

小野寺研インターン

澤 孝晃

2018 年 7 月 12 日

1 序論

トランジスタの微細化によりゲート長が 7nm のデバイスが製造可能となっており、 μm 以下の寸法になってからは電子や分子の量子的な揺らぎが顕著になり、大量のトランジスタからなる集積回路のチップにおいて、同じ寸法のトランジスタ特性間にミスマッチが起きるようになった。ここで、素子同士の特性のミスマッチが回路の性能と信頼性にどう影響を与えるのかが重要である。製造時に発生する特性のミスマッチは静的ばらつきと認識されている一方、動作時にトランジスタの特性が時間によって変動することがありノイズや経年劣化として認識されている。ノイズの主要成分は熱雑音であり白色雑音とも呼ばれる。

主要成分の他に、結晶と結晶の界面に置いて、分子間結合の分子間結合の切断による欠陥が存在する。界面に存在する欠陥に自由キャリアの捕獲と放出が繰り返されると電流の時間変動が発生する。このような変動をフリッカーノイズと呼び、低い周波数領域に置いてパワー密度が大きいことが特徴である。MOS トランジスタの場合、シリコンと酸化膜の間の界面に存在する欠陥が原因となっている。トランジスタの寸法が μm 以下になってから、各種欠陥へのキャリアのトラップによる影響が顕著に現れ始めた。その理由として、欠陥 1 つへのキャリアのトラップの相対的な影響が顕著にあらわれたことと、製造技術の進歩により各種欠陥の数が減少してきており、あるトランジスタに欠陥が存在する確率が減少してきたことがある。従って、1 つの欠陥がチャンネルに流れる電流にどう影響されるか正確に見積もる手法が求められるようになった。相対的に大きな電流変動は、1 つの欠陥への 1 つの欠陥へのキャリアの捕獲と放出の減少により発生するため離散的な変動として観測される。また、その変動が起きる時間間隔は固定ではなく大きくばらつく。

ランダムテレグラフノイズ (RTN) は界面に存在するトラップにキャリアの捕獲・放出によりデバイスの閾値電圧が変動する現象である。閾値電圧だけでなく移動度が変化する説もある。RTN を特徴付けるパラメータは、トラップあたりのオン電流の変化量、トラップあたりの時定数、トラップの数の 3 種類がある。トラップあたりの RTN パラメータを評価するのではなく、RTN による合計量の変動を評価し、その変動量の分布をモデル化することにより回路設計に活かすことを目標にする。

2 方法

今回のインターンでは、微細デバイスに発生する RTN をリング発振回路を用いて測定し、RTN が回路性能の最悪分布に与える影響を評価する。測定対象である RTN は統計的な性質を持っており、各種統計的な性質をモデル化することが目的である。統計的な評価を行うために、同じ寸法の大量のデバイスの電流特性の時間変化を測定し、デバイス毎に観測される電流値変動の振幅および捕獲・放出するまでの平均時間などを評価

する。

今回の測定環境では、FPGA ボードと PC を使って、スロット 0 からスロット 71 のリングオシレータ (RO) を、セクション 0 からセクション 383 まで 384 個のセクションの発信周波数を測定する。各セクション 10 秒ずつ測定するので、合計 1 時間程度かかる。また、RO の電源は 0.5V に設定する。また、以下の表 1 に示されている RO について測定を行なった。ゲート幅や負荷容量が異なっていて、段数は特に指定されていない限り 7 段である。

表 1 各回路の構造

Index	Cell Name	Slot number	Description
Section Left			
1	FM.RIGHT_RING7_P140_N140_MAHFUZ	0-1, 28-35	Balanced, no extra load
2	FM.LEFT_RING7_P655X16_N140_MAHFUZ	2	N skewed
3	FM.LEFT_RING7_P655X16_N280_MAHFUZ	4	N skewed
4	FM.LEFT_RING7_P655X16_N560_MAHFUZ	6	N skewed
5	FM.LEFT_RING7_P655X16_N1120_MAHFUZ	8	N skewed
6	FM.LEFT_RING7_P655X16_N2240_MAHFUZ	10	N skewed
7	FM.LEFT_RING7_P140_N420X16_MAHFUZ	12	P skewed
8	FM.LEFT_RING7_P280_N420X16_MAHFUZ	14	P skewed
9	FM.LEFT_RING7_P560_N420X16_MAHFUZ	16	P skewed
10	FM.LEFT_RING7_P1120_N420X16_MAHFUZ	18	P skewed
11	FM.LEFT_RING7_P2240_N420X16_MAHFUZ	20	P skewed
12	FM.LEFT_RING7_LE5O_MK61INVXL1_NAKAI	25	Medium size
13	FM.LEFT_RING7_LE5O_MK61INVXT11_NAKAI	26	Large size
Section Right			
14	FM.RIGHT_RING7_P140_N140_MAHFUZ	36, 41-44, 49-71	Balanced, no extra load
15	FM.RIGHT_RING7_P280_N280_MAHFUZ	37	Balanced, no extra load
16	FM.RIGHT_RING7_P560_N560_MAHFUZ	38	Balanced, no extra load
17	FM.RIGHT_RING7_P1120_N1120_MAHFUZ	39	Balanced, no extra load
18	FM.RIGHT_RING7_P2240_N2240_MAHFUZ	40	Balanced, no extra load
19	FM.RIGHT_RING7_P140_N140_LOADXC1_MAHFUZ	46	Extra load (small)
20	FM.RIGHT_RING7_P140_N140_LOADXE1_MAHFUZ	47	Extra load (medium)
21	FM.RIGHT_RING7_P140_N140_LOADXL1_MAHFUZ	48	Extra load (large)

