

測定の精度を上げる！

マスコンパレータMCシリーズの 正しい理解と使い方



MC-6100



MC-10K



MC-100KS

株式会社エー・アンド・デイ

2016年9月16日

目次

1. はじめに	3
2. 天びんの基礎（用語の解説）	4
2.1. ゼロ点とスパン値	4
2.2. 繰り返し性	4
2.3. 偏置（四隅）誤差	5
2.4. ドリフト（ゼロ点ドリフト）	6
2.5. 不確かさ	7
3. 質量比較の実施	8
3.1. マスコンパレータの選定	8
3.2. 設置環境	9
3.3. 設定と準備	9
3.4. 等量比較法	11
4. 質量比較以外の用途	16
4.1. MCシリーズの強みとその限界	16
4.2. カタログ仕様と実際のばらつき	16

1. はじめに

MC シリーズは、分銅の校正（質量比較）を主な用途として開発された電子天びんです。嬉しいことに、2010 年の販売開始以来、分銅を自社で管理したいというユーザー様のみならず、校正を専門に行う数多くのサービス業者の方々にも重宝され、好評を博してきました。適切な方法で使用したとき、MC シリーズは非常に高精度な測定を可能にし、優れたコストパフォーマンスを実現してくれます。

とはいえ、マスコンパレータ（質量比較器）としての、その目的と特性を正しく理解し、しかるべき設置、準備、操作を行わないと、思ったような性能が得られず、製品に不満を抱く結果となる恐れがあります。そこで、本レポートでは、より正確な質量比較が実施できるよう、MC シリーズを使用する上での基本的な手順と注意点を解説しています。¹

一方で、大きなひょう量と高い分解能を兼ね備えた天びんとして、MC シリーズを質量比較以外の用途のために購入されるユーザー様も少なからずいらっしゃいます。但し、その際であっても、MC シリーズ本来の目的や特性、仕様の意味をきちんと把握しておかないと、製品に問題があるのではないかという結論を誤って出すことになりかねません。本レポートの最後に、その点に関する幾つかの留意事項を述べてますので、併せて参照してください。

¹ 本レポートは、質量比較の代表的な手法に言及してはいますが、分銅の校正そのものを詳細に指南するものではありません。ここで取り上げている以外の手法や厳密な要求・推奨事項、不確かさの計算などについては、OIML R111 や JIS B7609 といった規格を参照するようにしてください。

2. 天びんの基礎（用語の解説）

2.1. ゼロ点とスパン値

ゼロ点とは、被計量物が皿に載っていない状態での天びんの出力のことで、測定の基点となります。対してスパン値とは、被計量物が皿に載ることによる出力の変化量のことで、被計量物の正味重量を示します。

スパン値を得るには、被計量物が載せられたときの表示値から、載せる前（ゼロ点）の表示値を引く必要があります。通常の使用では、各測定にあたりリゼロ／風袋引きキーまたはゼロトラック機能²を用いて、表示値を一旦ゼロにします。すると、被計量物を載せたときの表示値がスパン値となります。

例)

<u>ゼロ点</u>	<u>測定値（フル）</u>	<u>スパン値</u>
0.0007g	100.0829g	$100.0829\text{g} - 0.0007\text{g} = 100.0822\text{g}$
-0.00012g	19.99637g	$19.99637\text{g} - (-0.00012\text{g}) = 19.99649\text{g}$

2.2. 繰り返し性

繰り返し性は、同一の質量を同一の測定者が同一の条件下で繰り返し測定したときの結果のばらつき具合を示します（これは、天びん自体の性能に加え、測定者や被計量物、測定手順、環境などの要因が、測定値の一貫性を左右するという前提に基づいています）。

一般的に、繰り返し性は一連のスパン値から計算された標準偏差（ σ ）によって表されます。例えば、標準偏差が 0.0004g の場合、複数回行った計量の結果（スパン値）が、それらの平均値 $\pm 0.0004\text{g}$ の範囲に約 68%の確率で収まるであろうことを意味しています（次ページ図 1）。

