ANALOG DEVICES

想像を超える可能性を

AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

# 意外と知らないDACシステムの設計技法

## —プリント基板への実装例も交えて—

アナログ・デバイセズ株式会社

石井 聡

**9/13/2016 – 9/16/2016**

*Analog Devices Proprietary Information ©*

# アジェンダ

1. イントロダクション（DA変換とは）
2. DACアーキテクチャとそれぞれの特徴
3. DAC実装のアナログ設計の考え方
4. DACへのデータ伝送と基板レイアウト
5. 完成した基板を動かしてみると・・・
6. まとめ

Appendix 1. ダンピングのための抵抗接続のしくみ
Appendix 2. DACの折り返しスペクトルについて
Appendix 3. DACのノイズ特性を評価してみる


Analog Devices Proprietary Information ©
ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

ANALOG DEVICES

想像を超える可能性を

AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

1. 1. イントロダクション
2. （DA変換とは）



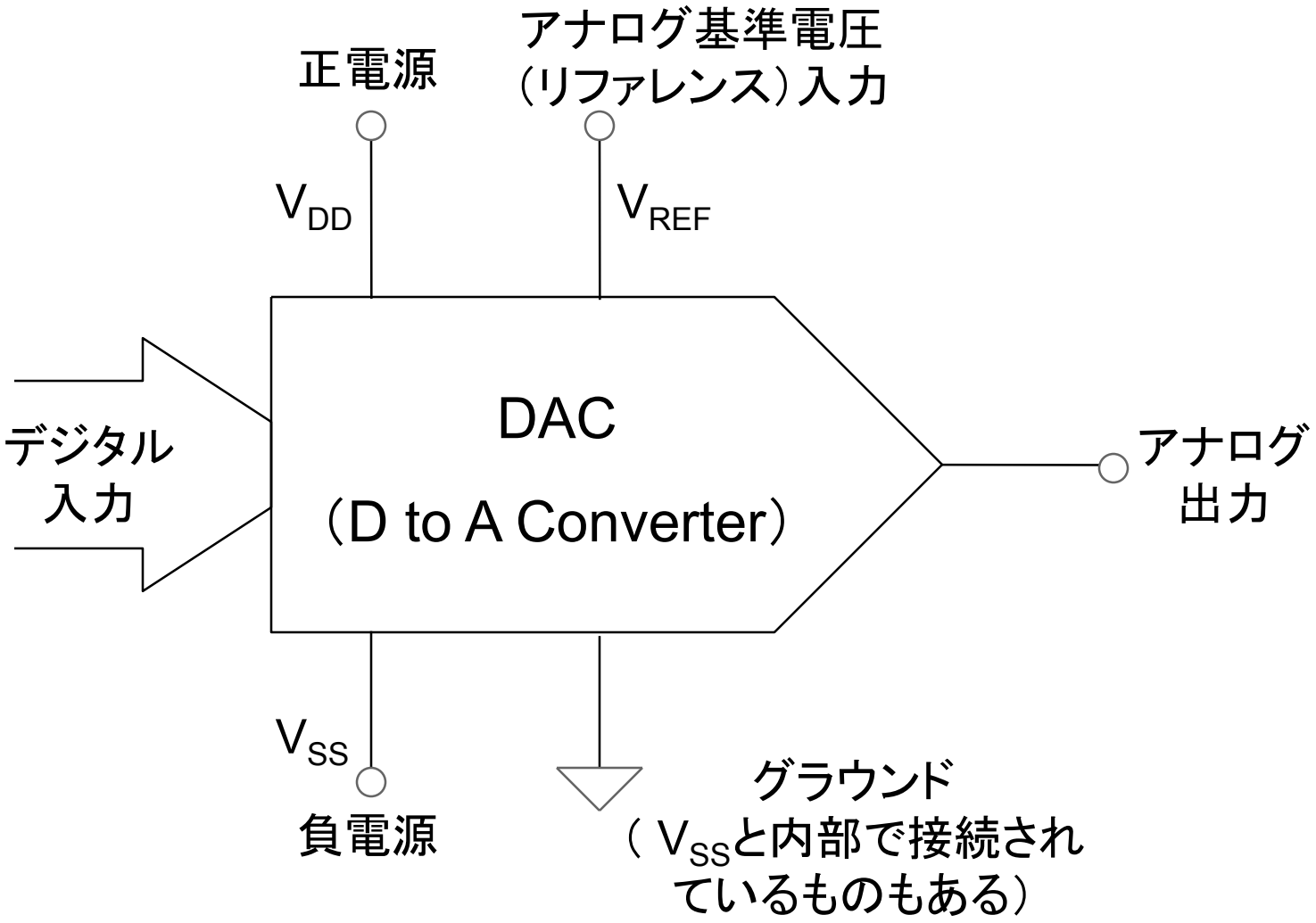
*Analog Devices Proprietary Information ©*

# このセッションで得られる知識

- DACの各種アーキテクチャ
- 電流モードR-2R DACのメリットと使用上の注意点や設計ノウハウ
- ミックスド・シグナル・プリント基板設計の考え方
- 各種ミックスド・シグナル・システムにも応用できる知識

Analog Devices Proprietary Information ©
ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

# DAコンバータの基本図
# 〔基準電圧（リファレンス）外付けの場合〕





Analog Devices Proprietary Information ©
ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

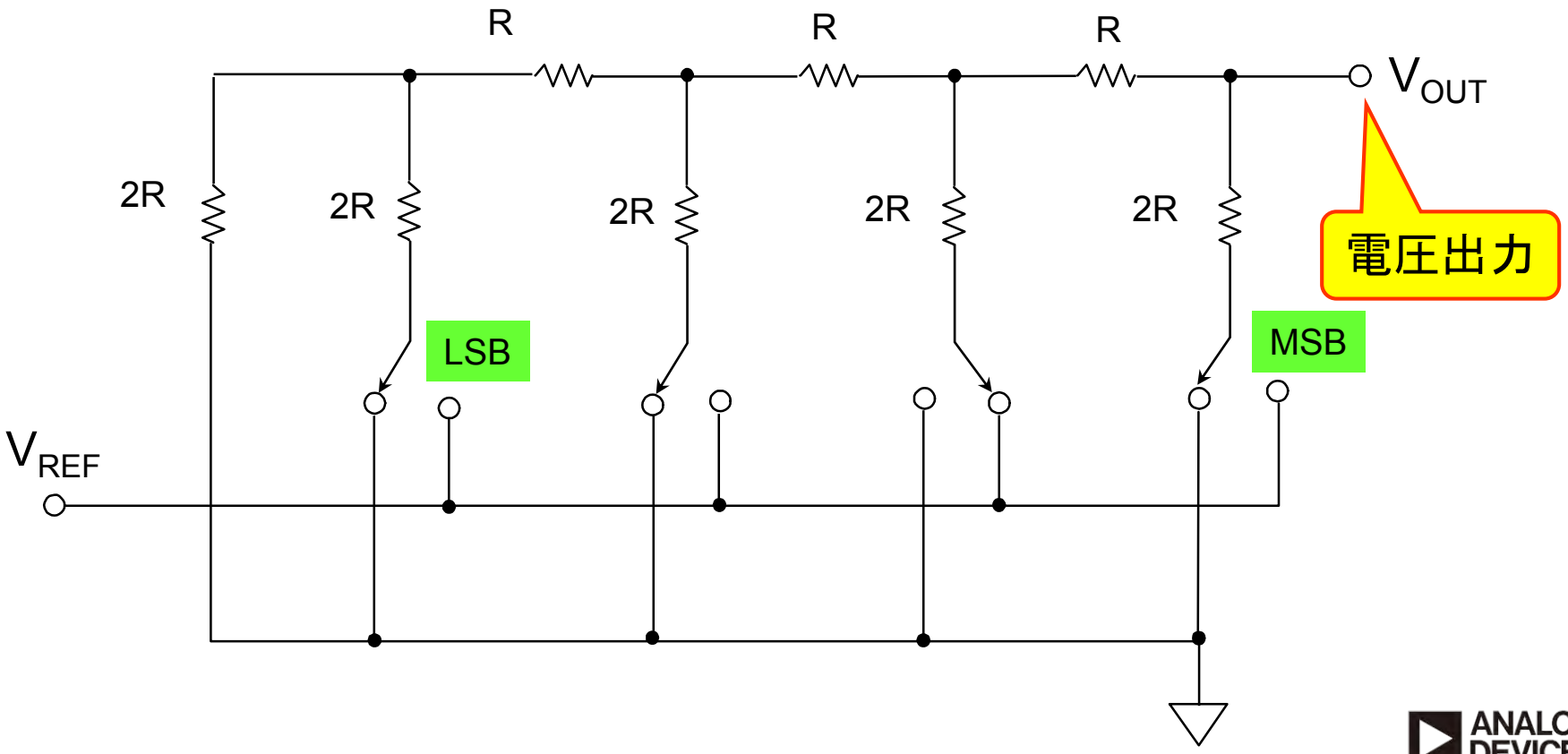
ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

# 2. DACアーキテクチャとそれぞれの特徴


*Analog Devices Proprietary Information ©*

# 電圧モード R-2R ラダー抵抗DAC

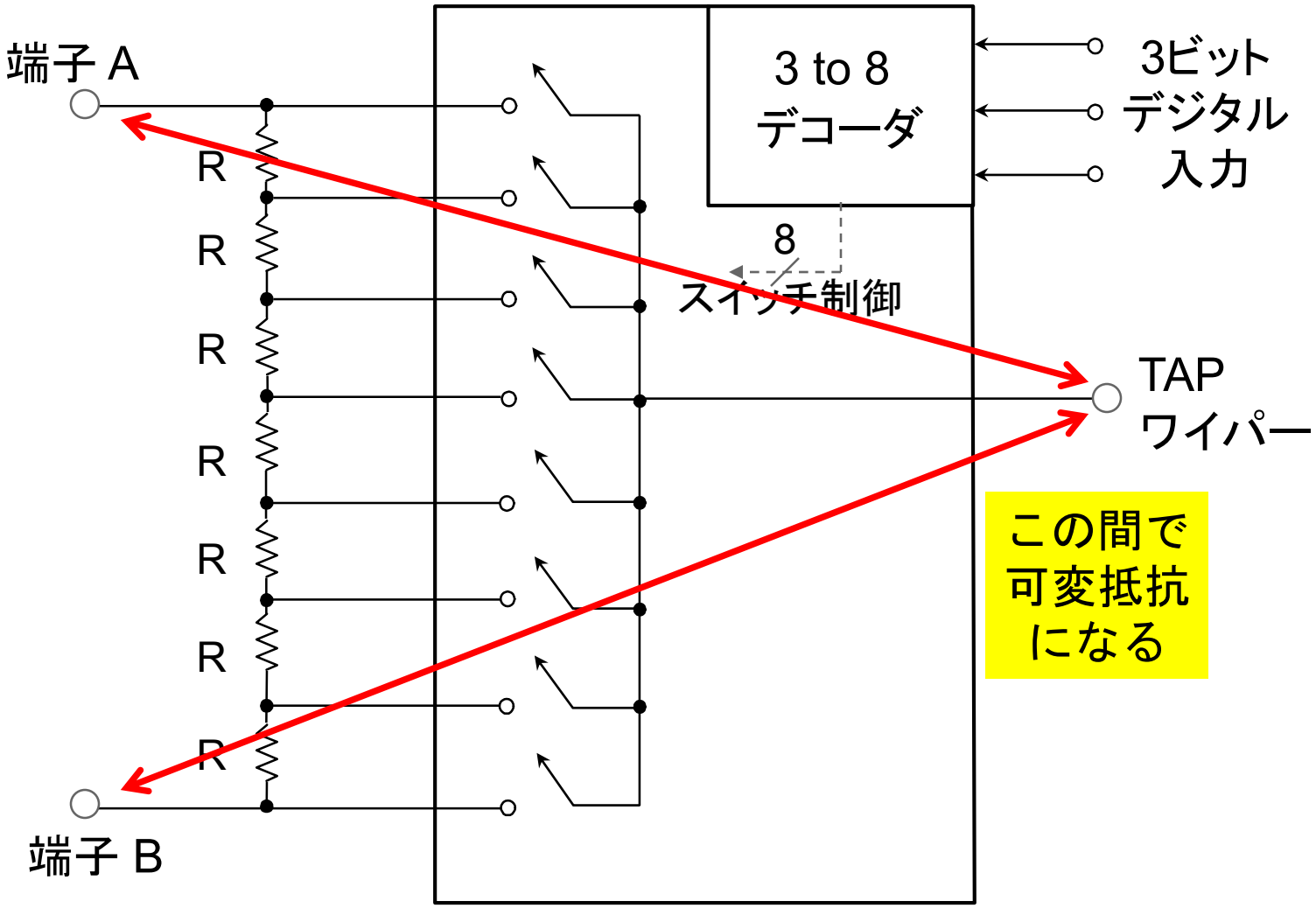
※$V_{OUT}$端子から見たインピーダンスはスイッチの状態によらず一定





Analog Devices Proprietary Information ©
ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

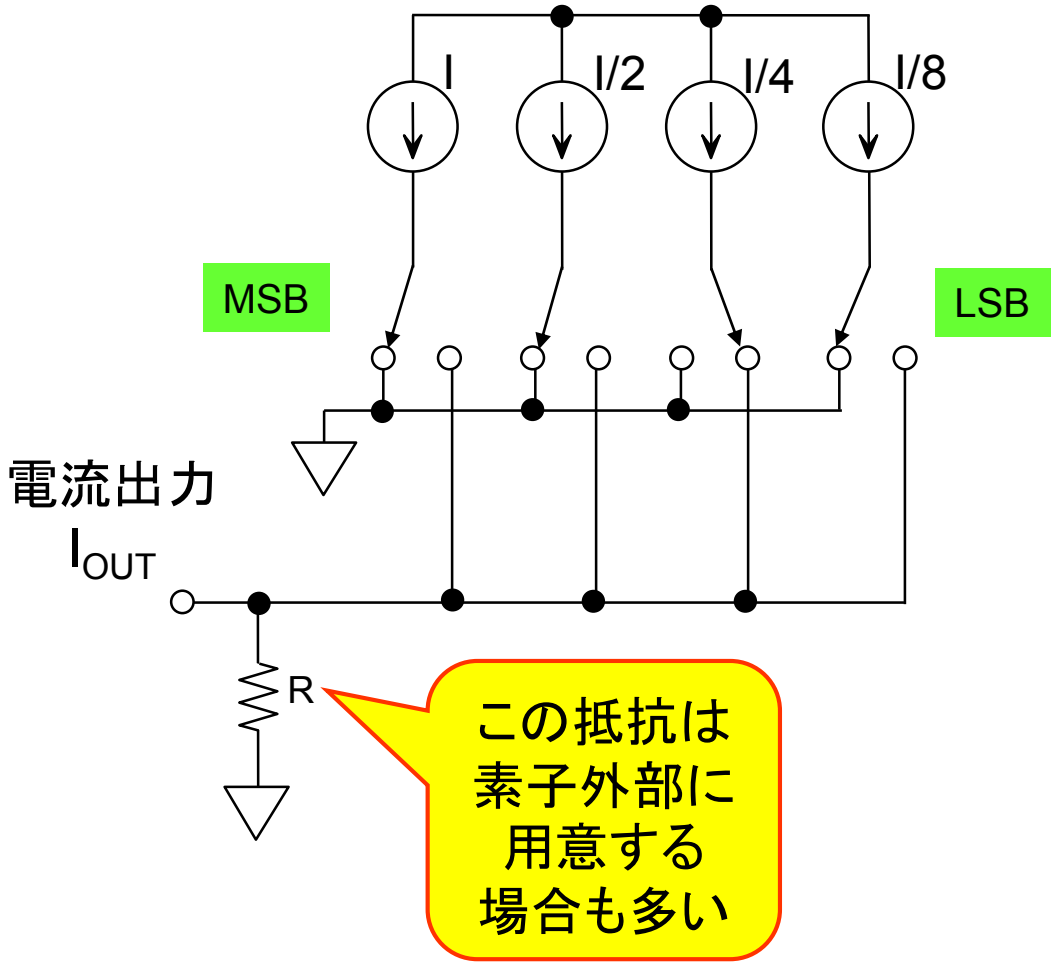
# ストリング型DACとその進化形
# デジタル可変抵抗「デジタル・ポテンショメータ」DigiPot





Analog Devices Proprietary Information ©
ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

# バイナリ電流スイッチングを使ったDAC回路（高速DACに多い）





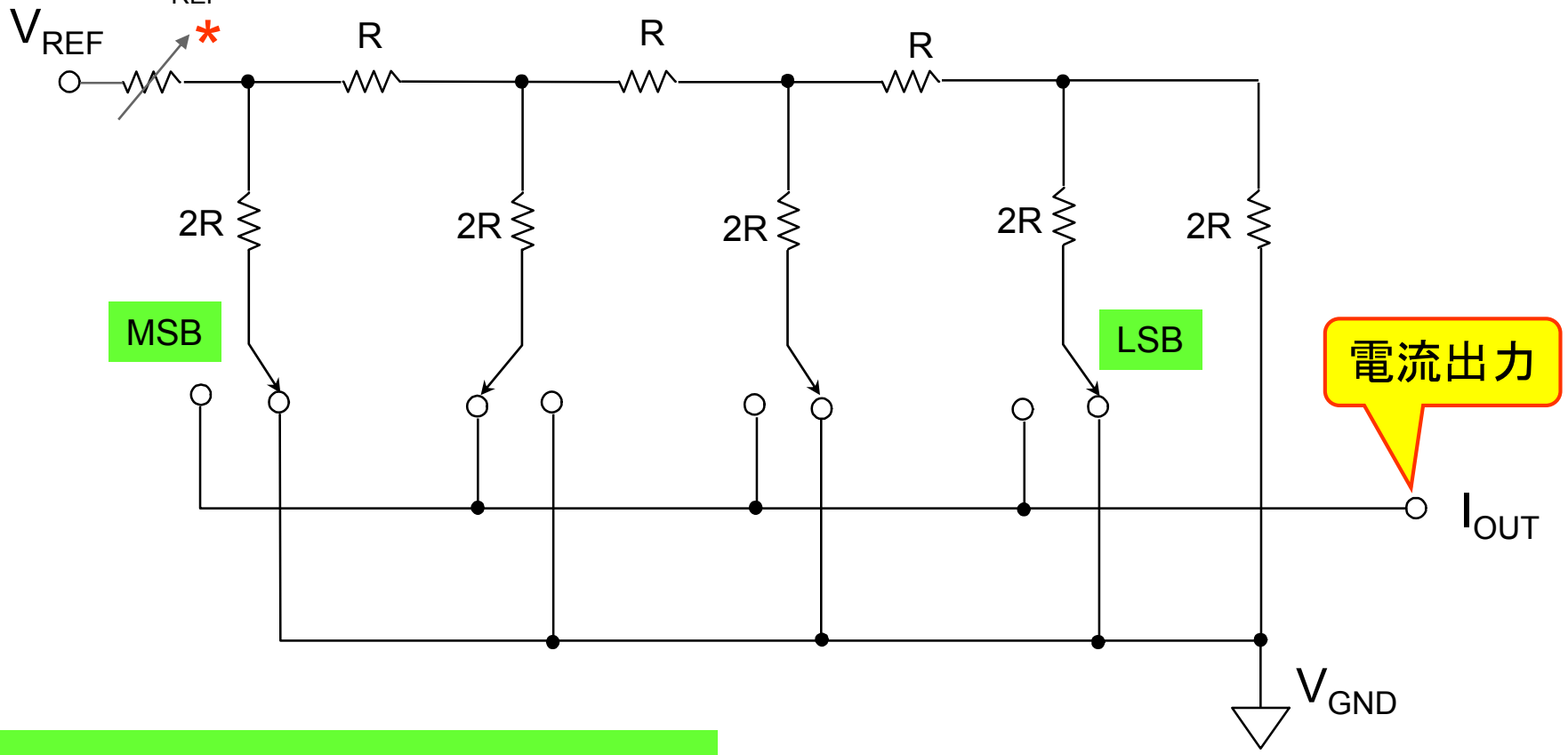
Analog Devices Proprietary Information ©
ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