3 結果

以下の 5 種類の項目について結果を取得した。

- nFET のゲート幅を変化させた場合
- pFET のゲート幅を変化させた場合
- nFET と pFET のゲート幅を変化させた場合

- 段数を変化させた場合
- 負荷容量を変化させた場合

3.1 nFET のゲート幅を変化させた場合

発振周波数のヒストグラムを図 1 に示す。横軸は分周期にかけられた発振周波数で縦軸はその周波数を示した回数を表している。

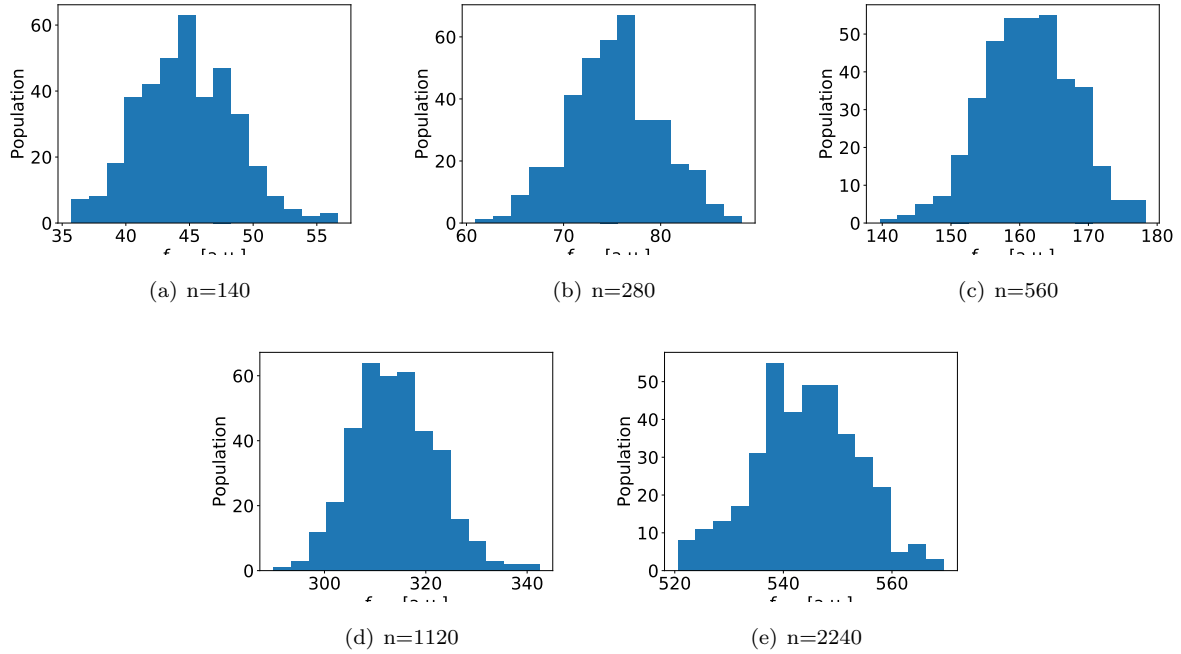


図 1 histogram in $p = 655$

分周した発振周波数の qqplot を図 2 に示す。qqplot とは得られたデータと理論分布を比較し、その類似度を調べるためのグラフである。横軸は各分周器にかけられた発振周波数の各セクションでの最大値と最小値の差を最大値で割った値である。縦軸は理論分位数となっている。また、対数正規分布における σ と μ を図 3 に示す。また、 a , b の値は横軸の値の対数を取った時の近似曲線の傾きと切片である。

図 2 と図 3 を見ると、nFET のゲート幅が大きくなればなるほど μ の値は小さくなり、 σ の値が大きくなっていることがわかる。また、 $\Delta F/F_{max}$ の値が大きい所と小さいところで対数正規分布に従わなくなっている。ここで、 $n=140$ の時の $\Delta F/F_{max}$ が大きい 2 点 ($s = 314, 192$) と小さい 2 点 ($s = 233, 276$) でのセクションにおける波形とタイムラグプロットを図 4, 5 に示す。

図 4 における $s=314, 192$ の時の結果を見ると何点かが離散的な値になっており、図 5 における $s=314, 192$ の時の結果を見ると相関がない値が何点かある。これは RTN による影響であると考えられる。 $\Delta F/F_{max}$ が小さい点 ($s = 233, 276$) において対数正規分布に従っていないが、図 4, 5 を考慮すると、白色雑音による影響があり RTN の影響のみを取り出すことができていると考えられる。

同様に、 $n=2240$ の時の $\Delta F/F_{max}$ が大きい 2 点 ($s = 92, 295$) と小さい 2 点 ($s = 205, 257$) でのセクションにおける波形とタイムラグプロットを図 6, 7 に示す。この図においても $\Delta F/F_{max}$ が大きい 2 点

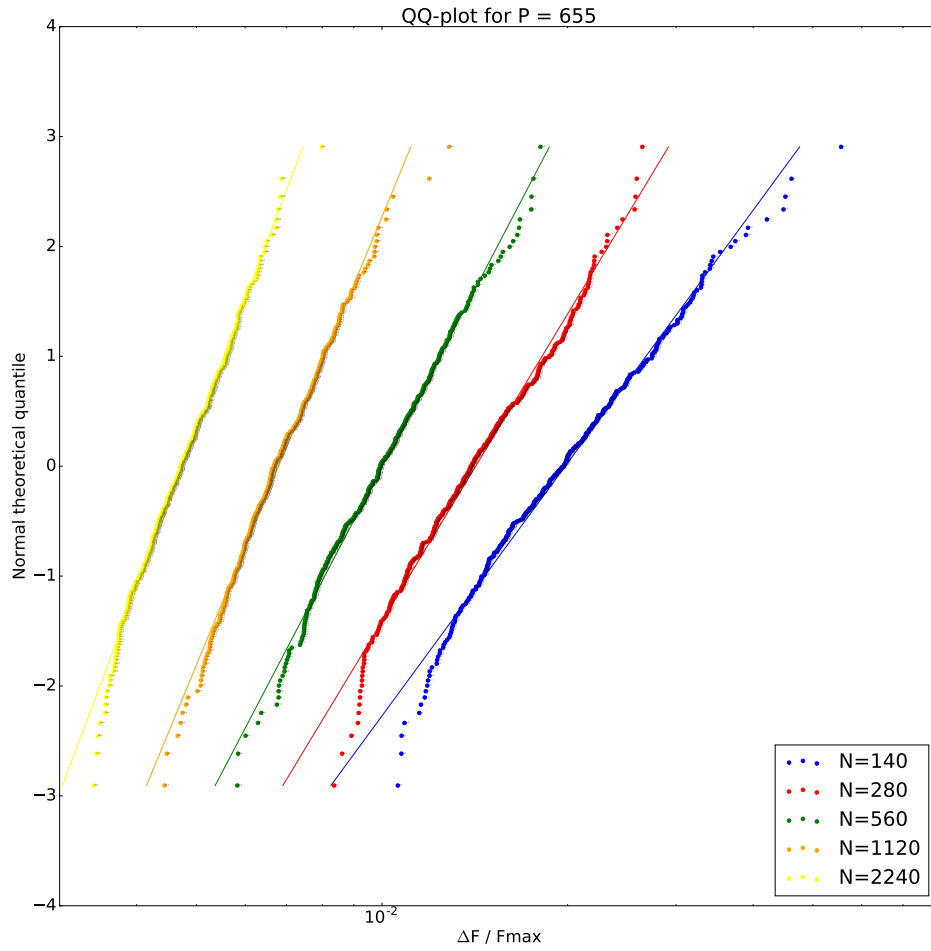


图 2 qqplot in $p = 655$

	a	b	σ	μ	y_min	y_max	x_min	x_max
P=140	3.472233	15.153213	0.287999	-4.364112	-2.905721	2.905721	0.005511	0.029385
P=280	4.221462	19.710795	0.236885	-4.669186	-2.905721	2.905721	0.004713	0.018669
P=560	5.260764	26.177423	0.190086	-4.975974	-2.905721	2.905721	0.003973	0.011991
P=1120	5.867112	31.045111	0.170442	-5.291379	-2.905721	2.905721	0.003068	0.008262
P=2240	6.732902	37.609672	0.148524	-5.585953	-2.905721	2.905721	0.002436	0.005774

