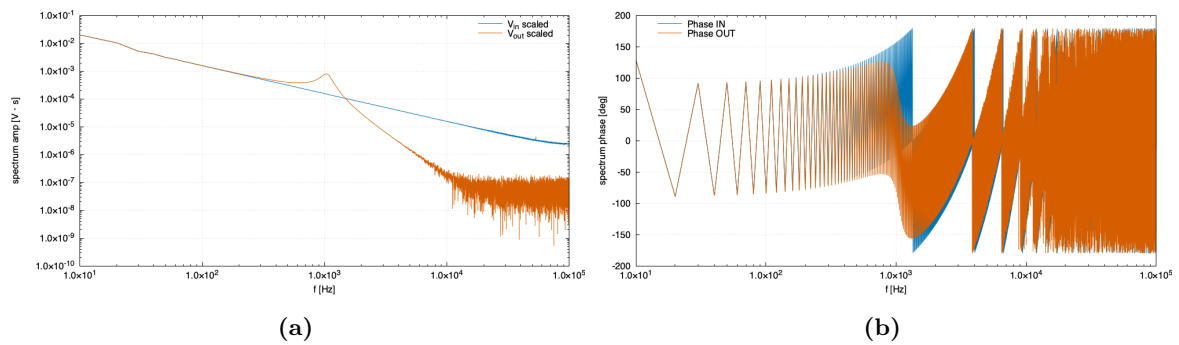


Figure22: (a) 入力電圧 V_{in} と出力電圧 V_{out} についての振幅スペクトル。(b) 入力信号と出力信号についての位相スペクトル。

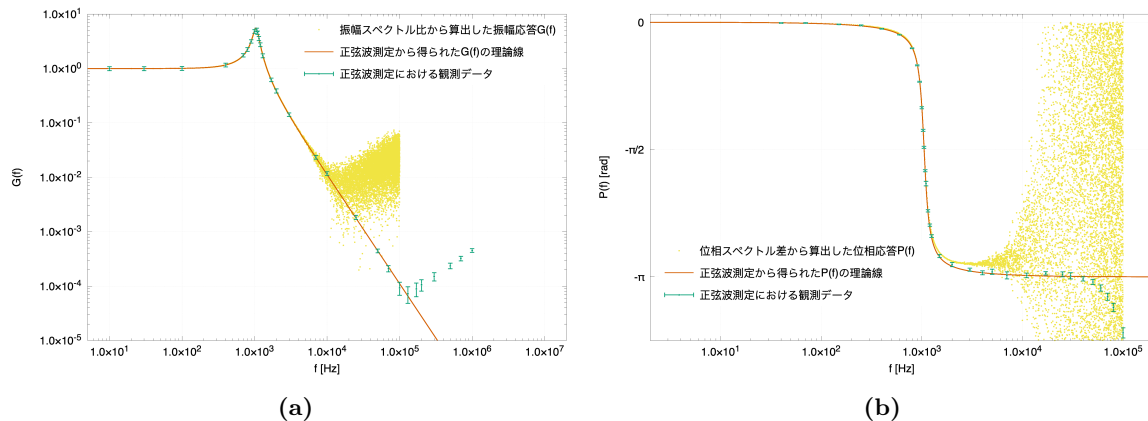


Figure23: ステップ入力と DFT から求めた振幅応答・位相応答を正弦波入力での実測データに重ねてプロットした図。ただし理論線については正弦波の測定で最終的に得られた f_c, Q の範囲のなかで f_c, Q を動かした時に得られる複数の理論線をプロットしているが、 f_c, Q の推定範囲が狭いため重なって一本の線に見える。 (a) 振幅スペクトル比から求めた振幅応答 $G(f)$ を正弦波測定のプロットに重ねた図。 (b) 位相スペクトル差から求めた位相応答 $P(f)$ を正弦波測定のプロットに重ねた図。

さて、Figure23を見ると振幅応答においても位相応答においても、DFT から得られたプロットは一定以上の高周波 f'_{\max} より高い周波数で理論線から乖離してしまっている。特に、正弦波測定における測定結果が $f \geq f_{\max}$ で理論線から乖離する現象は先に見た通りであるが、ステップ入力・DFT を用いた測定結果ではより早い段階（低い周波数）で乖離が生じている。すなわち $f_{\max} \neq f'_{\max}$ となっている。今、正弦波における高周波領域での測定結果の理論線からの乖離はオペアンプが理想通りの挙動をしなくなるからと推察していたのだが、 $f_{\max} \neq f'_{\max}$ であることから、ステップ入力・DFT を用いた測定においては何か別のメカニズムによって高周波域におけるデータの理論線からの乖離が生じていると考えるべきである。

いま、このような乖離が生じている具体的な理由として高周波における S/N 比の悪化が考えられる。Figure22の比や差を取る前のスペクトルを見るとわかるが、今回の測定においては V_{out} が $f \sim 1.0 \times 10^4 \text{Hz}$ あたりから出力信号のノイズがひどくなっており、S/N 比が非常に悪くなっている。これにより Figure23のプロットにおいても $f \sim 1.0 \times 10^4 \text{Hz}$ あたりからプロットの分散が大きくなっており、理論線からの乖離が S/N 比の悪化によって始まっていることがわかる。

この S/N 比の問題は矩形波の高周波成分が小さいことによる影響であると思われる。

また Figure23bを見ると、位相測定において測定ノイズが大きくなるよりもさらに早い段階（低い周波数）で、測定点が理論線からずれ始めていることがわかる。すなわち、オペアンプの挙動でも S/N 比でもないさらに別の原因が存在していて、高周波での回路の振る舞いに問題が生じている。この原因としては、ADC が仕組みとして超速で CH を切り替えながら信号を読み取っているという点が疑わしい。すなわち、一定以上の高周波では ADC の CH 切り替えが追いつかず、結果として読み取り信号に問題が生じている可能性がある。

以上をまとめると、この実験においては少なくとも3つの異なる原因により高周波における理論と実測の乖離が生じており、その原因は「オペアンプが高周波で理想通りの振る舞いをしない」「ステップ入力が高周波帯で S/N 比が悪くなる」「高周波帯では ADC の切り替えが追いつかなくなる」であると考えられる。

4.2 時間応答

次に、 $V_{\text{out}}(t)$ の時間応答を調べる。今、 V_{out} は次の微分方程式を満たす。

$$\frac{d^2}{dt^2}V_{\text{out}} + \frac{\omega_c}{Q} \frac{d}{dt}V_{\text{out}} + \omega_c^2 V_{\text{out}} = \omega_c^2 V_{\text{in}} \quad (33)$$

よって $D = d/dt$ と置き換え $\omega_c^2 V_{\text{in}} = \Gamma$ を定数とみなせば上式は

$$\left(D^2 + \frac{\omega_c}{Q}D + \omega_c^2\right)V_{\text{out}} = \Gamma \quad (34)$$

$$\rightsquigarrow (D - \alpha)(D - \beta)V_{\text{out}} = \Gamma \quad (35)$$

と変形でき、 V_{out} は

$$V_{\text{out}} = \Gamma_1 e^{\alpha t} + \Gamma_2 e^{\beta t} + \Gamma_3 \quad (36)$$

となる。ただし α, β は (34) に現れる二次方程式 $(D^2 + \omega_c/QD + \omega_c^2)$ の解であり、 $Q > 1/2$ では

$$(\alpha, \beta) = \frac{1}{2} \left(-\frac{\omega_c}{Q} \pm \sqrt{\left(\frac{\omega_c}{Q}\right)^2 - 4\omega_c^2} \right) \quad (37)$$

$$= \omega_c \left(-\frac{1}{2Q} \mp i\sqrt{1 - \frac{1}{4Q^2}} \right) \quad (38)$$

となる。よって特にこれを $-a \mp ib$ と置いて (36) に代入すれば、

$$V_{\text{out}} = \Gamma_1 e^{-at} e^{ibt} + \Gamma_2 e^{-at} e^{-ibt} + \Gamma_3 \quad (39)$$

$$= e^{-at} (\Gamma_1 e^{ibt} + \Gamma_2 e^{-ibt}) + \Gamma_3 \quad (40)$$

$$= e^{-at} (\Gamma'_1 \cos bt + \Gamma'_2 \sin bt) + \Gamma_3 \quad (41)$$

を得る。特に今 $a = \omega_c/2Q$ 、 $b = \omega_c\sqrt{1-1/(4Q^2)}$ であるから最終的に、

$$V_{\text{out}} = \exp\left(-\frac{\omega_c}{2Q}t\right) \left(\Gamma'_1 \cos \sqrt{1-\frac{1}{4Q^2}}\omega_c t + \Gamma'_2 \sin \sqrt{1-\frac{1}{4Q^2}}\omega_c t \right) + \Gamma_3 \quad (42)$$

を得る。

次に、 $V_{\text{in}}(t > 0) = V_0$ 、 $V_{\text{in}}(t < 0) = 0$ の時の係数 Γ_i を決定する。まず $t \rightarrow \infty$ における挙動を考えるが、このとき $V_{\text{out}} \rightarrow \Gamma_3$ でありこれを元の微分方程式 (33) に代入すれば $\omega_c^2 \Gamma_3 = \omega_c^2 V_0$ を得る。よって $\Gamma_3 = V_0$ である。