² ゼロトラック機能が備わった天びんは、ゼロ点を自動的に追尾し、表示値をゼロに保つことができます。

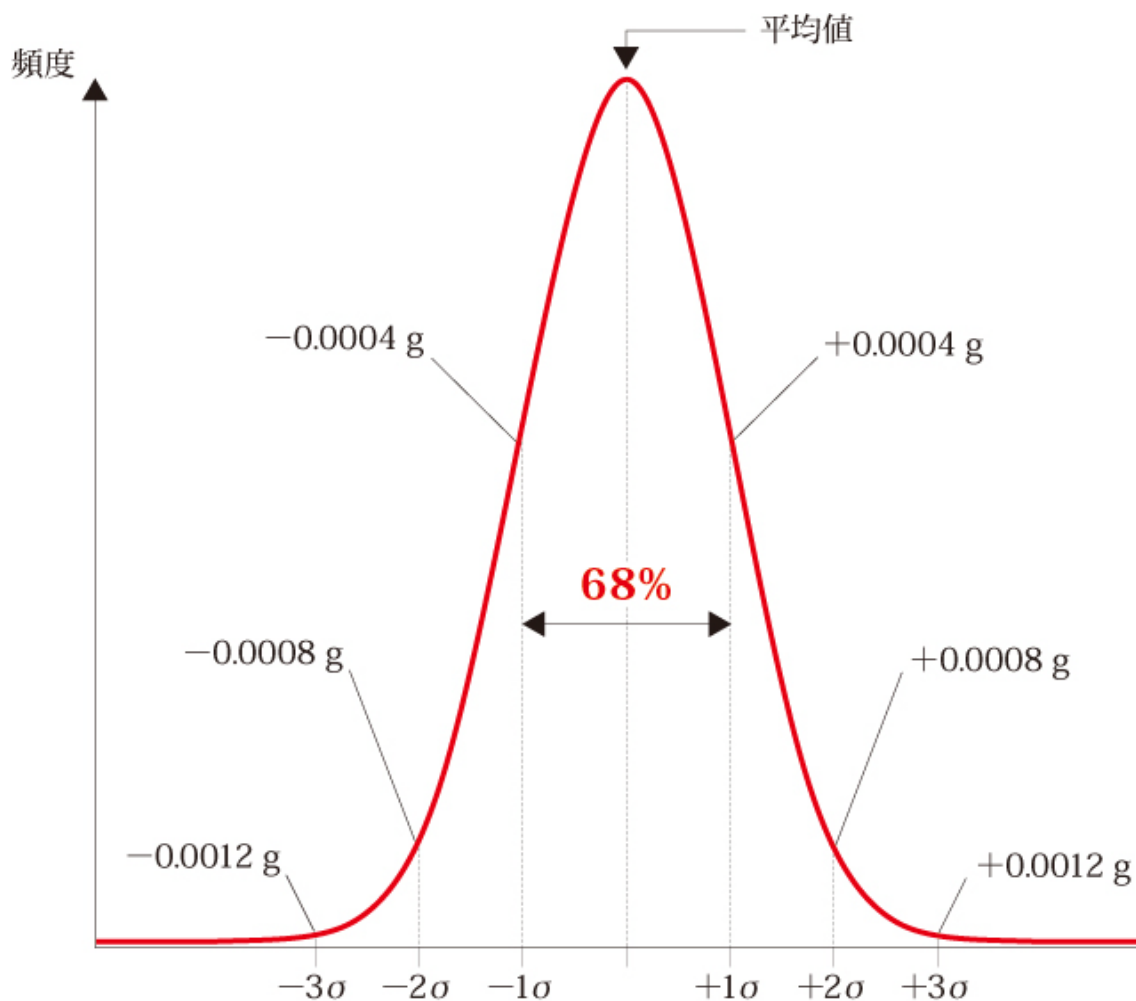


図 1. 標準偏差が 0.0004g のときに想定される結果の分布

2.3. 偏置（四隅）誤差

被計量物を皿の中央に載せてはかった時の値と、中央から離れた場所（四隅）に載せてはかった時の値の差を表します。

測定は、ひょう量の 1/3 以上の単一分銅を、皿の中央と 1/4 面積の重心位置に順次載せて行います（図 2）。

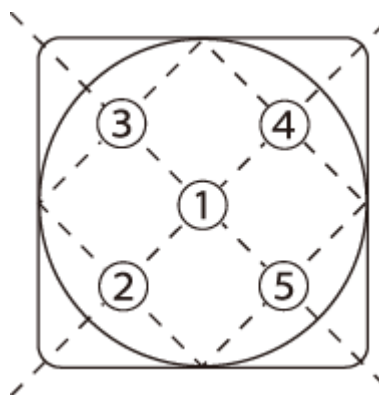


図 2. 偏置誤差の測定位置

偏置誤差が大きいと、被計量物を載せる位置が少しずれるだけで値が変わるため、繰り返し性が悪化します。

2.4. ドリフト（ゼロ点ドリフト）

ゼロ点とスパン値は、両方とも周囲の温度変化やその他の原因により変化＝“ドリフト”していきます。

計量の目的は、スパン値を決定することです。そのため、一般的に天びんメーカーは、スパン値のドリフト量についてはカタログ等で規定しています（感度ドリフト）。一方、スパン値に比べ、ゼロ点は環境変化の影響をはるかに受けやすく、そのドリフト量の仕様を公開しているメーカーはほとんどありません。

被計量物を載せたあと表示値がドリフトし続けて止まらない現象は、多くはゼロ点のドリフトを反映しており、スパン値は安定していることが多いです（図 3）。ゼロトラック機能が表示を一定（ゼロ）に保てるのは、出力がゼロ付近にある間、つまり計量が始まる前だけです。

