

# 超伝導検出器 MKID の多重読み出し用 フロントエンド回路の開発

総合研究大学院大学  
高エネルギー加速器科学研究科  
素粒子原子核専攻

石塚 光

# 目次

- CMB と GroundBIRD 実験
- MKID とその読み出し系
- 解決すべき課題
- 新しいアナログ基板 RHEA の開発
- RHEA の評価
- まとめ

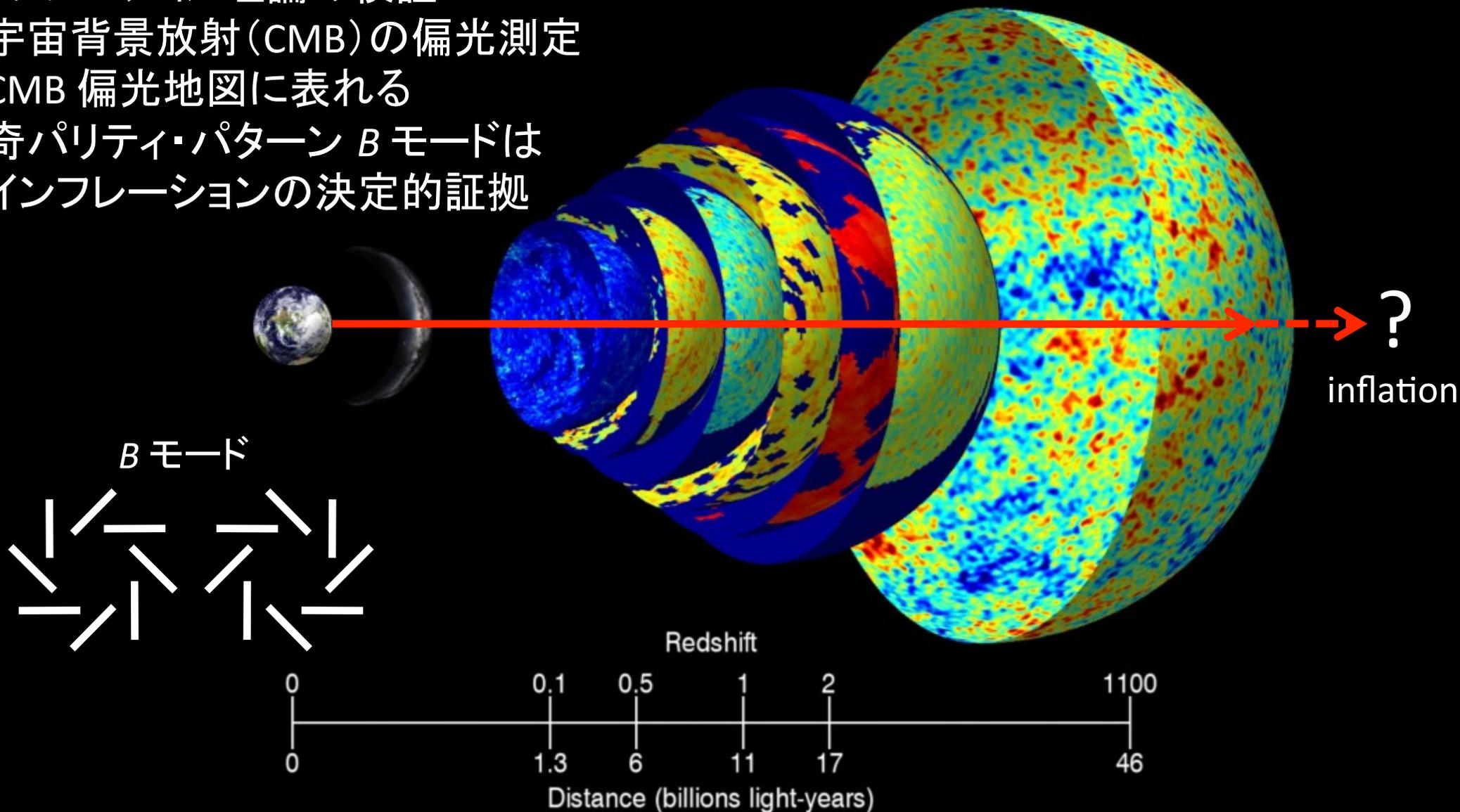
# 研究背景

インフレーション理論の検証

→ 宇宙背景放射 (CMB) の偏光測定

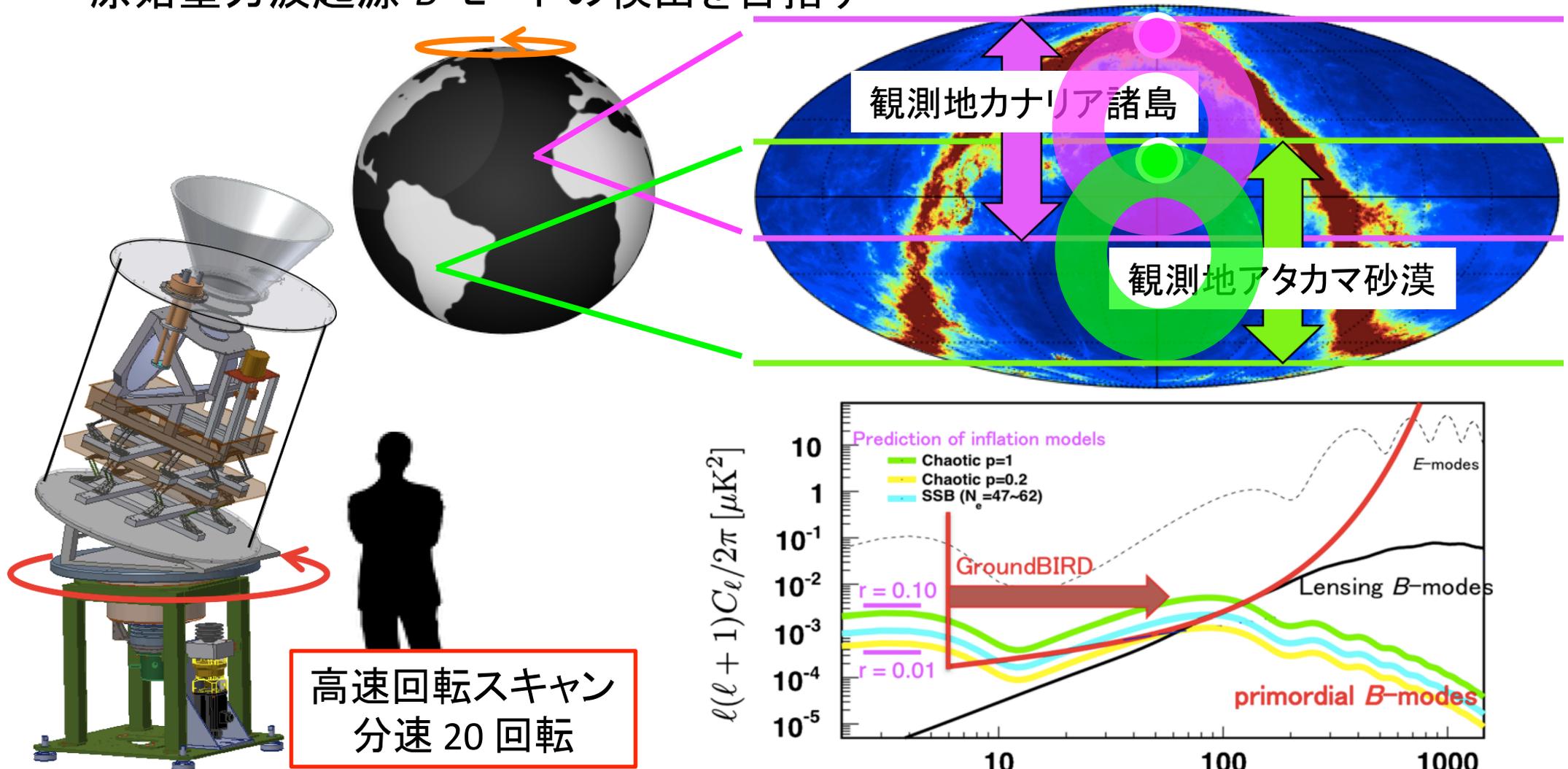
→ CMB 偏光地図に表れる

奇パリティ・パターン  $B$  モードは  
インフレーションの決定的証拠

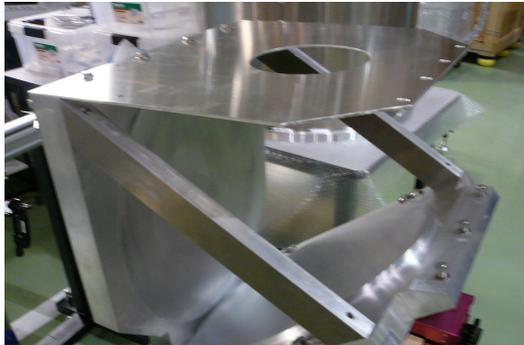


# GroundBIRD 実験

高速回転スキャンと地球の自転により、広い領域を観測  
 原始重力波起源  $B$  モードの検出を目指す



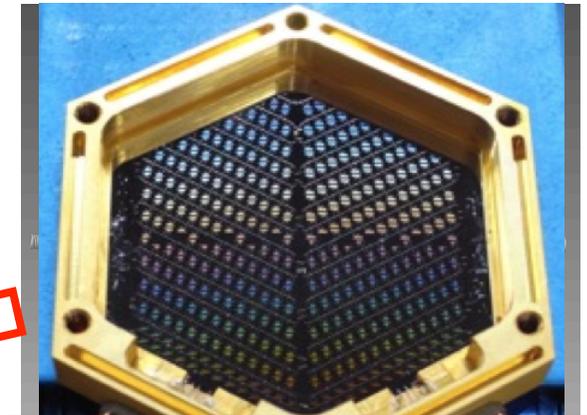
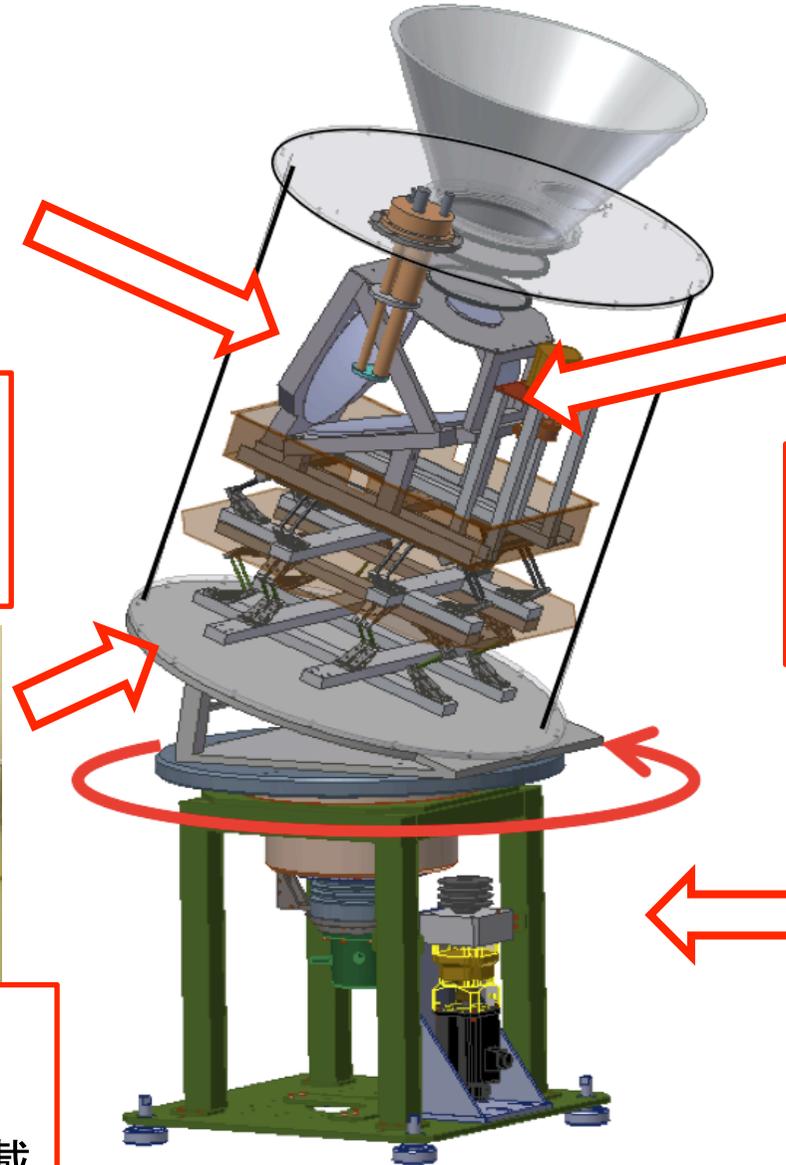
# GroundBIRD 実験 - 回転冷却光学系



クロスドラゴン  
反射光学系 @ 4 K  
開口径 30 cm、視野 20°



クライオスタット  
パルス管冷凍機、  
ヘリウム吸着式冷凍機搭載

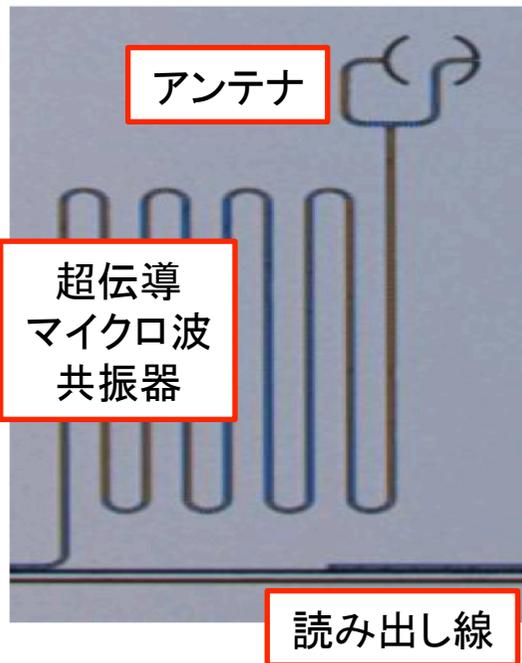


MKID アレイ @ 250 mK  
624 個 @ 145 GHz  
224 個 @ 220 GHz

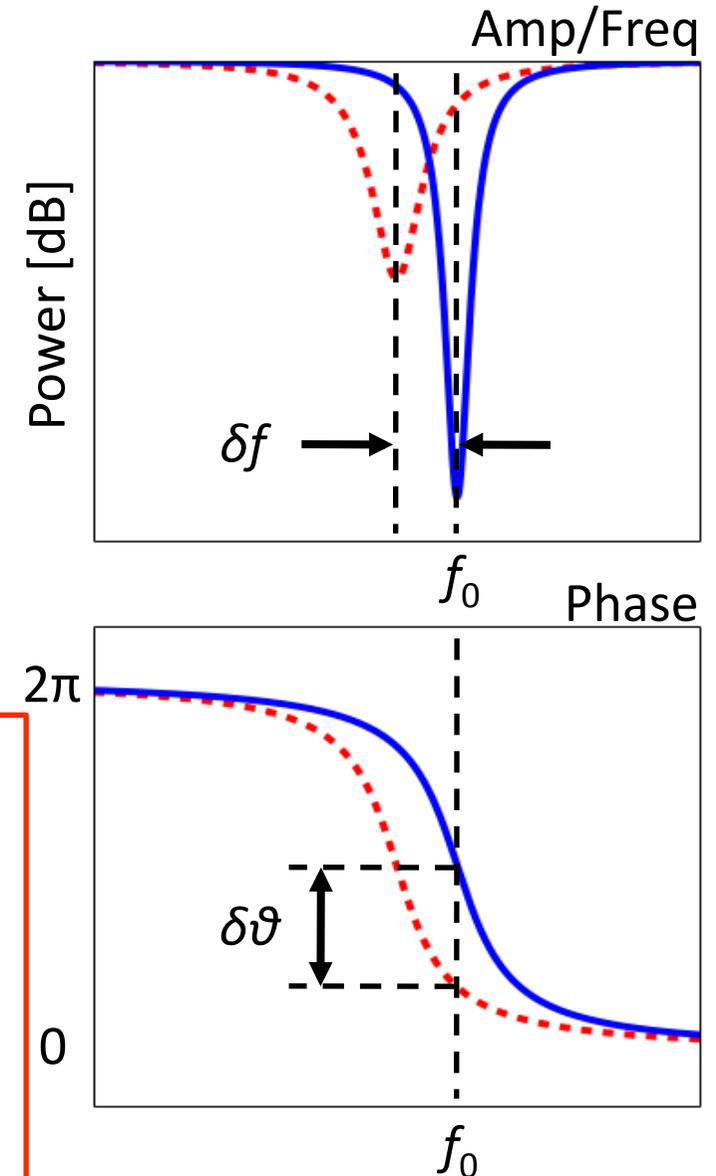
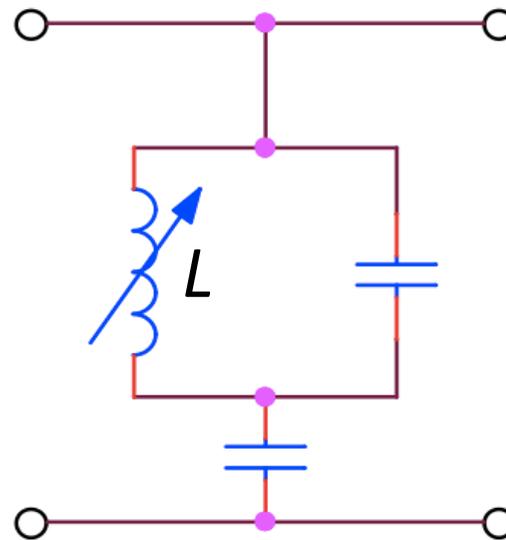


高速回転台  
分速 20 回転

# MKID (Microwave Kinetic Inductance Detector)



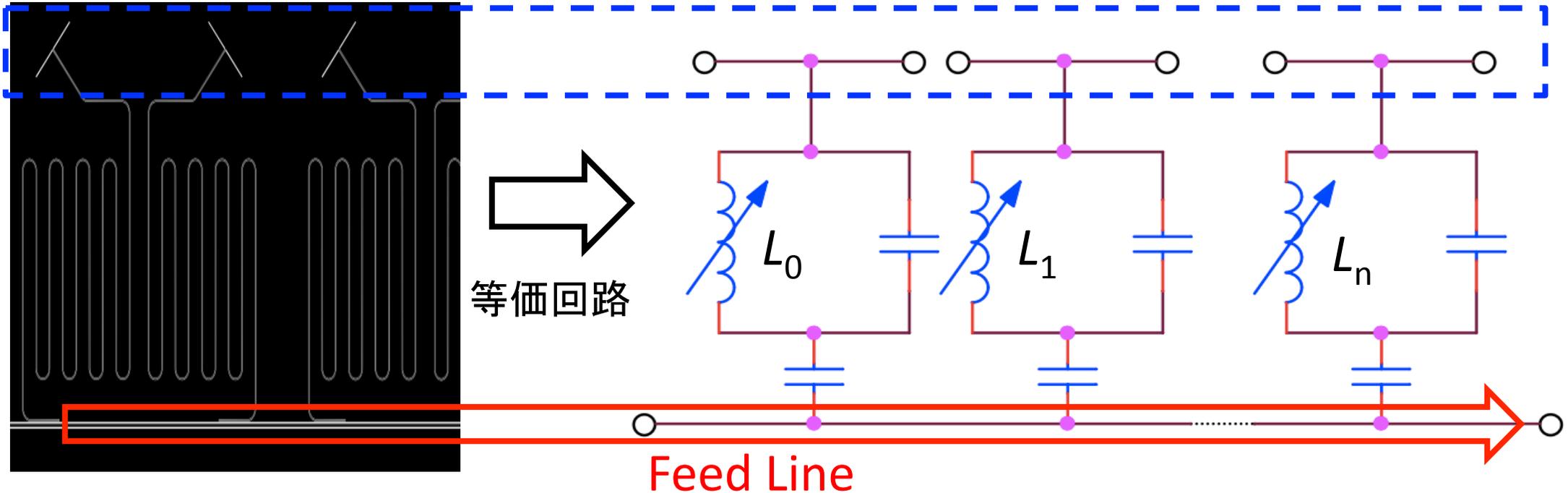
等価回路



アンテナに光子 (CMB) が入射  
→ 共振器のクーパ対が壊れ準粒子数増加  
→ 共振器の力学的インダクタンス変化  
→ 共振状態変化  
読み出し系は振幅と位相の変化を測定

