

次世代放射光施設入射器における MTC.A.4 規格を用いたデジタル LLRF システムの評価

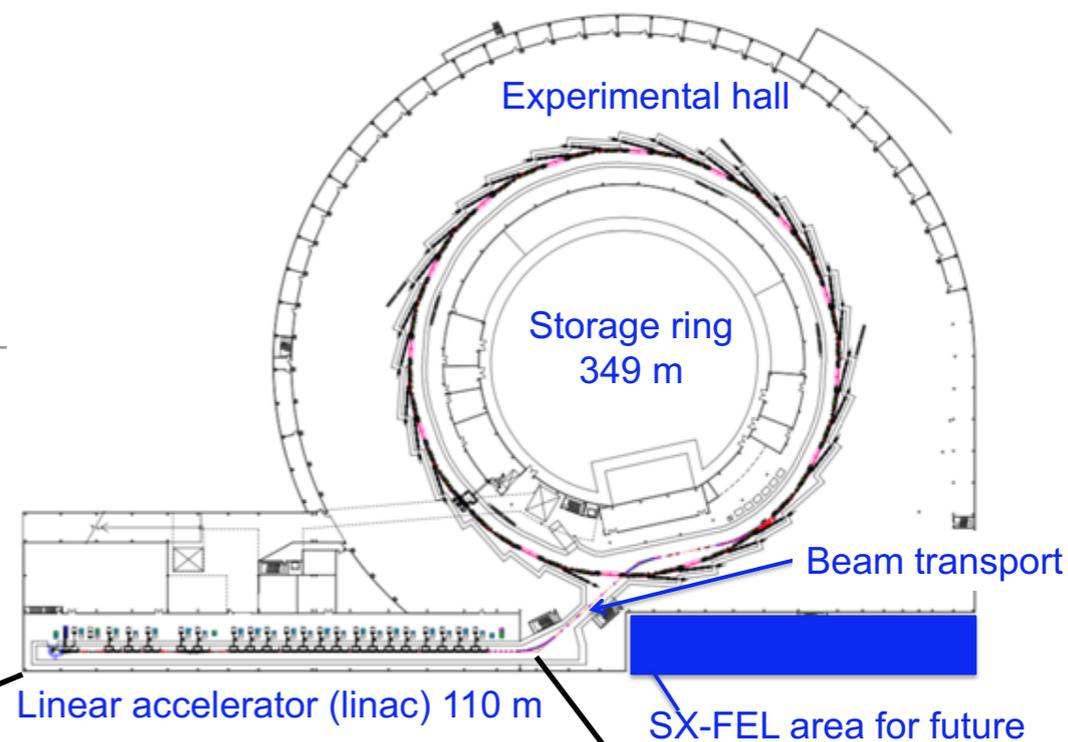
08/01/2019, 第16回日本加速器学会年会@京都大学

岩井瑛人, 細田直康, 福井達, 石井美保, 前坂比呂和, 出羽英紀, 大島隆, 稲垣 隆宏

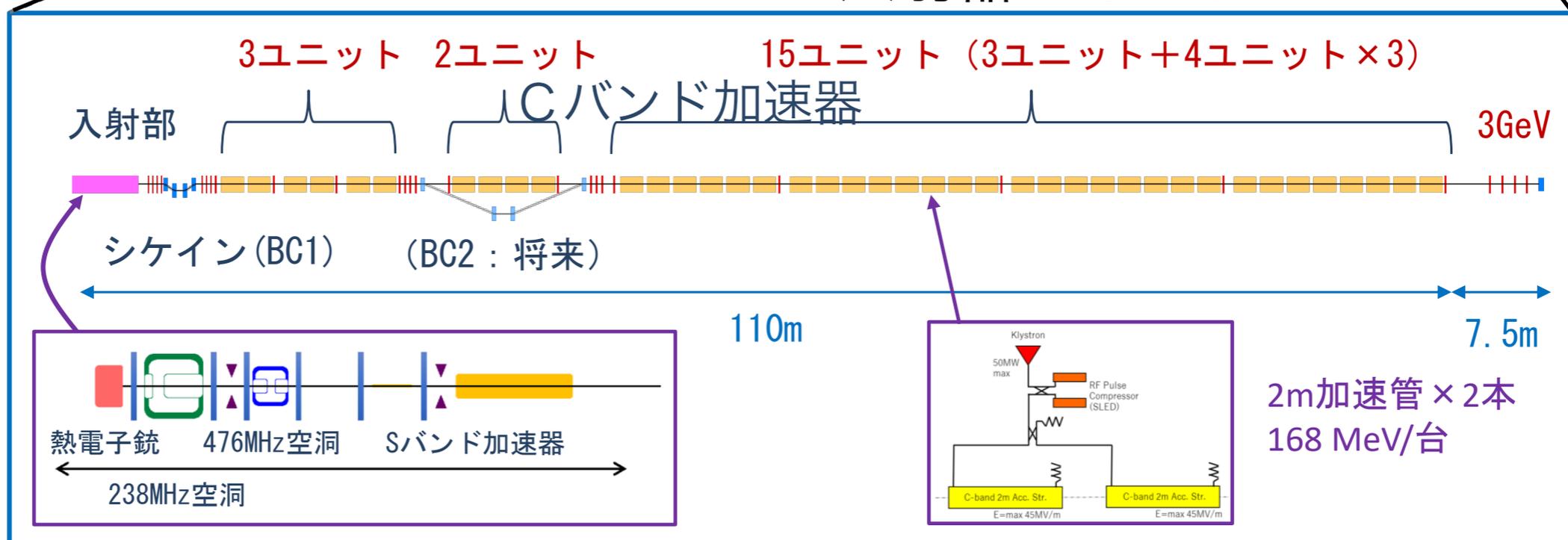
理研 放射光科学研究センター, 高輝度光科学研究センター, 量研機構 次世代放射光施設整備開発センター

次世代放射光施設と入射器

- 東北に計画中の次世代放射光施設
 - 3GeV, 1.1 nm rad(vert., natural), 400mA
 - 蓄積リング, 周長350m
 - 入射ライナック, 全長110m, Cバンド加速器20台
 - 2023年度ユーザー供用開始を目指す



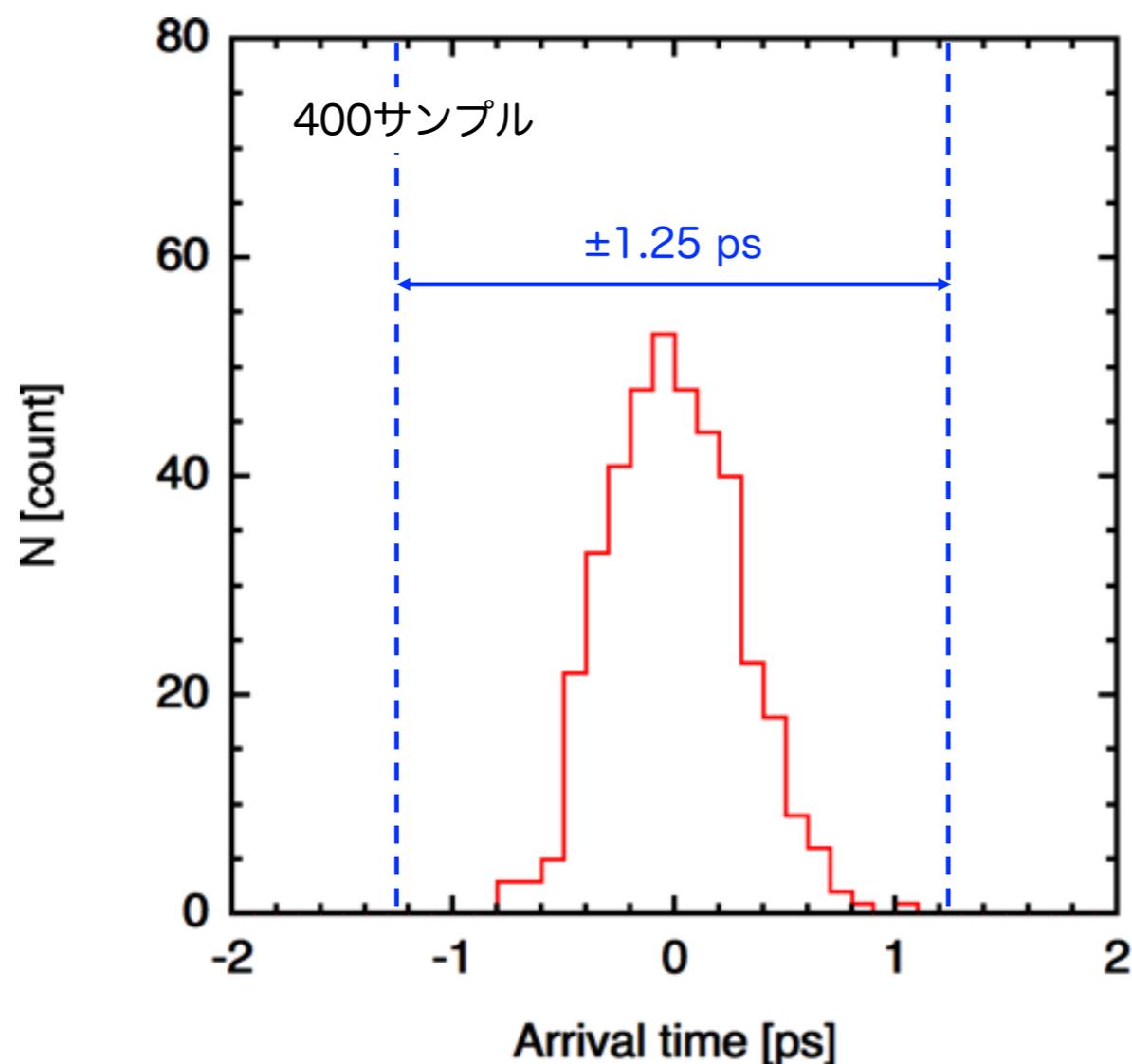
入射器ライナック



入射器ライナックに対する要求



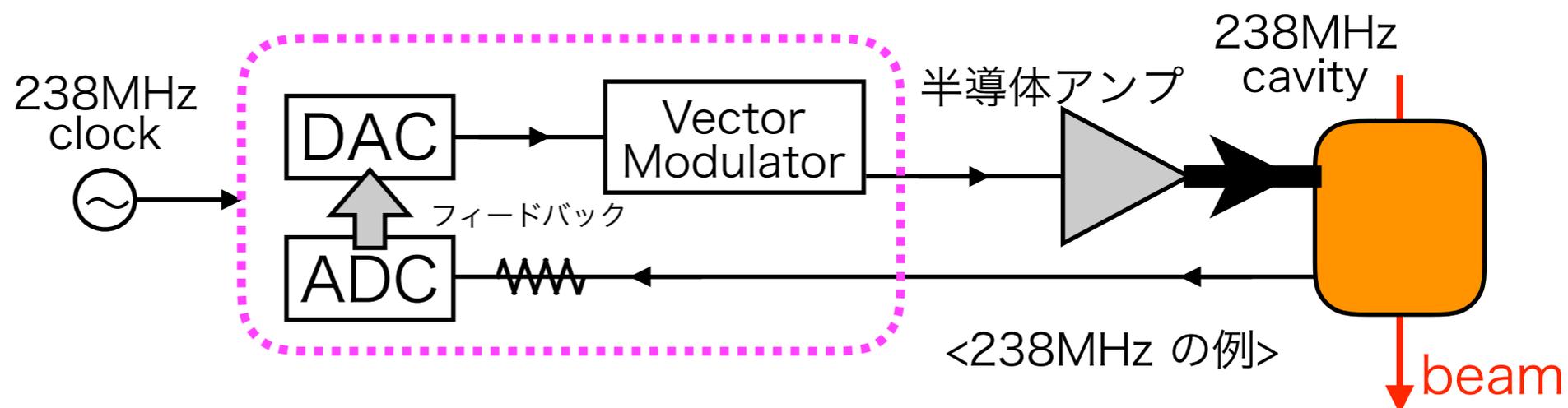
- 蓄積リングへの入射効率などの観点から、入射エネルギーのフラつきは $\pm 0.2\%$ 以内であることが望ましく、設計値として $\pm 0.1\%$ を目指す
- ➡これを達成するために、入射器の各コンポーネントには感度に応じて、振幅と位相に対する要求値（暫定）が設定されている