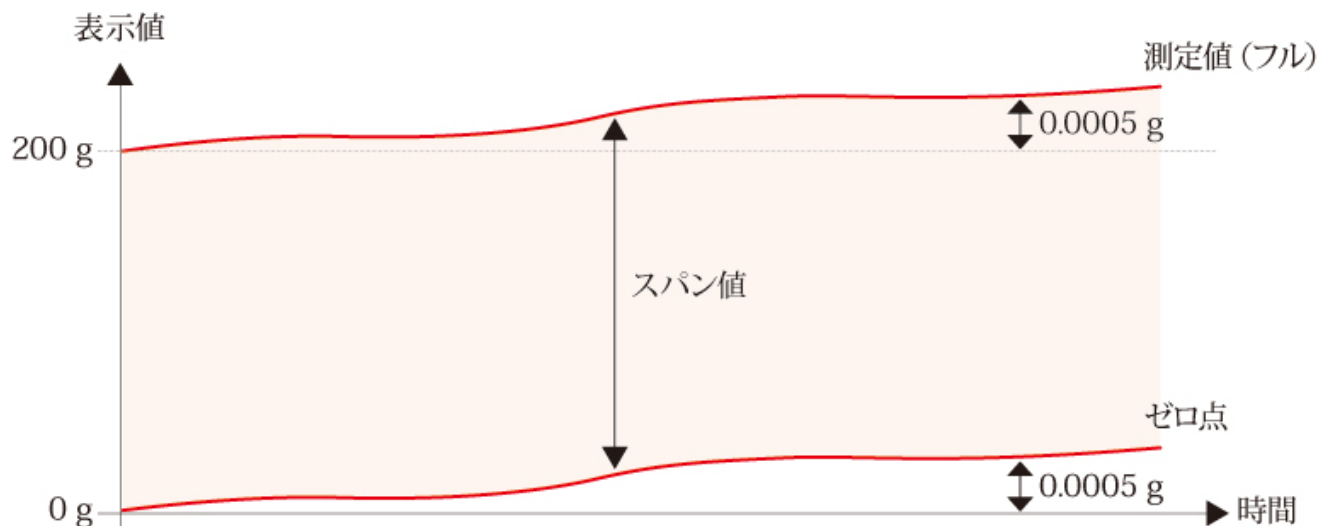


図 3. ゼロ点はドリフトしても、スパン値は安定

なお、天びんのウォームアップ中（通電されることにより機器内部の温度が上昇している間）は、ドリフトが特に大きくなり、繰り返し性にも影響するので注意が必要です。

2.5. 不確かさ

例えば、体重を訊かれたときのことを思い浮かべてください。たまたま前日の夜、お風呂上りに体重計に乗っていて、表示は **62.6kg** だったとします。さて、あなたはそれが、あなたの“真の体重³⁾”を間違いなく表していると言明することができるでしょうか。

考えてみましょう。体重を量る前、身体や髪の毛に付着した水分をどのくらいきちんと拭き取りましたか？ 入浴前に食事をしましたか？ トイレにはいつ行きましたか？ これらは全て、測定値のばらつきにつながります。また、就寝中は汗をかきますね。朝、もう一度量っていたら、きっと違う値が出ていたのではないのでしょうか。もちろん、体重計自体の精度も無視できません。最近ではデジタルの体重計が一般的になったとはいえ、表示は **100g** 単位のもが多く、当然そこには丸め誤差 (**100g** 未満は四捨五入される) が発生します。さらに、古いものであれば、経年変化によるズレも疑わなければなりません。

しかし、たとえこの様なことを意識していなかったとしても、あなたは経験的、感覚的に理解しているはずです。体重は、測定するたびに多少は変動して表示されるものだという⁴⁾ことを。つまり、真の体重など知りようがないということ。従って、現実在即するなら、あなたは切りの良いところをとって、次のように答えるのではないのでしょうか。「私の体重は、**62.5kg** くらいです」と。

不確かさとは、この“～くらい”といった曖昧な部分を、入浴前の食事や体重計の丸め誤差など、様々な“不確かさの要因⁴⁾”を総合的に考慮し、定量化したものです。不確かさは標準偏差で確率的に表現され、中でも標準偏差 2 つ分の区間 (包含係数 $k=2$: 95% の信頼水準) をとったものを“拡張不確かさ”と呼びます。上記の例で言えば、拡張不確かさが **0.74kg** だった場合、あなたの真の体重は **62.6kg ± 0.74kg** の範囲内に **95%** の確率で存在すると推定される、ということになります。

分銅などの国家標準へのトレーサビリティを対外的に証明するには、JCSS 校正事業者のような ISO/IEC17025 の認証を受けた機関に、校正値 (公称値 + 補正值) に加え、その値の不確かさが表記された校正証明書を発行してもらう必要があります。

³⁾ 「そもそも真の体重とは何か (どこまでを含むのか)」という問題がありますが、ここでは不確かさの概念を身近な例で分かりやすく説明するために、あえて存在するものとして扱っています。

