


**Measurements International**  
Membership in Our Sectors, Accuracy in Our Business™

**抵抗 1μΩ から 1TΩ での校正と比率精度の検証**  
**Calibration and Ratio Accuracy Verification from 1μΩ to 1TΩ**  
Duane Brown

Measurements International, Prescott, Ontario Canada

**概要:**

1μΩ から 1TΩ の間の抵抗計測の技術を二つ説明します。併せて直流電流コンパレータ (DCC) 技術に関連する不確かさと新技術 AccuBridge™ (ADCC) を 1μΩ から 100kΩ の範囲で説明します。10kΩ 以上は、ハイパー電圧分圧器 (BVD) の原理が使います。活用範囲は 10kΩ ~ 1TΩ までです。

更に、ADCC と BVD の計測での比率検証の方法を、トレーサビリティ確保して説明します。

MI が提案する ADCC と BVD の比率検証の方法は、すべての抵抗比で、補正值を設定する必要がなく、インターチェンジ技術で実施できます。

[www.mintl.com](http://www.mintl.com)

© 2010 Measurements International Prescott, Ontario Canada


**Measurements International**  
Membership in Our Sectors, Accuracy in Our Business™

**最初に**

2009年 以前 - 抵抗比の計測は次の二つの方法が活用されていました:

- 1) 2個、あるいはそれ以上の抵抗器を直列に接続して計測電流を流し、抵抗器に発生する電圧を計測し電圧比を求める。
- 2) 一組の抵抗器に既知の値の電流比で計測電流を流し、抵抗器に発生する電圧値を同じにする。

[www.mintl.com](http://www.mintl.com)

© 2010 Measurements International Prescott, Ontario Canada


**Measurements International**  
Membership in Our Sectors, Accuracy in Our Business™

**最初の技術説明**

この技術の適応には、既存のポテンショメータを活用するか、あるいは DVM を活用して発生電圧を計測します。

- 1) 計測精度を確保するには相応の計測装置を準備する必要があります。それで一次標準研等の限定した条件で有用になっています。
- 2) 安定した電圧源が必要で、連続して計測を行います。電圧計測での線形性、レンジが変化した時の計測性能が重要になります。

[www.mintl.com](http://www.mintl.com)

© 2010 Measurements International Prescott, Ontario Canada


**Measurements International**  
Membership in Our Sectors, Accuracy in Our Business™

**二番目の技術**

二番目の技術例は直流電流コンパレータ (DCC) ブリッジの活用です。



I<sub>x</sub> = current source I<sub>s</sub> = voltage source

$$\frac{I_x}{I_s} = \frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$$

$$\frac{I_x}{I_s} = \frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$$

マスター抵抗 R<sub>x</sub> とスレーブ抵抗 R<sub>s</sub> の関係を求めます。抵抗値は 1μΩ から 10kΩ まで計測可能です。

[www.mintl.com](http://www.mintl.com)

© 2010 Measurements International Prescott, Ontario Canada

**DCC ノイズの最低値**

ノイズの最低値は 0 アンペア時の検出器での、電流ノイズの値で決まります。

$0.2 \times 10^{-6} \text{ AT} / \text{Is} \times \text{Ns}$   
 $0.25 \text{ uat or } 0.25 \text{ ppm}$

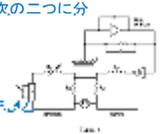
フィードバック回路で変調周波数が機能している部分からの直接の、電流ノイズを作り、マスター電流源とスレーブ電流源の間で反転している回路での電流ミスマッチがヒステリシス誤差を発生させます。

[www.mintl.com](http://www.mintl.com)

