

SCOPE衛星搭載に向けた 磁力計の設計と開発

～観測ロケットによる実証試験～

松岡研 D1 井口 恭介

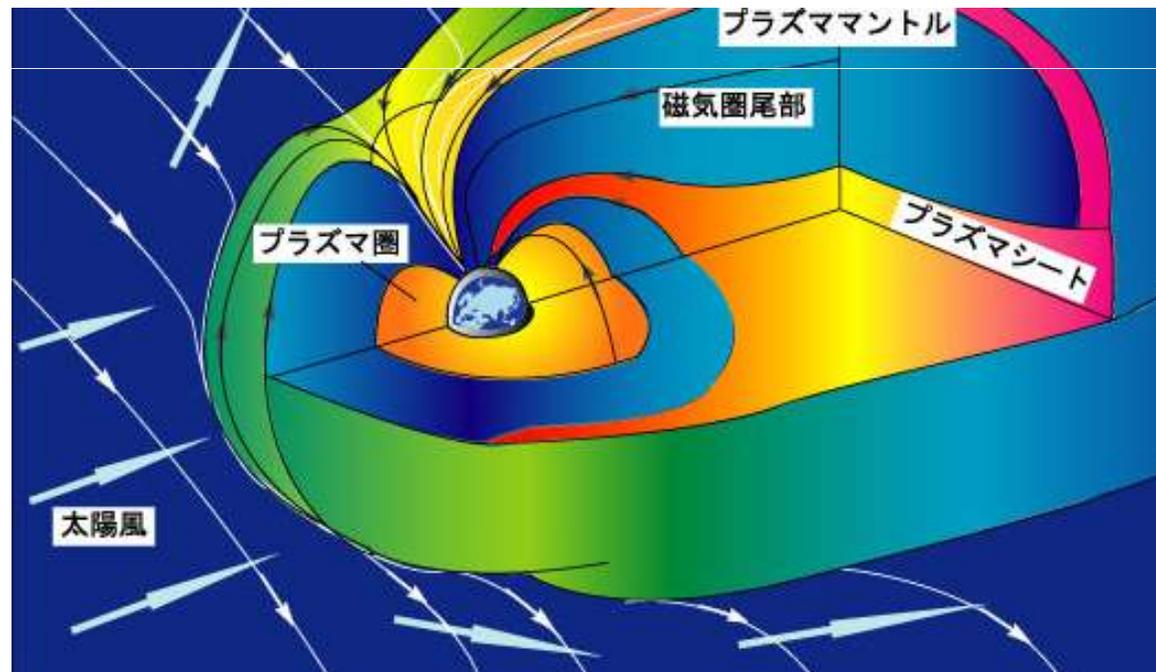
地球磁気圏

あけぼの オーロラ粒子の加速のメカニズムとオーロラ発光現象の観測

GEOTAIL 地球磁気圏尾部の構造とダイナミクスの研究

SPRINT-B(ERG) ジオスペースにおける最高エネルギー粒子生成過程の調査

SCOPE プラズマのスケール間結合の調査

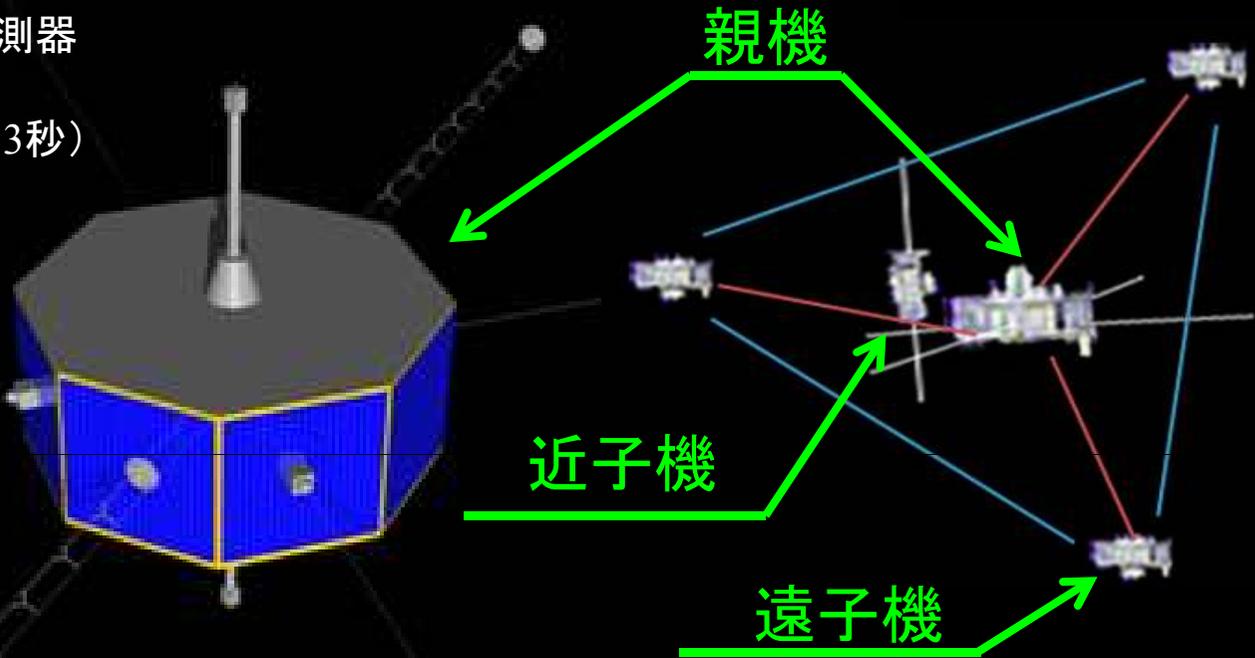
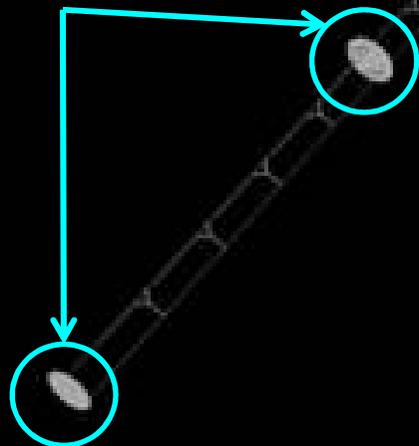


SCOPE

Scale COupling in the Plasma universE

観測機器 : 電磁場、粒子観測器
スピン周期 : 3秒
(近子機 20秒、遠子機 3秒)
近地点 : $9 R_E$
遠地点 : $24 R_E$

磁力計
(センサ)



探査領域

ショック、リコネクション、境界層

方法

マルチスケール・同時多点観測

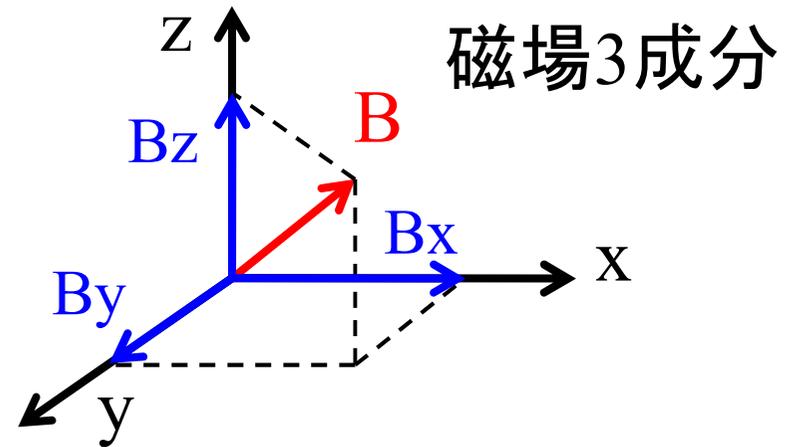
SCOPE衛星における磁場測定

2種類の磁場測定器

フラックスゲート
定常~128 Hz

サーチコイル
10 Hz~10 kHz

周波数



フラックスゲート磁力計の役割

定常磁場

- ・ 磁気圏の構造
- ・ 分布関数の非等方性

0.1~百数十 Hzの磁場

- ・ イオンや電子の加速や加熱過程
- 電子の時間スケール (10 msec) で磁場測定

Required performance characteristics	
Dynamic range	± 4096 nT
Resolution	8 pT@20 bits
Noise	10 pT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ @1Hz
Loop response	0~128 Hz
Linearity	0.005 % (=0.4 nT)
Mass	550 g
Power	1 W

科学観測ロケットでの実証試験

目的：新規開発コンポーネントの実証

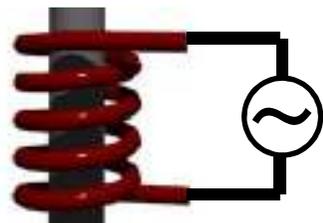
- 1 性能の実証
 - 環境、性能評価、校正試験
- 2 宇宙機への搭載実績
- 3 ロケットの姿勢測定



