

測定器の性能及び校正

Mar. 3, 2016

ローデ・シュワルツ・ジャパン株式会社
持田 周一



ROHDE & SCHWARZ

測定器の性能及び校正

- | なぜ校正するの？
- | 計量標準について
- | なぜ校正した測定器を使うの？
- | Spectrum Analyzerのメーカー性能試験、性能維持
- | メーカー校正のメリット
- | 較正と校正の違い
- | 電波法における較正について
- | 校正について
- | 測定の不確かさの概要
- | 不確かさの解析・評価の手順
- | 例1. Spectrum Analyzerの不確かさ
- | 例2. Power Meterによる測定の不確かさ
- | まとめ



なぜ校正（較正）するの？

測定器の校正を行わないと…

- ① 顧客と供給者との商取引で、顧客が要求する品質の製品が供給できない
- ② 商品に規格や規制に適合していることの証明ができない
- ③ 公に測定結果を公表する場合など、信頼性がないため結果を疑われてしまう
- ④ 商品の品質を一定レベルで管理できない
- ⑤ 製品の性能を維持できない

その結果…

- ① 品質の良い商品は製造できなく、製造の歩留りも悪い
- ② 顧客に損失を与え社会的信頼を失うリスクがある

世界共通の尺度（SI単位にトレーサブル）を持つ標準で校正された測定器を用い、検査および品質管理を行うことが不可欠になっている



計量標準 - 世界共通の尺度 -

メートル条約により国際単位系 (SI) を確立し、計量標準における単位の統一が図られる

より統一的で合理的な
単位系への進化

長さ(m)



光周波数コム

電流(A)



量子化ホール
抵抗標準(R)

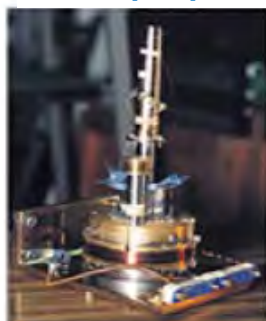
ジョセフソン効果
電圧標準(V)

物質質量(mol)



認証標準物質

光度(cd)



極低温電力置換放射計
受光部分

質量(kg)



キログラム原器

時間(s)



原子泉方式セシウム
周波数標準器

熱力学温度(K)



水の三重点セル

電気分野の事実上の標準は、SIで定義される電流のアンペアAでなく、基礎物理定数に基礎を置く量子標準から導かれるジョセフソン効果による電圧のボルトV、量子ホール抵抗によるオームΩによって標準が設定されている。



なぜ校正（較正）した測定器を使うの？

測定器の性能・特性は変化します！！

① 経年変化で測定器の特性は変化します

- ✓ 内部基準周波数確度
- ✓ 絶対レベル確度
- ✓ 周波数応答確度

スペクトラ
ム・アナライ
ザでは…

② 使用状況により特性は変化します！！

- ✓ 使用環境 . . . 室内 / 屋外 による温湿度の変化
- ✓ 使用頻度 . . . RFコネクタの磨耗による勘合状態の変化
- ✓ 機器の扱い . . . RFコネクタの締め方や持ち運び上の取り扱い

測定器の性能維持には、調整が可能なメーカー校正が必須！
メーカー推奨校正周期による校正で安全・安心な品質管理！



Spectrum Analyzer のメーカ性能試験

例) R社 / Model : FSV

校正項目

- ① Reference frequency uncertainty
- ② Immunity to interference
- ③ Resolution bandwidths
- ④ Bandwidth switching level uncertainty
- ⑤ Spurious response
- ⑥ Displayed average noise level
- ⑦ Absolute level uncertainty and frequency response
- ⑧ Display nonlinearity
- ⑨ Attenuator switching uncertainty
- ⑩ Phase Noise
- 11 VSWR at RF input

仕様値を外れた場合は、調整または修理 → 性能回復 → 再試験



Spectrum Analyzer の性能維持

メーカーでは、経年変化により特性が変化し性能規格値から外れてしまう恐れのある項目については、性能維持の観点から一定周期による調整が必要のため、推奨校正周期を設定しています

Reference frequency, internal		
Accuracy		(time since last adjustment × aging rate) + temperature drift + calibration accuracy
Aging per year	standard	1×10^{-9}
	with R&S®FSV-B4 OCXO reference frequency option	1×10^{-7}
	with R&S®FSV-B14 ultra-high precision reference frequency option	4×10^{-9}
Level measurement uncertainty		
Absolute level uncertainty at 64 MHz	RBW = 10 kHz, level -10 dBm, reference level -10 dBm, RF attenuation 10 dB	
	+20 °C to +30 °C	< 0.2 dB ($\sigma = 0.07$ dB)
	0 °C to +50 °C	< 0.35 dB ($\sigma = 0.12$ dB)
Frequency response referenced to 64 MHz	DC coupling, RF attenuation 10 dB, 20 dB, 30 dB, 40 dB, RF preamplifier = off, +20 °C to +30 °C	
	9 kHz ≤ f < 10 MHz	< 0.5 dB ($\sigma = 0.17$ dB)
	10 MHz ≤ f < 3.6 GHz	< 0.3 dB ($\sigma = 0.1$ dB)
	3.6 GHz ≤ f < 7 GHz	< 0.5 dB ($\sigma = 0.17$ dB)
	7 GHz ≤ f < 13.6 GHz, span < 1 GHz	< 1.5 dB ($\sigma = 0.5$ dB)

メーカー推奨校正周期 :