その上で、 $V_{\text{out}}(t=0) = 0$ という条件を (42) に代入すると、

$$0 = \Gamma'_1 + \Gamma_3 \rightsquigarrow \Gamma'_1 = -V_0 \quad (43)$$

を得る。さらに、 $dV_{\text{out}}/dt|_{t=0} = 0$ という条件を考えると、(42) から

$$0 = \exp\left(\frac{-\omega_c}{2Q}t\right) \left(-\frac{\omega_c}{2Q}\right) \Gamma'_1 + \exp\left(\frac{-\omega_c}{2Q}t\right) \Gamma'_2 \sqrt{1-\frac{1}{4Q^2}}\omega_c \quad (44)$$

$$\rightsquigarrow \Gamma'_2 = -\frac{V_0}{2Q} \frac{1}{\sqrt{1-\frac{1}{4Q^2}}} = -\frac{V_0}{\sqrt{4Q^2-1}} \quad (45)$$

を得る。以上より、最終的に V_{out} は次のようになる。

$$V_{\text{out}} = V_0 \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{\omega_c}{2Q}t\right) \left(\frac{1}{\sqrt{4Q^2-1}} \sin \sqrt{1-\frac{1}{4Q^2}}\omega_c t + \cos \sqrt{1-\frac{1}{4Q^2}}\omega_c t \right) \right\} \quad (46)$$

を得る。よってこれをプロットしたものが Figure24 である。ただし f_c (すなわち ω_c) および Q については正弦波測定により最終的に求まった f_c 、 Q の範囲のちょうど真ん中の値を用いた。また V_0 については、実際の測定の $t > 0$ での V_{in} の値を平均したものから、 $t < 0$ での V_{in} の値を平均したものを引いたものを用いた。具体的には

$$V_0 = 0.9856 \dots [\text{V}] \quad (47)$$

である。^{*14}また今後 V_0 はこの値を用い続けることになる。

^{*14} V_0 は計算にしか用いないので、有効桁は特に考えず計算機の限界まで値を保持している。

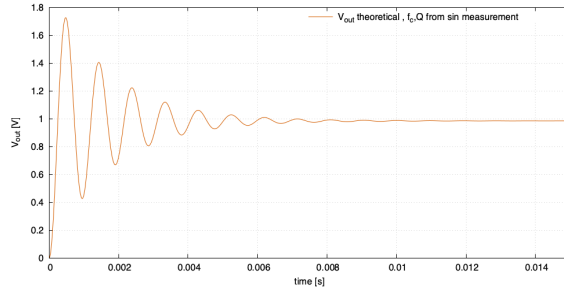


Figure24: $V_{\text{out}}(t)$ の解析解。 f_c および Q は正弦波測定により求めた f_c, Q の範囲の中心値を用いた。

また、この理論波形にステップ入力の立ち上がり時を $t = 0$ とした実測入力信号・実測出力信号を重ねたものが Figure25 である。今拡大図である Figure25b を見ると、理論線と実測線にズレが生じていることがわかる。より具体的には、理論線に比べて実測出力信号の包絡線の収束が早い。これは包絡線の時定数 $2Q/\omega_c$ が小さい、すなわち Q/f_c が小さいことを意味する。よって、時間応答実験から推定される f_c, Q は、正弦波実験から推定される f_c, Q と比べると f_c, Q 空間における偏角が小さくなっていると予想することができる。

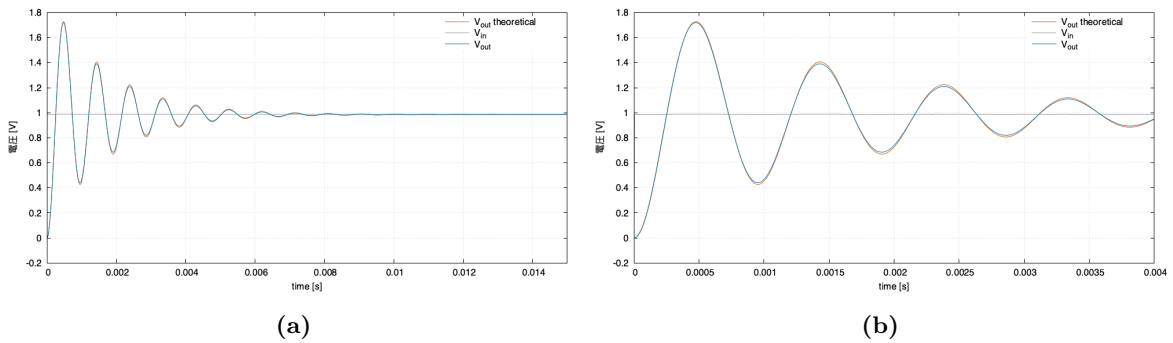


Figure25: (a) $V_{\text{out}}(t)$ の理論波形に、ステップ入力の立ち上がり時を $t = 0$ とした実測入力信号・実測出力信号を重ねた図。(b) a の $t \sim 0$ 近傍での拡大図。

4.3 時間応答を用いた f_c, Q の推定

手順書では独立に f_c, Q を推定することはしなくて良いとあるが、その後の「近似理論式を作り～」の部分は何を意図しているのか分からなかったため、開き直って f_c, Q を最小二乗推定により求めてしまうことにする。この場合の目的関数は、理論式を $V_{\text{out}}(t; f_c, Q)$ 、測定値を $\hat{V}_{\text{out}}(t)$ として次のように与えられる。

$$E = \sum_{t_i \in \text{cDAQ のサンプル点}} \left\{ V_{\text{out}}(t_i; f_c, Q) - \hat{V}_{\text{out}}(t_i) \right\}^2 \quad (48)$$

*15そして、この目的関数を最小にするような f_c, Q は次のように求まった。*16

$$f_c = 1054.6\text{Hz}, Q = 5.326 \quad (49)$$

ただしこの時数値計算における f_c, Q の分解能は

$$\Delta f_c = 0.4\text{Hz}, \Delta Q = 0.0036 \quad (50)$$

であり、今回は f_c, Q の不確かさを算出しないためこの分解能を用いて (49) の有効桁を考えた。また、この時の目的関数の振る舞いを示した。Figure26を見ると、目的関数は極小をただ一つ持っており、また局所解も存在していない。また f_c, Q の間の相関も弱いことがわかる。

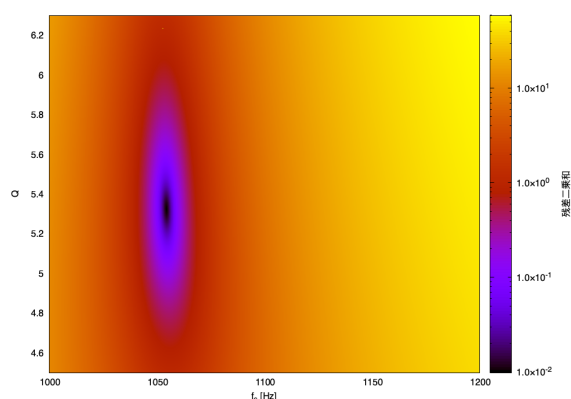


Figure26: $V_{\text{out}}(t)$ に対する最小二乗推定における目的関数の振る舞い。極小をただ一つ持っており、また局所解も存在していない。

また最小二乗推定値 f_c, Q に対して理論線を書き直したものが Figure27である。特に包絡線を描いた上で拡大した Figure27bを見ると、最小二乗推定を行ったことで理論線の測定点に対する（包絡線の）フィットの具合が改善していることが見て取れる。すなわち時定数についての推定が改善したことを意味している。

*15 本来は V_0 も未知パラメタであるが、これを推定しようと思うと未知パラメタが3つになり愚直な do loop だけで最小二乗推定を行うのが（計算機の計算時間的に）厳しくなる。その場合は LM 法などのアルゴリズムを用いて最小二乗推定をすれば良いが、正直期末期間の自分にそこまでの余裕はないため今回は見送ることにした。

*16 この時減衰の時定数は $\tau = 2Q/2\pi f_c = 1.607 \times 10^{-3}\text{s}$ となる。

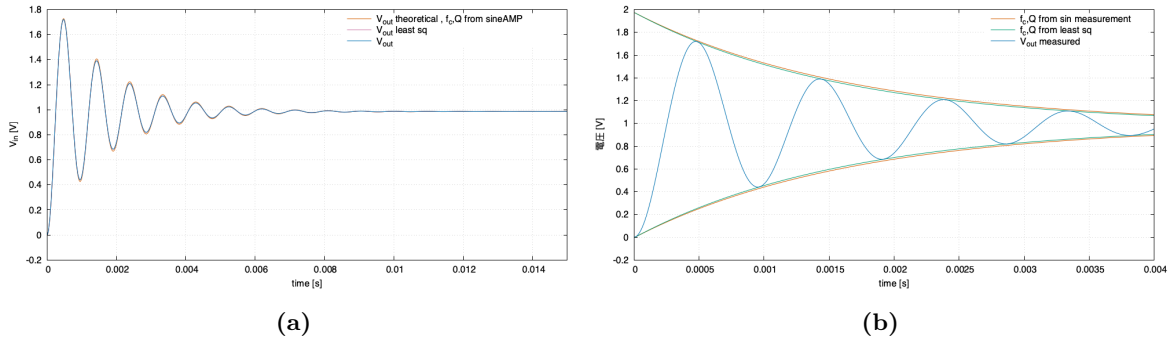


Figure27: (a) 最小二乗推定により得られた f_c, Q から得られる V_{out} と測定結果、および正弦波測定から求めた理論線との比較。(b) 最小二乗推定値 f_c, Q と正弦波測定から得られる f_c, Q に対して包絡線を描き測定結果と比較したもの。