© 2010 Measurements International Prescott, Ontario Canada

**DCC 誤差の発生解析**

- DCCの精度に影響を与える誤差要因には次の二つに分けることができます。
  1. ゲイン誤差
  2. ヒステリシス誤差
- ゲインの誤差は
  1. 磁束から電圧値への変換(ピーク検出器)で現れて、
    - 感度 = 100 uat = 100 mV
    - 信号の変調周波数成分  
2 to 3 uat ( 0.2 to 0.3 ppm)
    - 線形性能 = フルスケールの0.01 ppm (10:1 Ratio)
  2. 誤差は the partial turns (比率1以下)の特性に従っています。
    - Partial turns (比率1以下) 誤差の特性は線形性ではありません。




[www.mintl.com](http://www.mintl.com)

© 2010 Measurements International Prescott, Ontario Canada

**ヒステリシス誤差**

- DCCシールド内での電流変化により発生する残存磁束により生まれます。
- 磁束の漏れ、検出器コアの周りにある電磁シールドから発生しています。
- ヒステリシス誤差は線形特性はありません。
- ヒステリシス誤差は計測値が大きくなると、標準偏差、不確かさの値も大きくなる傾向があります。

[www.mintl.com](http://www.mintl.com)

© 2010 Measurements International Prescott, Ontario Canada

**DCC 比率検証**

1:1の比率で、この技術の検証はインターチェンジ技術を活用して行います。

$$r_e = (R_a - \frac{1}{R_b}) / 2$$

$R_a$  と  $R_b$  は各々、正方向、逆方向の比率計測値を表しています。

ここでは、コアの巻き数は同じ、計測電流も同じです。  
 ( $N_x = N_s$  and  $I_x = I_s$ )

さらに、この DCC 技術が有効な比率は1:1から10:1の間だけでした。何年もの間、DCCの課題でした。

[www.mintl.com](http://www.mintl.com)

© 2010 Measurements International Prescott, Ontario Canada


**Measurements International**  
Membership of the Society, Accuracy of the Business™

## DCC 10:1 比率計測

- 以前は、インターチェンジ技術は精度確認のため活用することはできませんでした。
- 10:1の比率計測を1:10に逆転させると、電流巻線(AT)の感度は1/100に引き下がります。
  - 10:1 Ratio = 40 aT
  - 1:10 Ratio = 0.4 aT
  - この1:10のインターチェンジエラーは、10:1の計測から0.5~1ppm増加します。
- DCCの比率校正はCCCか、あるいは校正済みの標準抵抗で比率を計測することで、DCCの出力(比率)が規格内であることを検証していました。

[www.mintl.com](http://www.mintl.com)  
© 2010 Measurements International Prescott, Ontario Canada


**Measurements International**  
Membership of the Society, Accuracy of the Business™

## 1:1以上のDCC 比率確認の方法

次の方法で確認することができます:

- 1) CCC
  - 費用と時間の考慮が必要です。
- 2) 絶対精度を保証した標準抵抗器
  - 抵抗比が大きくなるに従い、不確かさも大きく
- 3) ハイモン標準抵抗
  - 不確かさも大きく、消費電力も課題

[www.mintl.com](http://www.mintl.com)  
© 2010 Measurements International Prescott, Ontario Canada


**Measurements International**  
Membership of the Society, Accuracy of the Business™

## 直流電流コンパレータ(DCC) 不確かさ

- 電流ノイズ ( $I_n$ ) =  $0.05 \times 10^{-6} \text{ AT} / I_s \times N_s$  (slave turns)
  - 例えば  $I_x = 1 \text{ mA}$   
 電流ノイズ  $I_n = 0.05 \times 10^{-6} / 10^{-3} \times 800 \text{ turns}$   
 = 0.0625 ppm
- 比率誤差:
  - 比率誤差は、当該ブリッジの比率とブリッジを校正するために使用する計測器の出力差です。
  - 比率誤差 =  $CCC_{\text{RATIO}} - DCC_{\text{RATIO}}$
  - 比率誤差の不確かさ  $UNC =$
  - $RSS (CCC_{\text{UNC}}^2 + DCC_{\text{UNC}}^2 + DCC_{\text{DRIFT}}^2 + \text{Partialum}_{\text{UNC}}^2)$

[www.mintl.com](http://www.mintl.com)  
© 2010 Measurements International Prescott, Ontario Canada