图 3 slope intercept in $p = 655$

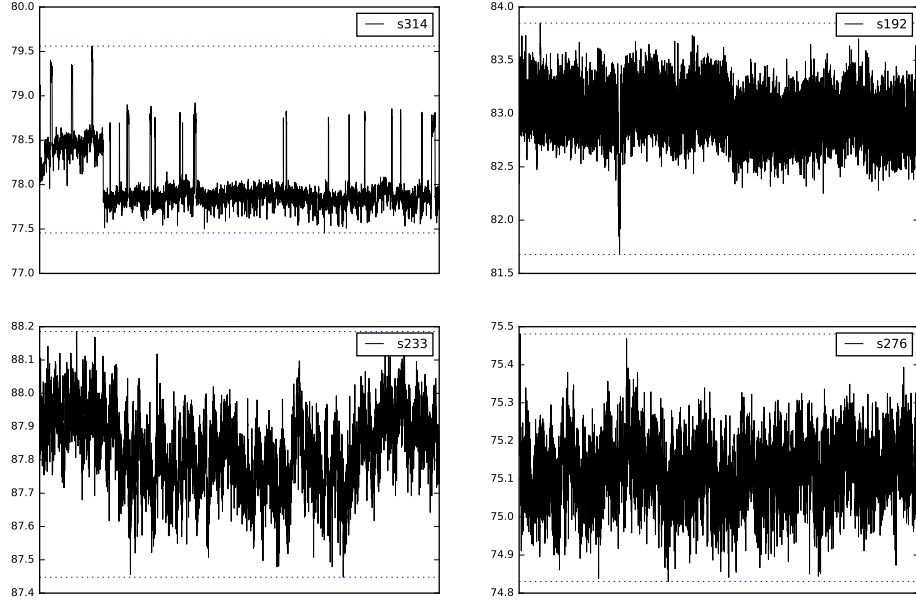


图 4 waveform in $p = 655$ and $n = 280$

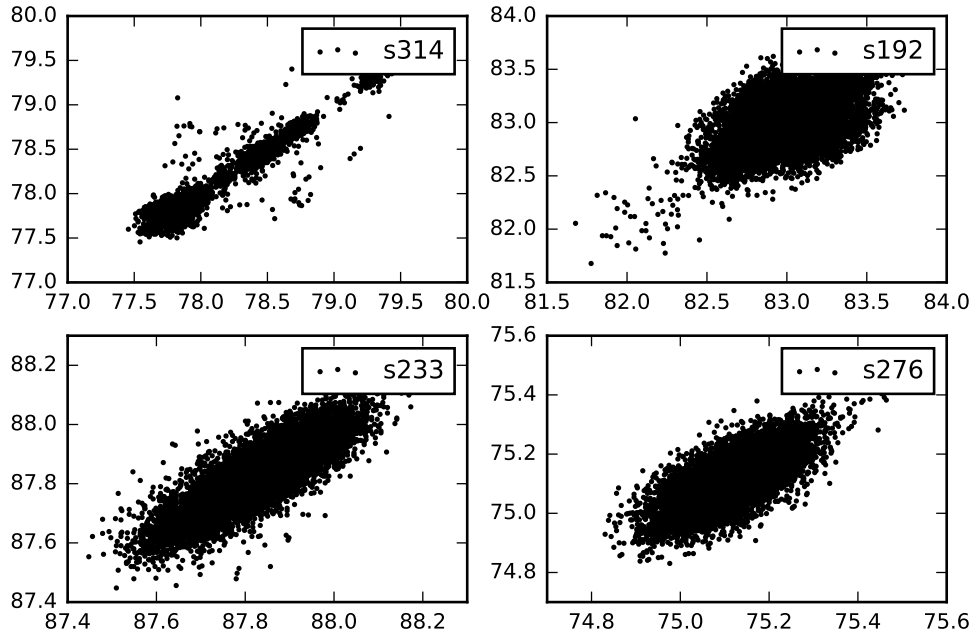


图 5 timelag plot in $p = 655$ and $n = 280$

($s = 92, 295$) で離散的なを取っていて $n=280$ の時と同じ現象が観測される。

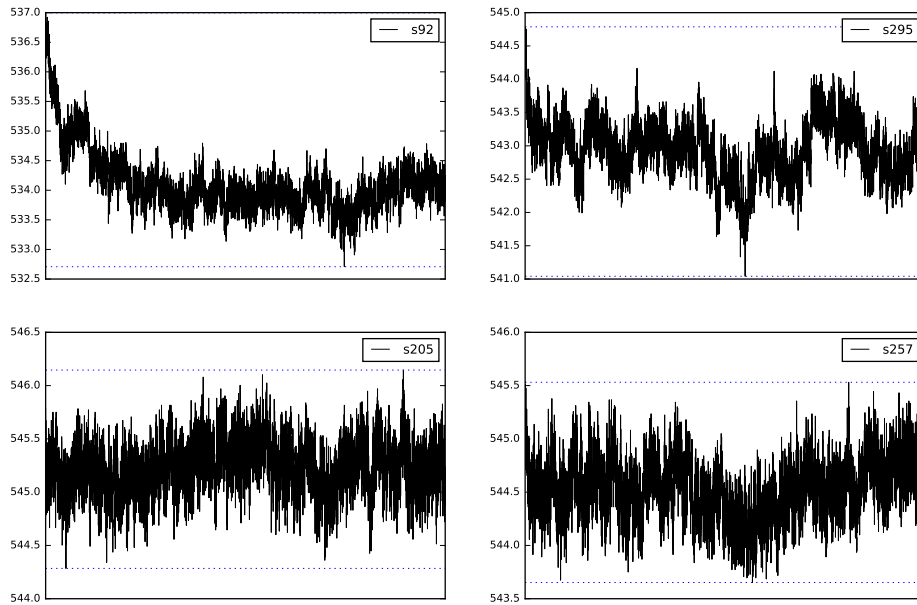


図 6 waveform in $p = 655$ and $n = 2240$

3.2 pFET のゲート幅を変化させた場合

発信周波数のヒストグラムを図 8 に示す。横軸は分周期にかけられた発振周波数で縦軸はその周波数を示した回数を表している。

分周した発振周波数の qqplot を図 9 に、対数正規分布における σ と μ を図 10 に示す。3.1 と比較するとほぼ同じ結果が見られる。

3.3 nFET と pFET のゲート幅を変化させた場合

発信周波数のヒストグラムを図 11 に示す。横軸は分周期にかけられた発振周波数で縦軸はその周波数を示した回数を表している。

分周した発振周波数の qqplot を図 12 に、対数正規分布における σ と μ を図 13 に示す。3.13.2 と比較すると、 $n, p = 140, 280$ の結果について $\Delta F/F_{max}$ の値が小さいところで対数正規分布からだいぶ離れてしまっている。これはゲート幅が小さいため白色雑音の影響を受けやすいからだと考えられる。