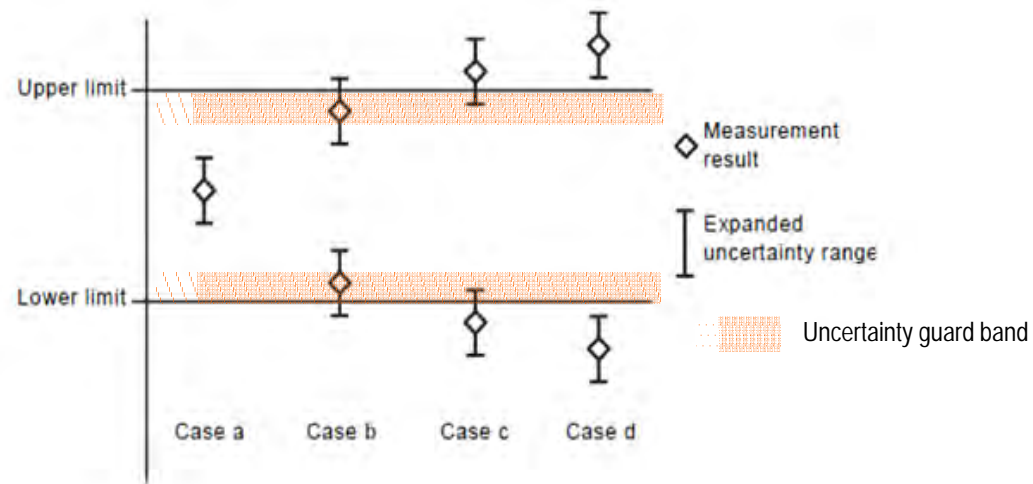
- ✓ Spectrum Analyzer **12** months
- ✓ Signal Generator **36** months
- ✓ Power Sensor **24** months
- ✓ Radio Communication tester **12** or **24** months



メーカー校正のメリット - R社の場合 -

安定した測定品質の維持が可能 ➡ 性能不良によるリスク低減

- ① 製品の性能試験による校正で、機器をトータル・チェック
- ② メーカーならではの調整（補正）が可能
- ③ 校正値にISO/IEC 17025に準じた不確かさ付き
- ④ 不確かさガードバンド（Uncertainty guard band）評価付き



UGB評価の結果、Case bは調整が必要になる

校正と較正の違い

法令上の行為として行われる**校正**は計量法に基づくものであり、**較正**は電波法に基づくものである。

較正とは 電波法が制定された当時は、測定器も単純なつくりであり「ズレがわかったら、ついでに調整しておこう」の考えの基に調整が行われたのではないか？

➡ 較正には調整が含まれる

校正とは 時代の変化とともに、測定器は複雑化し、測定器の中を開いてしまうと製造メーカーの保証が外れてしまうということもあり、精密な測定器の調整は行われることが少なくなっていた計量法は比較的新しい法律であり、調整は行わないとした

➡ 校正には調整を含まない

実際の行為は、

較正

=

校正

電波法における較正

測定器の較正に関わる規定（電波法第24条の二 第4項 第二号）

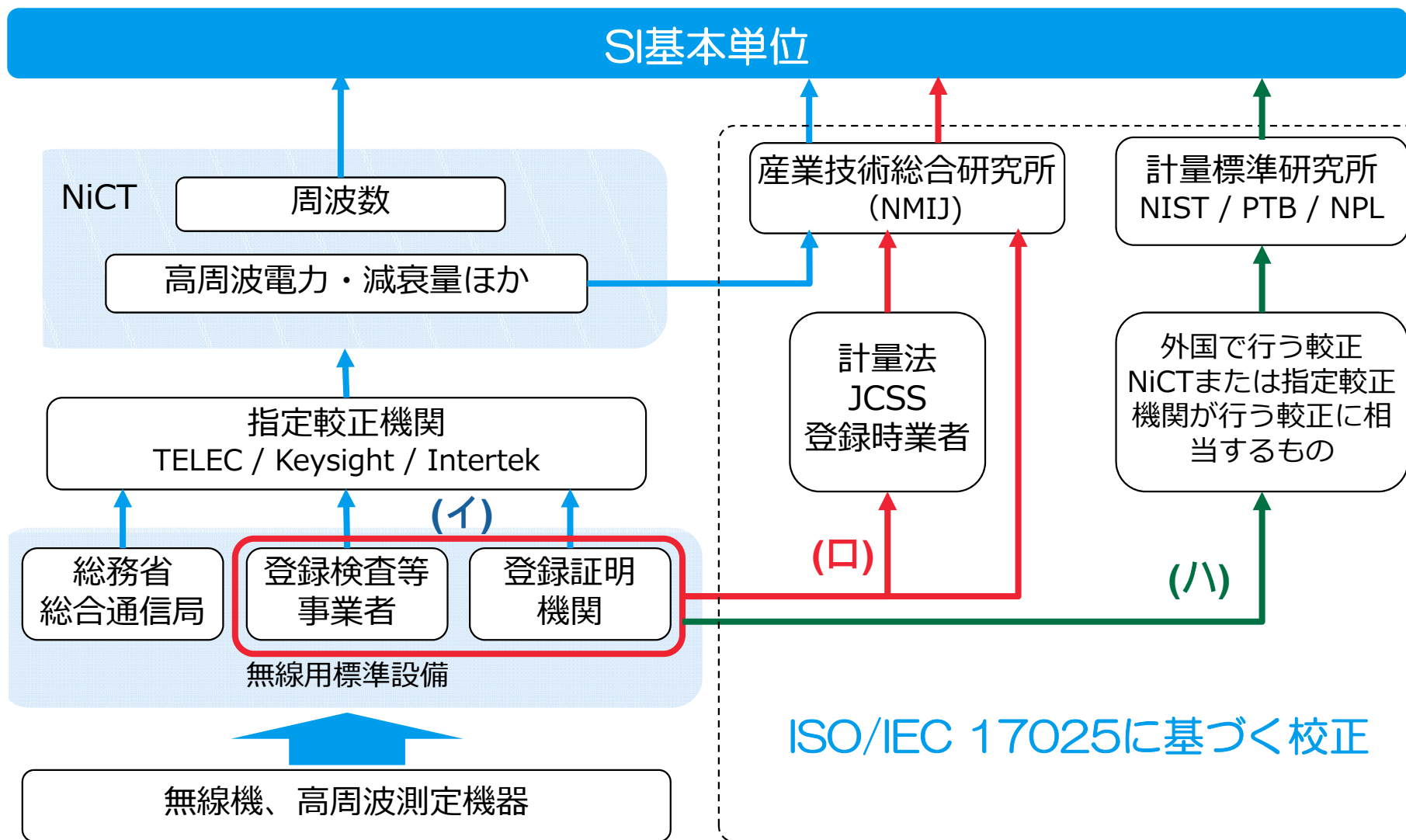
測定器の較正等に関する条件は、電波法の別表第二に掲げる測定器その他の設備であって、次のいずれかに掲げる較正等を受けたものを使用して無線設備の点検を行うものであることとしている

