

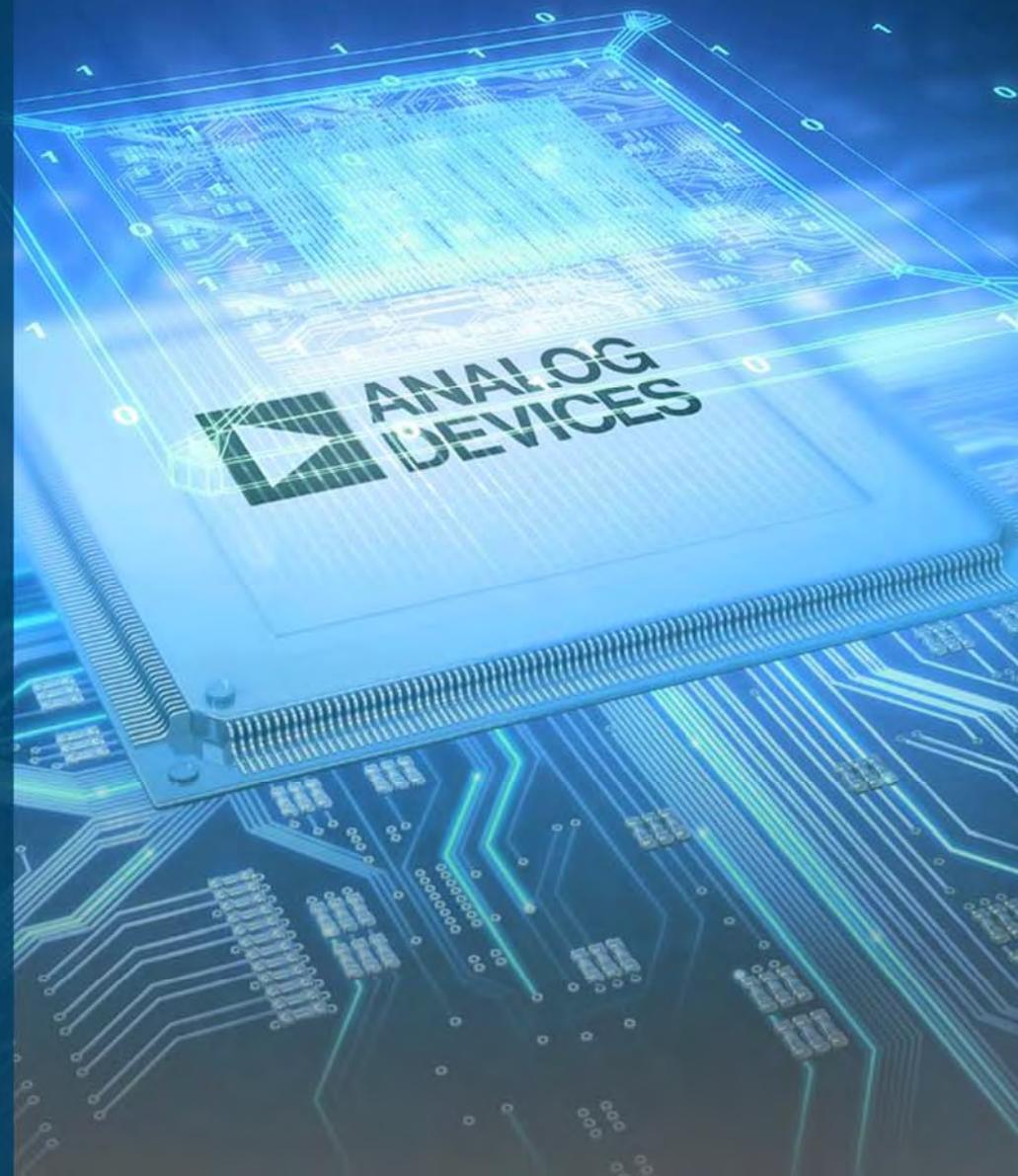


想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

低レベル電気量の計測 限界への挑戦(前編)

アナログ・デバイセズ株式会社

石井 聡



アジェンダ（前編）

- ▶ 高精度／高感度な電気量計測の基本事項
- ▶ 高感度を実現する：ノイズの原因と低減方法概論
- ▶ 高感度を実現する：フリッカ（ $1/f$ ）ノイズを理解する
- ▶ 高感度を実現する：フリッカ（ $1/f$ ）ノイズへの対峙方法「チョッピングと同期検波」
- ▶ 検出誤差源を排除する（前編）
 - 高抵抗／低抵抗の計測テクニック



想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

高精度／高感度な電気量 計測の基本事項

電気量計測の理論的境界

- ▶ 計測される物理量 $>$ ノイズレベルの関係が必要
- ▶ 低レベル電圧では色がかった領域に入り込んでくる
 - それゆえ高感度な測定技術が必要になる



※ 室温での条件

電気量計測の理論的限界

- ▶ 計測される物理量 > ノイズレベルの関係が必要
- ▶ 低レベル電圧では色がかった領域に入り込んでくる
 - それゆえ高感度な測定技術が必要になる
- ▶ 高精度また高確度な計測をするためには、特別な注意が必要
- ▶ **注意点を知っているか知らないかは大きな違い!**
 - 得られる感度特性
 - デバッグの手間



※ 室温での条件

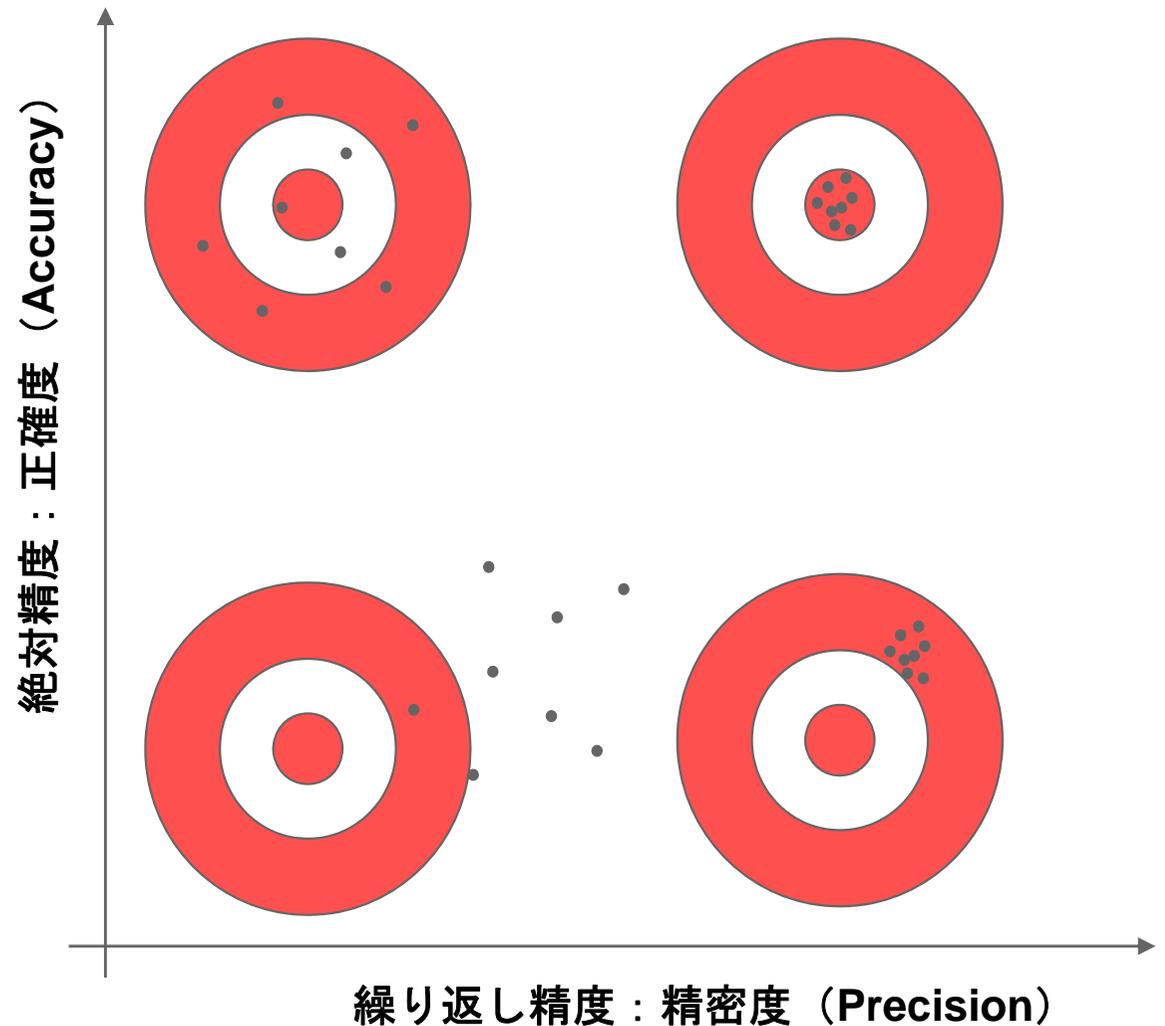
計測の基本事項

- ▶ 繰り返し精度：精密度（Precision）
 - Closeness of agreement between independent measurements under stipulated conditions
 - 規定条件での個々の**計測値間の一致度合い**
- ▶ 絶対精度：正確度（Accuracy）
 - Closeness of agreement between a measurement result and the true value
 - Usually expressed in terms of measurement uncertainty
 - **真値と計測結果との一致度合い**。計測不確定性として表現される
- ▶ 分解能（Resolution）
 - How many steps/bits/digits are available to represent a measurement
 - 計測をどれほどのステップ／ビット／桁で表せるか
- ▶ 感度（Sensitivity）
 - The smallest signal change a measurement device/system can detect
 - 計測系が**検出可能**な信号の最小変位

出典元 ISO TC 69/SC 6N: *Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results — Part 1: Introduction and basic principles*

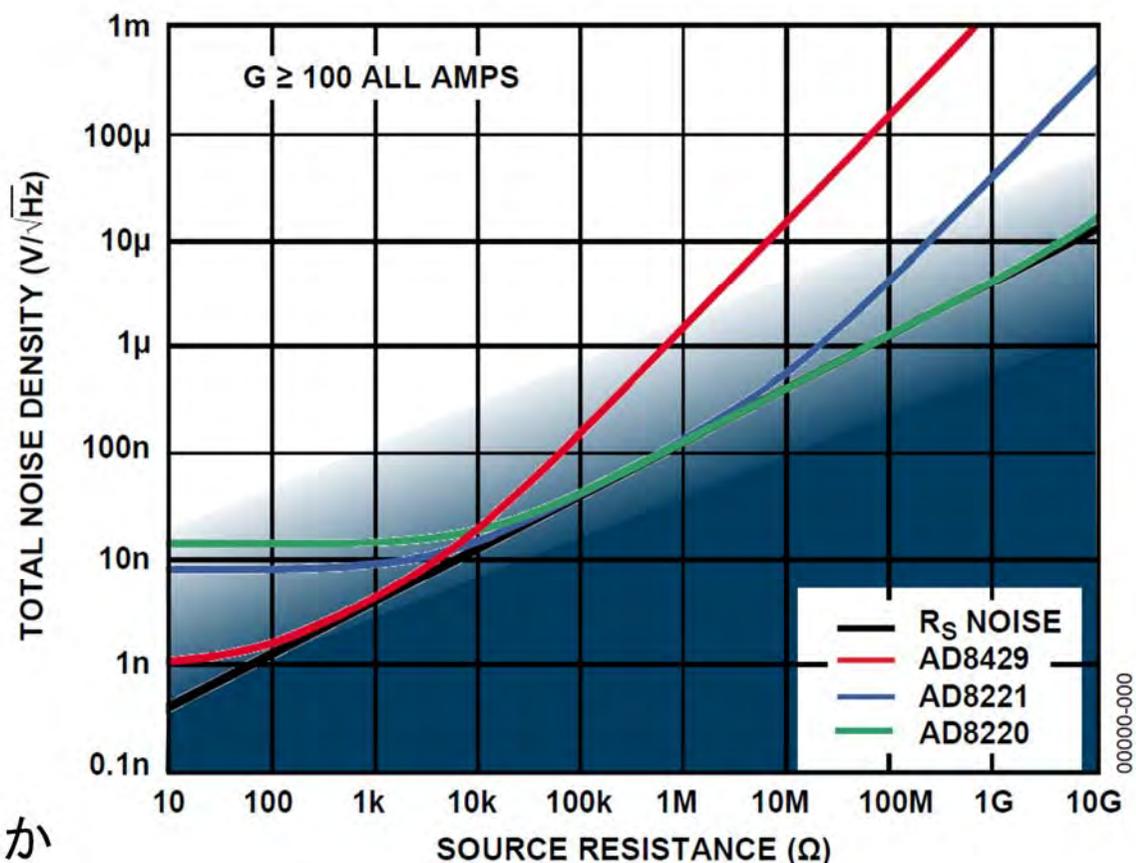
繰り返し精度：精密度（Precision）と絶対精度：正確度（Accuracy）

- ▶ 精密度の良さは、繰り返し計測で同じ結果を得る
- ▶ 正確度の良さは、計測値が真値に近くなる



高精度／高感度計測における問題点

- ▶ 高感度は高分解能／高ゲインで実現できるはず . . .
- ▶ 高感度により非常に微小な信号が検出できるはず . . .
- ▶ しかし多くの外的要因が！
 - フリッカ・ノイズ ($1/f$ ノイズ)
 - 異金属接合による熱電効果 (起電力)
 - 電磁界による誘起電圧
 - リーク経路
 - 機械的変動での電荷量の発生
 - 汚損や湿度
 - 静電気
 - その他
- ▶ このプレゼンテーションでは
 - どうやって高感度を実現するか
 - どうやって外的要因を最小化するか



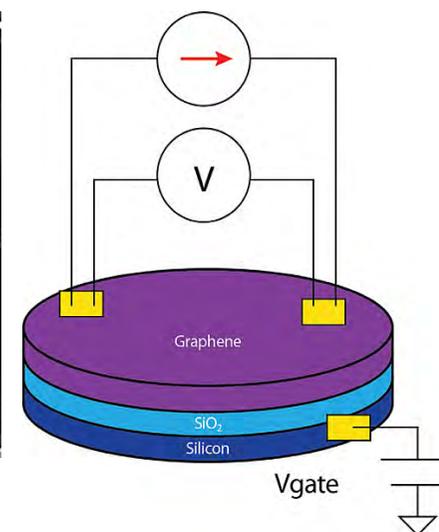
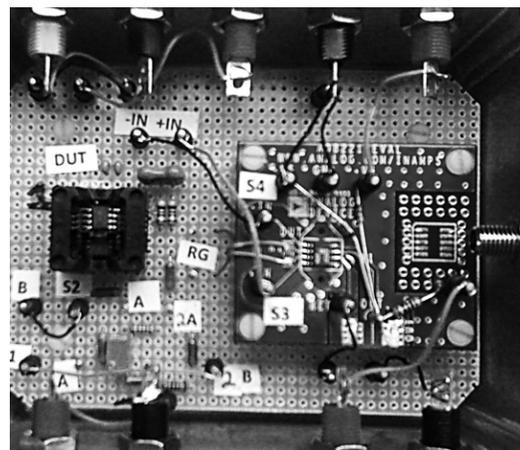
低レベル計測 vs. それ以外の計測

- ▶ 単純な一次近似は適用できない
- ▶ 制御不可能な「パラメータ」による計測不確定性を少なくするため、十分配慮する
- ▶ それら「パラメータ」は外部環境の影響を大きく受ける
 - たとえば温度、湿度、振動など
 - 時間変動する
- ▶ 低レベルとして考えるべき電気量（めやす）

電気量	しきい値
電圧	<100 μ V
電流	<1 μ A
低抵抗	<100 Ω
高抵抗	>10 M Ω
電荷チャージ	いつも

低レベル電気量計測の例

- ▶ 計測機器の校正
- ▶ ゼロドリフト・アンプのオフセット／ドリフトの計測
- ▶ 接触抵抗量の計測
 - 表面の酸化（接触の劣化）
- ▶ CMOSのゲート・リークの計測
- ▶ フォトダイオードでの光量精密計測
- ▶ 絶縁抵抗の計測
- ▶ 走査型プローブ顕微鏡
- ▶ pH



【出典】

http://www.designworldonline.com/tools-and-techniques-for-testing-nanotech/#_

低レベル電気量検出用計測器の例

- ▶ デジタル・マルチメータ
- ▶ ナノ・ボルト計
- ▶ ピコ・アンペア計
- ▶ 電位計 (Electrometer)
- ▶ ソース・メジャ・ユニット
- ▶ マイクロ・オーム計
- ▶ 絶縁テスタ
- ▶ 光検出器
- ▶ Potentiostat
- ▶ 電離真空計 (Ionization gauge)
- ▶ 自由誘導減衰 (Free Induction Decay; FID)
- ▶ pHメータ

これ以外にもまだまだある . . .