# （意外と知られてないが便利な）電流モード R-2Rラダー抵抗DAC

## 【本セッションのお題】

ADIのDACでは結構多い
メリットは技術資料MT-015も参照

※ $V_{REF}$端子から見たインピーダンスはスイッチ状態によらず一定




*この抵抗はRより十分小さい抵抗値であり、ゲイン調整のためのトリム用途

仮想グランド$V_{GND}$に$I_{OUT}$が流れるように外部回路を設計する


Analog Devices Proprietary Information ©
ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

# 便利に使える電流モード R-2Rラダー抵抗DAC

ADIのDACでは結構多い
メリットは技術資料MT-015も参照

- $V_{REF}$入力にゲイン抵抗が接続でき、ゲインのトリムが可能
- 電圧モードDAC（製品にもよるが）と比べてコードの下限・上限での動作が安定
- $V_{REF}$入力に高電圧やマイナス電位を加えられる（スイッチがグラウンド電位で動くから）
- $V_{REF}$を信号入力としてDACコードでレベル可変できる（意外と高い周波数まで動作する）
- この考え方で「乗算DAC（$I_{OUT} = V_{REF} \times$ デジタルコード）」が構成できる
- **使用上の注意点をきちんと抑えて最適化！**

Analog Devices Proprietary Information ©
ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

# 3. DAC実装のアナログ設計の考え方

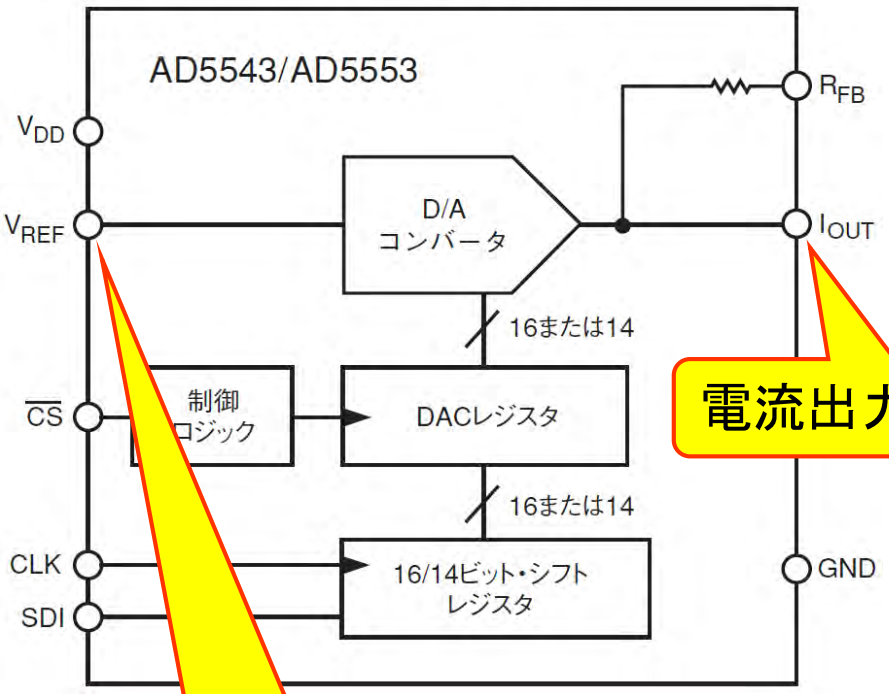

*Analog Devices Proprietary Information ©*

# 使用したDAC「16bit 電流出力型 AD5543」

## 特長

16ビット分解能：AD5543
14ビット分解能：AD5553
微分非直線性：±1 LSB
積分非直線性：±2 LSB (AD5543)
積分非直線性：±1 LSB (AD5553)
ローノイズ：12nV/√Hz
低消費電力：$I_{DD}$=10μA
セトリング時間：0.5μs
4象限の乗算リファレンス入力
2mAのフル・スケール電流、$V_{REF}$=10Vで±20%
電流-電圧変換を可能にするRFBを内蔵
3線式インターフェース
超小型のMSOP-8またはSOIC-8パッケージ

機能ブロック図

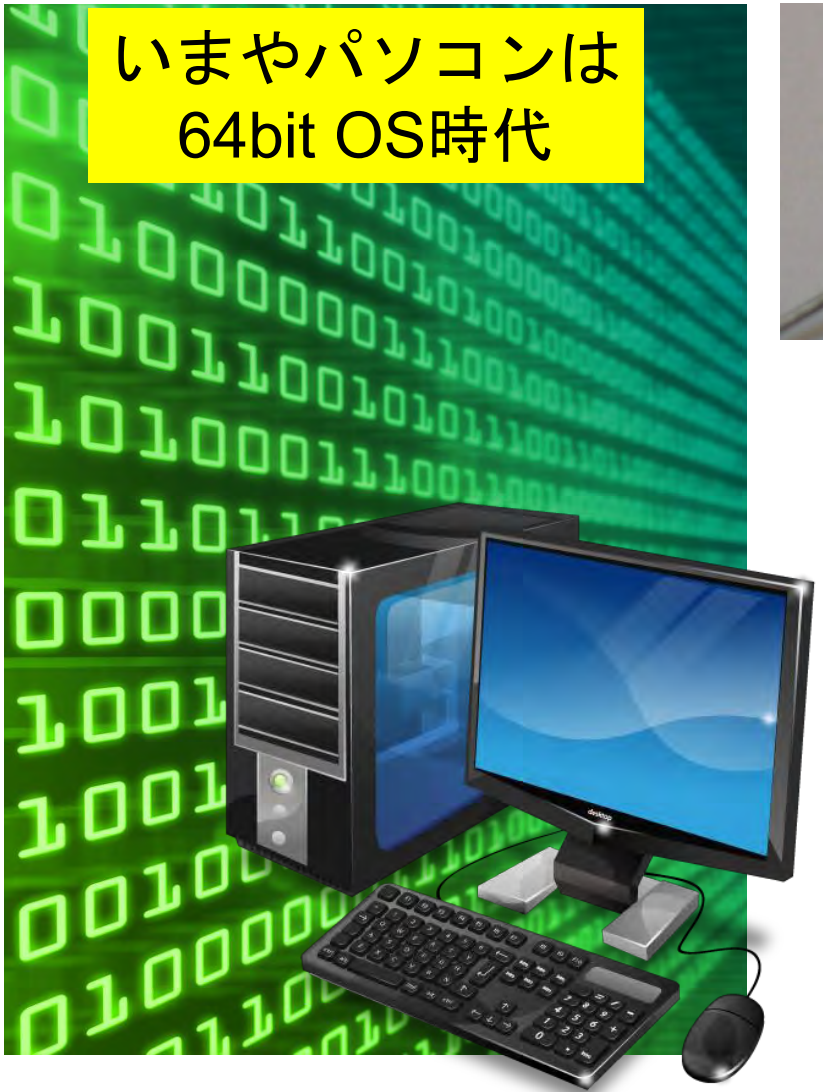


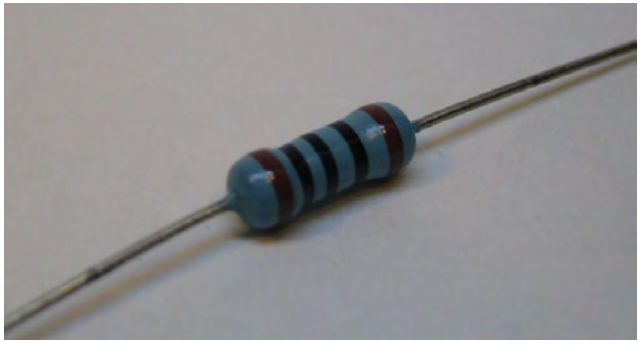

電流出力

$V_{REF}$ = ±15Vで
正弦波7MHz(@-3
dB)を入れられる！


Analog Devices Proprietary Information ©
ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

# 64bit OS時代の「たった16bitのアナログ」DACの注意点



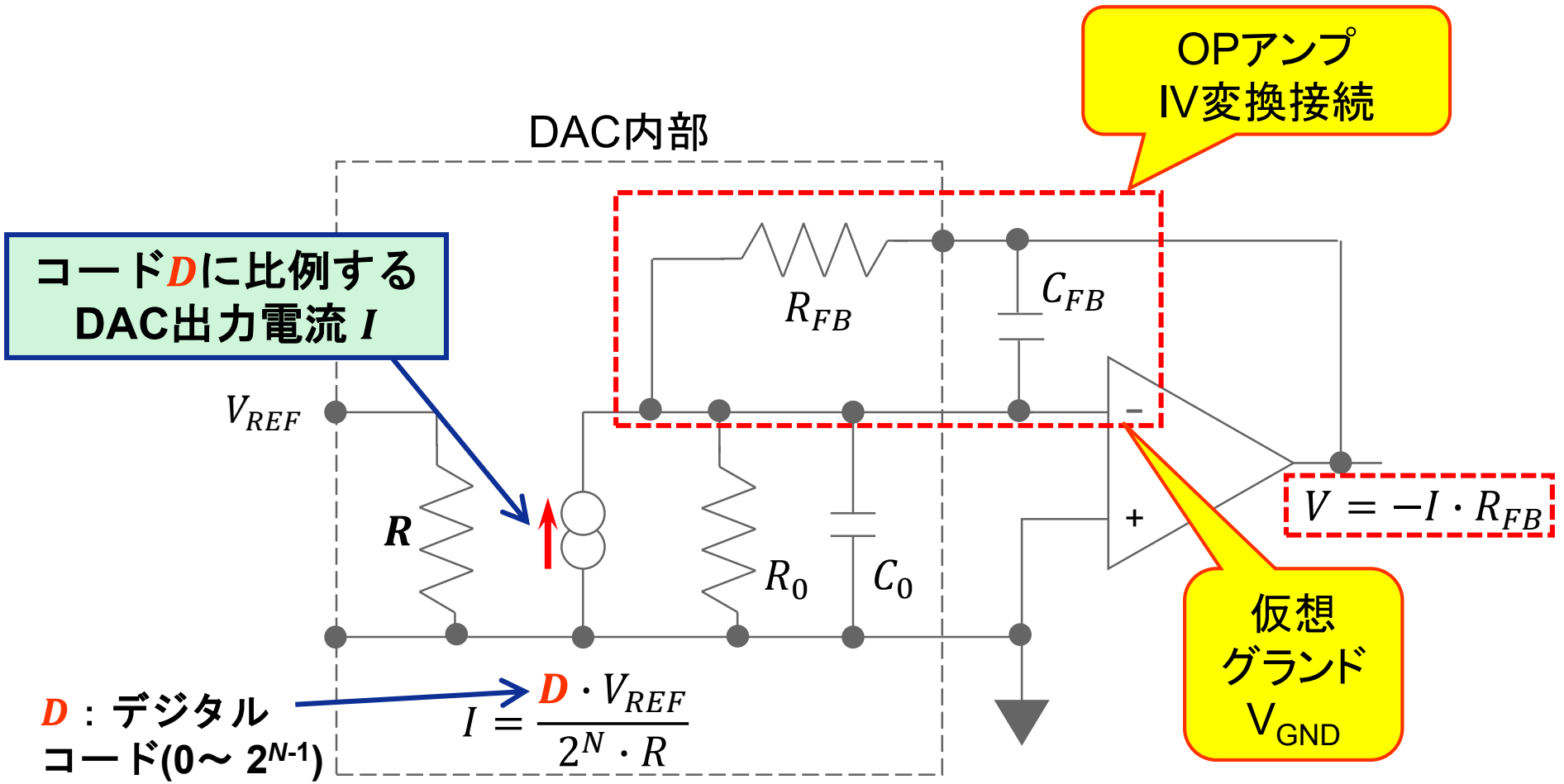
高精度抵抗は
精度1%（一例）

16ビットは$1/2^{16}$ = **0.0015%**！
むちゃくちゃ細かい！

それ相応のアナログ（DAC）回路
設計の配慮が必要


Analog Devices Proprietary Information ©
ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

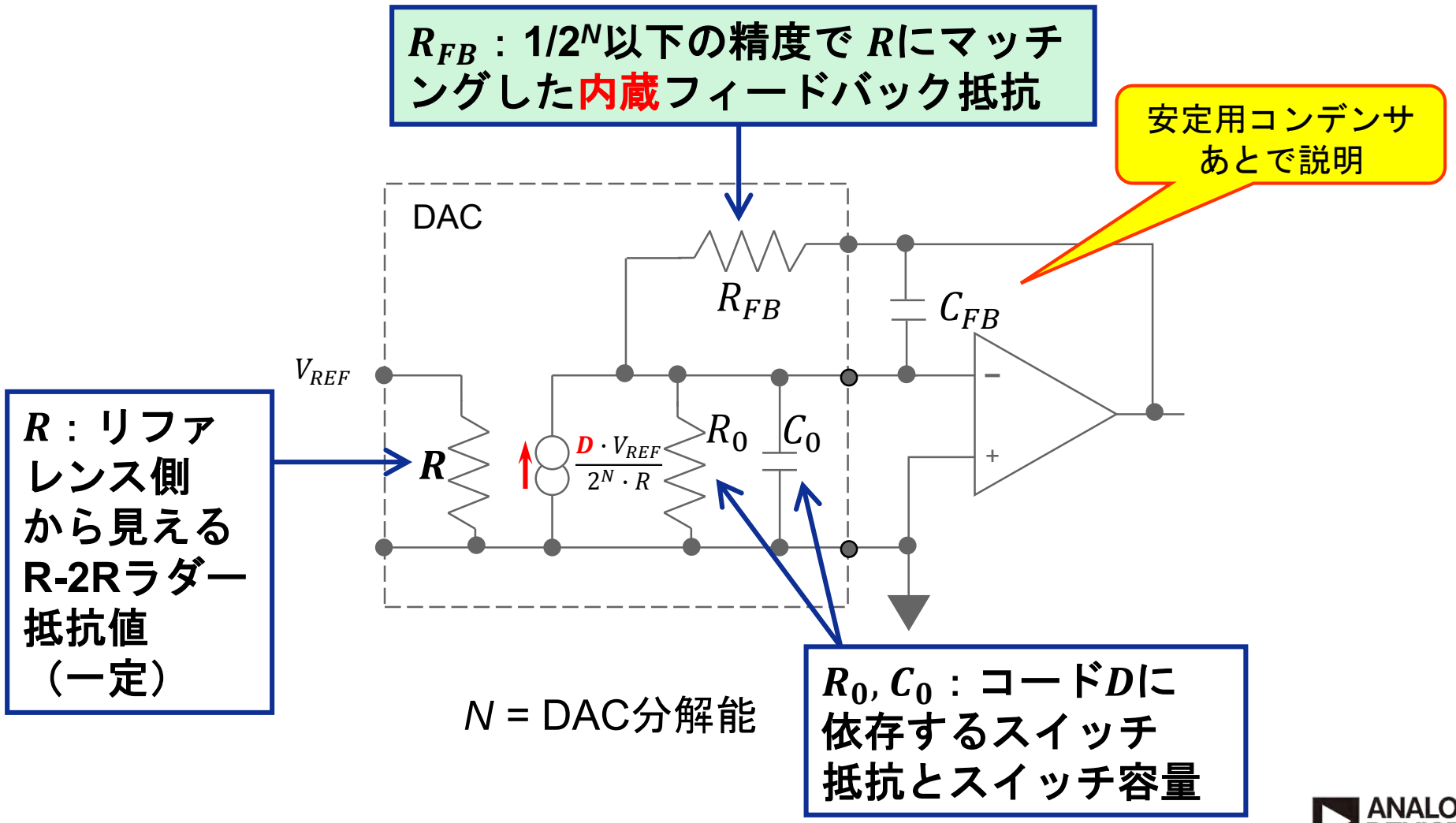
# 電流モードR-2R DACの簡易等価回路




N = DAC分解能


Analog Devices Proprietary Information ©
ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