透磁率 μ

磁性体

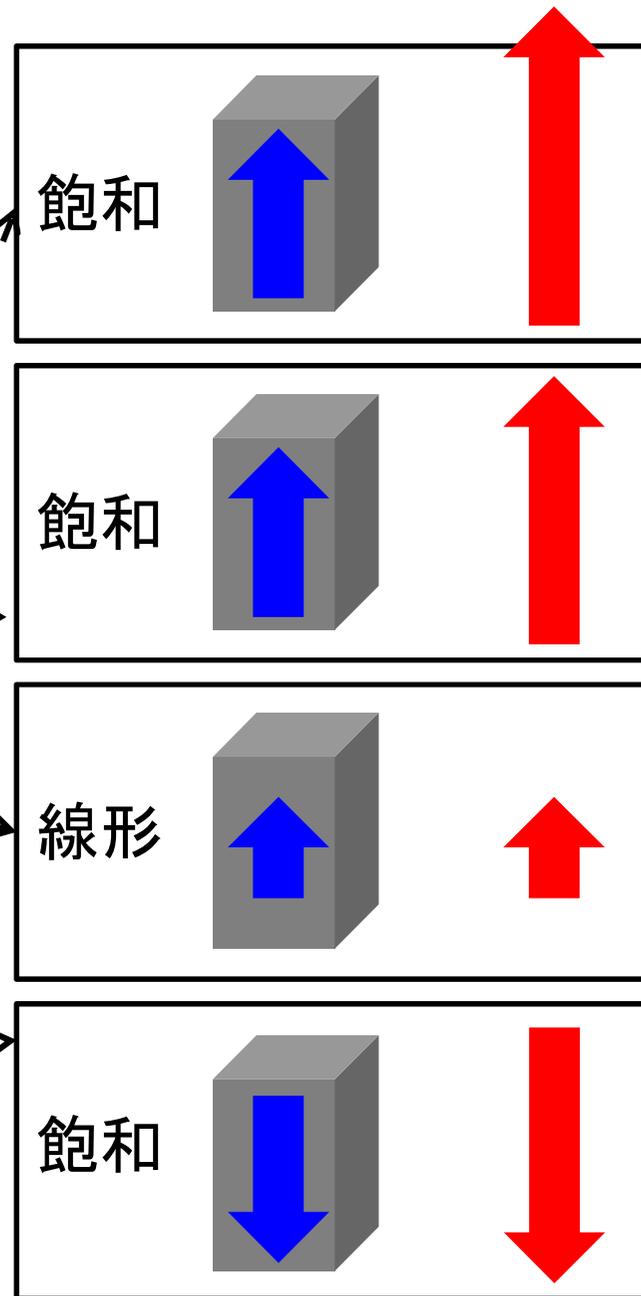
$$B = \mu H$$



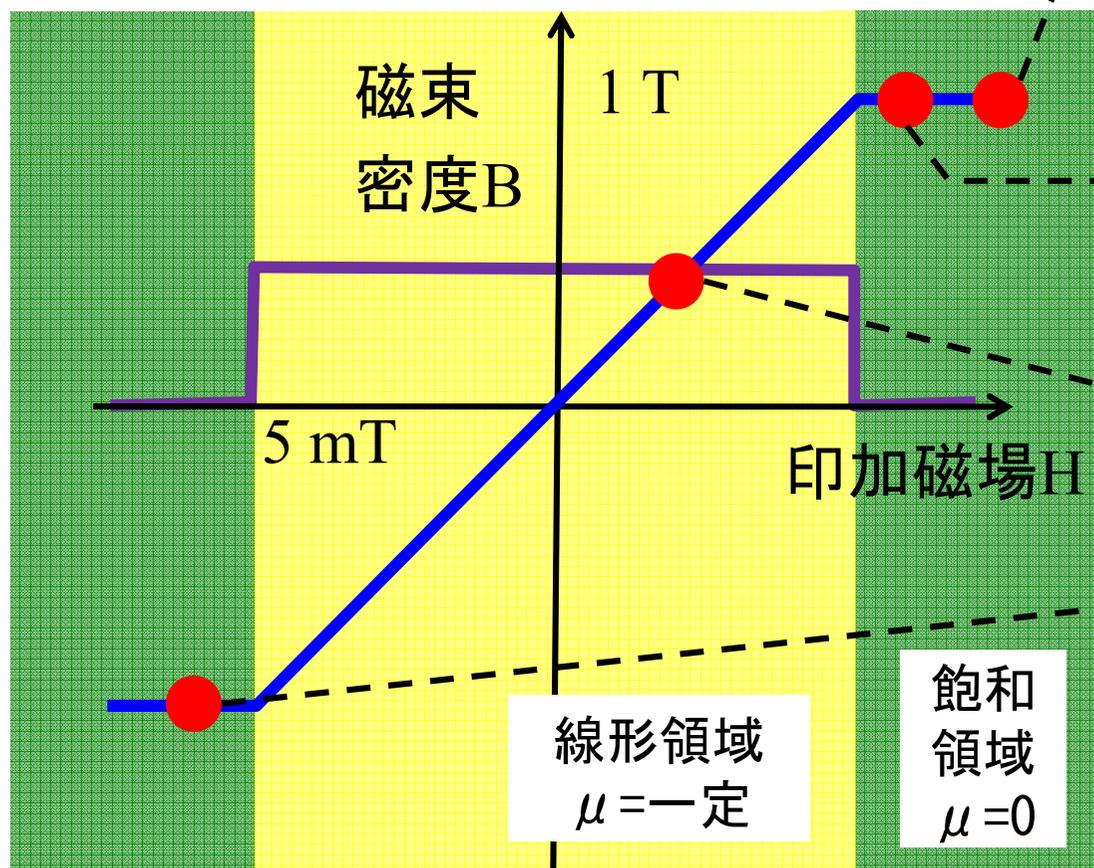
電源

磁束密度

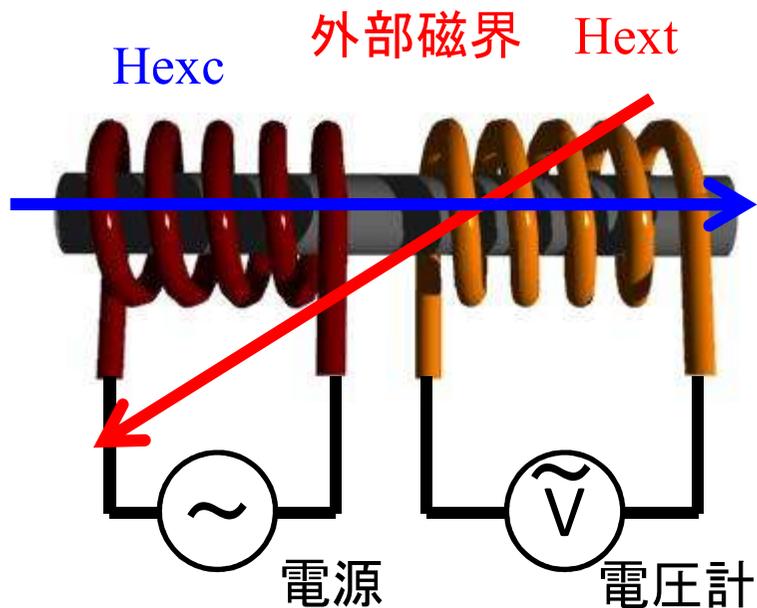
印加磁場



強磁性体のB-H曲線



フラックスゲート磁力計 センサ



- V : 誘導起電力
- n : 2次コイルの巻数
- S : 2次コイルの断面積
- Φ : 磁束
- B : 磁束密度 (磁場)
- Hexc : 印加電流で発生する磁界
- Hext : 外部磁界

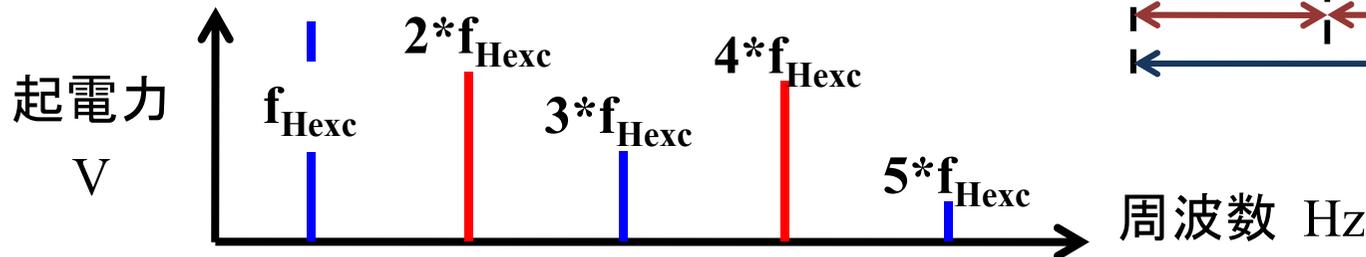
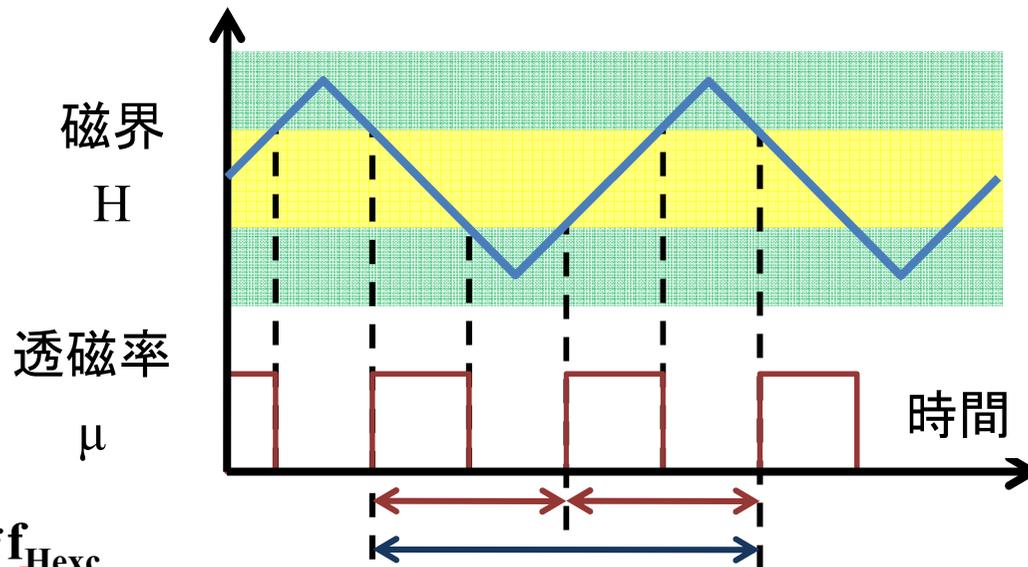
$$V = -n \frac{d\Phi}{dt} = -n \frac{dB S}{dt} = -n S \frac{d\mu(H_{exc} + H_{ext})}{dt}$$