Potentiostatとは、電気化学測定で使用される外部電源の一種。参照電極と対極を用い、参照電極で測定される試験電極の電位が測定者が設定したある値となるように対極から試験電極へ印加する電流を動的に制御できる（日本材料学会HPより引用）

FIDとは、核磁気共鳴（NMR）の吸収スペクトルを得るため、被測定試料にパルス磁場を加えたときに観測されるインパルス応答のこと

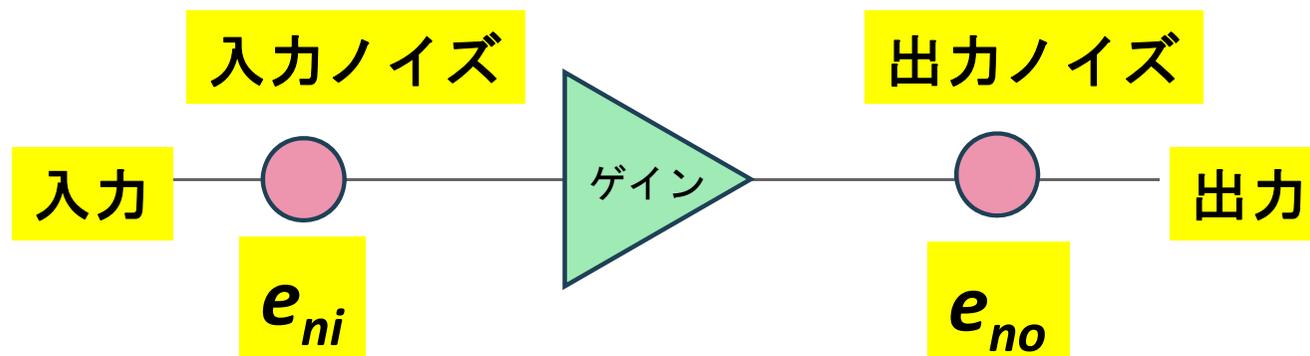


想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

高感度を実現する：ノイズ の原因と低減方法概論

【クイズ】 増幅系とゲイン

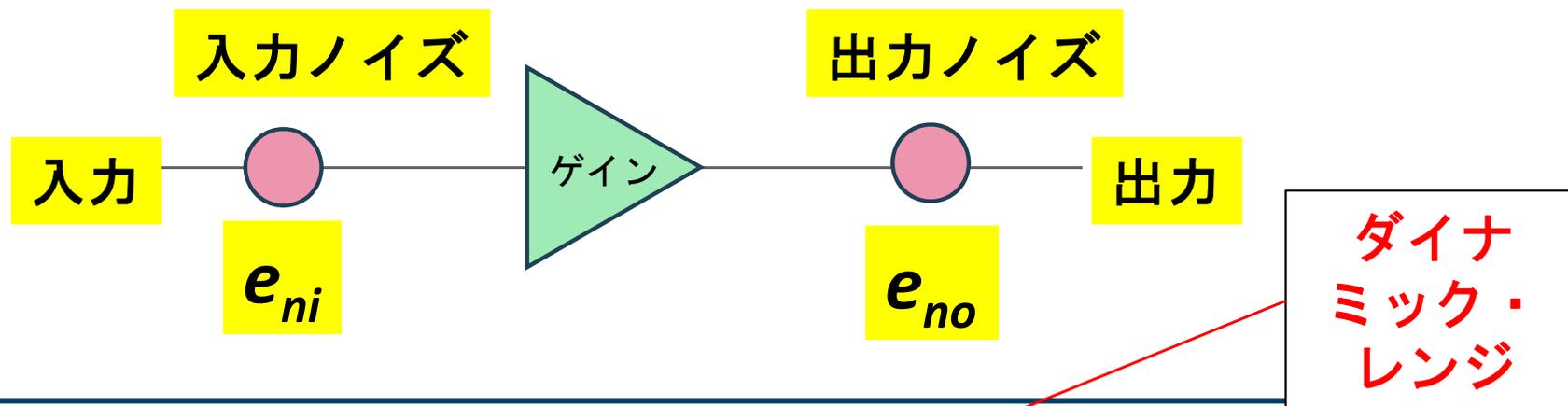
- ▶ ベストな感度を実現するには「ゲイン」をいくつに設定する？
なお $e_{no}(\text{out}) > e_{ni}(\text{in})$ と仮定



- A. 全出力ノイズを最低にするよう設定
- B. 全入力換算ノイズを最低にするよう設定
- C. e_{ni}/e_{no} の比とし、それぞれのノイズ源が同レベルで影響するように設定
- D. この情報だけでは決められない

【クイズ】 増幅系とゲイン

- ▶ ベストな感度を実現するには「ゲイン」をいくつに設定する？
なお $e_{no}(\text{out}) > e_{ni}(\text{in})$ と仮定



- A. 全出力ノイズを最低にするよう設定
- B. 全入力換算ノイズを最低にするよう設定
- C. e_{ni}/e_{no} の比とし、それぞれのノイズ源が同レベルで影響するように設定
- D. この情報だけでは決められない

感度

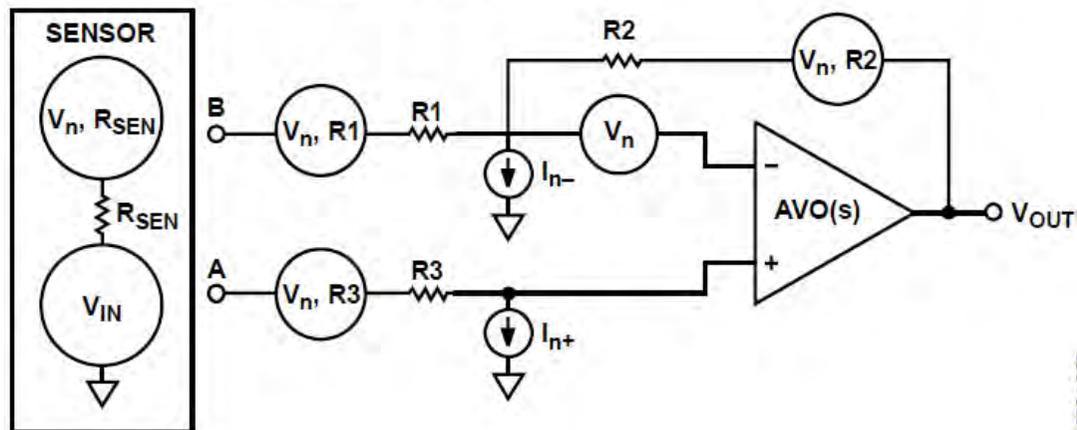
双方を
とりい
れて

発生源ごとにノイズを分類する

▶ 【内因性】 回路自体で生じる

- **低減不可能**
- 規定帯域幅で帯域制限する
- 測定限界を決めてしまう
- ノイズ電力は予測可能

$$\text{NOISE GAIN} = 1 + \frac{R2}{R1}$$
$$\text{BANDWIDTH} = 1.57 f_{\text{CLOSED-LOOP BANDWIDTH}}$$
$$\text{NOISE AT } V_{\text{OUT}} = \text{NOISE}_{\text{RTI}} \times \text{NOISE GAIN}$$



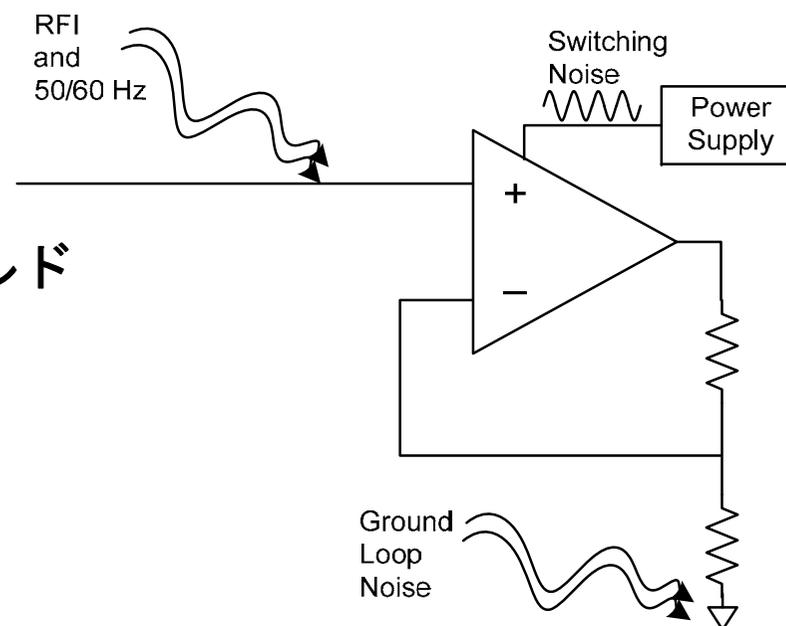
発生源ごとにノイズを分類する

▶ 【内因性】 回路自体で生じる

- **低減不可能**
- 規定帯域幅で帯域制限する
- 測定限界を決めてしまう
- ノイズ電力は予測可能

▶ 【外因性】 外部から

- **低減可能**
- ノイズ結合経路を最小にする
 - 適切なグラウンド／デカップリング／シールド
／レイアウト／その他テクニック
- 3要素を考える「ノイズ源」「結合経路」
「被害者側の回路」
- その周波数と高調波。断続的なケースも



ノイズ低減テクニック

検出前

- ▶ 内因性ノイズ
 - 帯域制限／フィルタ
 - 同期検波／ロックインアンプ
- ▶ 外因性ノイズ
 - ツイストペア
 - シールド
 - ガード
 - 適切なグラウンド設計
 - フィルタ
 - アナログ・ノッチ・フィルタ
 - 検出タイミング同期
 - 同期検波／ロックインアンプ

ノイズ低減テクニック

検出前

- ▶ 内因性ノイズ
 - 帯域制限／フィルタ
 - 同期検波／ロックインアンプ
- ▶ 外因性ノイズ
 - ツイストペア
 - シールド
 - ガード
 - 適切なグラウンド設計
 - フィルタ
 - アナログ・ノッチ・フィルタ
 - 検出タイミング同期
 - 同期検波／ロックインアンプ

検出後

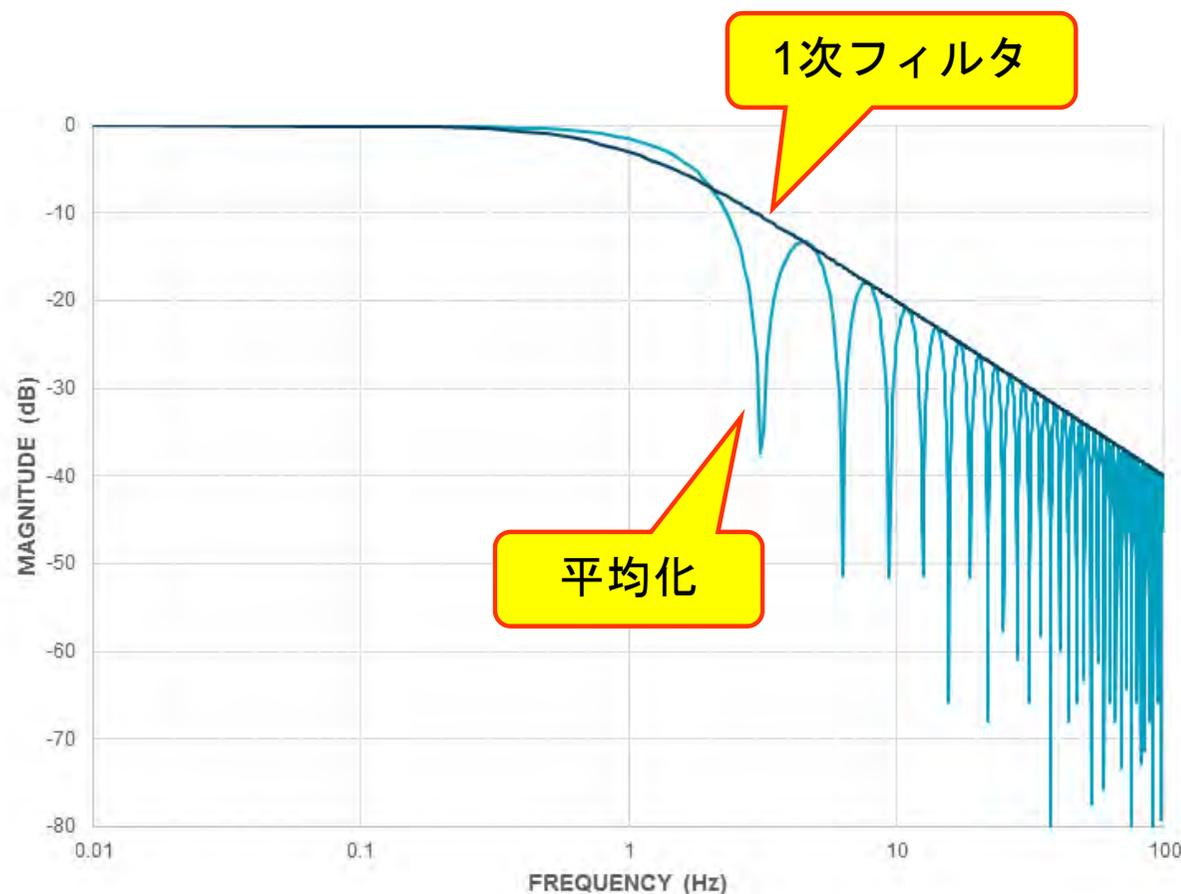
- ▶ 内因性／外因性ノイズ
 - 平均化
 - デジタル・フィルタ
 - FFT解析

しかし「時すでに遅し」ということもある

- ノイズにより回路が飽和して（振り切れて）いた
- ノイズがエイリアシングで折り返されていた

ノイズ低減－平均化？フィルタ？その効果

- ▶ 高感度にはノイズ最小化が必要
- ▶ 平均化とフィルタは計測帯域幅を狭くするが動きは少し異なる
- ▶ Nサンプルの平均化は
 - ノイズが $1/\sqrt{N}$ になる（ホワイトノイズ）
 - 有効帯域幅が $1/N$ になる
 - ノッチが生じる
 - 単純化FIRフィルタといえる
 - 任意に平均数（制限周波数）を変えられる
 - 良く使われる