# 電流モードR-2R DACの簡易等価回路 （続き）



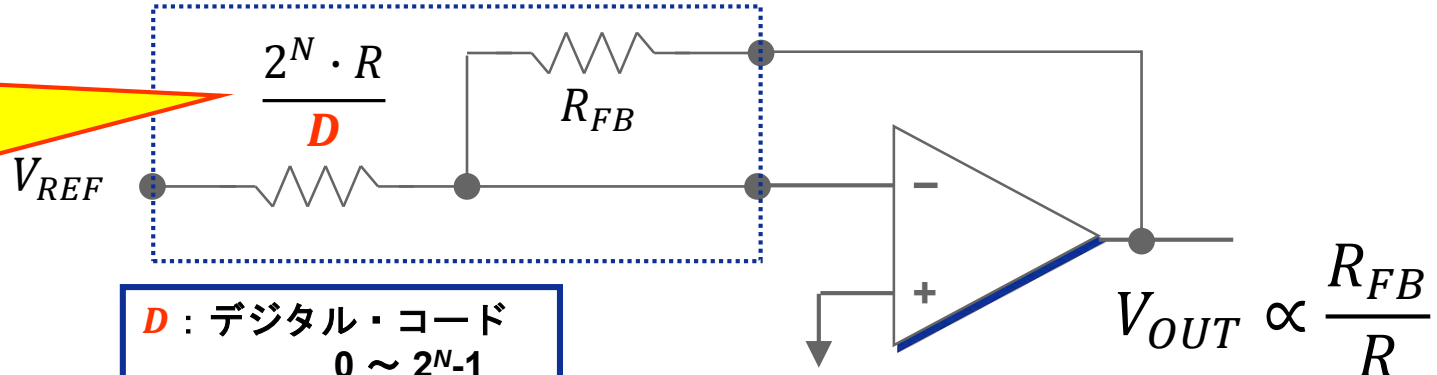



Analog Devices Proprietary Information ©

ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

# 内蔵フィードバック抵抗を使う理由は？

この抵抗値は説明の簡単化のため。実際は違う（考え方はスライド10）




$D$：デジタル・コード
0 ～ $2^N$-1
$N$ ：DAC分解能

## $R_{FB}$が外付けだと

外付$R_{FB}$が正確でも、$R_{FB}$対$R$が各種原因（IC内部の薄膜フィルム抵抗の温度係数など）でトラックせず、±20%ほど狂う可能性あり

## $R_{FB}$が内蔵だと精度が維持できる

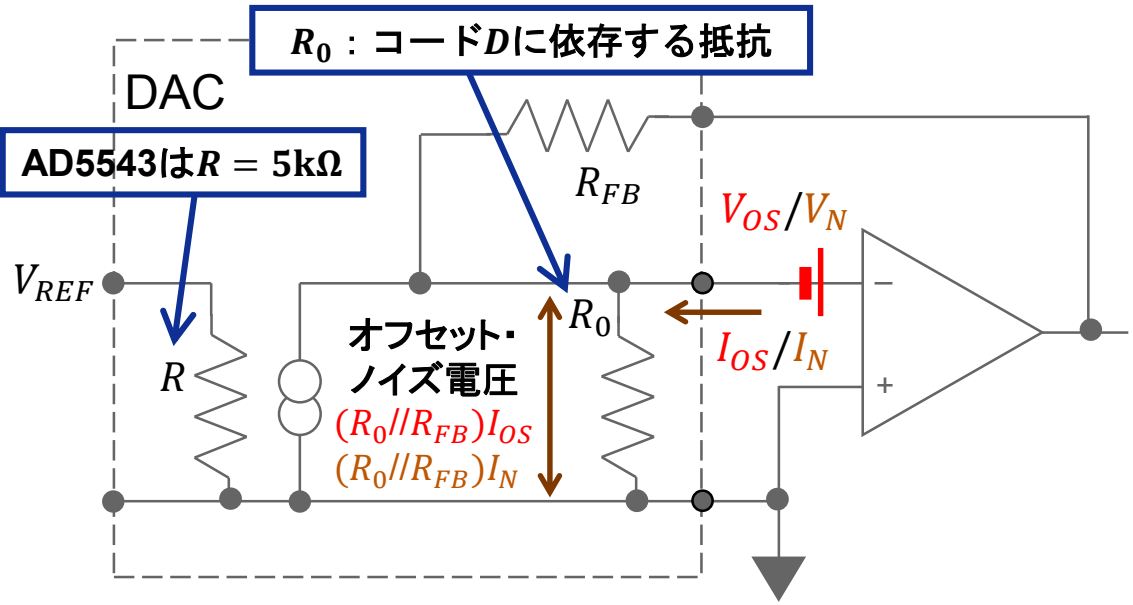
$R$と内蔵$R_{FB}$は、1/$2^N$以下の精度でマッチング

温度変化により$R$が「ある率で」ずれると、$R_{FB}$も同じだけずれる

そのため$R_{FB}$対$R$の比は変わらない


Analog Devices Proprietary Information ©
ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

# 適切な出力アンプの選定（デモでは手持ちのAD8051を使用）




オフセット電圧 $V_{OS}$
オフセット電流 $I_{OS}$
電圧性ノイズ $V_N$
電流性ノイズ $I_N$

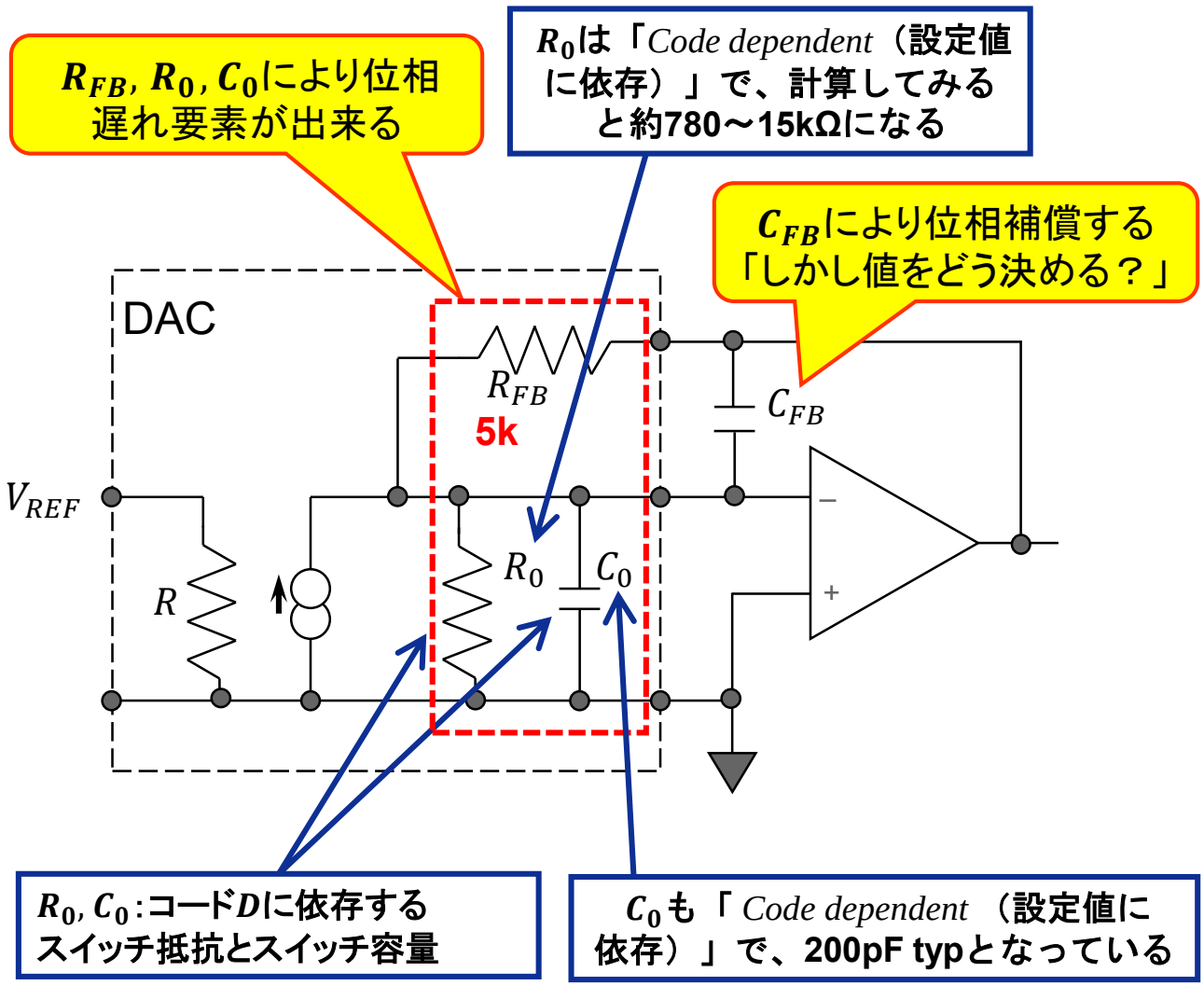
左記に注意し
これらの低い
アンプを使う

AD5543 D/SではTable 9に推奨アンプが記載

**<u>コード$D$に依存し、$R_0$が変化</u>**
**<u>$R_0$の変化に依存し、ノイズゲイン$G_N = 1 + R_{FB}/R_0$が変化</u>**
**⇒ 出力オフセット電圧、出力ノイズ電圧が変調を受け、**
**⇒ DNL（微分非直線性）も悪化**


Analog Devices Proprietary Information ©
ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

# 出力アンプの異常発振対策





Analog Devices Proprietary Information ©
ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

# 出力アンプの異常発振対策（AD5543のデータシートより）

## STABILITY

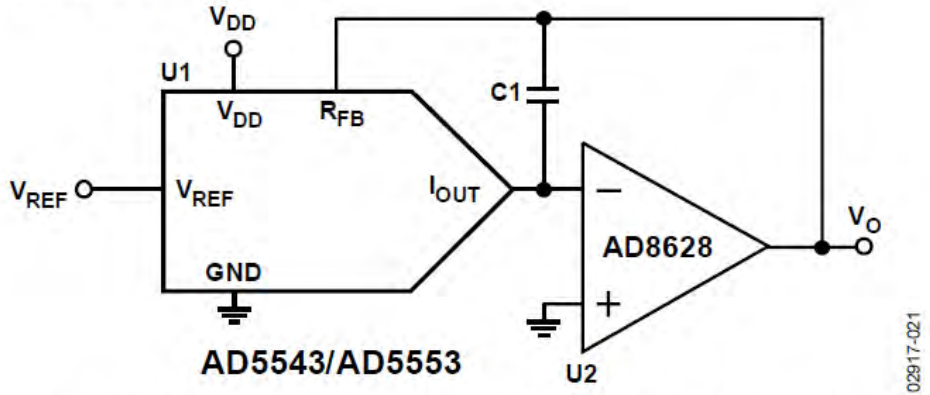



*Figure 21. Optional Compensation Capacitor for Gain Peaking Prevention*

An optional compensation capacitor, C1, can be added for stability, as shown in Figure 21. C1 should be found empirically, but 20 pF is generally adequate for the compensation.

「empirically」は「経験的に」という意味

補正には20pF程度が適当

実験での検証は、$I_{OUT}$とグラウンドの間に（マージンを取るため）100pFのコンデンサを接続し、出力レンジの上、中、下あたりで、それぞれの微小変化をあたえ、ステップ応答を見ると良い（オーバーシュートのようすで位相余裕が分かる）


Analog Devices Proprietary Information ©
ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

# 4. DACへのデータ伝送と基板レイアウト


*Analog Devices Proprietary Information ©*

# AD5543を高速で動作させたい（AD5543のタイミング・ダイヤグラム）

最高速で
20ns × 16 cycle = 320ns
3.125Mspsが実現できる

DAC CLK最大周波数
50MHz

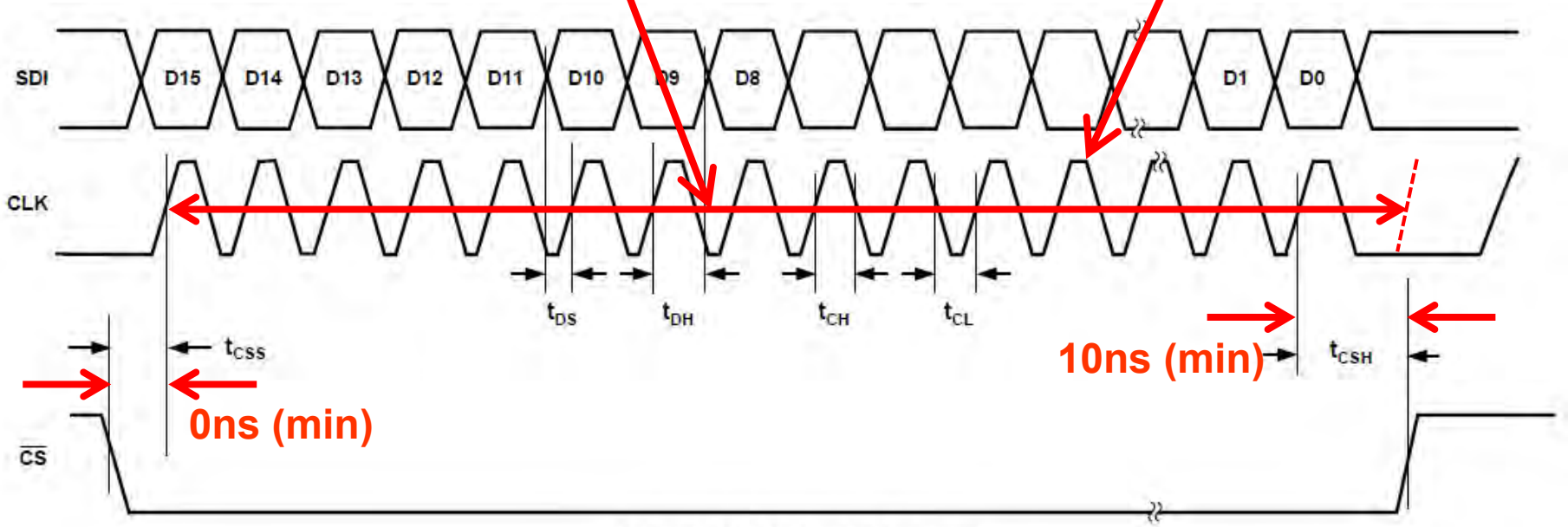



*Figure 4. AD5543 Timing Diagram*

デモでは80MHz FPGA CLKの2サイクルでDAC CLK（40MHz）を作成
また、余裕も考えて（きりの良い）1Mspsとした（/CSサイクル = 1us）
サイン波を作るFPGA内のCORDICアルゴリズムも33 FPGA CLK（412.5ns）必要だった

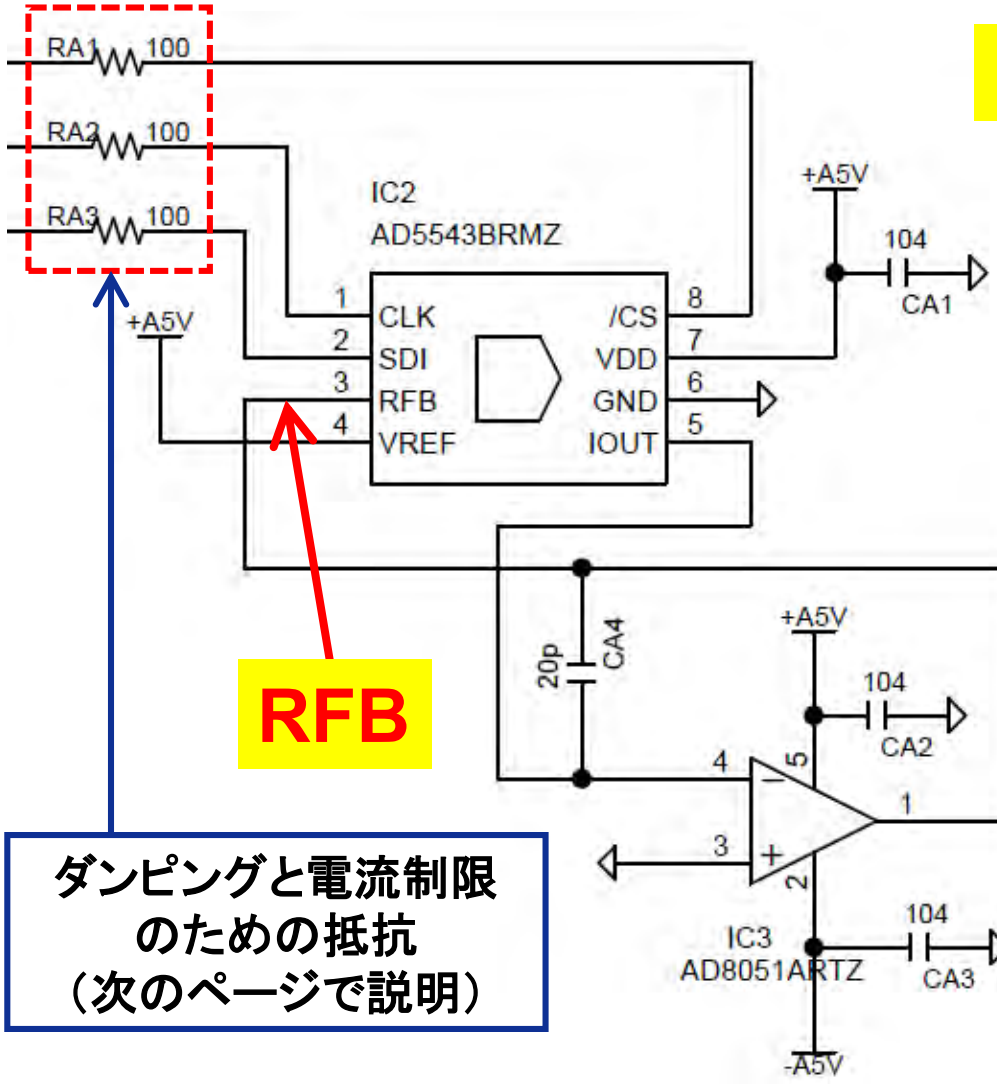

Analog Devices Proprietary Information ©
ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

# 完成したDAC基板（下はFPGA基板）

このデモ基板をP板.com展示ブースで展示しています
また関連する冊子「Arduinoと接続できるFPGA基板の設計とCORDICアルゴリズムの実装」も配布中です
※ 冊子はご名刺と交換となります

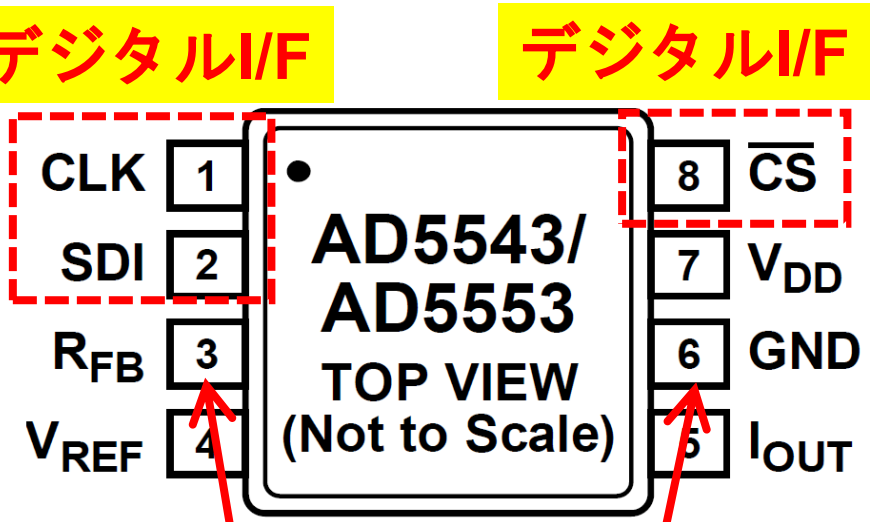
Analog Devices Proprietary Information ©
ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