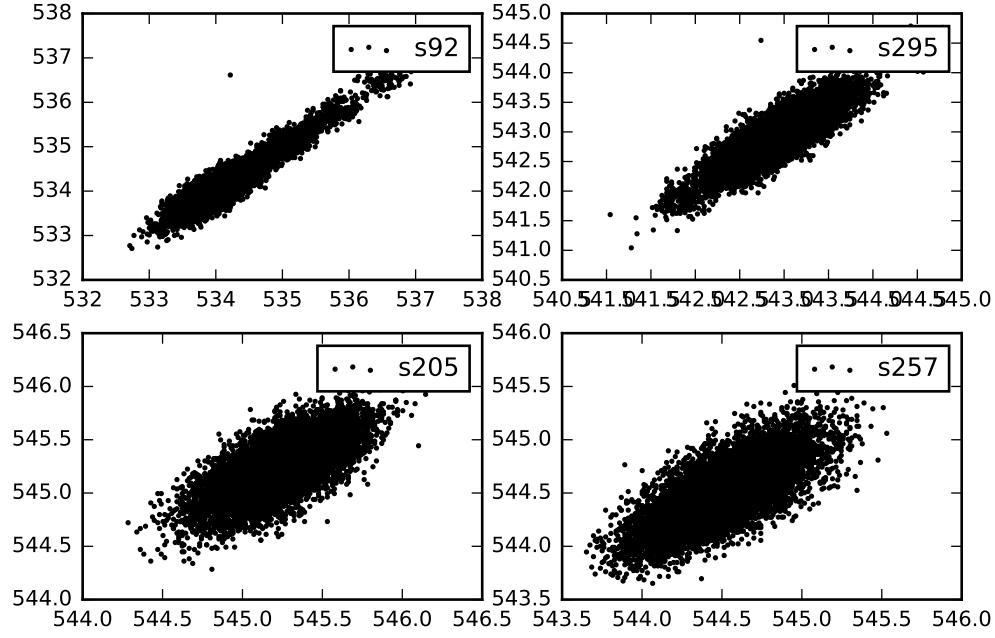


图 7 timelag plot in $p = 655$ and $n = 2240$

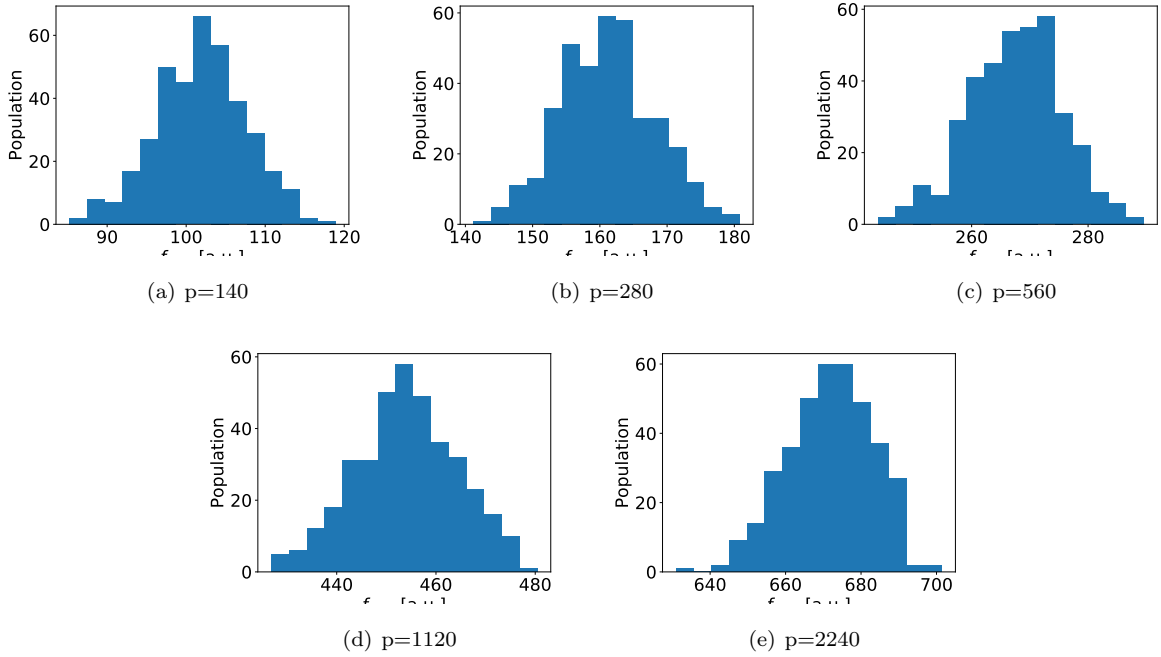


图 8 histogram in $n = 420$

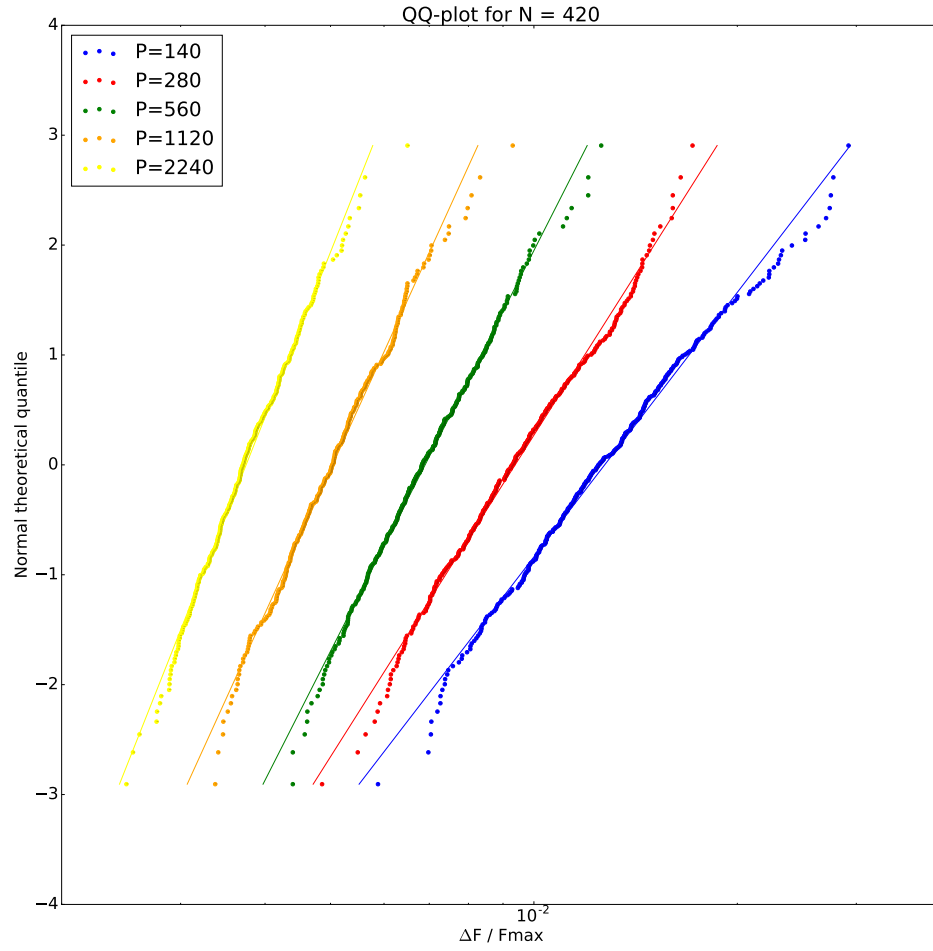


图 9 qqplot in $n = 420$

	a	b	σ	μ	y_min	y_max	x_min	x_max
N=140	3.319282	13.013758	0.301270	-3.920654	-2.905721	2.905721	0.008262	0.047585
N=280	4.034902	17.169270	0.247837	-4.255188	-2.905721	2.905721	0.006906	0.029158
N=560	4.655244	21.432948	0.214811	-4.604043	-2.905721	2.905721	0.005363	0.018688
N=1120	5.885608	29.374513	0.169906	-4.990906	-2.905721	2.905721	0.004150	0.011140
N=2240	6.475380	34.640114	0.154431	-5.349511	-2.905721	2.905721	0.003033	0.007441