# MKIDS (Microwave Kinetic Inductance Detectors)

Antenna



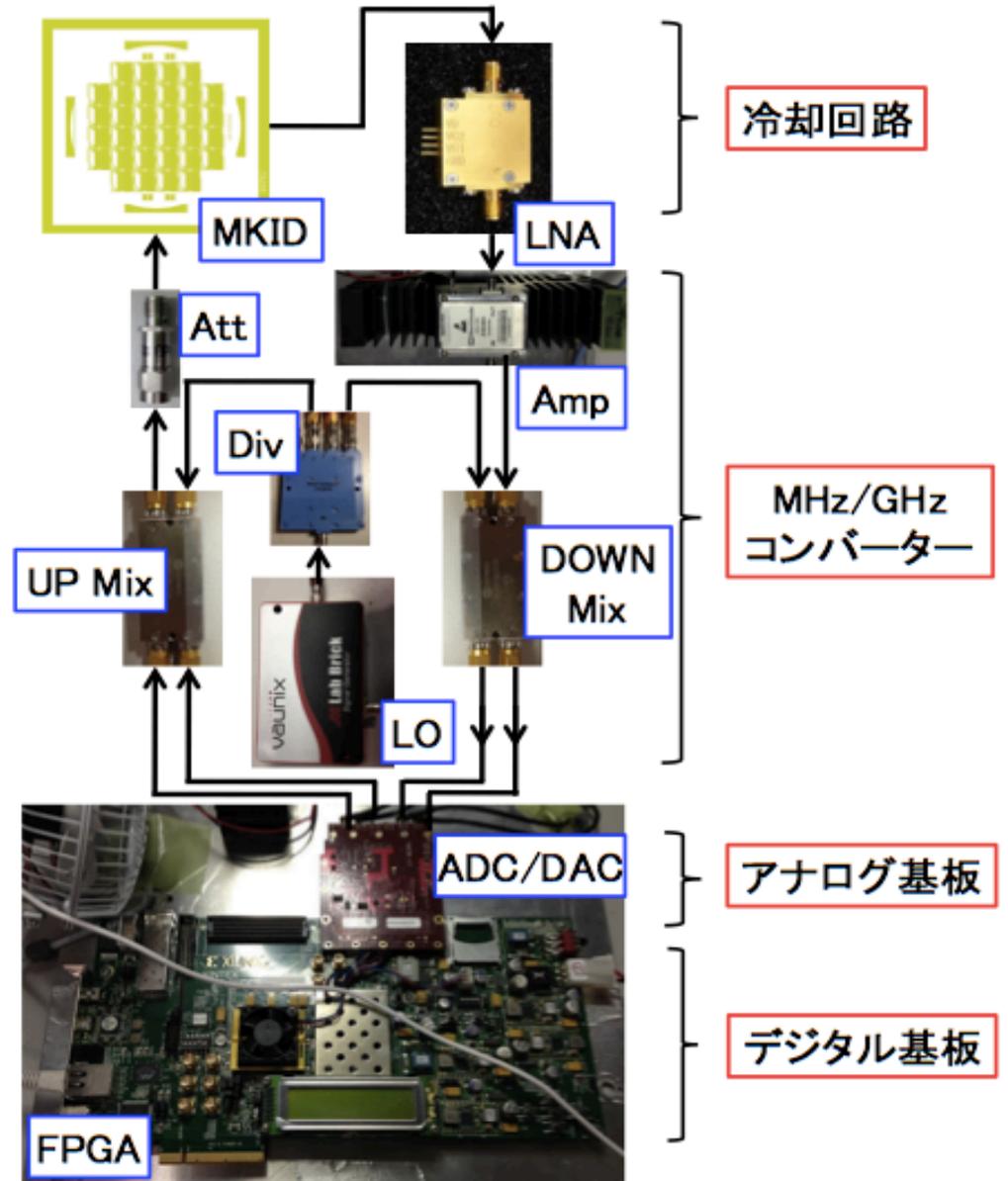
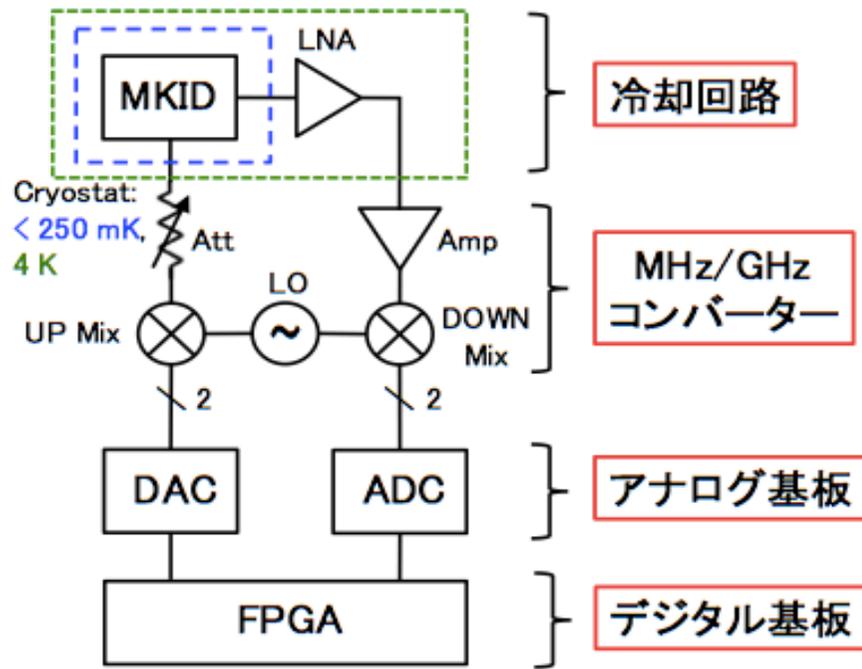
個々の共振器の長さを  $\lambda/4$  変えて、  
周波数空間への多重化を実現:

- 1本の Feed Line で多素子読み出し
- 冷凍機の熱流入を抑制

GroundBIRD:

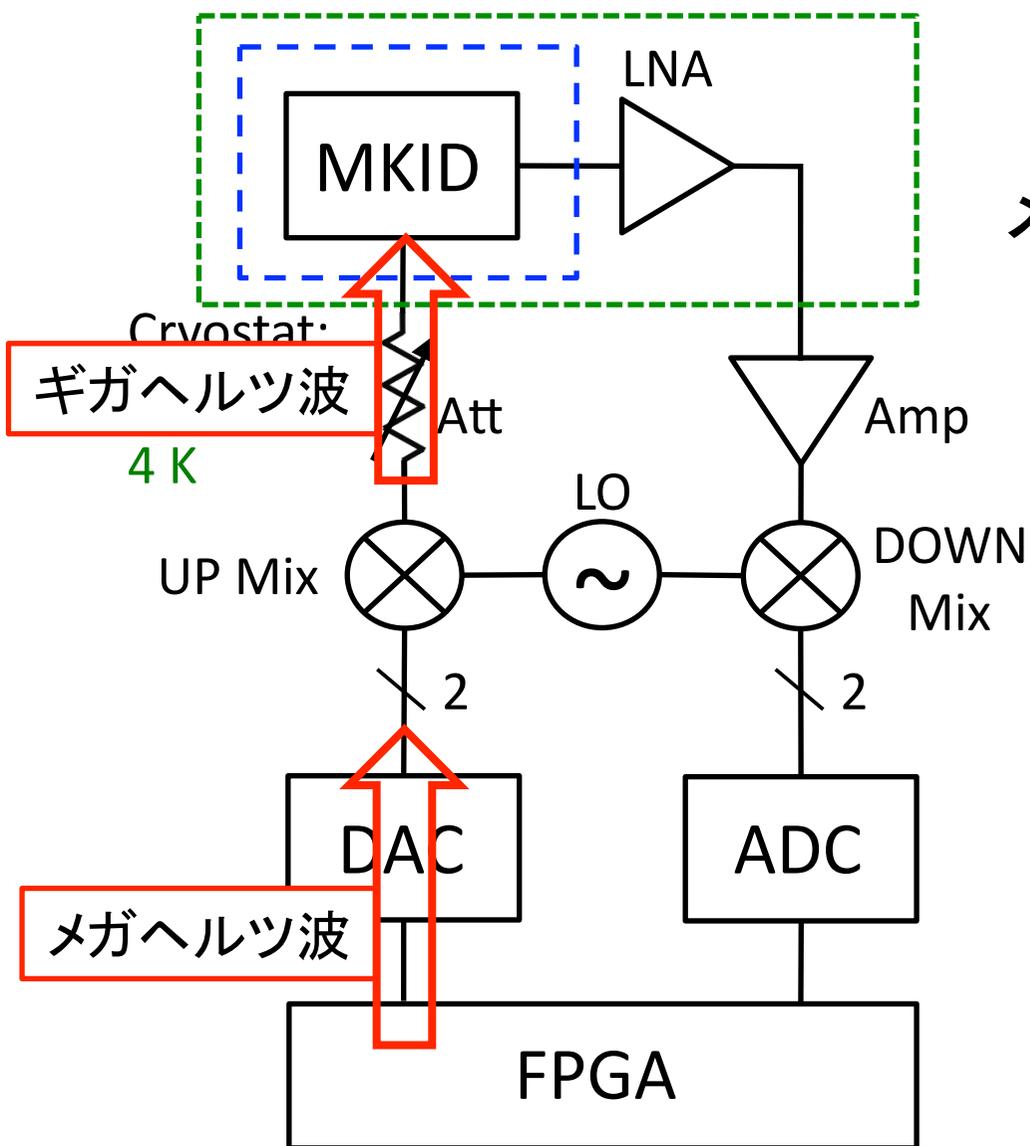
- 観測周波数: 145, 220 GHz
- 読出周波数:  $\sim 4$  GHz
- 検出器数: 848
- NET:  $250 \text{ uKs}^{1/2}/\text{個}$

# 読み出し系



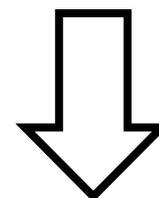
# 読み出し方法

FPGA でつくった波を DAC で出力し、  
UP Mixer と LO (3–6 GHz) で、  
メガヘルツをギガヘルツに Up-convert

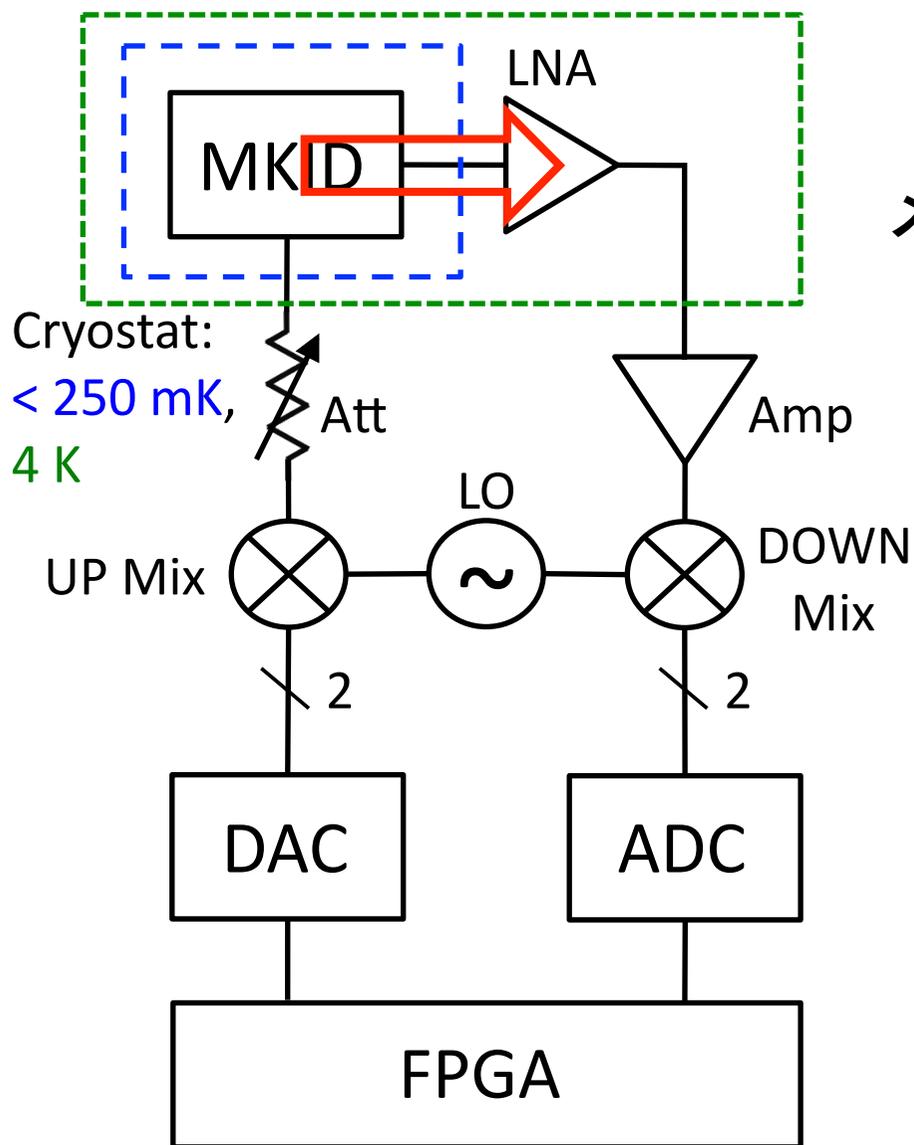


# 読み出し方法

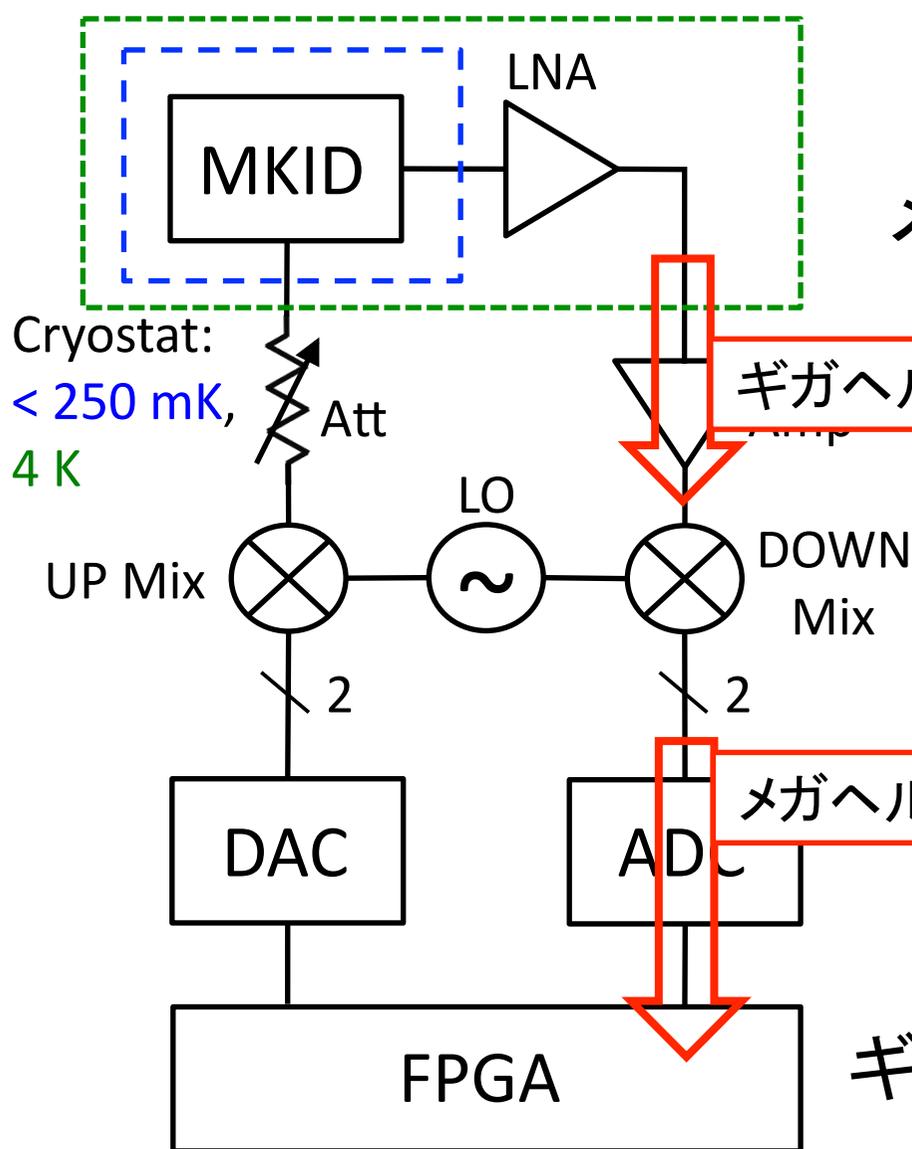
FPGA でつくった波を DAC で出力し、  
UP Mixer と LO (3–6 GHz) で、  
メガヘルツをギガヘルツに Up-convert



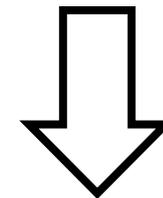
MKID



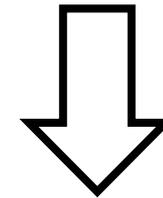
# 読み出し方法



FPGA でつくった波を DAC で出力し、  
UP Mixer と LO (3–6 GHz) で、  
メガヘルツをギガヘルツに Up-convert

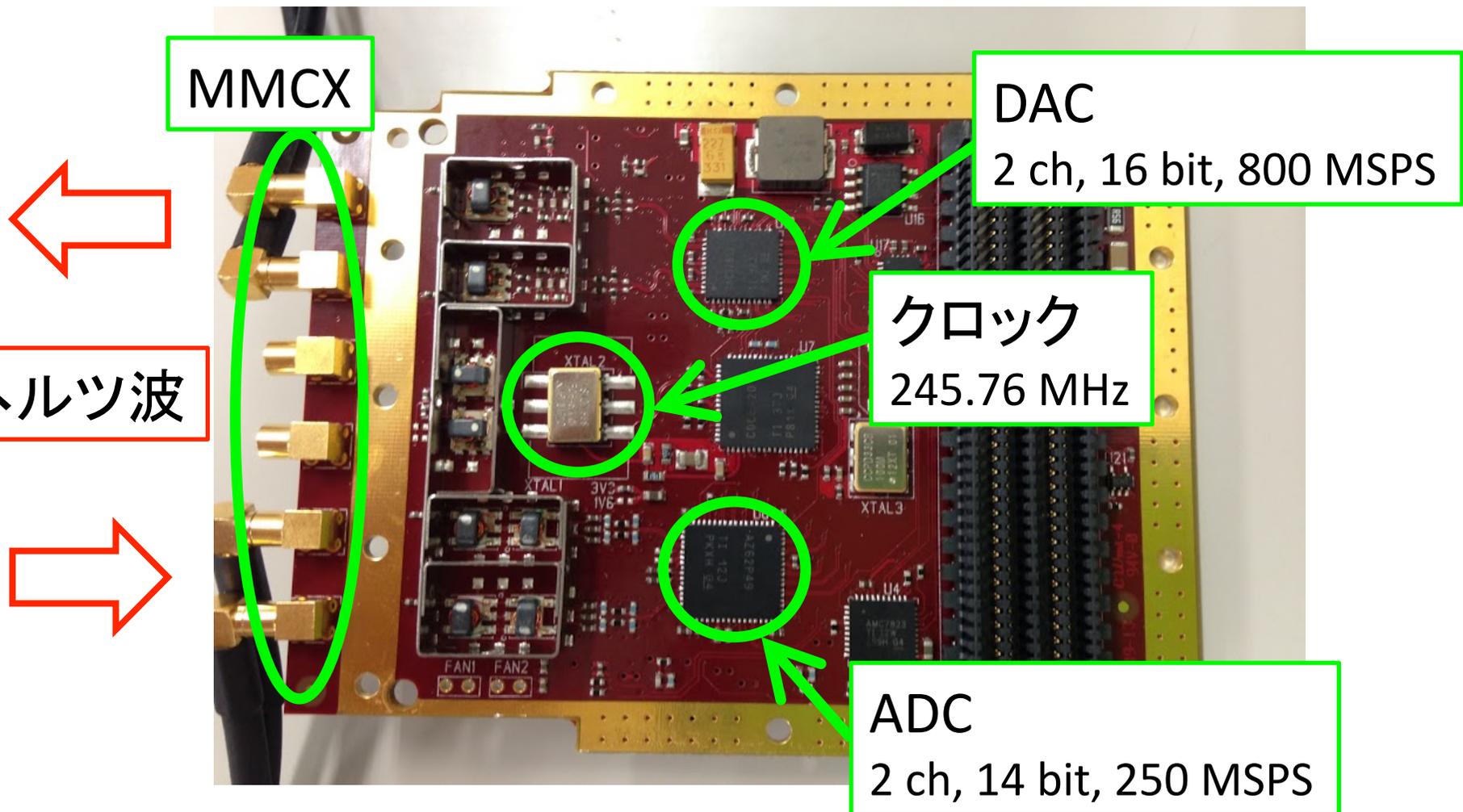


MKID



MKID からの出力を LNA で増幅し、  
DOWN Mixer と LO で、  
ギガヘルツをメガヘルツに Down-convert  
ADC で FPGA に戻して検出

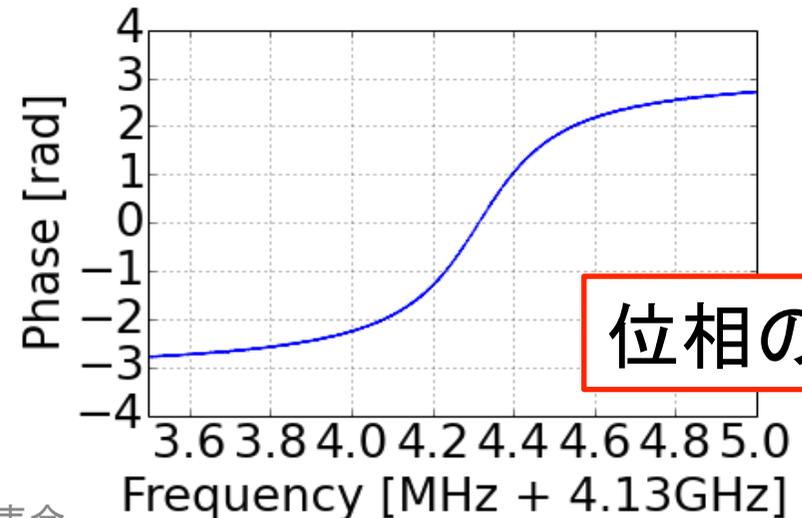
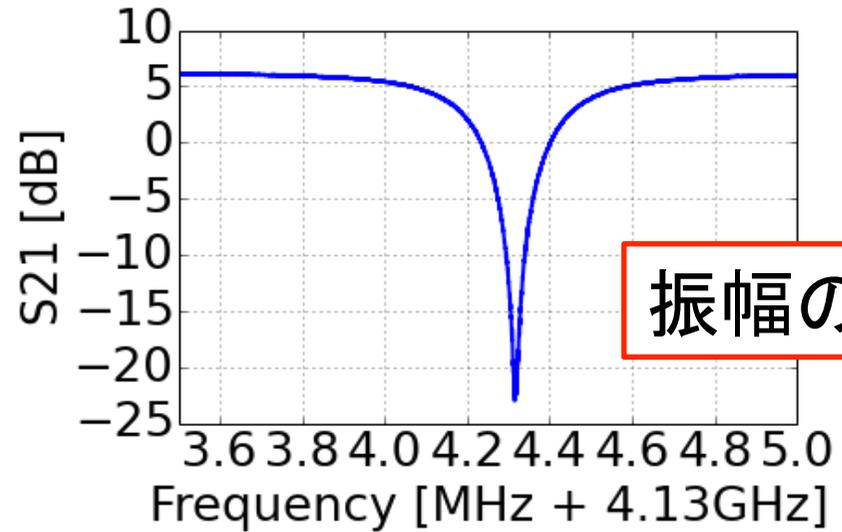
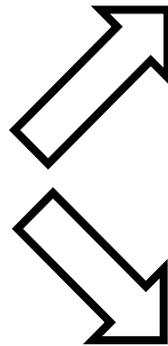
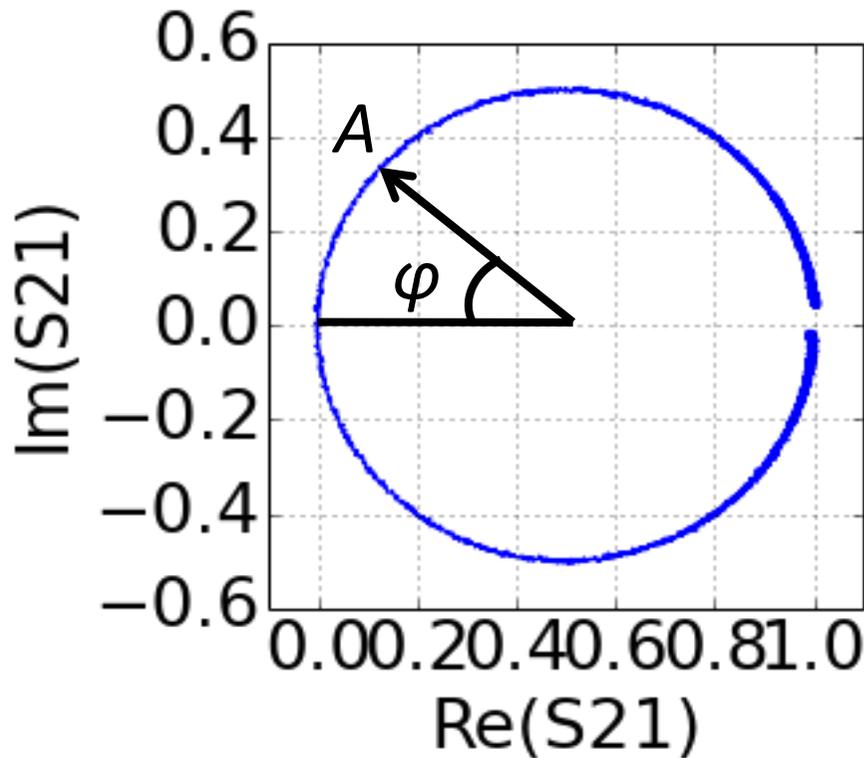
# 市販のアナログ基板 – FMC150<sup>[\*]</sup>