# 【基板設計】アナログ経路とI/F信号のレイアウト




RFB

ダンピングと電流制限
のための抵抗
（次のページで説明）




RFB
アナログ

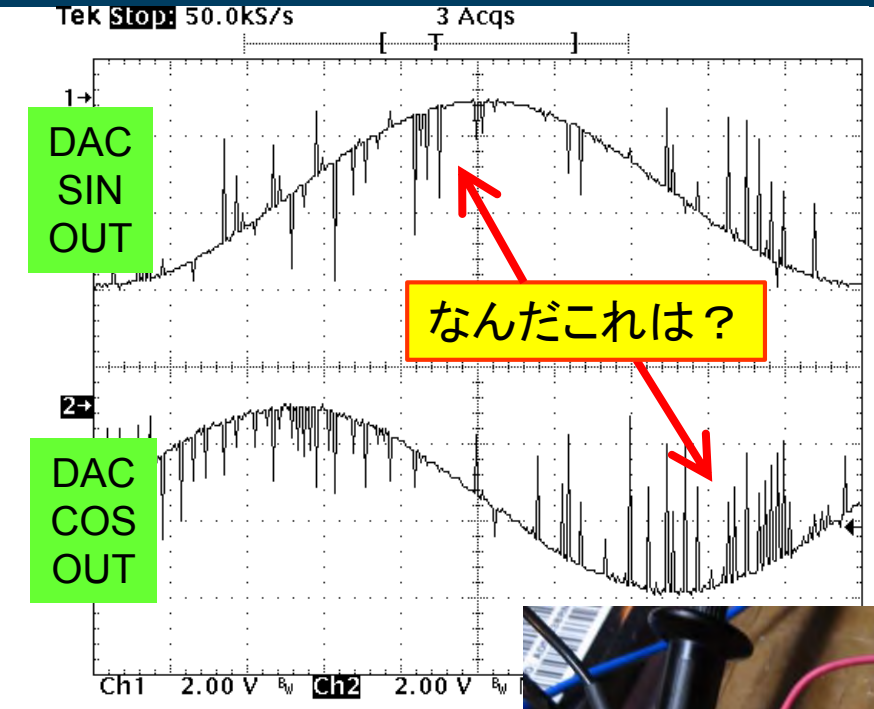
GND
どう接続？

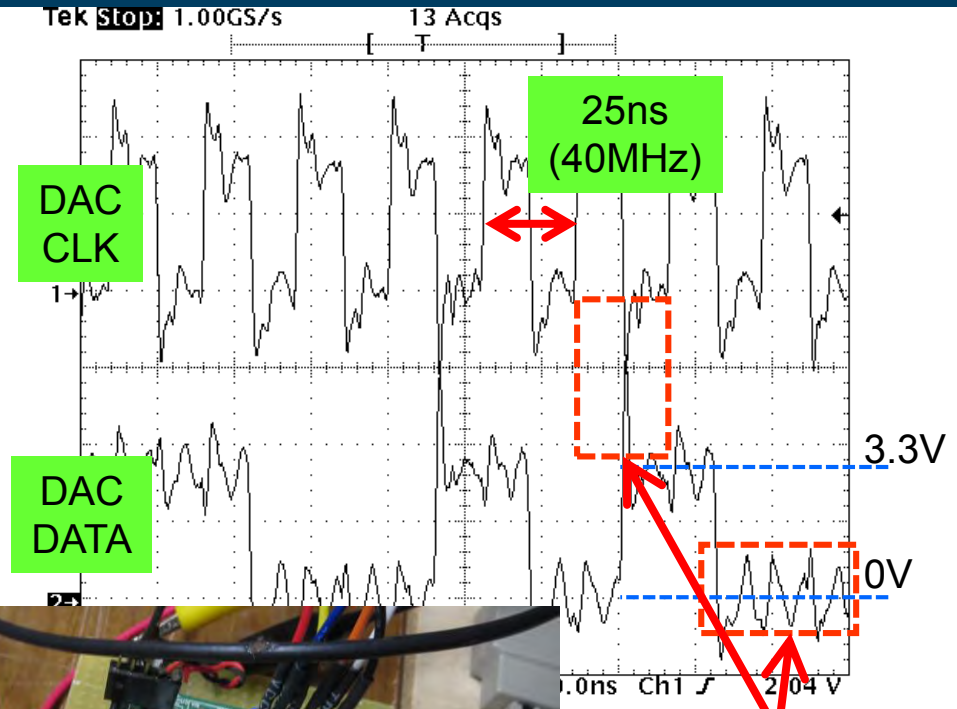


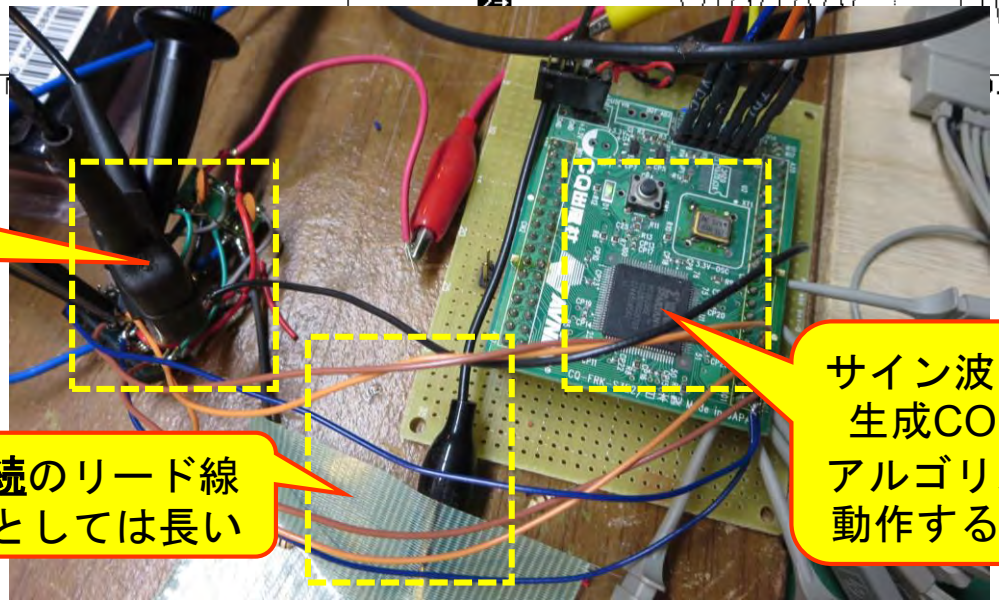
Analog Devices Proprietary Information ©

ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

# 【抵抗の挿入】高速信号で「なめた」試作（設計）をするとこうなる



DAC AD5543と AMP AD8051 90°ずれた2ch

大きく暴れている

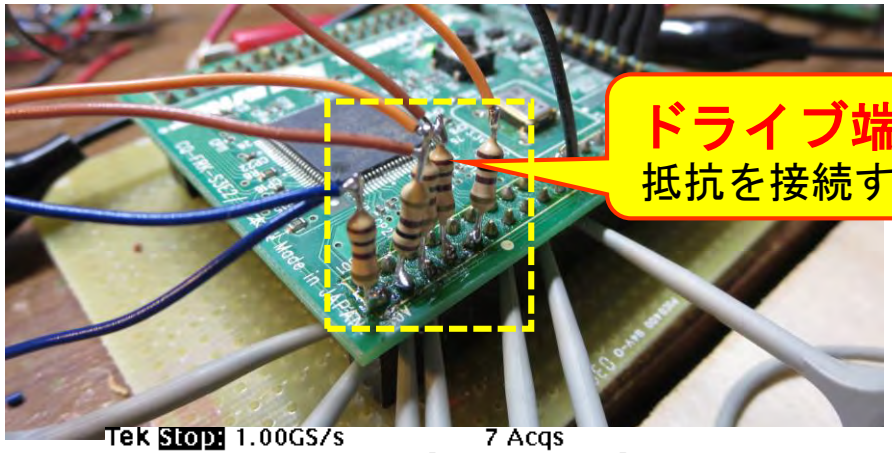
サイン波データ生成CORDICアルゴリズムが動作するFPGA

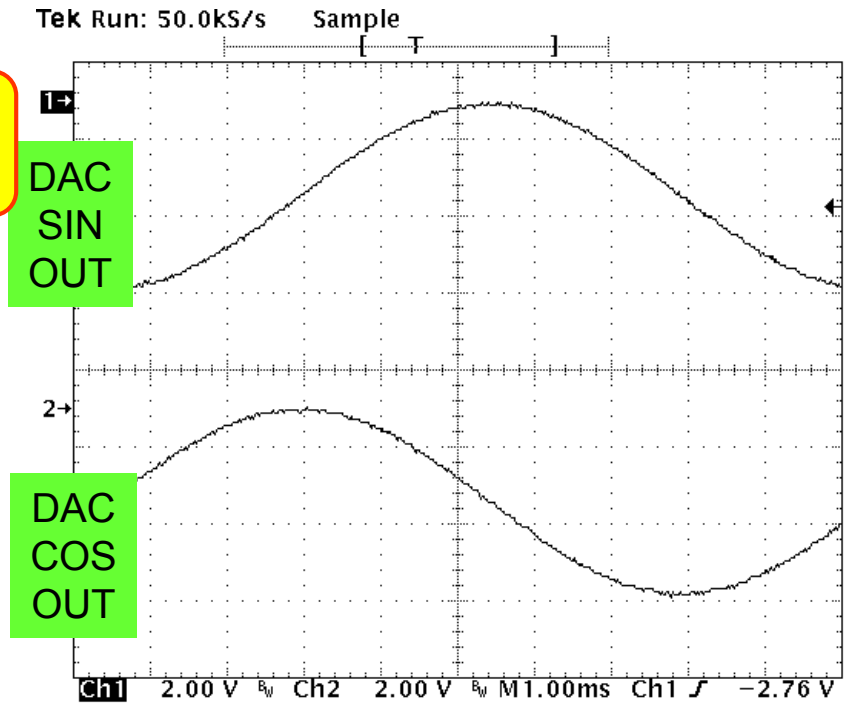
なめた接続のリード線 40MHz用としては長い

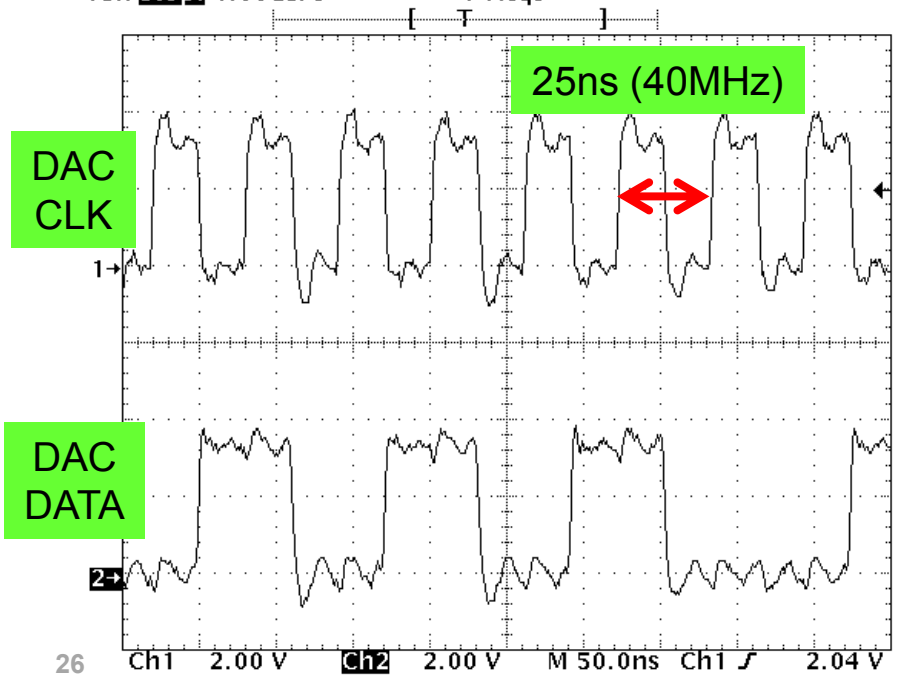


ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

# 【抵抗の挿入】電気理論を考慮した対策（対策と結果の測定）



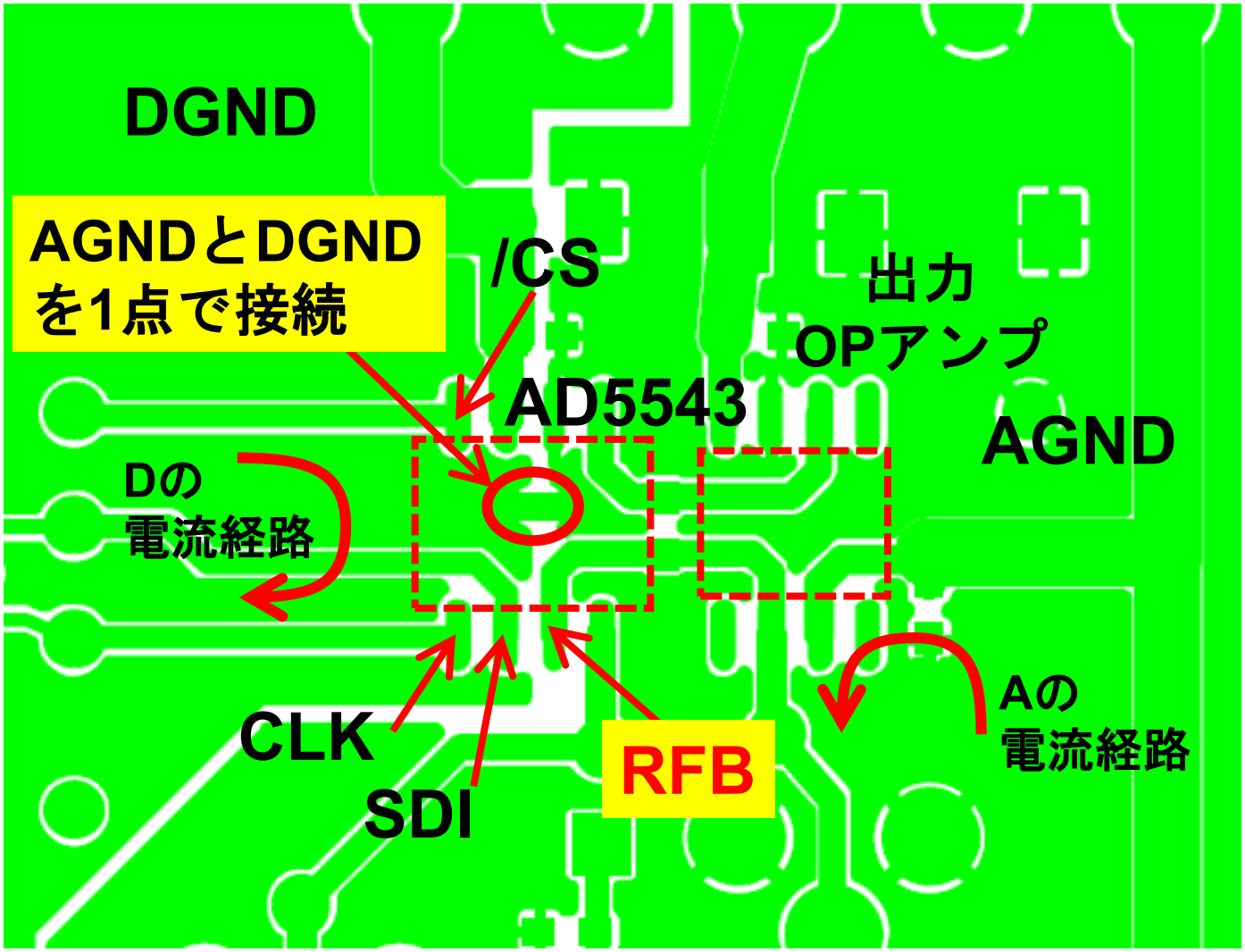




理論的詳細はAppendix 1を参照
プリント基板上でも同じ考え方


Analog Devices Proprietary Information ©
ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

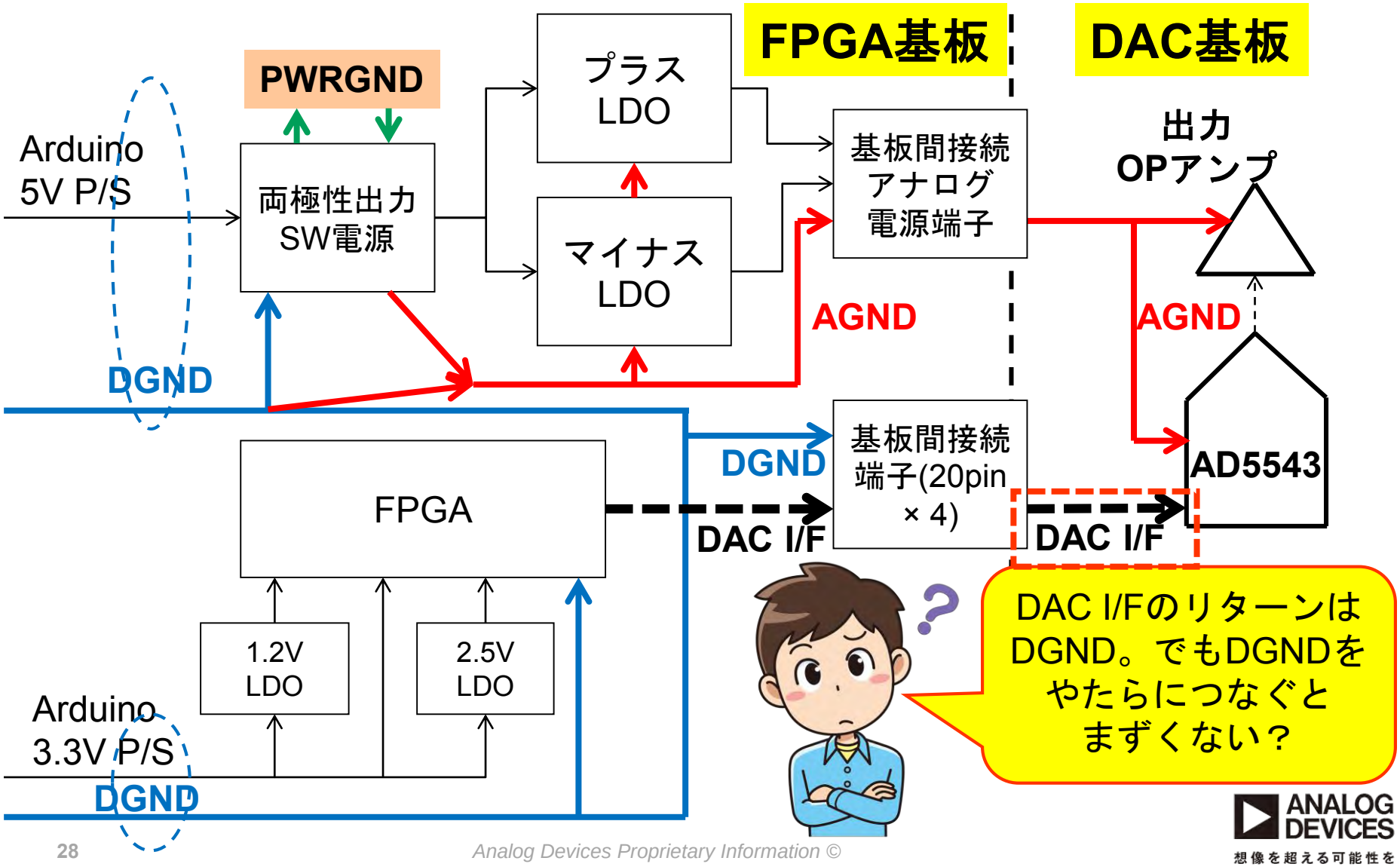
# 【グラウンド設計】EVAL-AD5543（ADI公式）評価ボードのアプローチ