最後に、正弦波測定で得られた f_c, Q の推定範囲との比較を行う。Figure28は、これまでの測定から得られた f_c, Q の推定値と推定範囲の上に水色の点で今回の測定で得られた f_c, Q の点を打ち込んだ図である。

まず、今回の時間応答測定から得られた f_c, Q の点は正弦波測定から求めた f_c, Q の共通集合 (Figure19b) に比べ偏角が小さい位置に存在している。よって先ほど定性的な関数の読み取りから行なった「時間応答実験から推定される f_c, Q は、正弦波実験から推定される f_c, Q と比べると f_c, Q 空間における偏角が小さくなっている」という考察が正しかったことがわかる。

その上で、今回特に注目に値すべきなのは、sinAMP、sinPhase、 V_{out} から得られた f_c, Q の推定値が非常に近い位置に存在していることであろう。すなわち、回路に対して異なる手法で f_c, Q を推定しても元の回路が同じであれば結果的に近い結果を得られるということを示唆している。(何を以て「近い」というのかという議論をするためにはより定量的な解析が必要であると考えられるが、そこまで行くとキリがないので今回はここまでとしておく。)

※ 追記：今回の実験における手順書の意図はおそらく、「テスターから求めた f_c, Q と回路の応答から求めた f_c, Q の推定範囲が整合することを確かめよ」というものであったと思う。しかし、これは暗にテスターから求めた f_c, Q の値と回路の応答から求まる f_c, Q の値に有意な差がないことを仮定している。だが Figure28を見ると、先に説明した通り sinAMP・sinPhase・時間応答から求まる f_c, Q の推定値が非常に近い値をとっているのに対して、テスターから求めた f_c, Q は孤立しているように見える。よってテスターによる回路のパーツの測定から求まる f_c, Q の値と回路の応答から求まる f_c, Q の値の間に有意差があるという可能性を考慮すべきではないかと思われる。(すなわち、静的に回路のパーツの物理量を測定するだけでは評価できない何かしらの物理が回路に電流を流した際には存在しているということ。) よって、手順書の文言にはもしかしたら若干の修正が必要なのかもしれない。

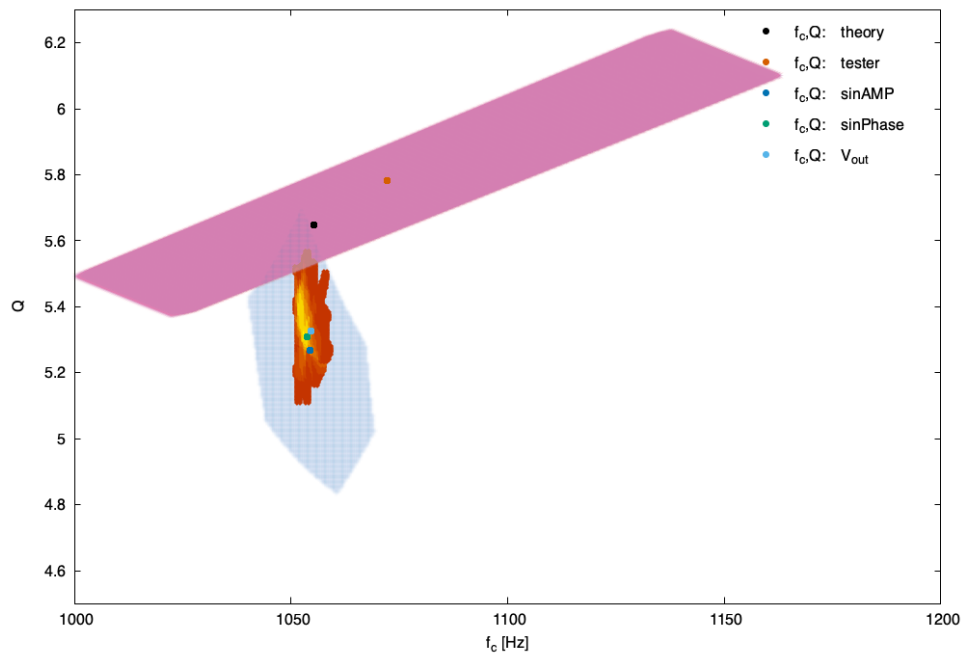


Figure28: (a) f_c, Q の推定値と推定範囲の図。ピンクの図形がテスターによる測定から、薄青の図形が sinAMP による測定から、黄色～オレンジの図形が sinPhase による測定から求まる f_c, Q の推定範囲を表している。またそれぞれの測定から求まる f_c, Q の推定値を点プロットしている。今回の時間応答に関する推定値は水色のプロットに相当。

以上

5 参考文献

- [1] <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2005WR004804>

6 付録

※ 生データ及び数値計算コードはhttps://github.com/ramutami/circuit_exp_MITAMURAにアップロードしています。

6.1 生データ

※ 位相測定が生データについて誤ったものを載せていたので修正した。

振幅測定

	fAmp(Hz)	VppIn (volt)	VppOut (volt)	sineGain	InMeasFS (volt)	OutMeasFS (volt)	Gerr
1	1.0000E+03	2.0400E+00	9.8400E+00	4.8235E+00	4.0000E+00	1.6000E+01	3.6861E-01
2	1.0000E+02	2.0200E+00	2.0400E+00	1.0099E+00	4.0000E+00	4.0000E+00	8.4430E-02
3	1.0000E+04	2.0200E+00	2.3800E-02	1.1782E-02	4.0000E+00	4.0000E-02	9.1805E-04
4	1.0000E+05	1.9800E+01	1.8400E-03	9.2929E-05	4.0000E+01	1.6000E-02	2.4888E-05
5	1.0000E+06	1.9600E+01	8.8800E-03	4.5306E-04	4.0000E+01	1.6000E-02	3.7002E-05
6	7.0000E+05	1.9600E+01	6.3200E-03	3.2245E-04	4.0000E+01	1.6000E-02	3.1456E-05
7	5.0000E+05	1.9600E+01	4.6400E-03	2.3673E-04	4.0000E+01	1.6000E-02	2.8457E-05
8	3.0000E+05	1.9600E+01	2.9600E-03	1.5102E-04	4.0000E+01	1.6000E-02	2.6177E-05
9	2.0000E+05	1.9600E+01	2.0800E-03	1.0612E-04	4.0000E+01	1.6000E-02	2.5337E-05
10	5.0000E+04	1.9800E+01	8.8000E-03	4.4444E-04	4.0000E+01	1.6000E-02	3.6239E-05
11	7.0000E+04	1.9800E+01	4.1600E-03	2.1010E-04	4.0000E+01	1.6000E-02	2.7383E-05
12	1.3000E+05	1.9800E+01	1.4400E-03	7.2727E-05	4.0000E+01	1.6000E-02	2.4640E-05
13	1.7000E+05	1.9800E+01	1.7600E-03	8.8889E-05	4.0000E+01	1.6000E-02	2.4834E-05
14	3.0000E+03	2.0000E+01	2.8000E+00	1.4200E-01	4.0000E+01	4.0000E+00	1.0421E-02
15	4.0000E+02	2.0000E+01	2.3200E+01	1.1600E+00	4.0000E+01	4.0000E+01	9.1892E-02
16	3.0000E+01	2.0000E+01	2.0000E+01	1.0000E+00	4.0000E+01	4.0000E+01	8.4853E-02
17	1.0000E+01	2.0000E+01	2.0000E+01	1.0000E+00	4.0000E+01	4.0000E+01	8.4853E-02
18	2.5000E+04	2.0000E+01	3.6800E-02	1.8400E-03	4.0000E+01	8.0000E-02	1.6306E-04
19	7.0000E+03	2.0000E+01	4.6800E-01	2.3400E-02	4.0000E+01	8.0000E-01	1.8469E-03
20	1.0720E+03	1.9800E-01	1.0200E+00	5.1515E+00	4.0000E-01	1.6000E+00	3.9528E-01
21	8.0000E+02	2.0000E-01	4.4800E-01	2.2400E+00	4.0000E-01	8.0000E-01	1.8018E-01
22	7.0000E+02	1.9800E-01	3.4800E-01	1.7576E+00	4.0000E-01	4.0000E-01	1.2255E-01
23	9.0000E+02	2.0000E-01	6.3200E-01	3.1600E+00	4.0000E-01	8.0000E-01	2.2438E-01
24	2.0000E+03	2.0000E-01	7.7600E-02	3.8800E-01	4.0000E-01	1.6000E-01	3.3436E-02
25	1.2000E+03	1.9800E-01	5.4400E-01	2.7475E+00	4.0000E-01	8.0000E-01	2.0596E-01
26	1.3000E+03	1.0000E-01	1.7200E-01	1.7200E+00	1.6000E-01	4.0000E-01	1.4566E-01
27	1.1000E+03	1.0000E-01	4.5600E-01	4.5600E+00	1.6000E-01	8.0000E-01	3.2482E-01
28	1.1500E+03	9.8400E-02	3.5200E-01	3.5772E+00	1.6000E-01	8.0000E-01	2.9990E-01
29	1.7000E+03	2.0000E-01	1.2400E-01	6.2000E-01	4.0000E-01	1.6000E-01	4.4270E-02
30							