要求値(暫定)	振幅	位相
238MHz	$\pm 0.08\%$	$\pm 0.5^\circ$ (クレスト)
476MHz	$\pm 0.15\%$	$\pm 0.2^\circ$
S-band	$\pm 0.25\%$	$\pm 0.5^\circ$
C-band	$\pm 0.1\%$	$\pm 2.5^\circ$ (クレスト)

LLRFシステム概要

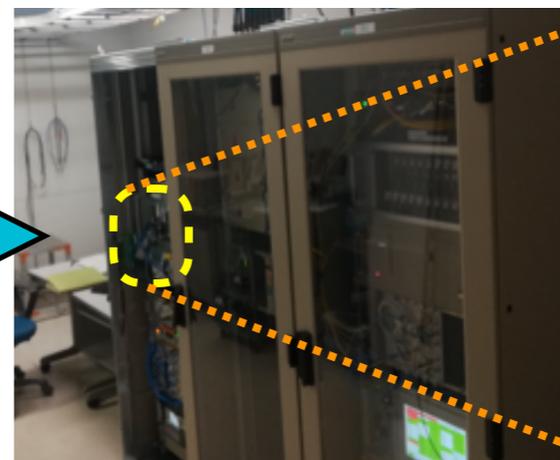
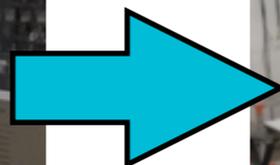
- ・ ビームが感じるRF信号の振幅, 位相を高精度に制御する
 - DACで IQ vector modulatorを制御して大電力増幅器への励振RF信号を制御
 - クライストロン, 加速管に実際に印加したRF信号をADCでモニターする
 - 設定値からのズレを測定し、DAC出力にフィードバックを掛ける



➡ 高機能, 高速, 省スペース, 省コストな MTCA.4 規格のモジュールを用いて構築

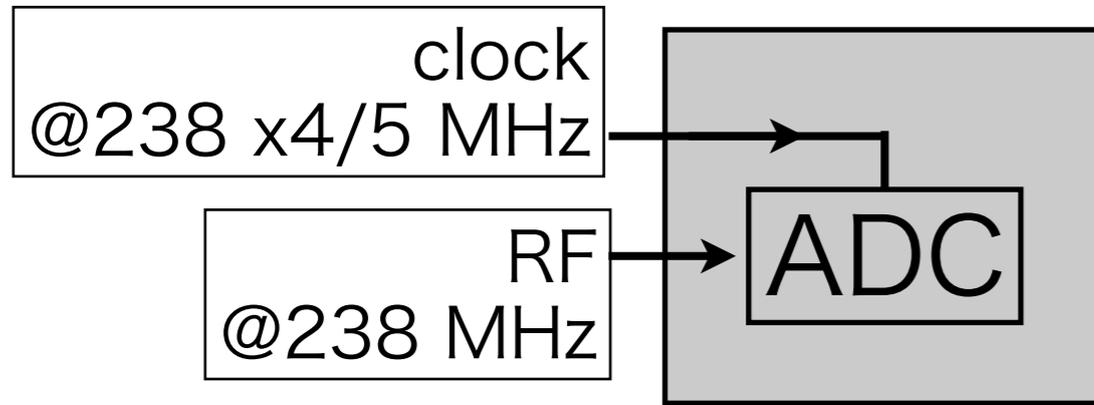
▶ SACLA: VME-ADC x4, IQ-det(3U), IQ-mod(2U) → AMC+RTM x1

▶ SPring-8:

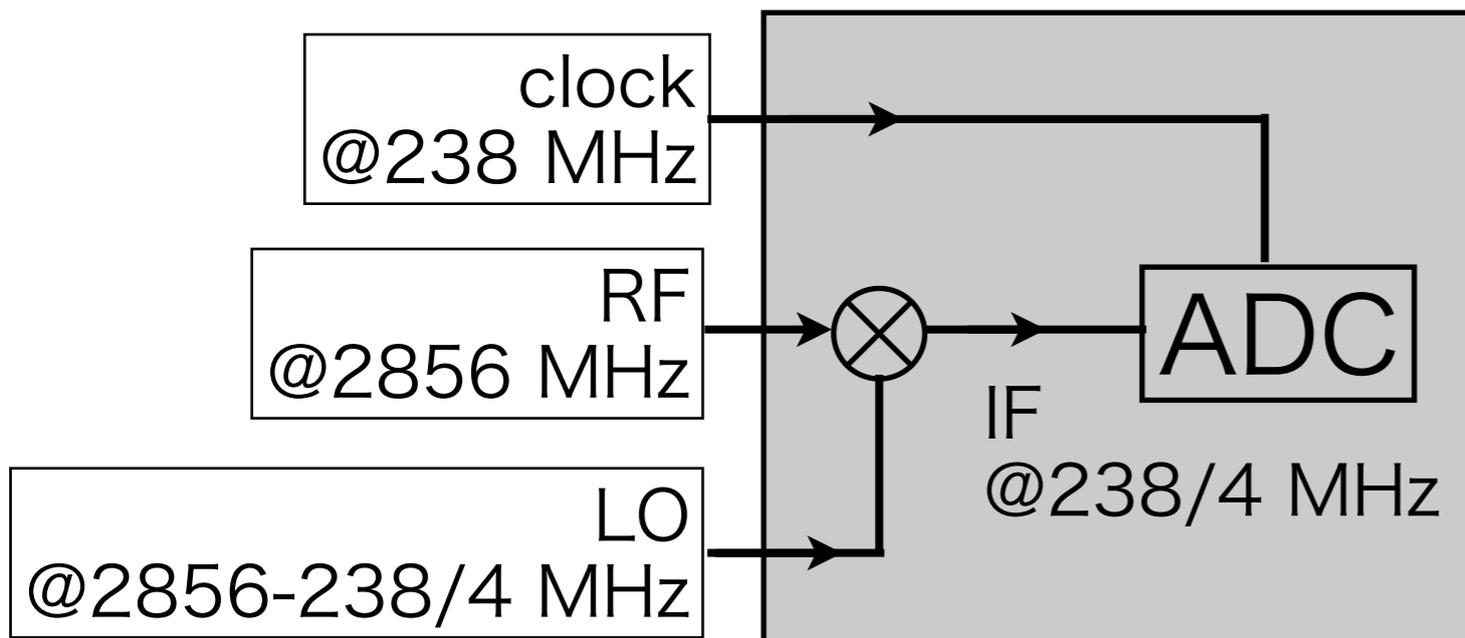


RF信号の測定方法

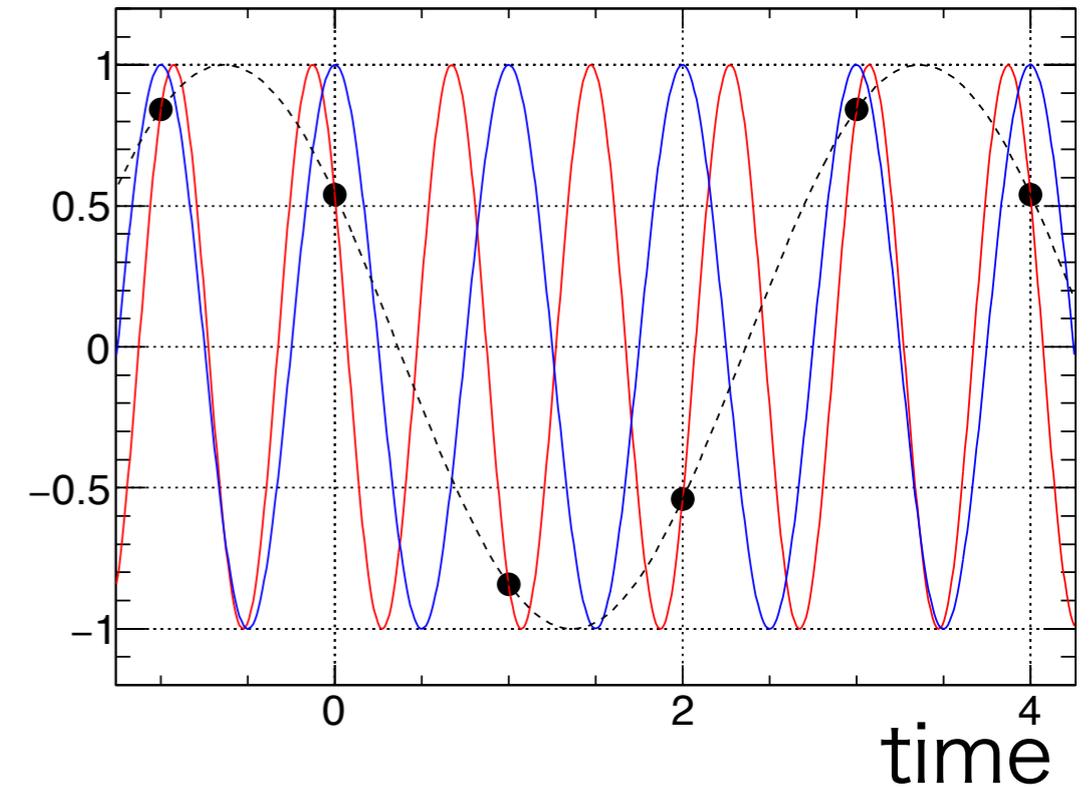
・ アンダーサンプリング法



・ ダウンコンバージョン法



— input RF
— sampling clock
...●... observed "beat"