图 10 slope intercept in $n = 420$

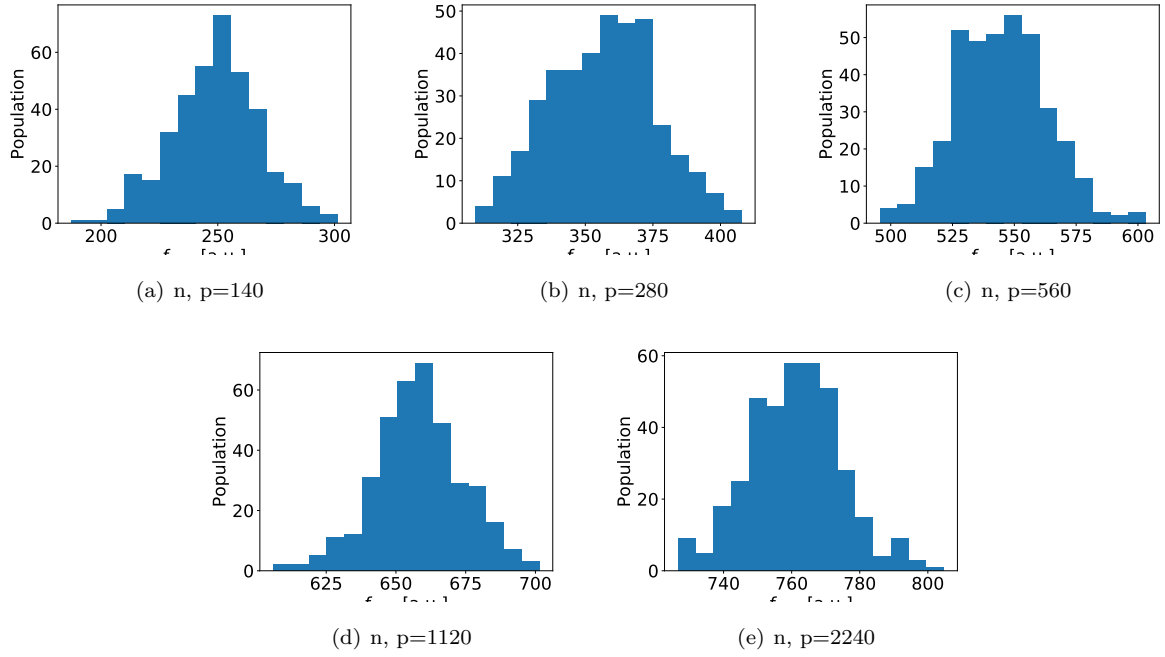


図 11 histogram in square

3.4 段数を変化させた場合

発信周波数のヒストグラムを図 17 に示す。横軸は分周期にかけられた発振周波数で縦軸はその周波数を示した回数を表している。

分周した発振周波数の qqplot を図 15 に、対数正規分布における σ と μ を図 16 に示す。図からわかるように段数が大きくなればなるほど対数正規分布に近づいていることがわかる。

3.5 負荷容量を変化させた場合

発信周波数のヒストグラムを図 14 に示す。横軸は分周期にかけられた発振周波数で縦軸はその周波数を示した回数を表している。

分周した発振周波数の qqplot を図 18 に、対数正規分布における σ と μ を図 19 に示す。負荷容量がある場合を比べたときに負荷容量の大きさにかかわらずほとんど同じ特性を示した。

load=large の時の $\Delta F/F_{max}$ が大きい 2 点 ($s = 193, 285$) と小さい 2 点 ($s = 282, 136$) でのセクションにおける波形とタイムラグプロットを図 20, 21 に、load=none の時の $\Delta F/F_{max}$ が大きい 2 点 ($s = 323, 283$) と小さい 2 点 ($s = 0, 36$) でのセクションにおける波形とタイムラグプロットを図 20, 21 に示す。どちらも $\Delta F/F_{max}$ が大きい 2 点にて RTN が発生していることが観測される。また負荷容量がない場合は負荷容量が大きい場合に比べて、RTN の発生頻度が高く、離散変動幅が大きいことがわかる。