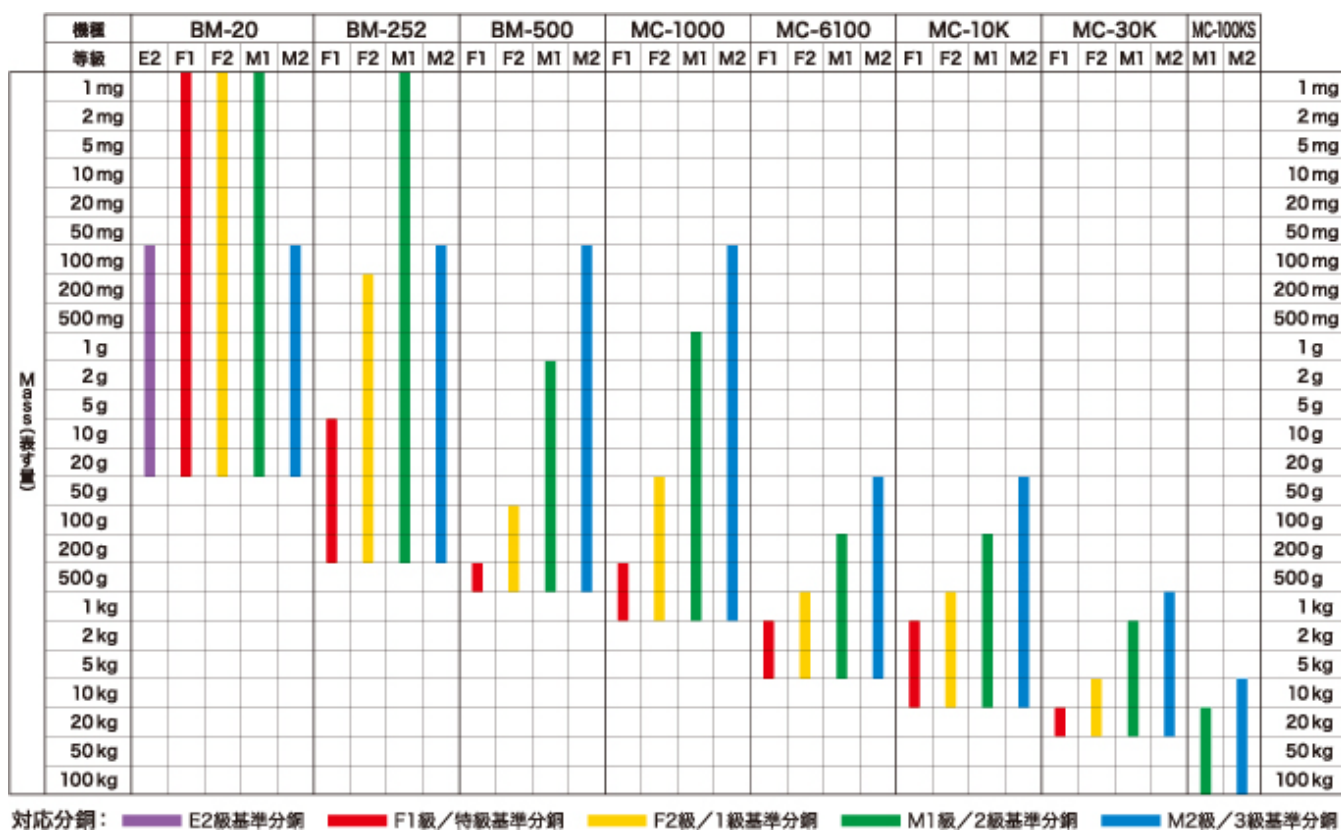
⁴⁾ 分銅の校正における代表的な不確かさの要因としては、参照分銅の不確かさ、空気浮力補正の不確かさ、天びんの不確かさ (繰返し性、感度、丸め誤差、偏置誤差など) が挙げられます。

3. 質量比較の実施

3.1. マスコンパレータの選定

校正の対象となる分銅（以後、被校正分銅と呼びます）の等級および校正範囲を考慮し、必要となるひょう量と目量を決めてください。目安としては、繰り返し性が被校正分銅の最大許容誤差の 1/6 以下となるものを選ぶのが理想です。⁵

これに基づけば、機種ごと（MC シリーズ以外も含まれます）の各分銅等級における推奨測定範囲は、以下のようになります。



但し、上記の考え方はあくまで業界の慣習であり、必ずしもこうしなければならないと定

⁵ その根拠は、OIML R111 の、『分銅の拡張不確かさ U (包含係数 k=2 : 95%の信頼水準) が、最大許容誤差 δm の 1/3 以下 ($U \leq 1/3 \delta m$) であること』(OIML R111-1: 2004 5.2) という規定にあります。拡張不確かさ U の主要因が天びんの繰り返し性 σ であることから、 $2\sigma \leq 1/3 \delta m \Rightarrow \sigma \leq 1/6 \delta m$ としています。

められているわけではありません。自社の求める管理レベルにもよりますが、繰り返し性が被校正分銅の最大許容誤差の 1/3 (1/6 ではなく) 以下であれば、通常は問題ないことが多いです。

3.2. 設置環境

マスコンパレータは、その目的（天びんの参照標準となる分銅の値付け）ゆえに、一般的な天びんよりも、さらに感度が高められています。その分、外乱（温度・湿度・気圧変化、風、振動、等）の影響を受けやすく、期待する繰り返し性を得るには、環境の整備が不可欠です。

具体的には、堅牢な作業台に設置し、必要に応じて天びん全体を覆う外部風防を利用します。また、試験室の温湿度はなるべく一定に保ち、気圧変化が大きい日（低気圧の通過時など）の測定は避けるようにしてください。当然、これらの環境を管理し、校正時には記録できるよう、温湿度計及び気圧計を用意しなければなりません（エー・アンド・デイの環境ロガー、AD-1687 が便利です）。

天びんに理想的な環境については、別小冊子『マイクロ天びんで安定した計量をするための 12 の秘訣』も併せて参照してください。



環境ロガー AD-1687

AD-1687 は、温度、湿度、気圧、そして振動まで、一台で経時変化を監視し、日付・時刻付きで記録することができます。また、エー・アンド・デイ製の天びん（MC シリーズを含む）に接続すれば、それらの環境データを天びんから送られてきた重量値と併せて記録することも可能です。

3.3. 設定と準備

偏置誤差と、その影響による繰り返し性誤差を極力減らすため、MC シリーズ専用の重心調整皿を使用してください（MC-100KS は除く）。重心調整皿は、被計量物（分銅）の重心が皿の中央に来るよう、自動的に調整する機能を持っています（次ページ図 4）。