**Measurements International**  
Membership of the Society, Accuracy of the Business™

## DCC 不確かさに要因検討

- マスター電流源の 0.01% 誤差 = 計測比率の0.01 ppm 誤差
- スレーブ電圧源の 0.01% 誤差 = 計測比率の0.01 ppm 誤差
- ナノボルト、電圧検出器の 0.01% 誤差 = 計測比率の0.01 ppm 誤差
- DCCのバーチャルターン(比率1以下の計測回路)の不確かさ (software algorithm)

[www.mintl.com](http://www.mintl.com)  
© 2010 Measurements International Prescott, Ontario Canada

**ヒステリシス誤差**

- DCCシールド内での電流変化により発生する磁束が残ります。
- 磁束の漏れるのは検出器コアの周りにある電磁シールドからです。
- ヒステリシス誤差には線形特性はありません。
- ヒステリシス誤差は、ピークディテクトの不安定出力で、DCC巻数の不安定値として現れ、電圧検出器の直流オフセットに影響を与えます。

[www.mintl.com](http://www.mintl.com)

© 2010 Measurements International Prescott, Ontario Canada

**DCC 計測不確かさ ワークシート**

Measurements International Ltd.  
Standard Calibration Laboratory Quality System  
Uncertainty Budget Worksheet for 10 Ohm

Technician: [redacted]      In test position: 10  
Reference Bridge L/N: 1021110  
Reference Bridge Error 1%: 0.021      0.012  
29944  
UT L/N: [redacted]  
Reference Resistor: 1011101      1.0000415      0.012  
S/N: 30966

Qty and Toler	Ratio	Deviation from nominal (ppm)	Max UNC (ppm)	STD DEV (ppm)	STD of Test (ppm)	Total (ppm)
10.0000 14.00	10.00001273	41.168	0.109	0.007	0.007	0.123
10.0000 14.01	10.00001274	41.174	0.107	0.007	0.007	0.123
10.0000 14.02	10.00001271	41.175	0.105	0.007	0.007	0.123
10.0000 14.03	10.00001277	41.171	0.107	0.007	0.007	0.123
10.0000 14.04	10.00001275	41.175	0.123	0.007	0.007	0.123
10.0000 14.05	10.00001272	41.173	0.107	0.007	0.007	0.123
Avg ratio: 10.00001273				0.007142	0.0012	0.0079

[www.mintl.com](http://www.mintl.com)

© 2010 Measurements International Prescott, Ontario Canada

**合成不確かさ 2s**

不確かさ 要因 (Ref Report)	タイプ	Dist	不確かさ (標準偏差)	合成不確かさ
1 6010C Uncertainty (Cal Report)	B	n	0.012	0.006
2 Bridge Error (Cal Report)	B	u	0.025	0.014
3 Long Term Drift (1 year) of bridge ratios	B	n	0.100	0.050
4 Worksheet uncertainty	A	n	0.0289	0.006
Uncertainty due to partial turns dependence of reference 6010C bridge	B	u	0.050	0.0289
拡張不確かさ	k=2		合成不確かさ	0.06

[www.mintl.com](http://www.mintl.com)

© 2010 Measurements International Prescott, Ontario Canada

**AccuBridge™ または ADCC 技術の原理**

Figure 2  
AccuBridge™ Block Diagram

- 1) 2009年に開発したAccuBridge™は2個のデジタル電流源にはリニアランプ回路を組み込んだマスター、スレーブ電流源として機能しています。この回路はCCCと類似している。
- 2) マスター、スレーブの両電流源は計測毎に校正する。

[www.mintl.com](http://www.mintl.com)

© 2010 Measurements International Prescott, Ontario Canada

**AccuBridge™ Tracking Current Sources which addresses the uncertainty due to hysteresis**

As measured at the output of the current sources and after the windings, again similar to the CCC  
The ramping current sources both demagnetize the core upon current reversal and removes the effect or changes in the residual flux upon current reversals (soft switching)