位相測定

	fPhase(Hz)	timeDelay (s)	phaseDelay (deg)	timeError (s)	phaseErr (deg)
1	4.000000E+02	3.200000E-05	-8.042477E-02	2.000000E-06	-5.026548E-03
2	8.000000E+02	6.400000E-05	-3.216991E-01	1.000000E-06	-5.026548E-03
3	1.500000E+03	3.060000E-04	-2.883982E+00	2.000000E-06	-1.884956E-02
4	3.000000E+03	1.620000E-04	-3.053628E+00	1.000000E-06	-1.884956E-02
5	7.000000E+03	7.100000E-05	-3.122743E+00	1.000000E-06	-4.398230E-02
6	3.000000E+04	1.660000E-05	-3.129026E+00	2.000000E-07	-3.769911E-02
7	1.000000E+05	6.100000E-06	-3.832743E+00	1.000000E-07	-6.283185E-02
8	8.000000E+04	7.000000E-06	-3.518584E+00	1.000000E-07	-5.026548E-02
9	7.000000E+04	7.700000E-06	-3.386637E+00	1.000000E-07	-4.398230E-02
10	6.000000E+04	8.700000E-06	-3.279823E+00	1.000000E-07	-3.769911E-02
11	5.000000E+04	1.020000E-05	-3.204425E+00	1.000000E-07	-3.141593E-02
12	4.000000E+04	1.260000E-05	-3.166725E+00	1.000000E-07	-2.513274E-02
13	1.700000E+04	2.900000E-05	-3.097610E+00	2.000000E-07	-2.136283E-02
14	2.500000E+04	1.980000E-05	-3.110177E+00	2.000000E-07	-3.141593E-02
15	1.100000E+04	4.520000E-05	-3.124000E+00	4.000000E-07	-2.764602E-02
16	5.000000E+03	9.800000E-05	-3.078761E+00	1.000000E-06	-3.141593E-02
17	4.000000E+03	1.230000E-04	-3.091327E+00	1.000000E-06	-2.513274E-02
18	1.100000E+03	2.880000E-04	-1.990513E+00	4.000000E-06	-2.764602E-02
19	1.200000E+03	3.320000E-04	-2.503221E+00	2.000000E-06	-1.507964E-02
20	2.000000E+03	2.380000E-04	-2.990796E+00	2.000000E-06	-2.513274E-02
21	1.000000E+03	1.680000E-04	-1.055575E+00	2.000000E-06	-1.256637E-02
22	9.000000E+02	9.400000E-05	-5.315575E-01	1.000000E-06	-5.654867E-03
23	9.500000E+02	1.230000E-04	-7.341902E-01	1.000000E-06	-5.969026E-03
24	1.050000E+03	2.340000E-04	-1.543779E+00	2.000000E-06	-1.319469E-02
25	1.150000E+03	3.220000E-04	-2.326664E+00	2.000000E-06	-1.445133E-02
26	1.250000E+03	3.360000E-04	-2.638938E+00	2.000000E-06	-1.570796E-02
27	1.030000E+03	2.060000E-04	-1.333166E+00	2.000000E-06	-1.294336E-02
28	1.080000E+03	2.700000E-04	-1.832177E+00	2.000000E-06	-1.357168E-02
29	7.000000E+01	2.000000E-05	-8.796459E-03	1.000000E-05	-4.398230E-03
30	6.000000E+02	4.100000E-05	-1.545664E-01	1.000000E-06	-3.769911E-03
31	1.500000E+02	2.800000E-05	-2.638938E-02	4.000000E-06	-3.769911E-03
32	4.000000E+01	4.000000E-05	-1.005310E-02	2.000000E-05	-5.026548E-03
33	2.500000E+02	2.400000E-05	-3.769911E-02	4.000000E-06	-6.283185E-03
34					

6.2 数値計算コード

※ レポートの修正のために追加でいくつかの計算を行った為、コードも修正した。

FORTRAN: 回路実験数値計算用コード

```
1 program main
2 use omp_lib
3 implicit none
4 real(8) , parameter :: pi=3.14159265358979323_8
5 integer :: i,meshsize,j,k,l,meshsize2,idx
6 real(8) :: f_min,f_max,f,fc_in,Q_in
7 real(8) :: R2_true,R3_true,C1_true,C4_true
8 real(8) :: R2_mes,R3_mes,C1_mes,C4_mes
9 real(8) :: R2_mes_min,R3_mes_min,C1_mes_min,C4_mes_min
10 real(8) :: R2_mes_max,R3_mes_max,C1_mes_max,C4_mes_max
11 real(8) :: R2_test,R3_test,C1_test,C4_test
12 integer::io,filesize
13 real(8),allocatable::freq_sinamp(:),G_sinamp(:),err_sinamp(:)
14 real(8) :: temp1,temp2,temp3,temp4,temp5,temp6,temp7
15 real(8) :: fc_test,Q_test,fc_min,fc_max,Q_min,Q_max
16 real(8) :: E_func,E_func_best,fc_best,Q_best
17 integer :: is_in_int
18 real(8),allocatable::freq_sinphase(:),P_sinphase(:),err_sinphase(:)
19 integer :: count_isin
20 real(8) :: t_min,t_max,t_test
21 real(8),allocatable :: Vin(:),time(:),Vout_data(:)
22 real(8) :: V0_est,V_offset
23 real(8),allocatable :: E_func_vect(:),fc_test_vect(:),Q_test_vect(:)
24 real(8) :: tau
25 integer,allocatable :: line_num(:)
26 integer :: tot_linenum
27 !=====fc,Qを定める=====
28 ! fc = 1055.2333827703276
29 ! Q = 5.6488539778585380
30
31 R2_true = 4.7e3_8
32 R3_true = 22.0e3_8
33 C1_true = 0.001e-6_8
34 C4_true = 0.22e-6_8
35 !=====fc,Qを定める=====
36
37 !=====G(f)を出力してみる=====
38 meshsize = 10000
39 f_min = 0.1_8
40 f_max = 1.0e8_8
41 fc_in = fc(R2_true,R3_true,C1_true,C4_true)
42 Q_in = Q(R2_true,R3_true,C1_true,C4_true)
43 write(*,*) 'fc_theory,Q_theory:',fc_in,Q_in
44
45 open(10,file='./data_out/G_test.dat',status='replace',action='write')
46 write(10,*) "fc,Q is calculated from true R,C value"
47 write(10,*) "f,G(f)"
48 do i = 1,meshsize
49 f = exp(log(f_min)+ (log(f_max)-log(f_min))*(real(i,8)/real(meshsize,8)))
50 write(10,*) f,G(f,fc_in,Q_in)
51 end do
52 close(10)
53 !-----
54
55 fc_in = fc(R2_true,R3_true,C1_true,C4_true)
56 Q_in = 0.01
57
58 open(10,file='./data_out/G_test_Q0d01.dat',status='replace',action='write')
59 write(10,*) "fc,Q is calculated from true R,C value"
60 write(10,*) "f,G(f)"
61 do i = 1,meshsize
62 f = exp(log(f_min)+ (log(f_max)-log(f_min))*(real(i,8)/real(meshsize,8)))
63 write(10,*) f,G(f,fc_in,Q_in)
64 end do
65 close(10)
66 !-----
67
68 Q_in = 0.1
69
70 open(10,file='./data_out/G_test_Q0d1.dat',status='replace',action='write')
71 write(10,*) "fc,Q is calculated from true R,C value"
72 write(10,*) "f,G(f)"
73 do i = 1,meshsize
74 f = exp(log(f_min)+ (log(f_max)-log(f_min))*(real(i,8)/real(meshsize,8)))
75 write(10,*) f,G(f,fc_in,Q_in)
76 end do
77 close(10)
78 !-----
79
80
81 Q_in = 0.5
82
83 open(10,file='./data_out/G_test_Q0d5.dat',status='replace',action='write')
84 write(10,*) "fc,Q is calculated from true R,C value"
85 write(10,*) "f,G(f)"
86 do i = 1,meshsize
87 f = exp(log(f_min)+ (log(f_max)-log(f_min))*(real(i,8)/real(meshsize,8)))
88 write(10,*) f,G(f,fc_in,Q_in)
```

```

89     end do
90     close(10)
91     !-----
92
93
94     Q_in = 1
95
96     open(10,file='./data_out/G_test_Q1.dat',status='replace',action='write')
97     write(10,*) "fc,Q is calculated from true R,C value"
98     write(10,*) "f,G(f)"
99     do i = 1,meshsize
100        f = exp(log(f_min)+ (log(f_max)-log(f_min))*(real(i,8)/real(meshsize,8)))
101        write(10,*) f,G(f,fc_in,Q_in)
102     end do
103     close(10)
104     !-----
105
106     Q_in = 2
107
108     open(10,file='./data_out/G_test_Q2.dat',status='replace',action='write')
109     write(10,*) "fc,Q is calculated from true R,C value"
110     write(10,*) "f,G(f)"
111     do i = 1,meshsize
112        f = exp(log(f_min)+ (log(f_max)-log(f_min))*(real(i,8)/real(meshsize,8)))
113        write(10,*) f,G(f,fc_in,Q_in)
114     end do
115     close(10)
116     !-----
117
118     Q_in = 10
119
120     open(10,file='./data_out/G_test_Q10.dat',status='replace',action='write')
121     write(10,*) "fc,Q is calculated from true R,C value"
122     write(10,*) "f,G(f)"
123     do i = 1,meshsize
124        f = exp(log(f_min)+ (log(f_max)-log(f_min))*(real(i,8)/real(meshsize,8)))
125        write(10,*) f,G(f,fc_in,Q_in)
126     end do
127     close(10)
128     !-----
129
130     Q_in = 50
131
132     open(10,file='./data_out/G_test_Q50.dat',status='replace',action='write')
133     write(10,*) "fc,Q is calculated from true R,C value"
134     write(10,*) "f,G(f)"
135     do i = 1,meshsize
136        f = exp(log(f_min)+ (log(f_max)-log(f_min))*(real(i,8)/real(meshsize,8)))
137        write(10,*) f,G(f,fc_in,Q_in)
138     end do
139     close(10)
140     !-----
141
142
143     fc_in = 10
144     Q_in = Q(R2_true,R3_true,C1_true,C4_true)
145
146     open(10,file='./data_out/G_test_f10.dat',status='replace',action='write')
147     write(10,*) "fc,Q is calculated from true R,C value"
148     write(10,*) "f,G(f)"
149     do i = 1,meshsize
150        f = exp(log(f_min)+ (log(f_max)-log(f_min))*(real(i,8)/real(meshsize,8)))
151        write(10,*) f,G(f,fc_in,Q_in)
152     end do
153     close(10)
154     !-----
155
156     fc_in = 100
157     Q_in = Q(R2_true,R3_true,C1_true,C4_true)
158
159     open(10,file='./data_out/G_test_f100.dat',status='replace',action='write')
160     write(10,*) "fc,Q is calculated from true R,C value"
161     write(10,*) "f,G(f)"
162     do i = 1,meshsize
163        f = exp(log(f_min)+ (log(f_max)-log(f_min))*(real(i,8)/real(meshsize,8)))
164        write(10,*) f,G(f,fc_in,Q_in)
165     end do
166     close(10)
167     !-----
168
169     fc_in = 1000
170     Q_in = Q(R2_true,R3_true,C1_true,C4_true)
171
172     open(10,file='./data_out/G_test_f1000.dat',status='replace',action='write')
173     write(10,*) "fc,Q is calculated from true R,C value"
174     write(10,*) "f,G(f)"
175     do i = 1,meshsize
176        f = exp(log(f_min)+ (log(f_max)-log(f_min))*(real(i,8)/real(meshsize,8)))
177        write(10,*) f,G(f,fc_in,Q_in)
178     end do
179     close(10)
180     !-----
181
182     fc_in = 10000
183     Q_in = Q(R2_true,R3_true,C1_true,C4_true)
184
185     open(10,file='./data_out/G_test_f10000.dat',status='replace',action='write')
186     write(10,*) "fc,Q is calculated from true R,C value"