印加磁場の時間変化

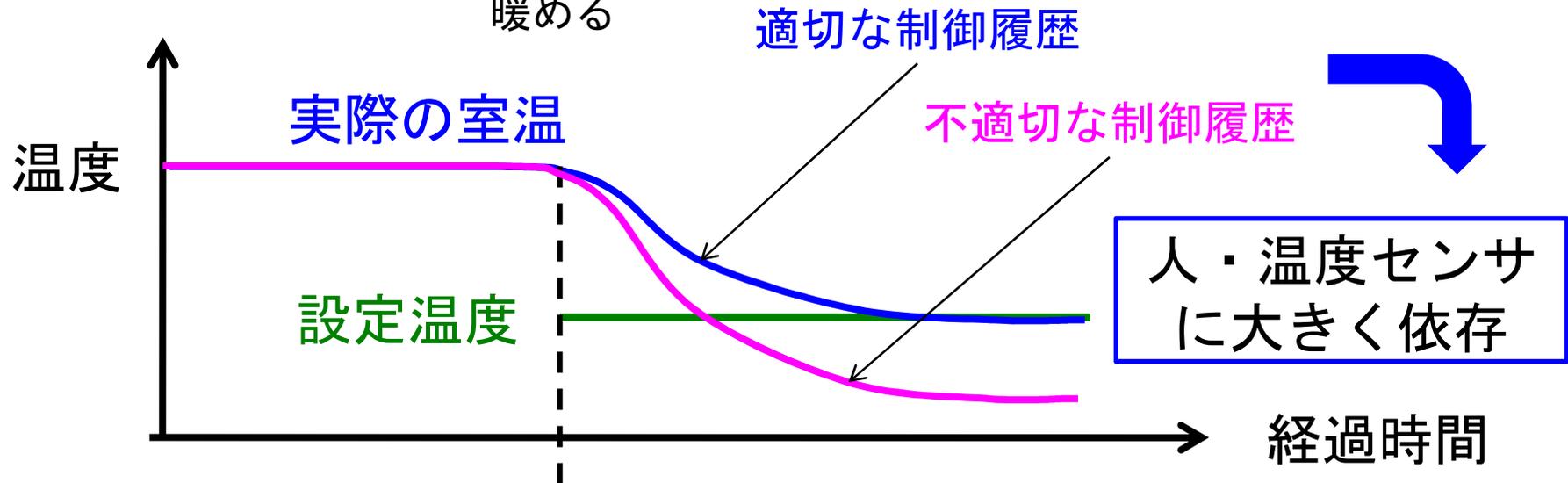
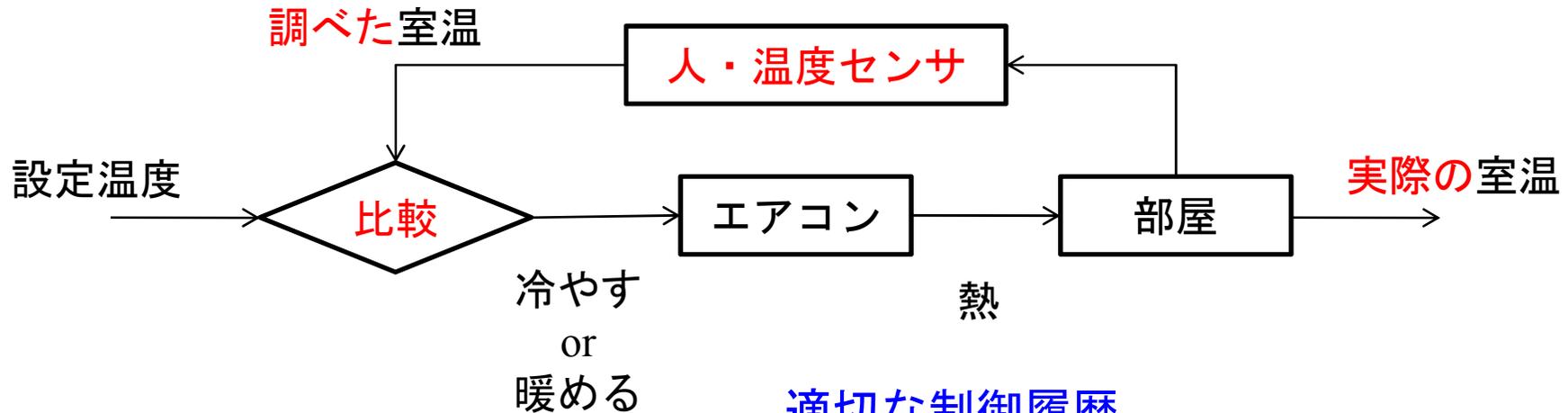
μ の時間変化

$$= -n S \left(\mu \frac{d(H_{exc} + H_{ext})}{dt} + (H_{exc} + H_{ext}) \frac{d\mu}{dt} \right)$$

外部磁界に比例した信号が取り出せる



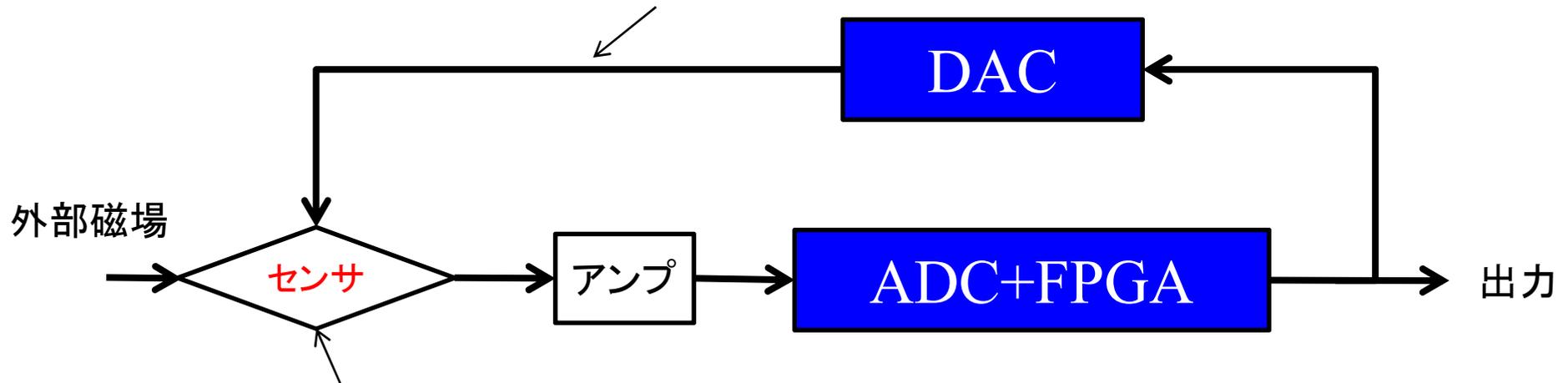
ネガティブフィードバックとは



ネガティブフィードバック
制御開始

磁力計

フィードバックは外部磁場を打ち消すように働く



センサは外部磁場に比例した信号を出力する

DACの性能が磁力計の精度を大きく左右する

DAC : Digital to Analog Converter

ADC : Analog to Digital Converter

FPGA : Field Programmable Gate Array

デジタル
(Digital)の世界



写真データ

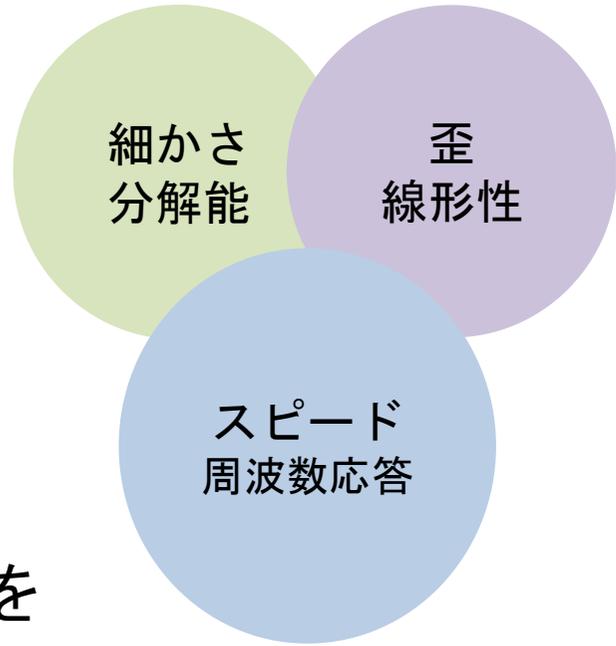


アナログ
(Analog)
の世界

DACとは

D デジタル信号を
A アナログ信号に
C 変換する装置
= プリンタ

プリンタ(=DAC)の性能

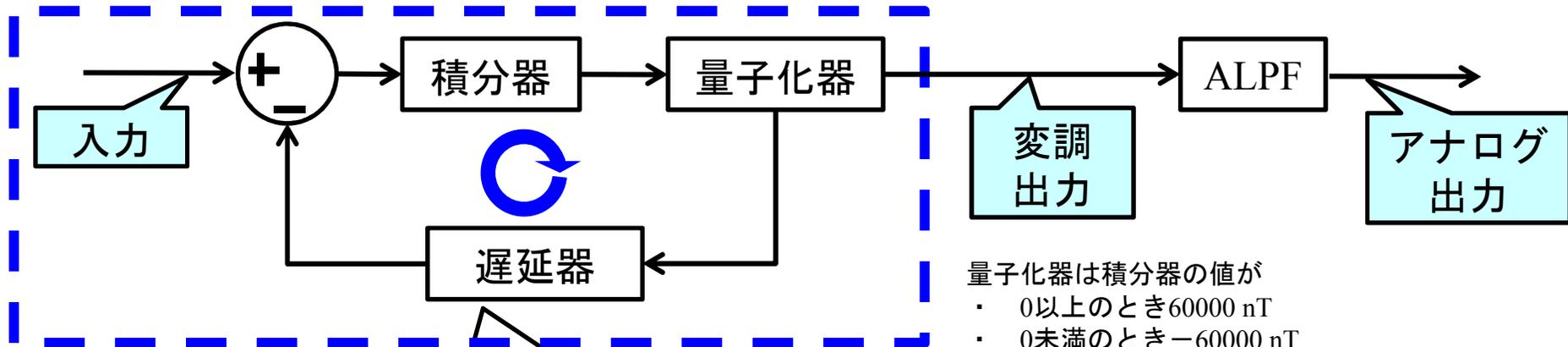


きれいな印刷
||
精度

磁力計は…

D FPGA(≒CPU)で計算されたデータを
A 電圧に
C 変換する

1ビット ΔΣ変調方式DAC 時系列信号



1つ前の入力から計算された値を保存

量子化器は積分器の値が

- ・ 0以上のとき60000 nT
- ・ 0未満のとき-60000 nT

を出力

- ・ 20000 nTを入力 (±60000 nT レンジ)
- ・ 0.1秒毎にループを1回計算 (1秒間)
- ・ 10回の出力中、1が7回、0が3回
- ・ 平均は0.7