[www.mintl.com](http://www.mintl.com)

© 2010 Measurements International Prescott, Ontario Canada

**AccuBridge™ 電流コンバーテラ**

Figure 3  
AccuBridge™ Block Diagram

- バイラー巻の直流電流コンバーテラ (1,2,4,8 etc)
  - マスター側 N<sub>x</sub>巻、スレーブ側 N<sub>s</sub>巻は両方とも可変。
  - 新開発の感度を増加させたピーク (磁束) 検出器は計測結果を更に安定化させ、ゲインを増加させました。 (100 uat = 200 mV)。
  - ピーク検出器での変調周波数成分は、安定した計測を実現するためノイズ成分になるため、除去します。
  - 全てのコア巻線はお互いの間で自己校正していることから、ブリッジの計測誤差は小さくなります。

[www.mintl.com](http://www.mintl.com)

© 2010 Measurements International Prescott, Ontario Canada

**AccuBridge™ または ADCC 技術の原理**

Figure 3  
AccuBridge™ Block Diagram

- 電流源の設定分解能、精度を実現する為、フィードバックは小さくしています。
- 増加したゲインと低電流ノイズのDCCを組み合わせ、ブリッジの能力をアップさせました。
  - ADCC (アドバンスドDCC) の線形特性は0.001ppmに達している。  
cont

[www.mintl.com](http://www.mintl.com)

© 2010 Measurements International Prescott, Ontario Canada

**ADCC リアルターンの校正  
線形性 < 0.001 ppm**

#1:	0.00026	+/- 0.00178 ppm
#2:	0.00070	+/- 0.00652 ppm
#3:	0.00022	+/- 0.00106 ppm
#4:	0.00056	+/- 0.00389 ppm
#5:	0.00077	+/- 0.00111 ppm
#6:	-0.00025	+/- 0.00105 ppm
#7:	-0.00012	+/- 0.00180 ppm
#8:	-0.00035	+/- 0.00179 ppm
#9:	-0.00002	+/- 0.00123 ppm
#10:	0.00092	+/- 0.00139 ppm
#11:	-0.00152	+/- 0.00171 ppm
#12:	0.00143	+/- 0.00052 ppm
#13:	-0.00024	+/- 0.00101 ppm
#14:	0.00120	+/- 0.00131 ppm

Table 1  
Real Turns Comparison

校正は最も重要なターンの比較から開始します。  
校正結果(数値)はメモリに記録し、比率の読み値に加算します。

[www.mintl.com](http://www.mintl.com)

© 2010 Measurements International Prescott, Ontario Canada

**ADCC Partial Turn's**

新開発のパーシャルターン回路 ブロック図

$$I_{PT} = \frac{I}{128}$$

$$I_{PT} = \frac{R_{30}}{R_{30} + R_{PT}} I$$

Unloading circuit to unload the winding resistance from the fractional turn resistor

Unload the contact resistance changes of the relays

[www.mintl.com](http://www.mintl.com)

© 2010 Measurements International Prescott, Ontario Canada

**ADCC パーシャルターンの校正**

- 1 RT vs 1/128 PTs : -0.00134 +/- 0.00324 ppm
- 1: Cal Turn
- 1: -0.0004 ± 0.0019 ppm
- 2: -0.0002 ± 0.0013 ppm
- 4: 0.0001 ± 0.0013 ppm
- 8: 0.0001 ± 0.0013 ppm
- 16: -0.0009 ± 0.0019 ppm
- 32: 0.0005 ± 0.0017 ppm
- 64: -0.0005 ± 0.0015 ppm
- 128: -0.0003 ± 0.0015 ppm
- Where #8 puts a separate 128 weighted turn against the full partial turns plus the Cal turn
- 校正結果は内部メモリに記録し、比率計測に加えませす。

[www.mintl.com](http://www.mintl.com)

