

Know Your Beans:

動的画像解析法によるコーヒーの品質管理

関連項目 : Litesizer DIA, 食品粉体, 粒子径・形状解析, コーヒー豆, コーヒー粉

焙煎と粉碎は、コーヒーの品質を左右する大きな要因です。Litesizer DIA による焙煎豆の粒子径測定は、微粒子の混入を明らかにし、一方粒子形状解析は破損度合いを明らかにします。コーヒー粉の場合は、抽出方法に合わせて挽き方を変えるために、粒子径解析が欠かせません。



1 はじめに

コーヒーは、毎日 22 億杯飲まれていると推定され、世界で最も広く消費されている飲料であり、最も多く取引されている農産品でもあります。その生産は圧倒的に熱帯地域に集中しており、推定 2500 万世帯の農家にとって重要な生計手段となっています (1)。

このように多様な生産者が存在するため、コーヒーメーカーは、製品の官能特性を維持するために、サプライチェーンのすべてのステップで厳格な品質管理を行う必要があります。

生豆を左右する主な要因は、気候、土壌の種類、地形、貯蔵条件などですが、焙煎と挽きの工程も最終製品を左右する主な要因になります。

焙煎したコーヒー豆とコーヒー粉の両方で必要なテイティングの量を最小限に抑えるためには、形態における品質管理基準を確立することが必要不可欠です。ここでは、アントンパール社の動的画像解析 (DIA) 装置である Litesizer DIA 500 を使用して、この基準を確立する方法を紹介します。

2 実験条件

2.1 サンプルおよびサンプル調製

今回は、2 種類の市販コーヒー豆サンプルを使用しました。1 つ目のサンプルは、アラビカ種の焙煎豆を 100 % 使用した汎用コーヒーです (以下、アラビカサンプルと記載)。2 つ目のサンプルは、エスプレッソマシン用のコーヒーで、アラビカ種の焙煎豆 80 %、ロブスタ種の焙煎豆 20 % で構成されています (以下、ブレンドサンプルと記載)。

1 セット目の測定では、挽いていないコーヒー豆を測定しました。2 セット目の測定では、家庭用電動コーヒーグラインダーで挽いたサンプルを測定しました。後者の測定では、グラインダーを使用して 4 パターンの設定で、両方のコーヒーサンプルを各 10 g ずつ、30 秒間挽きました。

2.2 Litesizer DIA 500 の測定結果

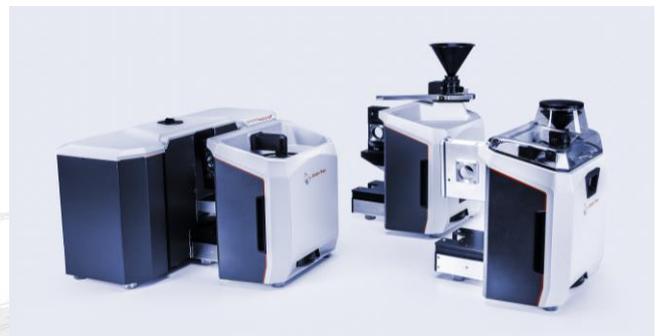


図1 : Litesizer DIA 500 と分散ユニット (湿式、乾式自由落下、乾式ドライジェット)

Litesizer DIA 500 は、モジュール式の動的画像解析装置で、装置本体に 3 種類の分散ユニットのいずれかを取り付けて使用します (図1)。

液体サンプル専用の分散ユニット (湿式分散ユニット)、圧縮空気を使用する乾燥粉体用の分散ユニット (乾式ドライ

ジェット分散ユニット)の他に、この装置では、自由落下分散を使用して、粉体や流動性の高い物質を分析することもできます。乾式自由落下分散ユニットでは、サンプルはバイブレーターによってホッパーからシュートへと移動し、重力のみによってカメラの前を流れていきます(図2)。この分散方式は、サンプルに加わる機械的な力を最小限に抑えられるという利点があり、もろいサンプルの分散に適しています。

Litesizer DIA 500 は、シングルカメラ、デュアル対物レンズの装置です。ズーム対物レンズの測定範囲は 0.8 – 300 μm 、標準対物レンズの測定範囲は 10 μm – 8 mm です。幅広い粒子径分布を測定する場合は、対物レンズを自動的に切り替えて、測定結果を繋げることができます。