```

```

187     write(10,*) "f,G(f)"
188     do i = 1,meshsize
189         f = exp(log(f_min)+ (log(f_max)-log(f_min))*(real(i,8)/real(meshsize,8)))
190         write(10,*) f,G(f,fc_in,Q_in)
191     end do
192     close(10)
193     !-----
194
195
196 !=====G(f)を出力してみる=====
197
198 !=====P(f)を出力してみる=====
199     fc_in = fc(R2_true,R3_true,C1_true,C4_true)
200     Q_in = Q(R2_true,R3_true,C1_true,C4_true)
201
202     open(10,file='./data_out/P_test.dat',status='replace',action='write')
203     write(10,*) "fc,Q is calculated from true R,C value"
204     write(10,*) "f,P(f)"
205     do i = 1,meshsize
206         f = exp(log(f_min)+ (log(f_max)-log(f_min))*(real(i,8)/real(meshsize,8)))
207         write(10,*) f,P(f,fc_in,Q_in)
208     end do
209     close(10)
210     !-----
211
212
213     fc_in = fc(R2_true,R3_true,C1_true,C4_true)
214     Q_in = 0.01
215
216     open(10,file='./data_out/P_test_Q0d01.dat',status='replace',action='write')
217     write(10,*) "fc,Q is calculated from true R,C value"
218     write(10,*) "f,G(f)"
219     do i = 1,meshsize
220         f = exp(log(f_min)+ (log(f_max)-log(f_min))*(real(i,8)/real(meshsize,8)))
221         write(10,*) f,P(f,fc_in,Q_in)
222     end do
223     close(10)
224     !-----
225
226     Q_in = 0.1
227
228     open(10,file='./data_out/P_test_Q0d1.dat',status='replace',action='write')
229     write(10,*) "fc,Q is calculated from true R,C value"
230     write(10,*) "f,G(f)"
231     do i = 1,meshsize
232         f = exp(log(f_min)+ (log(f_max)-log(f_min))*(real(i,8)/real(meshsize,8)))
233         write(10,*) f,P(f,fc_in,Q_in)
234     end do
235     close(10)
236     !-----
237
238
239     Q_in = 0.5
240
241     open(10,file='./data_out/P_test_Q0d5.dat',status='replace',action='write')
242     write(10,*) "fc,Q is calculated from true R,C value"
243     write(10,*) "f,G(f)"
244     do i = 1,meshsize
245         f = exp(log(f_min)+ (log(f_max)-log(f_min))*(real(i,8)/real(meshsize,8)))
246         write(10,*) f,P(f,fc_in,Q_in)
247     end do
248     close(10)
249     !-----
250
251
252     Q_in = 1
253
254     open(10,file='./data_out/P_test_Q1.dat',status='replace',action='write')
255     write(10,*) "fc,Q is calculated from true R,C value"
256     write(10,*) "f,G(f)"
257     do i = 1,meshsize
258         f = exp(log(f_min)+ (log(f_max)-log(f_min))*(real(i,8)/real(meshsize,8)))
259         write(10,*) f,P(f,fc_in,Q_in)
260     end do
261     close(10)
262     !-----
263
264     Q_in = 2
265
266     open(10,file='./data_out/P_test_Q2.dat',status='replace',action='write')
267     write(10,*) "fc,Q is calculated from true R,C value"
268     write(10,*) "f,G(f)"
269     do i = 1,meshsize
270         f = exp(log(f_min)+ (log(f_max)-log(f_min))*(real(i,8)/real(meshsize,8)))
271         write(10,*) f,P(f,fc_in,Q_in)
272     end do
273     close(10)
274     !-----
275
276     Q_in = 10
277
278     open(10,file='./data_out/P_test_Q10.dat',status='replace',action='write')
279     write(10,*) "fc,Q is calculated from true R,C value"
280     write(10,*) "f,G(f)"
281     do i = 1,meshsize
282         f = exp(log(f_min)+ (log(f_max)-log(f_min))*(real(i,8)/real(meshsize,8)))
283         write(10,*) f,P(f,fc_in,Q_in)
284     end do

```

```

285     close(10)
286     !-----
287
288     Q_in = 50
289
290     open(10,file='./data_out/P_test_Q50.dat',status='replace',action='write')
291     write(10,*) "fc,Q is calculated from true R,C value"
292     write(10,*) "f,G(f)"
293     do i = 1,meshsize
294         f = exp(log(f_min)+ (log(f_max)-log(f_min))*(real(i,8)/real(meshsize,8)))
295         write(10,*) f,P(f,fc_in,Q_in)
296     end do
297     close(10)
298     !-----
299
300
301     fc_in = 10
302     Q_in = Q(R2_true,R3_true,C1_true,C4_true)
303
304     open(10,file='./data_out/P_test_fi0.dat',status='replace',action='write')
305     write(10,*) "fc,Q is calculated from true R,C value"
306     write(10,*) "f,G(f)"
307     do i = 1,meshsize
308         f = exp(log(f_min)+ (log(f_max)-log(f_min))*(real(i,8)/real(meshsize,8)))
309         write(10,*) f,P(f,fc_in,Q_in)
310     end do
311     close(10)
312     !-----
313
314     fc_in = 100
315     Q_in = Q(R2_true,R3_true,C1_true,C4_true)
316
317     open(10,file='./data_out/P_test_fi100.dat',status='replace',action='write')
318     write(10,*) "fc,Q is calculated from true R,C value"
319     write(10,*) "f,G(f)"
320     do i = 1,meshsize
321         f = exp(log(f_min)+ (log(f_max)-log(f_min))*(real(i,8)/real(meshsize,8)))
322         write(10,*) f,P(f,fc_in,Q_in)
323     end do
324     close(10)
325     !-----
326
327     fc_in = 1000
328     Q_in = Q(R2_true,R3_true,C1_true,C4_true)
329
330     open(10,file='./data_out/P_test_fi1000.dat',status='replace',action='write')
331     write(10,*) "fc,Q is calculated from true R,C value"
332     write(10,*) "f,G(f)"
333     do i = 1,meshsize
334         f = exp(log(f_min)+ (log(f_max)-log(f_min))*(real(i,8)/real(meshsize,8)))
335         write(10,*) f,P(f,fc_in,Q_in)
336     end do
337     close(10)
338     !-----
339
340     fc_in = 10000
341     Q_in = Q(R2_true,R3_true,C1_true,C4_true)
342
343     open(10,file='./data_out/P_test_fi10000.dat',status='replace',action='write')
344     write(10,*) "fc,Q is calculated from true R,C value"
345     write(10,*) "f,G(f)"
346     do i = 1,meshsize
347         f = exp(log(f_min)+ (log(f_max)-log(f_min))*(real(i,8)/real(meshsize,8)))
348         write(10,*) f,P(f,fc_in,Q_in)
349     end do
350     close(10)
351     !-----
352
353
354
355
356
357     !=====P(f)を出力してみる=====
358
359
360     !=====テスターから求めるfc,Qの範囲=====
361     R2_mes_min=4.698e3_8-0.027e3_8
362     R3_mes_min=22.05e3_8-0.13e3_8
363     C1_mes_min=0.96e-9_8-0.119e-9_8
364     C4_mes_min=0.2216e-6_8-0.0049e-6_8
365
366     R2_mes_max=4.698e3_8+0.027e3_8
367     R3_mes_max=22.05e3_8+0.13e3_8
368     C1_mes_max=0.96e-9_8+0.119e-9_8
369     C4_mes_max=0.2216e-6_8+0.0049e-6_8
370
371     meshsize2 = 100
372
373
374     open(10,file='./data_out/tester_area.dat',status='replace',action='write')
375     write(10,*) 'fc,Q'
376     do i = 1,meshsize2
377         write(*,*) real(i,8)*100.0/real(meshsize2,8)
378         do j = 1,meshsize2
379             do k = 1,meshsize2
380                 do l = 1,meshsize2
381
382                     R2_test = R2_mes_min + (R2_mes_max-R2_mes_min)*(real(i,8)/real(meshsize2,8))