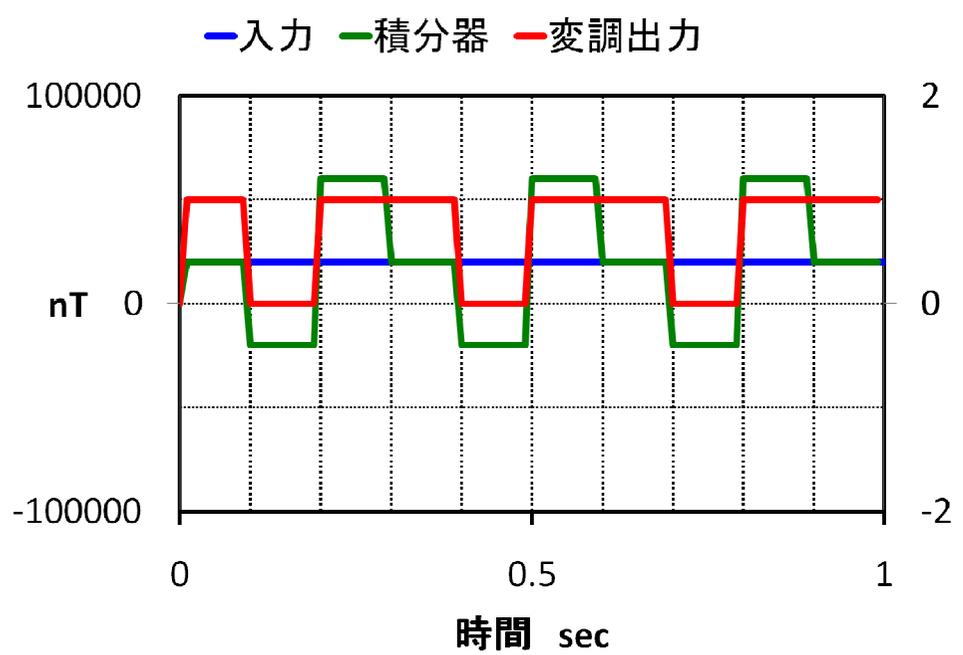
= (0.7-0.5) × 60000*2=24000 nT

- ・ 誤差は3.3%

- ・ 0.01秒毎に1回ループを計算 (1秒間)
- ・ 100回の出力中、1が67回、0が33回
- ・ 平均は0.67

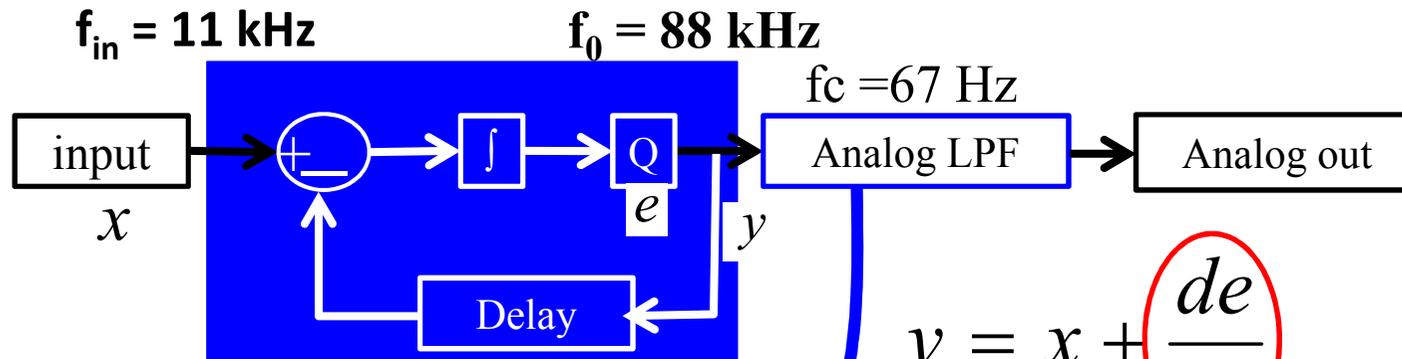
= (0.67-0.5) × 60000*2=22282 nT

- ・ 誤差は1.9%



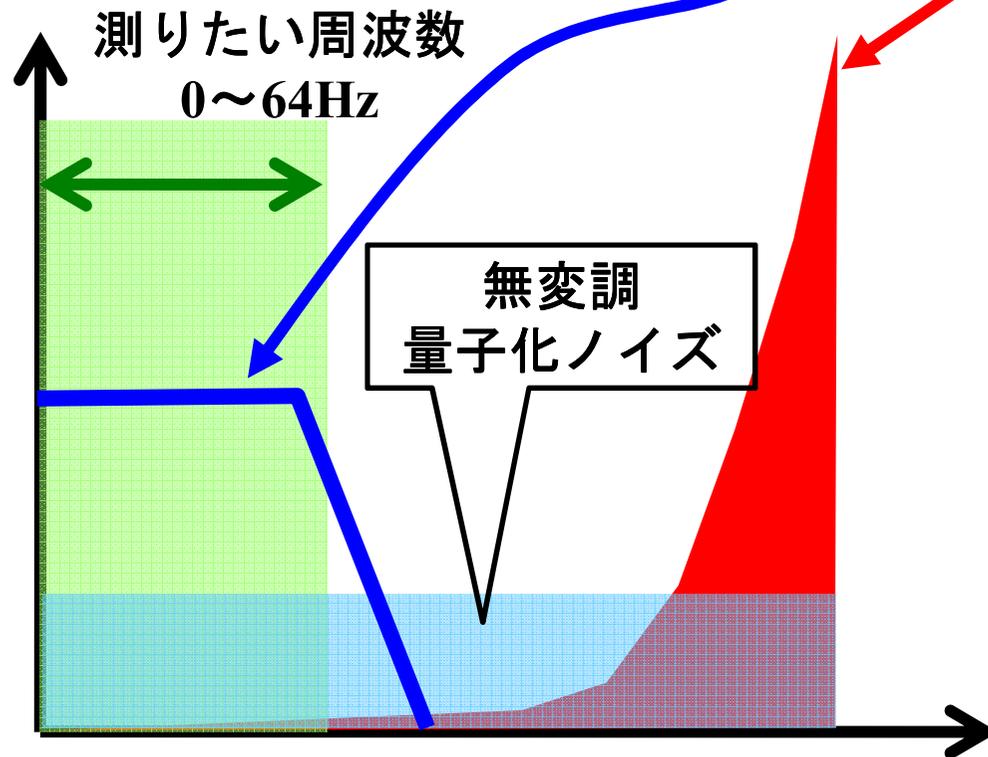
ΔΣ変調器の単位時間当たりの演算回数を増やすと精度が向上する

1ビット ΔΣ変調方式DAC スペクトル信号



$$y = x + \frac{de}{dt}$$

ノイズレベル



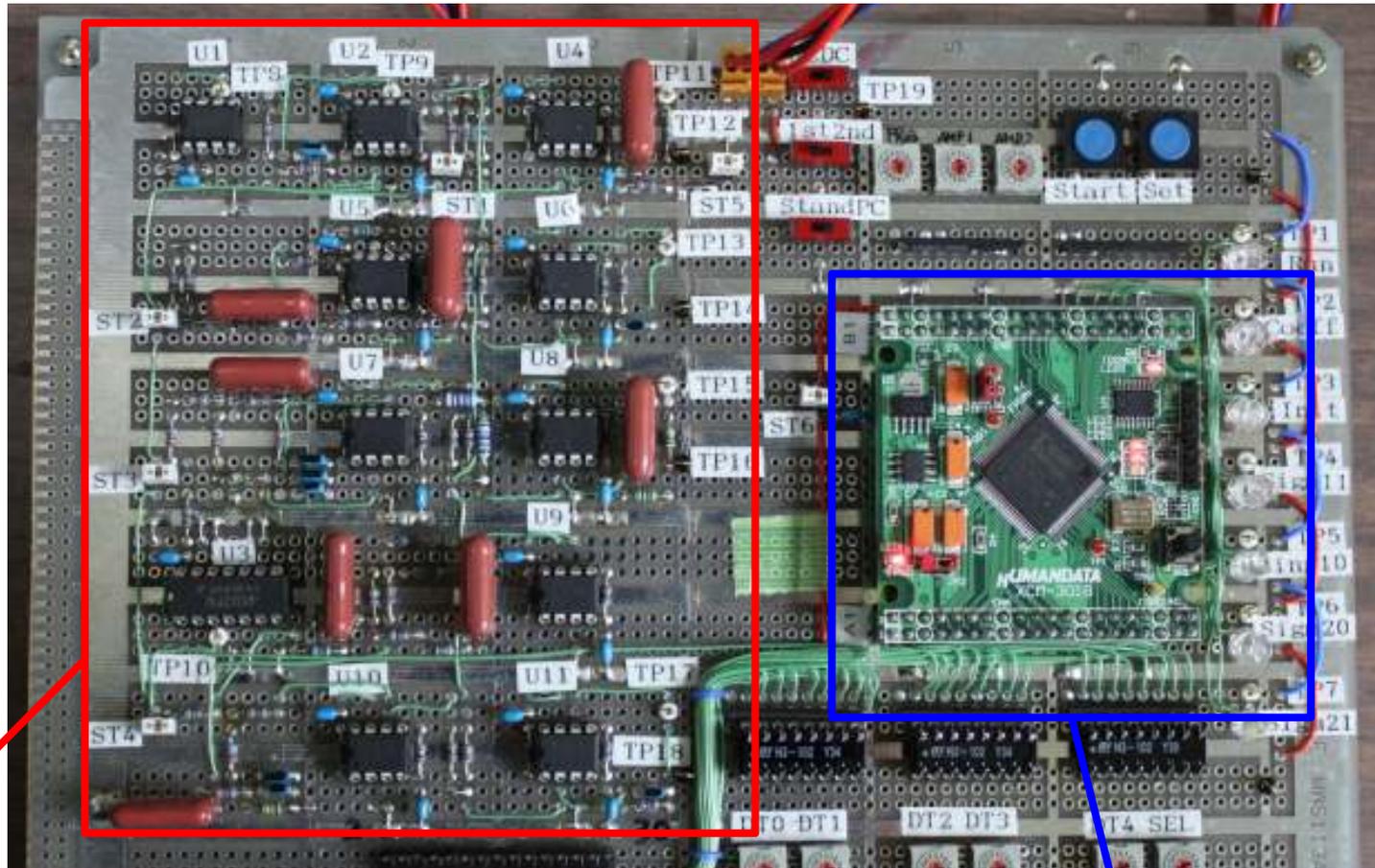
シミュレーションに基づく
ΔΣ変調DAC設計パラメータ