Analog Devices Proprietary Information ©
ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

# 【グラウンド設計】本システムのグラウンド経路は複雑だったので





Analog Devices Proprietary Information ©
ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

# 【グラウンド設計】本システムのグラウンド経路を考慮した基板設計アプローチ「珍問／難問集 Issue 9」より

検索 （調べる／学ぶ）

チュートリアル

ライブラリ
- アナログ・ダイアログ
- 技術資料・記事・ビデオ検索
- 珍問／難問集 (RAQ)
- FAQ
- トレーニング & チュートリアル
- ビデオ
- ウェブキャスト

University Engagement

## 珍問／難問集

About The Author
**James Bryant**

## コンバータの接地（あるいは救いの哲学！）

アナログ・デジタル・コンバータ

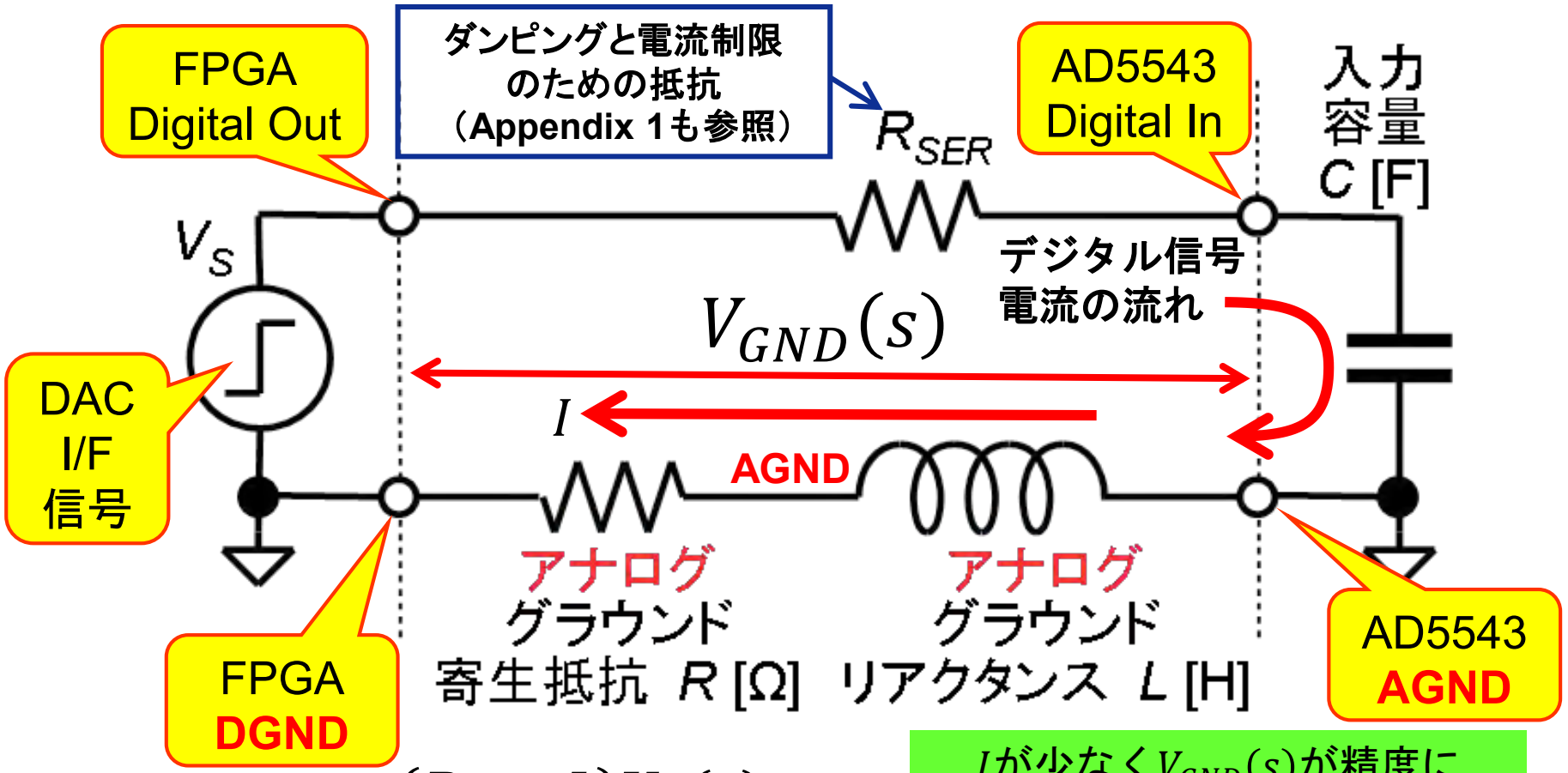
Q: 最近、ADCのデジタル・グラウンド・ピンをシステムのアナログ・グラウンドに接続するようにアドバイスされましたが、信じられません。間違いではありませんか？

間違いではありません。アナログ（AGND）とデジタル（DGND）のグラウンド接続が別々にあるデータ・コンバータ（ADCとDAC）の接続では、これが唯一の安全な方法です。びっくりされたのは、いわゆる「範疇的誤謬」という哲学的な誤りによるものです。幸いなことに、電子工学と同様、哲学についても若干の知識がありますので、ちょっと説明させてください。

Analog Devices Proprietary Information ©

ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

# 【グラウンド設計】「これでどれだけの性能が出る？」デジタルリターン電流とグラウンドのモデル化と影響度



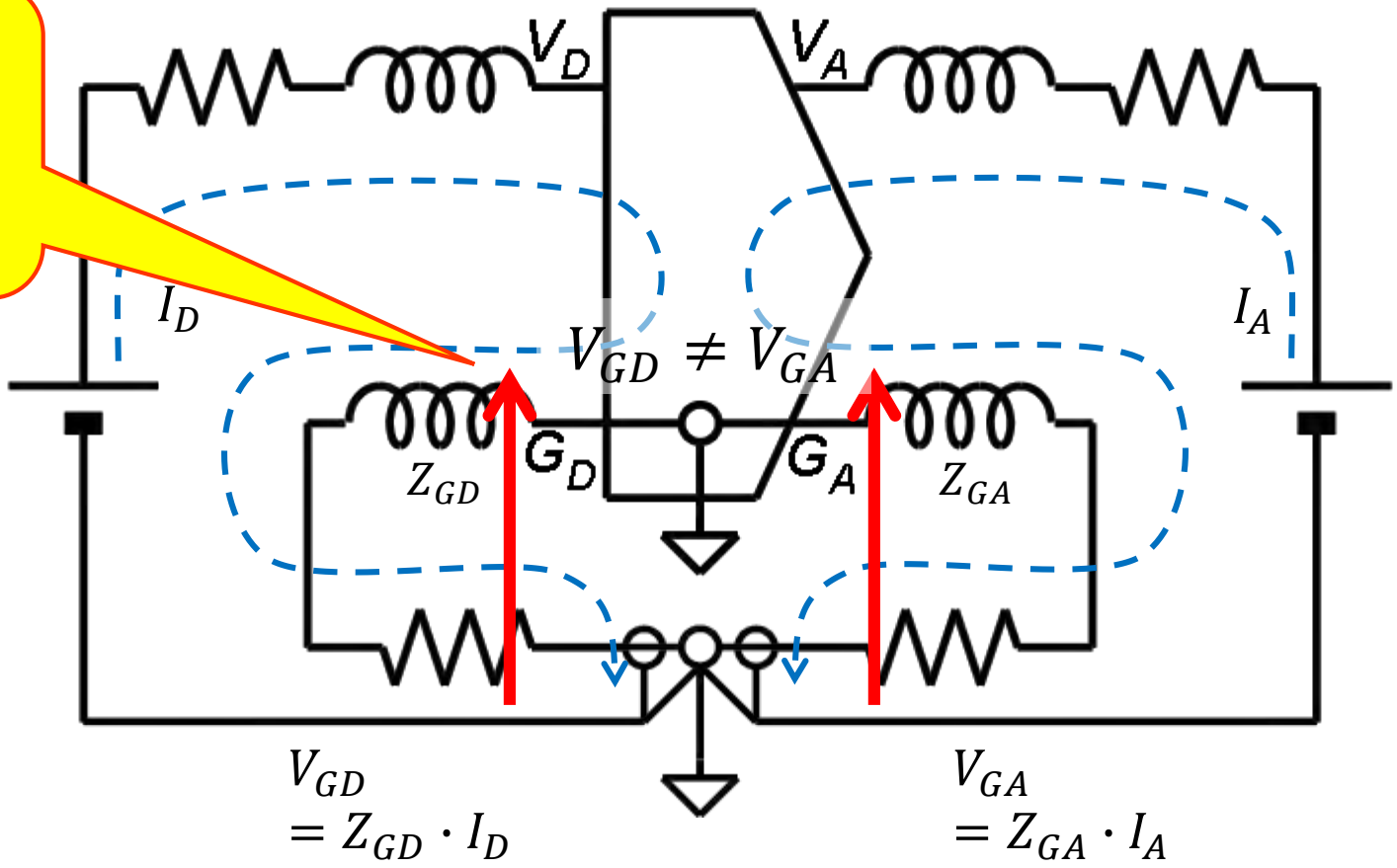

$$V_{GND}(s) = \frac{(R + sL)V_S(s)}{R + sL + \frac{1}{sC} + R_{SER}}$$

$I$が少なく$V_{GND}(s)$が精度に
影響を与えなければよい
（バイパスコンデンサも軽減要因）


Analog Devices Proprietary Information ©
ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

# 【グラウンド設計】ベストな方法でもグラウンド構成方法には注意が必要

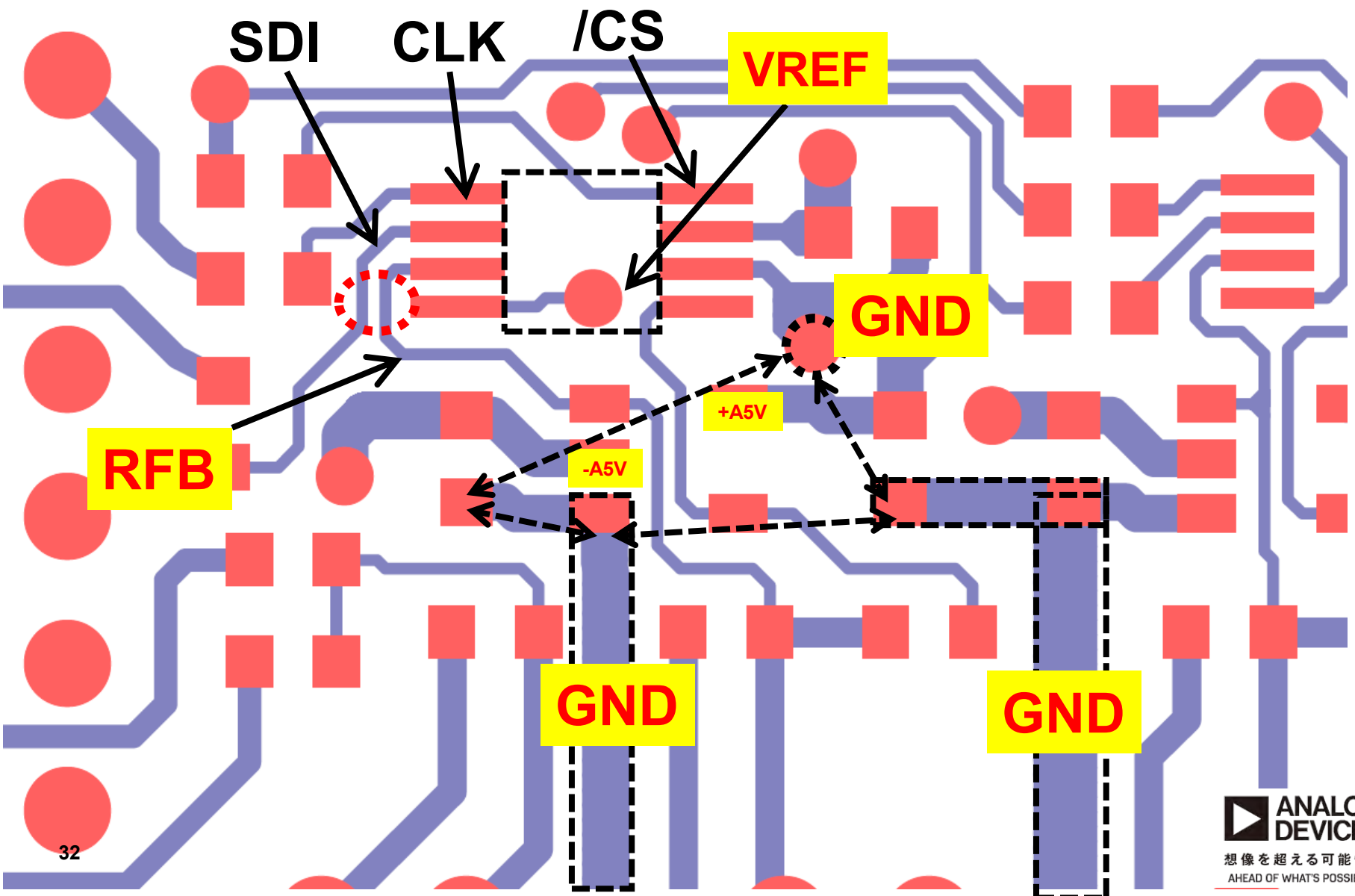
$V_{GD} \neq V_{GA}$
がグラウンド
ノイズになる
可能性あり




この問題を完全になくすには
デジタル・アイソレータを使うと良い


Analog Devices Proprietary Information ©
ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