1次フィルタと平均化

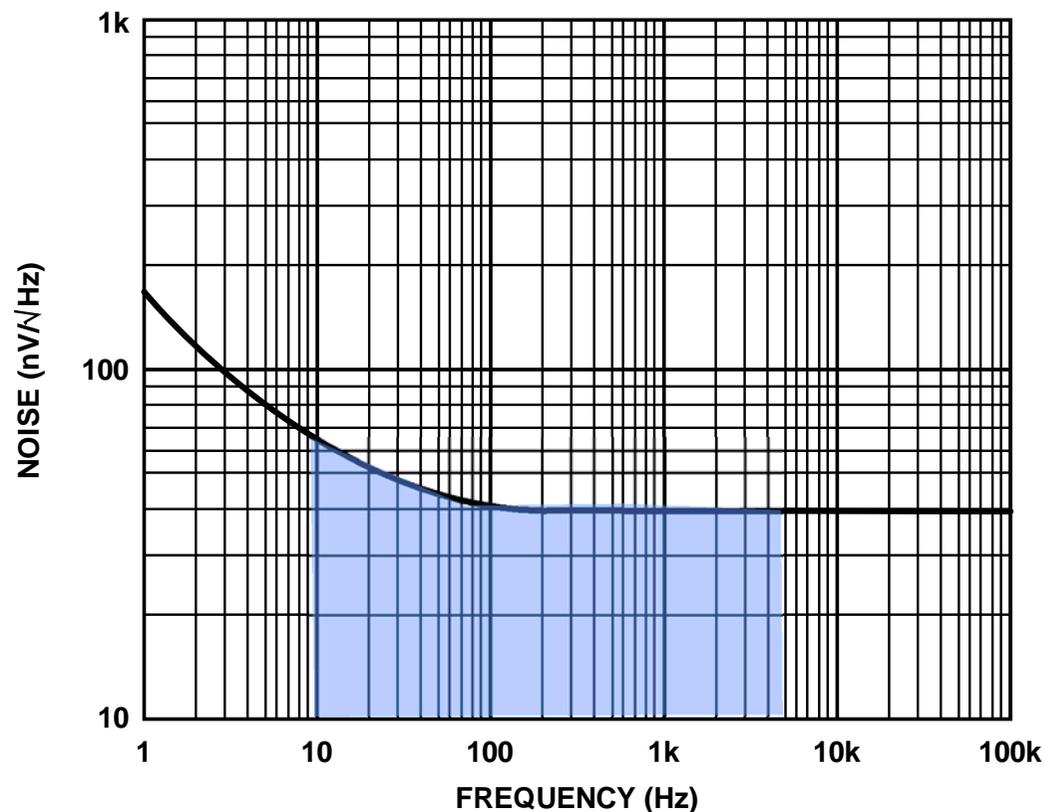


想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

高感度を実現する：フリッカ （ $1/f$ ）ノイズを理解する

低レベル計測における内因性ノイズ

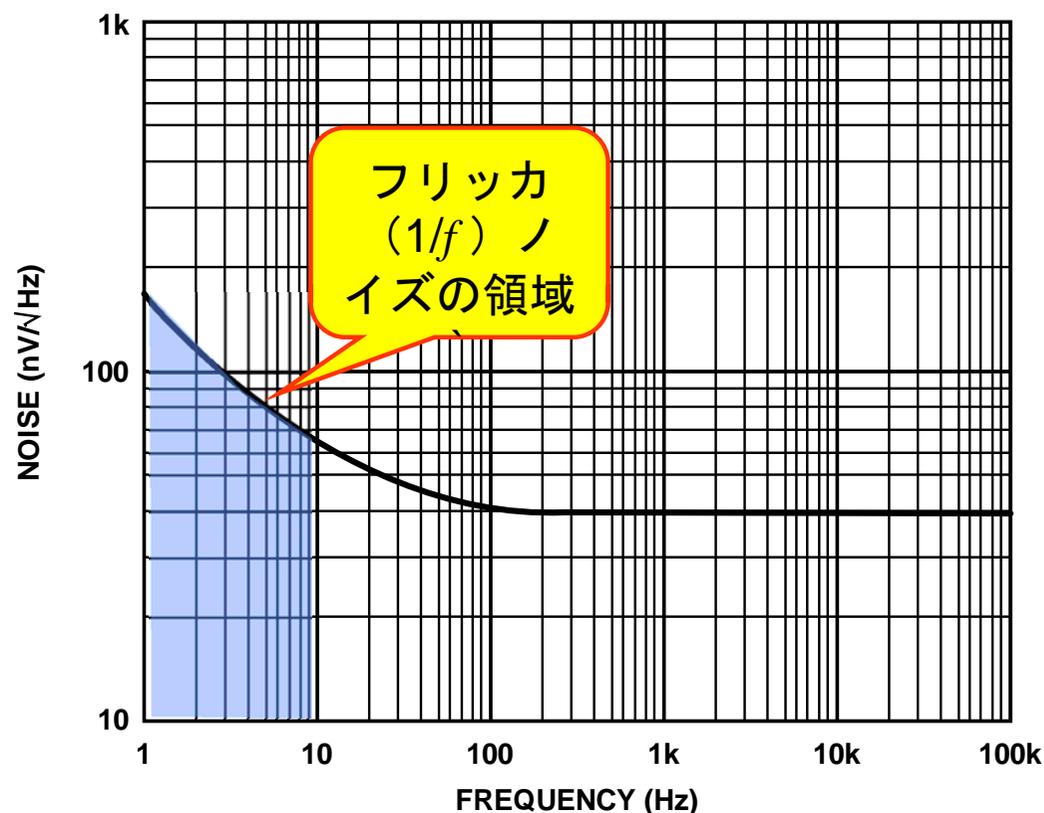
- ▶ ホワイトノイズはフィルタや平均化で簡単に低減可能



07343-067

低レベル計測における内因性ノイズ

- ▶ ホワイトノイズはフィルタや平均化で簡単に低減可能
- ▶ フリッカ・ノイズ ($1/f$ ノイズ) は高精度・低レベル計測でいちばん厄介なノイズ
- ▶ フリッカ・ノイズ領域では周波数 $1/2$ でノイズ密度は3dB上昇 (ノイズ電力は $1/f$ に比例)
- ▶ ノイズ帯域幅 (考慮すべき帯域幅) は以下で決まる
 - 回路の動作帯域幅 (広帯域システムの場合)
 - 信号の観測時間 (直流システムの場合)



07343-067

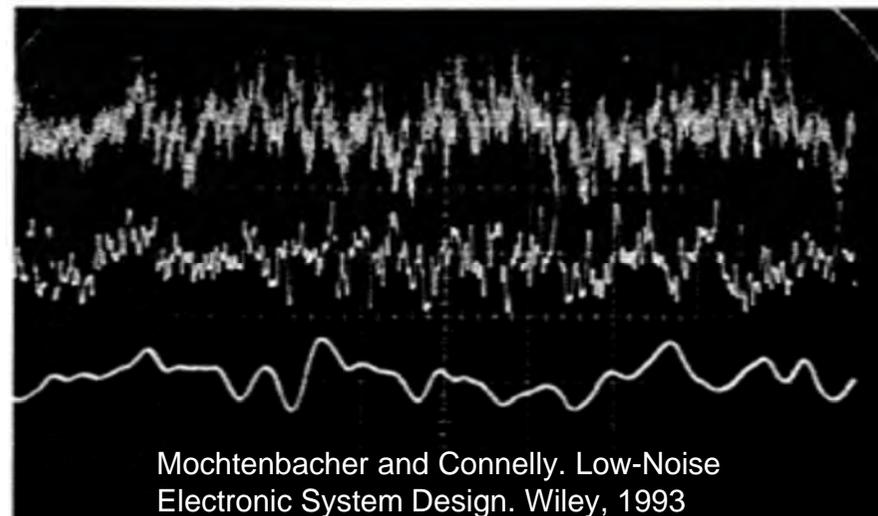
フリッカ（ $1/f$ ）ノイズにより生じる問題

「平均化を増やせばノイズが減る」

「帯域を狭くすればノイズが減る」

▶ これらの常識が $1/f$ コーナに近づくと破綻する

- ノイズ電圧は $1/\sqrt{f_{BW}}$ で低下しなくなる
- 平均化／観測時間を長くしても、帯域幅を狭くしても！（「ゼロ周波数」＝DCというのはいない）



フリッカ（ $1/f$ ）ノイズにより生じる問題

「平均化を増やせばノイズが減る」

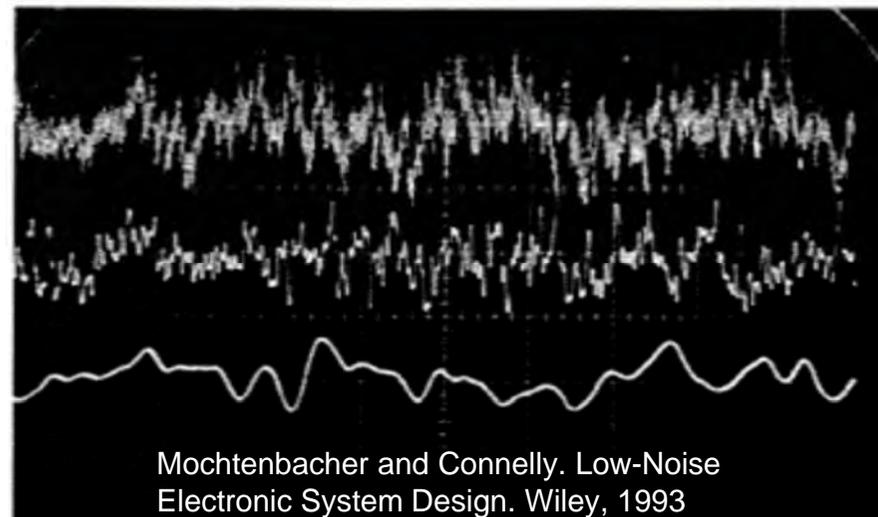
「帯域を狭くすればノイズが減る」

- ▶ これらの常識が $1/f$ コーナに近づくと破綻する

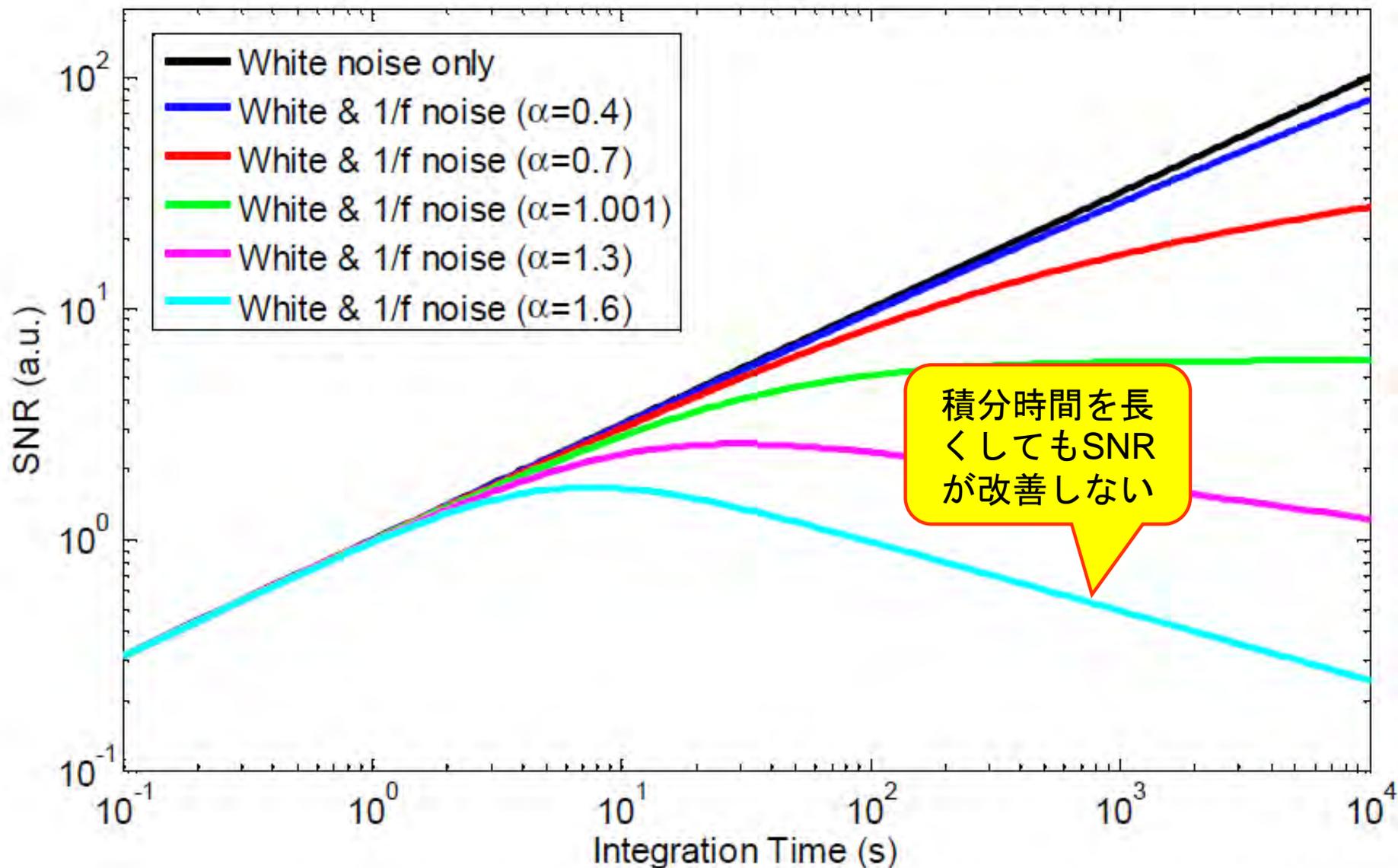
- ノイズ電圧は $1/\sqrt{f_{BW}}$ で低下しなくなる
- 平均化／観測時間を長くしても、帯域幅を狭くしても！（「ゼロ周波数」＝DCというのには存在しない）

- ▶ ここでのポイント

- 平均化でホワイトノイズは低減できる
- **平均化では $1/f$ ノイズを低減できない**
- 同じことがフィルタにもあてはまる



フリッカ ($1/f$) ノイズにより生じる問題



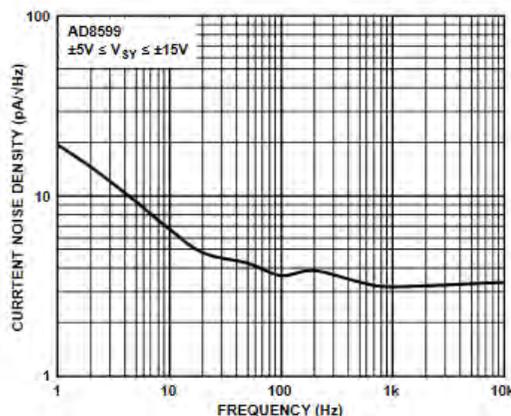
Optical SNR vs integration time From McDowell, Ren, Yang, 2008

フリッカ (1/f) ノイズ源は？

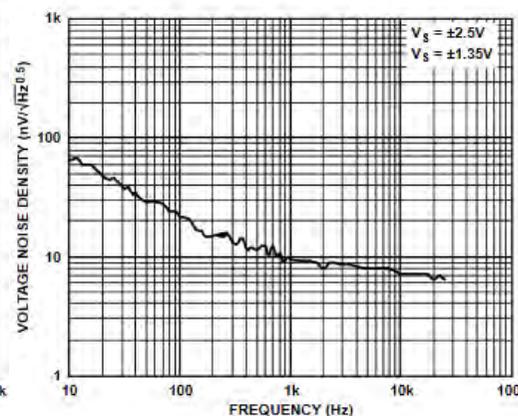
▶ 半導体

- IC
 - アンプ
 - 基準電圧IC
 - ADC
- トランジスタ
- ダイオード

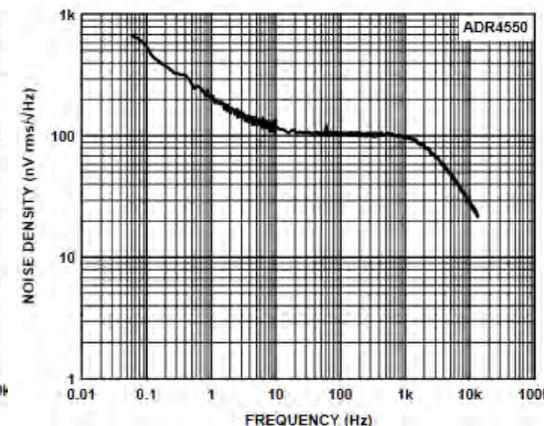
AD8597



AD8615



ADR4550



▶ 抵抗

- 過剰雑音（抵抗体内部で電流が均一に流れない）
- 製造技術と構造に依存

Noise Index [NI]

$$[NI]_{dB} = 20 \log \left[\left(\frac{u}{U} \right) \cdot 10^6 \right]$$

u : 1デケード帯域でのrmsノイズ[V]

これを μV に式中で変換 (10^6)

U : 抵抗での直流電圧降下[V]

(加える電圧に相当する)

[NI] dB	-40	-30	-20	-10	0	+10
Discrete Resistors						
Carbon composition			—————			
Deposited carbon		—————				
Metal foil	—————					
Wirewound	—————					
Integrated Resistors						
Thin-film		—————				
Thick-film			—————			

Figure 2. Average noise indexes of commercial resistors.

Source: Vishay Precision Group

<http://www.vishaypg.com/docs/49997/49997.pdf>



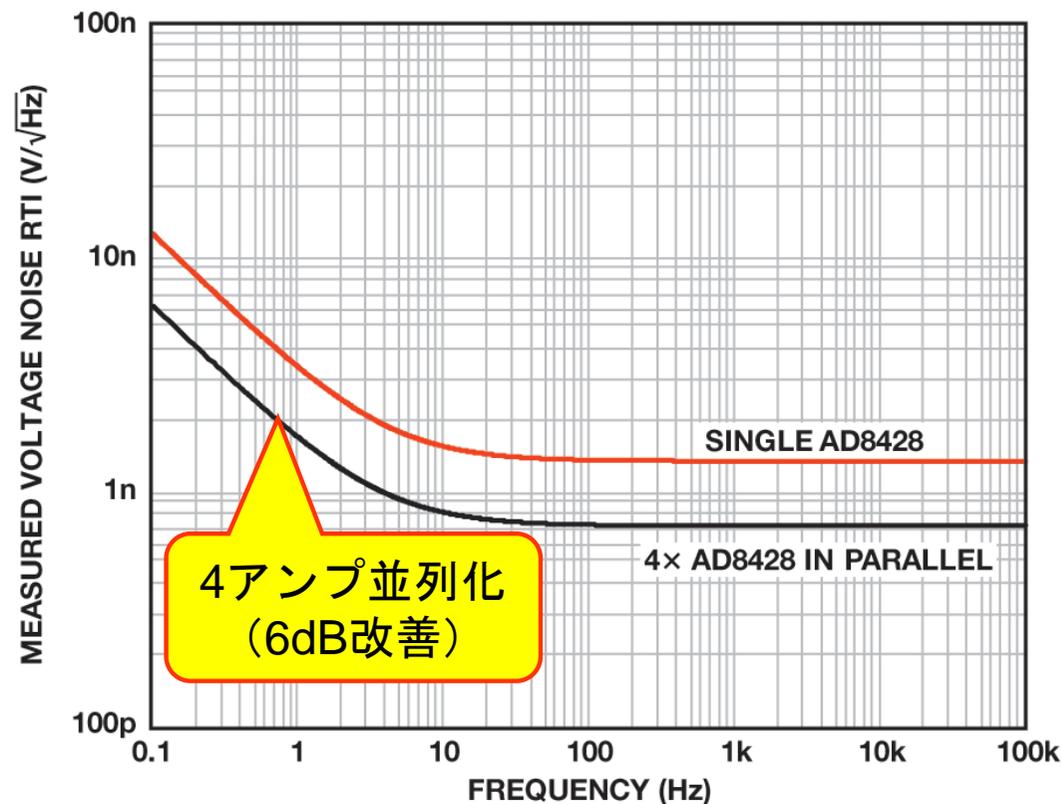
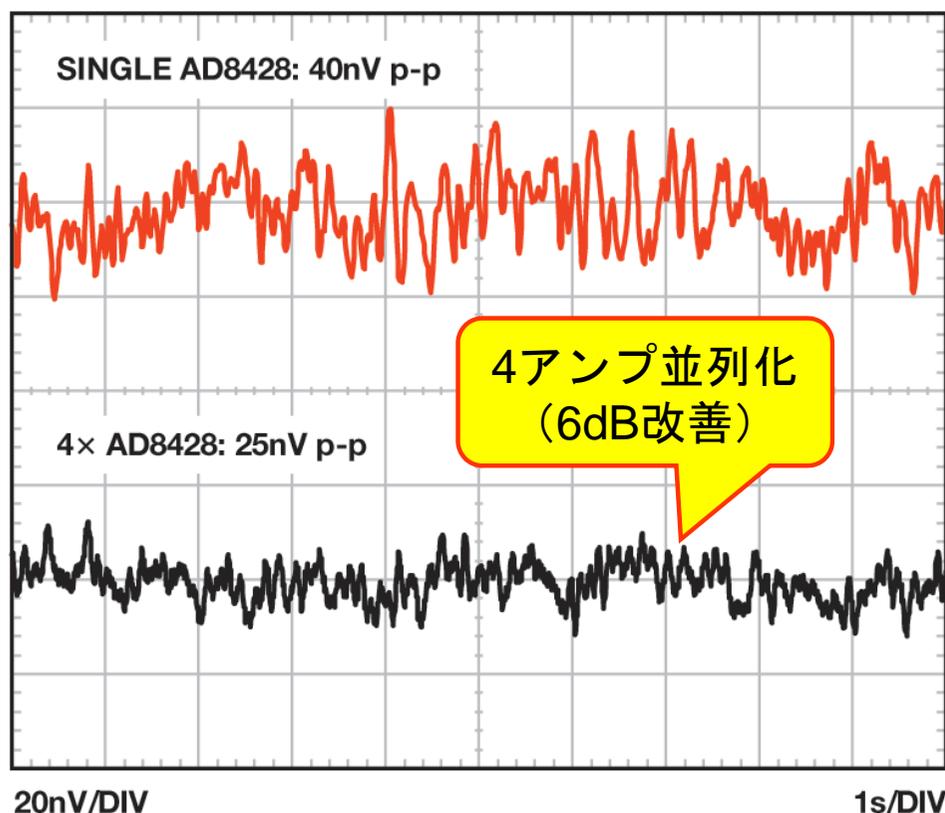
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