© 2010 Measurements International Prescott, Ontario Canada

**ADCC スレープターンの校正**

- #1: -0.0003 ± 0.0019 ppm
- #2: -0.0004 ± 0.0013 ppm
- #3: 0.0002 ± 0.0013 ppm
- #4: 0.0003 ± 0.0014 ppm
- ここで、スレープ巻数はマスター巻に対して校正しています。
- 校正結果はメモリに記録し、比率計測に加えませす。

[www.mintl.com](http://www.mintl.com)

© 2010 Measurements International Prescott, Ontario Canada

**ADCC 電圧検出器の校正**

- DCCの三番目に大きい不確かさの要因は**電圧検出器**です。
  - このゲインは計測する抵抗値、計測電流の値で変化します。
- 電圧検出器は
  - DCCパーシャルターンの最低ターン値の値に対し、校正してませす。

Figure 3  
AccuBridge™ Block Diagram

**電圧検出器**

[www.mintl.com](http://www.mintl.com)

© 2010 Measurements International Prescott, Ontario Canada

**ADCCでの比率の検証**

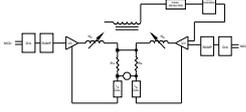


Figure 3  
AccuBridge™ Block Diagram

- ADCCでは、マスターの巻き数 (Nx)、スレーブの巻き数 (Ns) 共に一定ではありません。
- 10:1 Ratio aT = 25.6,
- 1:10 Ratio aT = 25.6
  - SN比で10以上に改善しています。
    - 電圧検出器から変調周波数成分の信号を除去します。
    - 線形特性を 0.01 から0.001に改善しました。

[www.mintl.com](http://www.mintl.com)

© 2010 Measurements International Prescott, Ontario Canada

**ADCC 比率 1:1の検証**

計測条件: DC Test

ADCデータ	収束数	正方向比率	標準偏差	逆方向比率	標準偏差	インターチェンジ
1:1 @50mA	8/3	1.000017340	0.0035	0.999982698	0.0028	15- 0.0191
1:1 @100mA	8/3	1.000017183	0.0023	0.999982847	0.0016	0.0147
1:1 @150mA	8/3	1.000017131	0.0024	0.999982910	0.0023	0.0202
10:1 @10mA	8/3	0.999967933	0.0060	1.001033140	0.0043	0.0039
100:100 @3mA	8/3	0.99996517	0.0197	1.000003485	0.0060	0.0027

- 1Ω から 100Ωまでの計測で、正方向、逆方向のインターチェンジエラーを評価
- 抵抗器での消費電力を <10 mW に設定
- 標準偏差の計算は25データサンプルから計算

[www.mintl.com](http://www.mintl.com)

© 2010 Measurements International Prescott, Ontario Canada

**ADCC 比率1:1の検証**

比率	10/8	1.001067241	0.0230	0.998933896	0.0351	-0.0004
1k:1k @0.1mA		1.001067231	0.0049	0.998933912	0.0049	0.0028
1k:1k @2mA		1.001067228	0.0026	0.998933894	0.0018	-0.0078
1k:1k @3mA		1.001067250	0.0020	0.998933896	0.0030	-0.0012
1k:1k @4mA		1.001067256	0.0060	0.998933846	0.0013	0.0021
1k:1k @5mA		1.001067320	0.0017	0.998933814	0.0032	-0.0018
10k:10k @0.1mA	12/6	0.999571559	0.0115	1.000428681	0.0130	0.0282
10k:10k @0.5mA	12/6	0.999571573	0.0014	1.000428663	0.0018	0.0260

- 1kΩ から 10kΩまでの計測で、正方向、逆方向のインターチェンジエラーを評価
- 抵抗器での消費電力を <10 mW に設定
- 標準偏差の計算は1A/Dの読み値、25データサンプルから計算

[www.mintl.com](http://www.mintl.com)