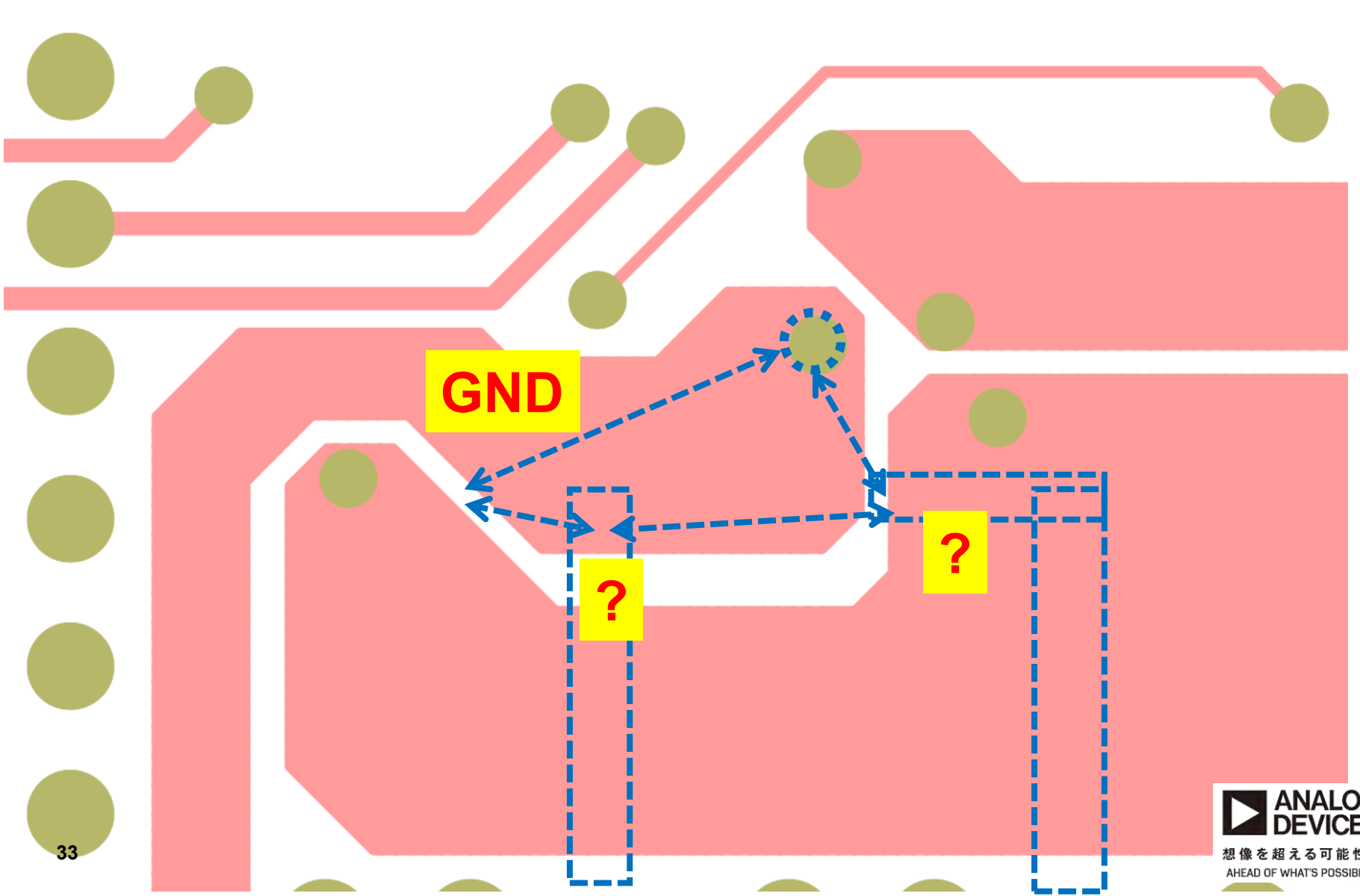
# 最初にCAD設計者から上がってきたレイアウト（部品面）






ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

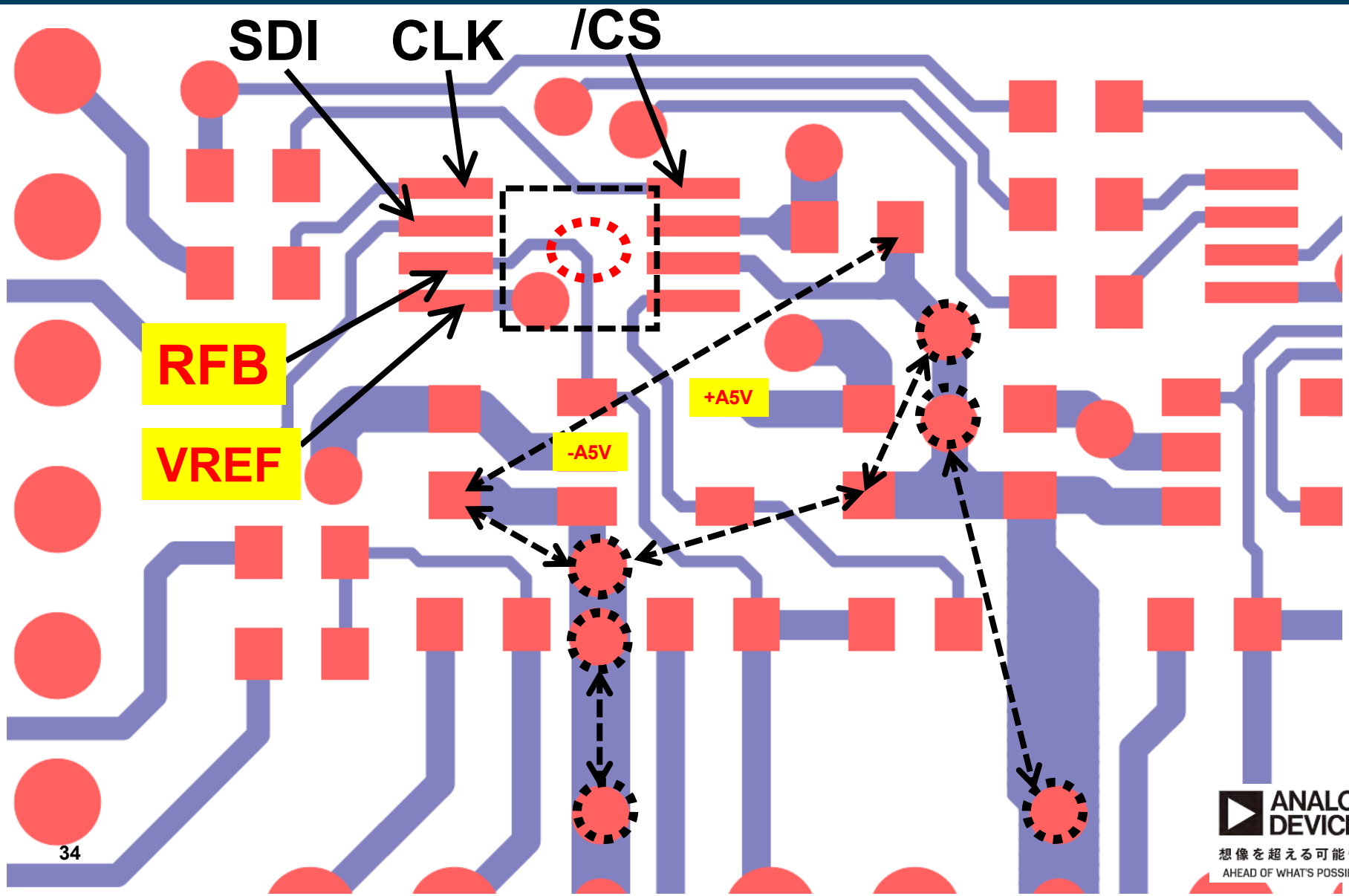
# 最初にCAD設計者から上がってきたレイアウト（半田面）






ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

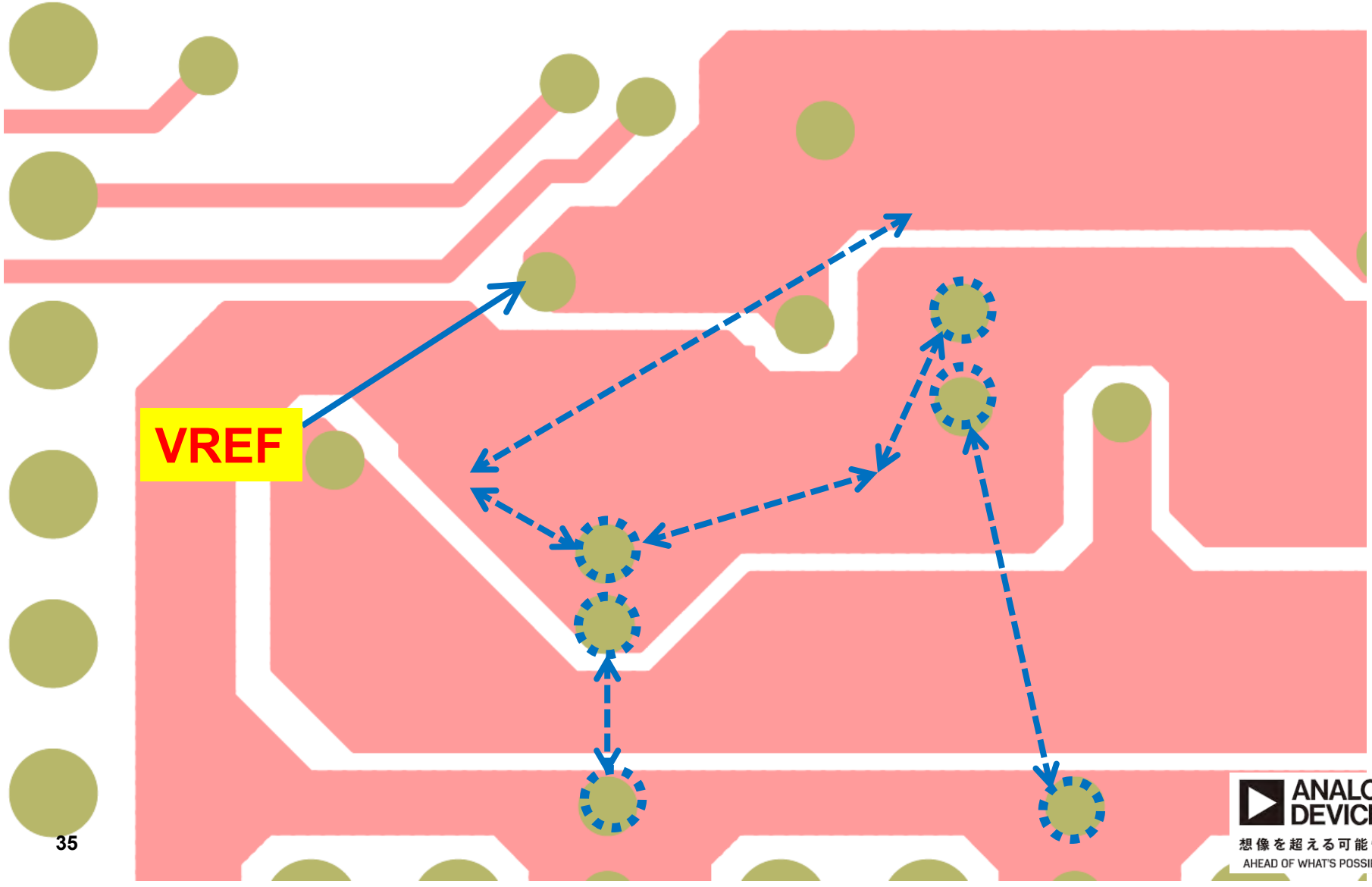
# 改善したレイアウト（部品面）






ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

# 改善したレイアウト（半田面）





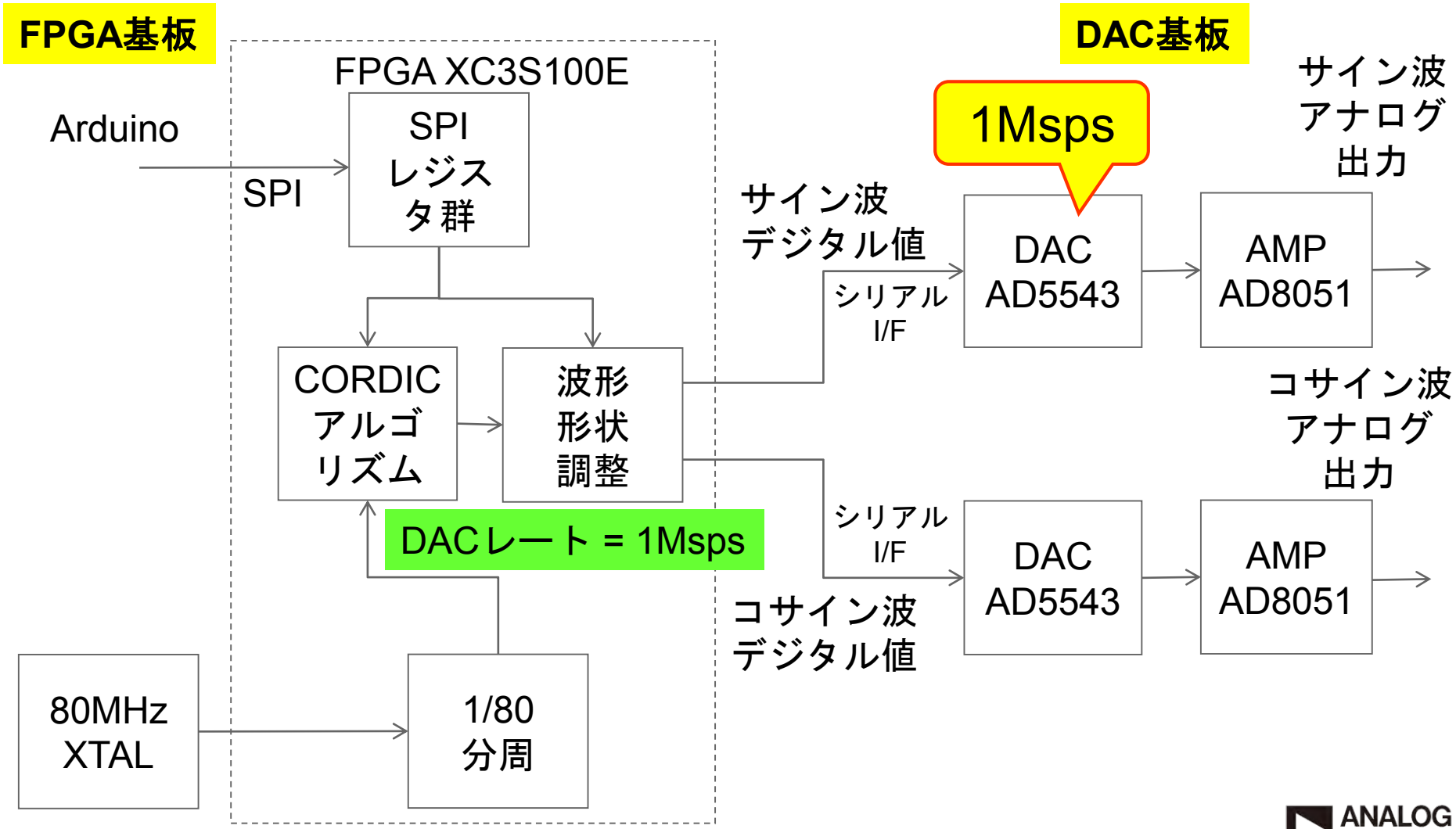

ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

# 5. 完成した基板を動かしてみると・・・


*Analog Devices Proprietary Information ©*

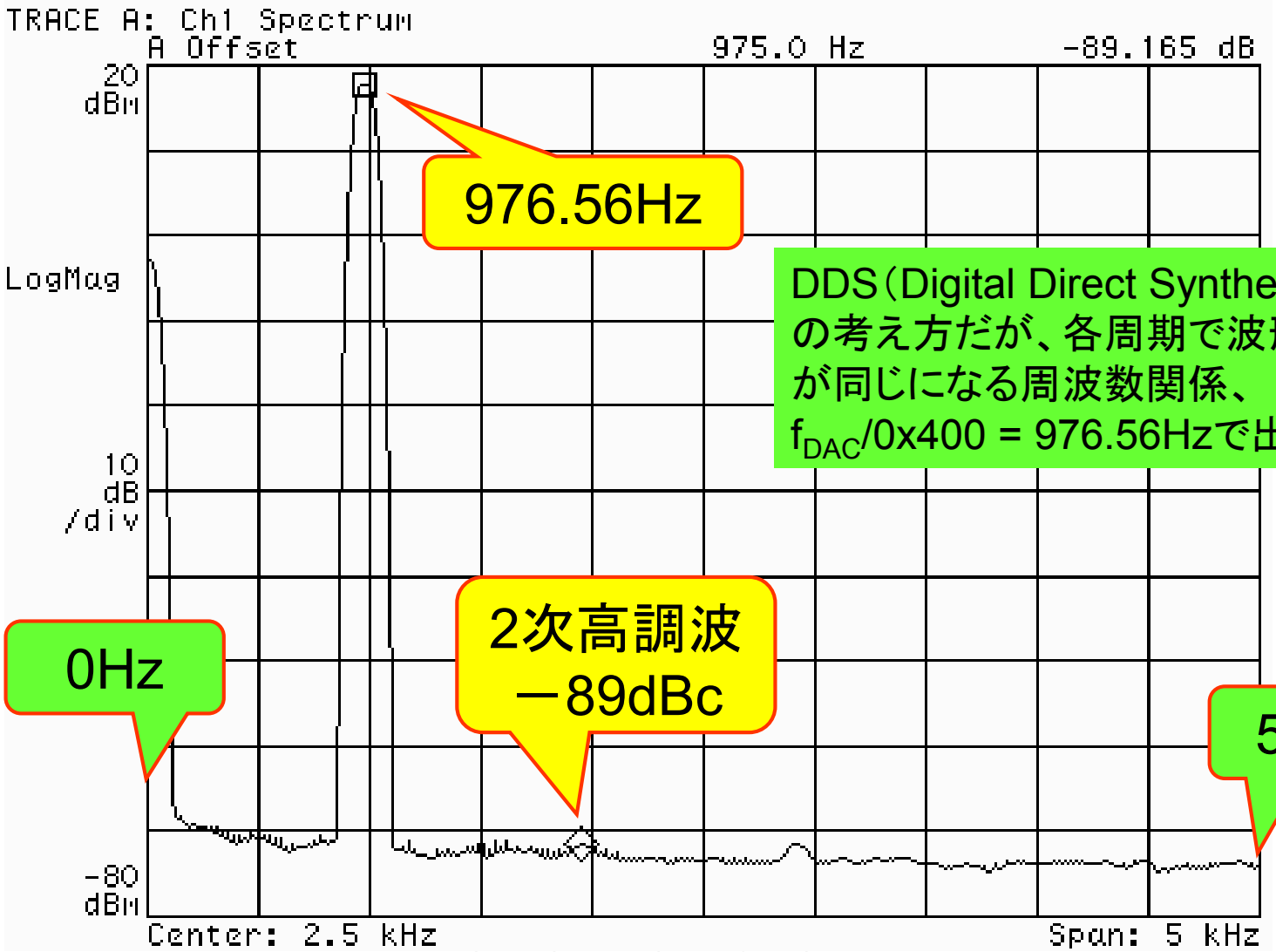
# 正弦波信号を生成するAD5543を含んだシステムのブロック図





Analog Devices Proprietary Information ©
ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

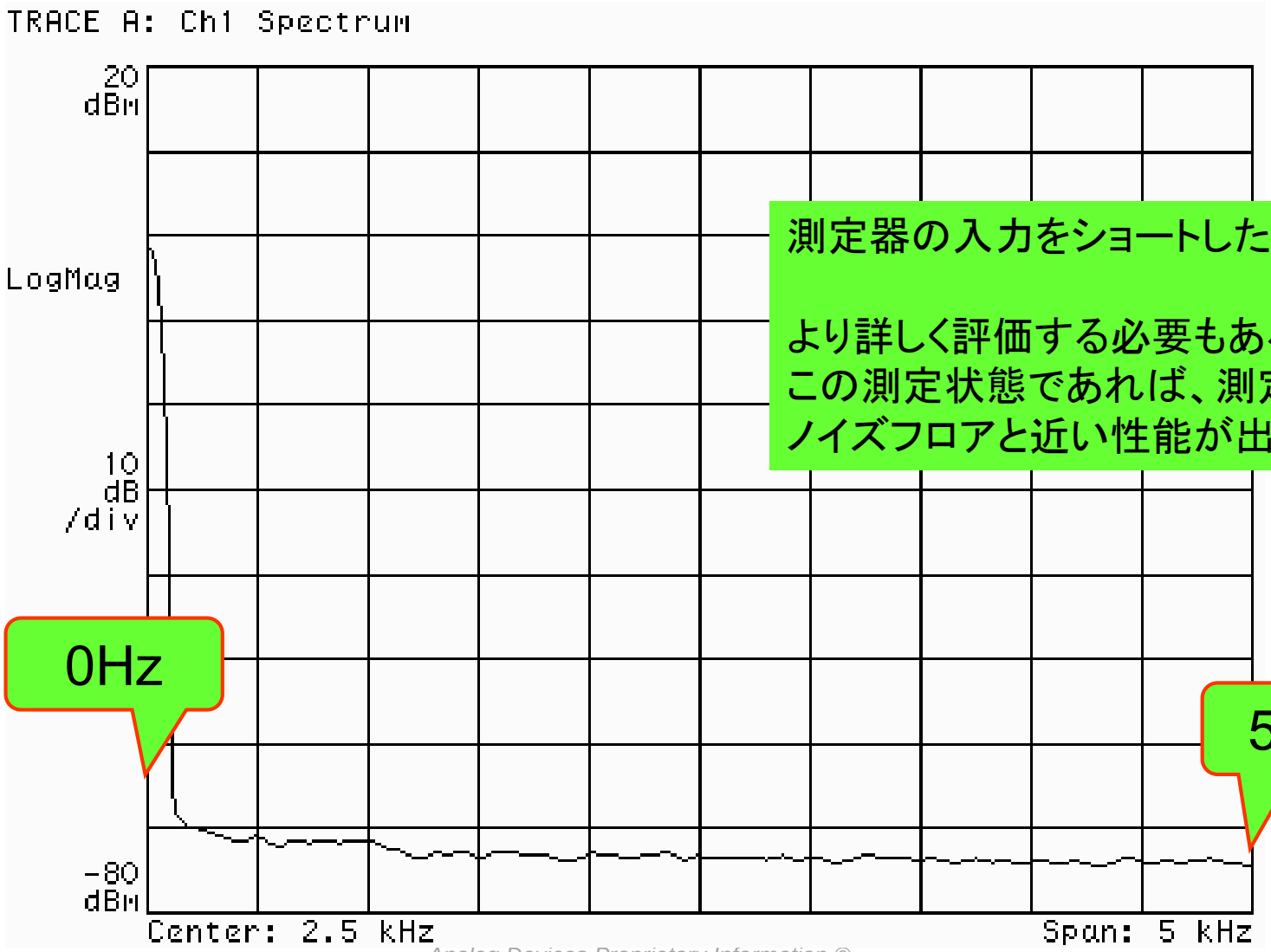
# 完成した基板での1kHz（976.56Hz）出力時のスペクトル





Analog Devices Proprietary Information ©
ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

# ノイズ・レベルの確認（測定器のノイズ・フロア）




測定器の入力をショートした状態

より詳しく評価する必要もあるが、
この測定状態であれば、測定器の
ノイズフロアと近い性能が出ている


Analog Devices Proprietary Information ©
ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