- イ) 通信総合研究所(NICT)または指定較正機関が行う較正
 - ロ) 計量法の規定に基づく校正（JCSS校正）
 - ハ) 外国において行う較正であって通信総合研究所または指定較正機関が行う較正に相当するもの
- 二) イ～ハまでのいずれかに掲げる較正等を受けたものを用いて行う較正等

別表第二

	電波法名称
1	周波数計
2	スペクトル分析器
3	電界強度測定器
4	高周波電力計
5	電圧電流計
6	標準信号発生器

電波法における較正のトレーサビリティ



校正

I 校正 (calibration) とは

計器又は測定系の示す値、若しくは実量器又は標準物質の表す値と、標準によって実現される値との間の関係を確定する一連の作業

JIS Z 8103:2000 のJIS計測用語より

備考：

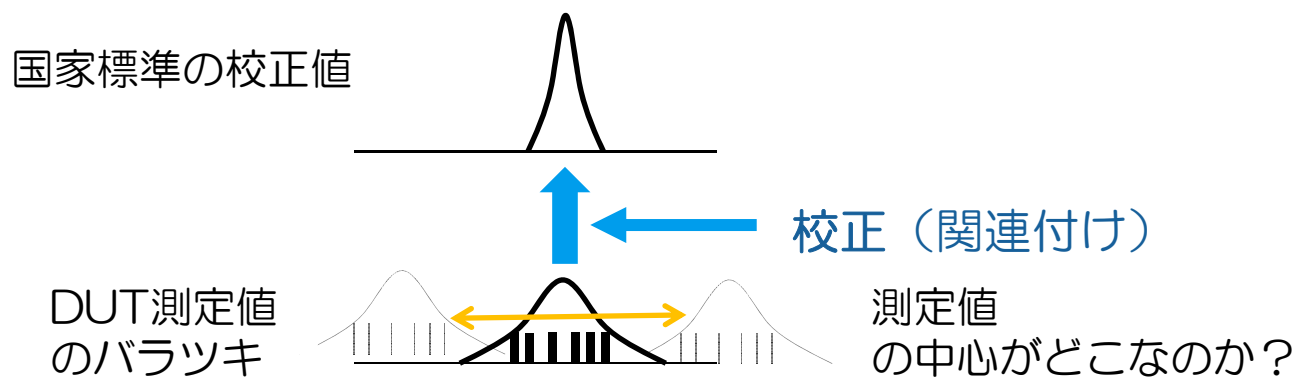
校正には、計器を調整して誤差を修正することは含まない。

計測のトレーサビリティ

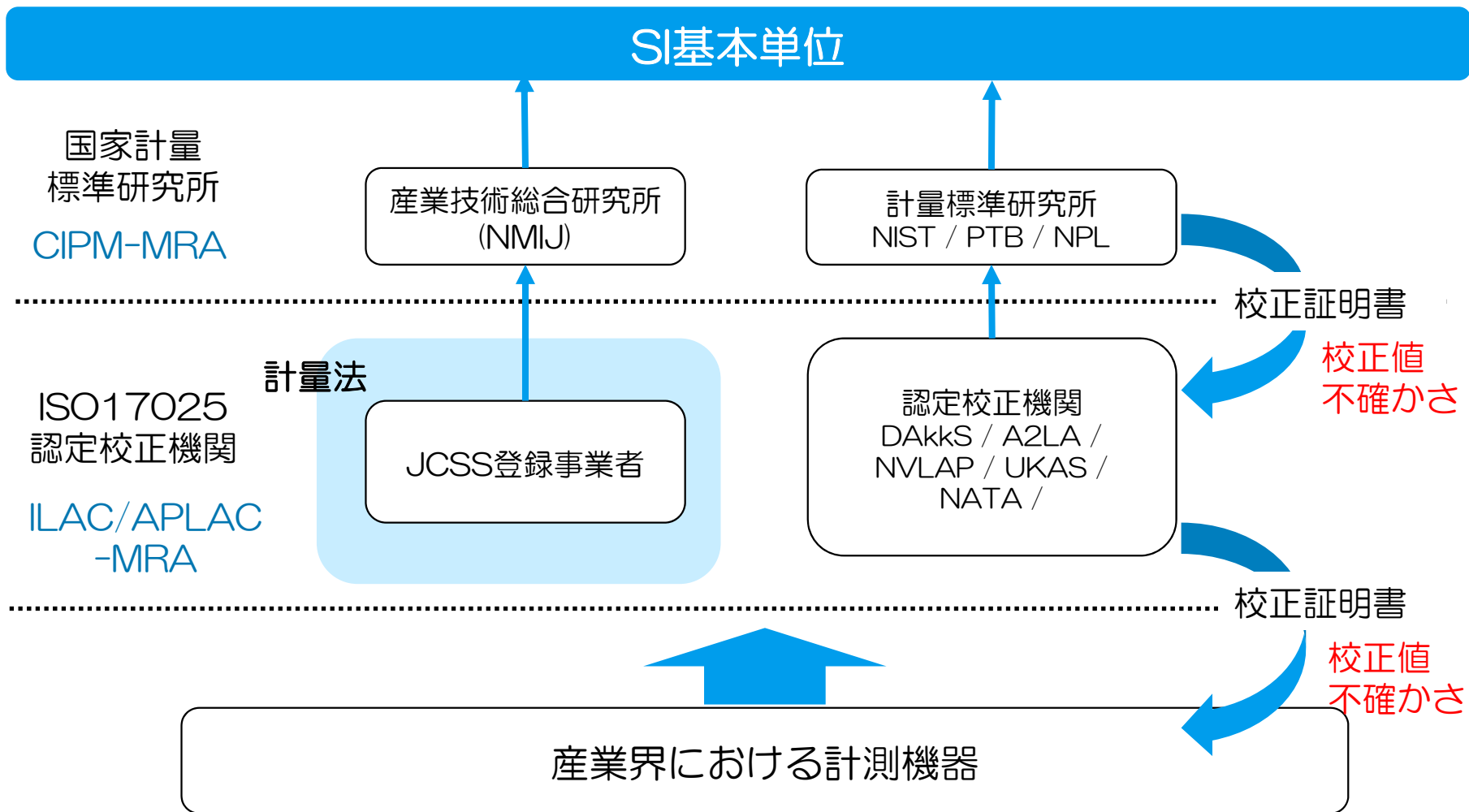
I トレーサビリティとは

不確かさがすべて表記された切れ目のない比較の連鎖
によって、決められた基準に結びつけられ得る測定結果
又は標準の値の性質。
基準は通常、国家標準又は国際標準である。