高感度を実現する：フリッカ（ $1/f$ ）ノイズへの対峙 方法「チョッピングと同期 検波」

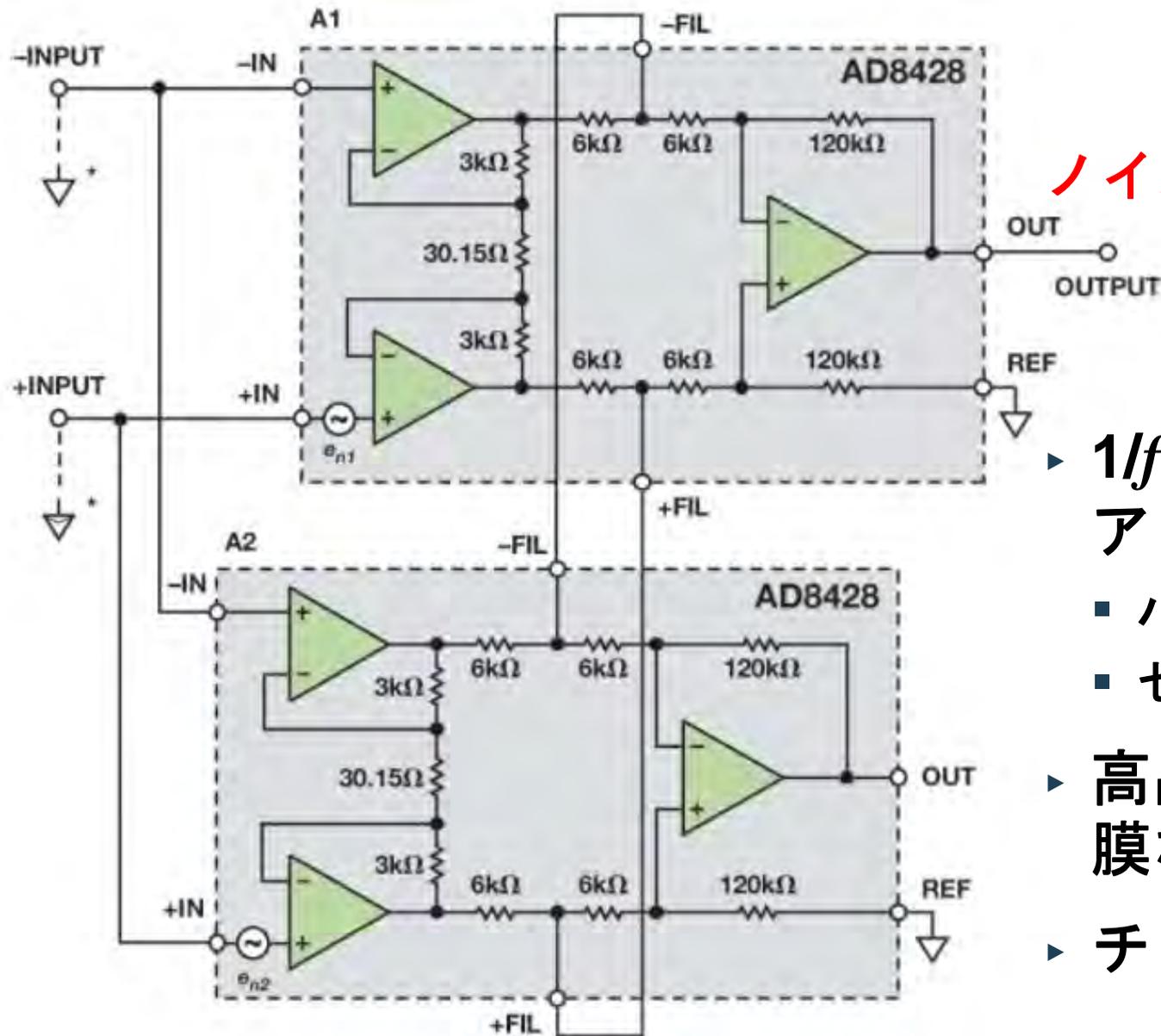
どうやってフリッカ (1/f) ノイズと対峙するか

【アンプ並列化】

Gerstenhaber, Johnson and Hunt. *No Pain, High Gain: Building a Low-Noise Instrumentation Amplifier with Nanovolt Sensitivity*. Analog Dialogue, May 2015



2アンプ並列化（Analog Dialogueより）

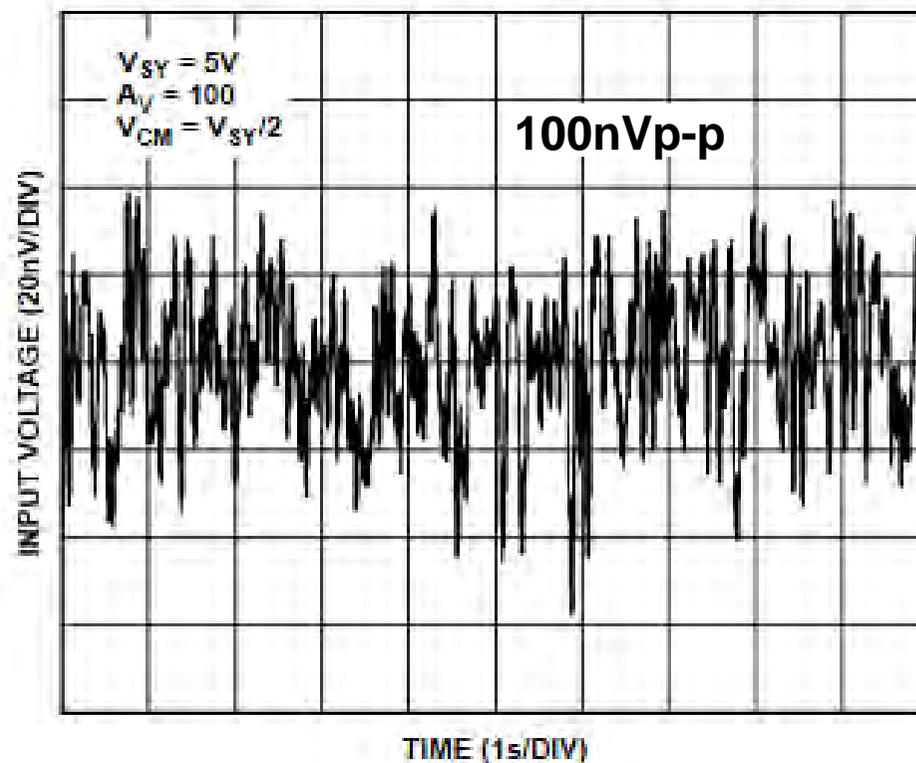
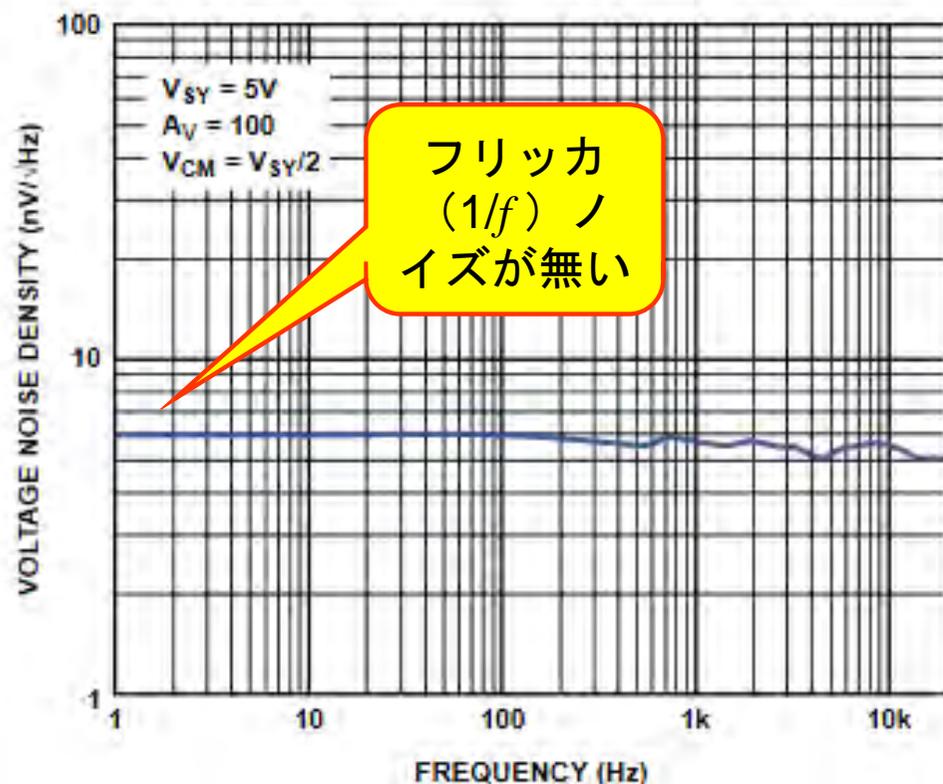


ノイズ電圧は $1/\sqrt{N}$ で低下

【その他の方法】

- ▶ $1/f$ コーナ周波数の低いアンプの使用
 - バイポーラ
 - ゼロドリフト（次ページ）
- ▶ 高品質の抵抗（金属皮膜など）の使用
- ▶ チョップパ技術の活用

どうやってフリッカ (1/f) ノイズと対峙するか

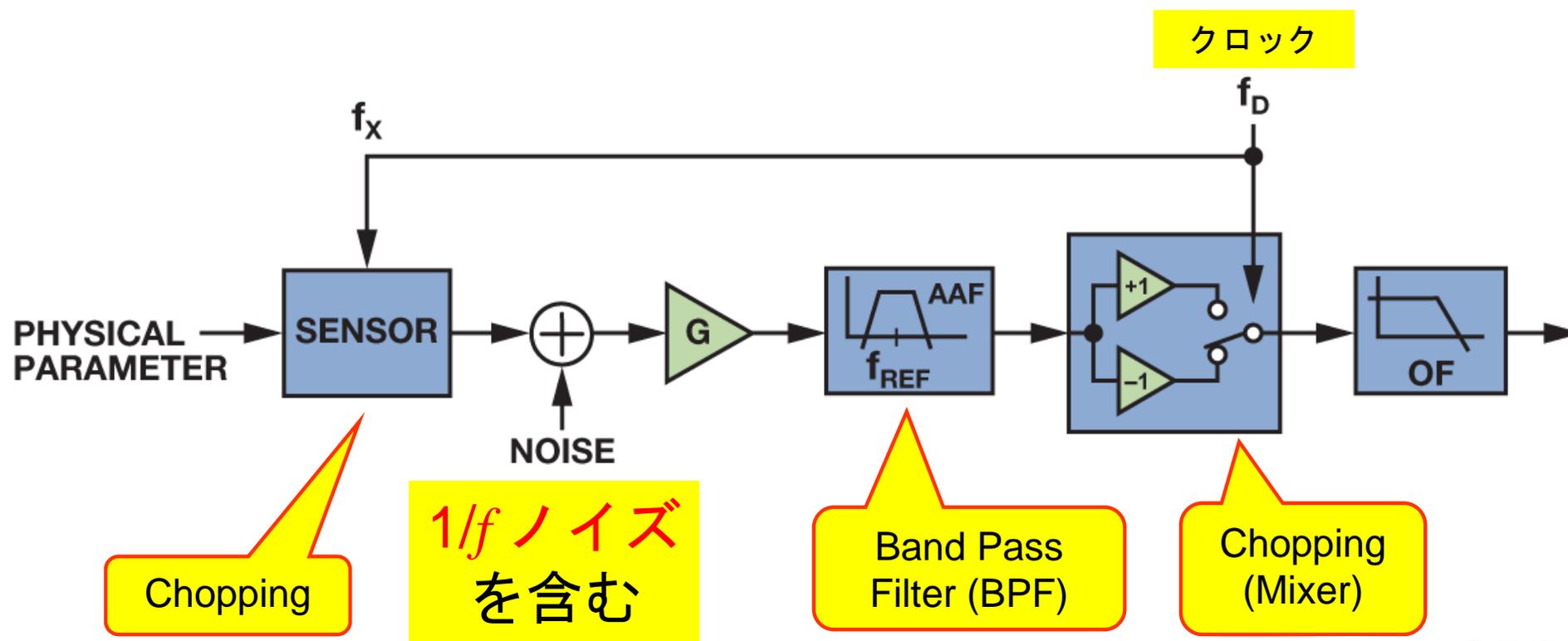


チョッパ技術を活用した
超ローノイズR to R I/O ゼロドリフト・アンプ
ADA4528-1 のデータシートより

- ▶ チョッパ技術 (同期検波) を活用する

フリッカ ($1/f$) ノイズとの対峙—チョッパ技術

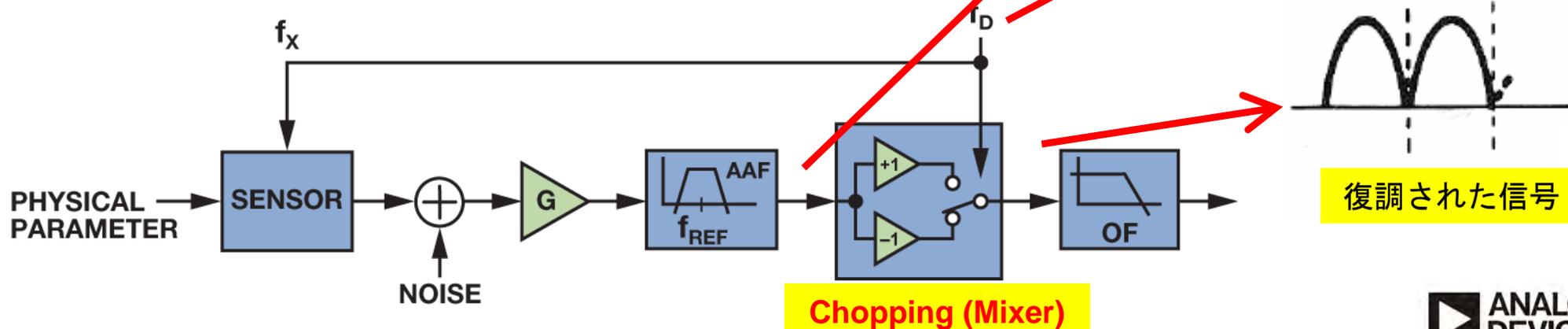
- ▶ 入力信号をクロック周波数で変調 (チョッピング) する
- ▶ その信号を増幅する ($1/f$ 領域外のAC信号として)
- ▶ それを同期検波する