- ・ 積分器の数 : 2個
- ・ OSR (Over Sampling ratio)
 $f_0/(2 \cdot f_c)$: 656
- ・ ローパスフィルタの減衰率
 : 4次型アナログフィルタ

- 1 計測周波数領域のノイズ低減
- 2 DACを簡便なシステムで実現

周波数

開発した $\Delta\Sigma$ DAC



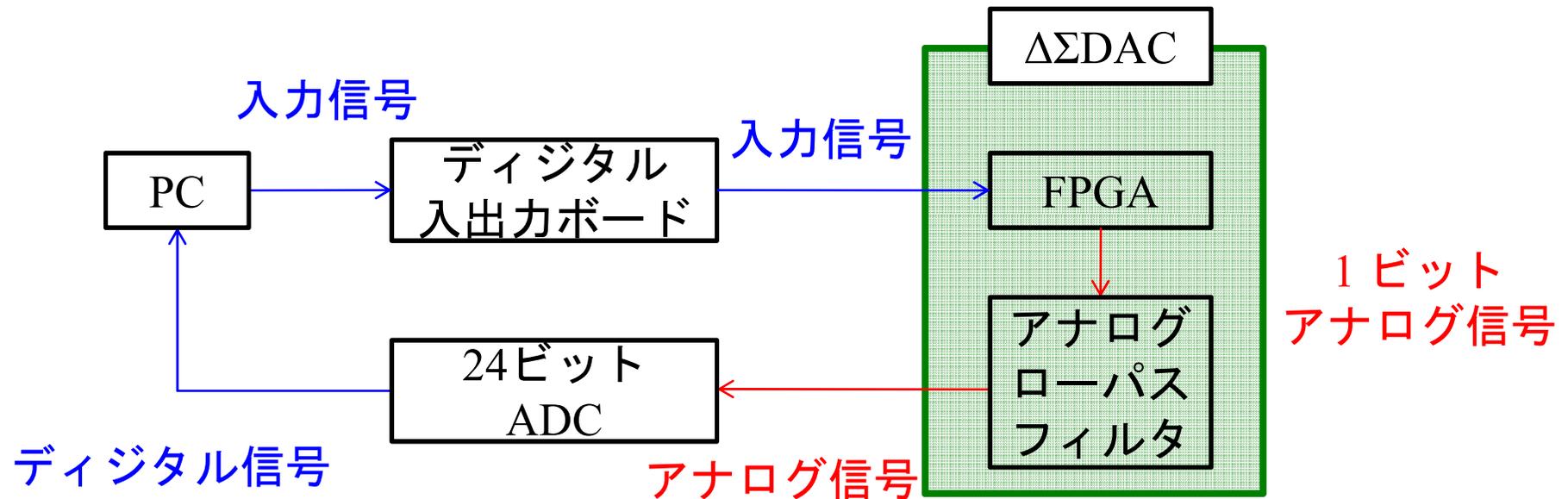
アナログローパスフィルタ
(オペアンプ)

$\Delta\Sigma$ 変調器
(FPGA)

DAC性能評価 方法

評価項目 . . . 分解能、線形性、周波数応答

入力信号 . . . 定常値および正弦波入力（～64Hz）で評価する



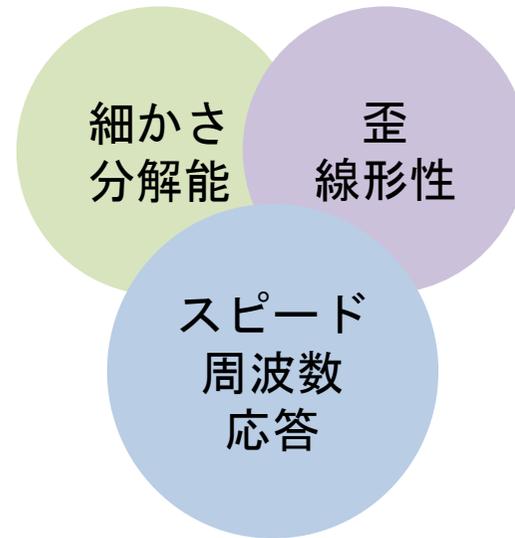
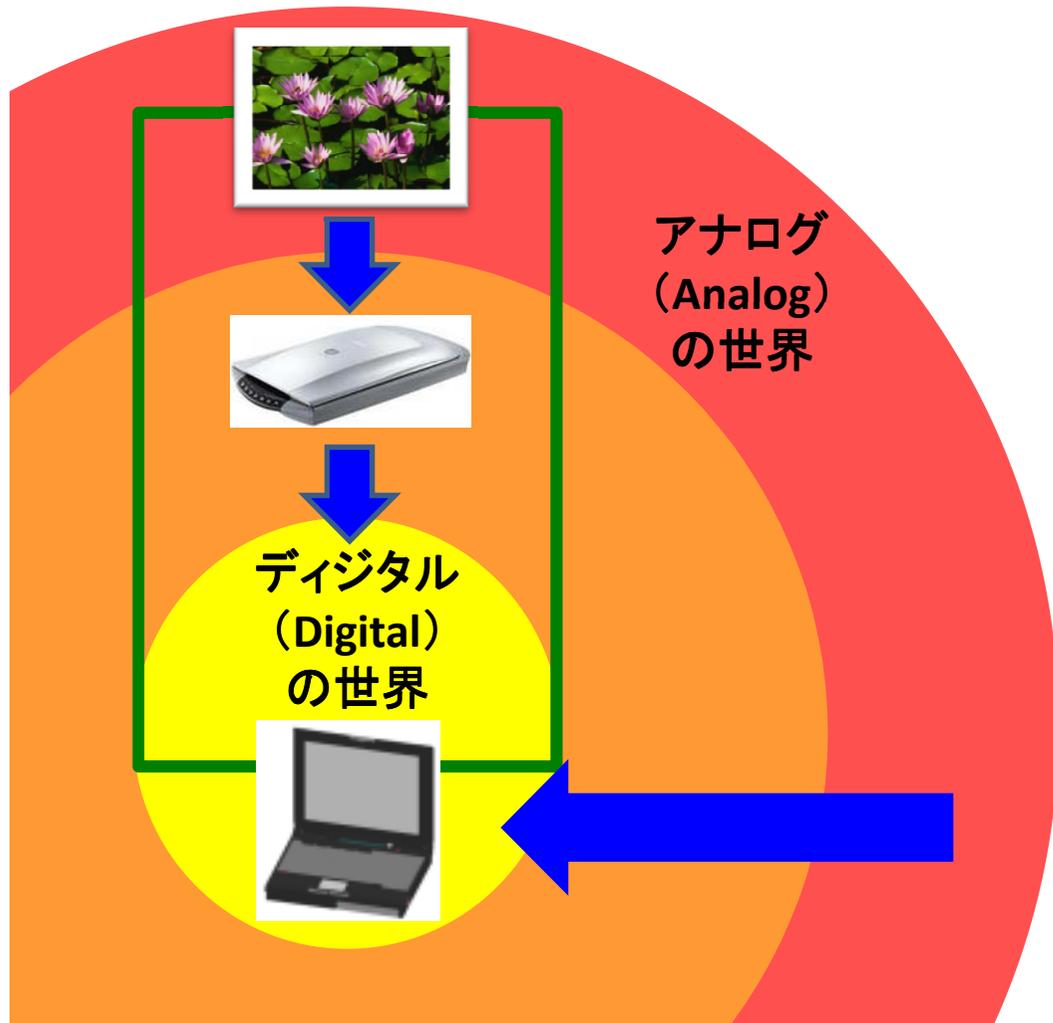
ΔΣDACによってデジタル信号はアナログ信号に変換される