[\*]: <http://www.4dsp.com/FMC150.php>

# 市販品で MKID を読み出した例

ADC/DAC がそれぞれ 2 ch. ずつあるので、複素空間に  $S_{21}$  パラメータを表現可能



# 市販のアナログ基板 – FMC150<sup>[\*]</sup>

MMCX

DAC

2 ch, 16 bit, 800 MSPS

メガ  
一応、MKID の読み出しに成功して  
いるが、解決すべき課題がある

ADC

2 ch, 14 bit, 250 MSPS

[\*]: <http://www.4dsp.com/FMC150.php>

本研究はここから

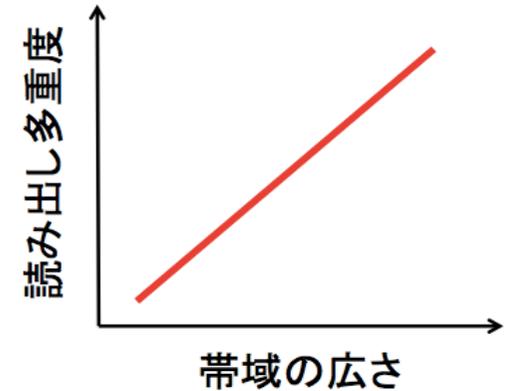
# 解決すべき課題

# LPF による帯域の制限

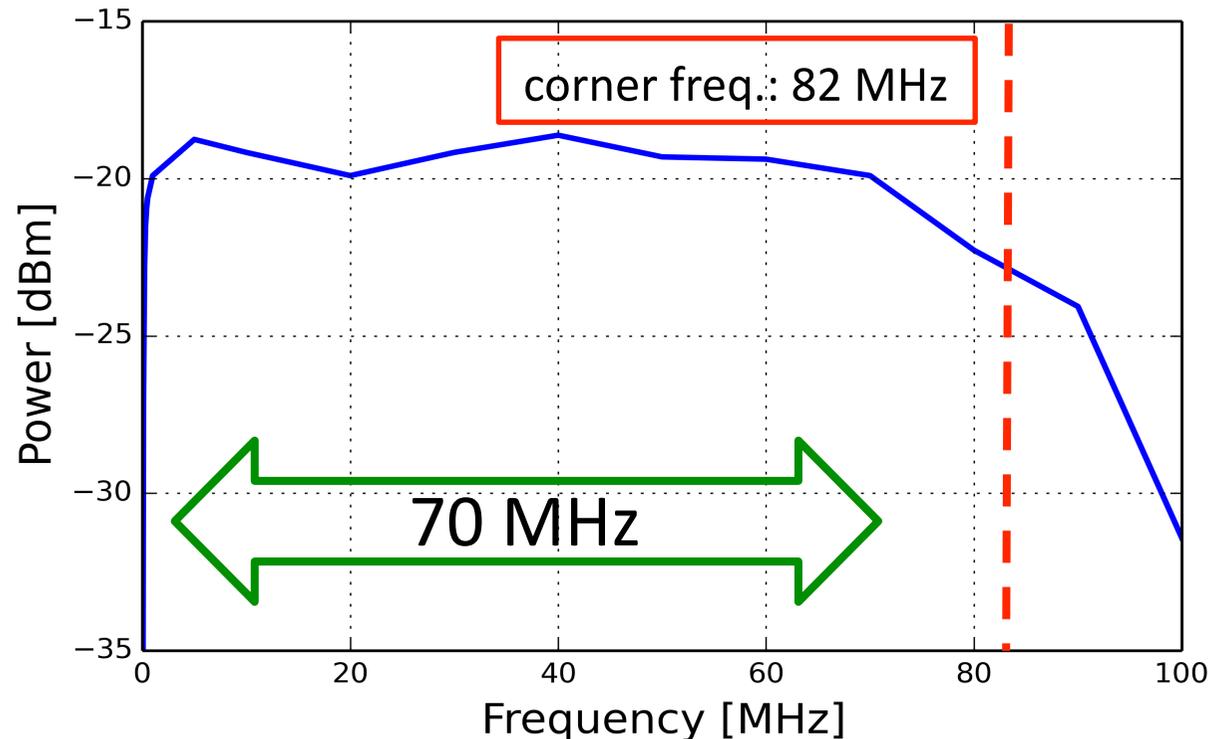
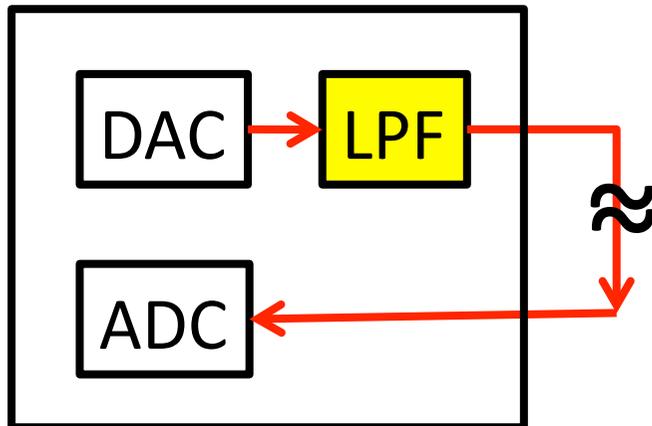
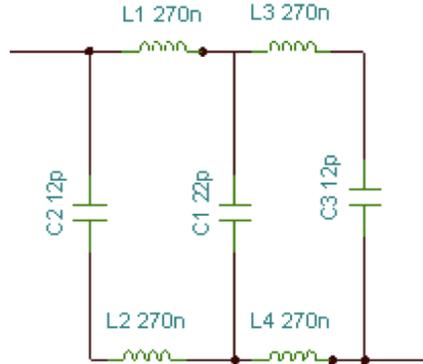
帯域の広さは読み出し多重度に比例

しかし、DAC 出口に Low-pass filter (LPF) が実装

→ 帯域を実質 70 MHz 以下に制限



5<sup>th</sup> order  
Chebyshev LPF



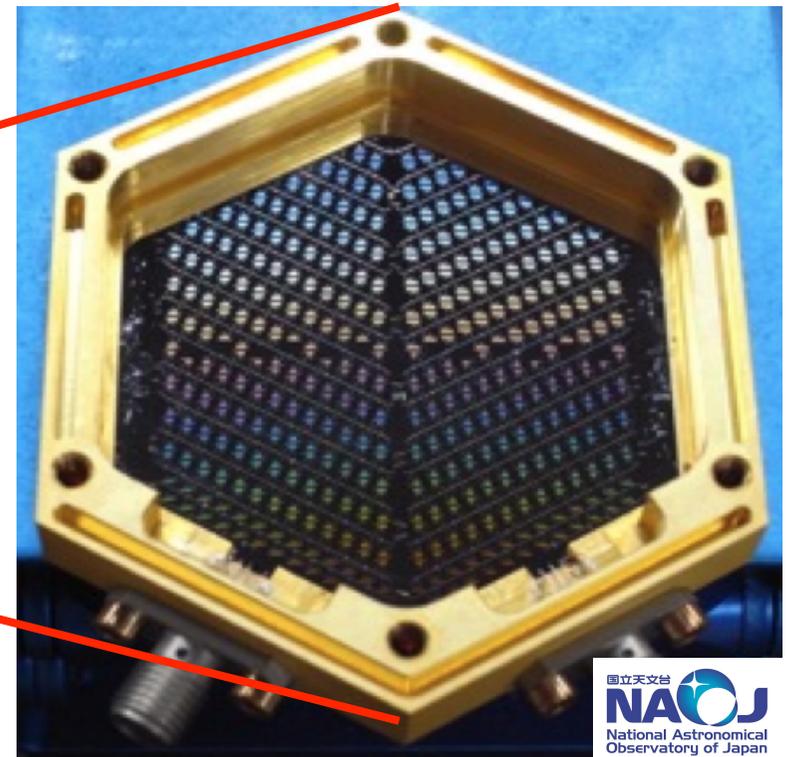
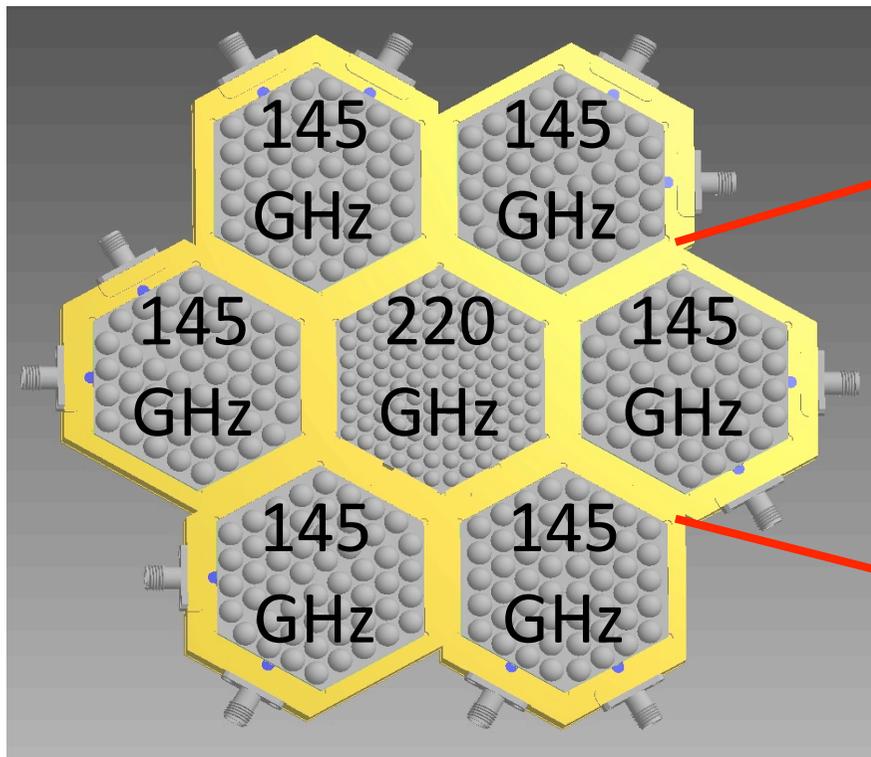
# GB からの帯域の要求値

MKID の共振ピーク間隔が 2 MHz とすると

→  $70 \text{ MHz} \times 2 / 2 \text{ MHz} = 70$

GB の読み出し要求値は 104 (@ 145 GHz) ⇔ **帯域 ± 100 MHz**

→ 要求を満たさない



# 消費電力・発熱の過大

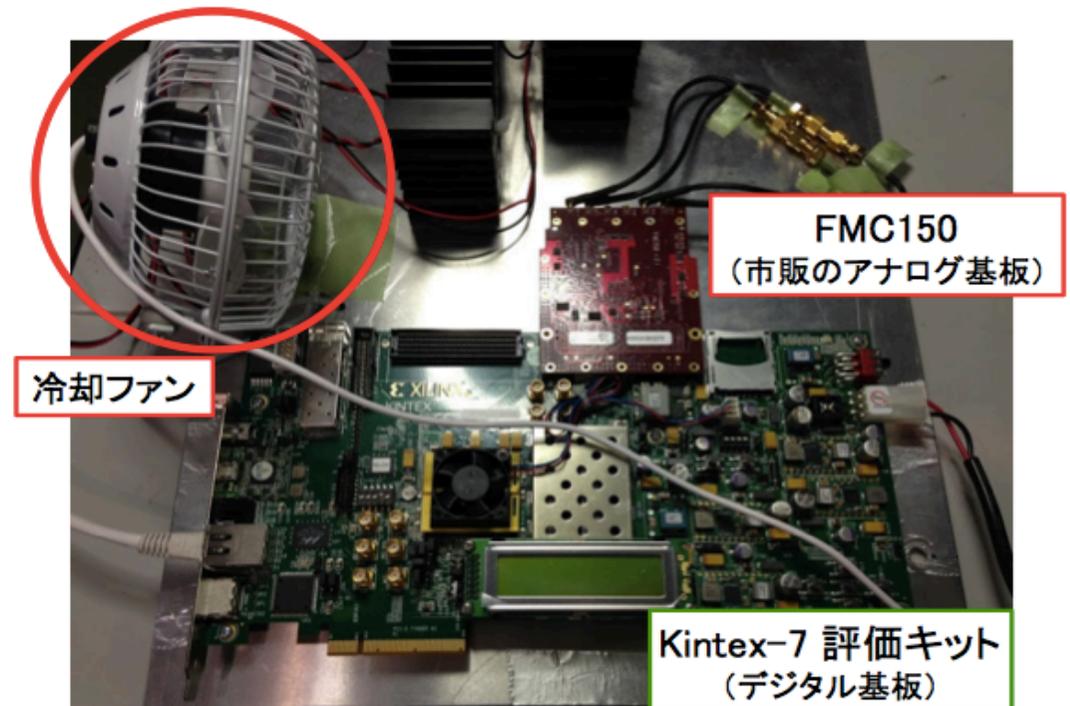
クロック生成器周辺が必要以上に複雑:

- 通信用なので、高級な IC が載っている → 消費電力大 → 発熱
- 読み出し系が不安定に → フロントエンド回路が頻繁に落ちる
- 読み出し多重度を実質 32 に制限

長時間観測を行う CMB 実験で頻繁に落ちる読み出し系は使えない  
→ GB の要求を満たさない

その他:

- 外付け冷却ファンが必須
- レギュレータ等部品が増える
- HDL コードも増える (1,000 行~)
- バグも増える



ここで、みなさんに問題です  
1秒以内に答えてください

$$12.288 \times 7 = ?$$

できましたか？

答えは、

86.016

# ユーザビリティの損失

クロック周波数が人にやさしくない:

- 通信用なので、分周しやすい周波数(245.76 MHz)の発振器が搭載
- ユーザーが調整する周波数分解能が非直感的になる(12.288 kHz)

コネクタの規格が不揃い:

- アナログ基板のコネクタだけ、別の工具、別のケーブルが必要
- コネクタの脱着は、デバック時において日常茶飯事
- ユーザーに余計なストレスを与える

# ユーザビリティの損失

クロック周波数が人にやさしくない:

- 通信用なので、分周しやすい周波数(245.76 MHz)の発振器が搭載
- ユーザーが調整する周波数分解能が非直感的になる(12.288 kHz)

コネクタの規格が不揃い:

- アナログ基板のコネクタだけ、別の工具、別のケーブルが必要
- コネクタの脱着は、デバック時において日常茶飯事
- ユーザーに余計なストレスを与える

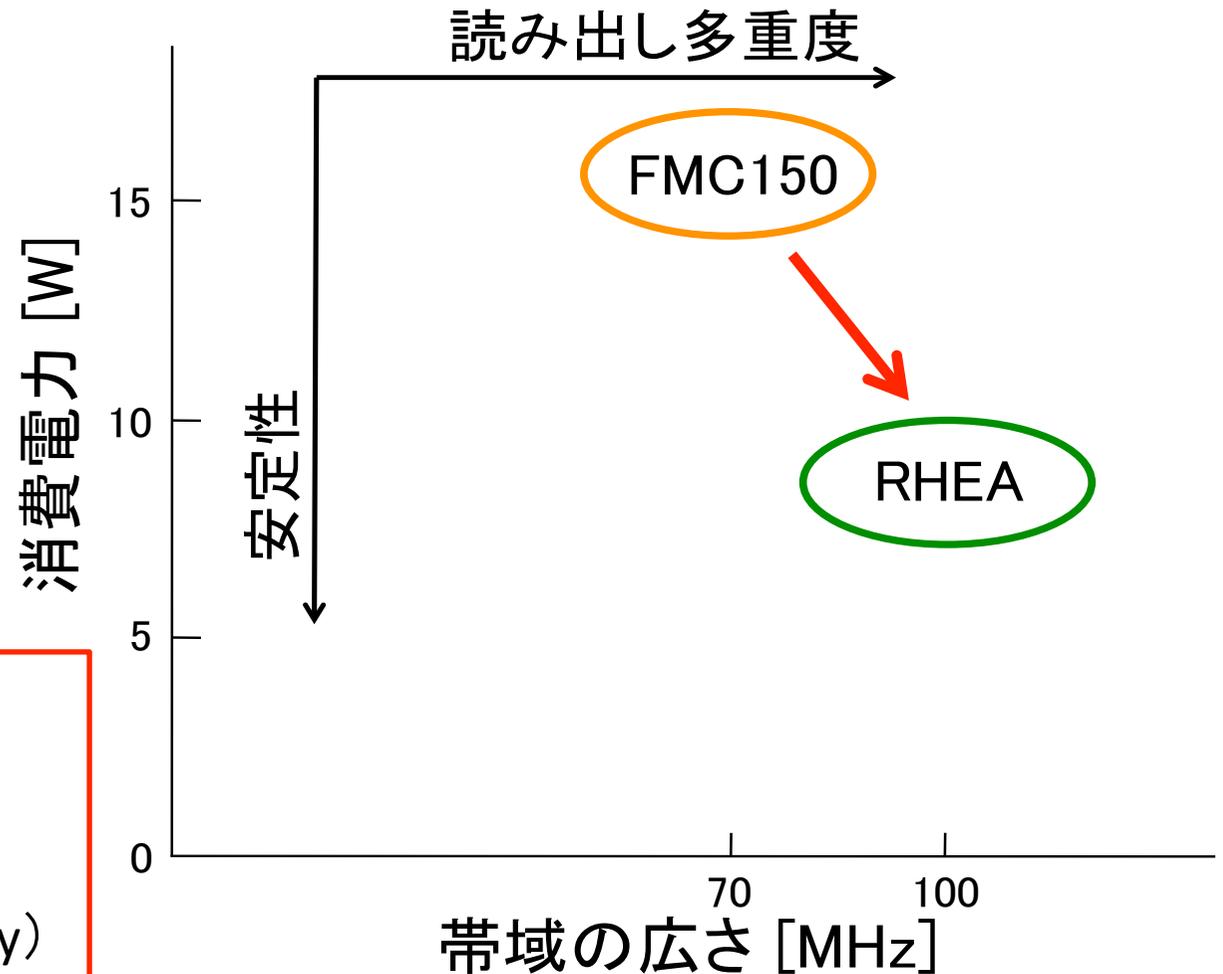
ADC/DAC の性能を活かし、  
無駄な機能を排除した  
シンプルなボードが欲しい！

# 新しいアナログ基板の開発

RHEA (Rhea is a High spEed Analog board)



南米に住む陸鳥 (ground bird)  
時速 60 km/h の俊足  
(Wikipedia より)