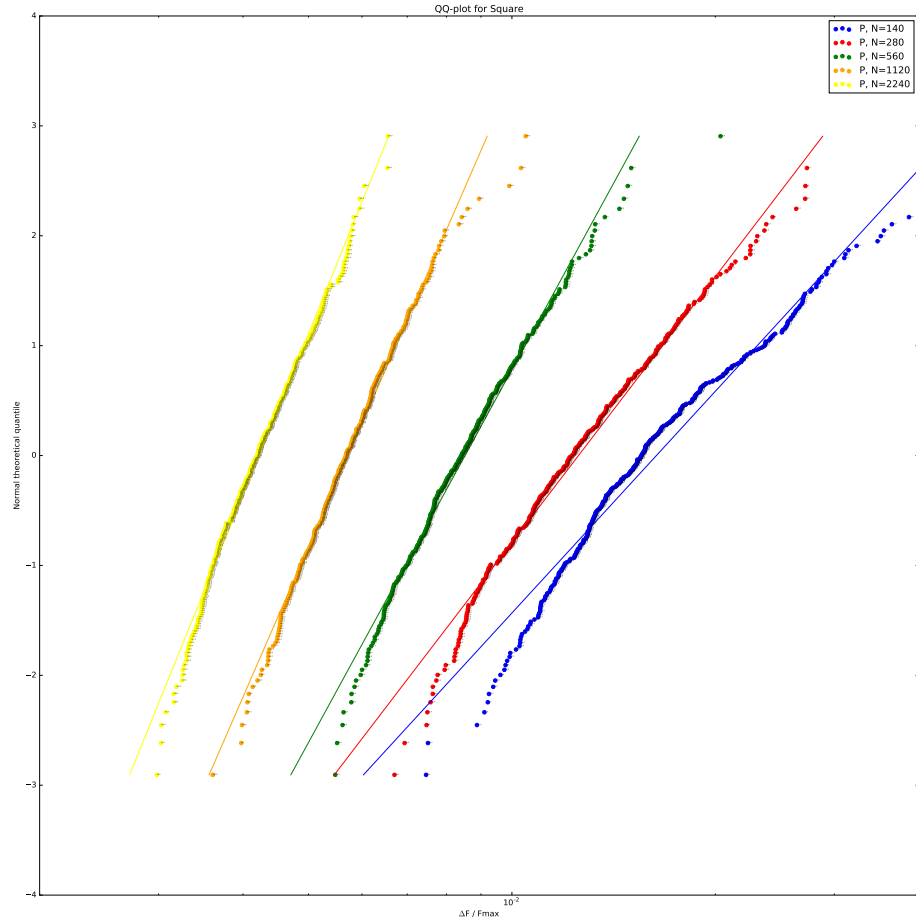


图 12 qqplot in square

	a	b	σ	μ	y_min	y_max	x_min	x_max
P, N=140	2.910539	11.970562	0.343579	-4.112833	-2.905721	2.905721	0.006029	0.044401
P, N=280	3.491771	15.287765	0.286388	-4.378227	-2.905721	2.905721	0.005460	0.028838
P, N=560	4.894339	23.320950	0.204318	-4.764882	-2.905721	2.905721	0.004708	0.015434
P, N=1120	6.131294	31.657139	0.163098	-5.163207	-2.905721	2.905721	0.003563	0.009193
P, N=2240	6.583520	35.990718	0.151894	-5.466790	-2.905721	2.905721	0.002717	0.006569

图 13 slope intercept in square

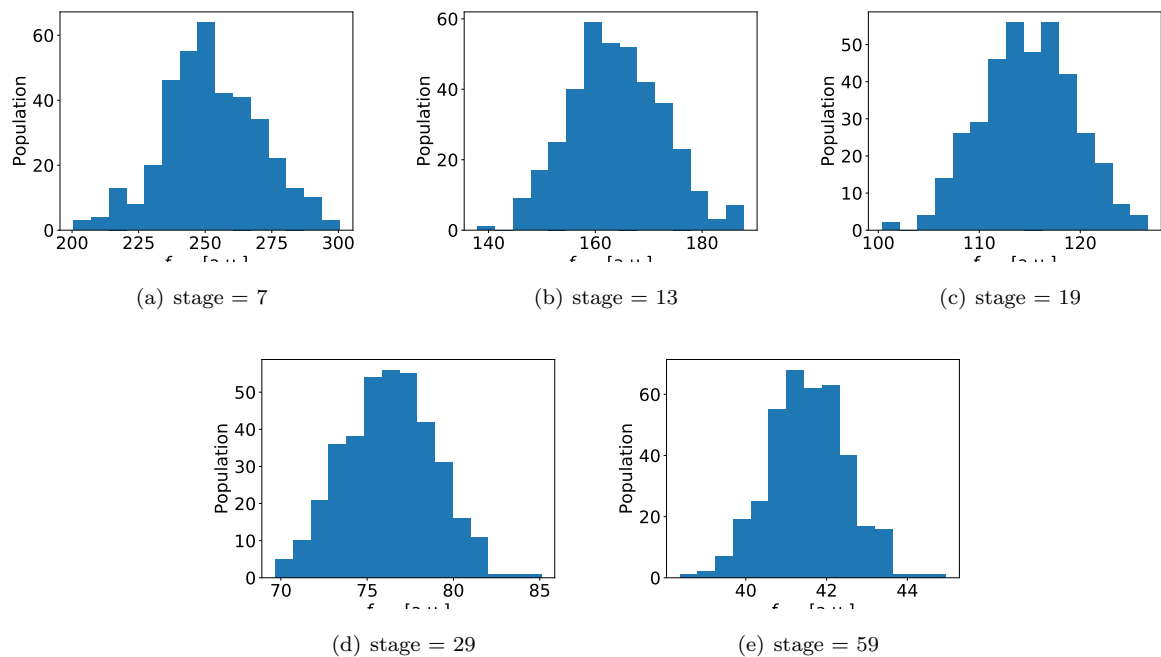


図 14 histogram in stage

4 作成したスクリプト

今回作成したスクリプトは ipynb ファイルであるので jupyter notebook を使って実行する。基本的には qqplot_wid_rtn.py と plot_rtn_waveform.py を改良して作成した。

- qqplot_wid_rtn_xscale.ipynb
 - mat ファイルを 4-5 種類選択して実行すれば、qqplot とそれに対する最小二乗法を用いた近似直線、 σ や μ などの値が得られる。
 - 各点にはセクション番号のアノテーションが振られているので波形を見るときに参照できる
- plot_rtn_waveform.ipynb
 - mat ファイルを 1 種類選択し、セクション番号を 4 つ指定すればその波形とタイムラグプロットを見ることができる

5 まとめ

今回のインターンで RTN の観測データを分析するスクリプトを書いてさまざまな評価を行いました。自分の研究では定式化やシミュレーションの実装などをメインで行なっているので、普段ではできない貴重な経験をさせていただきました。また、毎週評価結果について詳しく丁寧な助言をいただきありがとうございました。

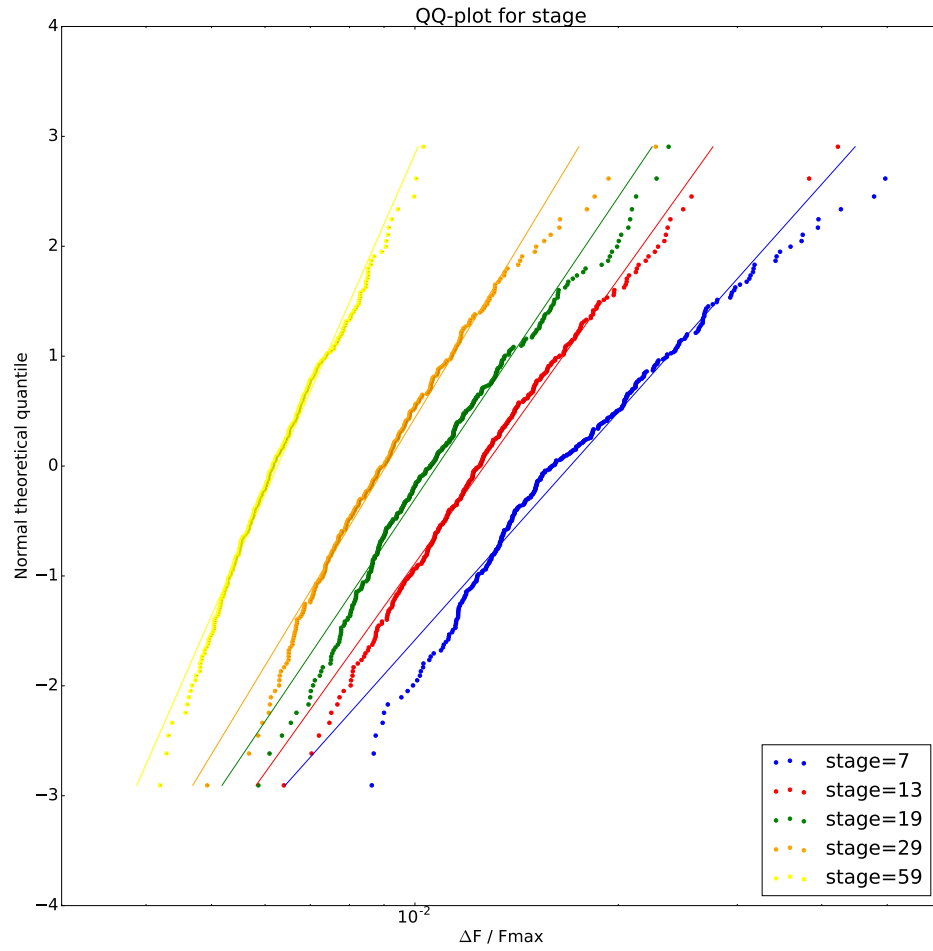
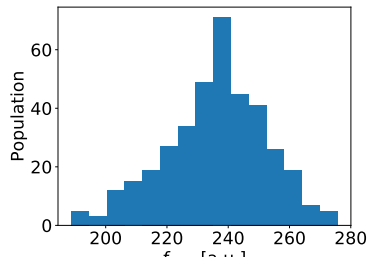