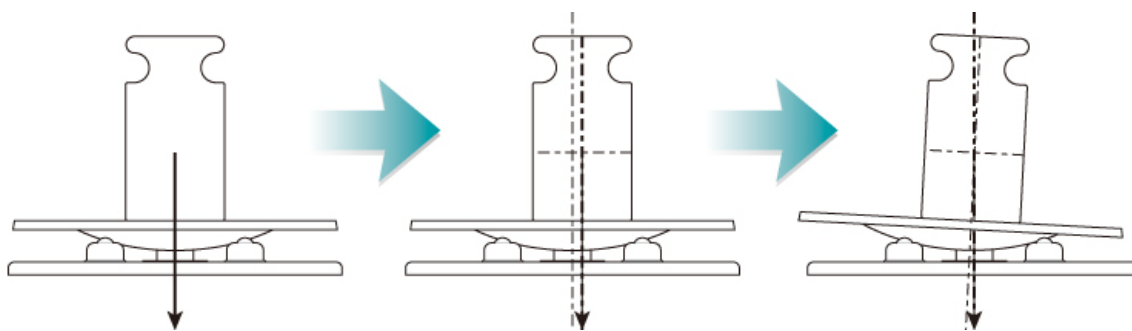


図 4. 分銅と皿の重心が自動的に一致

また、マスコンパレータの内部設定を、COND=2（応答特性 SLOW）、FIL=1（安定化フィルターあり）、TRC=0（ゼロトラック機能オフ）にしてください。とりわけ、最後のゼロトラック機能オフは必須です。

マスコンパレータは、遅くとも測定を行う前日（24 時間前）から通電、ウォームアップを開始してください。さらに、マスコンパレータのひょう量に相当する分銅（被校正分銅が一つだけの場合は、その被校正分銅でも可）を、同じく前日からマスコンパレータの皿上に載せておき、計量センサーを荷重に順応させます。

一方、参照標準として使用する分銅（以後、参照分銅と呼びます）と被校正分銅も、試験室の温度に充分馴染ませる必要があります。OIML R111 に、分銅の大きさと等級、及び分銅の初期温度と試験室の温度間の差ごとの熱安定化時間が示されていますが（OIML R111-1: 2004 B.4.3.1）、実用的には前日から試験室内に置いておくのが良いでしょう。

なお、劣化、汚染、温度変化をできるだけ避けるため、分銅は素手で触らず、手袋を着用の上、ピンセットや分銅用のフォーク、グリップなどで取り扱ってください（10kg 以上の大型の分銅は、手袋着用のみで取り扱っても、影響は軽微です）。



ピンセット



フォーク

3.4. 等量比較法

以下に紹介するのは、等量比較法と呼ばれる、参照分銅と被校正分銅の質量を直接比較し、その差分から被校正分銅の校正値を求める方法です。参照分銅には、被校正分銅と同じ公称質量で、等級が上位のものを使用します（例えば、F1級の校正にはE2級、F2級の校正にはF1級、など）。

質量比較を開始する前に、まず予備荷重（参照分銅または被校正分銅を数回載せ降ろしする）を実施してください。このとき、タイマーを用意して、分銅を載せてから表示値を読み取るまでの時間（読み取り時間）も決めておきます。マスコンパレータに標準の風防（計量室）が付いている場合は、分銅の載せ降し時に手を入れないよう注意してください。

ABA（3回）法

参照分銅を A、被校正分銅を B とします。

- ① A1 : A をマスコンパレータに載せ、P 秒後に表示値を読んで記録し、A を降ろします。
- ② B1 : B をマスコンパレータに載せ、P 秒後に表示値を読んで記録し、B を降ろします。
- ③ A2 : A をマスコンパレータに載せ、P 秒後に表示値を読んで記録し、A を降ろします。

P には、最初に決めた読み取り時間が入ります。同様に、①～②と②～③の各計量間のインターバルも一定に保つようにしてください。

ここで押さえておいていただきたいのは、天びんには大なり小なりドリフトが付き物であるということです。ABA法や後述するABBA法は、そのドリフトの影響を最小限に抑えるよう考案されたもので、読み取りや計量を等間隔で行う理由もそこにあります（次ページ図 5）。

なお、①で表示値を読み取る前に風袋引きを行うと（風袋引き方式）、以降の表示値が読み取りやすくなります。

- ④ ①～③を 1 サイクルとし、これを必要な回数だけ繰り返します。⁶
- ⑤ それぞれのサイクルにおける、A と B の質量差を求めます（ここでは、3 サイクル行ったとします）。