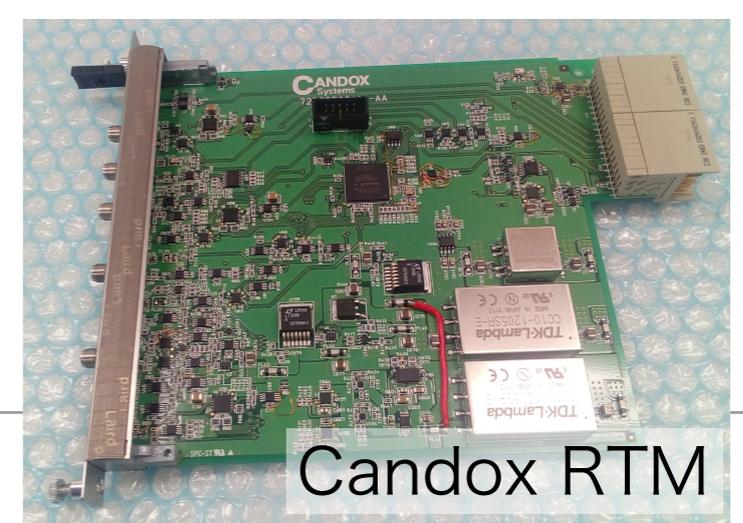


	アンダーサンプリング	ダウンコンバート
回路がシンプル	○	△
< ~500MHz	○	○
> 500 MHz	X	○

AMC/RTM



Struck AMC



Candox RTM

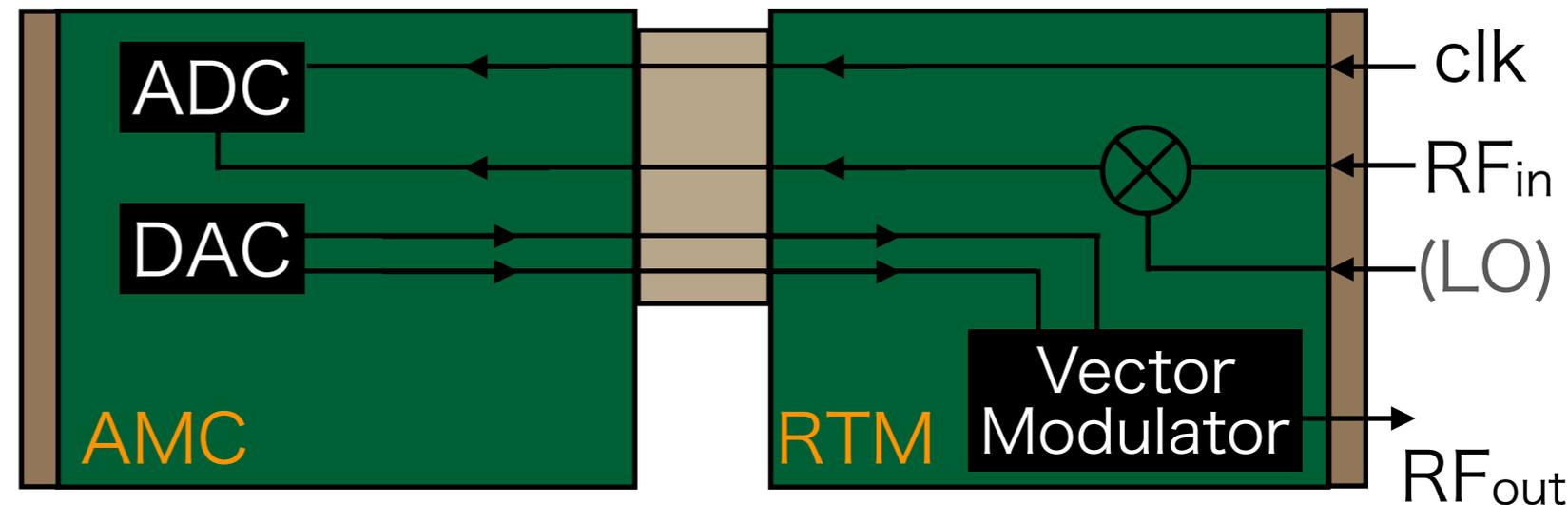
検討/試験している AMC/RTM

▶ AMC

- 三菱特機 mmeadc01b
- Struck SIS8325

▶ RTM

- Candox 72DSR238A (238, 476MHz): アンダーサンプリング用
- Struck DWC8VM (2856MHz, 5712MHz): ダウンコンバート用



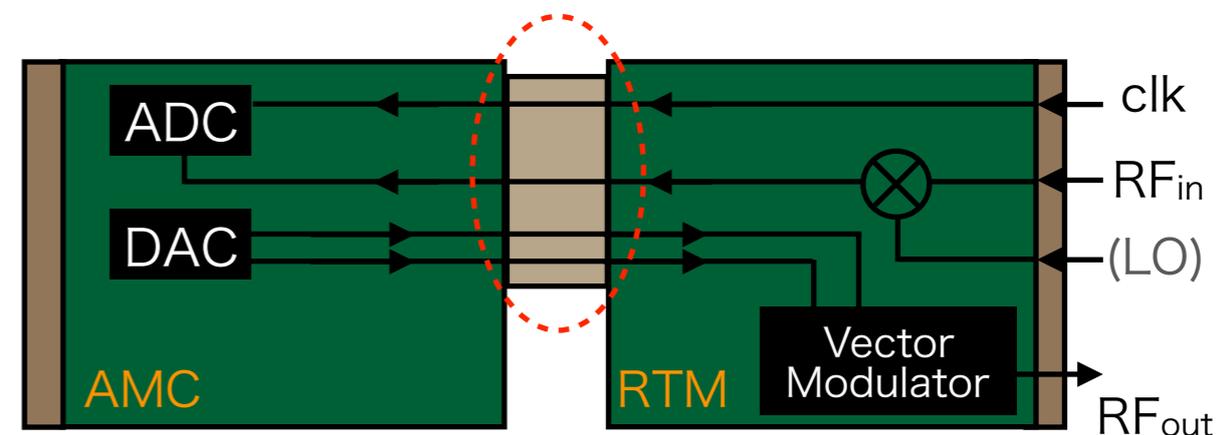
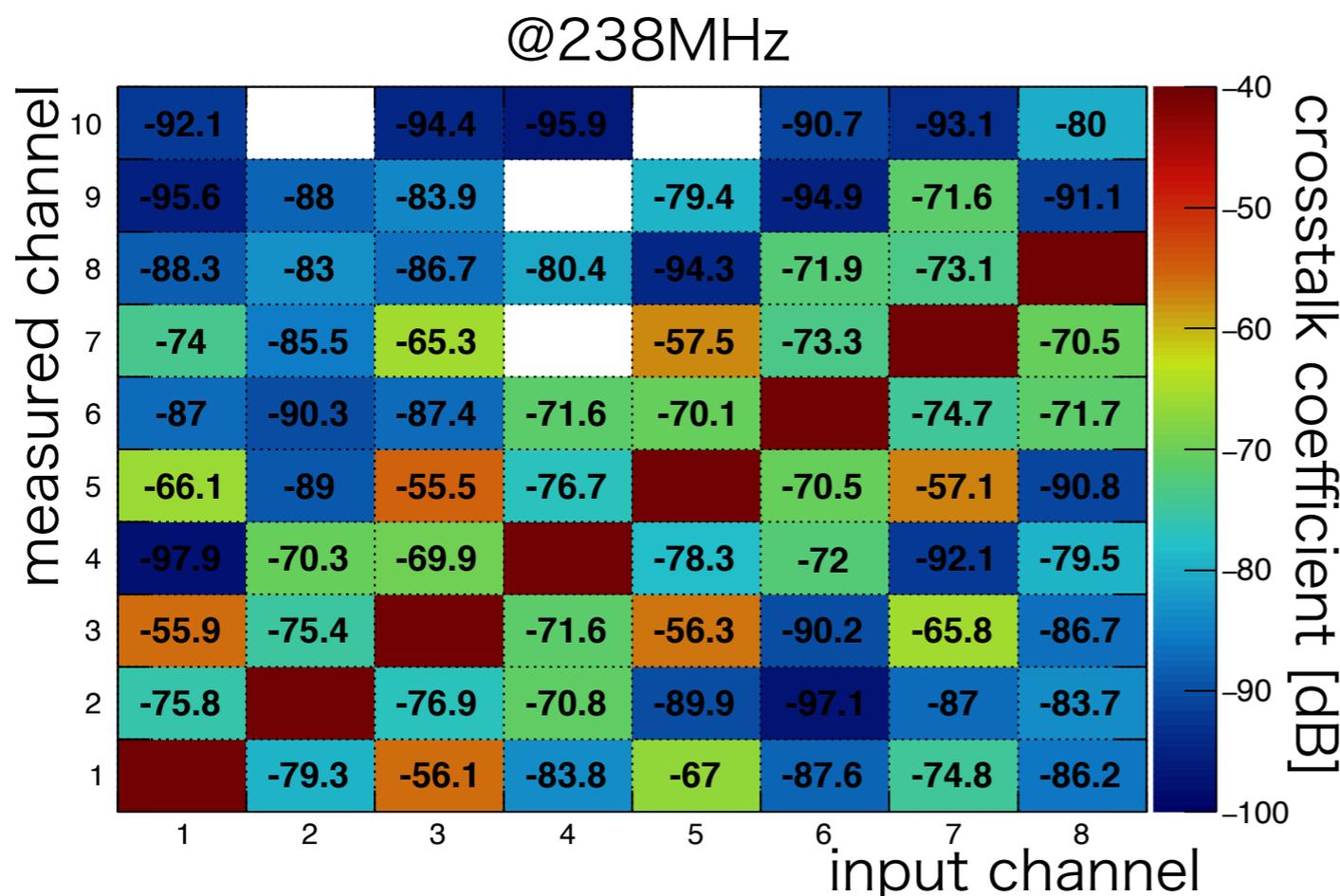
• “238MHz”: 三菱特機-AMC + Candox-RTM

• “S/C-バンド”: Struck-AMC + Struck-RTM

- クロストーク
- 分解能
- 温度依存性
- 安定性
- ADC直交性
- Vector Modulator出力特性
- AMC+RTM: DAC安定性

Cross-talk

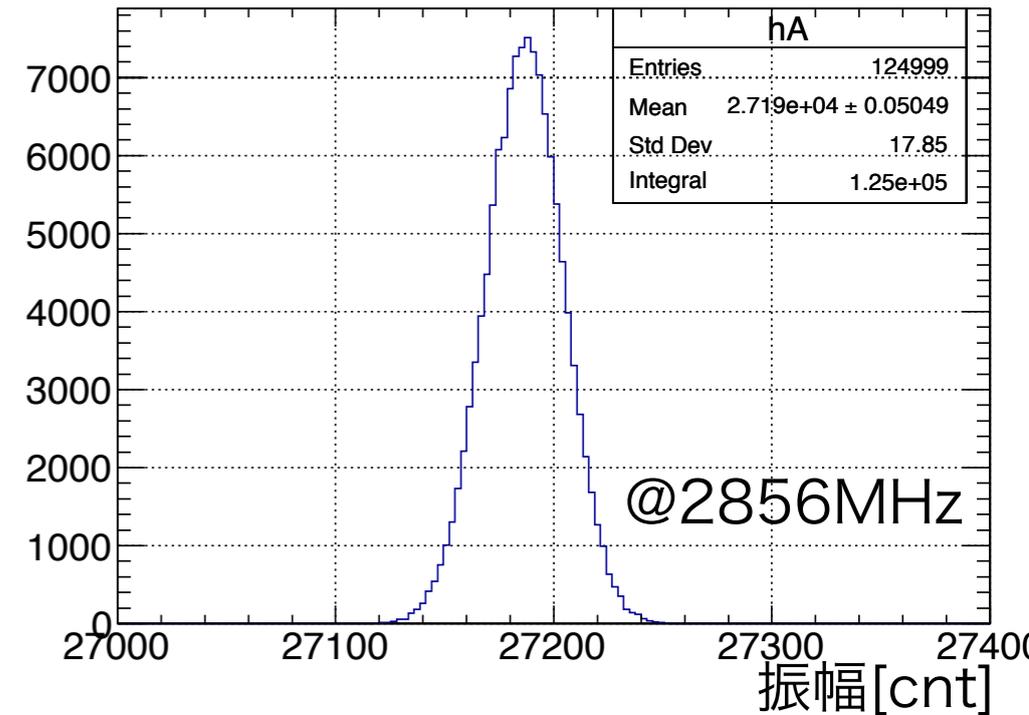
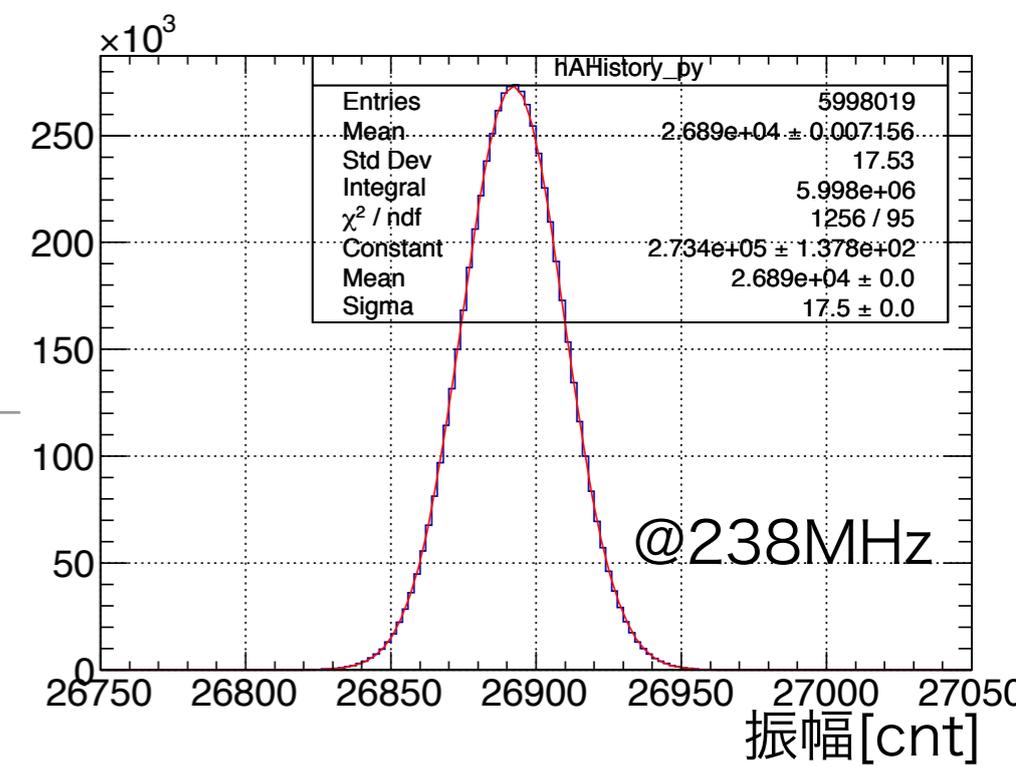
- 238MHz は最大-50dB代のチャンネル間クロストーク。Zone3の性能との報告あり
 - ▶ 奇数/偶数チャンネルで挙動がやや異なるが、ch1, 2, 4, 6, 7, 8 で -70dB 以下 (ch3, 5 は使わない) に抑えられる
- S-band はダウンコンバートしているため($238\text{M}/4=59.5\text{MHz}$)、大きなクロストークとそのチャンネル依存は見られず、概ね -80dB 程度