© 2010 Measurements International Prescott, Ontario Canada

**比率 10:1の検証**

抵抗比	正方向	標準偏差	逆方向	標準偏差	偏差	規格判定値
10Ω:1Ω	10.0003298	1.10E-02	0.09999670	1.30E-02	-2.1E-08	0.02
25Ω:10Ω	2.5027810	1.20E-02	0.39955553	2.00E-03	5.0E-09	0.02
100Ω:10Ω	9.9992249	8.00E-03	0.10000775	1.00E-02	2.7E-09	0.02
100Ω:25Ω	3.9954555	5.00E-03	0.25028434	2.60E-03	-1.7E-08	0.02
1000Ω:100Ω	10.0109121	6.00E-03	0.09989099	3.30E-02	-1.8E-08	0.02
10kΩ:1000Ω	9.9988335	2.00E-02	0.10001166	5.41E-02	-1.6E-08	0.02
100kΩ:10kΩ	9.9901778	4.20E-02	0.10009829	2.55E-01	-1.2E-07	0.1

- インターチェンジ計測は10:1の比率以外の他の比率計測でも可能です。
  - 両抵抗の計測条件で、同じ電流(巻き数)になるようにしてください。
  - 両抵抗の計測条件で、同じ消費電力になるようにしてください。

[www.mintl.com](http://www.mintl.com)

© 2010 Measurements International Prescott, Ontario Canada

**ADCC ワークシート**

104498

野測日時	正方向比率 (%)	Date and Time	逆方向比率 (%)	5P- RSN	STD Feed	STD Rev	STD of Interchange	Ratio Unc	
3/3/2010 14:04	10.0002900	0.0099	3.330661418	0.0099	-1.4E-08				
3/3/2010 14:11	10.0002900	0.0099	3.330661411	0.0099	-1.4E-08				
3/3/2010 14:22	10.0002900	0.0099	3.330661422	0.0099	-1.4E-08				
3/3/2010 14:31	10.0002900	0.0074	3.330661431	0.0074	-1.4E-08				
3/3/2010 14:40	10.0002900	0.0121	3.330661440	0.0121	-1.4E-08				
3/3/2010 14:50	10.0002900	0.0075	3.330661450	0.0075	-1.4E-08				
<b>正方向比率</b> 平均	10.0002900		<b>逆方向比率</b> 平均	0.0099678	-1.1E-08	0.0099	0.0099	0	0.0126

[www.mintl.com](http://www.mintl.com)

© 2010 Measurements International Prescott, Ontario Canada

**不確かさ解析**

Identified Measurement	Value	Distribution	Order	Adjuster	Value	Component	Value	Std. Dev.
Short Term Repeatability of Bridge	0.01	Normal	1	1	0.01	0.01	0.001	0.001
Bridge Repeatability	0.004	Rectangular	120	1.708	0.001	0.004	0.00007	0.00007
Bridge Linearity	0.004	Rectangular	120	1.708	0.001	0.004	0.00007	0.00007
Temperature Effects (at 2 degC)	0.007	Rectangular	120	1.708	0.004	0.004	0.00007	0.00007
Interchange Error	0.018	Rectangular	120	1.708	0.012	0.012	0.00007	0.00007

[www.mintl.com](http://www.mintl.com)

© 2010 Measurements International Prescott, Ontario Canada

**抵抗値 とトレーサビリティ**

- 抵抗値は以下の手順で計測すると、向上した不確かさで求めることができます。
  - 抵抗値 = ((Normal + 1/Reverse)/2) x Rs  
ここで RsはQHRを使って求めます。通常の不確かさ= 0.01ppm あるいはそれ以下であることを期待しています。
- インターチェンジ技術を活用します。  
計測範囲 1Ω から 10,000Ω

[www.mintl.com](http://www.mintl.com)

© 2010 Measurements International Prescott, Ontario Canada

**校正不確かさを小さくする代用校正技術**

1kΩを10kΩ(標準)で校正する。この10kΩ標準はQHRで値付けする。

**10kΩの校正:**  
抵抗測定置換法(10kΩ:1kΩ:10kΩ)  
10kΩは標準抵抗を使用します。  
ブリッジ単体の誤差を除去できます。  
インターチェンジ操作は不要です。

**1kΩの校正:**  
インターチェンジ技術(10kΩ:1kΩと1kΩ:10kΩ)の活用  
10kΩは標準抵抗を使用します。

[www.mintl.com](http://www.mintl.com)