```

```

383         R3_test = R3_mes_min + (R3_mes_max-R3_mes_min)*(real(j,8)/real(meshsize2,8))
384         C1_test = c1_mes_min + (C1_mes_max-C1_mes_min)*(real(k,8)/real(meshsize2,8))
385         C4_test = C4_mes_min + (C4_mes_max-C4_mes_min)*(real(l,8)/real(meshsize2,8))
386         write(10,*) fc(R2_test,R3_test,C1_test,C4_test),Q(R2_test,R3_test,C1_test,C4_test)
387     end do
388 end do
389 end do
390 end do
391 close(10)
392
393 !=====テスターから求めるfc,Qの範囲=====
394
395 !=====実験当日に測定したQ,fcに対する理論線=====
396
397 R2_mes = 4.698e3_8
398 R3_mes = 22.05e3_8
399 C1_mes = 0.96e-9_8
400 C4_mes = 0.2216e-6_8
401
402 fc_in = fc(R2_mes,R3_mes,C1_mes,C4_mes)
403 Q_in = Q(R2_mes,R3_mes,C1_mes,C4_mes)
404 open(10,file='./data_out/G_mes.dat',status='replace',action='write')
405 write(10,*) "fc,Q is calculated from the measured R,C value"
406 write(10,*) "f,G(f)"
407 do i = 1,meshsize
408     f = exp(log(f_min)+(log(f_max)-log(f_min))*(real(i,8)/real(meshsize,8)))
409     write(10,*) f,G(f,fc_in,Q_in)
410 end do
411 close(10)
412
413 open(10,file='./data_out/P_mes.dat',status='replace',action='write')
414 write(10,*) "fc,Q is calculated from the measured R,C value"
415 write(10,*) "f,P(f)"
416 do i = 1,meshsize
417     f = exp(log(f_min)+(log(f_max)-log(f_min))*(real(i,8)/real(meshsize,8)))
418     write(10,*) f,P(f,fc_in,Q_in)
419 end do
420 write(*,*) 'from_mes:',fc_in,Q_in
421 close(10)
422
423
424
425
426 !=====測定したQ,fcに対する理論線=====
427
428 !=====sinAMPから求めるfc,Qの範囲=====
429
430 open(10,file='./raw_data/sinAMP.dat',status='old',action='read')
431 !ファイルサイズを取得する
432 filesize=0
433 read(10,'(A)')
434 do
435     read(10,'(A)',iostat=io)
436     if(is_iostat_end(io)) then
437         exit
438     end if
439     filesize=filesize+1
440 end do
441 !filesizeを取得したら、data_inにallocateして、読み込みを開始する。
442 rewind(10)
443 read(10,'(A)')
444 j=0
445 do i = 1,filesize
446     read(10,*) temp1,temp2,temp3,temp4,temp5,temp6,temp7
447     if (temp1 < 9.0e4) then
448         j=j+1
449     end if
450 end do
451 allocate(freq_sinamp(j),G_sinamp(j),err_sinamp(j))
452 rewind(10)
453 read(10,'(A)')
454 j=0
455 do i = 1,filesize
456     read(10,*) temp1,temp2,temp3,temp4,temp5,temp6,temp7
457     if (temp1 < 9.0e4) then
458         j=j+1
459         freq_sinamp(j) = temp1
460         G_sinamp(j) = temp4
461         err_sinamp(j) = temp7
462     end if
463 end do
464 close(10)
465
466 meshsize2 = 500
467 fc_min = 1000
468 fc_max = 1200
469 Q_min = 4.5
470 Q_max = 6.3
471 open(10,file='./data_out/sineamp_leastsq.dat',status='replace',action='write')
472 write(10,*) 'fc,Q,E_val,is_in?'
473 E_func_best = 999.0e10
474 do j = 1,meshsize2
475     do k = 1,meshsize2
476         fc_test = fc_min + (fc_max-fc_min)*(real(j,8)/real(meshsize2,8))
477         Q_test = Q_min + (Q_max-Q_min)*(real(k,8)/real(meshsize2,8))
478         is_in_int = 1

```

```

481     E_func = 0.0
482
483     do i = 1,size(freq_sinamp)
484         E_func = E_func + (G(freq_sinamp(i),fc_test,Q_test)-G_sinamp(i))*2.0_8
485     end do
486     if (E_func < E_func_best) then
487         E_func_best = E_func
488         fc_best = fc_test
489         Q_best = Q_test
490     end if
491
492     do i = 1,size(freq_sinamp)
493         if(G(freq_sinamp(i),fc_test,Q_test)<G_sinamp(i)-err_sinamp(i) .or. G(freq_sinamp(i),fc_test,Q_test)>
494             G_sinamp(i)+err_sinamp(i) ) then
495             is_in_int=0
496         end if
497     end do
498
499     write(10,*) fc_test,Q_test,E_func,is_in_int
500
501     end do
502     close(10)
503
504     write(*,*) "fcbest,Qbest",fc_best,Q_best,E_func_best,(fc_max-fc_min)*(real(1,8)/real(meshsize2,8)),(Q_max-Q_min)
505         *(real(1,8)/real(meshsize2,8))
506
507     open(10,file='./data_out/sineamp_fit.dat',status='replace',action='write')
508     fc_in = fc_best
509     Q_in = Q_best
510     write(10,*) "f,G(f)"
511     do i = 1,meshsize
512         f = exp(log(f_min)+ (log(f_max)-log(f_min))*(real(i,8)/real(meshsize,8)))
513         write(10,*) f,G(f,fc_in,Q_in)
514     end do
515     close(10)
516
517     !=====sinAMPから求めるfc,Qの範囲=====
518
519     !=====sinPhaseから求めるfc,Qの範囲=====
520     open(10,file='./raw_data/sinPhase.dat',status='old',action='read')
521     !ファイルサイズを取得する
522     filesize=0
523     read(10,'(A)')
524     do
525         read(10,'(A)',iostat=io)
526         if(is_iostat_end(io)) then
527             exit
528         end if
529         filesize=filesize+1
530     end do
531     !filesizeを取得したら、data_inにallocateして、読み込みを開始する。
532     rewind(10)
533     read(10,'(A)')
534     j=0
535     do i = 1,filesize
536         read(10,*) temp1,temp2,temp3,temp4,temp5
537         if (temp1 < 1.0e4) then
538             j=j+1
539         end if
540     end do
541     allocate(freq_sinphase(j),P_sinphase(j),err_sinphase(j))
542     rewind(10)
543     read(10,'(A)')
544     j=0
545     do i = 1,filesize
546         read(10,*) temp1,temp2,temp3,temp4,temp5
547         if (temp1 < 1.0e4) then
548             j=j+1
549             freq_sinphase(j) = temp1
550             P_sinphase(j)=temp3
551             err_sinphase(j)=temp5
552         end if
553     end do
554     close(10)
555     meshsize2 = 500
556     fc_min = 1000
557     fc_max = 1200
558     Q_min = 4.5
559     Q_max = 6.3
560     open(10,file='./data_out/sinphase_leastsq.dat',status='replace',action='write')
561     write(10,*) 'fc,Q,E_val,is_in?'
562     E_func_best = 999.0e10
563     do j = 1,meshsize2
564         do k = 1,meshsize2
565             fc_test = fc_min + (fc_max-fc_min)*(real(j,8)/real(meshsize2,8))
566             Q_test = Q_min + (Q_max-Q_min)*(real(k,8)/real(meshsize2,8))
567             is_in_int = 1
568             E_func=0.0
569             count_isin = 0
570
571             do i = 1,size(freq_sinphase)
572                 E_func = E_func + (P(freq_sinphase(i),fc_test,Q_test)-P_sinphase(i))*2.0_8
573             end do
574             if (E_func < E_func_best) then
575                 E_func_best = E_func
576                 fc_best = fc_test
577                 Q_best = Q_test