	クロストーク
238MHz	<-70dB (6ch)
S-band	-80dB

ADC 分解能 (短期)

- 固定周波数, 一定振幅信号を測定
- LLRF測定系ノイズ
 - ▶ 238MHz
 - ADC ランダムノイズ: ~8.5cnt/16bit
 - clock 位相ノイズ: 120/260 fs (238/190MHz)
 - ▶ S-band
 - ADC ランダムノイズ: ~12cnt/16bit
 - (down-convert) clock 位相ノイズ: ~200 fs



@0.8xA _{max}	σ_A/A [%]	σ_ϕ [deg]
238MHz	0.07	0.07
S-band	0.07	0.05

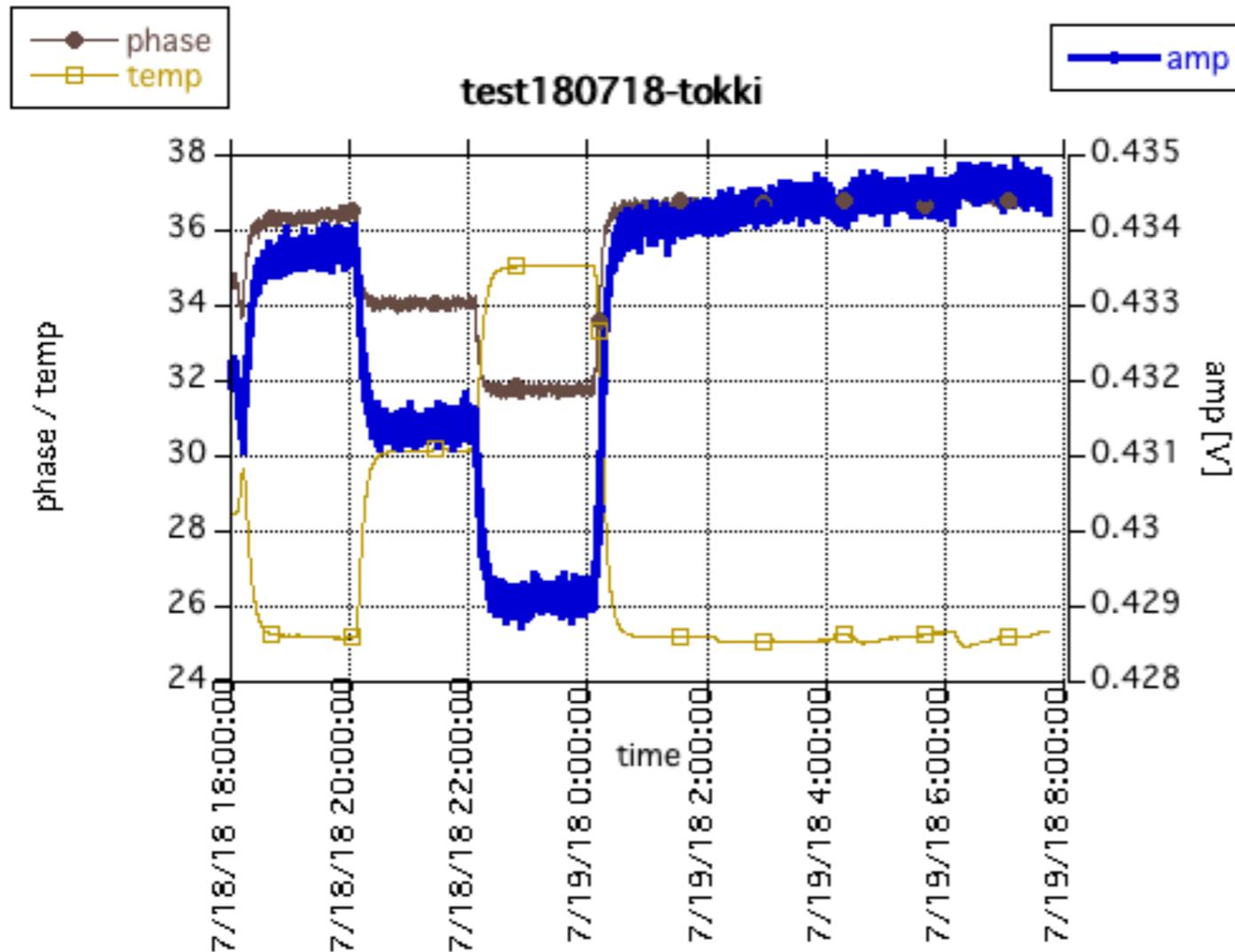
Averaging

@0.8xA _{max}	σ_A/A [%]	σ_ϕ [deg]	BW
238MHz	0.02	0.02	1MHz
S-band	0.02	0.02	20MHz

ADC 分解能 (温度特性)

- ・ 振幅, 位相 それぞれ相応の温度相関がある

➔ 時間的な安定性を評価するには、相応に温度変化を抑える必要がある

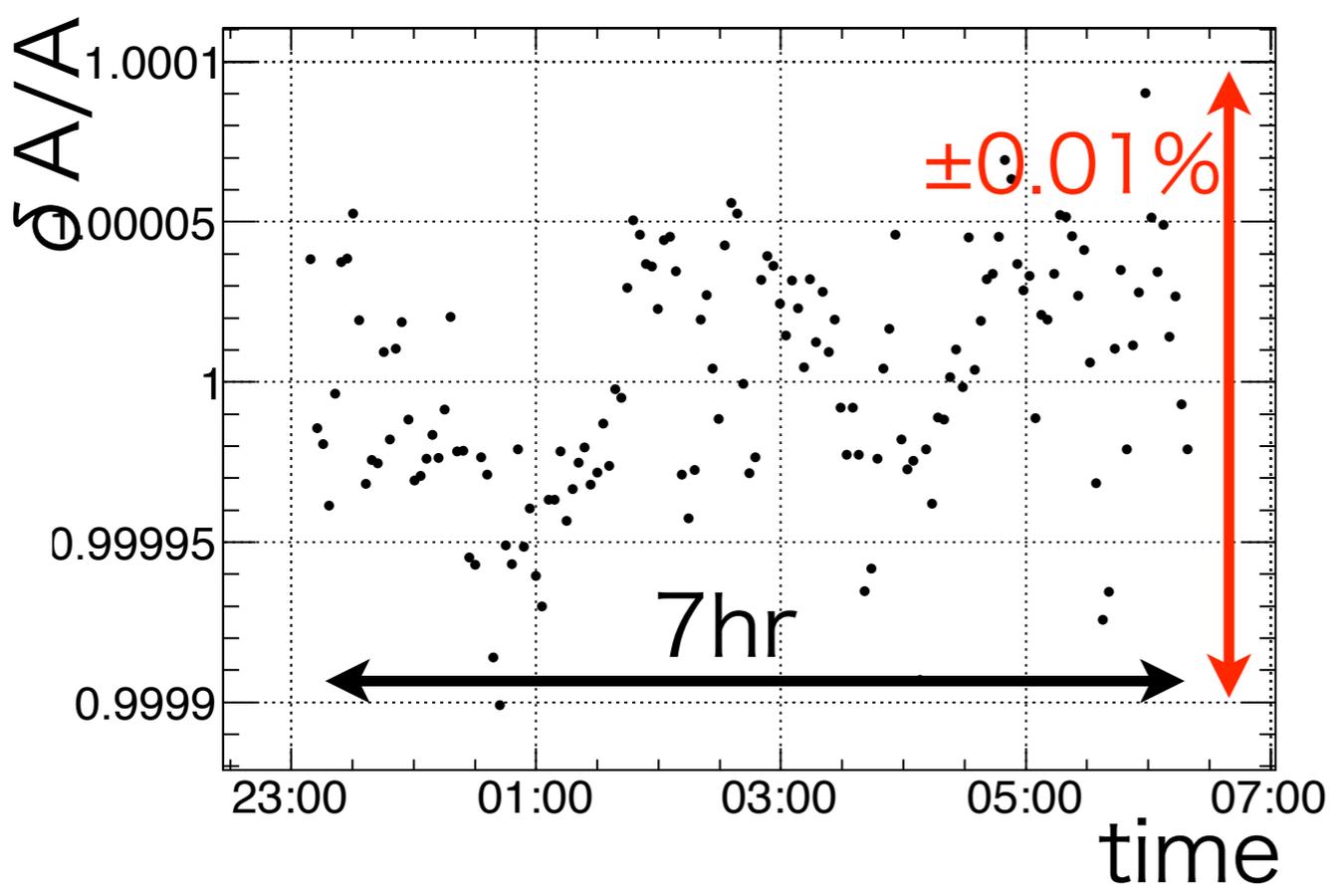
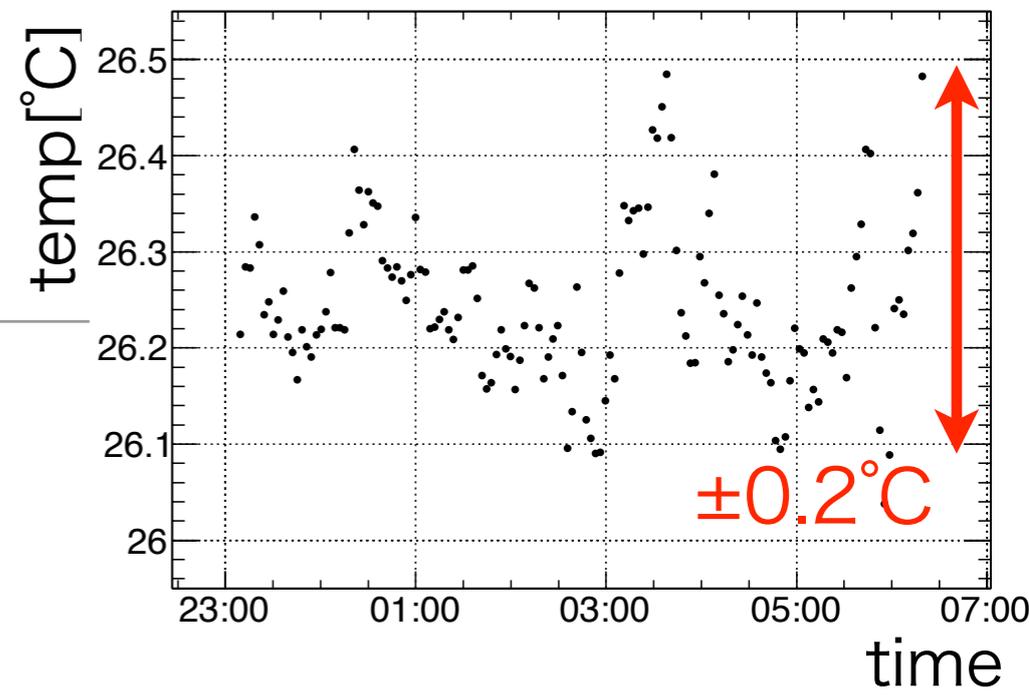