JIS Z 8103:2000 のJIS計測用語より



計量標準における校正のトレーサビリティ



国際標準・国家標準との同等性が証明される



「測定の不確かさ」とは

不確かさとは、測定結果に付随した、合理的に測定量に結びつけられ得る値の**ばらつき**を特徴づけるパラメータ

国際計量基本用語集より

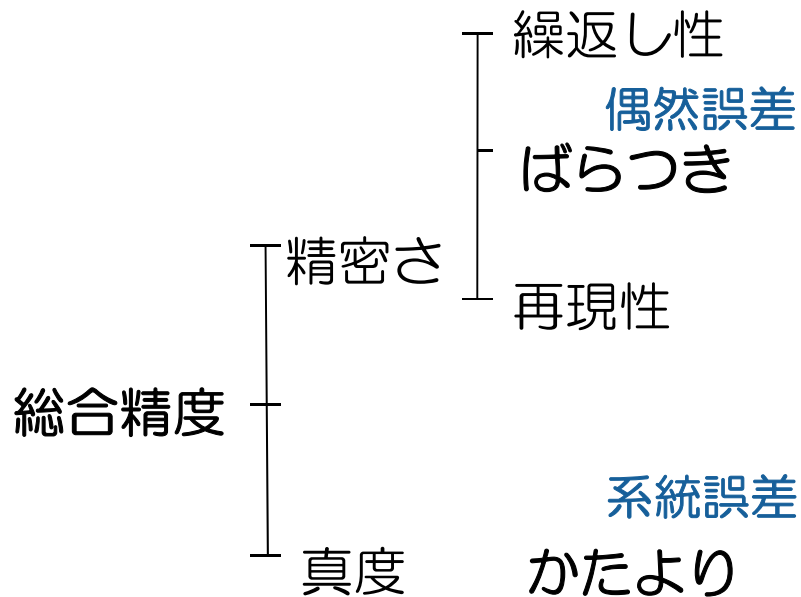
不確かさを数量化する2つ数

- **区間** : ばらつきの幅（大きさ）
- **信頼水準** : 真の値がこの区間に入っている確率（%で表現）

不確かさは、電気、物理、機械、化学などあらゆる計測の分野で定量的に評価・表現できるパラメータとして用いられている

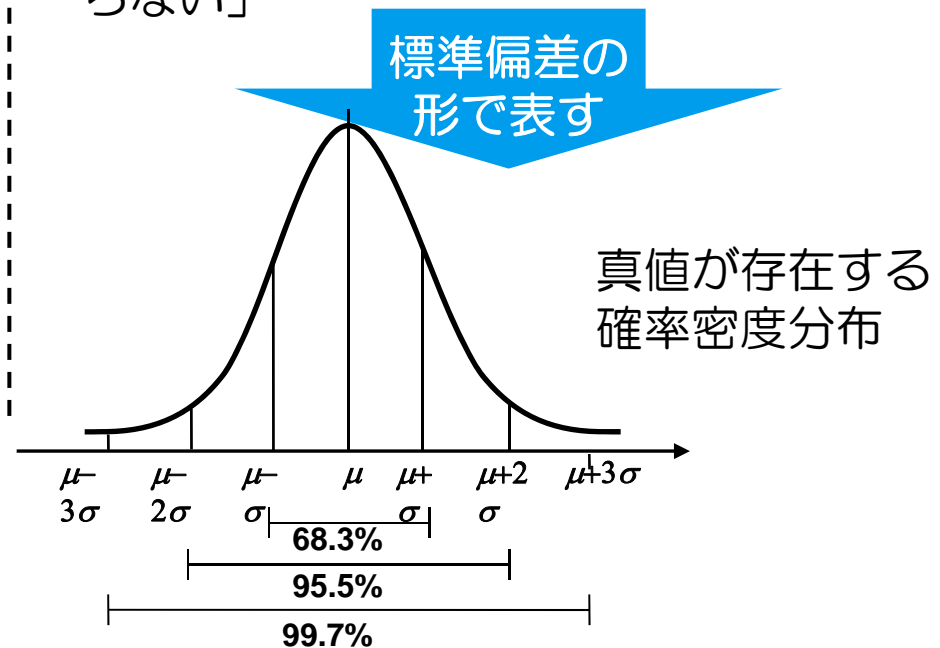
なぜ「不確かさ」を用いるの？

従来の精度・誤差



不確かさ表現