⁶ OIML R111 に、分銅の等級ごとの最小サイクル数が記載されています（OIML R111-1: 2004 C.4.3）。

$$C1 = B1 - \frac{A1 + A2}{2}$$

$$C2 = B2 - \frac{A3 + A4}{2}$$

$$C3 = B3 - \frac{A5 + A6}{2}$$

⑥ 質量差の平均を求めます。

$$D = \frac{C1 + C2 + C3}{3}$$

⑦ 参照分銅の公称値を N、補正値を CV とすると、被校正分銅の校正値は

$$N + (CV + D)$$

となります。

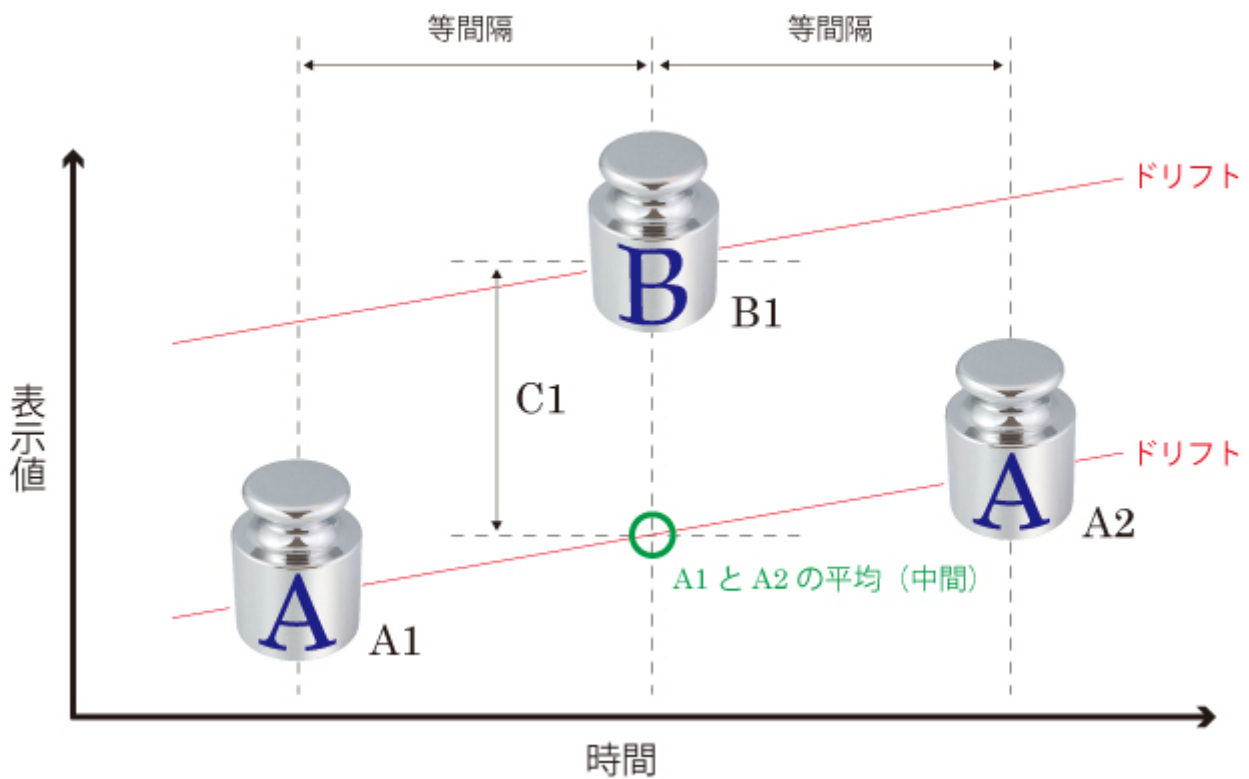


図 5. ドリフトの影響を取り除く原理 (ABA 法)

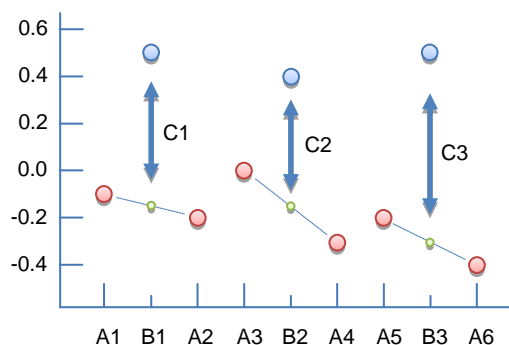
図 5 は、ABA 法の計量 1 サイクル (①～③) を、時間軸に沿って表したものです。ご覧のように、天びんにドリフトが発生していても、一定間隔で読み取りや計量を行ってれば、A1 と A2 の中間が B1 の計量時と重なるため、そこで正確な質量比較が可能になります。(見方を変えると、B1 の表示値に対して、A1 と A2 の平均はゼロ点、A と B の質量差 C1 はスパン値、とすることができます。)

例)

MC-1000 (ひょう量 : 1100g / 目量 : 0.0001g) にて、1kg の分銅を校正する。

ABA のサイクルを、風袋引き方式にて 3 回実施する。

	A (mg)	B (mg)	質量差 (mg)
1	A1 -0.1		
		B1 0.5	C1 0.65
	A2 -0.2		
2	A3 0.0		
		B2 0.4	C2 0.55
	A4 -0.3		
3	A5 -0.2		
		B2 0.5	C3 0.80
	A6 -0.4		
		D 0.67	



参照分銅Aの協定質量⁷ 1kg -1.4mg

被校正分銅 B の校正值 1kg -0.7mg

⁷ 協定質量とは、空気中の計量結果の協定値です。20℃の参照温度において取り扱われる分銅に対して、1.2 kg/m³の参照密度の空気中において釣り合う密度 8000 kg/m³の参照分銅の質量を指します。(OIML R111-1: 2004 2.7)

ABBA (4回) 法

参照分銅 A だけでなく、被校正分銅 B の計量も 2 回行い、それぞれの平均を比較する方法です。ABA 法と同様、ドリフトの影響が考慮されています (→ 次ページ図 6)。

- ① A1 : A をマスコンパレータに載せ、P 秒後に表示値を読んで記録し、A を降ろします。
- ② B1 : B をマスコンパレータに載せ、P 秒後に表示値を読んで記録し、B を降ろします。
- ③ B2 : B をマスコンパレータに載せ、P 秒後に表示値を読んで記録し、B を降ろします。
- ④ A2 : A をマスコンパレータに載せ、P 秒後に表示値を読んで記録し、A を降ろします。