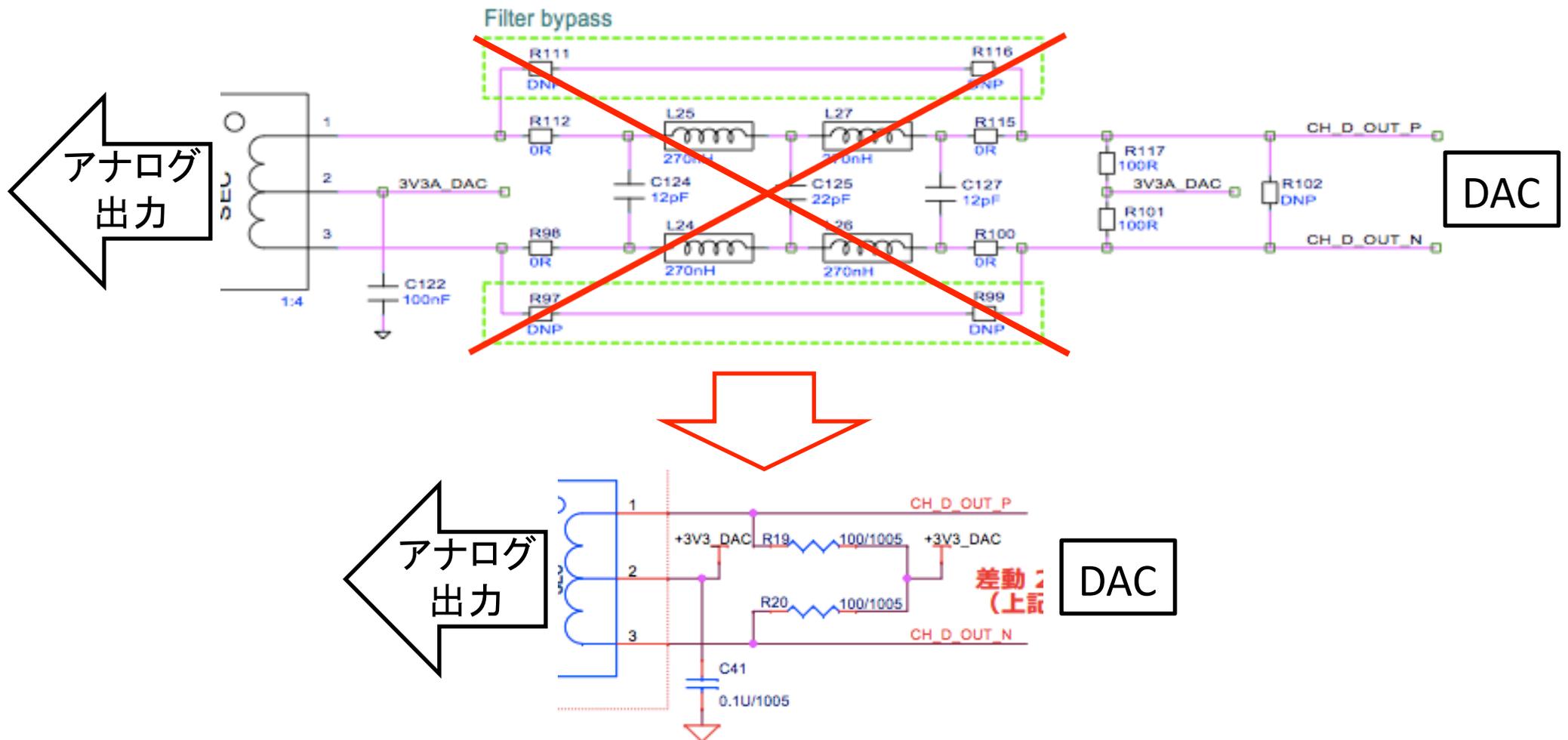


より広く！ (広帯域)  
より軽やかに！ (省電力)  
よりやさしく！ (User-friendly)  
そして、コケない！

広帯域化

# LPF

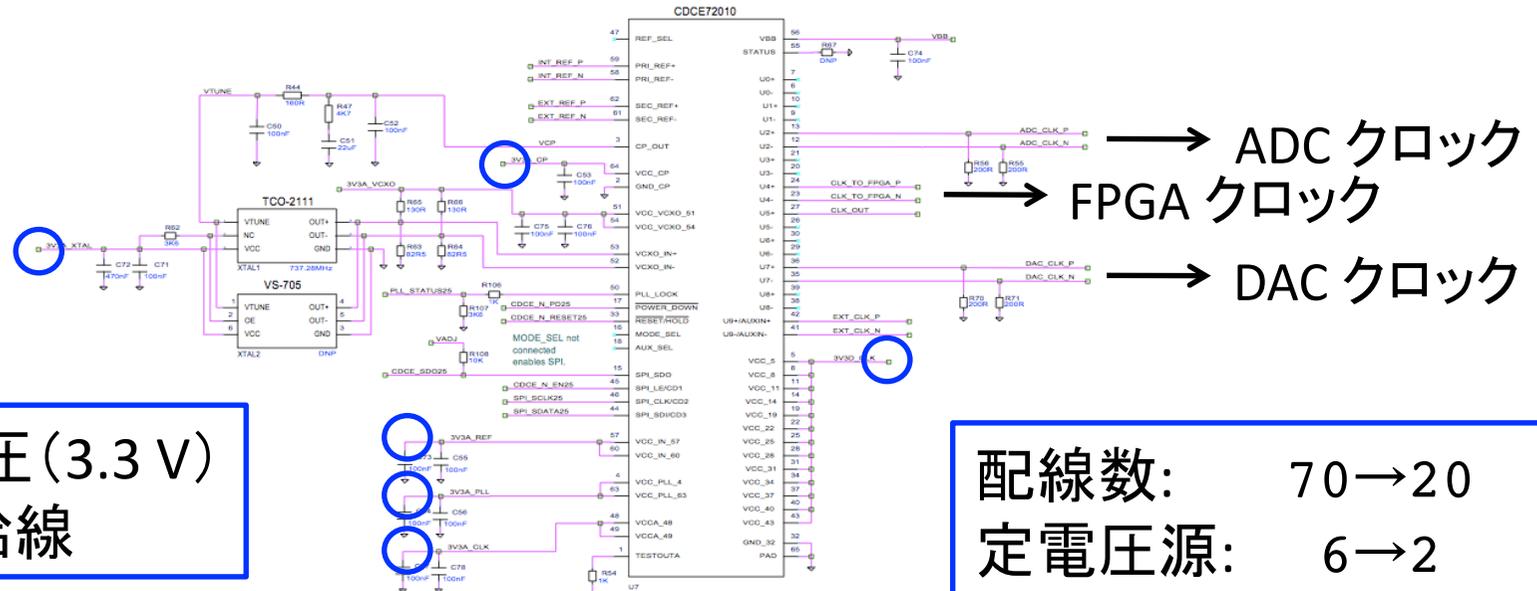
DAC 出力部分のキャパシタとインダクタからなる LPF を排除



省電力化  
& 利便化

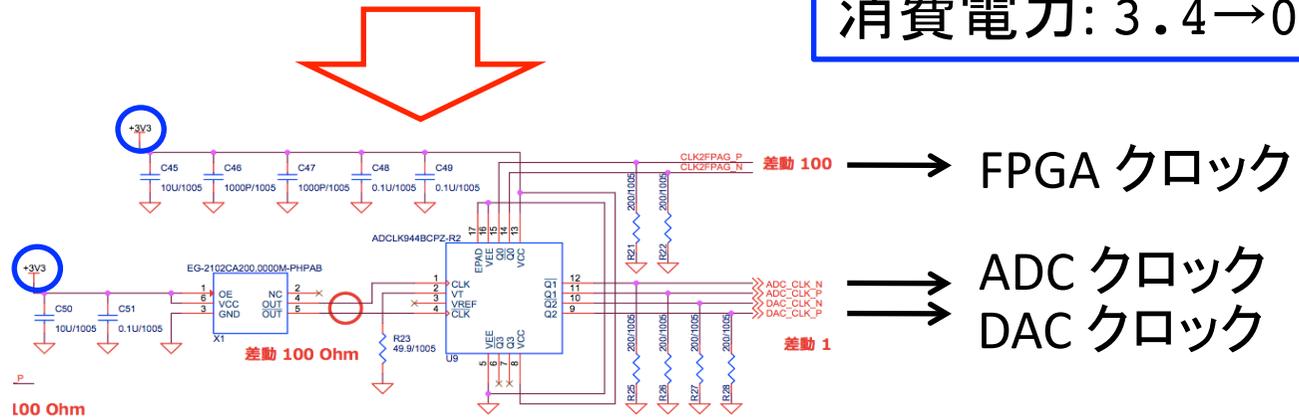
# クロック生成器周辺

PLL → Clock fanout buffer、周波数: 245.76 MHz → 200 MHz



○: 定電圧 (3.3 V)  
供給線

配線数: 70 → 20  
定電圧源: 6 → 2  
消費電力: 3.4 → 0.62 W

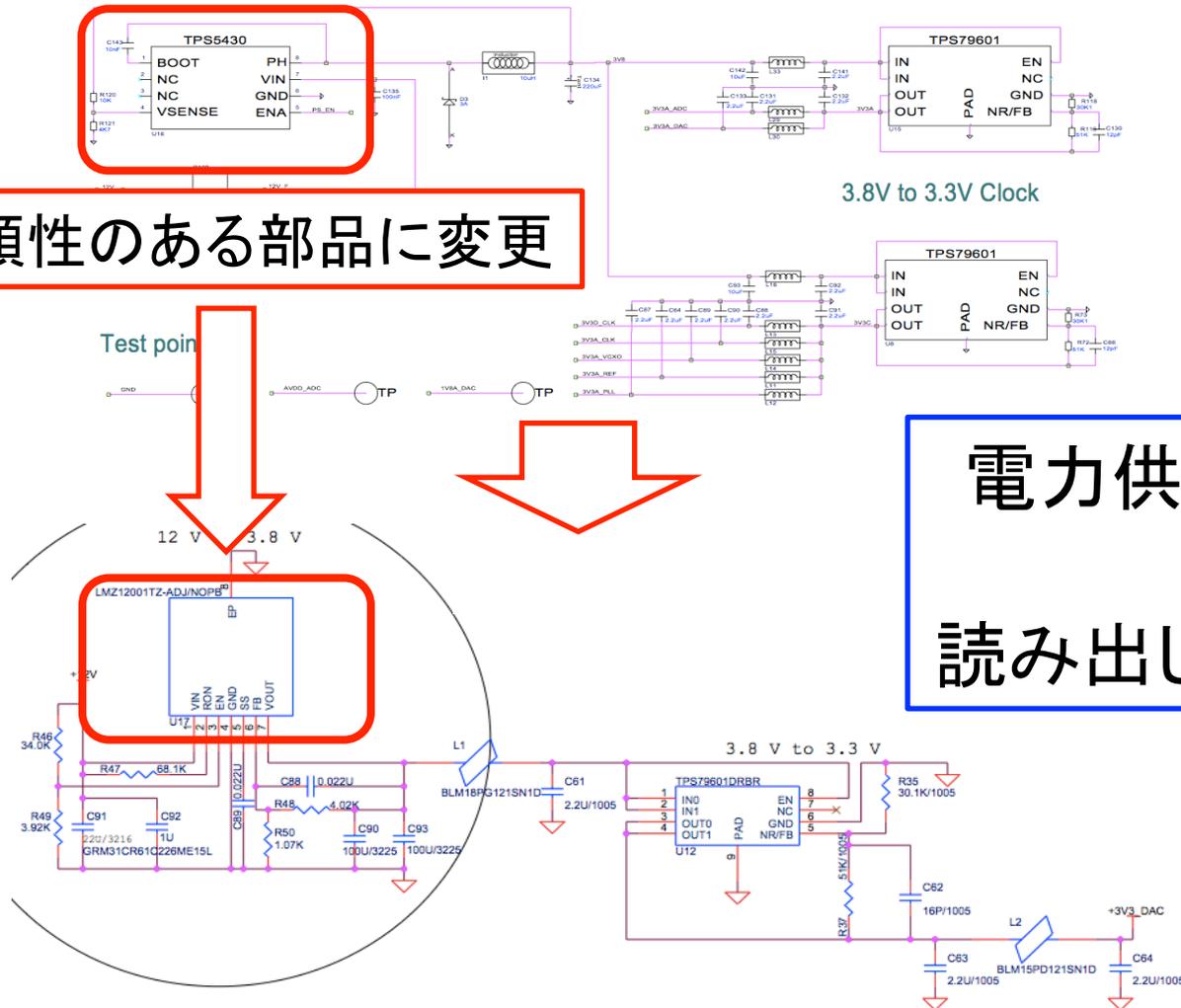


安定化

# 電源回路

## 電源回路を簡素化 & IC の再選定

信頼性のある部品に変更



# RHEA による改良点

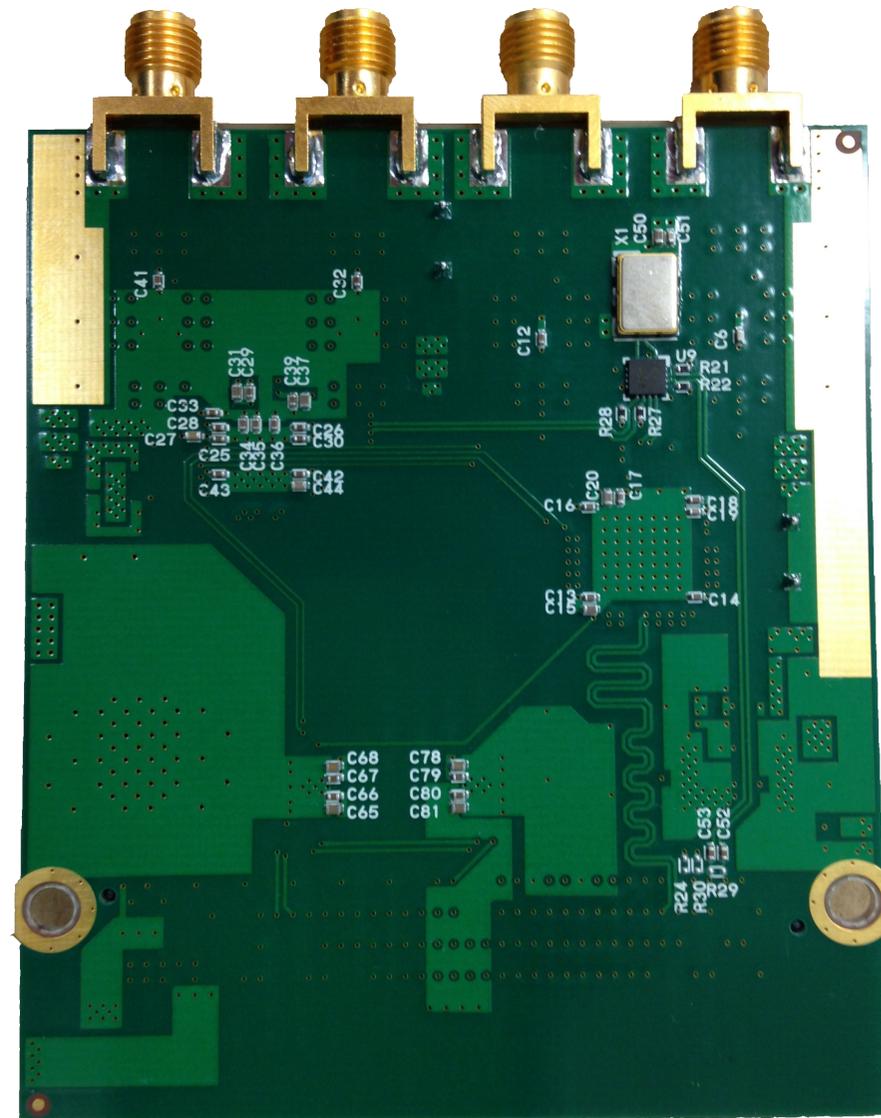
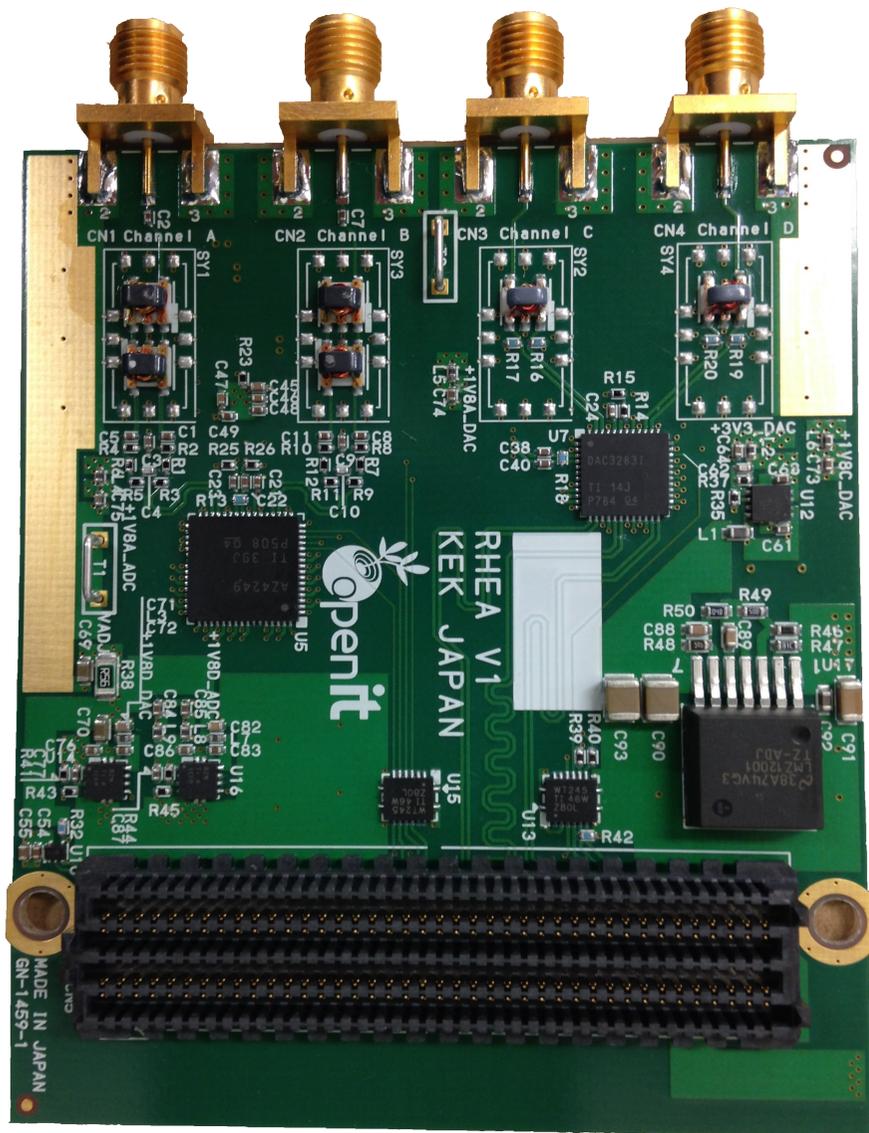
- ADC/DAC は現ボードとほぼ同じ IC を採用
  - ADC: 2 ch, 14 bit, 250 MSPS (省電力版)
  - DAC: 2 ch, 16 bit, 800 MSPS
- LPF を排除
  - 帯域 +60 MHz (30% Up)
- クロック・電源周辺見直し
  - PLL 排除。よりシンプルな回路に変更
  - 消費電力半分
- ユーザビリティ向上
  - クロック周波数を直感的な周波数 (200 MHz) に変更
  - コネクタ規格を SMA に統一

さらに、

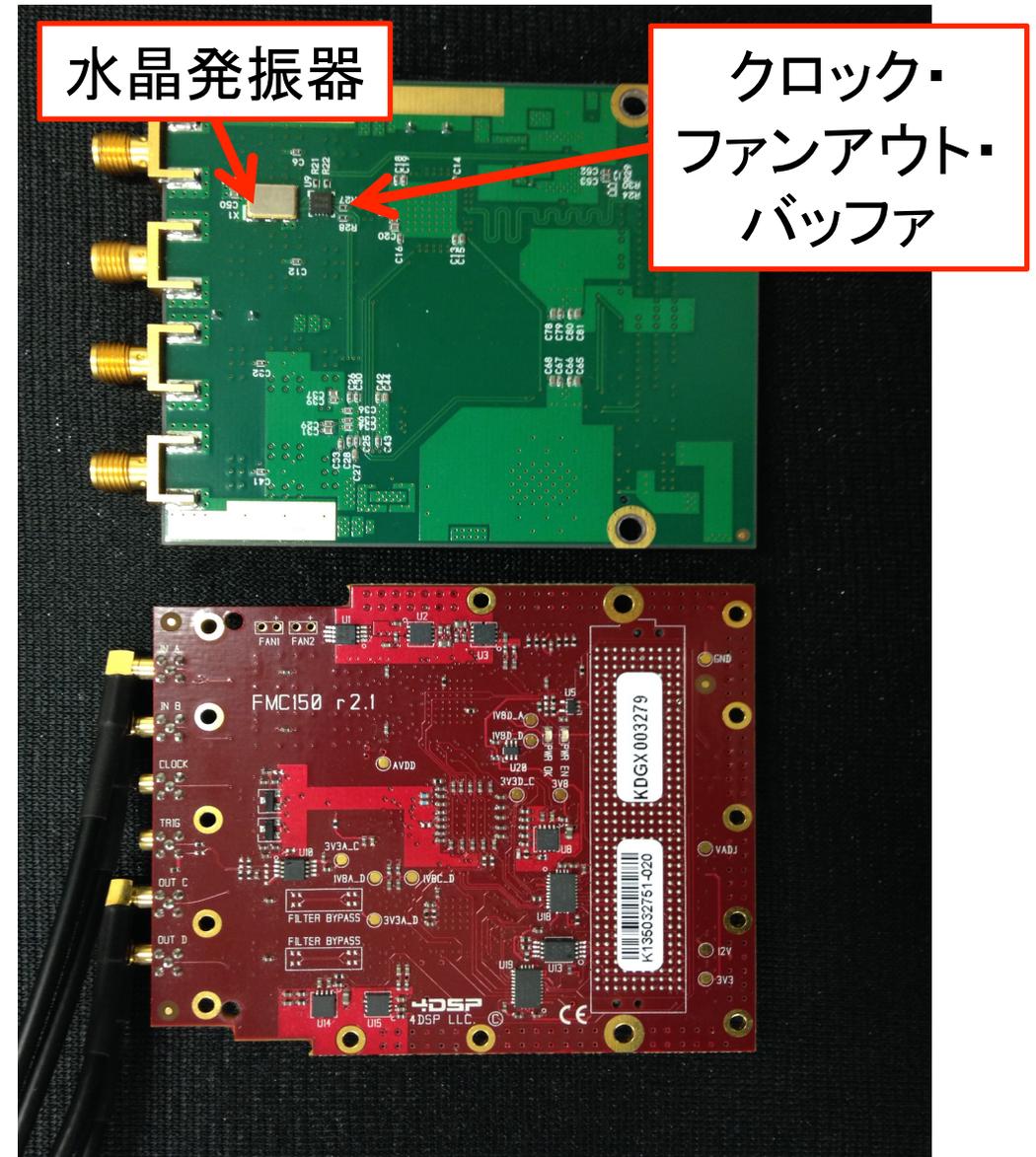
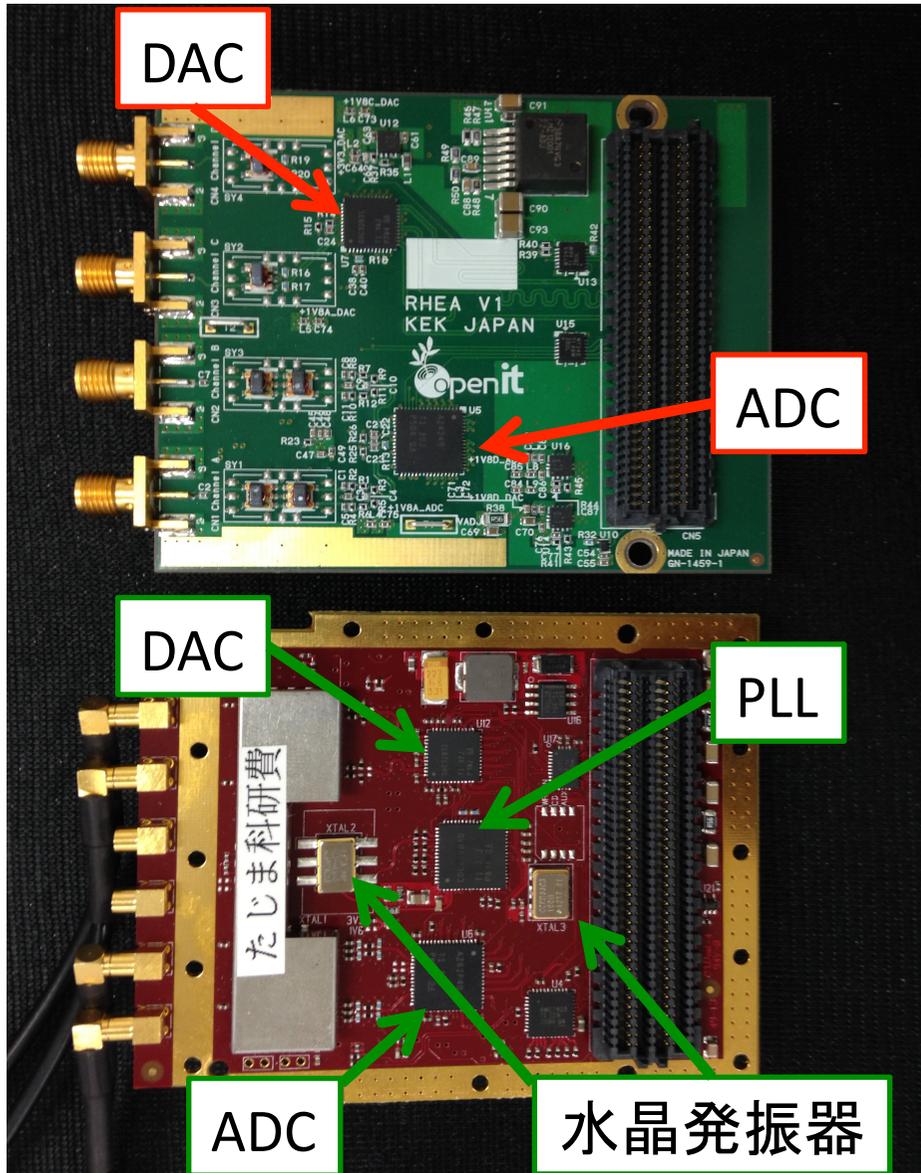
- お買い得
  - 1 枚 80 万円<sup>[\*]</sup> → 46 万円 (デザイン料込)
  - 量産する場合は 12 万円 (7 枚買ったとして、およそ 400 万円もお得！)