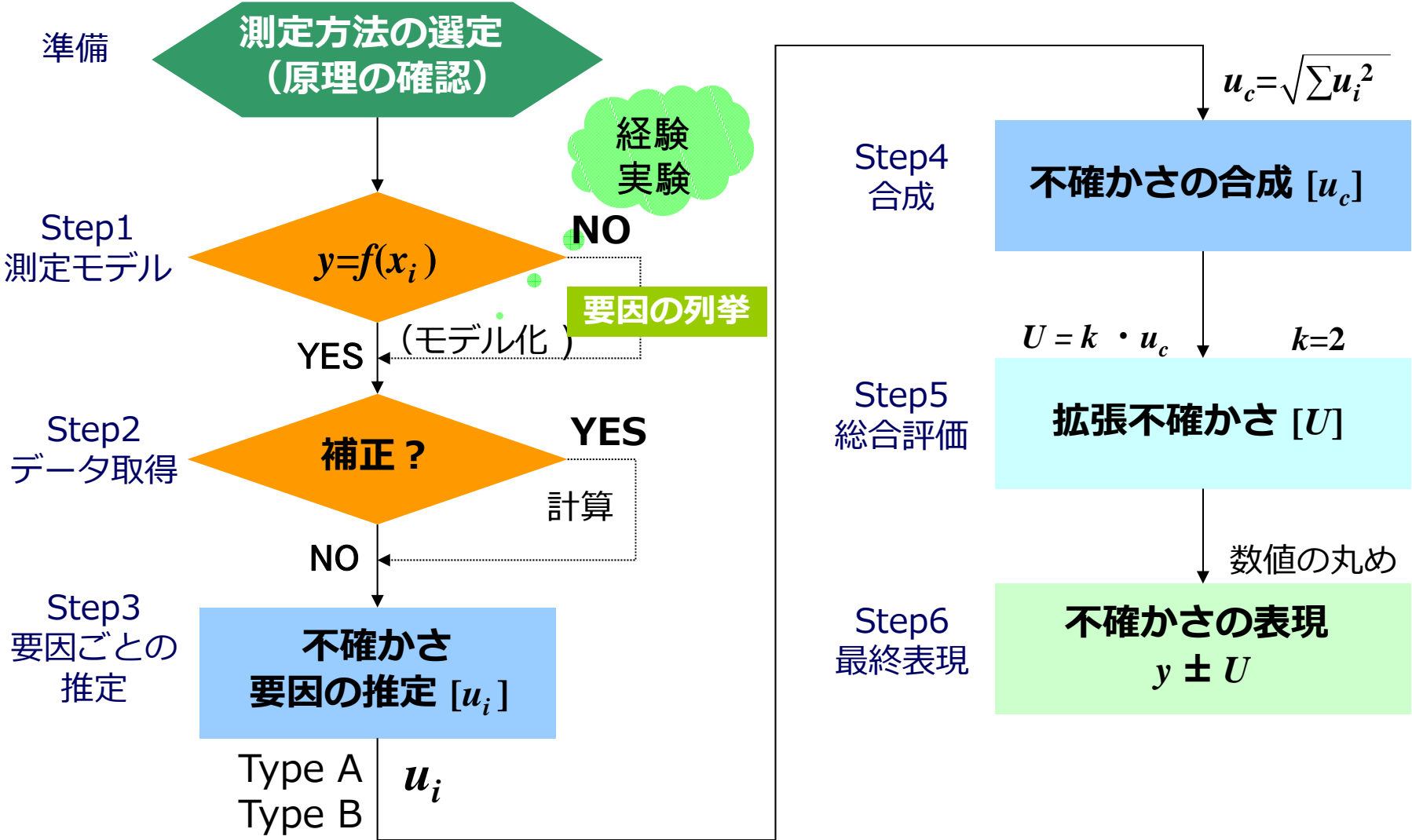
従来の「系統誤差」および「偶然誤差」は「真値」分かることを前提
不確かさの表現では、「誤差(error)は真値がわからないのと同じようにわからない」



計測における不確かさ要因

- ✓ 測定量の定義が不完全・あいまいである場合
- ✓ 測定システムにおける構成が不完全であることを認識していない場合
- ✓ 測定に対する環境条件の影響について正しくわからない、または未知のものである場合
- ✓ 計量標準が不正確な値による場合
- ✓ 外部から得られる測定器の規格値やデータ補正の定数、およびパラメータの不正確な値によるもの
- ✓ 測定方法や使用機器に対する理解が不十分である場合
- ✓ 同一条件で測定しているつもりが、同一条件ではなく、測定ごとに変動していることを気づかない場合
- ✓ アナログ計測器の測定値の読み取りに対し測定者によるかたよりのばらつき
- ✓ 測定者の経験・知識など能力によるもの