チョッパ信号を復調する「同期検波」

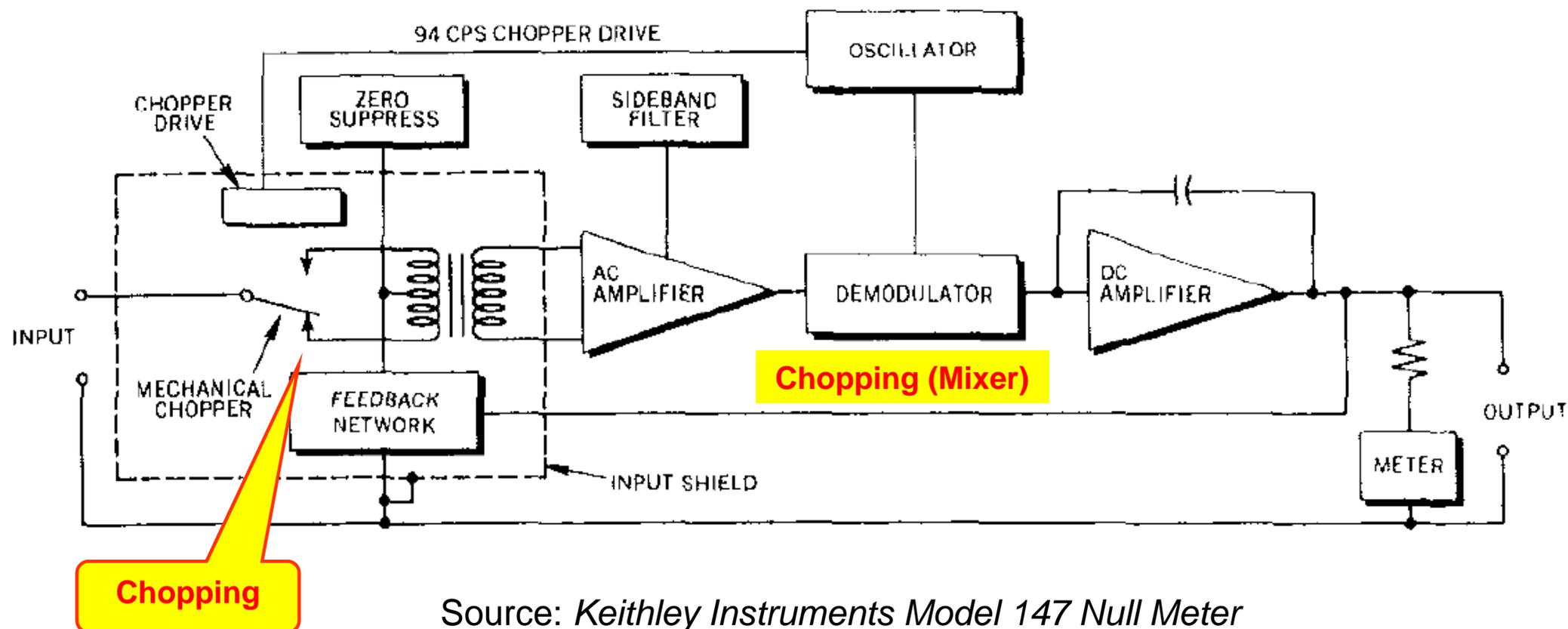
- ▶ クロック周波数は既知。信号はBPFでフィルタ可能
- ▶ ミキシングは簡単。スイッチON/OFF（もしくは極性反転）
- ▶ クロックとミキシングした後、目的の信号はDCとなる
- ▶ LPFでノイズ低減とチョッパによる残渣を除去

このテクニックを「同期検波」とよぶ



チョッパ技術による安定化の例（Keithley 147 Null Meter）

- ▶ Null Meterは微小電圧を測定できる計測器。Keithley 147は最小フルスケール30nV



Source: Keithley Instruments Model 147 Null Meter

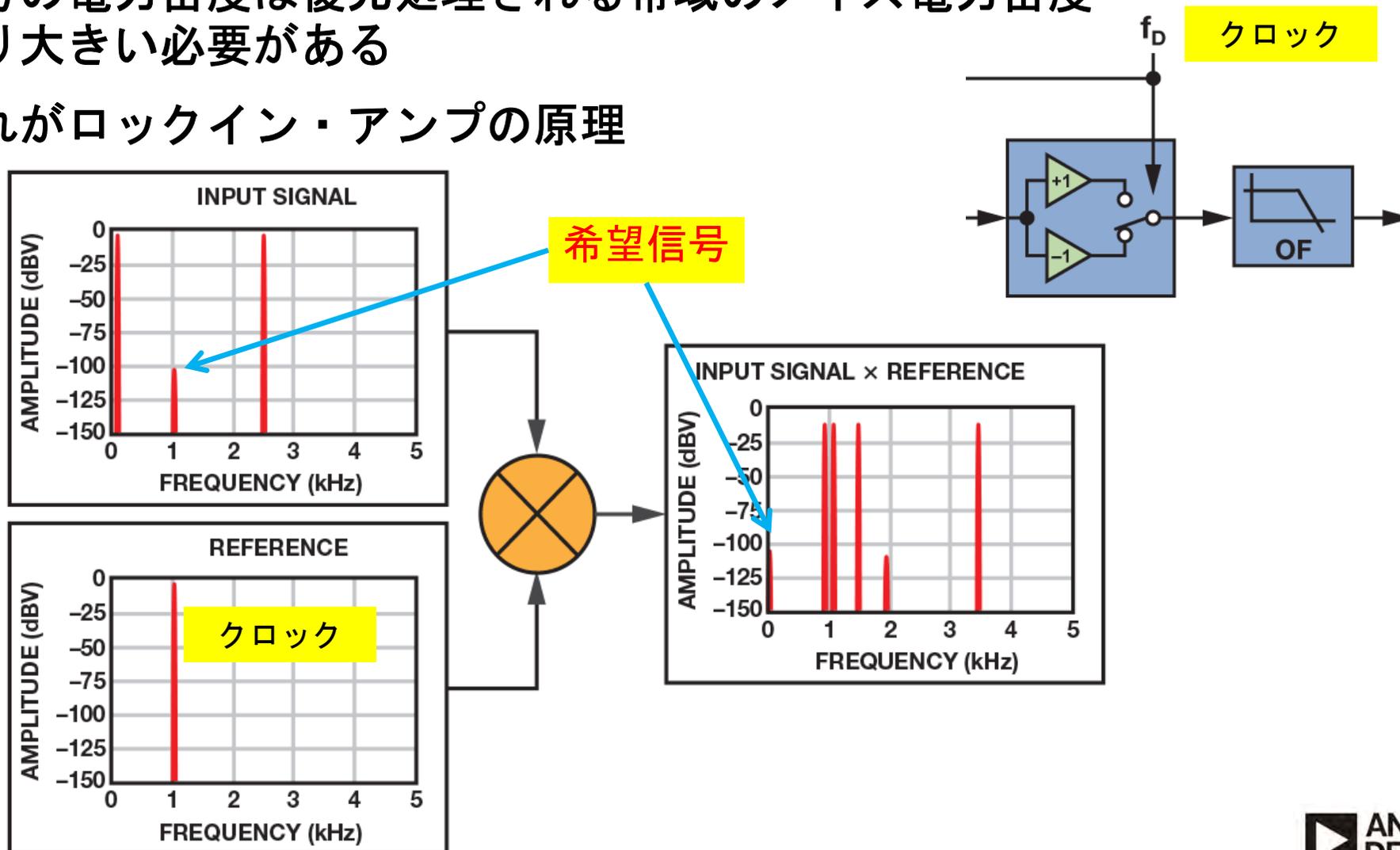
チョッパ技術の実現例－Pico Volt 電圧計（20pV感度）



<http://www.emelectronics.co.uk/p13.html>

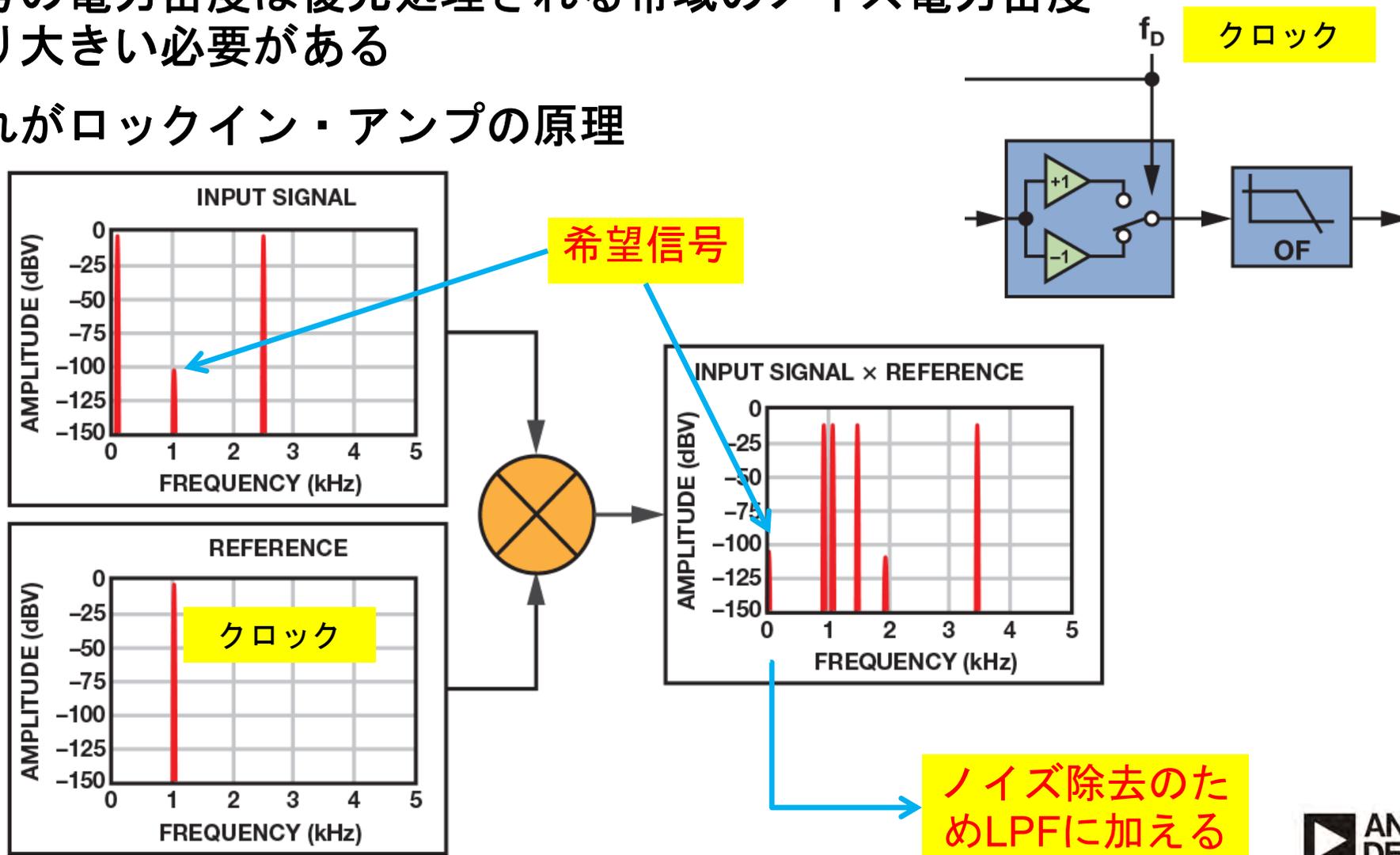
チョッパ信号を復調する「同期検波」

- ▶ 同期検波は外来ノイズがあっても信号を復元できる
- ▶ 信号の電力密度は復元処理される帯域のノイズ電力密度より大きい必要がある
- ▶ これがロックイン・アンプの原理



チョッパ信号を復調する「同期検波」

- ▶ 同期検波は外来ノイズがあっても信号を復元できる
- ▶ 信号の電力密度は復元処理される帯域のノイズ電力密度より大きい必要がある
- ▶ これがロックイン・アンプの原理



信号検出後の信号復元（代替手法）

1. ミキサをADCで置き換える

- 同期サンプリングする

2. FFT解析をする

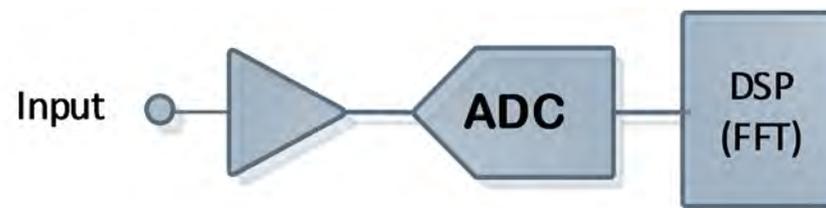
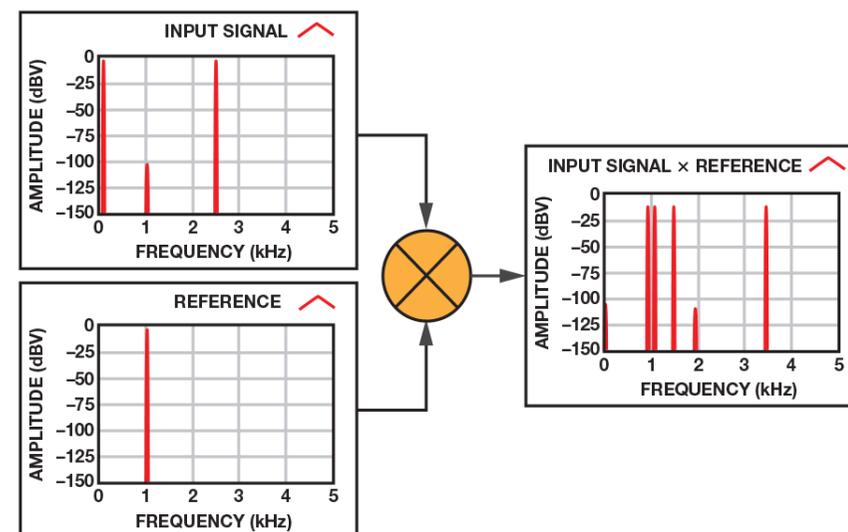
- FFT結果から目的の周波数（クロック周波数）でのスペクトルの大きさを取り出す

メリット

- フレキシブル／プログラムで処理可能／部品数が少ない
- 実データからより多くの情報を得られる

デメリット

- 電力が大きい。高速なデバイスが必要
- 前段での（気づかない）飽和に注意



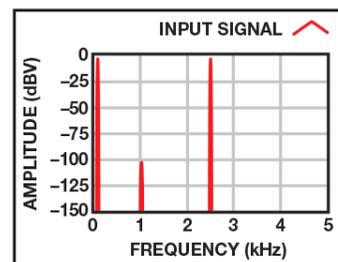
信号検出後の信号復元（代替手法）

1. ミキサをADCで置き換える

- 同期サンプリングする

2. FFT解析をする

- FFT結果から目的の周波数（クロック周波数）でのスペクトルの大きさを取り出す



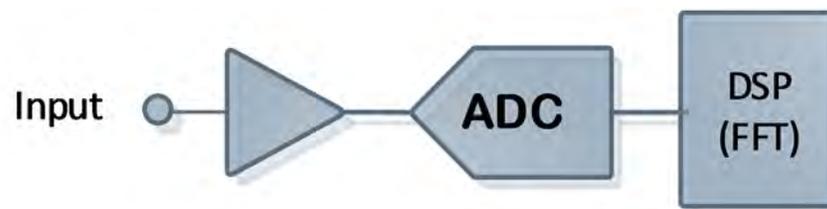
→ ADCに直接
加える

メリット

- フレキシブル／プログラムで処理可能／部品数が少ない
- 実データからより多くの情報を得られる

デメリット

- 電力が大きい。高速なデバイスが必要
- 前段での（気づかない）飽和に注意

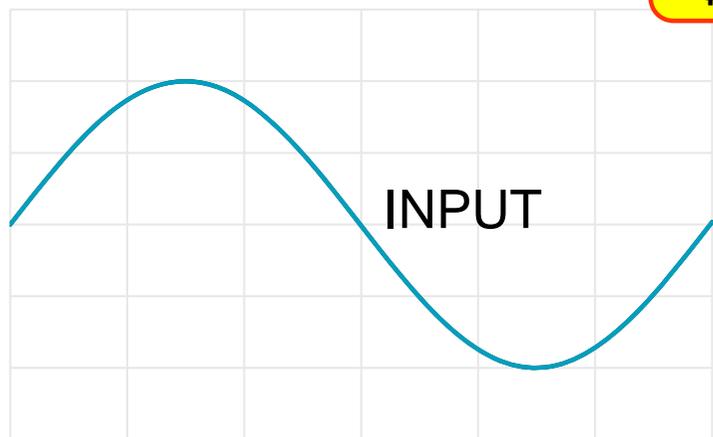
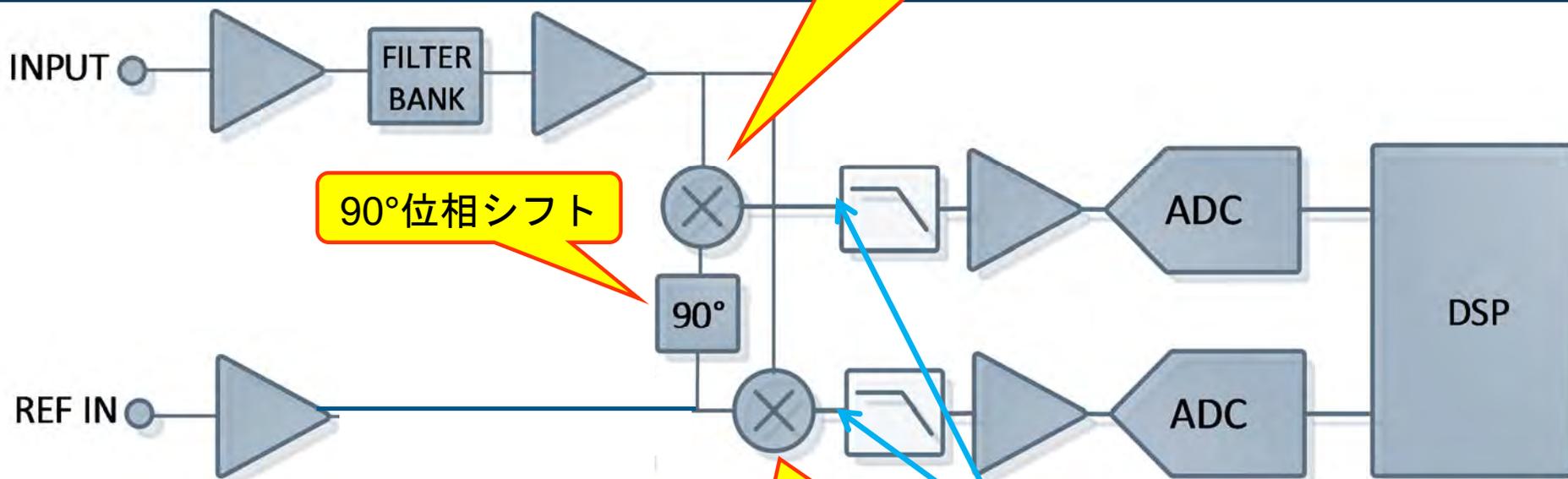