アナログデータを評価する為に再度A/D変換によってデジタル化する

ADCとは

A アナログ信号を
D デジタル信号に
C 変換する装置
= スキャナ

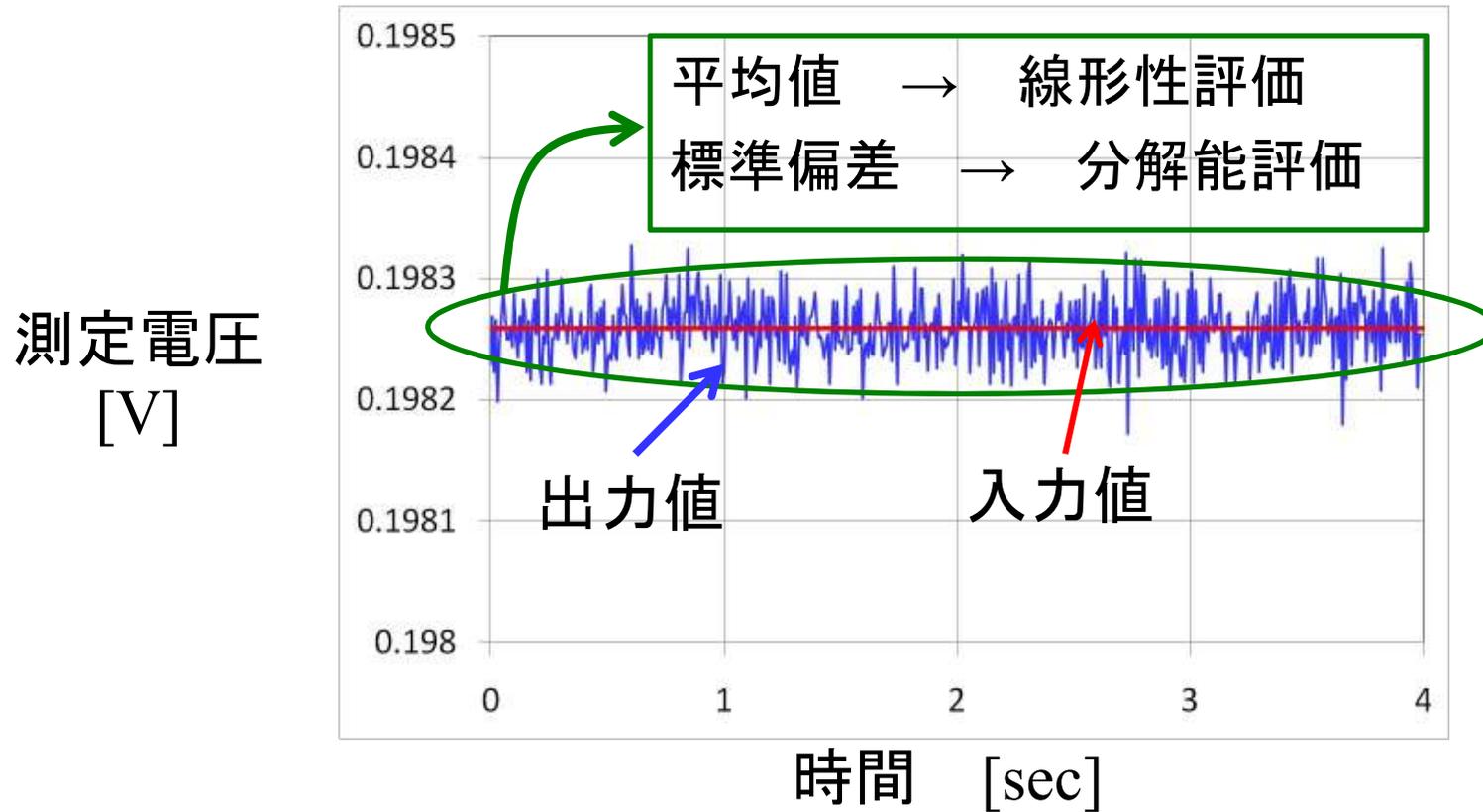
スキャナ (=DAC) の性能



きれいに読取
||
精度

24ビット	$\Delta\Sigma$ ADC
分解能	24 ビット
線形性	0.002 %
周波数応答	最大1.5 MHz

DC入出力 (時系列データ)