不確かさ解析・評価の流れ



準備 - 測定の計画および留意点 -

測定方法、測定条件、与えられる標準の不確かさなど考慮し
測定の計画を立案

- ① どれくらいの不確かさが必要なのか
- ② 測定にかけられるコスト
時間・必要な測定器など
- ③ 測定条件を変化させた測定結果は必要なのか
- ④ 最終結果に与える影響が大きい要因をピックアップ
- ⑤ 系統効果による「かたより」の扱い
補正する or 不確かさに組み込む
- ⑥ 参照標準器の校正周期および経年変化による影響
- ⑦ 参照標準器のリスク管理のための中間チェック



測定モデル ～ 要因ごとの推定

① 測定のモデル化

測定における不確かさの要因をあげ、不確かさをモデル化

測定量 Y の測定結果（推定値）を y とすると、 y は他の N 個の入力量 X_N の推定値 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_N$ から次の関数関係 f により決定される

$$y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_N)$$

② 標準不確かさの要因と大きさの見積り

Type A の評価： 測定データから標準偏差によるばらつきを求める
← 統計を用いた不確かさの推定

Type B の評価： Aタイプ以外の情報から標準偏差に相当するばらつきを求める
← 他の全ての情報から不確かさの推定
(校正証明書、製造者仕様)

合成 ～ 総合評価

① 合成標準不確かさの算出

入力量に相関がないなど多くの場合は、測定値 y の合成標準不確かさ $u_c(y)$ は次式で表す

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n u_i^2(y)}$$

すなわち、合成標準不確かさは **Type A** と **Type B** の標準不確かさを 2乗和の平方根で表す

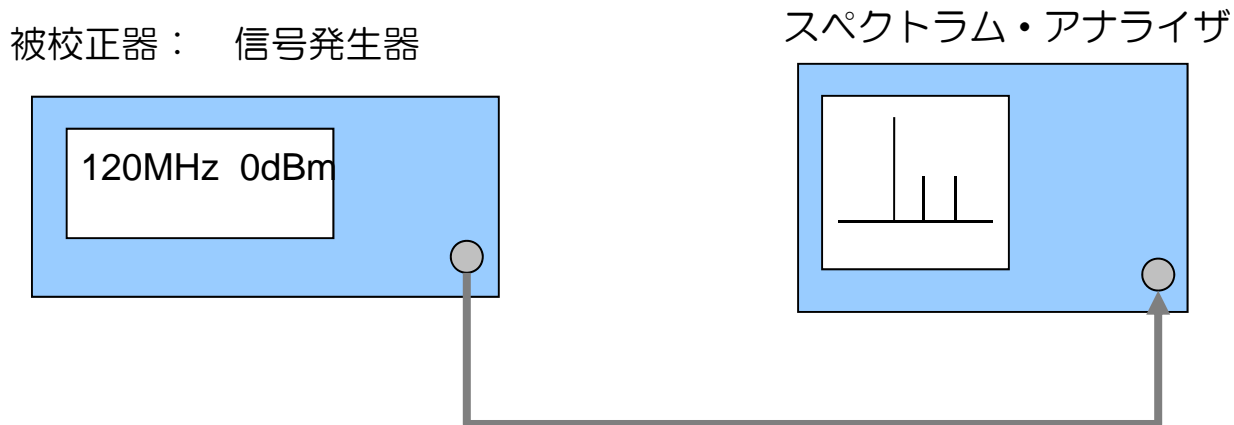
② 拡張不確かさの決定

拡張不確かさ U は、合成標準不確かさ $u_c(y)$ に**包含係数 k** を掛けて求める

$$U = k * u_c(y)$$

- ✓ 包含係数 $k=2$ を採用する場合
 - 有効自由度 v_{eff} が10以上であって、GUM付属書G.6.6の条件を満たしている
 - Type A 評価の繰り返し観測数が10 以上のとき
- ✓ 包含係数を有効自由度から求める場合
 - 算出した有効自由度からTINVの関数を用いる

例 1 : Spectrum Analyzer の不確かさ

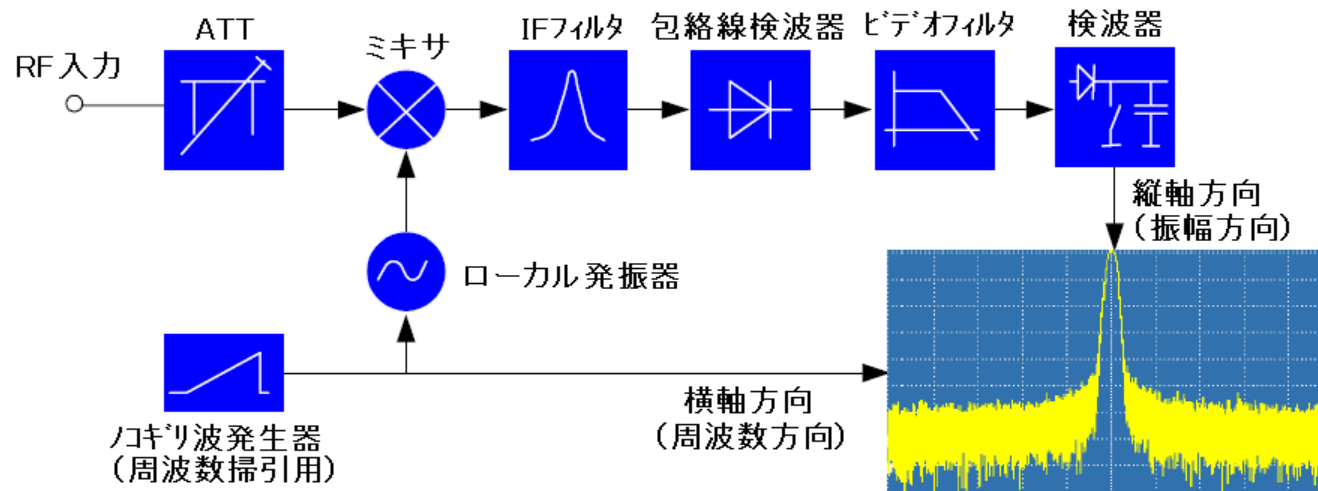


電力を測定する時の不確かさは、

- ① スペクトラム・アナライザの固有の測定不確かさ
- ② 被校正器に起因するエラー
例. RFインタフェースのインピーダンス・ミスマッチ
- ③ 信号対雑音比に起因するエラー
- ④ 測定アクセサリ（ケーブル、アダプタ）に起因するエラー