[\*]: FPGA とセットで買うと 50 万円にディスカウント

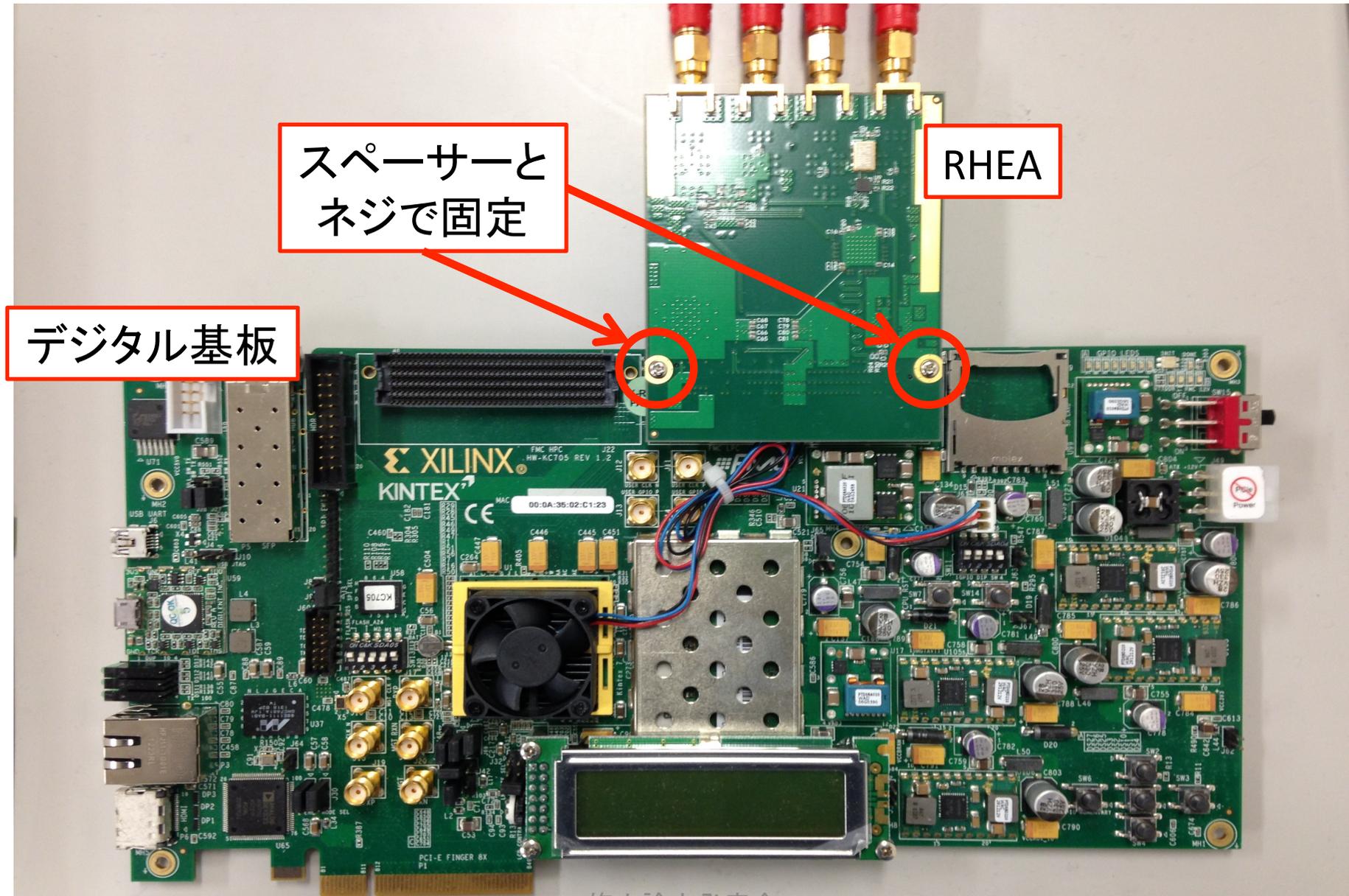
# 新アナログ基板 RHEA Ver. 1.0



# 市販品 (FMC150) と RHEA



# 新フロントエンド回路

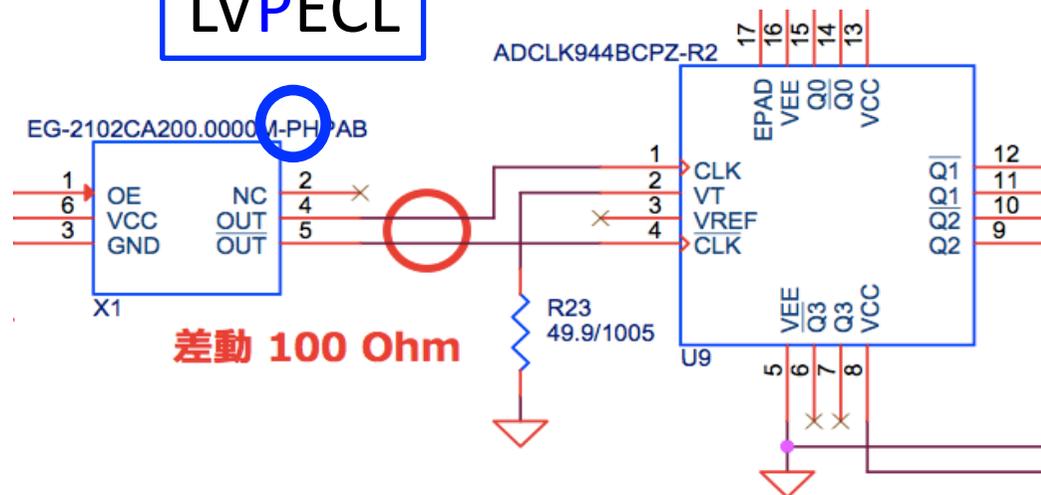
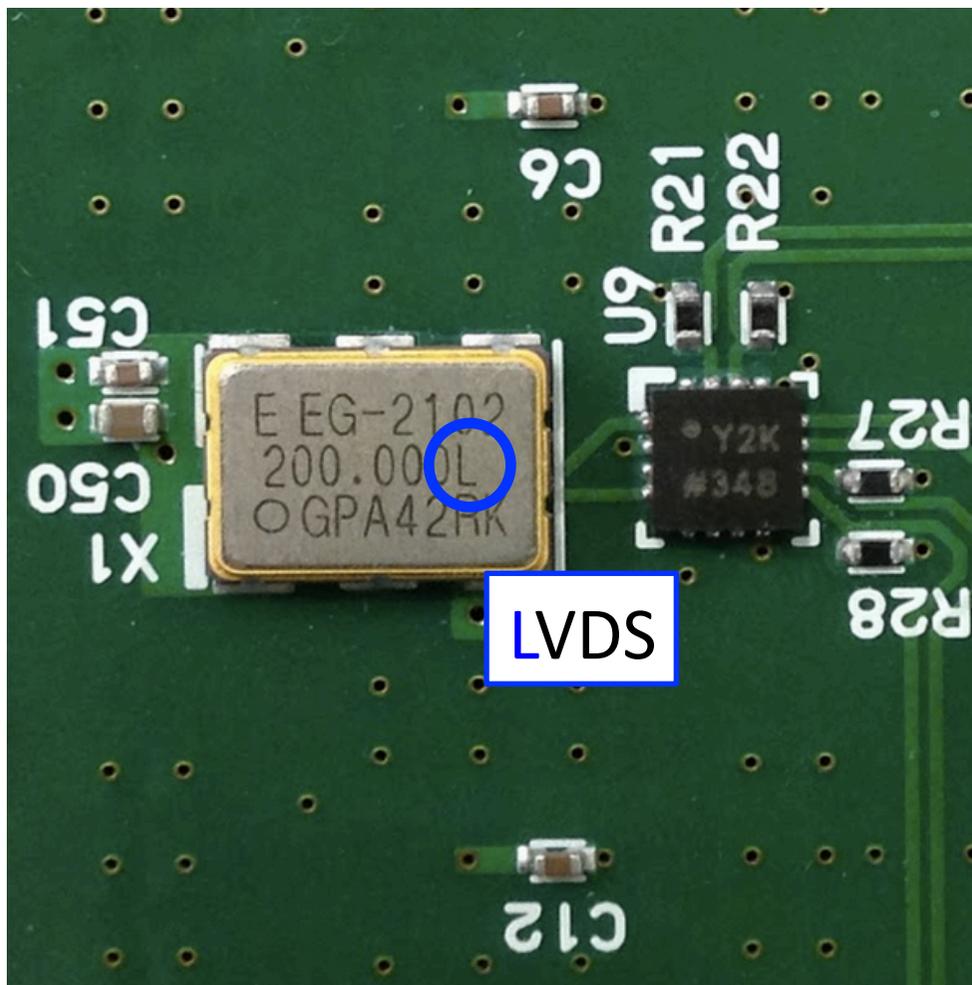


# RHEA の評価

# クロックが出ない？

搭載している水晶発振器が回路図と違った

LVPECL



LVDS を ADCLK944 に入力するには、AC-Coupled する必要がある。  
また、R23 により差動クロックの Common-mode が GND に落ちているため、閾値を超えない。  
つまり、信号は出ない。

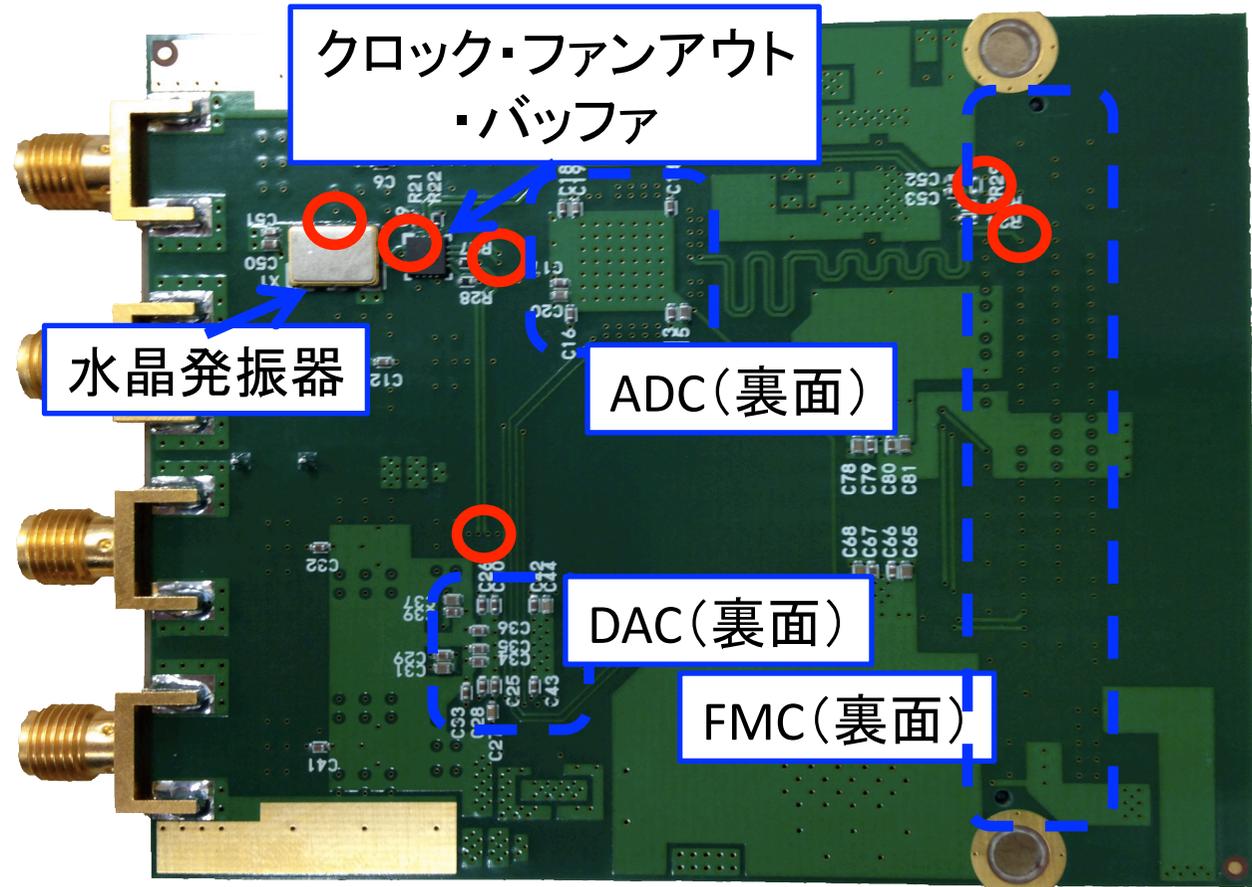
# クロックの確認方法

## 確認方法:

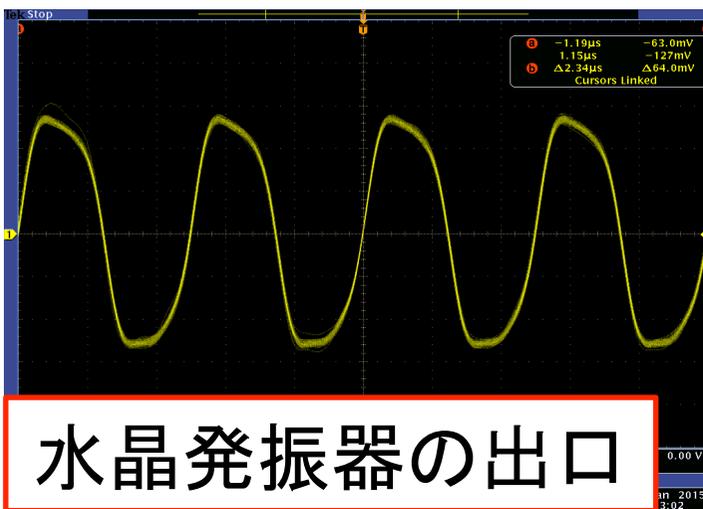
- ○ 部分をオシロスコープでプローブ
- + 厳密には、差動信号をプローブする際は差動プローブを用いるが信号の有無を確認することが目的のためパッシブ・プローブを使う

### Probe point:

- 水晶発振器の出口
- ファンアウトの入口
- ファンアウトの出口
- ADC の入口
- ADC の出口
- DAC の入口



# 水晶発振器を交換



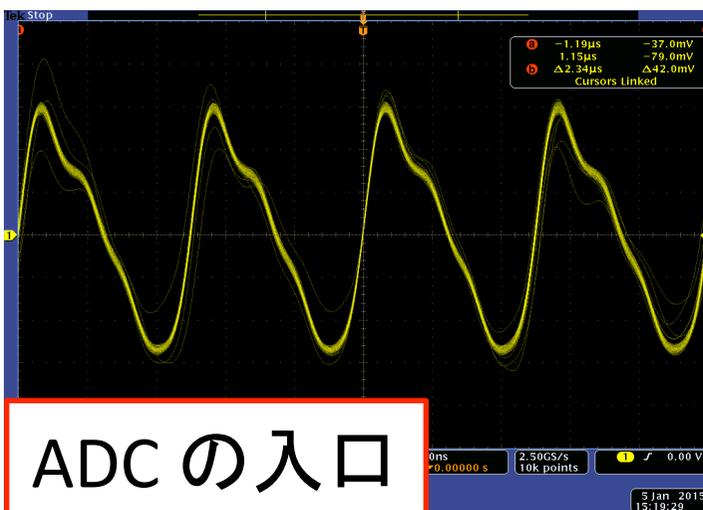
水晶発振器の出口



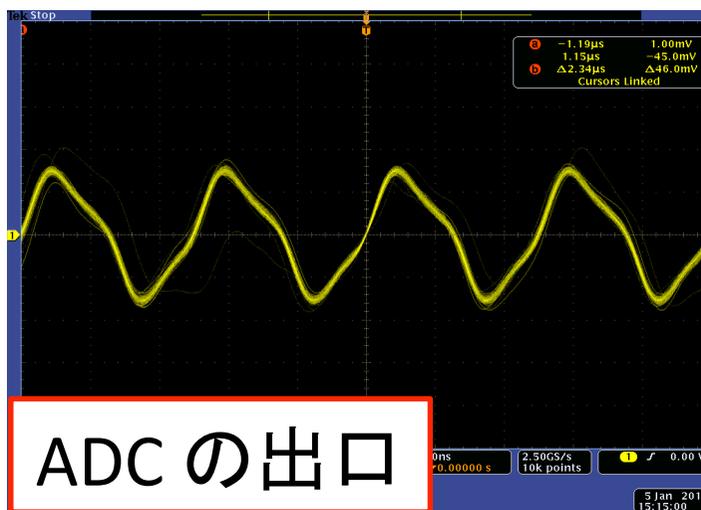
ファンアウトの入口



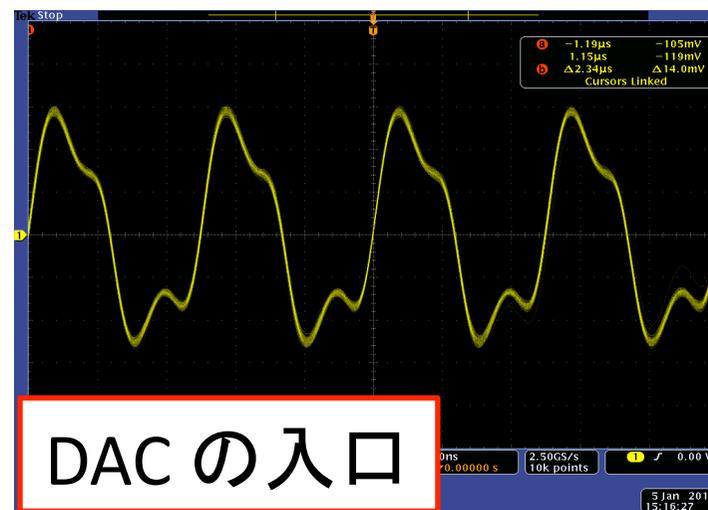
ファンアウトの出口



ADC の入口



ADC の出口



DAC の入口

# 水晶発振器を交換

FPGA を使ってクロック分配の  
安定性を確認

ファンアウトの出口

ADC の入口

ADC の出口

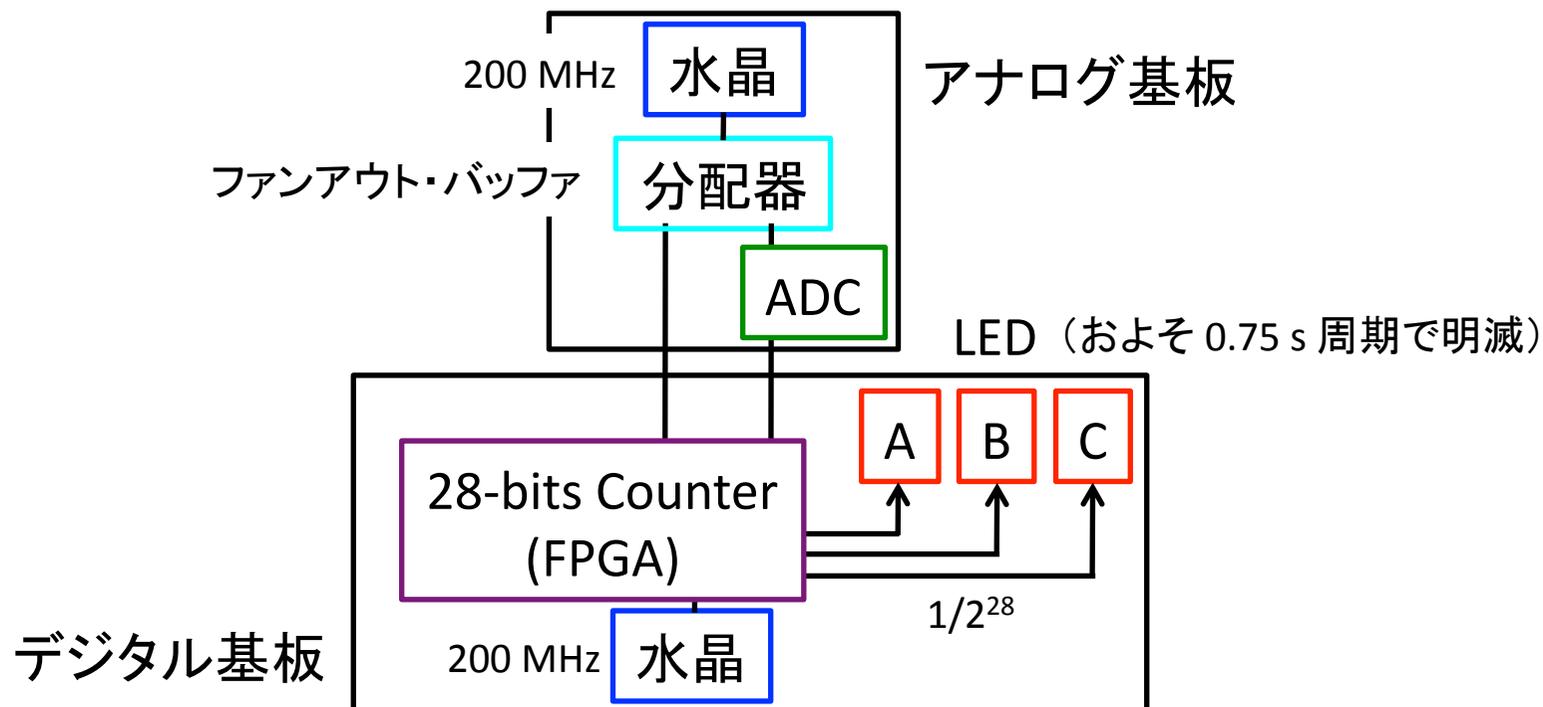
DAC の入口

# クロック分配の安定性確認

アナログ基板からのクロックとデジタル基板上のクロックを比較:

1. 28-bits counter を FPGA に実装、MSB を LED に出力 ( $1/2^{28}$  に down-sample)
2. 3 つのクロックを同時にカウント・アップ
3. 1 日放置して、ズレを確認

もし、クロック抜け等があれば、そのクロックは大きくズれる



# クロック分配の安定性確認

アナログ基板からのクロックとデジタル基板上的クロックを比較:

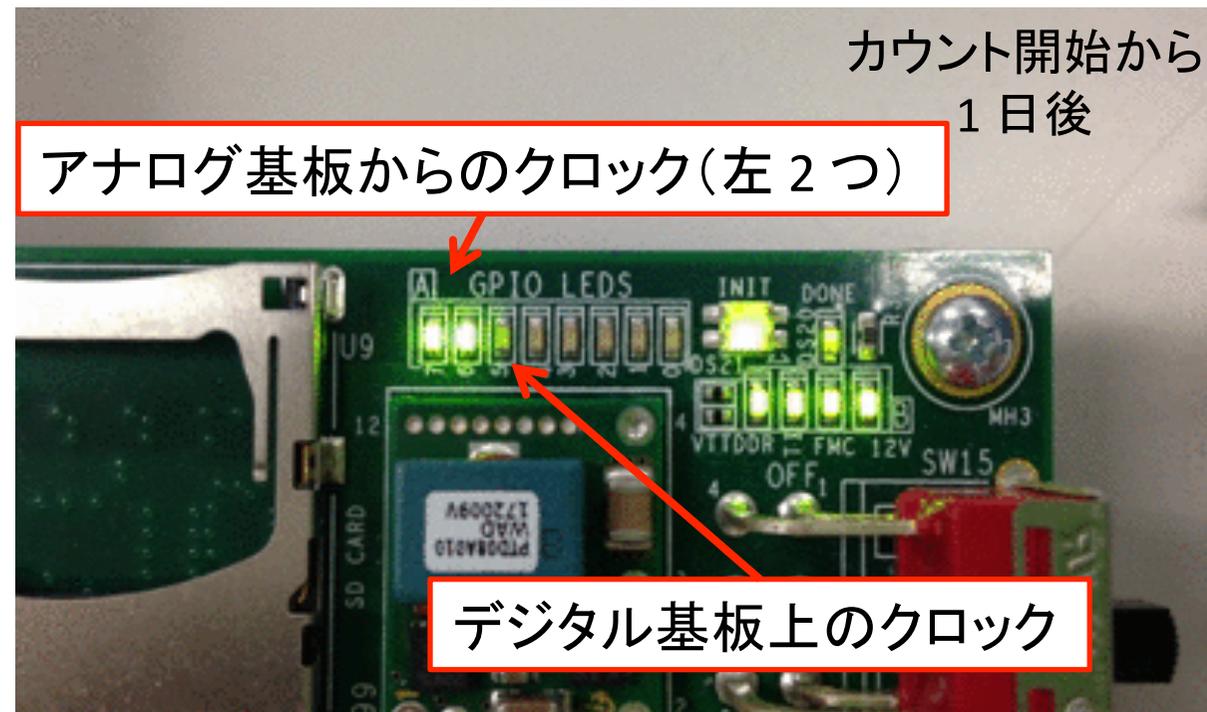
1. 28-bits counter を FPGA に実装、MSB を LED に出力 ( $1/2^{28}$  に down-sample)
2. 3 つのクロックを同時にカウント・アップ
3. 1 日放置して、ズレを確認

もし、クロック抜け等があれば、そのクロックは大きくズレル

アナログ基板からのクロック  
とデジタル基板上的クロック  
のズレ:

$\sim 10^{-5} < \text{水晶の仕様} (10^{-4})$

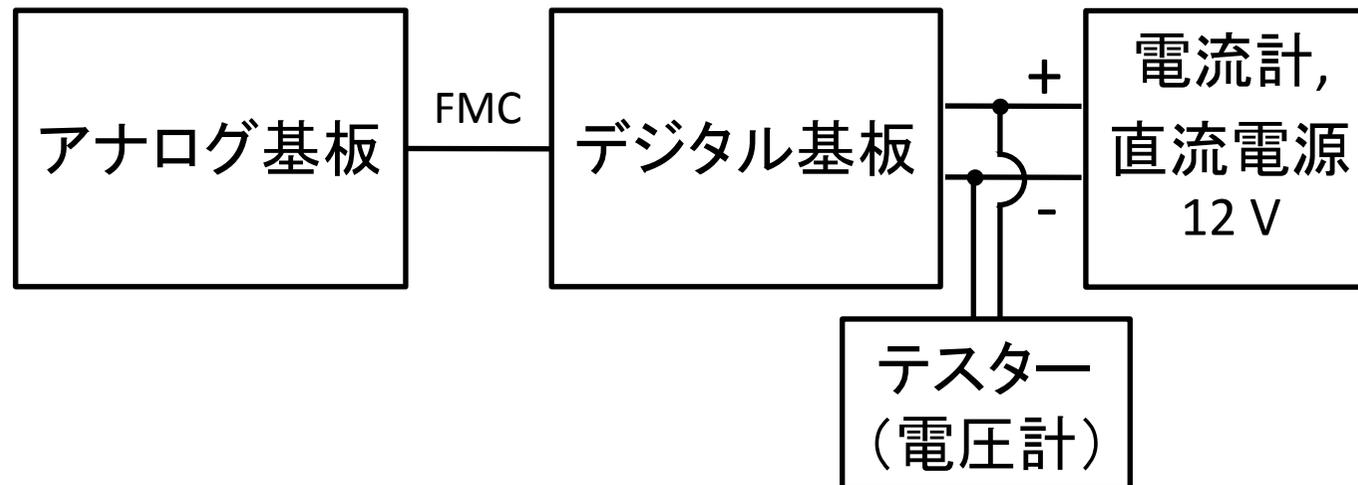
差動クロック信号がきれいに  
分配されていることを間接的に確認



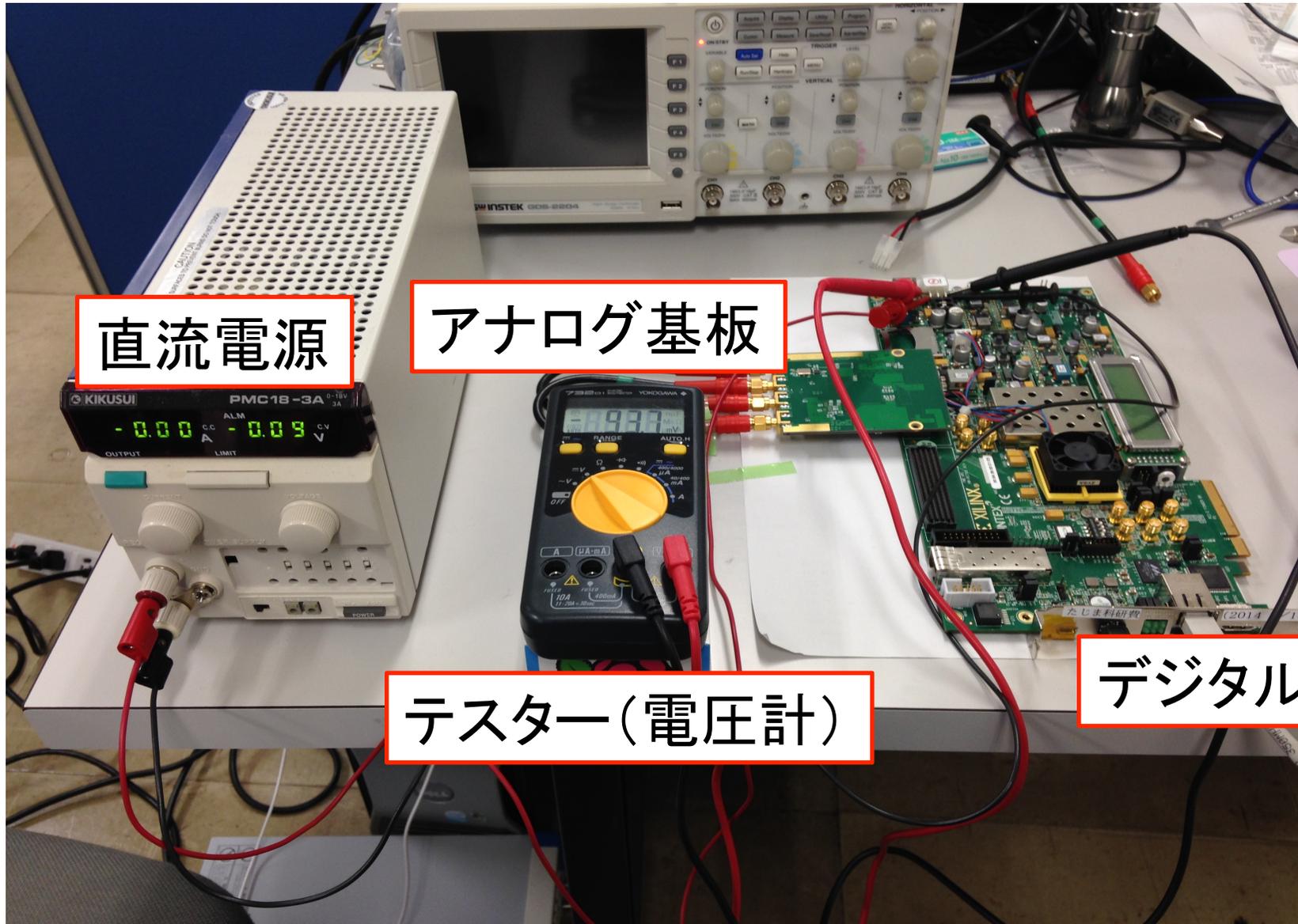
# 消費電力の評価

## 評価方法:

1. デジタル基板に定電圧源(12 V)で電力を供給
2. 読み出し系を稼働(待機状態、多重度 1、多重度 32)
3. デジタル基板に流れる電流量を計測
4. デジタル基板のみの電流量を差し引く



# 消費電力の評価



# 消費電力の評価 – 結果

状態	消費電力 [W]		電力比 (RHEA/FMC150)
	RHEA	FMC150	
待機状態	1.8	5.9	0.31
読み出し多重度 1	4.7	11.4	0.41
読み出し多重度 32	7.9	15.1	0.52

「従来の半分の消費電力(目標値)」を達成

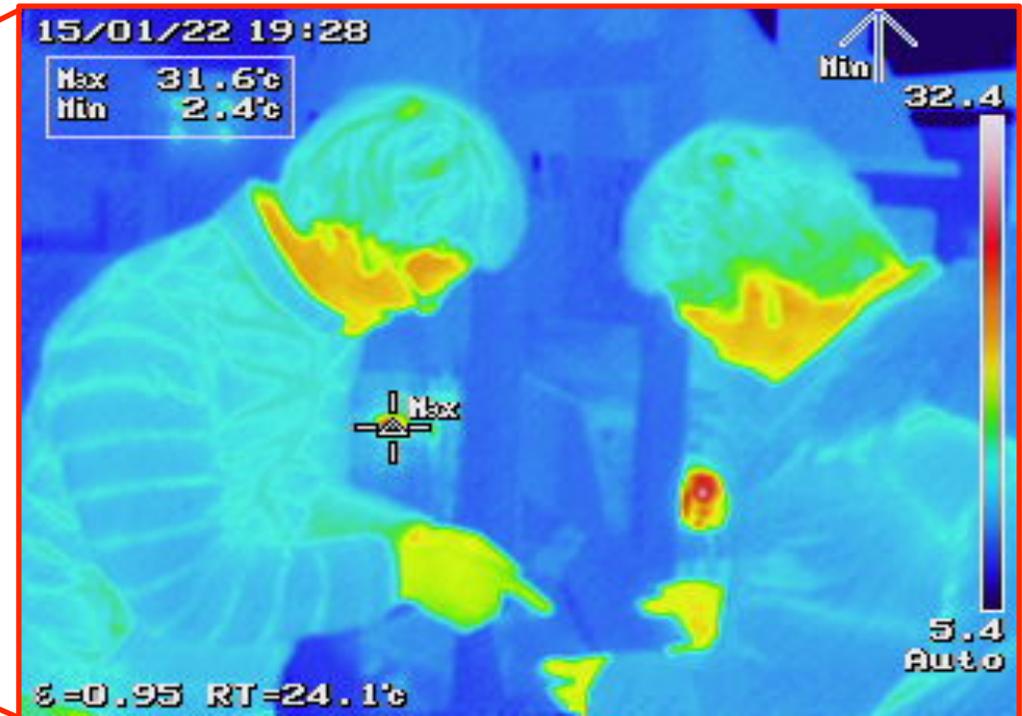
# 基板上 IC の発熱量の評価

赤外線サーモグラフィ[\*]を使って基板表面温度を測定:

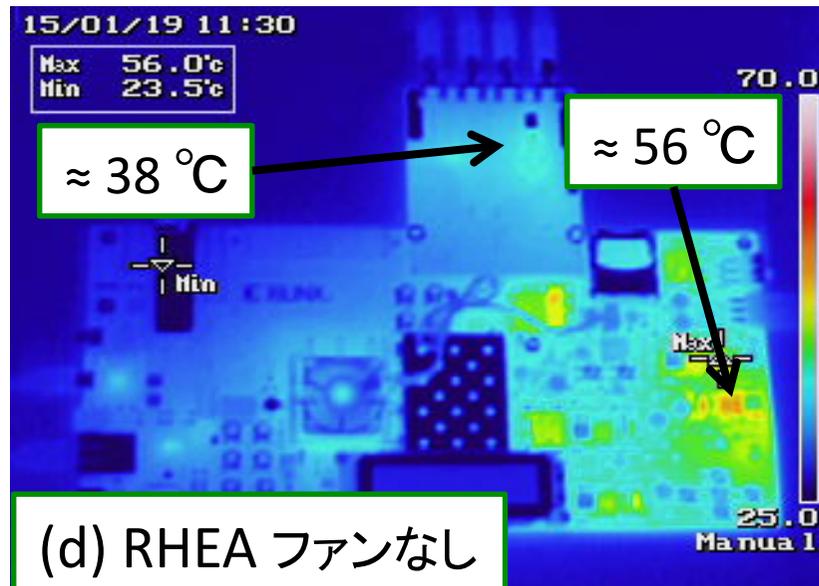
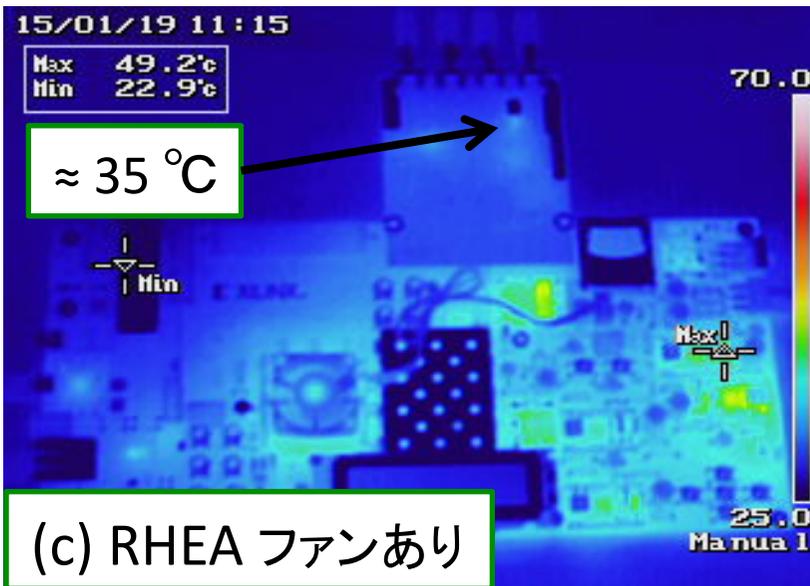
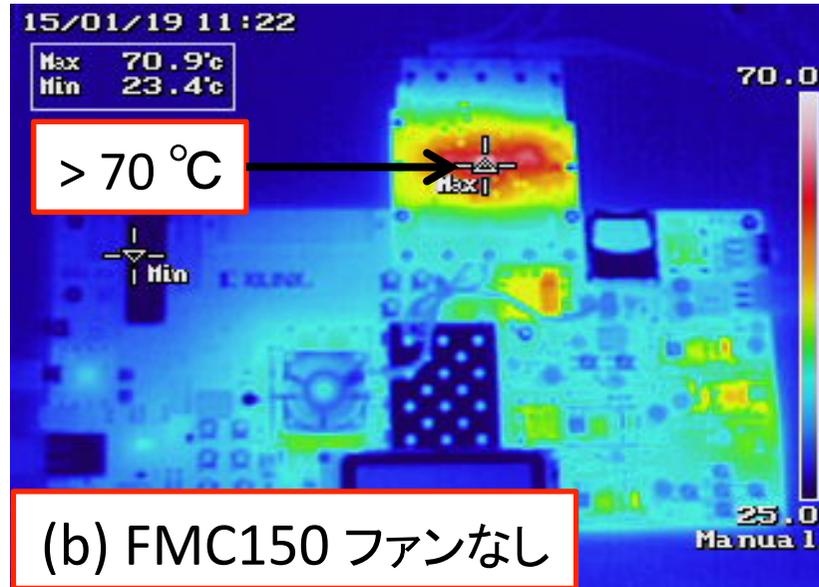
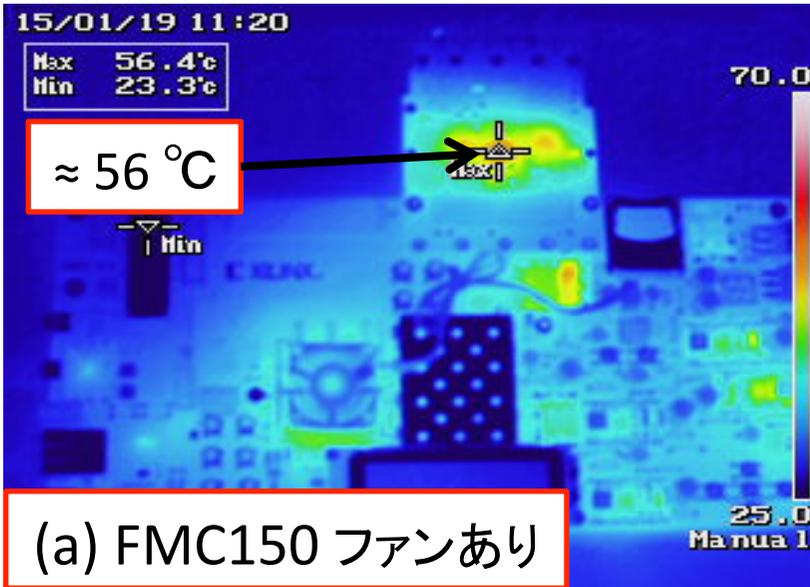
- RHEA と FMC150 を「読み出し多重度 32」で稼働し、それぞれについて冷却ファンあり/なしの温度を計測



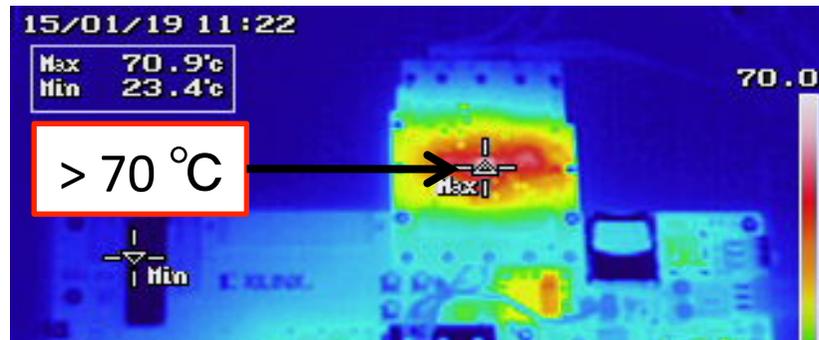
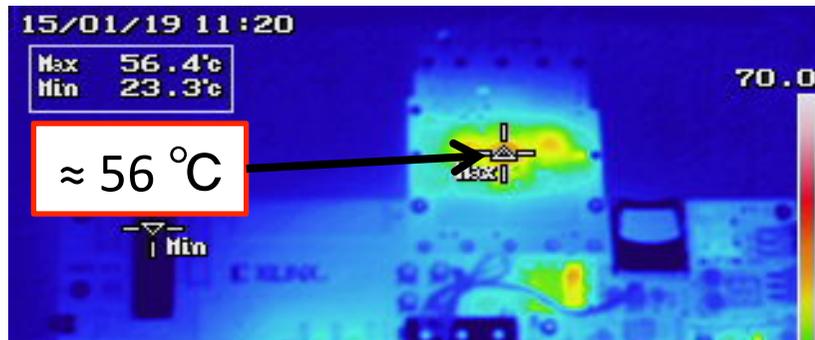
[\*]: Keysight U5855A