2相ロックイン・アンプ

ミキシング
 $\Phi = 90^\circ$ (直交相)

90°位相シフト

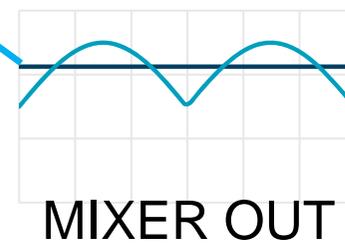
ミキシング
 $\Phi = 0^\circ$ (同相)



×

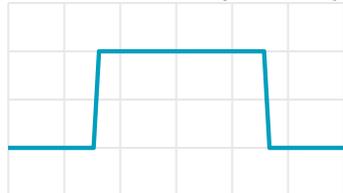


=

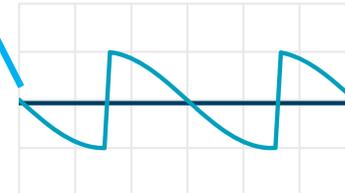


$\Phi = 0^\circ$
(同相)

×



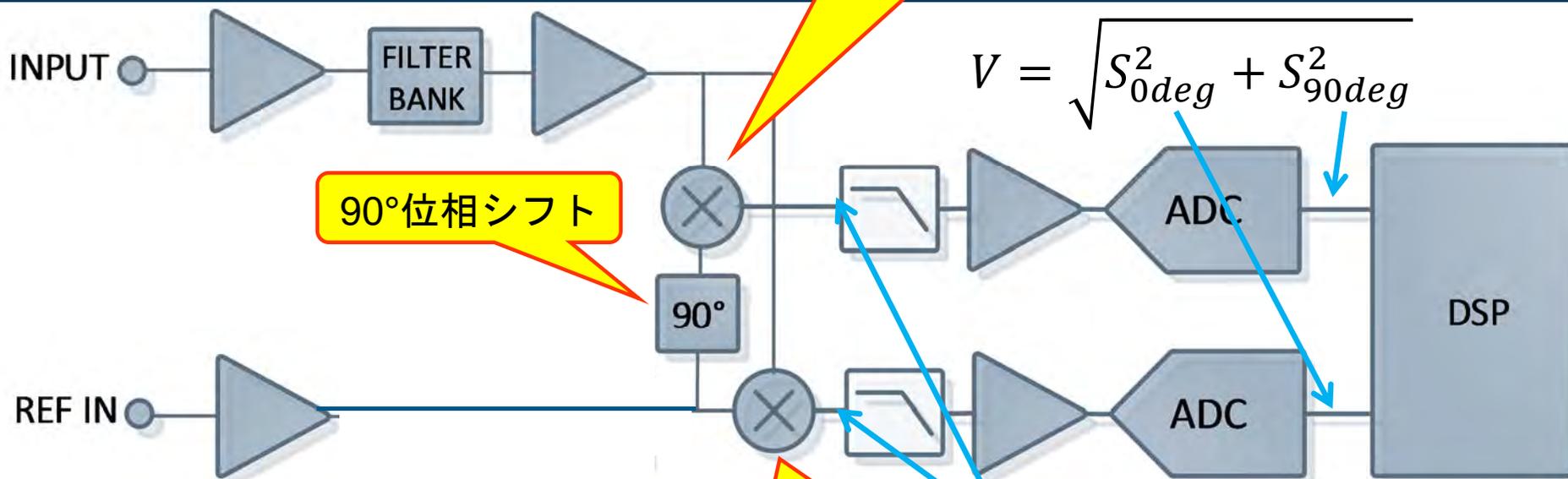
=



$\Phi = 90^\circ$
(直交相)

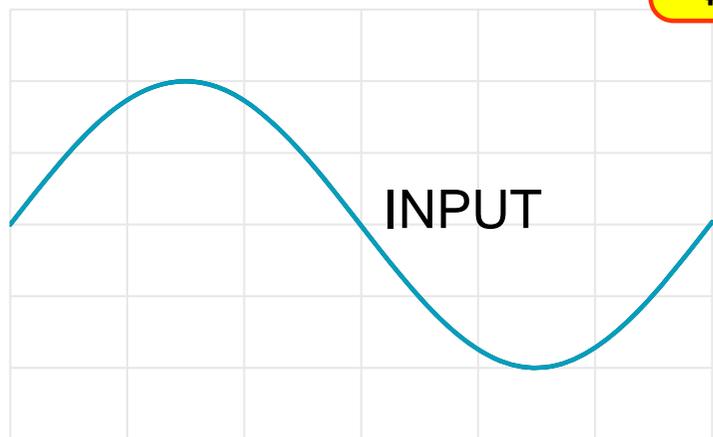
2相ロックイン・アンプ

ミキシング
 $\Phi = 90^\circ$ (直交相)



90°位相シフト

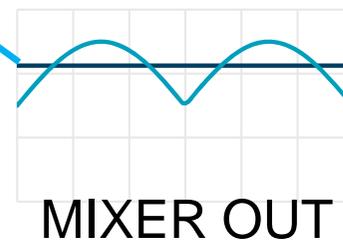
ミキシング
 $\Phi = 0^\circ$ (同相)



×

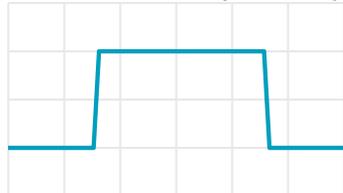


=

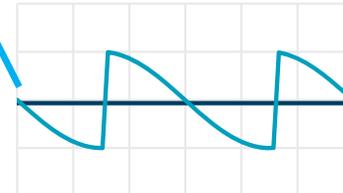


$\Phi = 0^\circ$
 (同相)

×

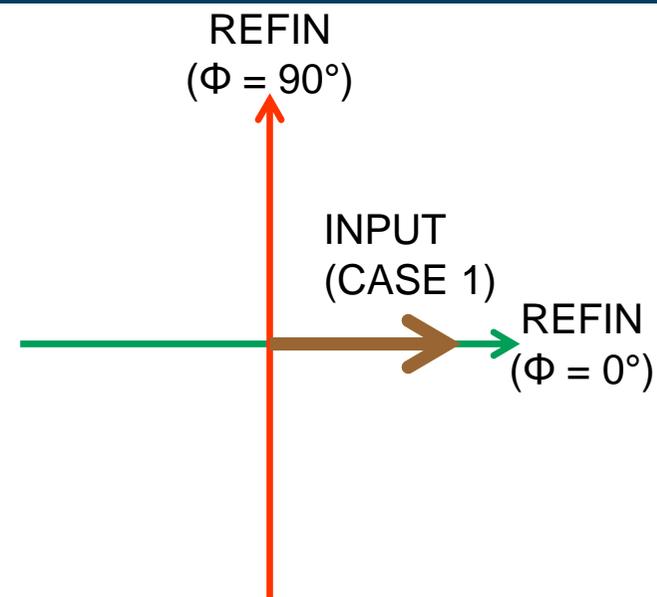
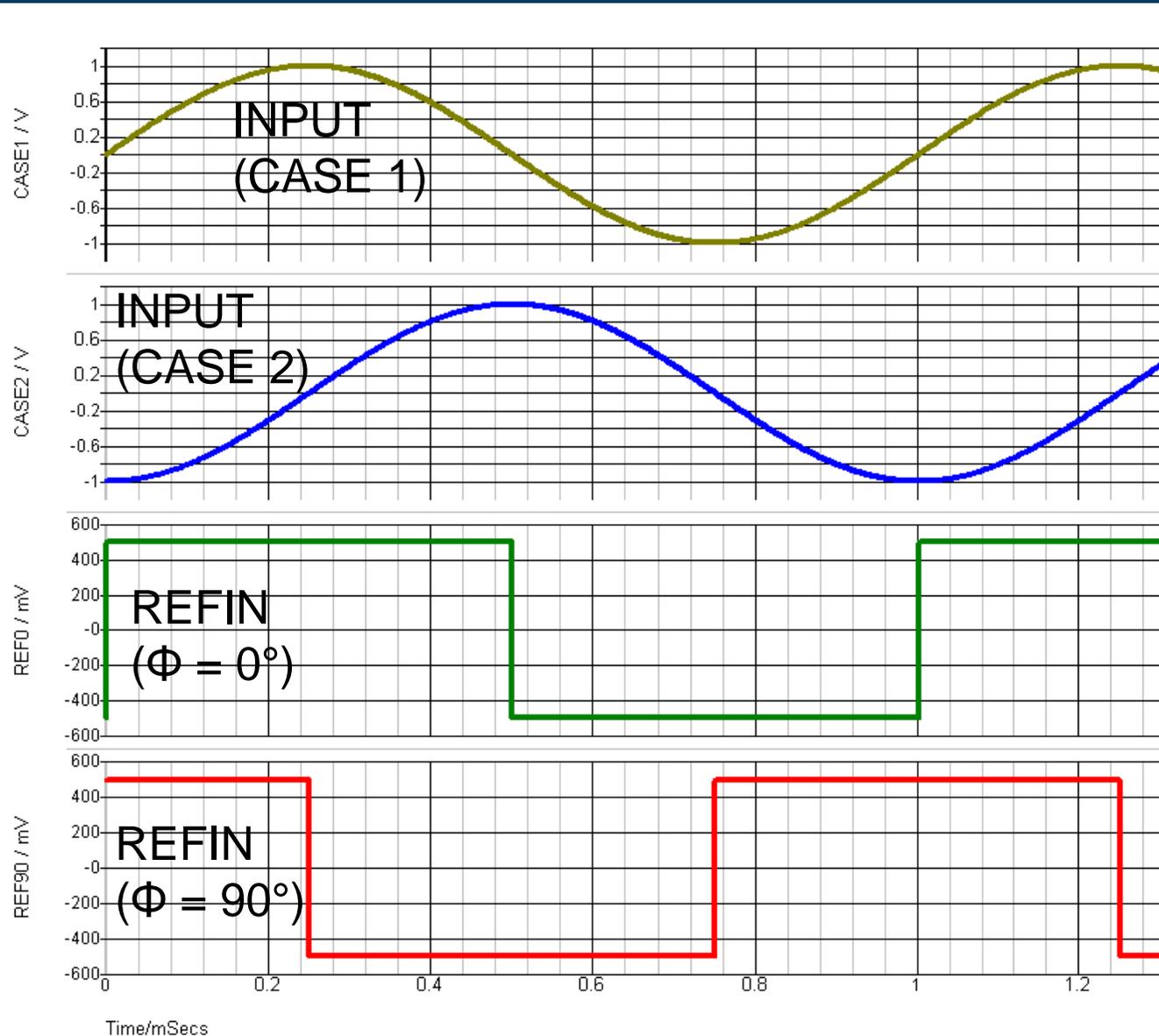


=

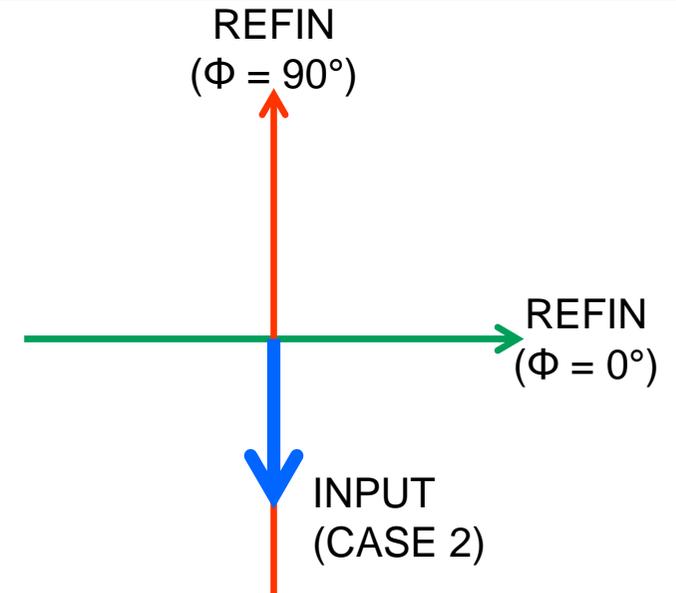
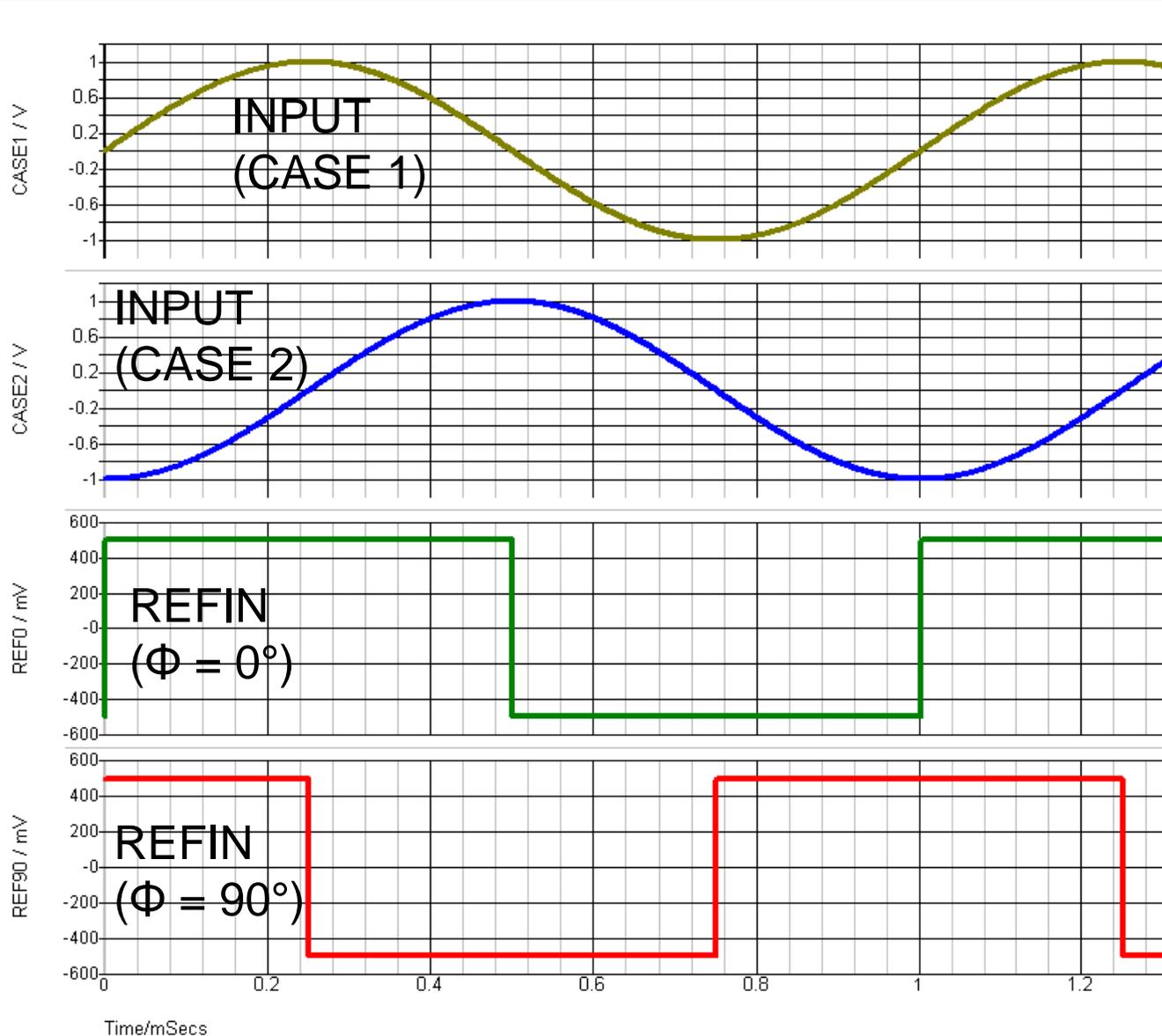


$\Phi = 90^\circ$
 (直交相)