$\delta / ^\circ\text{C}$	$\delta A/A[\%]$	$\delta \phi[\text{deg}]$
mmeadc01b + Cadox 508MHz	0.13	-0.51

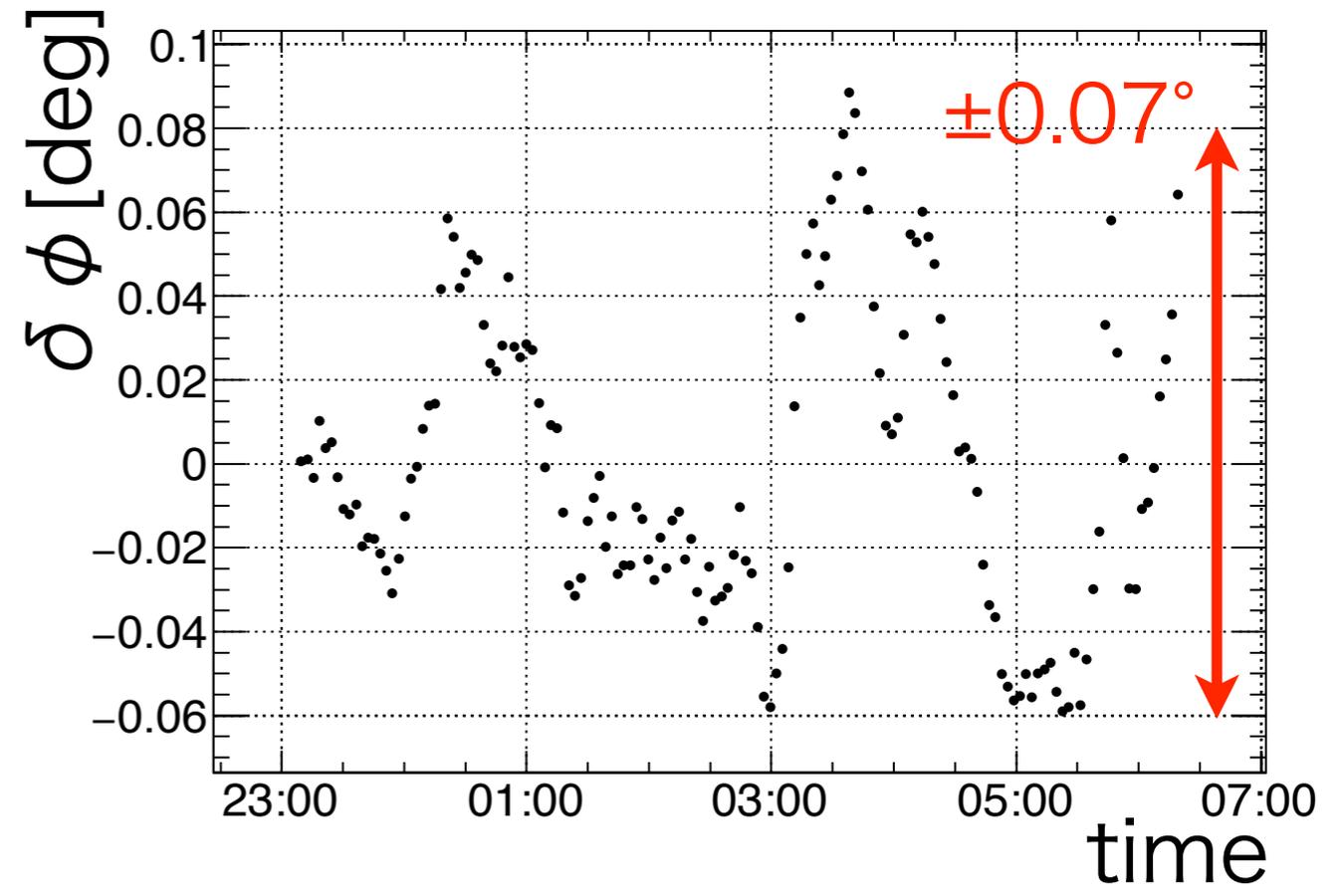
238MHz のみ

ADC 分解能 (中長期)

- 温度変化を抑えて測定
 - ✓ 振幅, 位相の変動は温度変化がなお支配的か

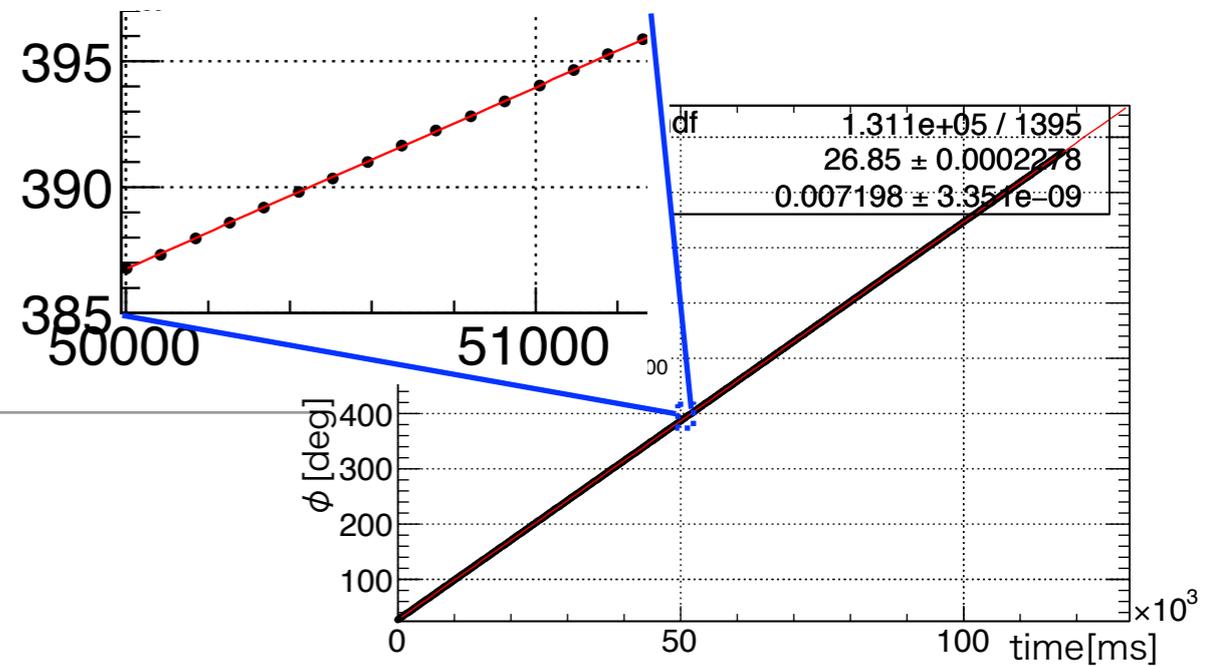


⇔ 要求値: $\pm 0.08\%$

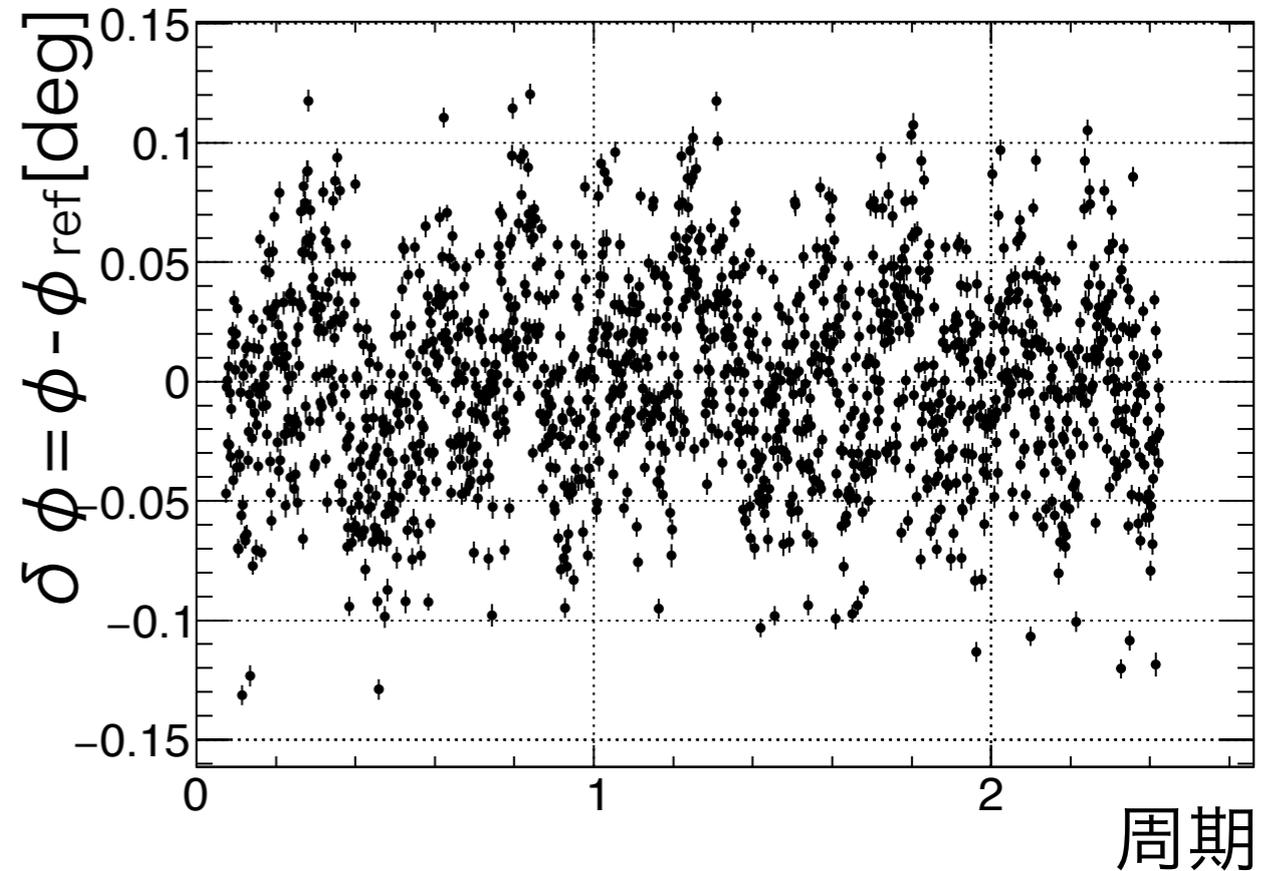
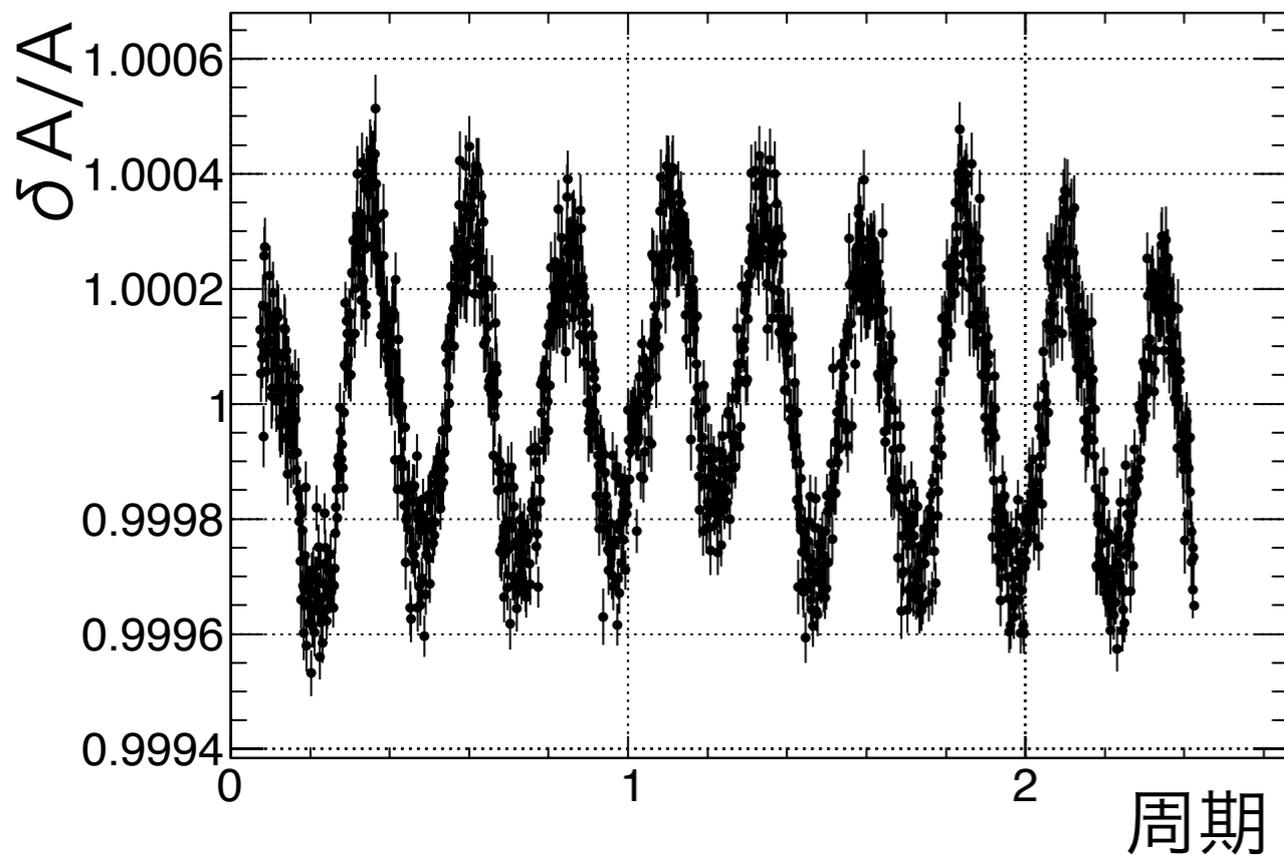