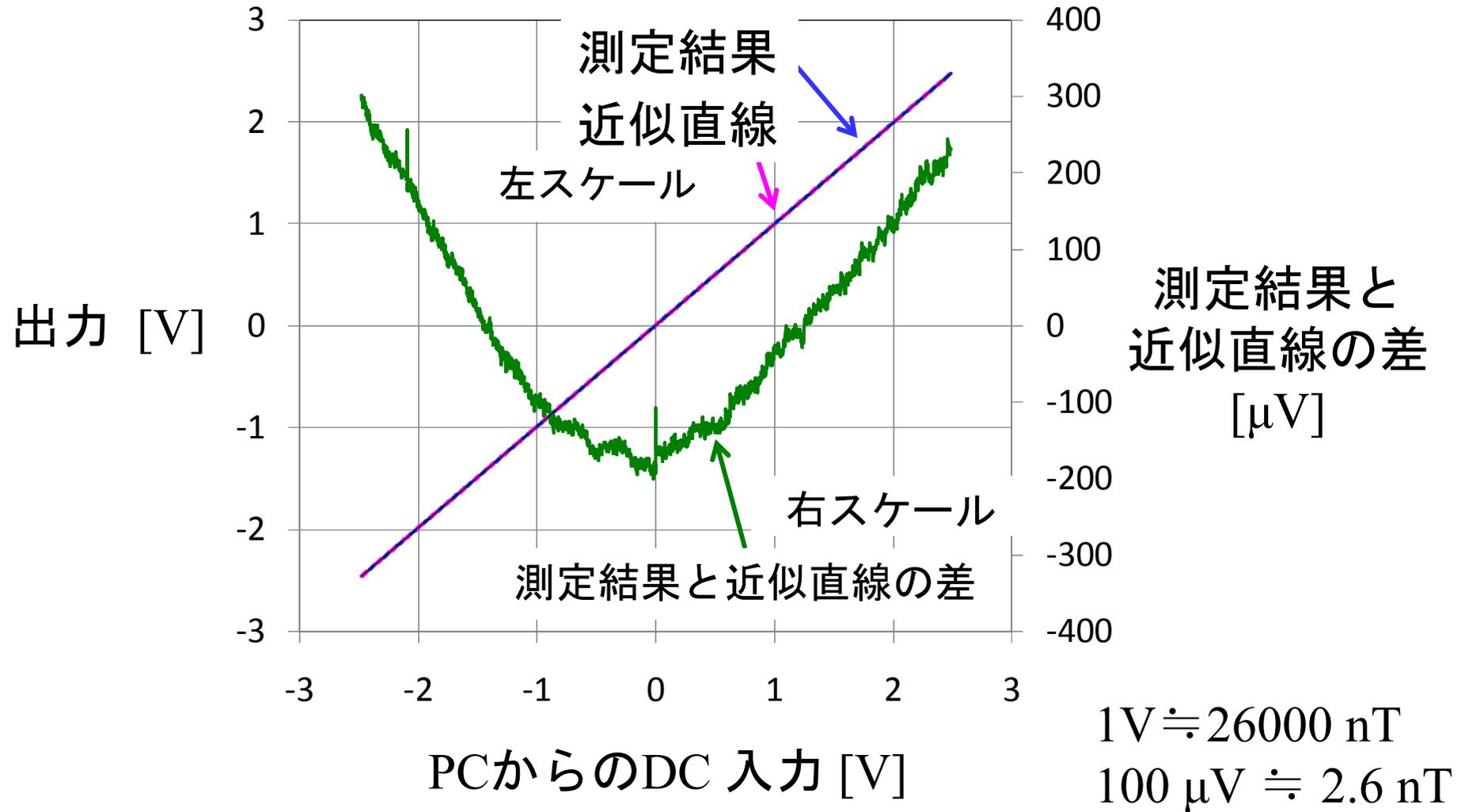


サンプリング周波数128 Hz

約4秒間計測

→ 各入力値に対して平均値とノイズレベルを計算

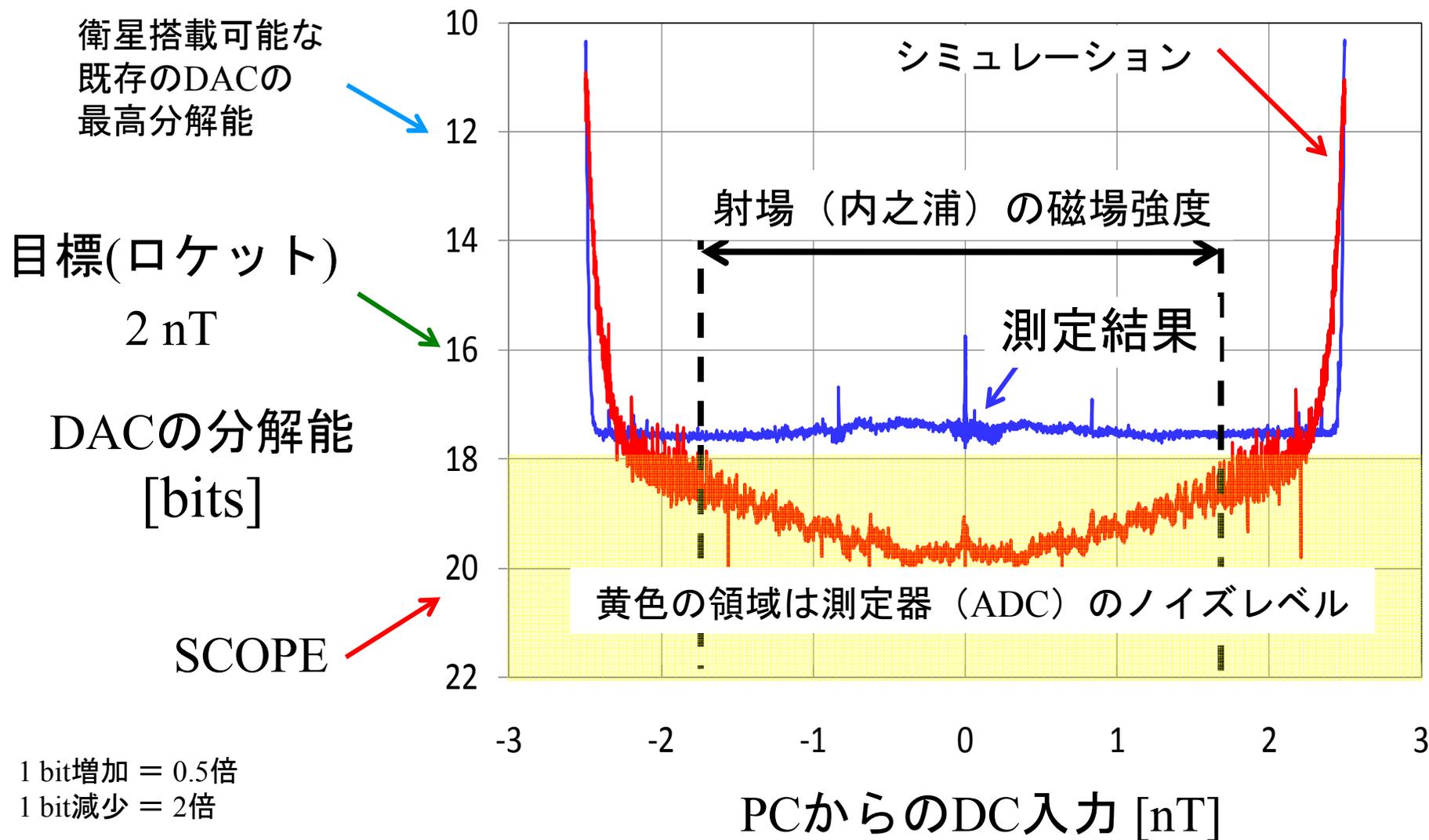
DC入出力特性と線形性



測定結果は理想的な直線に対して、0.006 -8%の非線形性を持つ

→ 測定系の非線形も含まれるため、結果は要求値0.005%とほぼ同等である。

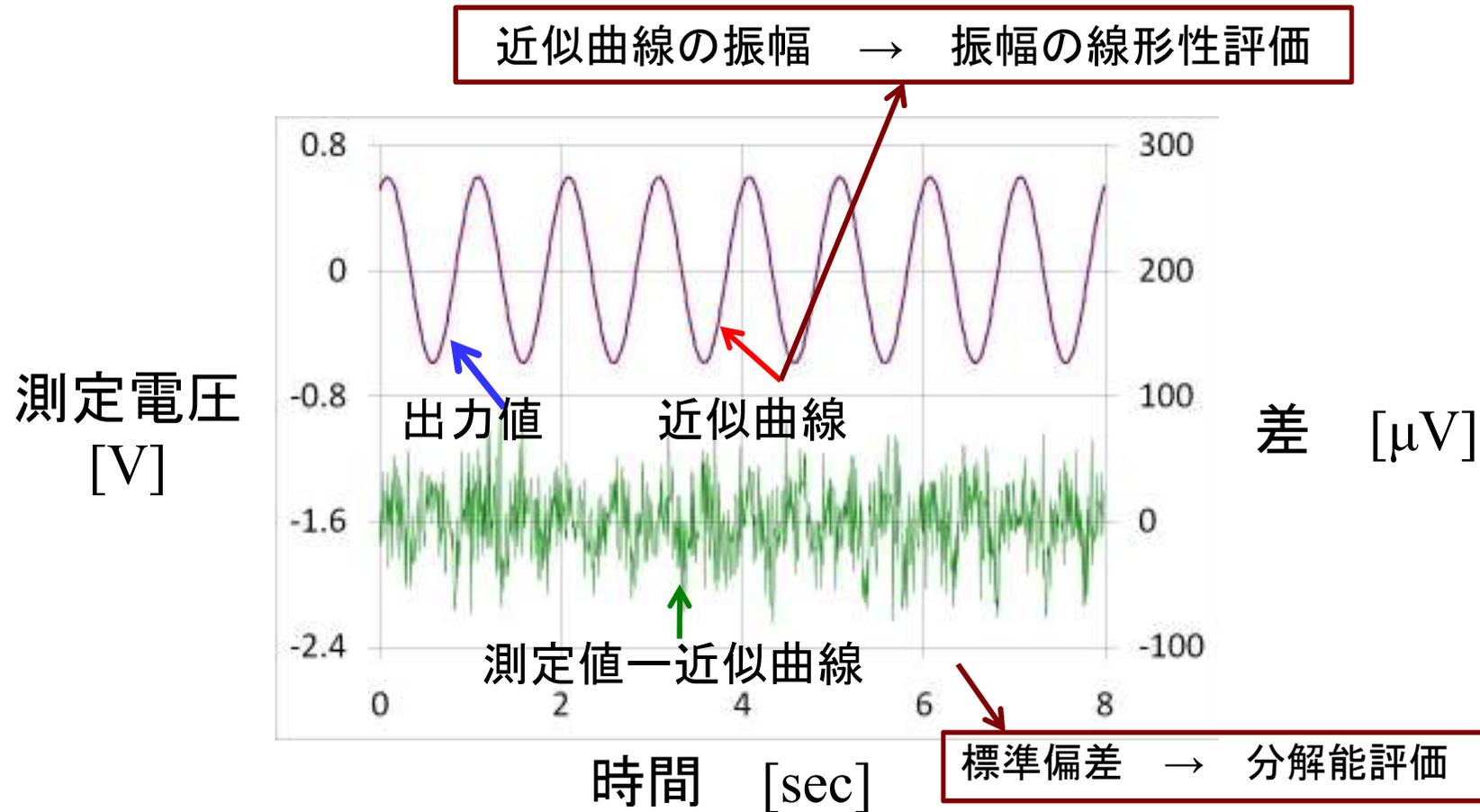
ノイズレベル (DC入力)