① 固有の測定不確かさ

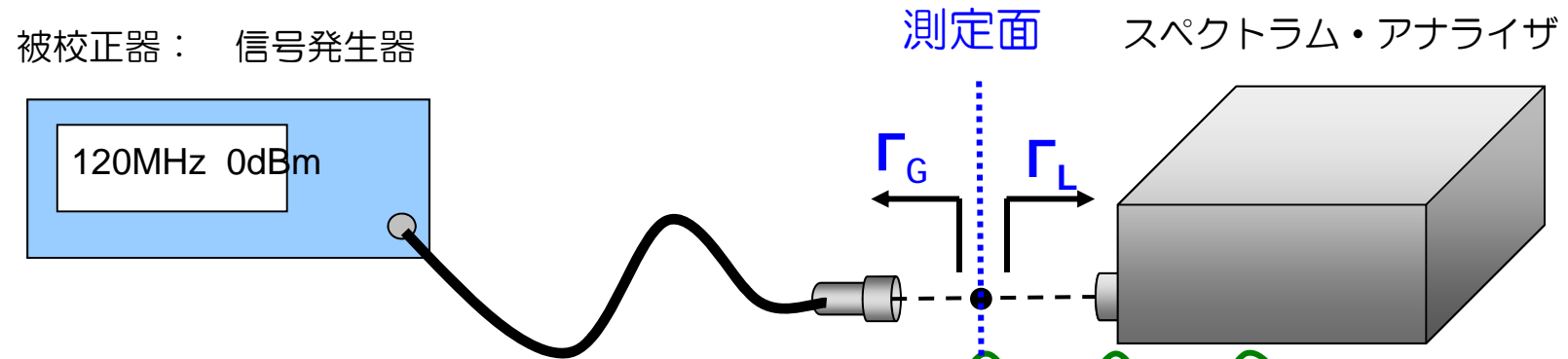
ブロック図



レベル・エラーの不確かさ要因

- ✓ Absolute error
- ✓ Frequency response of the RF input
- ✓ Error of the input attenuator switching
- ✓ Error of the IF gain setting
- ✓ Error of the display linearity
- ✓ Error of bandwidth switching
- ✓ Error of Resolution Bandwidth

② 被校正器に起因するエラー



不確かさの範囲：

$$M = |1 - \Gamma_G \cdot \Gamma_L|^2$$

$$|\Gamma_G \Gamma_L| \ll 1$$

$$M = 1 \pm 2|\Gamma_G \Gamma_L|$$

図の測定面は完全に整合しておらず、測定面においてインピーダンス・ミスマッチから生じる不整合不確かさがある

不確かさバジェット・シート

Level Uncertainty Calculation for R&S FSV		
General Calculation		
	specified error	standard uncertainty
Inherent errors		
Absolute error @128 MHz [dB]	0.2	0.12
Frequency response [dB]	0.3	0.17
Input attenuator switching [dB]	0.2	0.12
IF Gain switching [dB]	0	0.00
Display linearity [dB]	0.1	0.06
Bandwidth switching error [dB]	0.1	0.06
Resolution Bandwidth error [%]	3.00	0.08
combined variance		0.07
combined standard uncertainty		0.26
rss error [dB] (95 % confidence level)		0.52
Error due to source mismatch		
VSWR of SA	1.5	0.25
VSWR of DUT	1.5	
combined variance		0.13
combined standard uncertainty		0.36
error including source mismatch (95%)		0.71

このバジェットの利用条件：

- ✓ トレーサビリティの確立
- ✓ メーカーの仕様値の満足
 - 推奨校正周期にてメーカー校正が実施されている

周期的に機器の性能確認が重要！

→ スペクトラム・アナライザ固有の拡張不確かさ

→ 不整合不確かさ (1σ)

→ トータルの拡張不確かさ



参考：Spectrum Analyzer の不確かさ算出

■アプリケーション・ノート

Download 先：

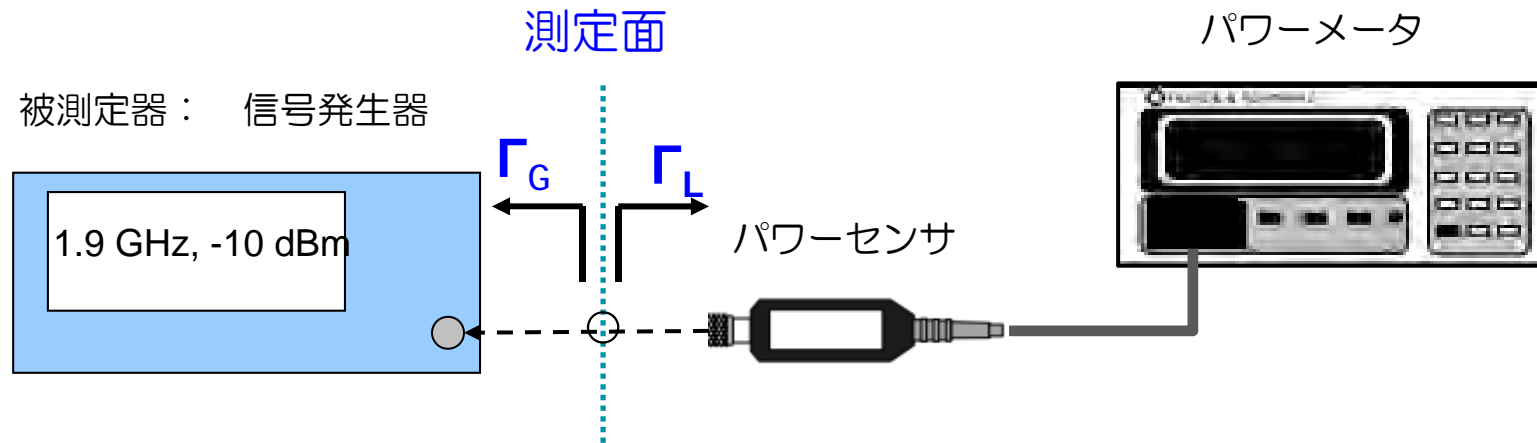
http://www.rohde-schwarz.com/en/applications/level-uncertainty-calculation-for-r-s-fsv-signal-and-spectrum-analyzer-application-note_56280-15478.html