⇔ 要求値: $\pm 0.5^{\circ}$

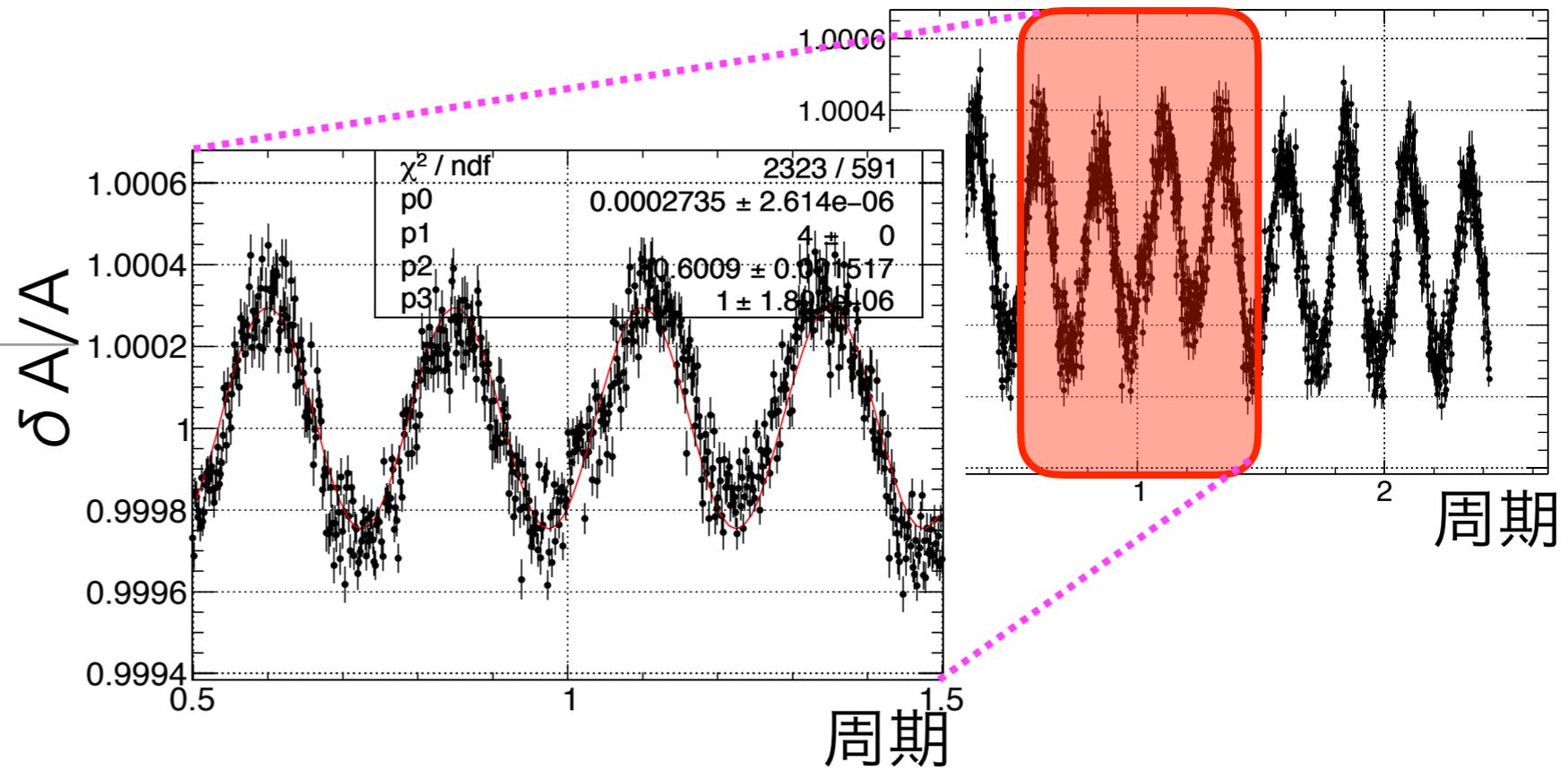
ADC の 直交性



- 特に実運用の観点から、位相を微調した際に振幅が変わると、調整が難しくなるので、ADC の A/ ϕ 直交性を確認する。
- 入力信号を基準信号 238MHz からズラして、入力位相を時間に比例して動かす ($0.02\text{Hz}/238\text{MHz} \sim 8e-11$)



ADC の 直交性

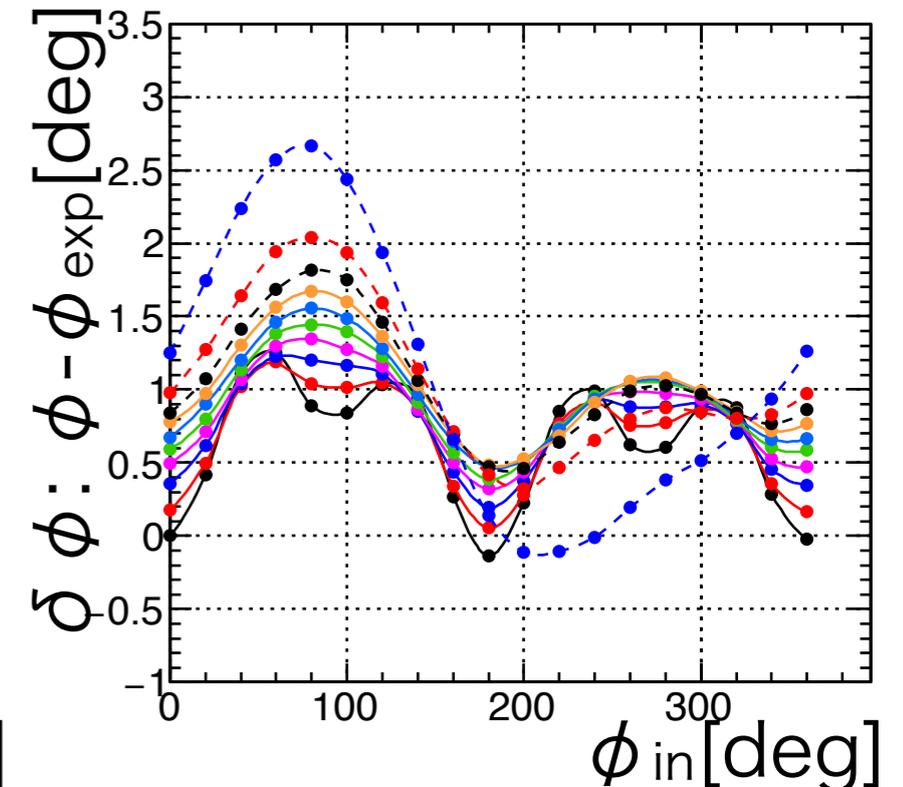
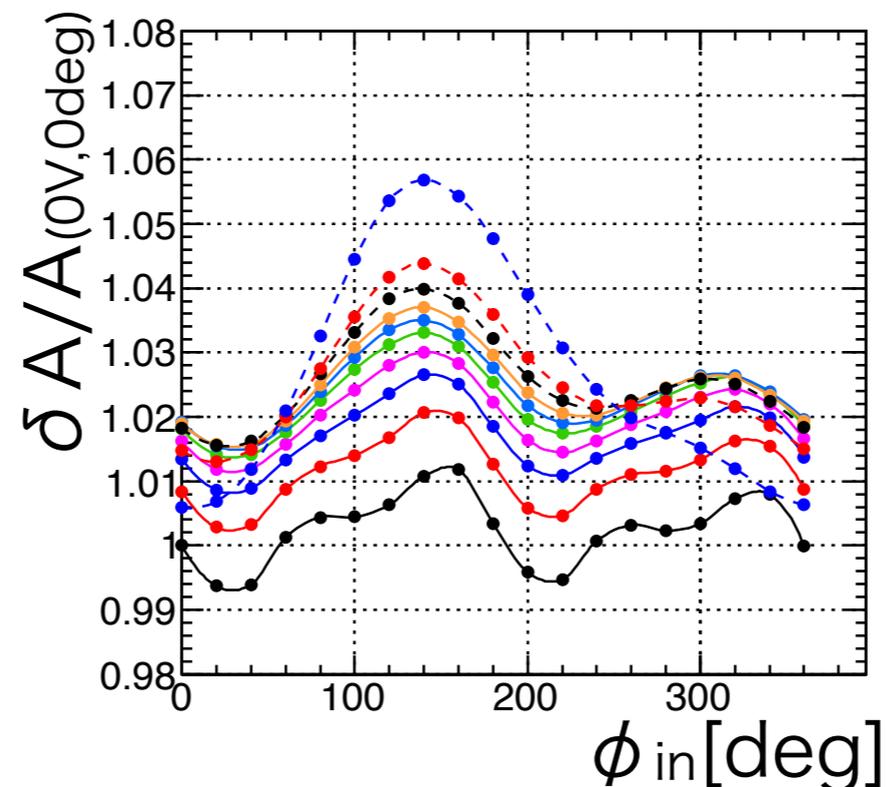
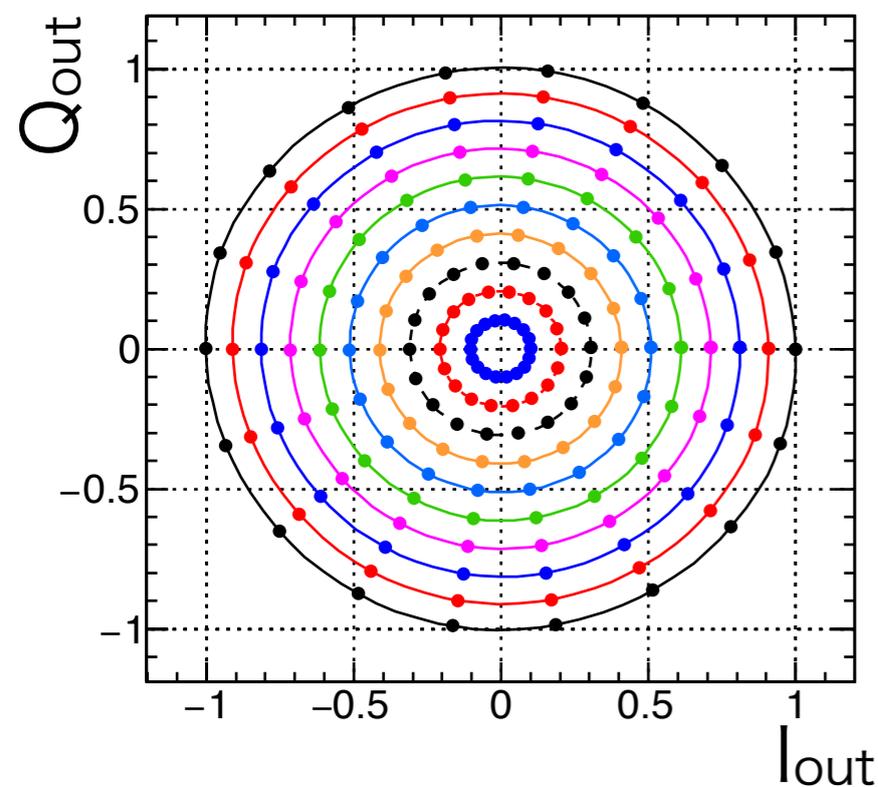