```

```

577         end if
578
579         do i = 1,size(freq_sinphase)
580             if(P(freq_sinphase(i),fc_test,Q_test)<P_sinphase(i)-abs(err_sinphase(i)) .or. P(freq_sinphase(i),
                    fc_test,Q_test)>P_sinphase(i)+abs(err_sinphase(i)) ) then
581                 is_in_int=0
582             end if
583             if(P(freq_sinphase(i),fc_test,Q_test)>=P_sinphase(i)-abs(err_sinphase(i)) .and. P(freq_sinphase(i),
                    fc_test,Q_test)<=P_sinphase(i)+abs(err_sinphase(i)) ) then
584                 count_isin = count_isin+1
585             end if
586         end do
587
588         write(10,*) fc_test,Q_test,E_func,is_in_int,count_isin
589
590     end do
591 end do
592 close(10)
593
594 write(*,*) "fcbest,Qbest",fc_best,Q_best,E_func_best,(fc_max-fc_min)*(real(1,8)/real(meshsize2,8)),(Q_max-Q_min)
        *(real(1,8)/real(meshsize2,8))
595
596 open(10,file='./data_out/sinphase_fit.dat',status='replace',action='write')
597 fc_in = fc_best
598 Q_in = Q_best
599 write(10,*) "f,P(f)"
600 do i = 1,meshsize
601     f = exp(log(f_min)+(log(f_max)-log(f_min))*(real(i,8)/real(meshsize,8)))
602     write(10,*) f,P(f,fc_in,Q_in)
603 end do
604 close(10)
605
606
607 !それぞれのcount_is_inに対して、P(f;fc,Q)がどう動いているのかを見たい!
608 meshsize = 1000
609 f_min = 29.0_8
610 f_max = 1.2e4_8
611 !---
612 open(23,file='./data_out/sinPhasegraph_23points.dat',status='replace',action='write')
613 open(22,file='./data_out/sinPhasegraph_22points.dat',status='replace',action='write')
614 open(21,file='./data_out/sinPhasegraph_21points.dat',status='replace',action='write')
615 open(20,file='./data_out/sinPhasegraph_20points.dat',status='replace',action='write')
616 open(19,file='./data_out/sinPhasegraph_19points.dat',status='replace',action='write')
617 open(18,file='./data_out/sinPhasegraph_18points.dat',status='replace',action='write')
618 open(17,file='./data_out/sinPhasegraph_17points.dat',status='replace',action='write')
619 open(16,file='./data_out/sinPhasegraph_16points.dat',status='replace',action='write')
620 open(15,file='./data_out/sinPhasegraph_15points.dat',status='replace',action='write')
621 open(14,file='./data_out/sinPhasegraph_14points.dat',status='replace',action='write')
622 open(13,file='./data_out/sinPhasegraph_13points.dat',status='replace',action='write')
623 open(12,file='./data_out/sinPhasegraph_12points.dat',status='replace',action='write')
624 open(11,file='./data_out/sinPhasegraph_11points.dat',status='replace',action='write')
625 open(10,file='./data_out/sinPhasegraph_10points.dat',status='replace',action='write')
626 open(39,file='./data_out/sinPhasegraph_9points.dat',status='replace',action='write')
627 open(38,file='./data_out/sinPhasegraph_8points.dat',status='replace',action='write')
628 open(37,file='./data_out/sinPhasegraph_7points.dat',status='replace',action='write')
629 open(36,file='./data_out/sinPhasegraph_6points.dat',status='replace',action='write')
630
631 !---
632 open(30,file='./data_out/sinphase_leaststsq.dat',status='old',action='read')
633 read(30,*)
634 do i = 1,meshsize2*meshsize2
635     read(30,*) fc_in,Q_in,temp3,temp4,count_isin
636     write(*,'(f5.2,A)') real(i,8)*100.0/real(meshsize2*meshsize2,8),'%'
637     do k = 23,10,-1
638         meshsize = 1000
639
640
641         if (count_isin >= k) then
642             do j = 1,meshsize
643                 f = exp(log(f_min)+(log(f_max)-log(f_min))*(real(j,8)/real(meshsize,8)))
644                 write(k,*) f,P(f,fc_in,Q_in),count_isin
645             end do
646             write(k,*)
647         end if
648     end do
649     do k = 39,36,-1
650         if (count_isin >= k-30) then
651             if (k-30 <= 8) then
652                 meshsize = 500
653             end if
654             if (k-30 == 6) then
655                 meshsize = 300
656             end if
657             do j = 1,meshsize
658                 f = exp(log(f_min)+(log(f_max)-log(f_min))*(real(j,8)/real(meshsize,8)))
659                 write(k,*) f,P(f,fc_in,Q_in),count_isin
660             end do
661             write(k,*)
662         end if
663     end do
664
665     end do
666
667
668 close(30)
669 !----
670 close(23)
671 close(22)

```

```

672     close(21)
673     close(20)
674     close(19)
675     close(18)
676     close(17)
677     close(16)
678     close(15)
679     close(14)
680     close(13)
681     close(12)
682     close(11)
683     close(10)
684     close(39)
685     close(38)
686     close(37)
687     close(36)
688     !-----
689     meshsize = 10000
690     f_min = 0.1_8
691     f_max = 1.0e8_8
692
693
694
695
696     !=====sinPhaseから求めるfc,Qの範囲=====
697
698     !=====sinPhaseから求めるfc,Qの範囲=====
699     !最終的に求めたfc,Qの範囲
700     !fc=1053.2>>>Q=5.5296-5.5476 ,0.0036刻み
701     !fc=1053.6>>>5.5332-5.5620,0.0036刻み
702     !fc=1054.0>>>5.5368,5.5404
703     open(10,file='./data_out/G_theo_from_sine.dat',status='replace',action='write')
704     open(20,file='./data_out/P_theo_from_sine.dat',status='replace',action='write')
705     write(10,*) "fc,Q is estimated from sine mesurement"
706     write(10,*) "f,G(f)"
707     write(20,*) "fc,Q is estimated from sine mesurement"
708     write(20,*) "f,G(f)"
709     do i = 1,meshsize
710         f = exp(log(f_min)+ (log(f_max)-log(f_min))*(real(i,8)/real(meshsize,8)))
711         write(10,'(E20.13,1X)',advance='no') f
712         write(20,'(E20.13,1X)',advance='no') f
713         fc_in = 1053.2
714         Q_in = 5.5296
715         do
716             if (Q_in>5.5477) then
717                 exit
718             end if
719             write(10,'(E20.13,1X)',advance='no') G(f,fc_in,Q_in)
720             write(20,'(E20.13,1X)',advance='no') P(f,fc_in,Q_in)
721             Q_in = Q_in + 0.0036
722         end do
723         fc_in = 1053.6
724         Q_in = 5.5332
725         do
726             if (Q_in>5.5621) then
727                 exit
728             end if
729             write(10,'(E20.13,1X)',advance='no') G(f,fc_in,Q_in)
730             write(20,'(E20.13,1X)',advance='no') P(f,fc_in,Q_in)
731             Q_in = Q_in + 0.0036
732         end do
733         fc_in = 1054.0
734         Q_in = 5.5368
735         do
736             if (Q_in>5.5405) then
737                 exit
738             end if
739             write(10,'(E20.13,1X)',advance='no') G(f,fc_in,Q_in)
740             write(20,'(E20.13,1X)',advance='no') P(f,fc_in,Q_in)
741             Q_in = Q_in + 0.0036
742         end do
743         write(10,*)
744         write(20,*)
745     end do
746
747     close(10)
748     close(20)
749
750     !=====sinPhaseから求めるfc,Qの範囲=====
751
752     !=====共通集合に対する理論線の出力=====
753
754     fc_min = 1053.2
755     fc_max = 1054.0
756     Q_min = 5.53
757     Q_max = 5.56
758     meshsize = 10000
759     f_min = 0.1_8
760     f_max = 1.0e8_8
761     open(10,file='./data_out/G_for_common_area.dat',status='replace',action='write')
762     write(10,*) 'f/G(fc_min,Q_min)/G(fc_min,Q_max)/G(fc_max,Q_min)/G(fc_max,Q_max)'
763     do i = 1,meshsize
764         f = exp(log(f_min)+ (log(f_max)-log(f_min))*(real(i,8)/real(meshsize,8)))
765         write(10,*) f,G(f,fc_min,Q_min),G(f,fc_min,Q_max),G(f,fc_max,Q_min),G(f,fc_max,Q_max)
766     end do
767     open(10,file='./data_out/P_for_common_area.dat',status='replace',action='write')
768     write(10,*) 'f/P(fc_min,Q_min)/P(fc_min,Q_max)/P(fc_max,Q_min)/P(fc_max,Q_max)'
769     do i = 1,meshsize