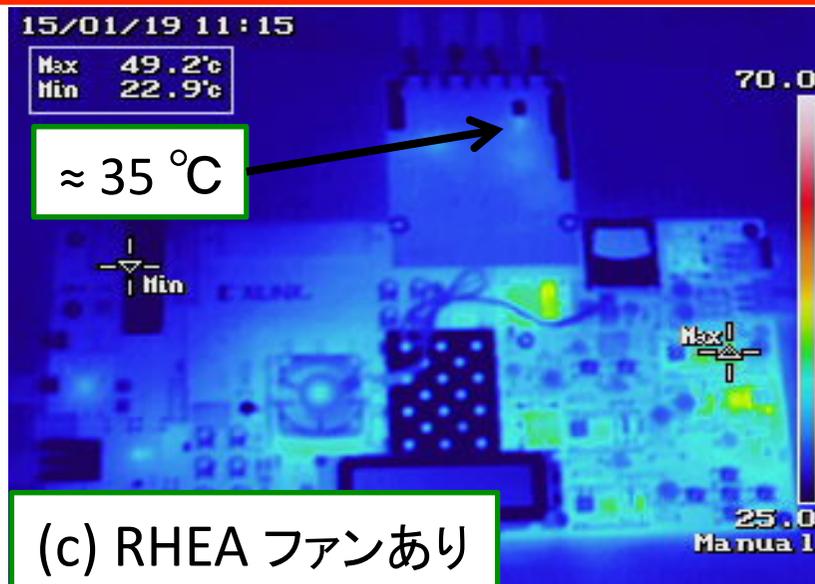
# 基板上 IC の発熱量の評価 - 結果



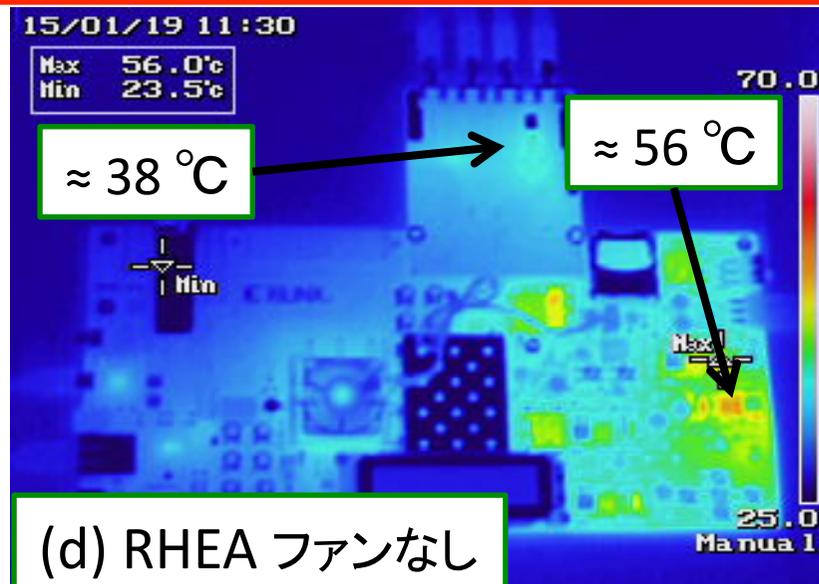
# 基板上 IC の発熱量の評価 - 結果



RHEA はファンあり/なし、どちらも 40°C 以下  
よって、外付け冷却ファンは不要



(c) RHEA ファンあり

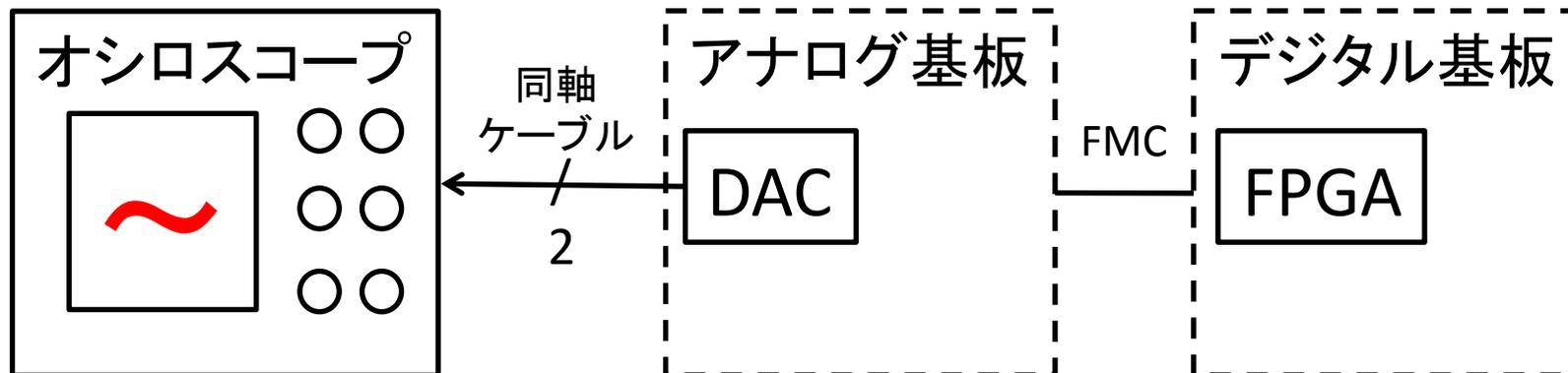


(d) RHEA ファンなし

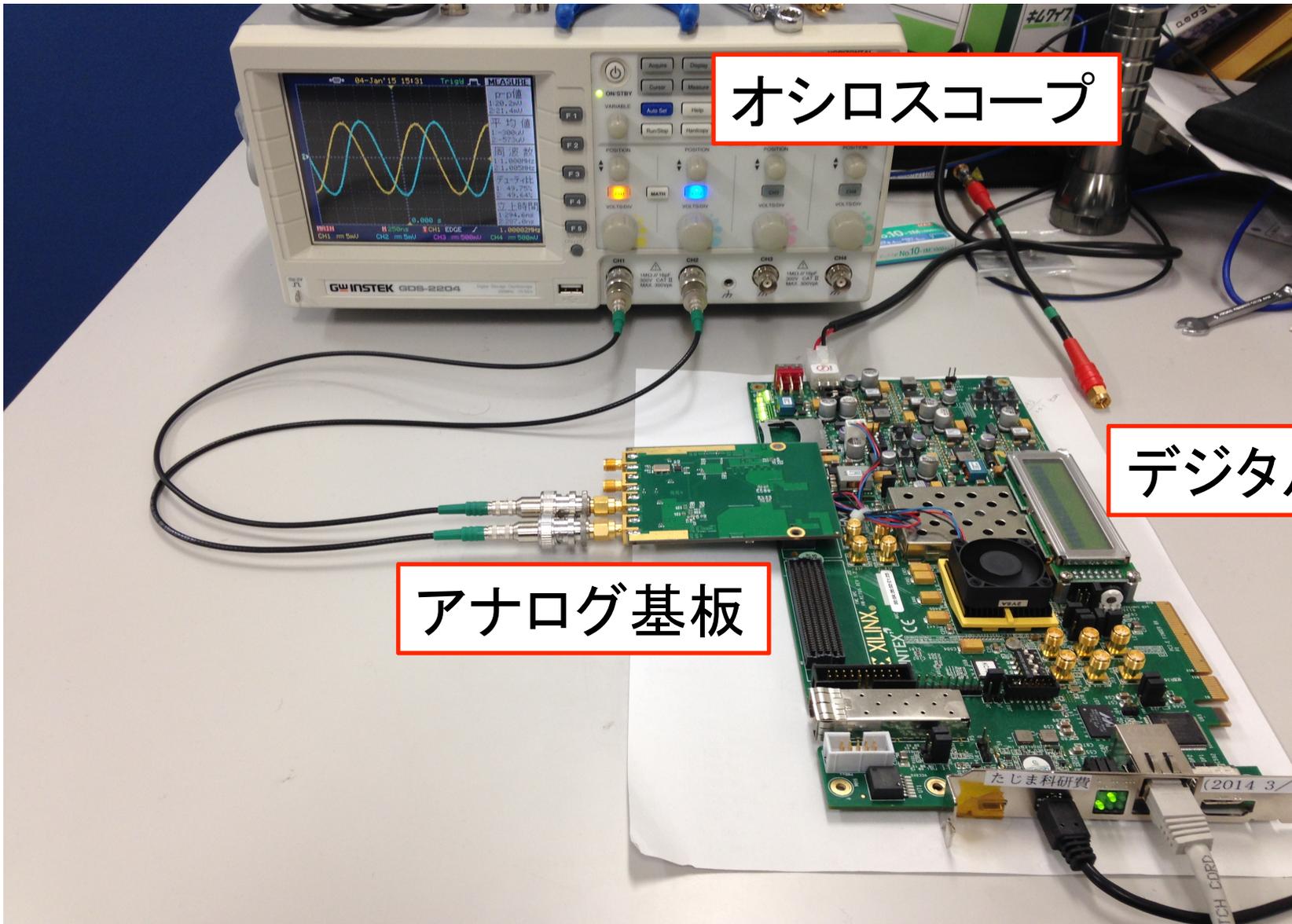
# 帯域の評価

## 評価方法:

1. FPGA である周波数の Sine/Cosine 波を生成
2. 2 ch. の DAC で出力
3. オシロスコープで電圧 (peak-to-peak) を測定
4. 周波数を変えて測定 (以下繰り返し)



# 帯域の評価

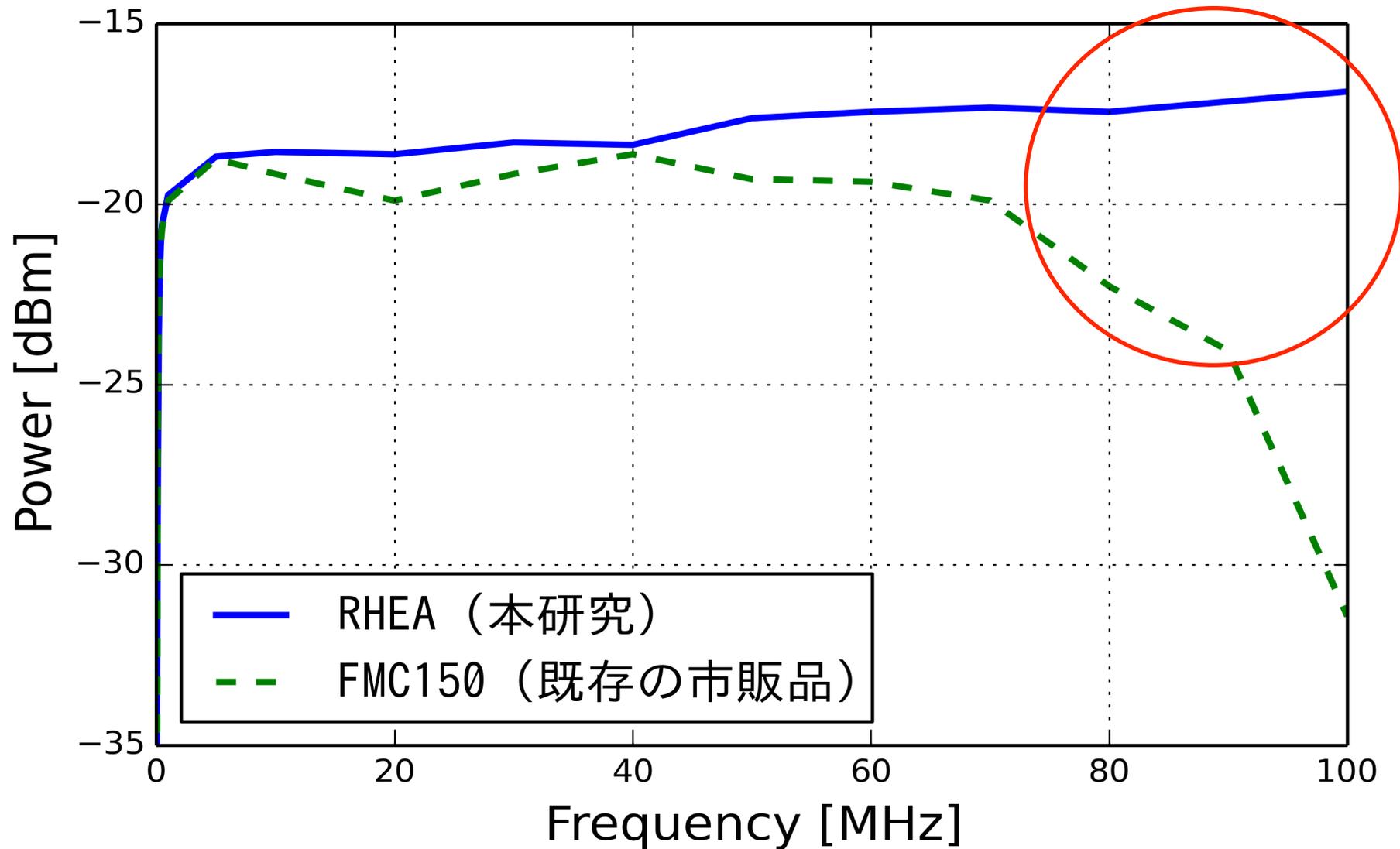


オシロスコープ

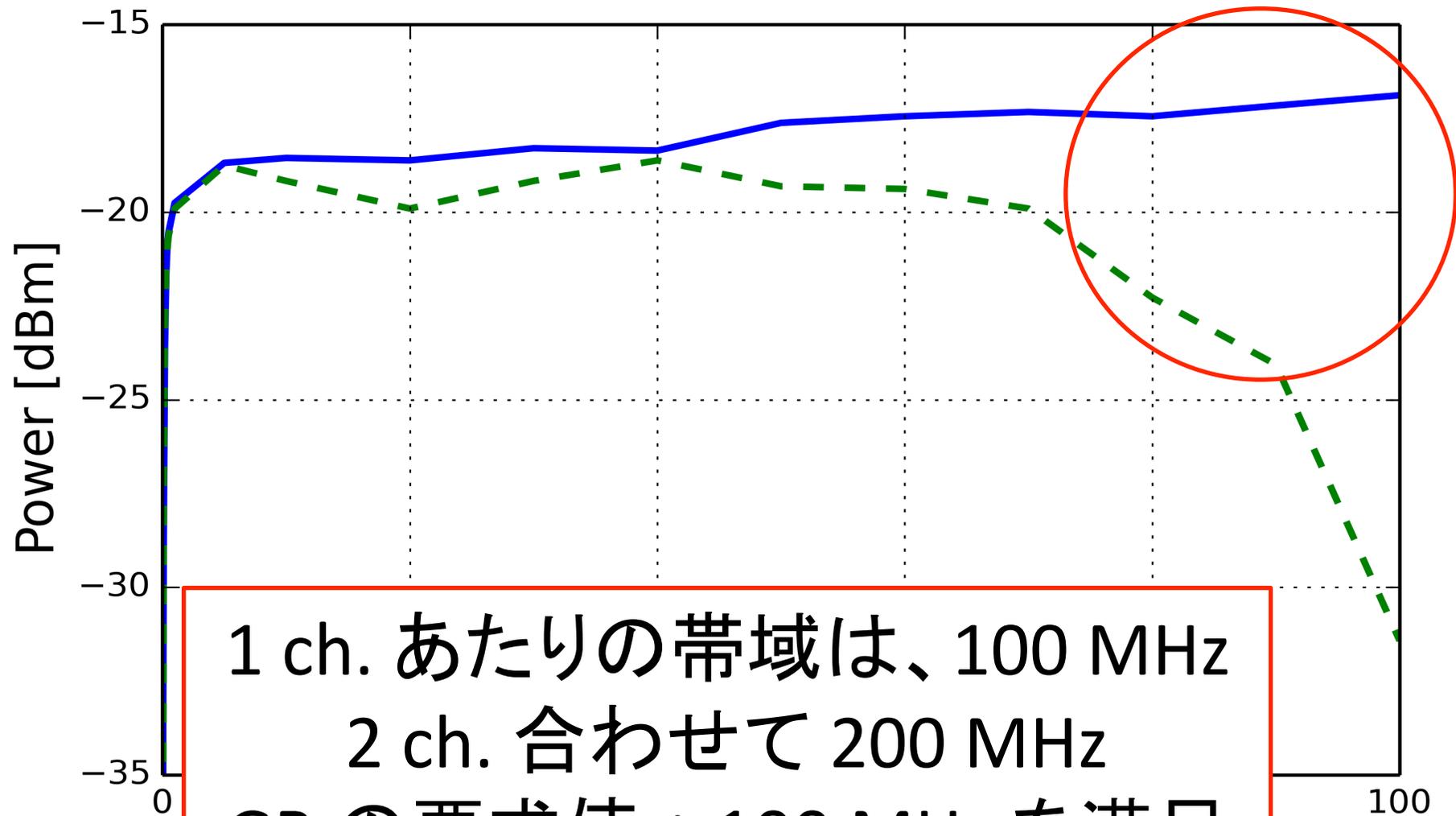
デジタル基板

アナログ基板

# 帯域の評価 - 結果



# 帯域の評価 - 結果



# まとめ

- GroundBIRD に搭載する MKID の読み出し系に用いるフロントエンド回路の開発を行った
- 従来のフロントエンド回路は、市販品で構成していたが、以下の解決すべき課題があった:
  - LPF による帯域制限
  - 消費電力・発熱の過大
  - ユーザビリティの損失
- RHEA により以下が改善した:

# まとめ

- GroundBIRD に搭載する MKID の読み出し系に用いるフロントエンド回路の開発を行った
- 従来のフロントエンド回路は、市販品で構成していたが、以下の解決すべき課題があった:
  - LPF による帯域制限
  - 消費電力・発熱の過大
  - ユーザビリティの損失
- RHEA により以下が改善した:
  - LPF を排除
  - クロック分配方式の簡素化
  - 水晶発振器の周波数の変更、コネクタの統一

# まとめ

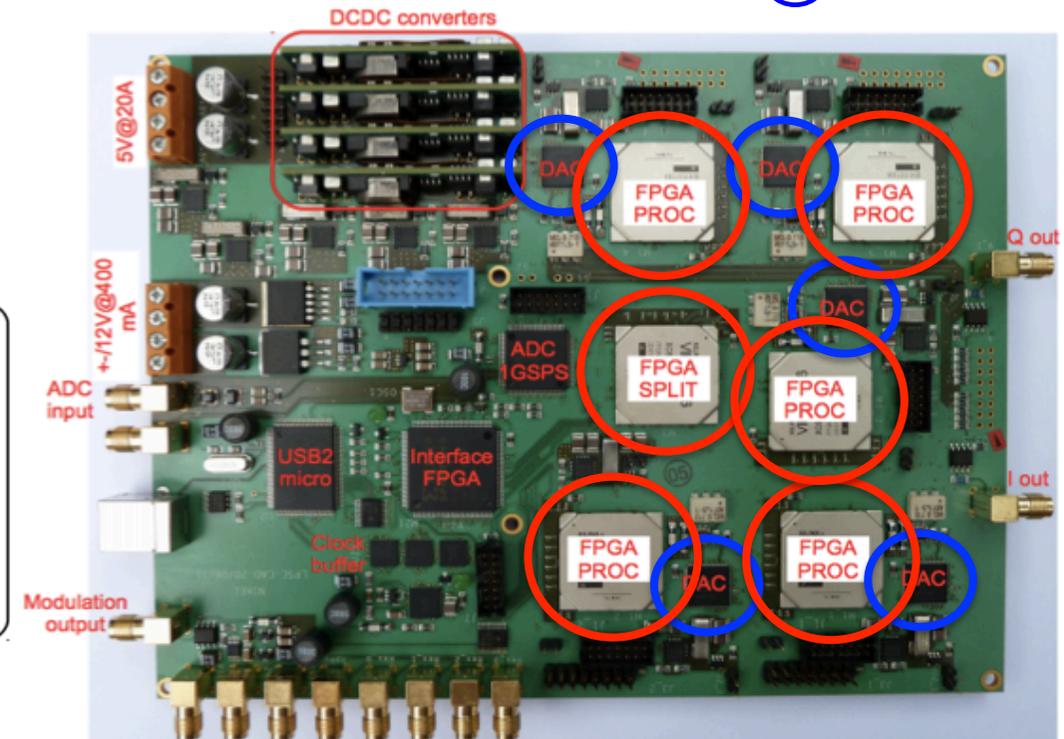
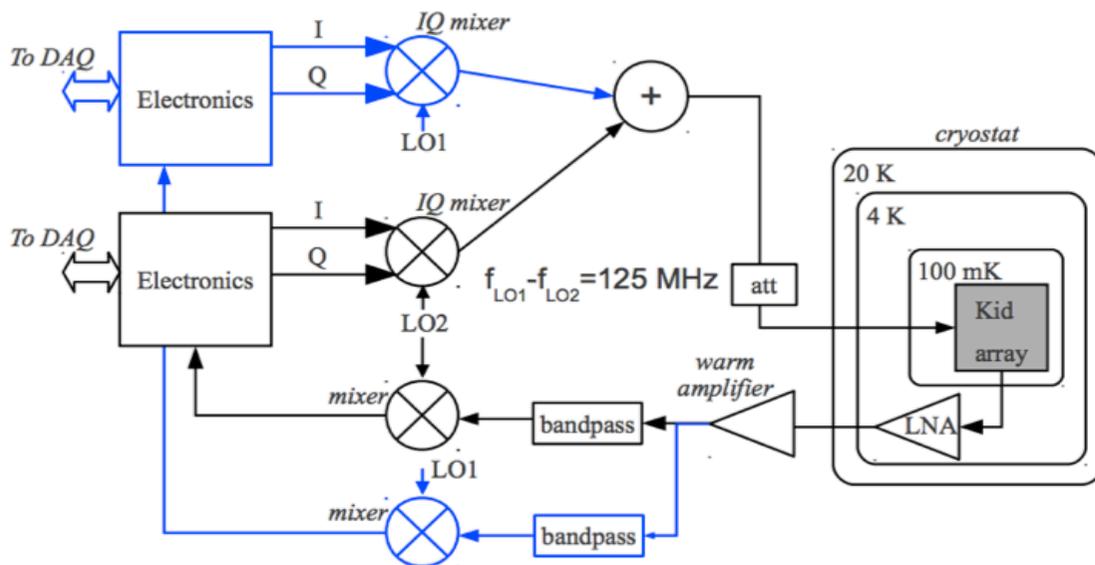
- GroundBIRD に搭載する MKID の読み出し系に用いるフロントエンド回路の開発を行った
- 従来のフロントエンド回路は、市販品で構成していたが、以下の解決すべき課題があった:
  - LPF による帯域制限 → LPF を排除
  - 消費電力・発熱の過大 → クロック分配方式の簡素化
  - ユーザビリティの損失 → 水晶発振器の周波数の変更、コネクタの統一
- RHEA により以下が改善した:
  - 帯域  $\pm 100$  MHz → 30% Up, GB の要求値を満足
  - 消費電力 7.9 W → 50% Down
  - 高いユーザビリティの獲得 → Useful clock, No Extra-fan, etc.
- アナログ基板 RHEA を組み合わせた新フロントエンド回路は、GroundBIRD 実験の要求を満足することを確認した

# BACKUP

# NIKEL

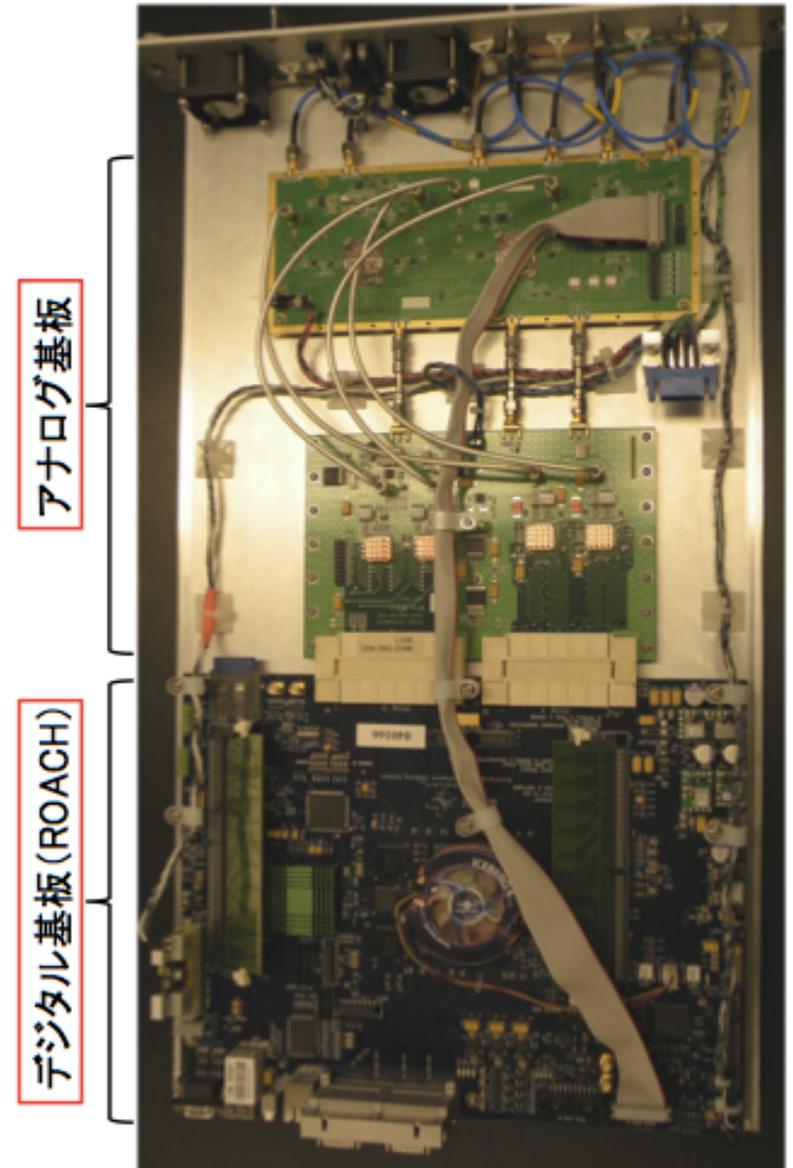
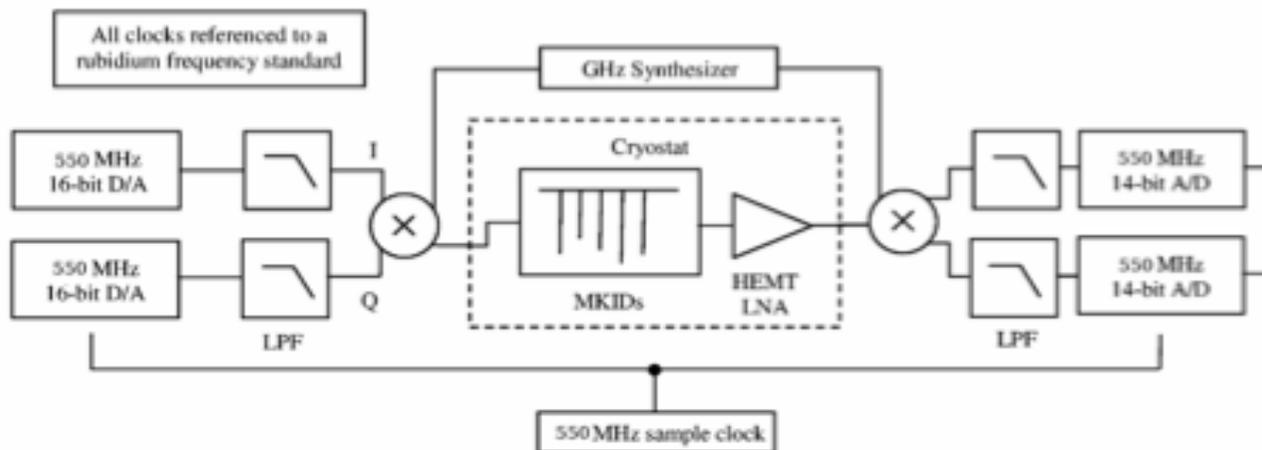
実験: NIKA  
読み出し方式: DDC  
帯域: 500 MHz  
読み出しレート: 953 Hz  
消費電力: 100 W