- 周期が半分の構造が見えると予想していたが、 $\delta A/A$ 上で 1/4周期の構造が見えた
- 仮に、これが外乱ではなく全てLLRF系システムによるとした場合でも...
 - 0 ~ 360°で考えても $\delta A_{p-p}/A < 1e-3$
 - $\delta A/A \sim 2.7e-4 \cos\{2\pi(4N+0.6)\} \sim 2.7e-4 \cos(4\phi_{\text{rad}} + \pi)$
 - ▶ その傾きの絶対値は、 $\phi_{\text{rad}} \sim (2n+1)\pi/8$ の時に
最大で $10.8e-4 \Delta\phi_{\text{rad}} \sim 1.9e-5 \Delta\phi_{\text{deg}}$ となる

$\sigma_{A/A}$	p-p	微調 $\Delta\phi_{\text{deg}}$	要求値
238MHz	$<1e-3$	$1.9e-5 \Delta\phi_{\text{deg}}$	$\pm 8e-4$
C-band	$<7e-04$	$1.8e-5 \Delta\phi_{\text{deg}}$	$\pm 1e-3$

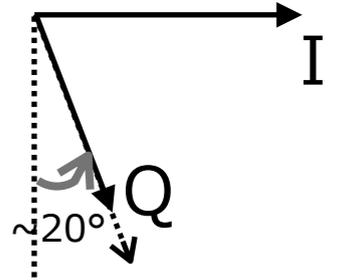
Vector Modulator 出力特性

- vector modulatorに設定するDAC制御電圧の振幅・位相を、0.1Vから1Vまで0.1Vステップで、0度から340度まで20度ステップで変化させてADCで測定、(1V, 0deg)で規格化
- DACの出力特性は概ね期待通り
 - 振幅0.4-0.6Vのレンジで用いると出力の応答誤差は小さい
 - 先の位相滑りの測定でADCの直交性は確認しているため、この特性は概ねDACの特性であると考えられる



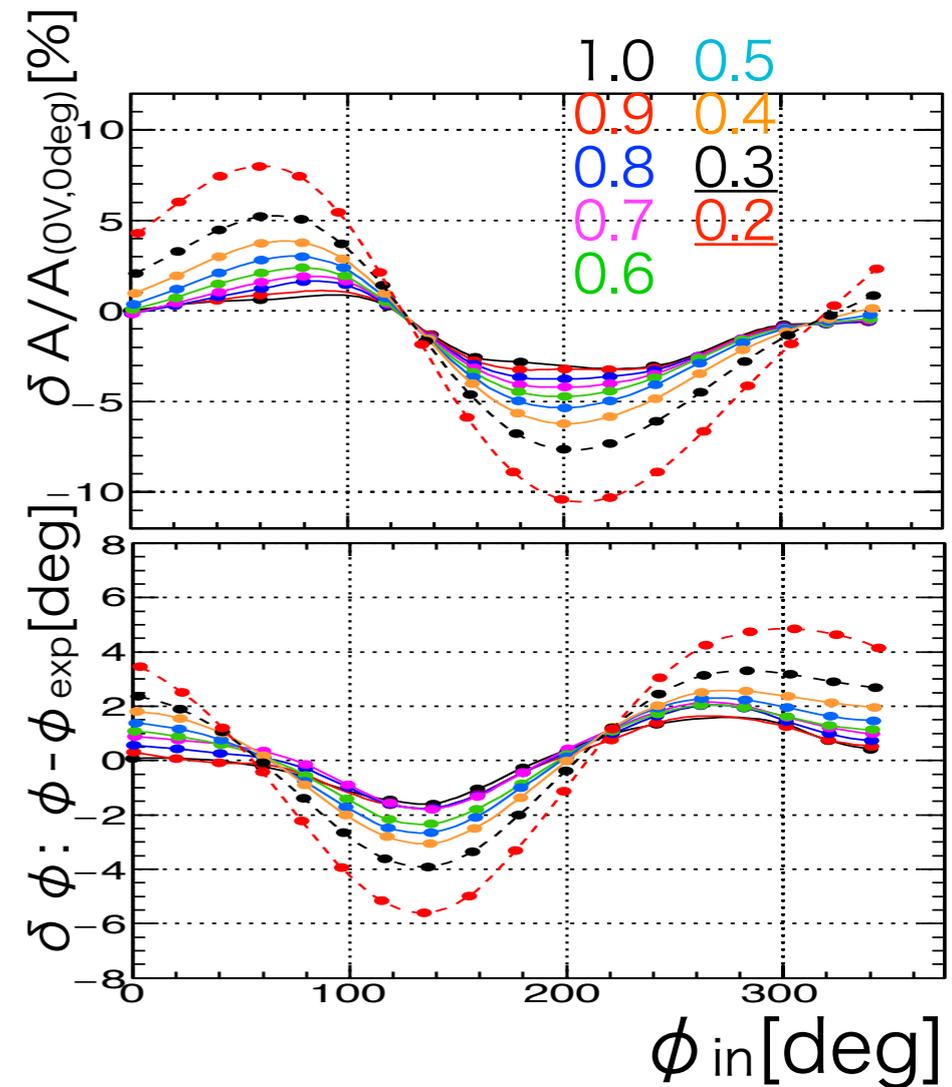
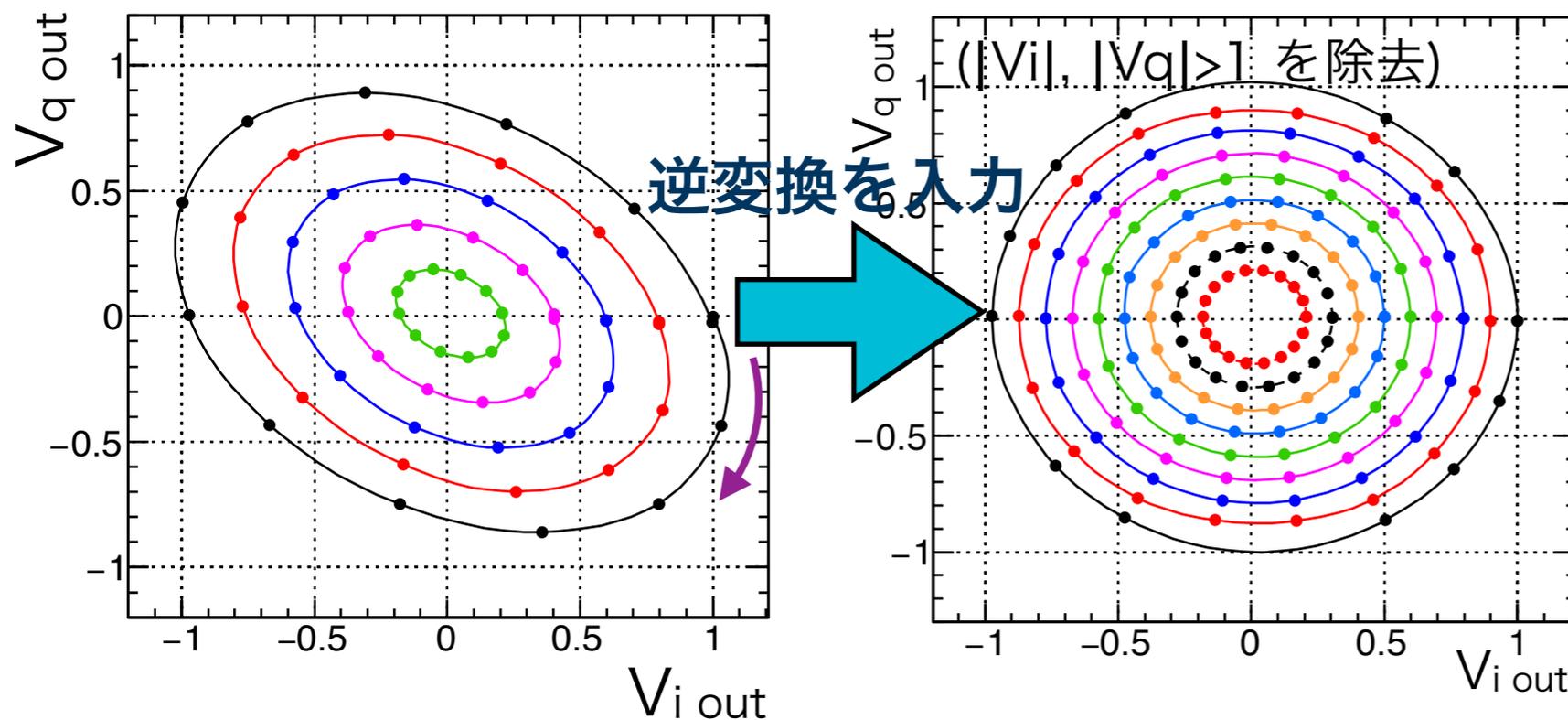
Vector Modulator 出力特性

- I/Qが直行しておらず歪んでいる
- 出力から入力への(逆)変換を考える
→ 設定したい値に同様の変換を適用した値を、実際に設定すればよい
- 変換自由度を2つ入れて、同時フィットを行う