```

```

770     f = exp(log(f_min)+ (log(f_max)-log(f_min))*(real(i,8)/real(meshsize,8)))
771     write(10,*) f,P(f,fc_min,Q_min),P(f,fc_min,Q_max),P(f,fc_max,Q_min),P(f,fc_max,Q_max)
772 end do
773
774
775
776 close(10)
777
778
779 !=====共通集合に対する理論線の出力=====
780
781 !=====Vout(t)について=====
782
783
784     !まずV0を求める。
785     open(10,file='./raw_data/V_time.dat',status='old',action='read')
786
787     !ファイルサイズを取得する
788     filesize=0
789     read(10,'(A)')
790     do
791         read(10,'(A)',iostat=io)
792         if(is_iostat_end(io)) then
793             exit
794         end if
795         filesize=filesize+1
796     end do
797     allocate(Vin(filesize),Vout_data(filesize),time(filesize))
798     rewind(10)
799     read(10,'(A)')
800     do i = 1,filesize
801         read(10,*) temp1,Vin(i),Vout_data(i),time(i)
802     end do
803     close(10)
804
805     V_offset = 0.0
806     V0_est = 0.0
807     j=0
808     k=0
809     do i = 1,size(Vin)
810         if (Vin(i) < 0.5) then
811             V_offset = V_offset + Vin(i)
812             j = j+1
813         end if
814         if (Vin(i)>0.9) then
815             V0_est = V0_est + Vin(i)
816             k=k+1
817         end if
818     end do
819
820     V_offset = V_offset/real(j,8)
821     V0_est = V0_est/k
822     V0_est = V0_est-V_offset
823     write(*,*) 'V_0:',V0_est
824     t_min = 0.0_8
825     t_max = 0.05_8
826
827     fc_in = 1053.6
828     Q_in = (5.5332+5.5620)/2.0
829
830     open(10,file='./data_out/Vout_time.dat',status='replace',action='write')
831     write(10,*) "t,V_out(f)"
832     do i = 1,meshsize
833         t_test = t_min + (t_max-t_min)*real(i,8)/real(meshsize,8)
834         write(10,*) t_test,Vout(fc_in,Q_in,V0_est,t_test),upperenvelope(fc_in,Q_in,V0_est,t_test),lowerenvelope(fc_in
            ,Q_in,V0_est,t_test)
835     end do
836     close(10)
837
838
839     !f_c,Qについて最小二乗推定
840     meshsize2 = 1000
841     fc_min = 1000
842     fc_max = 1200
843     Q_min = 4.5
844     Q_max = 6.3
845     allocate(E_func_vect(meshsize2**2),Q_test_vect(meshsize2**2),fc_test_vect(meshsize2**2))
846
847     l=0
848
849     !$omp parallel default(none) shared(l,meshsize2,fc_min,fc_max,Q_min,Q_max,time,V0_est,Vout_data, &
850     !$omp fc_test_vect,Q_test_vect,E_func_vect) &
851     !$omp private(j,k,i,fc_test,Q_test,E_func,idk)
852
853     !$omp do collapse(2) schedule(dynamic)
854     do j = 1,meshsize2
855
856         do k = 1,meshsize2
857             fc_test = fc_min + (fc_max-fc_min)*(real(j,8)/real(meshsize2,8))
858             Q_test = Q_min + (Q_max-Q_min)*(real(k,8)/real(meshsize2,8))
859             E_func=0.0
860
861             do i = 1,size(time)
862                 if (time(i) >= 0.0_8) then
863                     E_func = E_func + (Vout(fc_test,Q_test,V0_est,time(i))-Vout_data(i))**2.0_8
864                 end if
865             end do
866             idk = (j-1)*meshsize2 + k

```

```

867         fc_test_vect(idk) = fc_test
868         Q_test_vect(idk) = Q_test
869         E_func_vect(idk) = E_func
870
871         !$omp atomic update
872         l=l+1
873
874         if (omp_get_thread_num()==0) then
875             write(*, '(I2,Ix,f5.2,A)') omp_get_thread_num(),real(1,8)*100.0/real(meshsize2**2,8), '%'
876         end if
877
878     end do
879 end do
880 !$omp end do
881 !$omp end parallel
882
883 open(10,file='./data_out/Vout_time_leastsq.dat',status='replace',action='write')
884 write(10,*) 'fc,Q,E_val'
885 E_func_best = 999.0e10
886 do j=1,meshsize2
887     do k = 1,meshsize2
888         idk = (j-1)*meshsize2 + k
889         write(10,*) fc_test_vect(idk),Q_test_vect(idk),E_func_vect(idk)
890         if (E_func_vect(idk)<E_func_best) then
891             E_func_best = E_func_vect(idk)
892             Q_best =Q_test_vect(idk)
893             fc_best = fc_test_vect(idk)
894         end if
895     end do
896 end do
897 close(10)
898 write(*,*) "fcbest,Qbest,E_best",fc_best,Q_best,E_func_best
899
900 !fcbest,Qbest,E_best    1054.5999999999999          5.3262000875473019          9.8200780187732047E-003
901
902
903
904 tau = 2.0_8* 5.3262000875473019/(2.0_8*pi*1054.5999999999999)
905 write(*,*) 'tau',tau
906 open(10,file='./data_out/Vout_fit.dat',status='replace',action='write')
907 fc_in = 1054.5999999999999
908 Q_in = 5.3262000875473019
909 t_min = 0.0_8
910 t_max = 0.05_8
911 write(10,*) "t,Vout(t),upper_envelope(t),lower_envelope(t)"
912 do i = 1,meshsize
913     t_test = t_min + (t_max-t_min)*real(i,8)/real(meshsize,8)
914     write(10,*) t_test,Vout(fc_in,Q_in,V0_est,t_test),upperenvelope(fc_in,Q_in,V0_est,t_test),lowerenvelope(fc_in
915         ,Q_in,V0_est,t_test)
916 end do
917 close(10)
918
919
920
921 !=====Vout(t)について=====
922
923
924
925
926
927 stop
928 contains
929
930 real(8) function fc(R2_in,R3_in,C1_in,C4_in)
931     implicit none
932     real(8),intent(in) :: R2_in,R3_in,C1_in,C4_in
933     fc = (1.0_8/(2.0_8*pi))*((C1_in*C4_in*R2_in*R3_in)**(-0.5_8))
934 end function
935
936 real(8) function Q(R2_in,R3_in,C1_in,C4_in)
937     implicit none
938     real(8),intent(in) :: R2_in,R3_in,C1_in,C4_in
939     Q = sqrt(C1_in*C4_in*R2_in*R3_in)/(C1_in*(R2_in+R3_in))
940 end function
941
942 real(8) function G(f_in,fc_in,Q_in)
943     implicit none
944     real(8),intent(in) :: f_in,fc_in,Q_in
945     G = ((1.0_8-(f_in/fc_in)**2.0)**2.0 + (f_in/(Q_in*fc_in)**2.0)**(-0.5_8))
946 end function
947
948 real(8) function P(f_in,fc_in,Q_in)
949     implicit none
950     real(8),intent(in) :: f_in,fc_in,Q_in
951     if((f_in/(Q_in*fc_in))/(1.0_8 - (f_in/fc_in)**2.0_8) >= 0.0_8) then
952         P = -atan((f_in/(Q_in*fc_in))/(1.0_8 - (f_in/fc_in)**2.0_8))
953     else
954         P = -(atan((f_in/(Q_in*fc_in))/(1.0_8 - (f_in/fc_in)**2.0_8)) + pi)
955     end if
956 end function
957
958 real(8) function Vout(fc_in,Q_in,V0_in,t_in)
959     implicit none
960     real(8) :: A,B,omega_c,term1,term2,term3
961     real(8),intent(in) :: fc_in,Q_in,V0_in,t_in
962
963     omega_c = 2.0_8*pi*fc_in

```

```

964 A = -1.0_8*V0_in/(sqrt(4.0_8*(Q_in**2.0_8)-1.0_8))
965 B = -1.0_8*V0_in
966 term1 = A*sin(sqrt(1.0_8-(1.0_8/(4.0_8*Q_in**2.0_8)))*omega_c*t_in)
967 term2 = B*cos(sqrt(1.0_8-(1.0_8/(4.0_8*Q_in**2.0_8)))*omega_c*t_in)
968
969 term3 = exp(-1.0_8*omega_c*t_in/(2.0_8*Q_in))*(term1+term2)+V0_in
970
971 Vout=term3
972
973 end function
974
975 real(8) function upperenvelope(fc_in,Q_in,V0_in,t_in)
976 implicit none
977 real(8) :: tau,term1,term2
978 real(8),intent(in) :: fc_in,Q_in,V0_in,t_in
979
980 tau = 2.0_8* Q_in/(2.0_8*pi*fc_in)
981 term1 = sqrt(4.0_8*(Q_in**2.0_8)/(4.0_8*(Q_in**2.0_8)-1.0_8))
982 term2 = V0_in*(1.0_8+term1*exp(-1.0_8*t_in/tau))
983
984 upperenvelope = term2
985
986 end function
987
988 real(8) function lowerenvelope(fc_in,Q_in,V0_in,t_in)
989 implicit none
990 real(8) :: tau,term1,term2
991 real(8),intent(in) :: fc_in,Q_in,V0_in,t_in
992
993 tau = 2.0_8* Q_in/(2.0_8*pi*fc_in)
994 term1 = sqrt(4.0_8*(Q_in**2.0_8)/(4.0_8*(Q_in**2.0_8)-1.0_8))
995 term2 = V0_in*(1.0_8-term1*exp(-1.0_8*t_in/tau))
996
997 lowerenvelope = term2
998
999 end function
1000
1001 end program

```