© 2010 Measurements International Prescott, Ontario Canada

Measurements International  
Metrology is Our Science, Accuracy is Our Business™

### 1uΩ から 100mΩまで(レンジエクステンダ)の活用

www.mintl.com

© 2010 Measurements International Prescott, Ontario Canada

Measurements International  
Metrology is Our Science, Accuracy is Our Business™

### 6011 比率校正

- 1) 0.1 W @ 150 mA を計測、1W の標準抵抗、ブリッジ6010
- 2) 10 W @ 5 mA を計測、1 W の標準抵抗、ブリッジ6010
- 3) 0.1 W @ 250 mA を計測、1 W の標準抵抗、計測器 6010/6011/6100  
ステップ3)とステップ1)を比較する。(比率10を校正する。)
- 4) 0.1 W @ 1.1 A を計測、1 W の標準抵抗、計測器 6010/6011/6100
- 5) 0.1 W @ 1.1 A を計測、10 W の標準抵抗、計測器 6010/6011/6100  
この差は6011の比率1000の誤差になる。
- 6) 0.01 W @ 1.1 A を計測、1 W の標準抵抗、計測器 6010/6011/6100
- 7) 0.01 W @ 1.1 A を計測、10 W の標準抵抗、計測器 6010/6011/6100  
この差は6011の比率10000の誤差になる。

3/16/2017 Metrology is our Science, Accuracy is our Business www.mintl.com

© 2010 Measurements International Prescott, Ontario Canada

Measurements International  
Metrology is Our Science, Accuracy is Our Business™

### 抵抗値10kΩ to 1TΩ での 校正と比率トレーサビリティ

- バイナリーボルテージディバイダ(BVD)では、0.01ppmオーダの短期間の安定性をもった電圧源をBVDに接続し、直列に接続した抵抗の一組との間で並列にDVMを挿入し、マスター・スレーブ刊の関係を作っています。

$$\frac{\Delta R_x}{R_x} = \frac{\Delta V_x \cdot R_2}{V_x \cdot R_1} = \frac{\Delta V_x \cdot 1.0E-10E}{1.01E-10E} = \frac{\Delta V_x}{V_x} \cdot 1.01$$

www.mintl.com

© 2010 Measurements International Prescott, Ontario Canada

Measurements International  
Metrology is Our Science, Accuracy is Our Business™

### BVD 計測結果

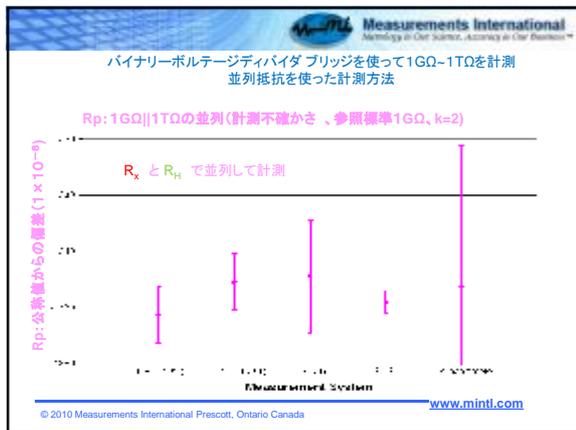
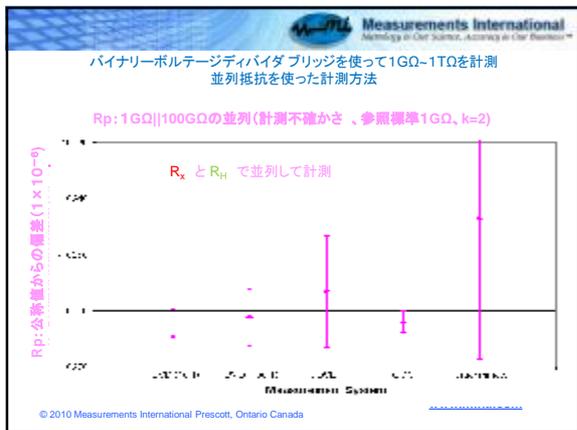
1.00003501	10000.38561	0.99996417	10000.02863
1.00003568	10000.38718	0.99996435	10000.03044
1.00003516	10000.38676	0.99996438	10000.03038
1.00003508	10000.38669	0.999964369	10000.03063
1.00003538	10000.38698	0.999964397	10000.03091
1.00003527	10000.38687	0.999964376	10000.03069
1.00003563	10000.38723	0.999964351	10000.03044
1.00003543	10000.38703	0.999964356	10000.03045
1.00003529	10000.38689	0.999964332	10000.03005
1.00003532	10000.38692	0.999964333	10000.03026
1.00003535	R <sub>s</sub>	0.999964359	R <sub>x</sub>
1.41E-02		2.1E-02	
10000.38695		10000.03052	