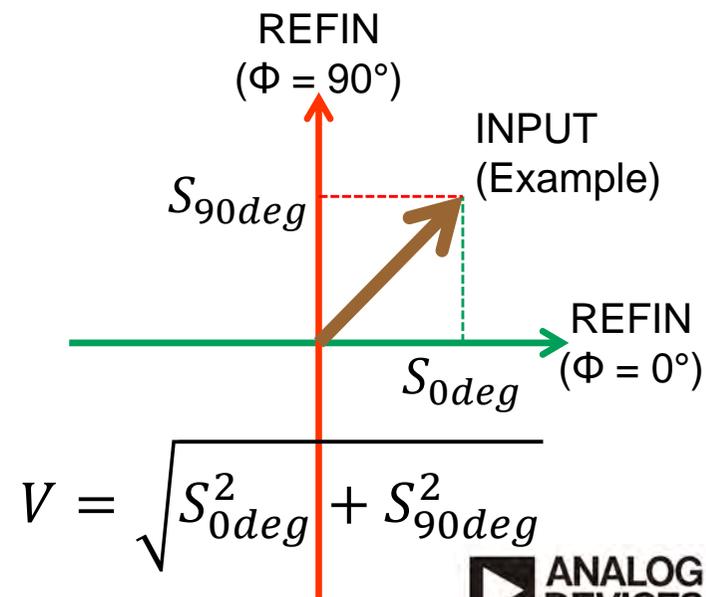
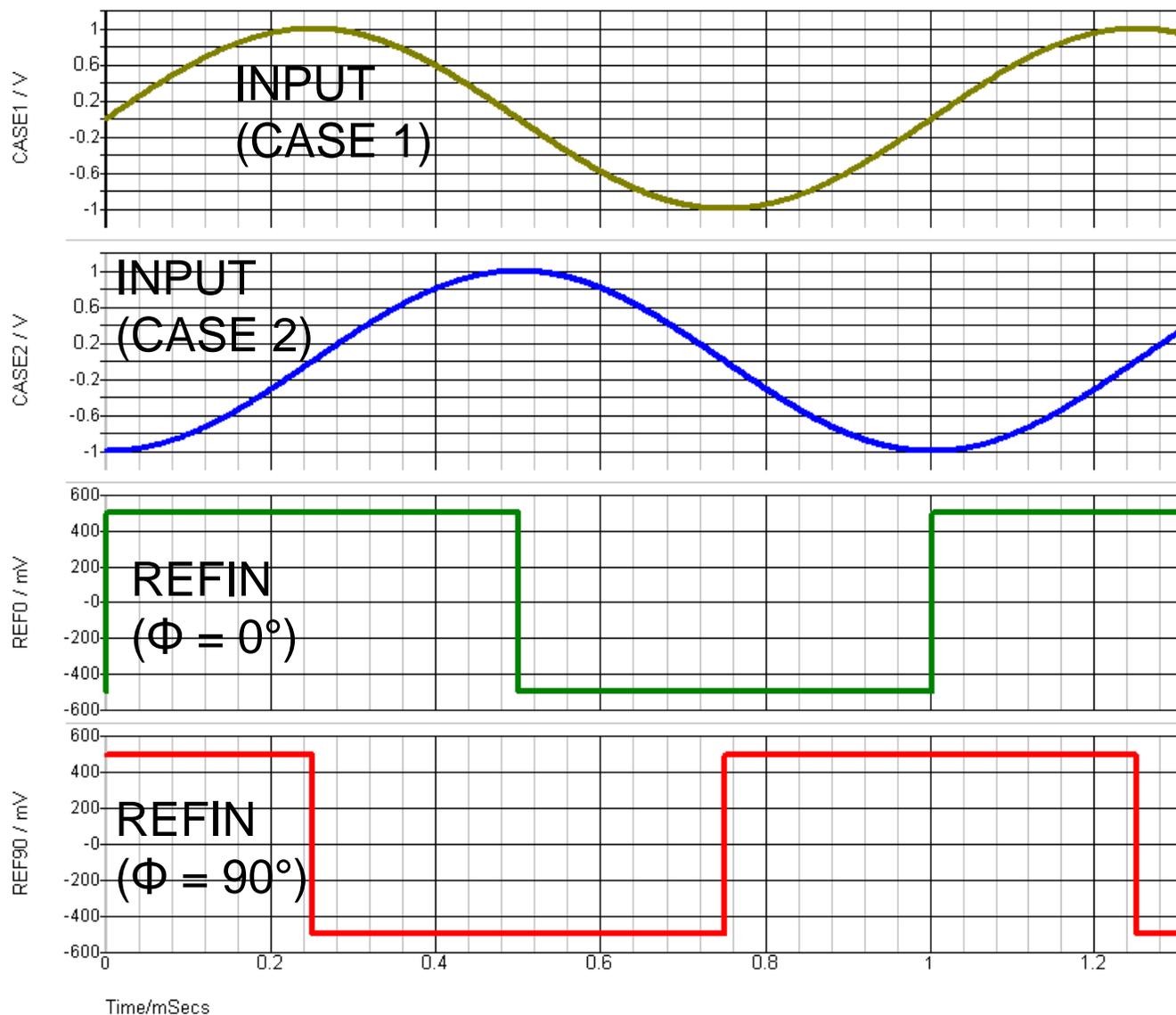
2相ロックイン・アンプの検出原理（位相がずれても確実に振幅量が得られる）



2相ロックイン・アンプの検出原理（位相がずれても確実に振幅量が得られる）



2相ロックイン・アンプの検出原理（位相がずれても確実に振幅量が得られる）

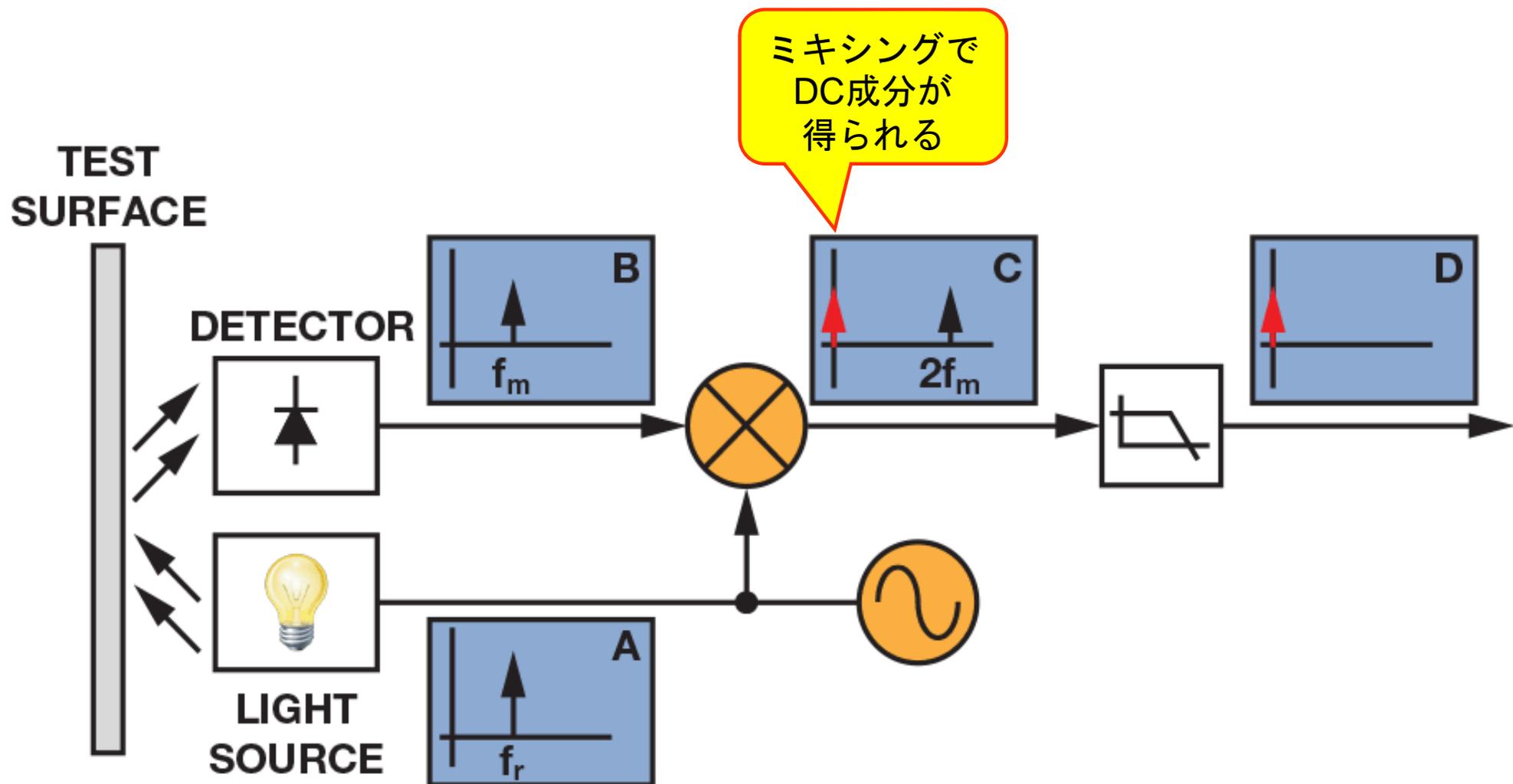


$$V = \sqrt{S_{0deg}^2 + S_{90deg}^2}$$



想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

ロックイン・アンプを使用した表面汚損度の計測



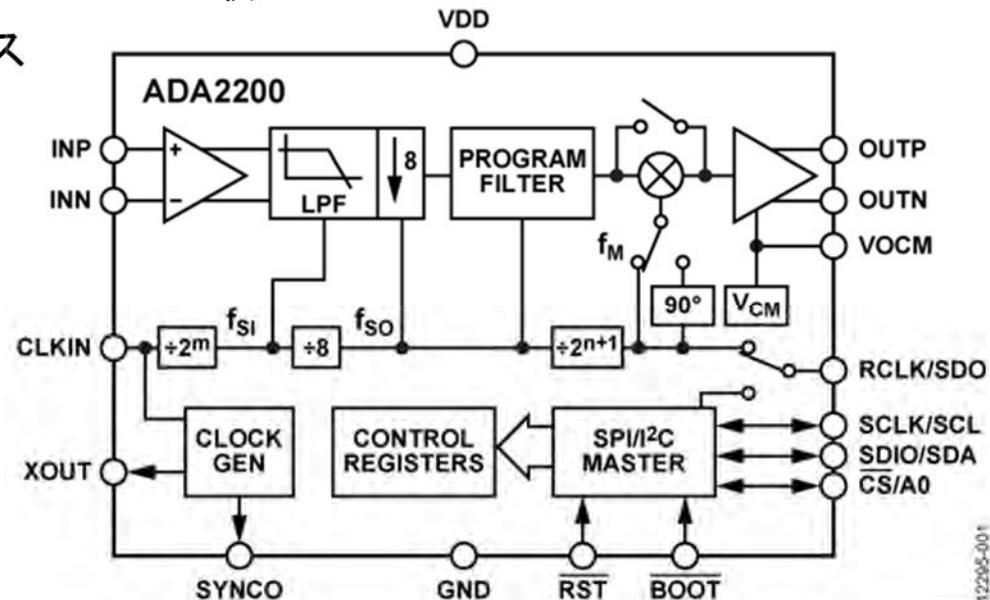
ADA2200 - 同期検波器 + 設定可能アナログ・フィルタ 2個並列接続で2相ロックイン・アンプも実現可能

特徴

- ▶ 同期検波機能すべてを集積化
 - ローパス、1/8xデシメートFIRフィルタ
 - 4次IIRフィルタを構成可能
 - チョッパ周波数を可変できるミキサ
 - 検波回路は0°/90°の位相選択が可能
 - REF CLKで同期した励起回路を構成可能
 - ADCに直結できる出力ドライバ
- ▶ フレキシブルな入出力インターフェース
 - シングルエンド/差動入力
 - レール to レール入出力
 - SYNCO出力によるADC変換開始指示
 - クロック生成のための水晶発振回路内蔵
 - I²C EEPROMから単独ブート可能
- ▶ 16ピンTSSOPパッケージで小型

性能

- ▶ 超低消費電流
 - 395 μ A @ $f_s = 500$ kHz
 - 供給電圧+2.7V~+3.6V
- ▶ 復調帯域幅 30 kHz
- ▶ 位相検出感度0.009°
- ▶ 最大サンプルレート1 MHz





想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

検出誤差源を排除する

ナビゲーションしていきましょう！

- ▶ Question: 低レベル電気量計測で注意すべき誤差要素は？
- ▶ Answer: 何を計測するかで異なります！
 - それぞれの電気量ごとで異なる壁があります





想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

検出誤差源を排除する 高抵抗／低抵抗の計測 テクニック

抵抗量の計測方法と注意点

高抵抗

- ▶ 高電圧を加え、流れる電流を測定する
- ▶ 低電流量の計測が難しい（要テクニック）

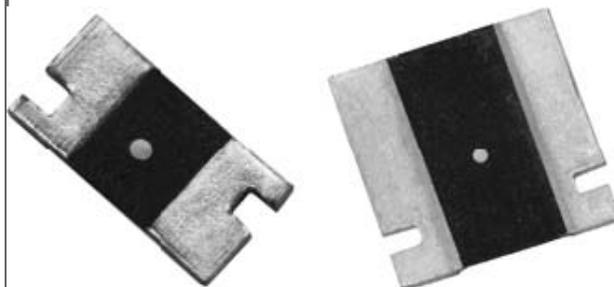
- 絶縁抵抗
- 誘起電流
- リーク電流
- 誘電体吸収
- 寄生容量



低抵抗

- ▶ 大電流を加え、生じる電圧を測定する
- ▶ 低電圧量の計測が難しい（要テクニック）

- リード線の抵抗
- 熱起電力



LOW-VOLTAGE
MEASUREMENTS

LOW-CURRENT
MEASUREMENTS

HIGH-RESISTANCE
MEASUREMENTS

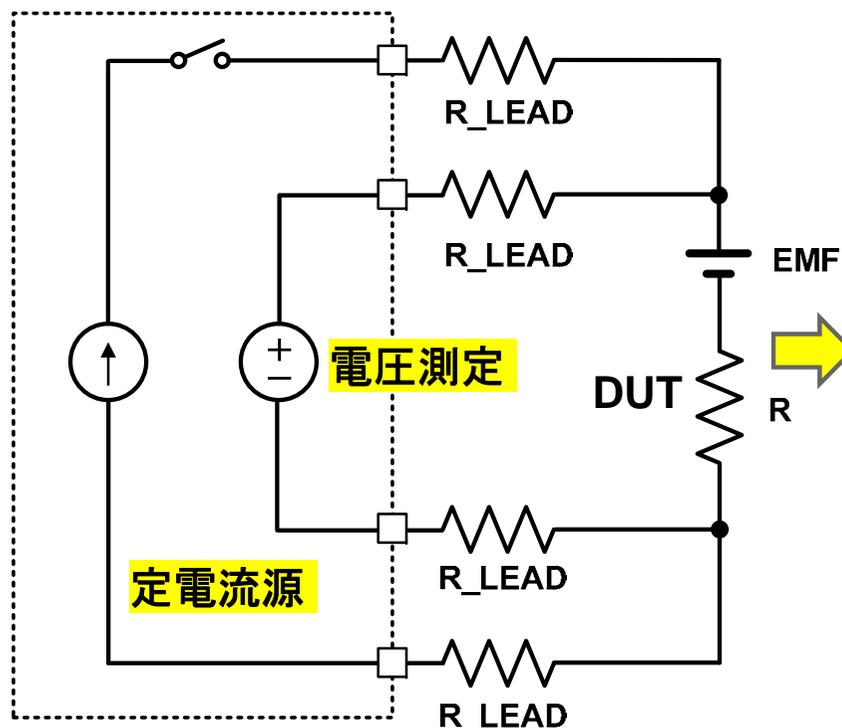
LOW-RESISTANCE
MEASUREMENTS

CHARGE
MEASUREMENTS



低抵抗量計測テクニック（4線式計測）

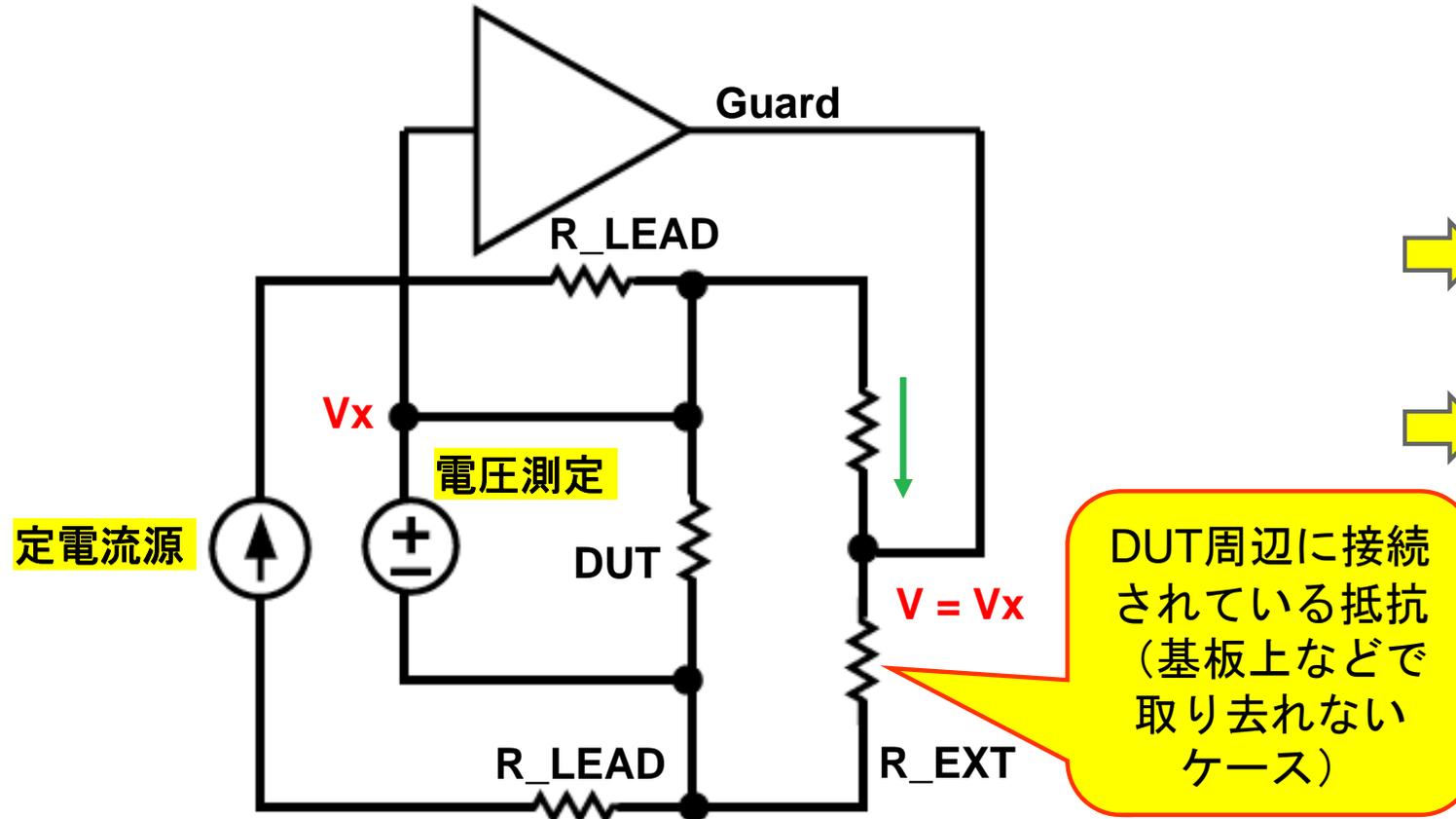
- ▶ 4線式計測はケーブル抵抗と接点抵抗の影響を排除できる
- ▶ 電流源の極性反転か遮断すれば、熱起電力の影響を排除できる
 - Offset Compensated Ohms と呼ばれる
 - 同期検波に近い考え方
- ▶ 計測の手順
 - 測定 $V_1 = I \times R + EMF$
 - 電流源をオフ
 - 測定 $V_2 = EMF$
 - $\frac{V_1 - V_2}{I} = \frac{I \times R + EMF - EMF}{I} = R$