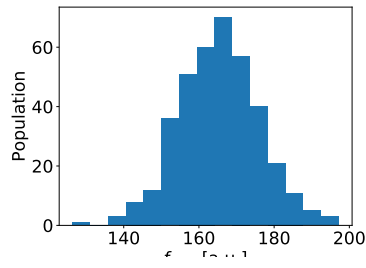
图 15 qqplot in stage

	a	b	σ	μ	y_min	y_max	x_min	x_max
stage=7	2.991813	12.195206	0.334246	-4.076193	-2.905721	2.905721	0.006426	0.044826
stage=13	3.732133	16.301643	0.267943	-4.367915	-2.905721	2.905721	0.005820	0.027616
stage=19	3.964356	17.957195	0.252248	-4.529663	-2.905721	2.905721	0.005182	0.022445
stage=29	4.415194	20.770548	0.226491	-4.704334	-2.905721	2.905721	0.004689	0.017488
stage=59	6.063930	30.766687	0.164910	-5.073721	-2.905721	2.905721	0.003876	0.010107

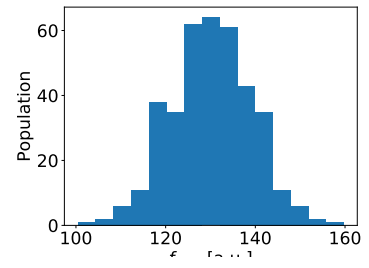
图 16 slope intercept in stage



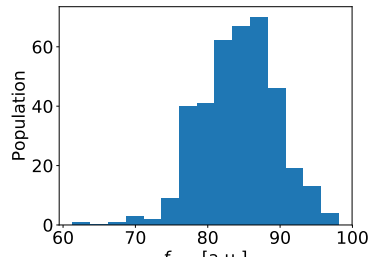
(a) load = none



(b) load = small



(c) load = medium



(d) load = large

图 17 histogram in load

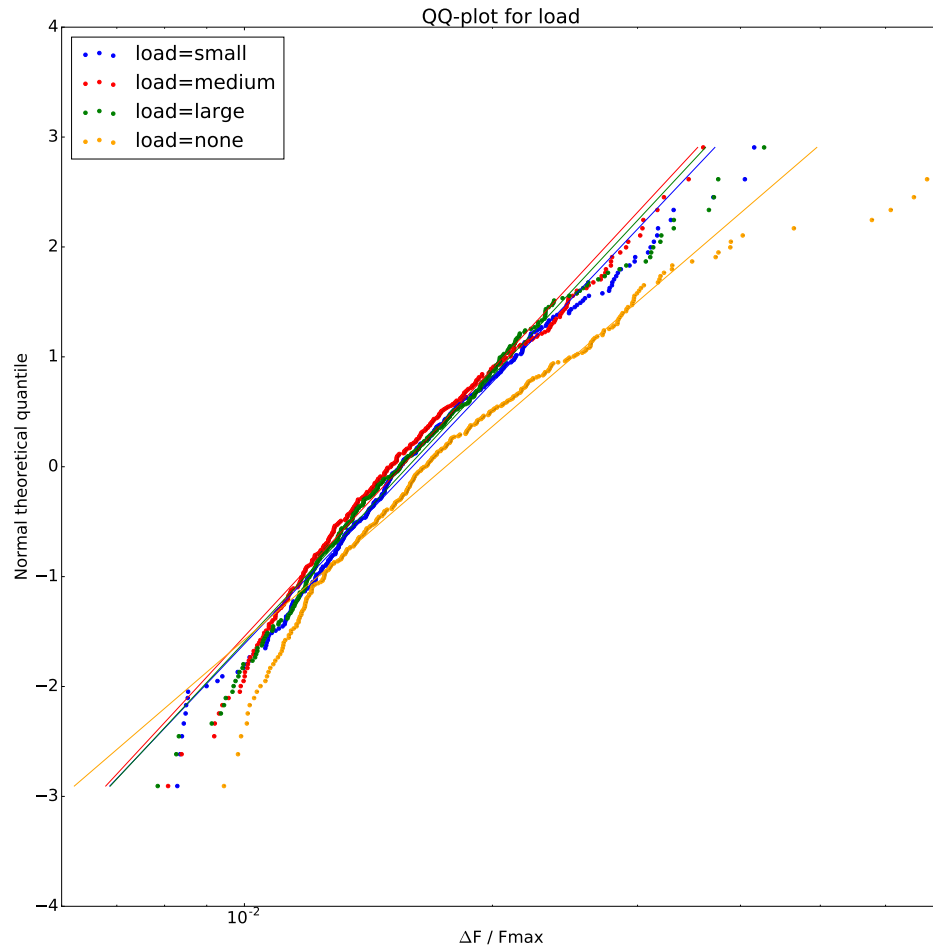


图 18 qqplot in load

	a	b	σ	μ	y_min	y_max	x_min	x_max
load=small	3.436520	14.213154	0.290992	-4.135915	-2.905721	2.905721	0.006864	0.037240
load=medium	3.512983	14.633828	0.284658	-4.165641	-2.905721	2.905721	0.006787	0.035490
load=large	3.493068	14.490517	0.286281	-4.148364	-2.905721	2.905721	0.006873	0.036279
load=none	2.800720	11.323411	0.357051	-4.043036	-2.905721	2.905721	0.006217	0.049512