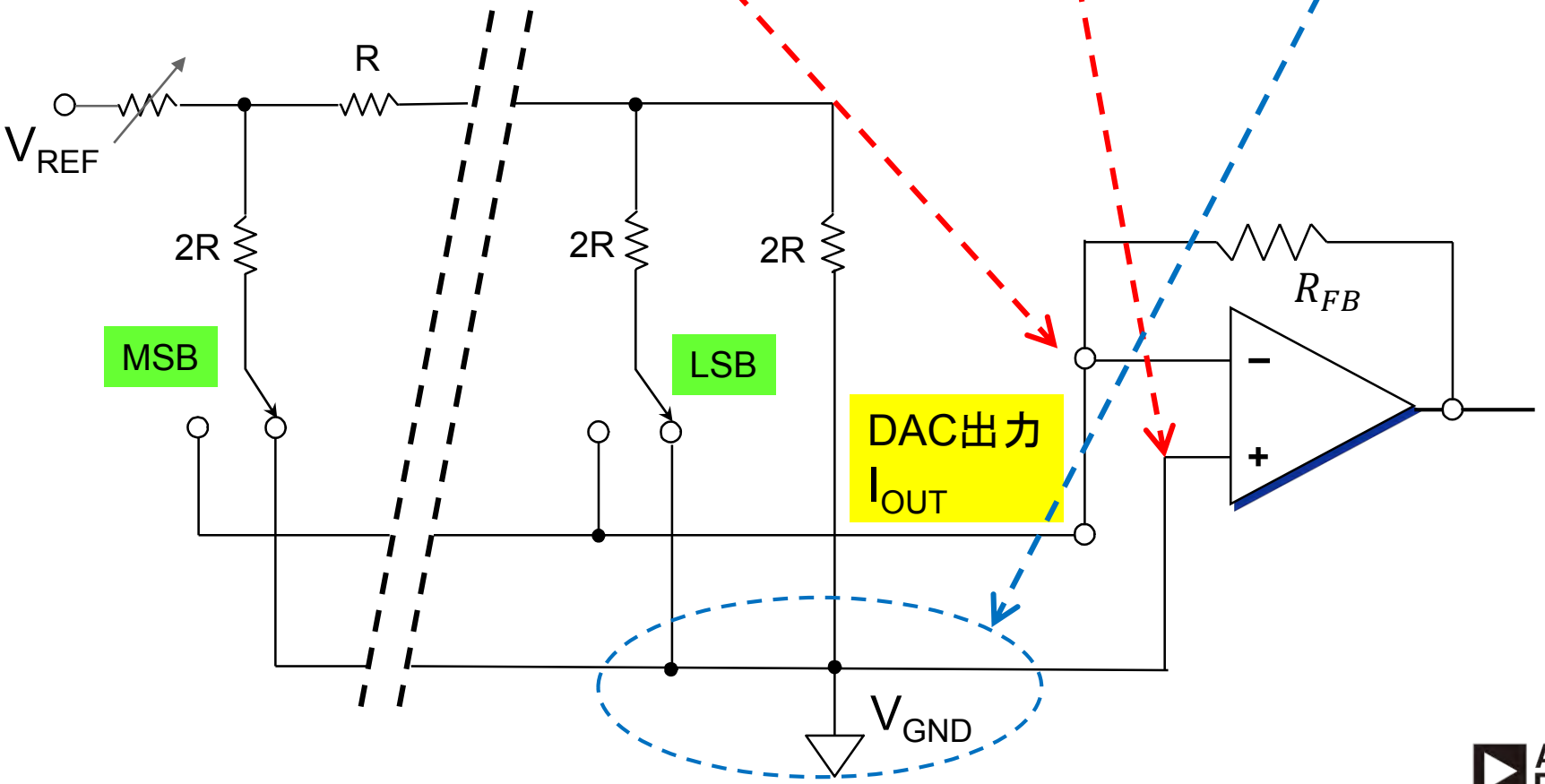
ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

# 6. まとめとAppendix


*Analog Devices Proprietary Information ©*

# 【最後にご注意を！】電流モードR-2R DACの出力接続と、一部の超高速電流出力型DACの出力接続との差異

- 電流モードR-2R DAC出力は、IVアンプの反転入力端子へ接続
- 非反転入力端子（仮想ショート）は、DAC内部電流スイッチの基準電位（グラウンドがほとんど）に設定



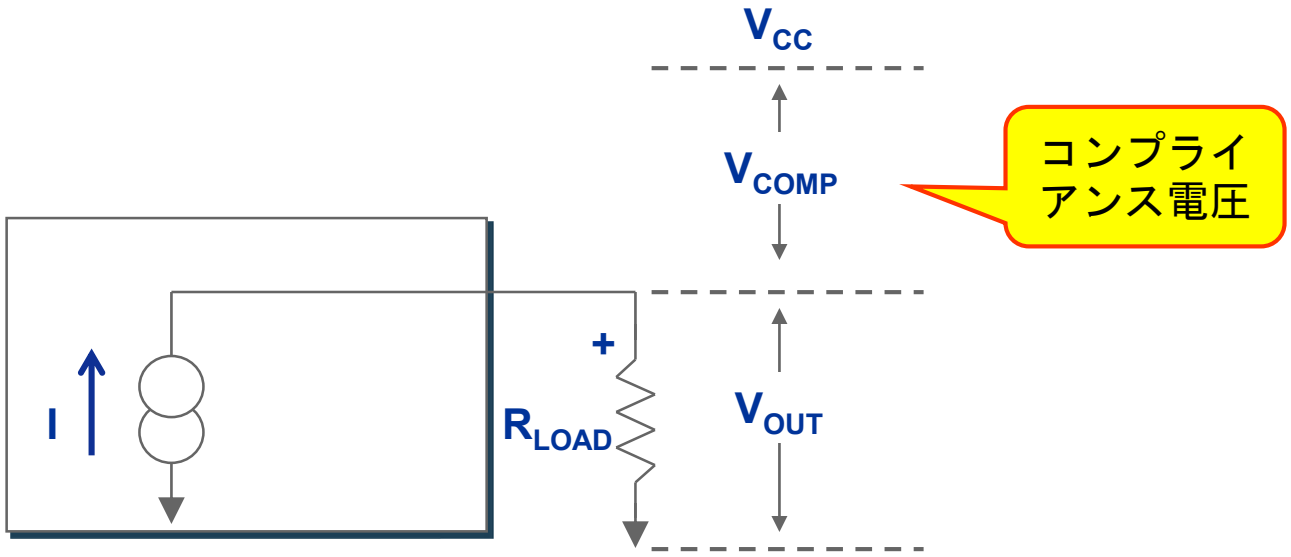


Analog Devices Proprietary Information ©
ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

# （続き）電流モードR-2R DACの出力接続と、一部の超高速電流出力型DACの出力接続との差異

- 一部の超高速電流出力型DACは下図のような接続
- それらのDACは「コンプライアンス電圧$V_{COMP}$」という、DAC出力電圧$V_{OUT}$の最大値が規定されている
- 電流モードR-2R DACはこのような接続はNG。$V_{OUT}$が変動するから

一部の超高速電流出力型DACの出力接続例





Analog Devices Proprietary Information ©
ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

# まとめ

- DACの各種アーキテクチャをご説明
- 電流モードR-2R DACは便利で高性能なDAC
- 使用上の注意点をきちんと抑えて最適化！
- コンバータ搭載のミックスド・シグナル・プリント基板は、グラウンド設計に注意する
- ご説明した事項・考え方は、各種ミックスド・シグナル・システムにも応用できる知識

Analog Devices Proprietary Information ©
ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

# 参考文献


- Liam Riordan; 乗算型 DAC—固定リファレンスによる波形発生アプリケーション, AN-1094, Analog Devices
- Liam Riordan; 乗算型 DAC—AC/任意リファレンス・アプリケーション, AN-1085, Analog Devices
- John Wynne; CMOS DAC とオペアンプをベースにしたプログラマブル・ゲイン・アンプ Part I, AN-320A, Analog Devices

【以下はかなり長編な資料（ただし英文です）】

- Analog Devices; CMOS DAC Application Guide, 1984
  - http://www.analog.com/jp/education/education-library/cmos-dac-application-guide.html
- Analog Devices; The Data Conversion Handbook, 2005
  - http://www.analog.com/en/education/education-library/data-conversion-handbook.html
- Analog Devices, Mixed Signal Electronics Systems, Analog Circuit Design Tutorials
  - http://www.analog.com/jp/education/courses-and-tutorials/tutorials/mixed-signal-electronics-systems.html




Analog Devices Proprietary Information ©

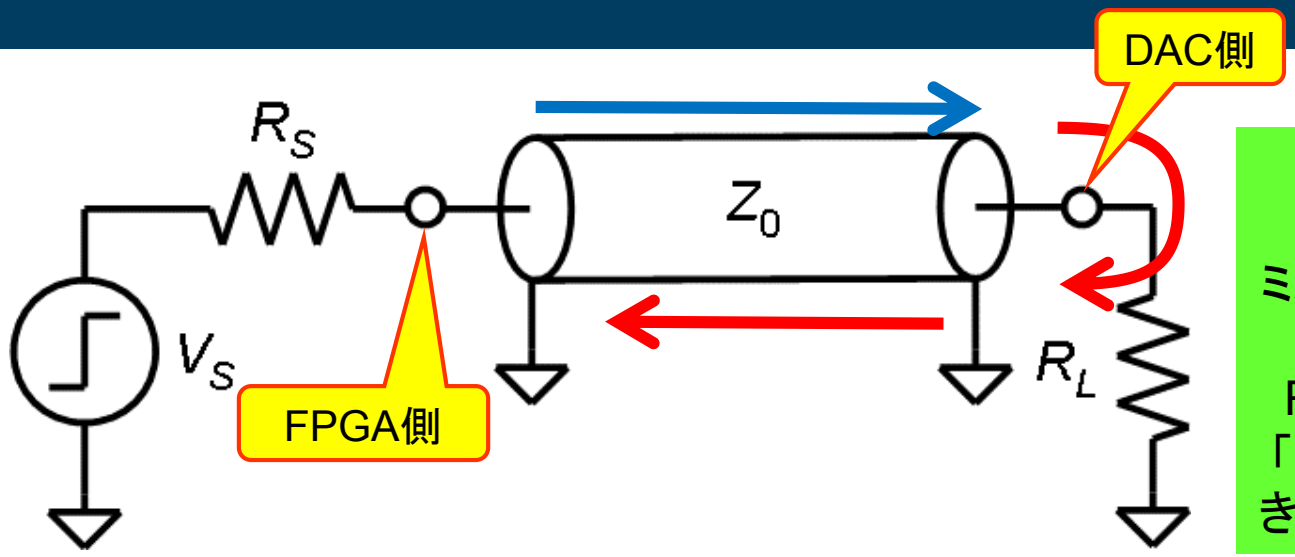
ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

# Appendix 1. ダンピングのための抵抗接続のしくみ

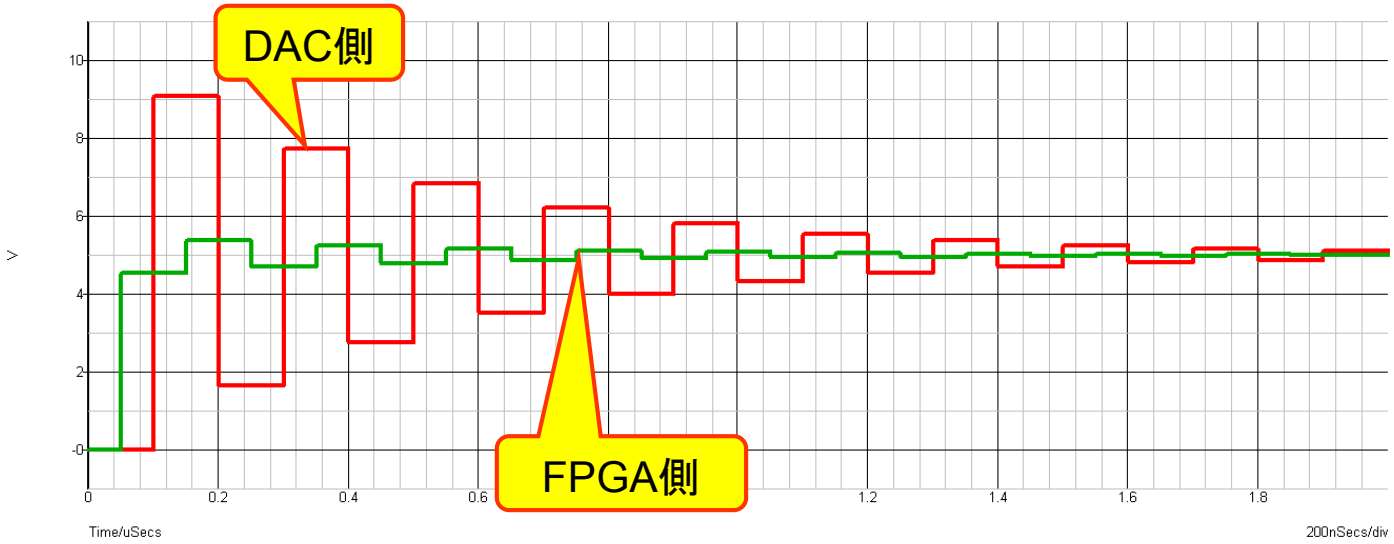

Analog Devices Proprietary Information ©

# 電気理論を考慮した原因の予測
# （信号の反射を原因とする波形の暴れ）




信号の反射は
伝送路終端の
ミスマッチにより生じる

$R_S$を挿入することで
「送端終端」が実現で
き、波形の暴れが減る

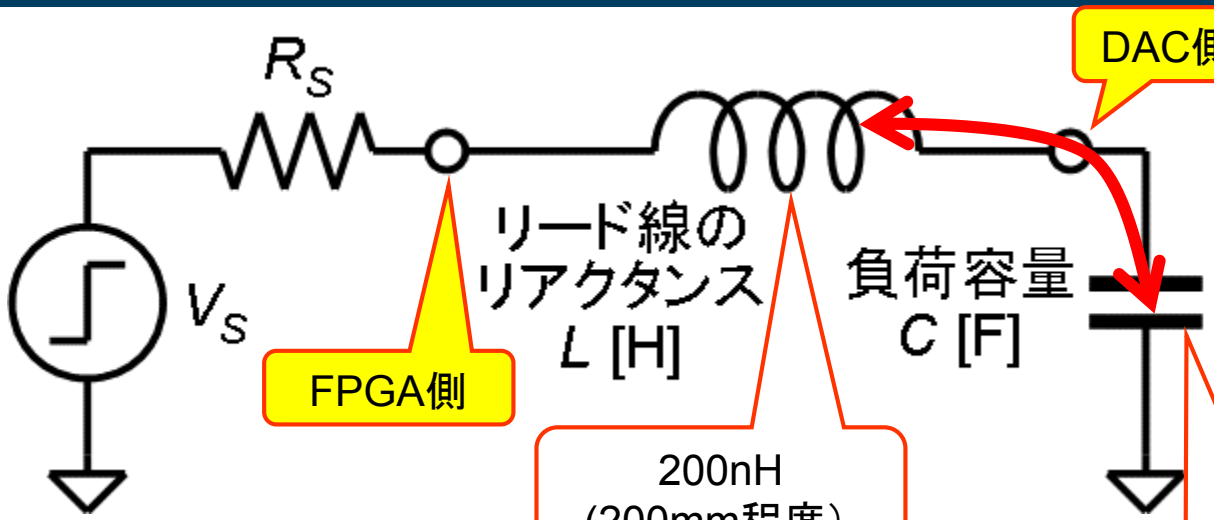





Analog Devices Proprietary Information ©

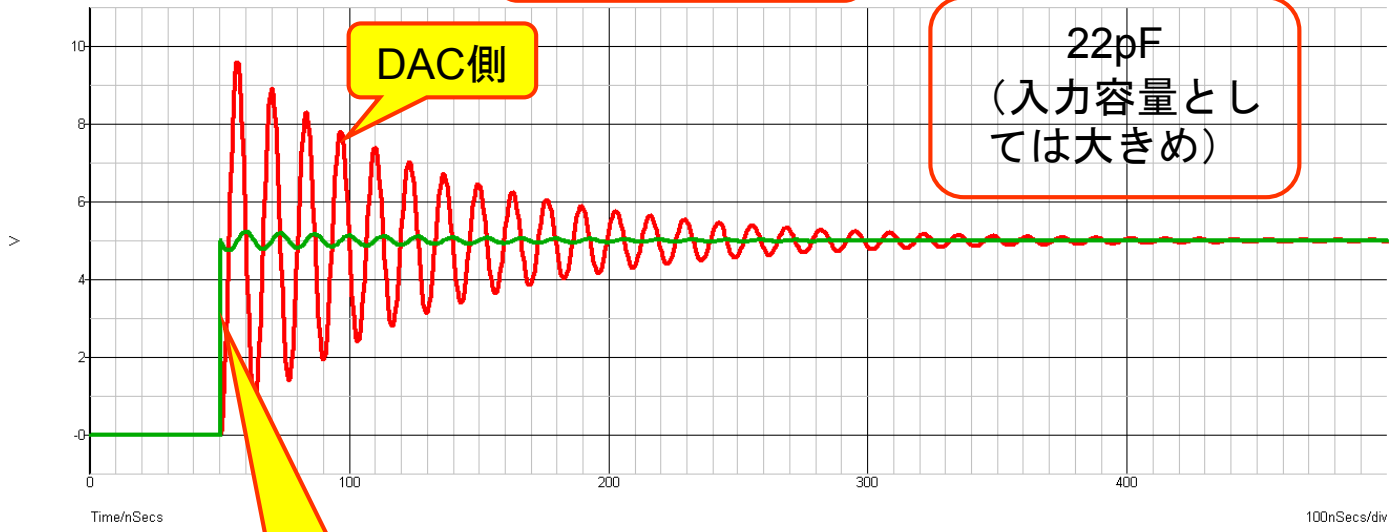
ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