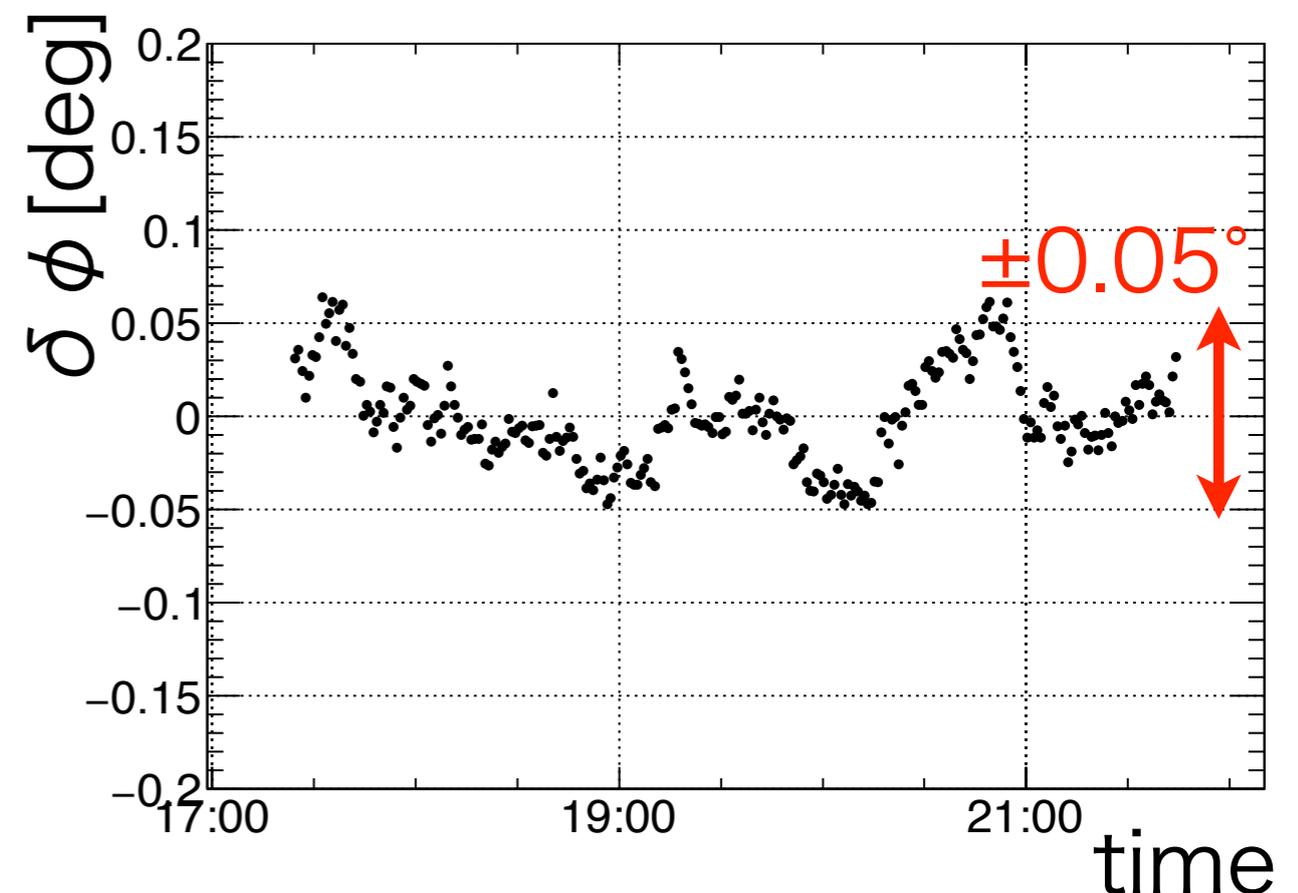
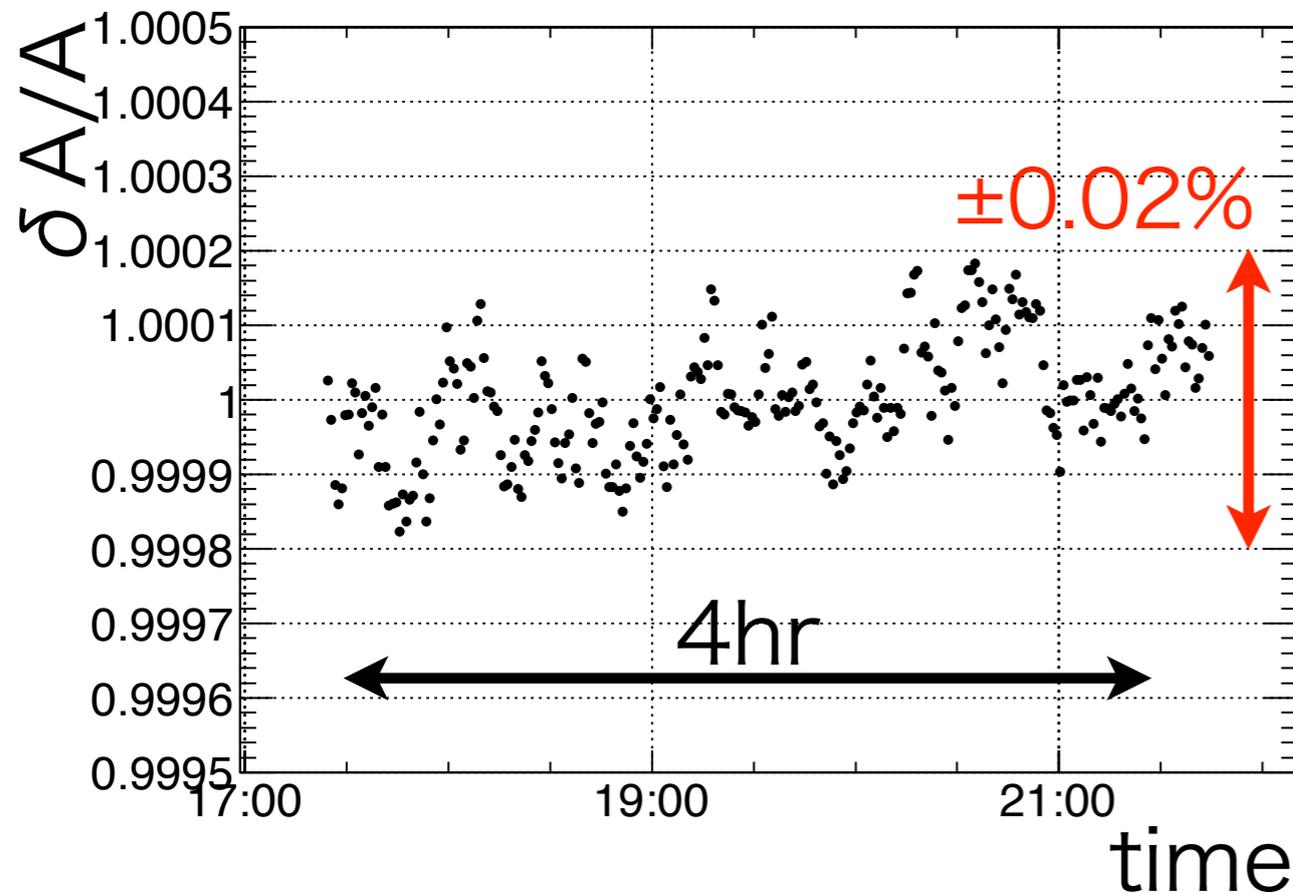
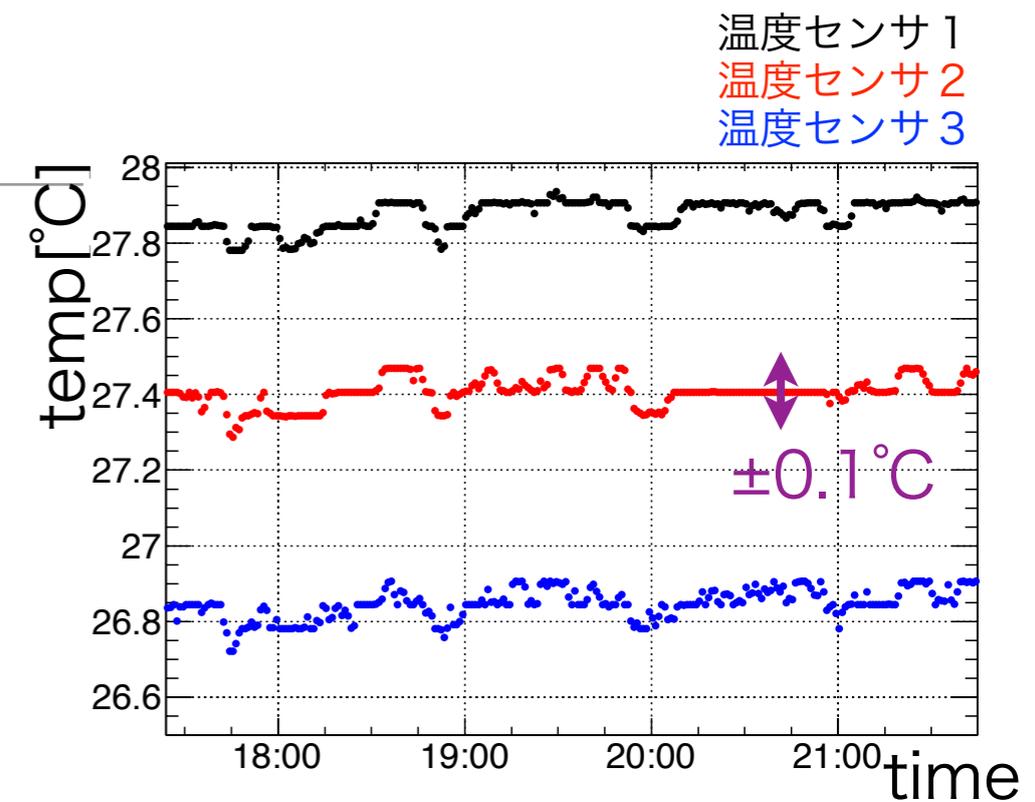
- IQ軸の角度: -69.2°
- IQ軸の相対スケール: $Q/-6\%$

✓ 0.7-0.8V 付近で使うと応答誤差は小さい



AMC+RTM: VMパルス安定性

- 温度変化を抑えて4時間超測定
- DAC の FB はしていない
- 安定性
 - 振幅: $\pm 0.02\%$ 以内
 - 位相: $\pm 0.05^\circ$ 程度



まとめと今後の展開

- 高輝度でコンパクトな次世代放射光施設の建設が始まる
 - この次世代放射光施設の入射器ライナックのための MTCA.4 を用いた LLRFシステムの開発
 - 試験中の AMC, RTMモジュールについての性能評価
(クロストーク, 分解能, 安定性, 直交性, DAC出力特性)
- ✓ 十分な性能を有していることを確認
- 今後の展開
 - 測定していない 476MHz 用RTMや, S/Cバンドの項目, AMC-RTMの組み合わせを変えた場合の測定
 - AMCがもつ温度依存性と要求性能との落とし所の検討
 - プロトタイプ加速器での実証試験

		振幅[%]	位相[°]
要求値	238MHz	±0.08	±0.5
	476MHz	±0.15	±0.2
	S-band	±0.25	±0.5
	C-band	±0.1	±2.5
	クロストーク	< -70 dB	
2	分解能	0.07	0.07
3	分解能 (avg)	0.02	0.02
8			
M	安定性	±0.01	±0.07
H	直交性	1.9e-3 Δ φ	-
Z	VM特性	±1.0	±0.6
	VM安定性	±0.02	±0.05
S / C バンド	クロストーク	-80 dB	
	分解能 (S)	0.07	0.05
	分解能 (avg, S)	0.02	0.02
	直交性 (C)	1.8e-3 Δ φ	-
	VM特性 (C)	±2.5	±2.0