P には、最初に決めた読み取り時間が入ります。同様に、①～②、②～③、③～④の各計量間のインターバルも一定に保つようになしてください。

- ⑤ ①～④を 1 サイクルとし、これを必要な回数だけ繰り返します。
- ⑥ それぞれのサイクルにおける、A と B の質量差を求めます (ここでは、2 サイクル行ったとします)。

$$C1 = \frac{B1 + B2}{2} - \frac{A1 + A2}{2}$$

$$C2 = \frac{B3 + B4}{2} - \frac{A3 + A4}{2}$$

- ⑦ 質量差の平均を求めます。

$$D = \frac{C1 + C2}{2}$$

- ⑧ 参照分銅の公称値を N、補正値を CV とすると、被校正分銅の校正値は

$$N + (CV + D)$$

となります。

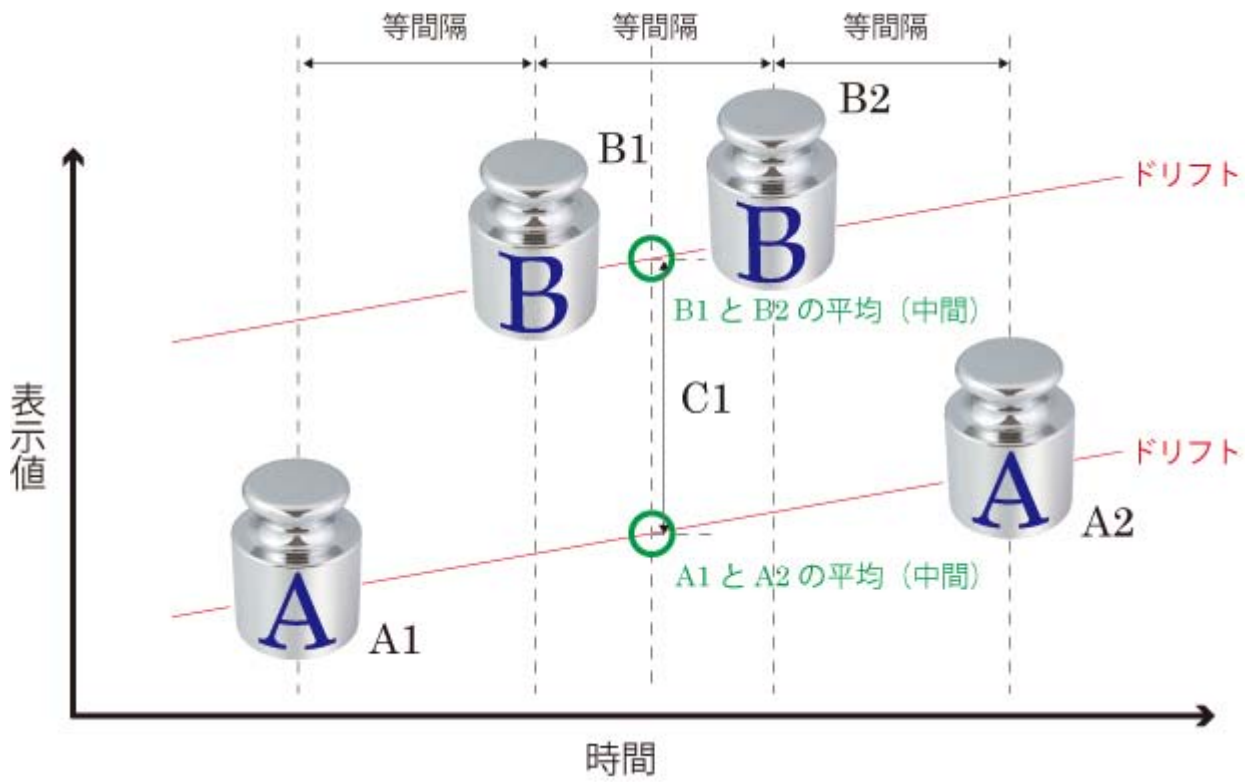


図 6. ドリフトの影響を取り除く原理 (ABBA 法)

4. 質量比較以外の用途

4.1. MC シリーズの強みとその限界

繰り返しになりますが、MC シリーズは分銅の校正を主な用途とした、分解能が特別に高められた電子天びんです。そのため、同ひょう量の一般的な天びんよりも、値をもう一桁細かく表示することができます。これを利用すれば、例えば金属材料の摩耗量や水素ガスの充填量のように、天びんに載せる全体量（風袋含む）に対して、実際に測定・管理したい正味量が非常に小さい用途にも有効です。

但し、ここまでの内容から明らかなように、MC シリーズの性能を十分に引き出し、確度の高い測定を行うには、それ相応の手続きを踏まなければなりません。また、MC シリーズと目量が等しい通常の天びん(MC-1000 と目量 0.0001g の分析天びんなど)を比較した場合、前者はひょう量が大きいというメリットがある反面、最終桁の安定性ではどうしても後者に劣ってしまいます。

4.2. カタログ仕様と実際のばらつき

どういうことか、具体的に見ていきましょう。まずは繰り返し性です。MC シリーズのカタログ仕様は、以下のようになっています。

	MC-1000	MC-6100	MC-10K	MC-30K	MC-100KS
ひょう量	1100g	6100g	10.1kg	31kg	101kg
目量 (d)	0.0001g	0.001g		0.01g	0.1g
繰り返し性 (σ) *	0.0005g	0.004g	0.005g	0.015g	0.2g

* 良好環境下にて、重心調整皿使用時 (MC-100KS は、自動機にて同じ位置に載せ降したした場合)