ノイズレベルはおよそ17ビット

→ 観測ロケットの要求を満たす

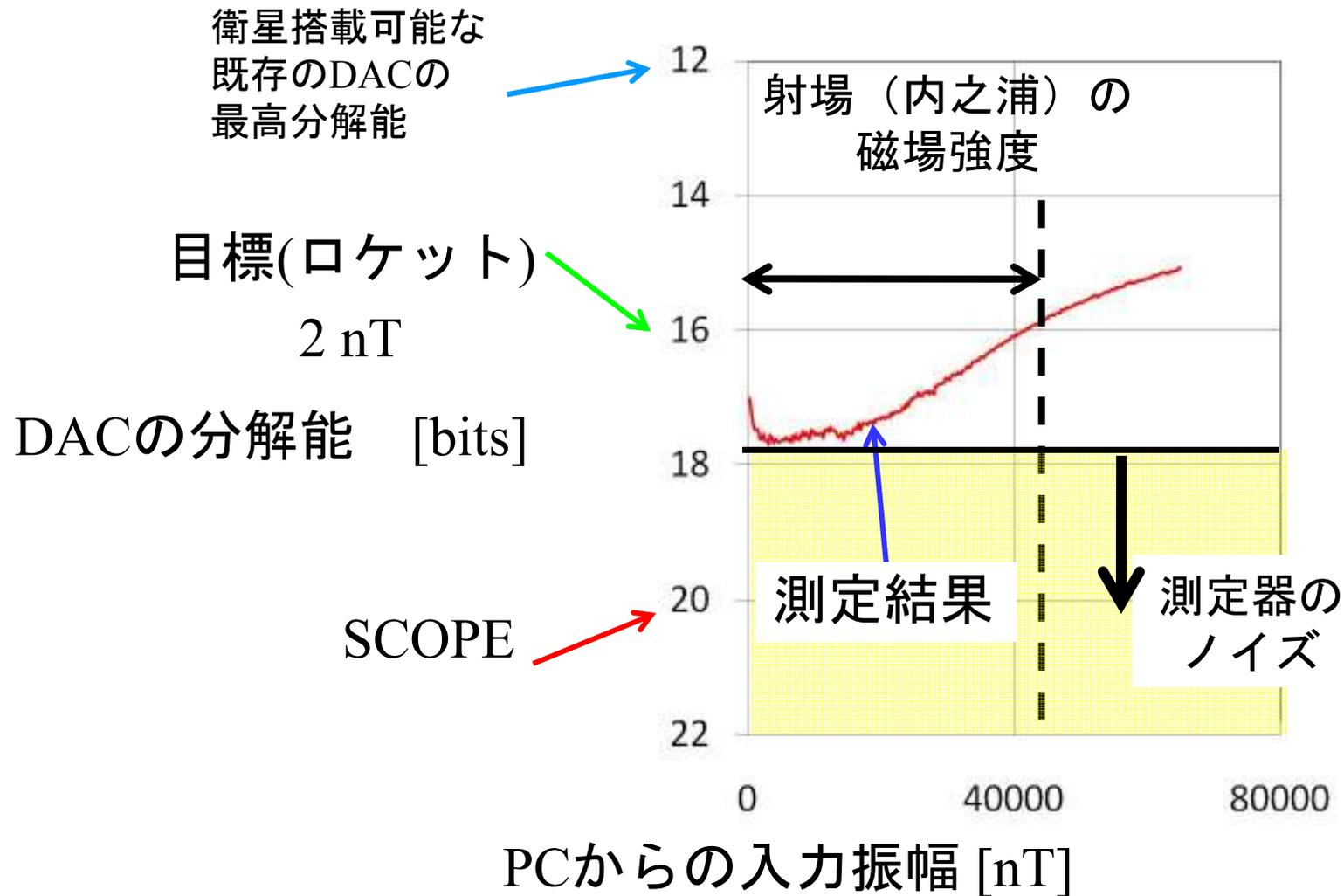
正弦波入出力



サンプリング周波数128 Hz、8秒間測定

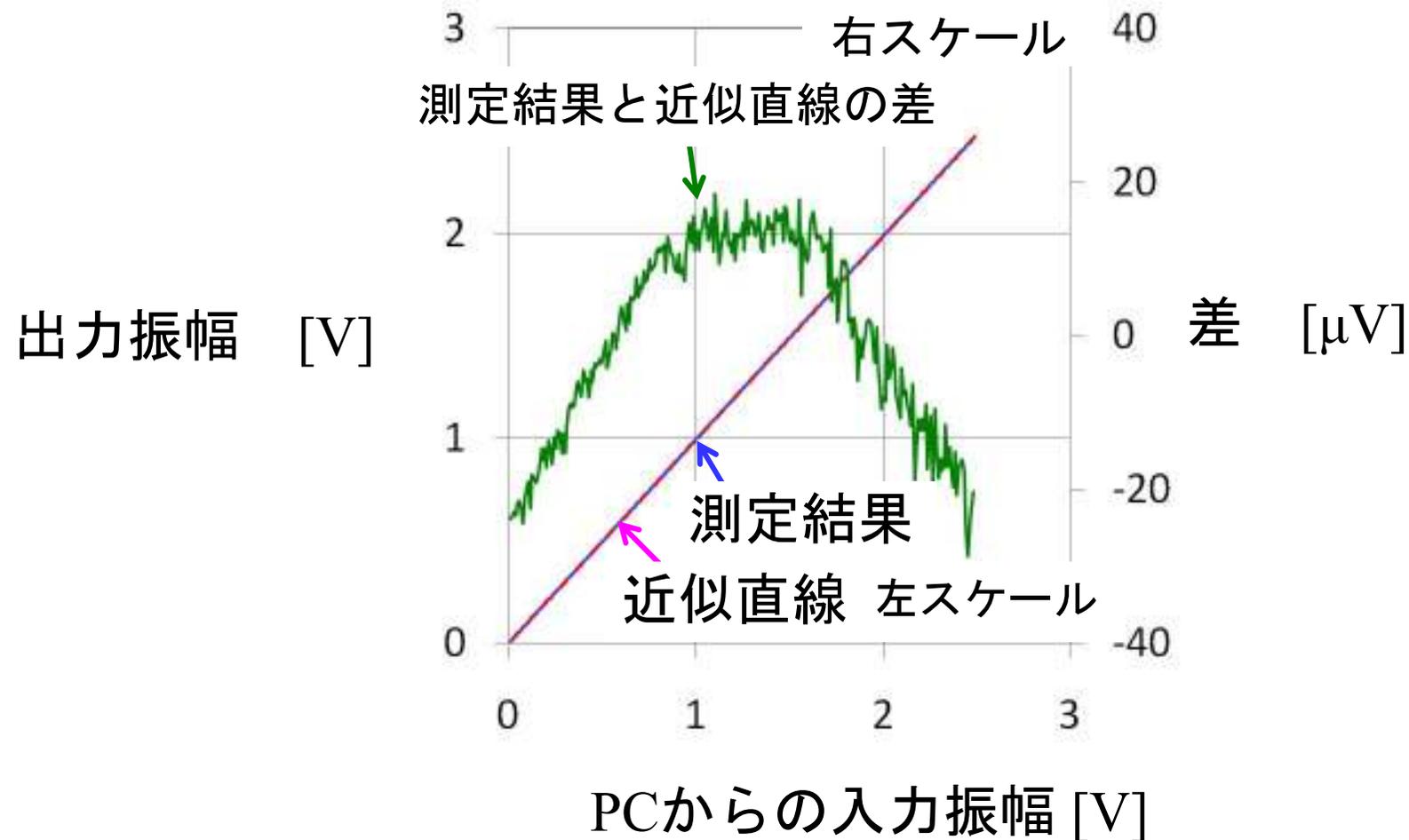
→ 各入力振幅に対して振幅とノイズレベルを計算

ノイズレベル (AC入力)



射場の磁場強度範囲においてノイズレベルは分解能の要求値16ビットを満たす。
入力振幅が大きくなるほどノイズレベルが大きくなる理由は現在調査中

振幅の線形性 (AC入力)

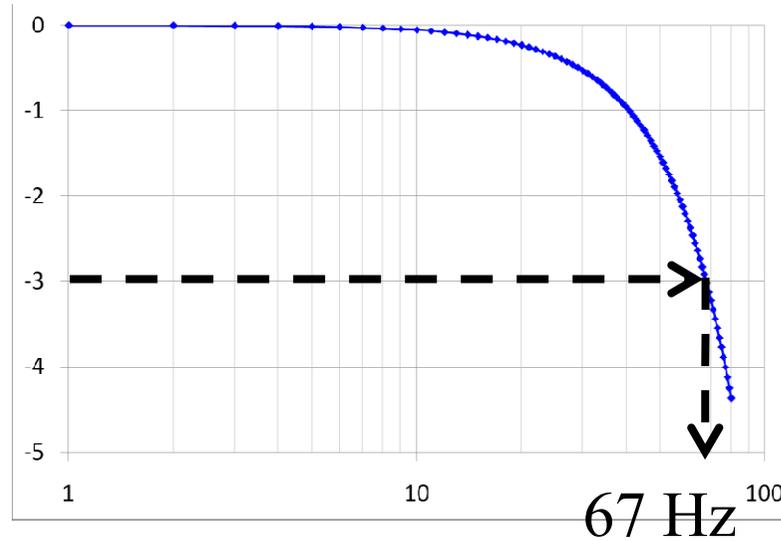


振幅の非線形性は $5 \times 10^{-5}\%$

→ 線形性の要求値 0.005% を満足している

周波数応答

減衰率
dB



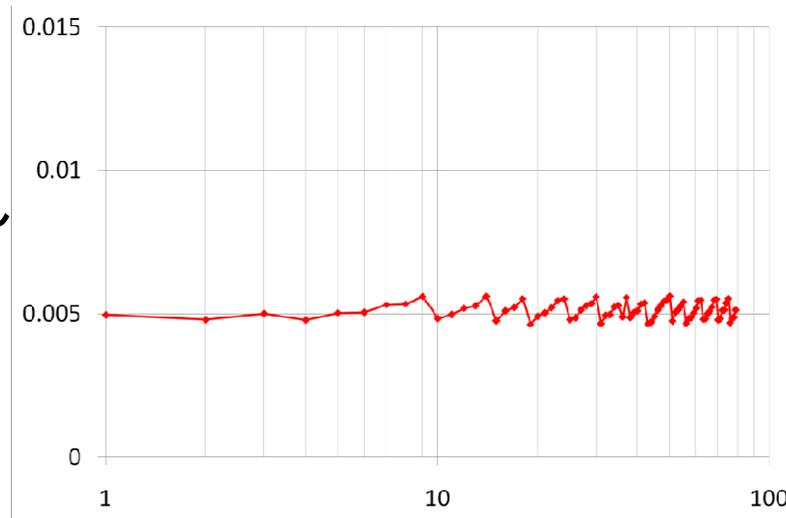
要求値

カットオフ周波数 65 Hz以上

測定値

カットオフ周波数 67~68 Hz

時間遅れ
sec



要求値 (変動) ± 2.5 msec以内

設計値 5.0 msec

(アナログフィルタによる時間遅れ)

位相応答から計算した

時間遅れ 4.6~5.4 msec

周波数 [Hz]

研究の最終目的

- ・ SCOPE衛星搭載磁力計の開発
- ・ 仕様

分解能 8 pT/ビット

(±4096 nT、20ビット)

線形性 0.005 % (=0.4 nT)

本研究の目的

- ・ 観測ロケットS310-40号機搭載
磁力計の開発

分解能 2 nT/ビット

(±65536 nT、16ビット)

線形性 0.005 % (=6.6 nT)

本研究の特徴

- ・ デジタル方式フラックスゲート磁力計のDAC部に $\Delta\Sigma$ 変調方式を採用
長所 新規DAC素子の開発が不要
高磁場分解能
原理的に高い線形性を確保ができる

これまでに得られた成果

- ・ $\Delta\Sigma$ DACの性能評価を行った。

分解能 : 2 nT以下 (16ビット)

線形性 : 0.006 %以下

周波数応答 : カットオフ 67 Hz@-3 dB

時間遅れ 5 msec

今後の予定

2010年 9月上旬 磁力計の製造

参考文献

- [1] J. L. Burch and V. Angelopoulos, The THEMIS Mission. Springer New York, 2008
- [2] H U Auster et al, 1995, *Meas. Sci. Technol.* **6** 477-481.
- [3] M. Kono, M. Koyanagi, and S. Kokubun, A Ring-Core Fluxgate for Spinner Magnetometer, *J. Geomag. Geoelectr.*, vol.36, pp149-160, 1984
- [4] Primdahl, F., The fluxgate magnetometer, *Journal of Physics E: Science Instrum.*, Vol.12, pp241-253, 1979
- [5] James C. Candy et al, “The Structure of Quantization Noise from Sigma-Delta Modulation”, *IEEE Trans. Commun.*, vol. COM-29, pp. 1316-1323, 1981
- [6] Robert M. Gray, “Oversampled Sigma-Delta Modulation”, *IEEE Trans. Commun.*, vol. COM-35, pp. 481-489, 1987
- [7] Ning He et al, “Double-Loop Sigma-Delta Modulation with dc Input”, *IEEE Trans. Commun.*, vol. 38, pp. 487-495, 1990
- [8] Richard Schreier 著、和保 孝夫・安田 彰 監修、 $\Delta\Sigma$ 型アナログ/デジタル変換器入門
- [9] 岡田 和之, 松岡 彩子, 中村 正人, JAXA - RR-05-019, 2006