图 19 slope intercept in load

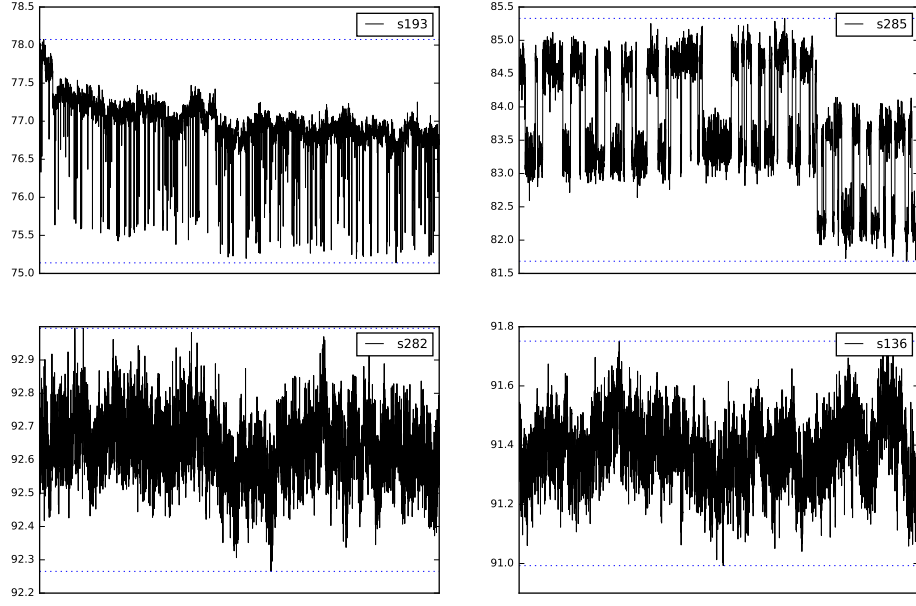


图 20 waveform in large load

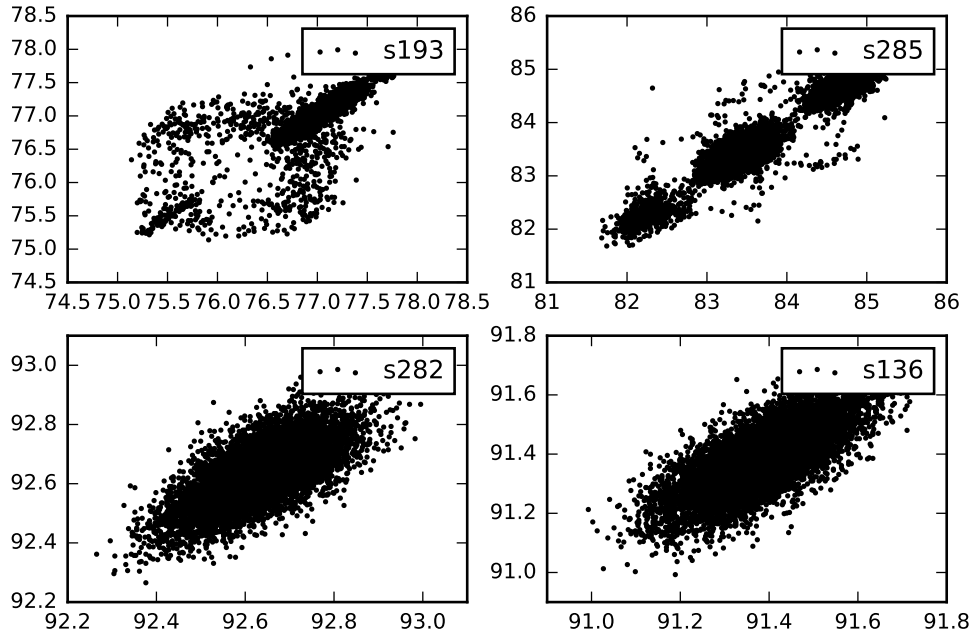


图 21 timelag plot in large load

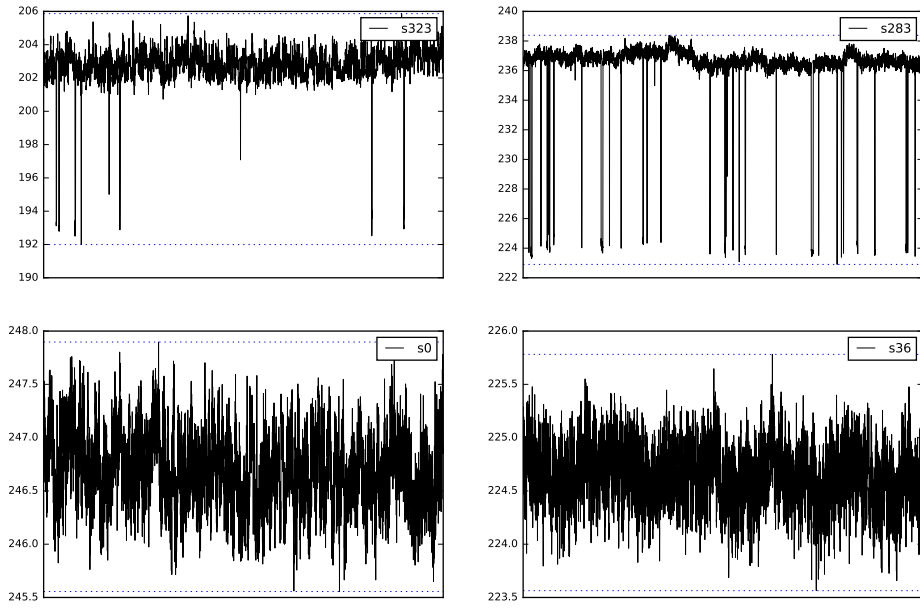


图 22 waveform in none load

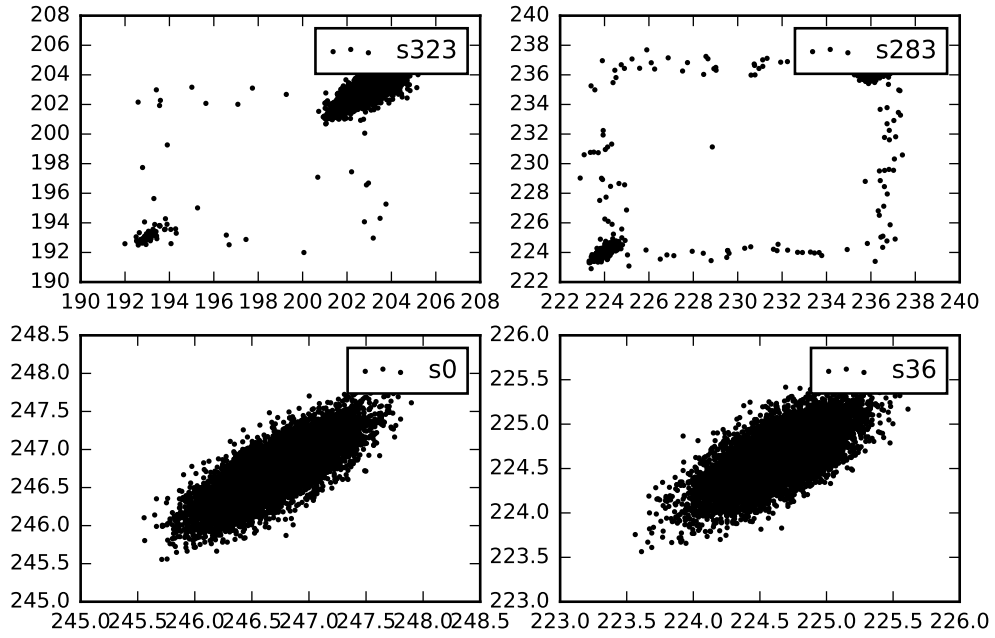


图 23 timelag plot in none load