# 電気理論を考慮した原因の予測
# （信号のリンギングを原因とする波形の暴れ）




信号のリンギングは
L/C間の
共振により生じる

$R_S$を挿入することで
「Qダンプ」が実現で
き、波形の暴れが減る





Analog Devices Proprietary Information ©

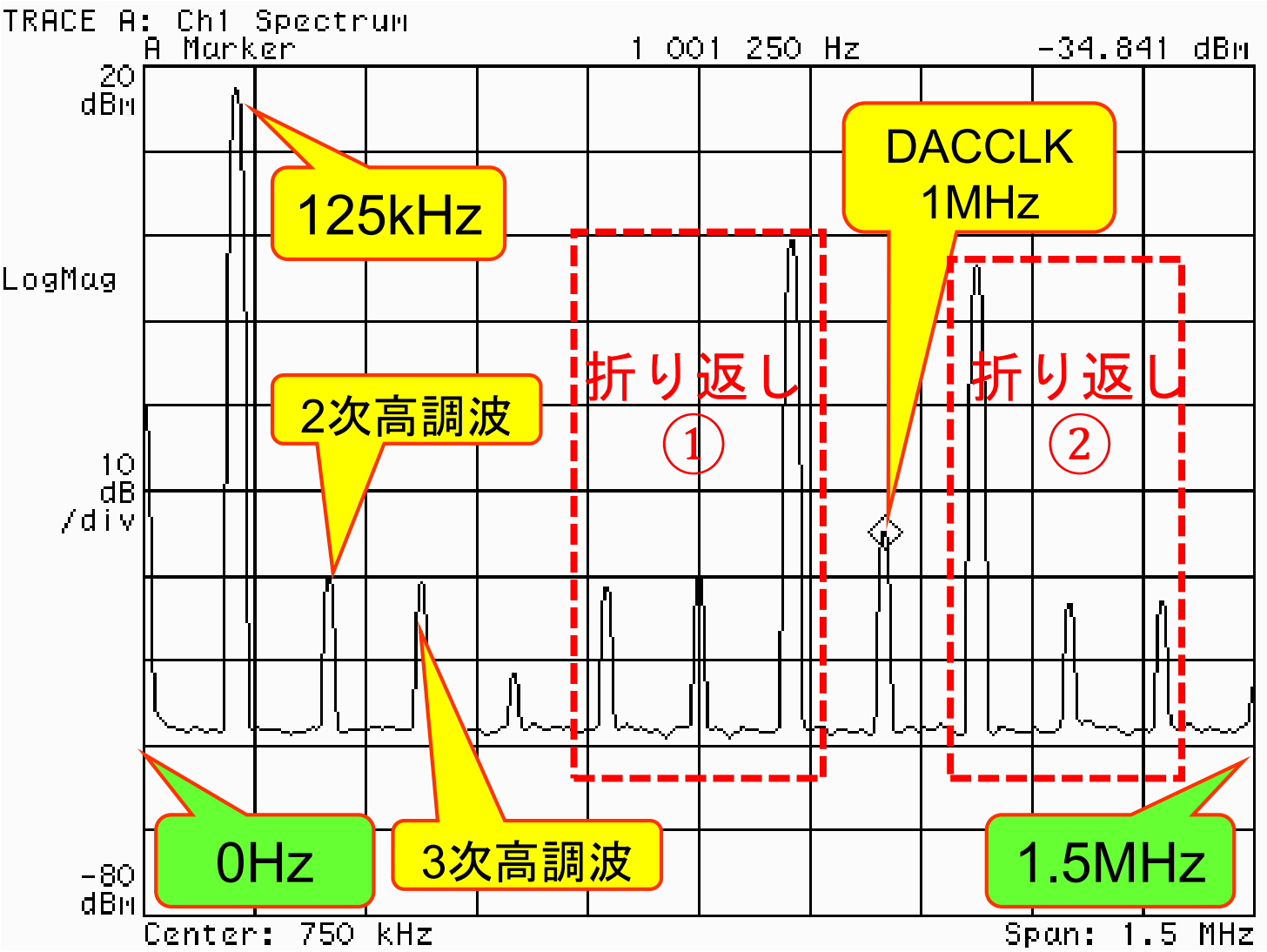
ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

# Appendix 2. DACの折り返しスペクトルについて


*Analog Devices Proprietary Information ©*

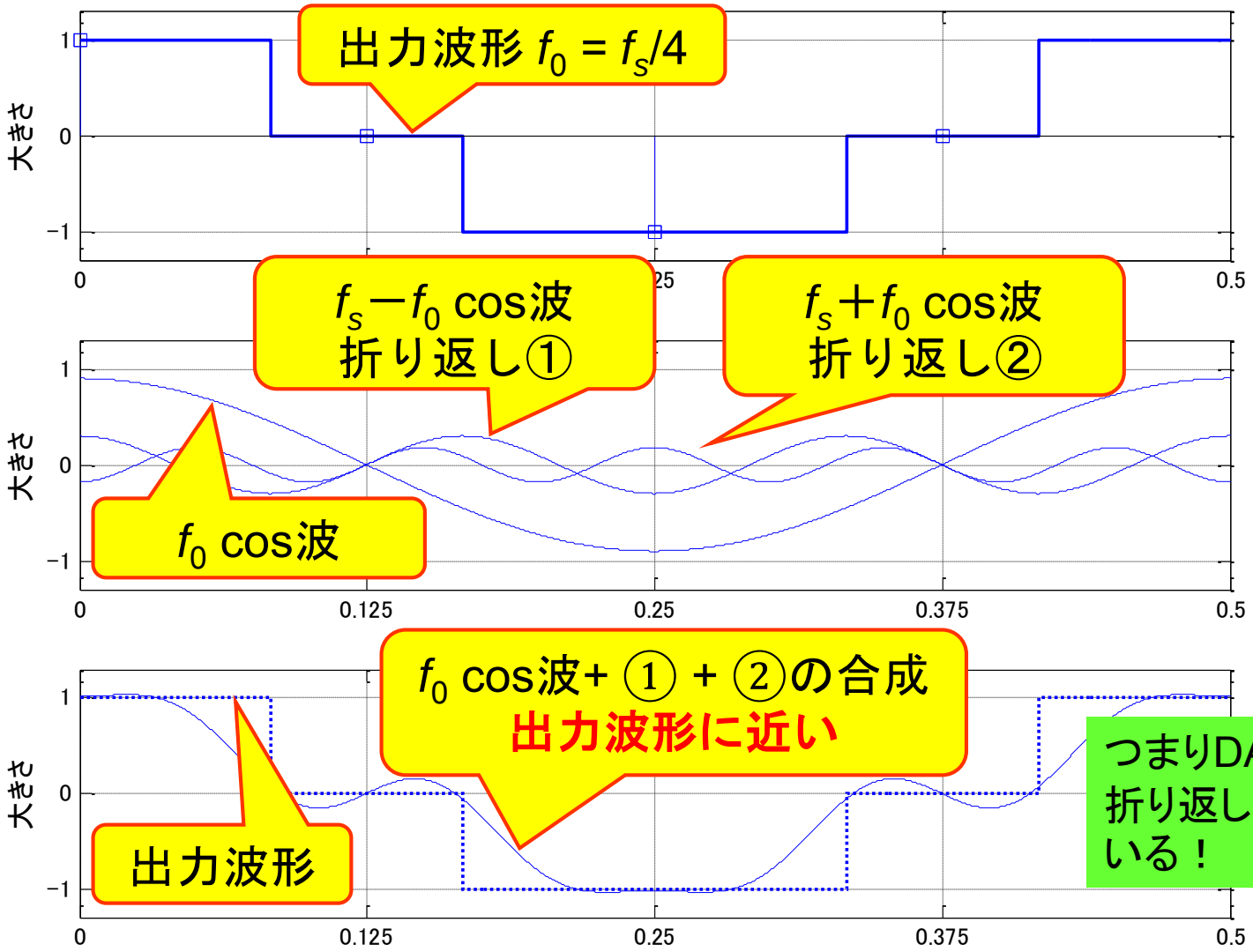
# 125kHzでは不思議な周波数にスペクトルが見える





Analog Devices Proprietary Information ©
ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

# 「デジタル離散値」からアナログ値に変換するDAC出力で生じる折り返しのしくみ（$f_s$はサンプリング周波数）




※それぞれ適切に重み付けしてある

つまりDAC出力波形は、折り返し成分が含まれている！


Analog Devices Proprietary Information ©
ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

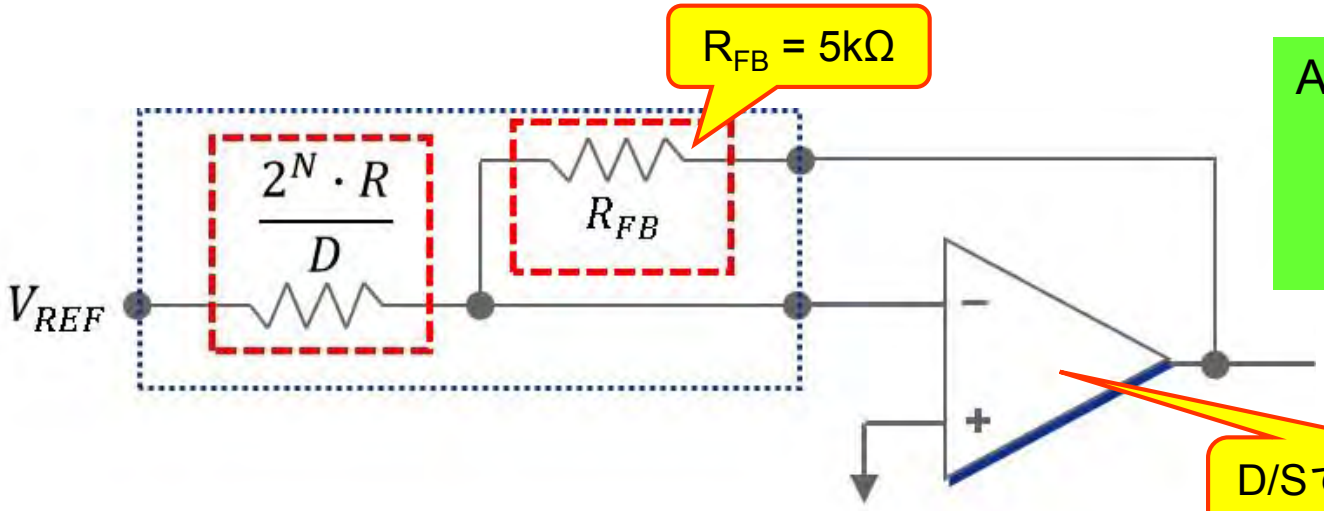
# Appendix 3. DACのノイズ特性を評価してみる


Analog Devices Proprietary Information ©

# データシートに記載されているAD5543のノイズ特性

| Parameter | Symbol | Condition | 5 V ± 10% | Unit |
|---|---|---|---|---|
| AC CHARACTERISTICS[4] | | | | |
| Output Voltage Settling Time | $t_S$ | To ±0.1% of full scale,<br>Data = 0x0000 to 0xFFFF to 0x0000 for AD5543<br>Data = 0x0000 to 0x3FFF to 0x0000 for AD5553 | 0.5 | µs typ |
| Reference Multiplying Bandwidth | BW | $V_{REF}$ = 100 mV rms, data = 0xFFFF | 6.6 | MHz typ |
| DAC Glitch Impulse | Q | $V_{REF}$ = 0 V, data = 0x7FFF to 0x8000 for AD5543 | 7 | nV-sec |
| Feedthrough Error | $V_{OUT}/V_{REF}$ | Data = 0x0000, $V_{REF}$ = 100 mV rms, same channel | −83 | dB |
| Digital Feedthrough | Q | $C_S$ = 1 and $f_{CLK}$ = 1 MHz | 7 | nV-sec |
| Total Harmonic Distortion | THD | $V_{REF}$ = 5 V p-p, data = 0xFFFF, f = 1 kHz | −103 | dB typ |
| Output Spot Noise Voltage | $e_N$ | f = 1 kHz, BW = 1 Hz | 12 | nV/√Hz |

[1] All static performance tests (except $I_{OUT}$) are performed in a closed-loop system using an external precision OP177 I-to-V converter amplifier. The AD5543 $R_{FB}$ terminal is tied to the amplifier output. The +IN op amp is grounded, and the DAC $I_{OUT}$ is tied to the −IN op amp. Typical values represent average readings measured at 25°C.

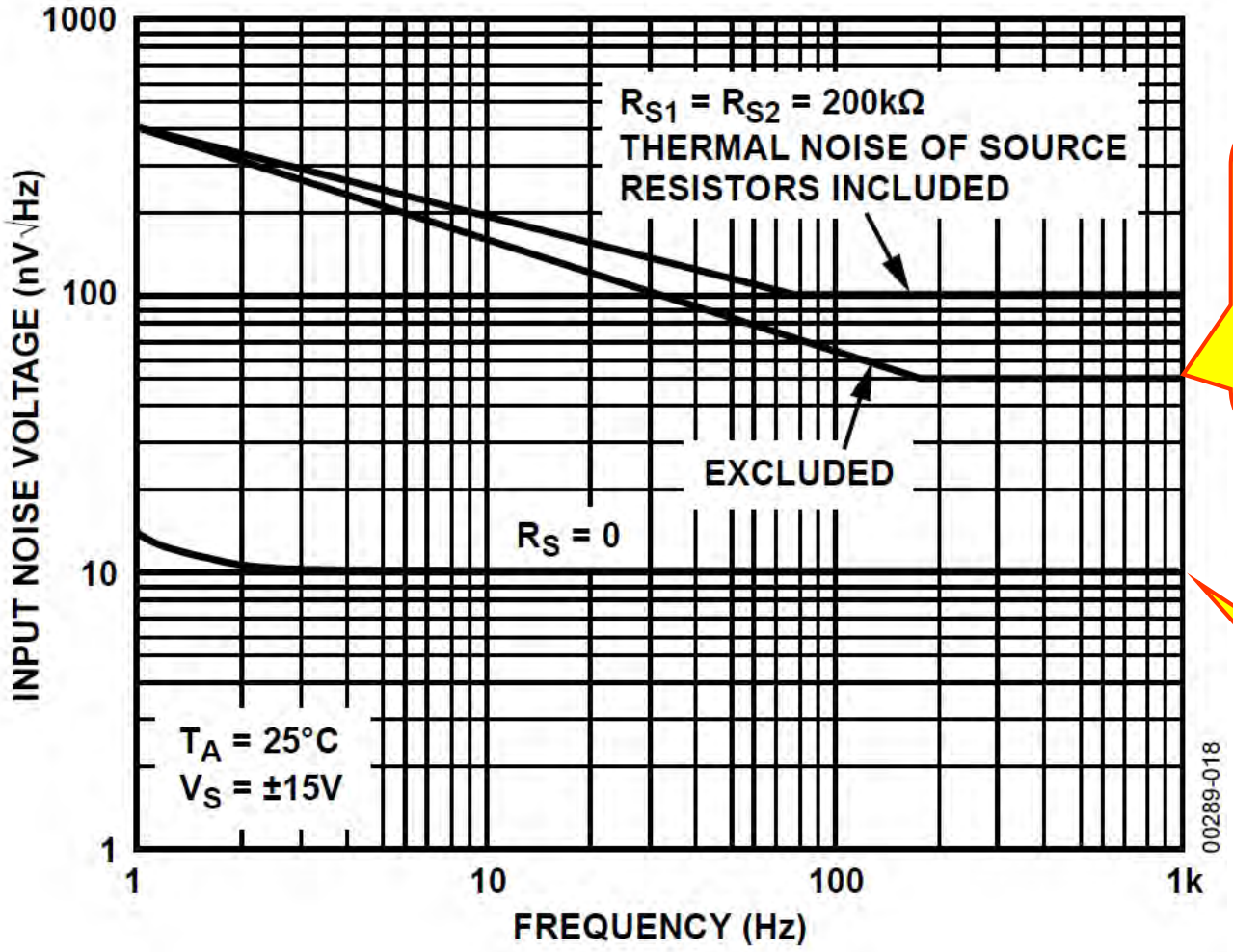



AD5543はOP177使用で
電圧性ノイズ密度
@1kHzで12nV/√Hz
と記載されている

D/SではOP177が
使われている


Analog Devices Proprietary Information ©
ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

# OP177単体のノイズ密度特性




@1kHzにおいて電流性ノイズ$I_N$での電圧降下が34.6nV/√Hz（次スライドの計算による）

@1kHzにおいて電圧性ノイズ$V_N$が10nV/√Hz

*Figure 18. Total Input Noise Voltage vs. Frequency*



Analog Devices Proprietary Information ©

ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

# OP177の電流性ノイズの算出手順

- OP177では、電流性ノイズ密度$I_N$はスペックとして表記されていない。
そこで計算で求めてみる

- $R_{S1}$ = $R_{S2}$ = 200kΩ THERMAL NOISE OF SOURCE RESISTORS EXCLUDED のグラフから、$V_{OP177}$ =50nV/√Hz @1kHzと読める。これはOP177の電圧性ノイズ$V_N$ =10nV/√Hz（$R_S$ = 0のときのプロット）と、同じく電流性ノイズ$I_N$により$R_{S1}$, $R_{S2}$に生じる電圧降下$V_{NI}$とが合成されたノイズ量である

- 一方「THERMAL NOISE OF SOURCE RESISTORS EXCLUDED」なので、抵抗によるサーマル・ノイズは計算から除外されている。ゆえに、$V_{OP177}$は

$$V_{OP177} = \sqrt{V_N^2 + V_{NI}^2 + V_{NI}^2} = \sqrt{V_N^2 + (I_N R_{S1})^2 + (I_N R_{S2})^2}$$

- これから$2V_{NI}^2 = (I_N R_{S1})^2 + (I_N R_{S2})^2$は、2400 (nV/√Hz)²となり、$(I_N R_S)^2 = 1200, I_N R_S$ = 34.6 nV/√Hz、これから（$R_{S1} = R_{S2}$ =200kΩなので） OP177の**電流性ノイズ$I_N$は173 fA/√Hzと計算できる**


Analog Devices Proprietary Information ©
ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

# AD5543のノイズ特性の算出

- 一方、スライド53のDAC R-2R抵抗（REFにつながっている方）が、スライド10の形でMSB（ビット15）のみ接続されている状態であれば、DAC内部を見た抵抗値は10kΩ（$2R_{FB}$）となる。IVアンプの入力抵抗は$2R_{FB}//R_{FB}$ = 3.3kΩ。ここに**電流性ノイズ$I_N$は173 fA/√Hz**が加わると、57pV/√Hzとなり、「OP177の電流性ノイズはほとんど影響を与えない」ことがわかる
- $2R_{FB}//R_{FB}$ = 3.3kΩのサーマル・ノイズ密度$V_{RN}$は、$V_{RN} = \sqrt{4kTR}$より、$V_{RN}$ =7.4nV/√Hzと計算できる
- トータルのノイズは$\sqrt{V_N^2 + V_{RN}^2}$から$\sqrt{10^2 + 7.4^2}$ = 12.44nV/√Hzと計算でき、これはデータシートのスペック12nV/ /√Hzとほぼ同じになる（過剰雑音源はない）。これから分かることは、**「AD5543の静的なノイズ特性はR-2R抵抗のサーマル・ノイズのみを考慮すればよい」**

- **※スイッチ抵抗はコード$D$に依存するため、コード$D$でノイズ量が変化する**
- **※動的にはスイッチ切り替えによるグリッチもノイズになるので注意**


Analog Devices Proprietary Information ©
ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™