例えば、目量 0.0001g のエー・アンド・デイ製 分析天びんの繰り返し性が 0.0001g~0.0002g (1d~2d) なのに対し、MC-1000 では 0.0005g (5d) と少し大きめに取られています。

P.4~5 で説明したように、標準偏差 (σ) が 0.0005gであれば、同一の質量を同一の測定者が同一の条件下で繰り返し測定したとき、理論上、結果の約 68%が平均値 \pm 0.0005g ($\pm 1\sigma$) の範囲に収まることになります。⁸

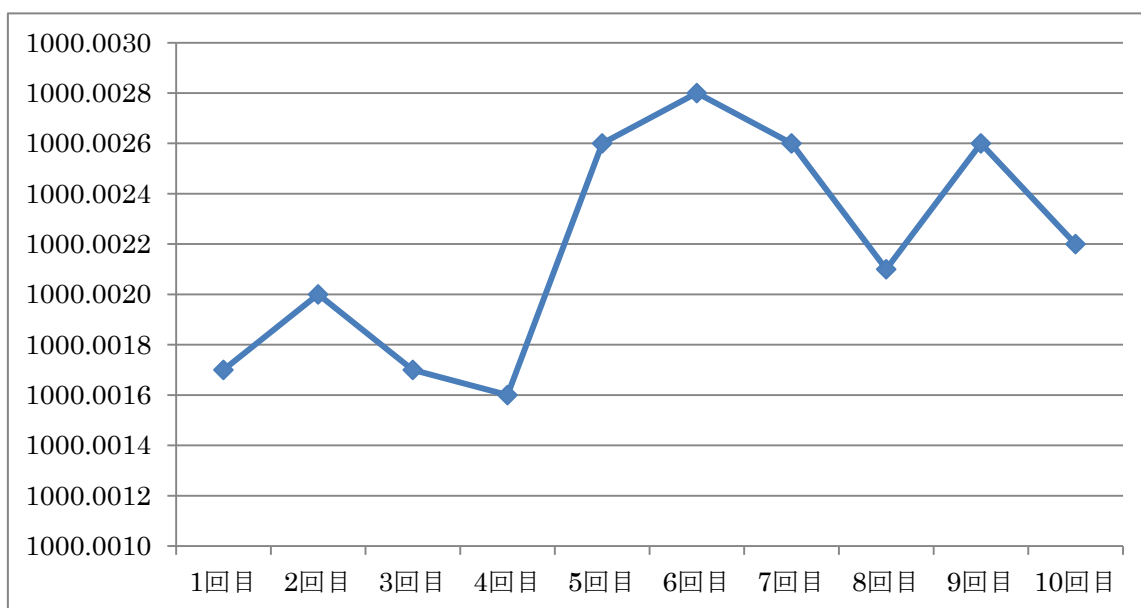
⁸ さらに、約 95%が \pm 0.0010g ($\pm 2\sigma$)、約 99.7%が \pm 0.0015g ($\pm 3\sigma$) に収まります。

さて、ここに MC-1000 を使って実際に 1kg の分銅を繰り返し測定した結果があります。あまり良いデータではありませんが、 $\sigma = 0.0005\text{g}$ の仕様は満たしています。

	1 回目	2 回目	3 回目	4 回目	5 回目
ゼロ点	0.0000g	0.0003g	0.0000g	0.0005g	0.0002g
測定値 (フル)	1000.0017g	1000.0023g	1000.0017g	1000.0021g	1000.0028g
スパン値	1000.0017g	1000.0020g	1000.0017g	1000.0016g	1000.0026g

6 回目	7 回目	8 回目	9 回目	10 回目	繰り返し性
0.0000g	0.0006g	0.0006g	0.0005g	0.0003g	
1000.0028g	1000.0032g	1000.0027g	1000.0031g	1000.0025g	
1000.0028g	1000.0026g	1000.0021g	1000.0026g	1000.0022g	0.000441g

分かりやすく、スパン値のみグラフにしてみます。



いかがでしょうか？ 標準偏差は 0.000441g ($< 0.0005\text{g}$) なのに、意外とばらついて見えることに驚かれたかもしれません (最大値と最小値の差が 12d あります)。この例からも分かるように、標準偏差はあくまで全体としての確率を示すものなので、個々の測定において数値が大きく変動する場合は往々にしてあり得ます。目量に対する標準偏差が大きい MC シリーズだと、その度合いが特に増すことを踏まえてください。

次に、偏置誤差です。注意書きにもあるように、MC シリーズの繰り返し性のカタログ仕様

は、重心調整皿または自動機を使用すること、つまり偏置誤差を取り除くことを条件としたものです。言い換えれば、それだけ偏置誤差の影響が出やすいため、重心調整皿や自動機がないと、繰り返し性が損なわれるリスクが高まります。

最後に、P.11 で述べた通り、マスコンパレータの使用法（等量比較法）は、ドリフトが発生することを前提に考案されています。従って、MC シリーズは同じ目量の他の天びんに比べてドリフトが出やすい傾向にあるものの、それを問題とはしていません。もちろん、測定のばらつき同様、設置環境や機器の設定、準備次第で、かなりのレベルまで抑えることは可能ですが。

以上のような理由から、質量比較以外の用途においては、MC シリーズの最終桁（MC-1000 なら 0.0001g の桁）は、あくまでその一つ上の桁（0.001g の桁）で値を確定するための補助的な表示とする使い方を、エー・アンド・デイとしては推奨しています。