$$r_e = \left( R_x - \frac{1}{R_s} \right) / 2 = 0.004 \text{ ppm}$$

www.mintl.com

© 2010 Measurements International Prescott, Ontario Canada





Measurements International  
Metrology of Our Science, Accuracy of Our Business™

## Resistance Traceability

QHR  
Whether your own  
Or from an NMI calibration report  
Primary Standards Required  
1Ω, 10kΩ, 100MΩ (minimum of four 1Ω, two 10kΩ, two 100MΩ)  
Check Standards for all other values

[www.mintl.com](http://www.mintl.com)

© 2010 Measurements International Prescott, Ontario Canada

Measurements International  
Metrology of Our Science, Accuracy of Our Business™

## Conclusions

- 1) DCCの不確かさの全ては追加の補正操作を実施せず、ADCCで改善しています。
- 2) 以前のDCC技術と新しいADCC技術の間で、いくつかの改良を実施した。
  - ADCCはその比率不確かさが仕様範囲内であることを検証するため、
    - どのような比率でも、インターチェンジ技術を使用します。

$$r_p = (R_a - \frac{1}{R_b}) / 2$$

- BVDでも、その比率不確かさが仕様範囲内であることを検証するため、
  - どのような比率でも、インターチェンジ技術を使用します。

$$r_p = (R_a - \frac{1}{R_b}) / 2$$

[www.mintl.com](http://www.mintl.com)

© 2010 Measurements International Prescott, Ontario Canada


**Measurements International**  
Membership of the Society, Accuracy of the Division

**まとめ**

13:1とその逆数0.076との間の任意の比について、ADCCを<0.01ppmの精度まで改善することができる。

[www.mintl.com](http://www.mintl.com)  
© 2010 Measurements International Prescott, Ontario Canada


**Measurements International**  
Membership of the Society, Accuracy of the Division

**References**

M.P. MacMartin and N.L. Kusters, "A direct-current-comparator ratio bridge for four-terminal resistance measurements," IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. IM-15, pp. 212-220, December 1966

M.P. MacMartin and N.L. Kusters, "A direct current comparator bridge for high resistance measurements", IEEE Trans. Instrum. Meas., vol IM-22, pp. 382–386, December 1973

Dean Jarret, Rand Elmquist, Marlin Kraft, NIST, NCSL 2009, A Parallel-Scaling Method from 1GΩ to 1TΩ for the Binary Resistive Divider Bridges

And special thanks

Dr. Barry Wood – INMS – Partial Turn Calibration techniques

Dr Kaneko from NMJ – testing and evaluation (NCSL Japan)

Nick Fletcher, BIPM for his input on grounding techniques and voltage detector optimization

Carlos Sanchez, NRCC on grounding techniques

[www.mintl.com](http://www.mintl.com)  
© 2010 Measurements International Prescott, Ontario Canada