○ FPGA  
○ DAC



# MUSIC Readout

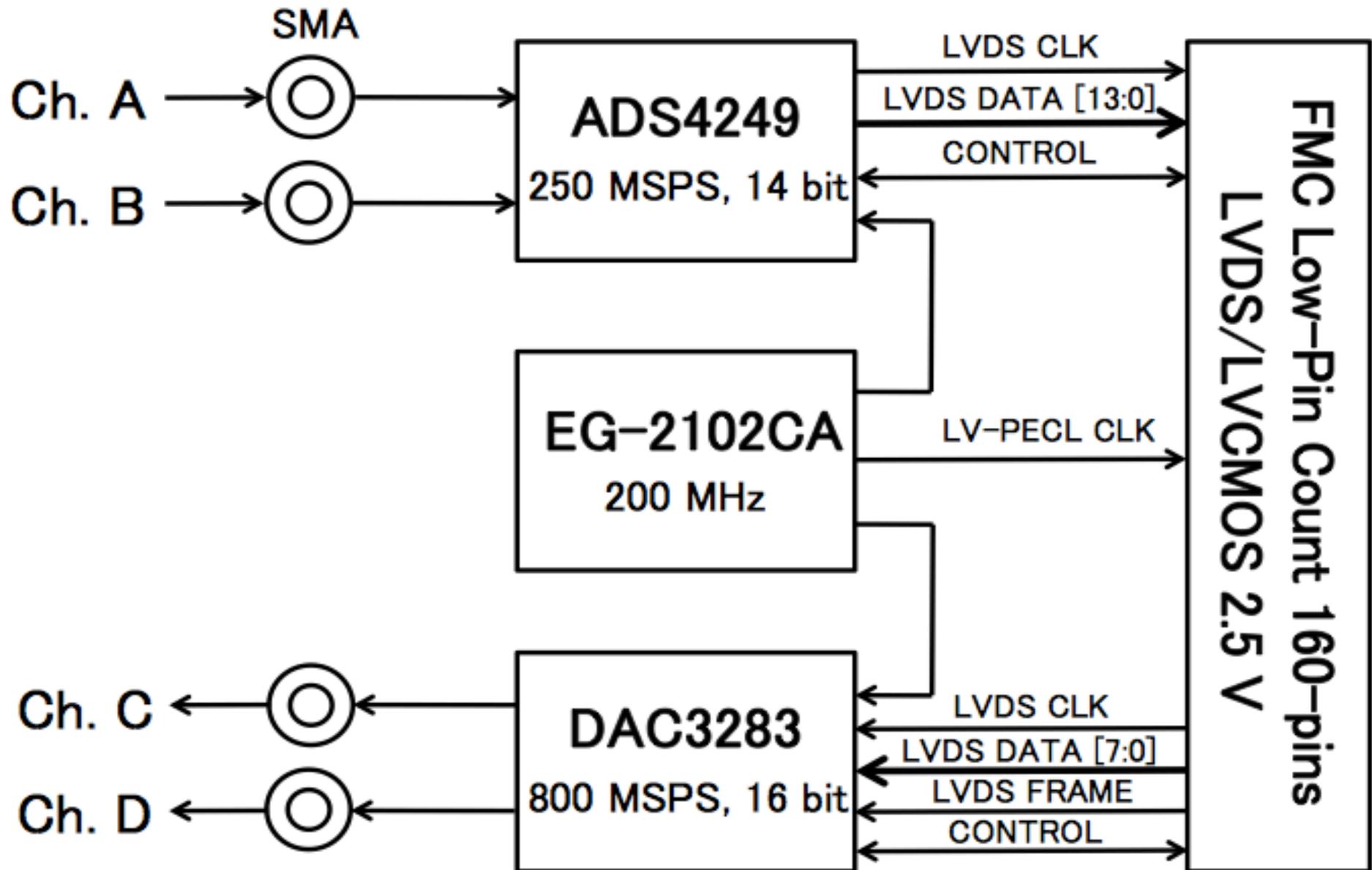
実験: MUSIC  
読み出し方式: FFT  
帯域: 550 MHz  
読み出しレート: 100 Hz  
消費電力: 38 W



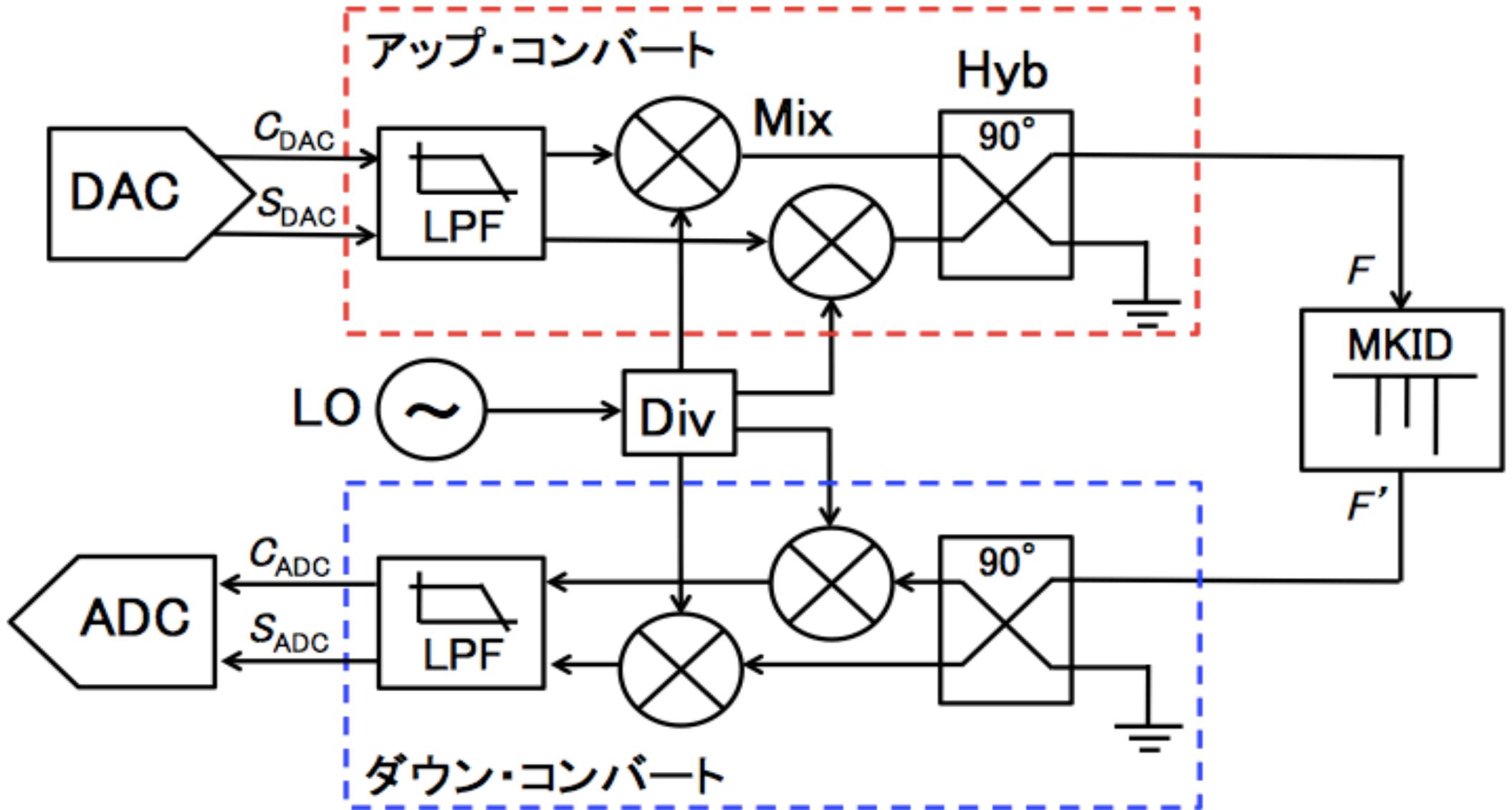
# 本研究との比較

		本研究	NIKEL	MUSIC
読み出し方式		DDC	DDC	FFT
実効総帯域 [MHz]		200	500	550
FPGA	Family	Kintex-7*	Vertex-6	Vertex-5
	搭載総数	1	6	1
ADC	チャンネル数	2	1	1
	分解能 [bit]	14	12	12
	Sample Rate [MSPS]	200	1,000	550
	搭載総数	1	1	2
DAC	チャンネル数	2	2	1
	分解能 [bit]	16	16	16
	Sample Rate [MSPS]	200	250	550
	搭載総数	1	5	2
通信規格		GbE	USB 2.0	GbE**
復調信号の読み出しレート [Hz]		10,000	953	100
消費電力 [W]		23	100	38

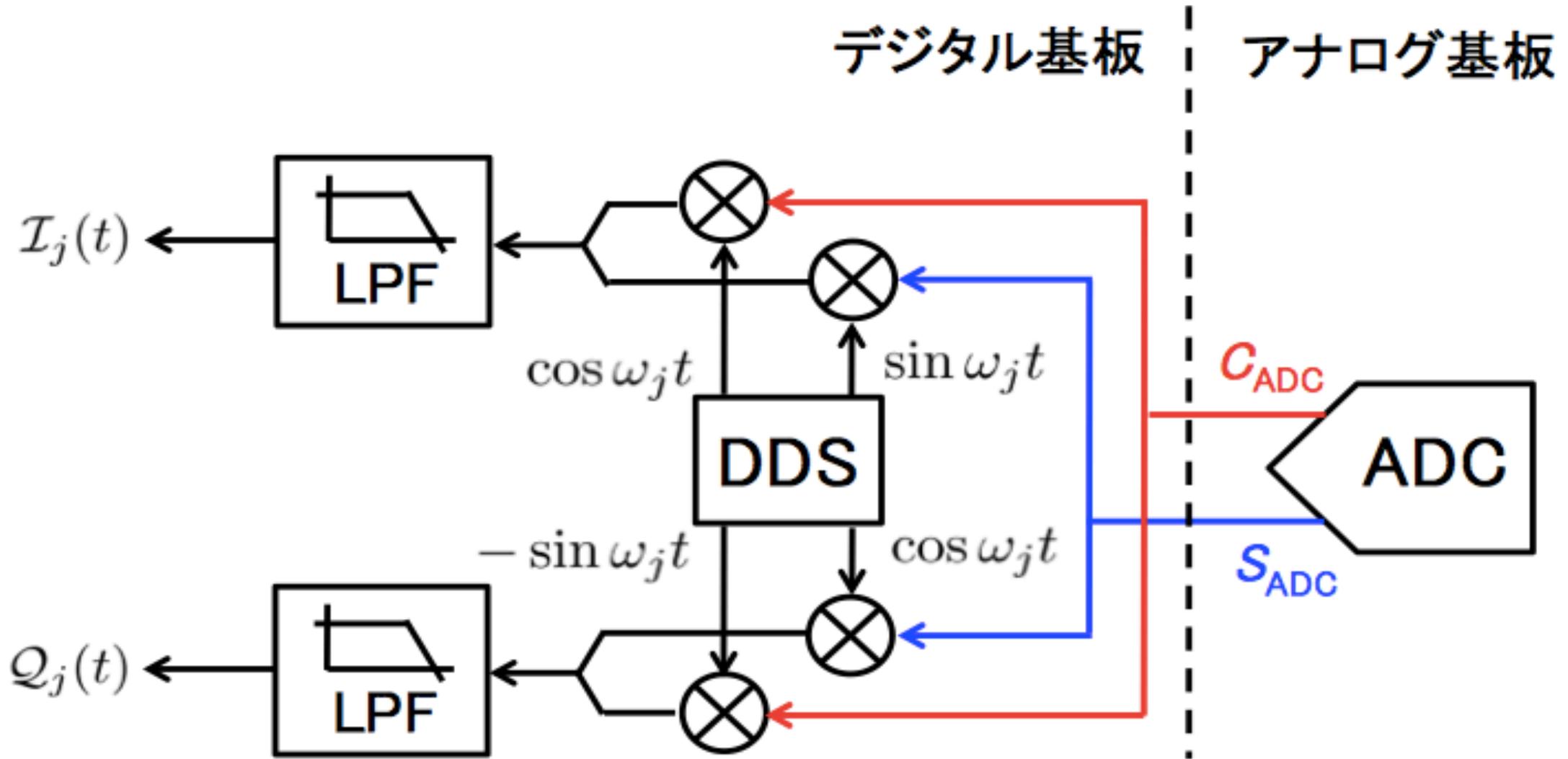
# RHEA のブロック図



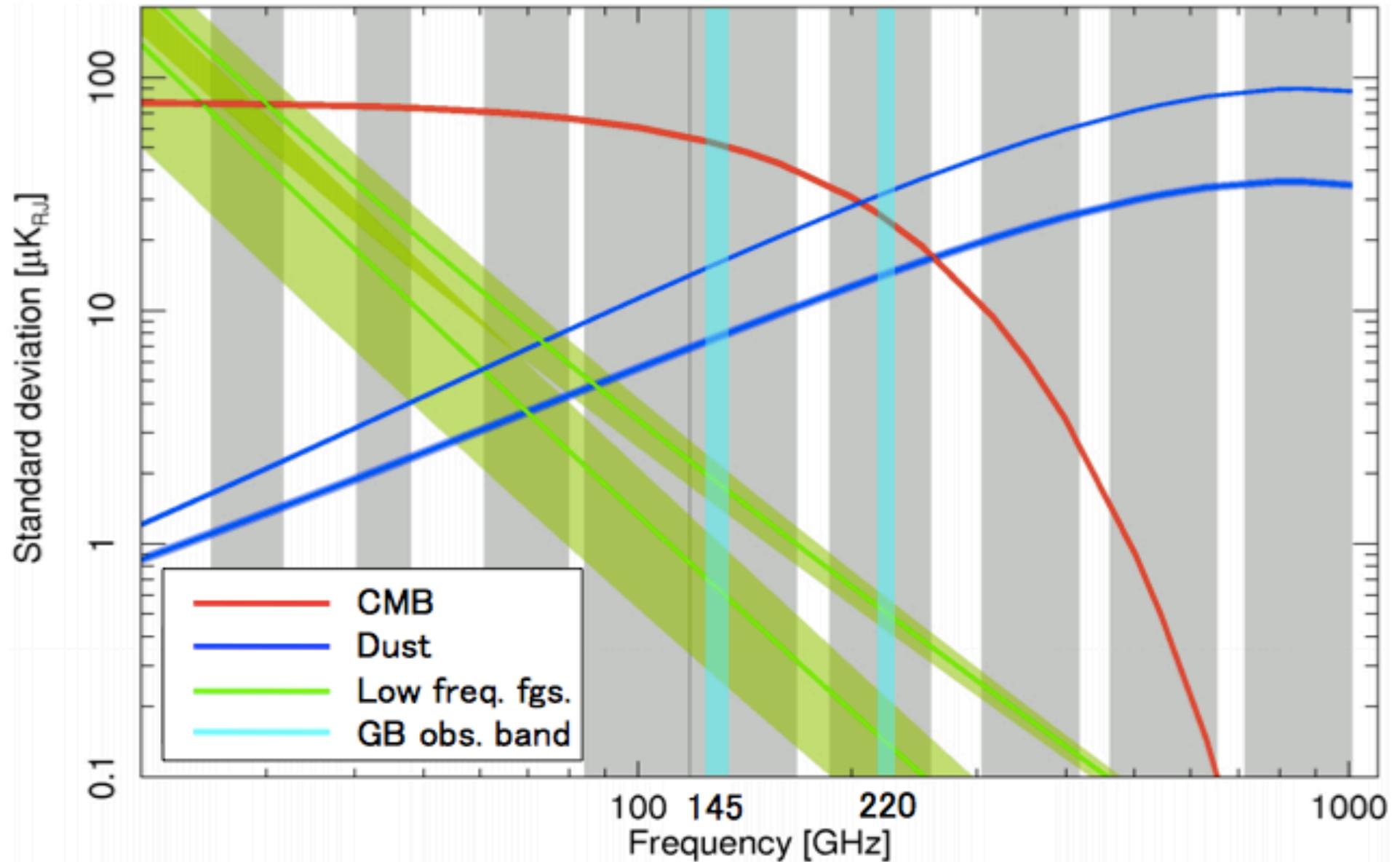
# MKID Readout



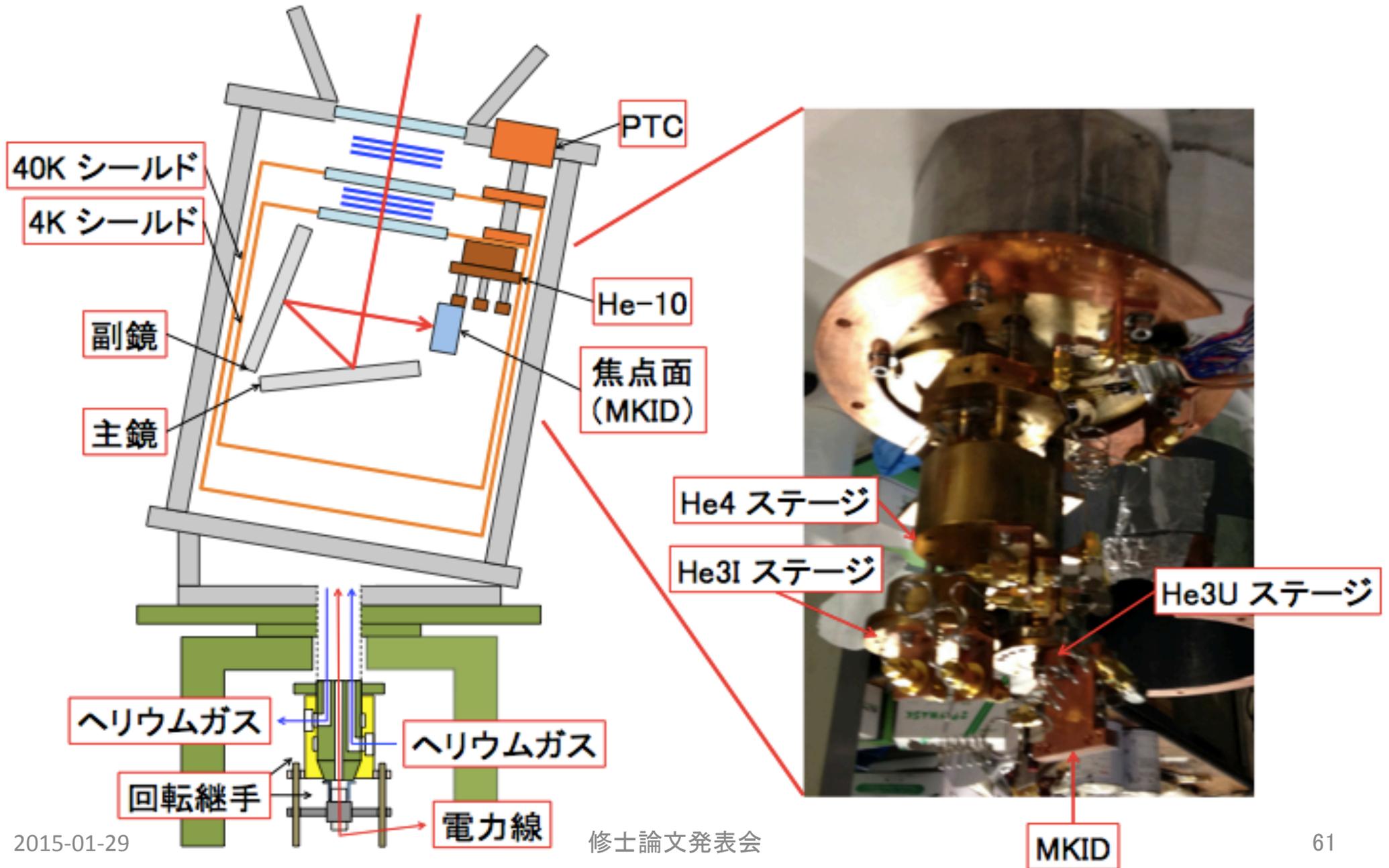
# Demodulation



# CMB と前景放射のスペクトル



# 回転冷却光学系



# MKID for GB

観測帯域 [GHz]	$D_{\text{pixel}}(3\lambda)$ [mm]	NET [ $\mu\text{K}\sqrt{s}$ ]	ピクセル [pix/枚]	ウエハー [枚]	MKID [個]	$\text{NET}_{\text{array}}$ [ $\mu\text{K}\sqrt{s}$ ]
145	6.0	250	52	6	624	10
220	4.1	380	112	1	224	26