The screenshot shows a navigation bar with 'Home' and 'Application Note' tabs. Below it is a 'History' section with 'Level Uncertainty Calculation...'. The main heading is '1EF63: Level Uncertainty Calculation for R&S®FSV Signal and Spectrum Analyzer'. A descriptive paragraph follows: 'This application note helps to understand the measurement uncertainty calculation for a modern spectrum analyzer and provides a tool to calculate the total measurement uncertainty for different measurements.' Below this is a table with columns: Name, Type, Language, Version, Date, and Size. The table lists two files: '1EF63_2E.pdf' (Application Note, English, Version 2, Date 21.04.2010, Size 216 kB) and '1EF63_FSV_Level_Uncertainty.xls' (Application Note File, English, Version 1, Date 25.01.2010, Size 35 kB). At the bottom left is a '+ Share this page' button, and at the bottom right is a 'Stay informed:' section with icons for YouTube, Twitter, Facebook, Google+, LinkedIn, and RSS.

Name	Type	Language	Version	Date	Size
▶ 1EF63_2E.pdf	Application Note	English	2	21.04.2010	216 kB
▶ 1EF63_FSV_Level_Uncertainty.xls	Application Note File	English	1	25.01.2010	35 kB



例 2 : Power Meter による測定の不確かさ



電力を測定する時の不確かさは、

- ✓ Mismatch uncertainty
- ✓ Calibration uncertainty
- ✓ Linearity uncertainty
- ✓ Temperature effect
- ✓ Zero offset
- ✓ Display noise
- ✓ Base unit

不確かさバジェット・シート

測定例：高周波電力 -10 dBm @1.9 GHz

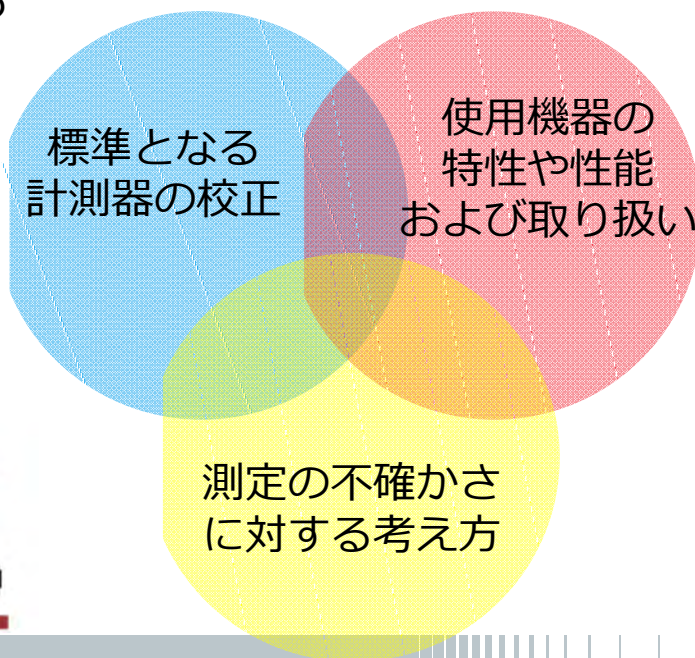
Influencing parameter	Specification		Standard uncertainty
	Value	Weighting /distribution	ui
Mismatch uncertainty ($SWR_{source} = 1.2$)	0.038 dB	1.4 σ /u	0.027 dB
Calibration uncertainty	0.050 dB	2 σ /normal	0.025 dB
Linearity uncertainty	0.020 dB	2 σ /normal	0.010 dB
Temperature effect (18°C to 28°C)	0.005 dB	1 σ	0.005 dB
Zero offset	60 nW	2 σ /normal	0.001 dB
Display noise (filter 7)	4 x 22 nW	2 σ /normal	0.002 dB
NRVS base unit	0.017 dB	1.7 σ /square	0.010 dB
Combined standard uncertainty	$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n u_i^2(y)}$		0.040 dB
Expanded uncertainty (95 % confidence level)	$U = 2 * u_c(y)$		0.080 dB



まとめ

- ✓ 国家標準あるいは、国際標準にトレーサビリティのある計測器を用いる
- ✓ 測定に用いる計測器の校正は、機器の性能が満足していることが確認できる内容でなければならない
- ✓ 測定においては、何が測定エラーの要因になるのか考え、可能であればその要因を除く努力が必要
- ✓ 測定値が妥当であるか？用いる計測器の取り扱いを理解し、計測のアプリケーションに最適な測定方法を用い測定する

信頼性のある測定結果を得るためには、
要員の知識・能力が重要！



ご静聴ありがとうございました