6線式計測（ブートストラップ）

- ▶ 高精度抵抗測定に用いられる
- ▶ ガード技術と等価
- ▶ リーク経路をブートストラップする

ブートストラップとは「自分自身で引き上げる」というような意味

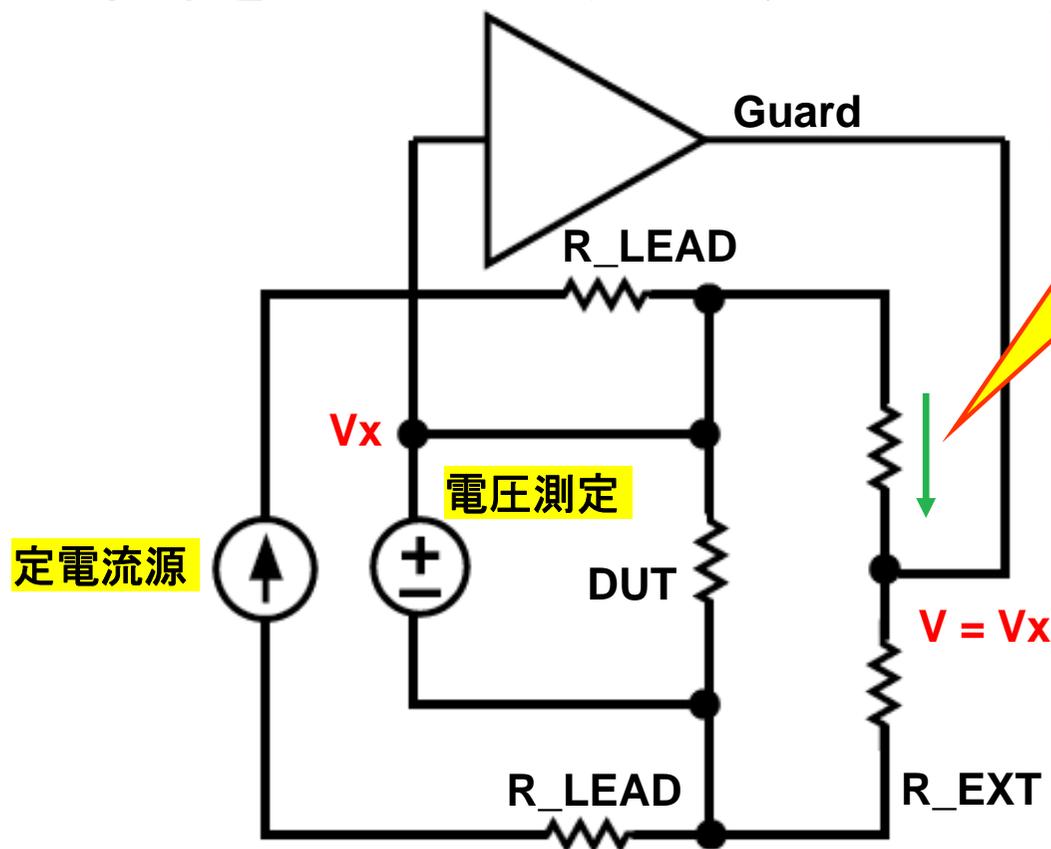


参考文献：Accurate Resistance Measurements Using the 6-Wire Ohms Technique
http://www.tek.com/sites/tek.com/files/media/document/resources/Obtaining_More_Accurate_WP.pdf

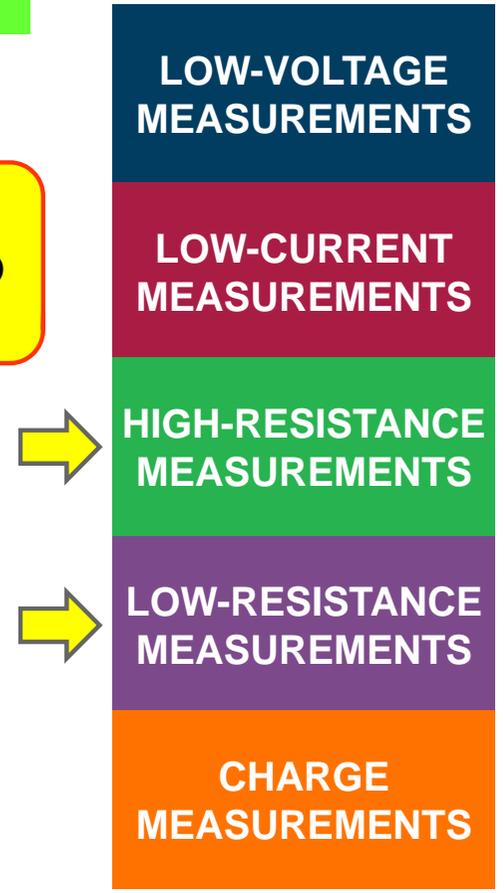
6線式計測（ブートストラップ）

- ▶ 高精度抵抗測定に用いられる
- ▶ ガード技術と等価
- ▶ リーク経路をブートストラップする

ブートストラップとは「自分自身で引き上げる」というような意味



$I_L = 0$ (リーク)
となり R_{EXT} の
影響を無くせる



参考文献 : Accurate Resistance Measurements Using the 6-Wire Ohms Technique
http://www.tek.com/sites/tek.com/files/media/document/resources/Obtaining_More_Accurate_WP.pdf

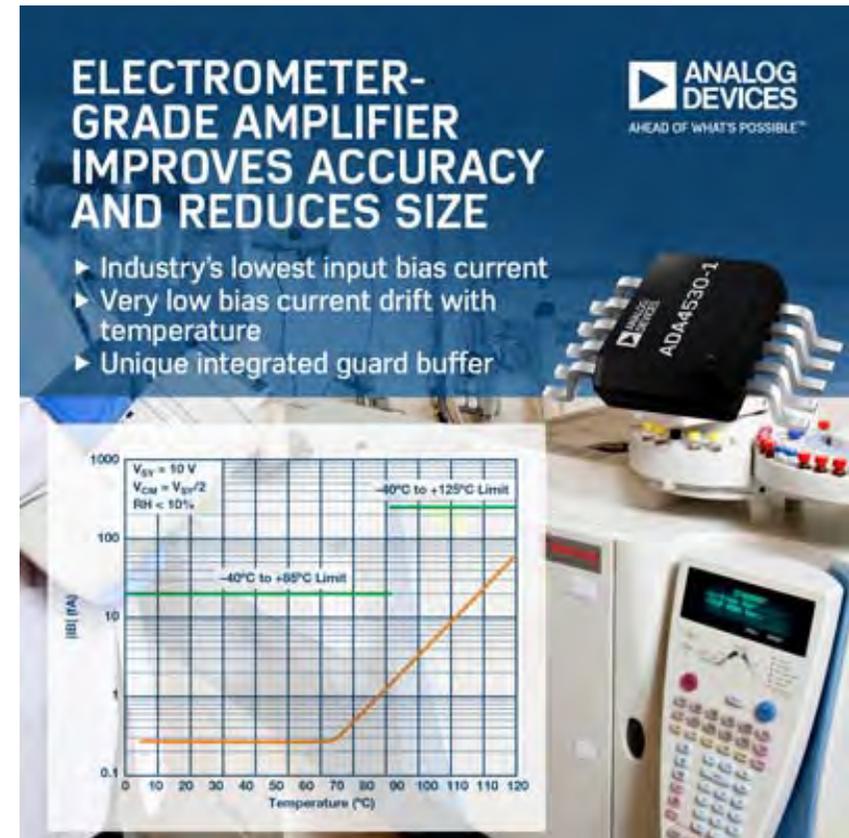
高抵抗／微小電流測定のための： ADA4530－超低バイアス電流エレクトロメータ用アンプ

▶ 超高感度な化学分析の世界を切り開く

- 小型化が可能
- 世界最小の入力バイアス電流
- 出荷テストで温度条件まで保証
- 補償回路を簡略化可能

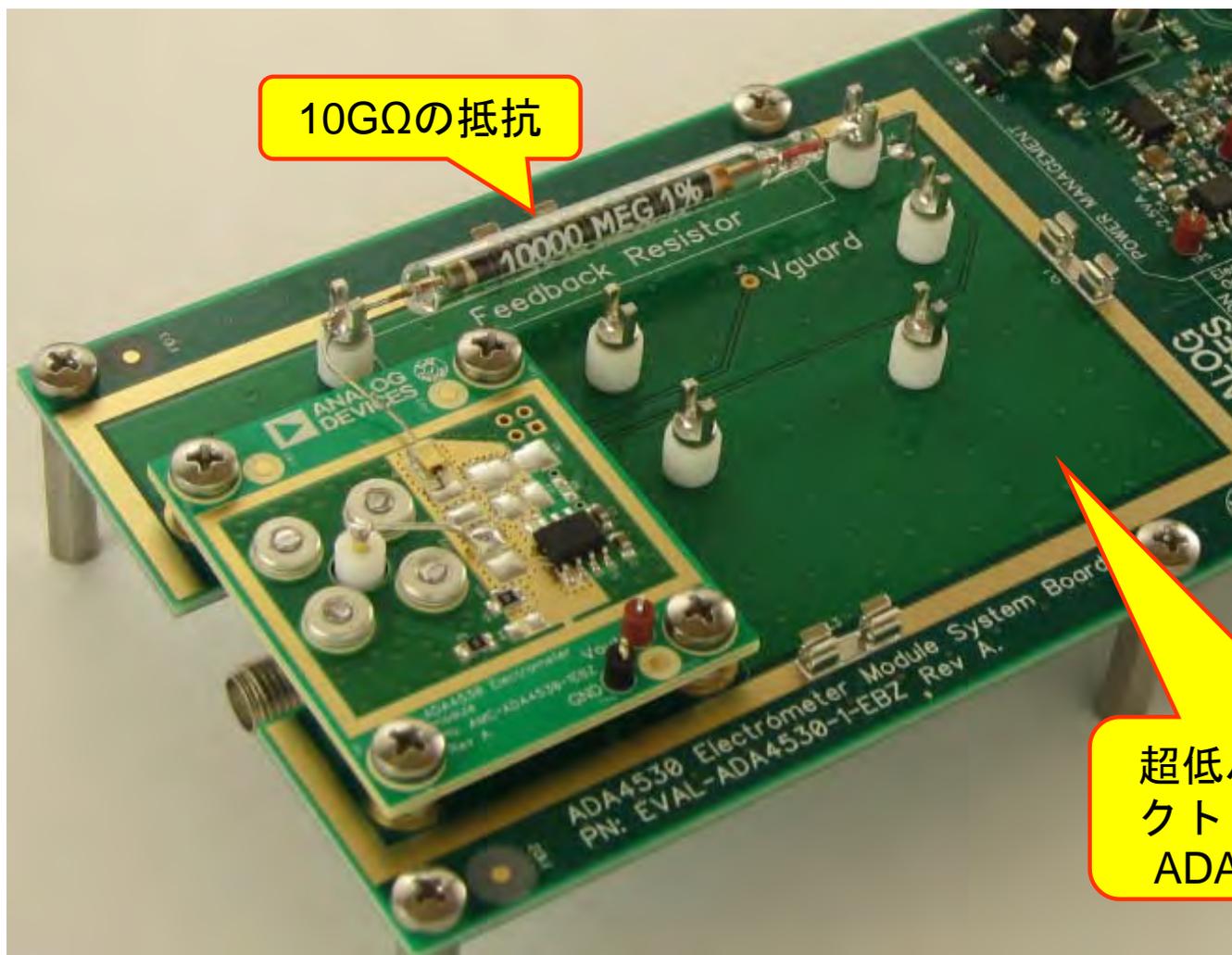
▶ 特徴

- 使いやすい
- ガードリング・ドライバ回路内蔵
- 表面実装
- ピンレイアウトは電源端子から入力端子をアイソレートできるよう最適化
- 高性能な携帯化学分析装置に応用可能
- 現場で研究室並みの計測が可能
- 現場で高精度な校正が可能



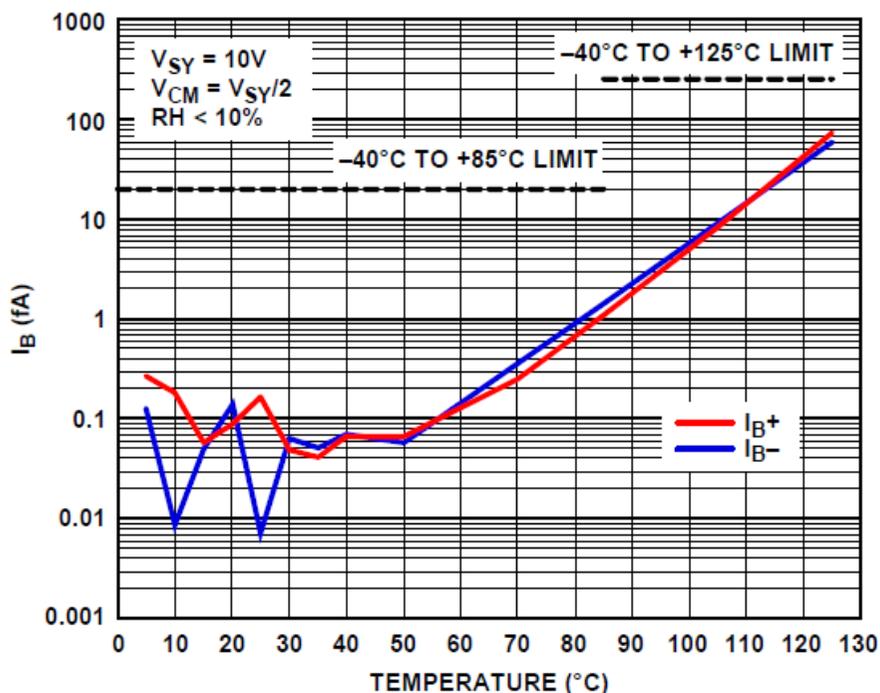
ADA4530で10GΩのDUTを測定する

- ▶ 後編で「誘電体吸収」のスライドとして示す



ADA4530—超低バイアス電流エレクトロメータ用アンプ

- ▶ 超低バイアス電流
 - 20 fA @ 25°C max (全数テスト)
 - 20 fA @ 85°C max
 - 250 fA @ 125°C (全数テスト)



- ▶ ガードリング・ドライバ回路内蔵
- ▶ SOIC 8パッケージ

- ▶ 製品の位置づけ
従来の超低バイアス電流OPアンプ
AD549と比較して
 - 入力バイアス電流が1/40 (20fA vs 800fA @ 85°C)
 - 温度範囲が拡大 (-40 $^{\circ}\text{C}$ ~ 125 $^{\circ}\text{C}$ vs 0 $^{\circ}\text{C}$ ~ 70 $^{\circ}\text{C}$)
 - 実装が簡単 (SOIC vs TO-99)
 - 競合比較でも1/45 (室温)、1/20 (125°C)

ADA4530の設計リソース

- ▶ データシート
- ▶ 評価ボード
 - ADA4530-1R-EBZ
 - 評価ボードユーザガイドUG-865
- ▶ SPICEモデル
- ▶ [EngineerZone](#)
- ▶ アプリケーション・ノート:
[AN-1373: ADA4530-1 を使用したフェムトアンペア・レベルの入力バイアス電流測定](#)
- ▶ ビデオ: [ADA4530-1 Electrometer Op Amp with Integrated Guard Buffer](#)
- ▶ 製品ページ:
<http://www.analog.com/jp/ada4530-1>