コーヒー豆とコーヒー粉のサンプルに適用した測定パラメータは、以下の表 1 に詳述しています。

パラメータ	コーヒー豆	コーヒー粉
分散ユニット	乾式自由落下	乾式ドライジェット
倍率モード	標準対物レンズ	標準対物レンズ
フレームレート	自動	手動、50 fps
測定時間	03:00	01:00
追加の測定終了条件	なし	粒子数 = 300,000
フレームカバレッジ基準	デフォルト	デフォルト
圧縮空気の圧力	—	200 mbar
搬送モード	手動	手動
搬送速度	70 %	60 – 70 %
速度補正	なし	なし

表 1 : Litesizer DIA 500 におけるコーヒー豆とコーヒー粉の測定パラメータ

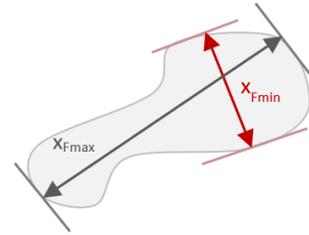
2.3 動的画像解析法における粒子径と形状の表現

動的画像解析法では、カメラで捉えた粒子の 2 次元投影像から粒子径を算出します。粒子の投影像から球相当径を算出する方法としては、一般的にフェレー径 (x_F) や投影面積円相当径 (x_A) が用いられます。

フェレー径 x_F (

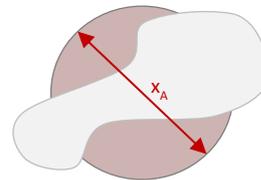
模式図 1) は、粒子の輪郭に接する 2 つの平行面間の距離に相当します。

これらの平面間の最小距離と最大距離を最小フェレー径、最大フェレー径 (x_{Fmin} , x_{Fmax}) といいます。



模式図 1 : フェレー径の最小値 (x_{Fmin}) と最大値 (x_{Fmax})

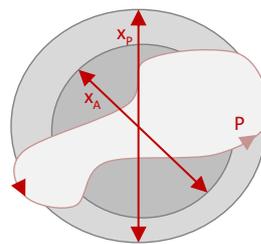
投影面積円相当径 (x_A) (模式図 2) は、粒子の投影面積 (A) と同じ投影面積を持つ球体の直径を表しています。



模式図 2 : 投影面積円相当径 (x_A)

粒子形状の解析も、粒子の投影輪郭から行われます。Litesizer DIA 500 は、アスペクト比、長短度、コンパクト度、凸度など 10 種類の粒子形状パラメータを自動的に算出します。

このレポートでは、円形度と呼ばれる形状パラメータに注目します。このパラメータは、粒子の投影面積と円の類似度合いを示し、外周の滑らかさを考慮するものです(模式図 3)。



模式図 3 : 形状パラメータとしての円形度

円形度は x_A/x_P で算出されます。 x_A は投影面積円相当径、 x_P は粒子の投影と同じ外周 (P) を持つ円の直径を表します。値は 0 から 1 の間の無次元数となり、値 1 は完全に滑らかな球形粒子であることを意味します。

3 結果と考察

3.1 コーヒー豆の乾式自由落下分散測定

コーヒーの風味は変化しやすく、空気に触れると容易に酸化するため、コーヒー粉よりもコーヒー豆の方が風味を維持することができます。しかし、焙煎すると豆がもろくなるため、加工や保管、輸送の際にどうしても破損が発生し、豆が割れて微粒子が発生してしまいます。したがって、豆の割れや微粒子の混入が少ないほど、風味を保っていると考えられます。



図2：乾式自由落下分散ユニットの大型振動ホッパーとシュートにより、コーヒー豆を分析可能

Litesizer DIA 500 の乾式自由落下分散測定（図2）でコーヒー豆を分析し、微粒子の混入度合いやコーヒー豆の破損度合いを調べました。

3.1.1 粒子径解析による微粒子混入の確認

サンプル中の微粒子分をより明確にするために、粒子径分布の結果は個数基準で、形状基準として最小フェレー径 (x_{Fmin}) を用いて表しています。

図3に示すように、両サンプルの粒子径分布は、コーヒー豆に相当する 8 mm 以上のピークが中心となっています。ただし、超微粒子（約 10 - 60 μm ）と微粒子（約 60 - 1000 μm ）は明確に識別できます。

興味深いことに、この微粒子（60 - 1000 μm ）は、ブレンドサンプルよりもアラビカサンプルの方が顕著でした。このことは、個数基準の x_{Fmin} の Q 値を分析することで確認できます（表2）。実際、2つのサンプルの Q_{10} と Q_{90} の差はわずかですが、 Q_{50} （メディアン径）の値は、アラビカサンプルで約 280 μm 、ブレンドサンプルで約 6520 μm と大きく異なります。

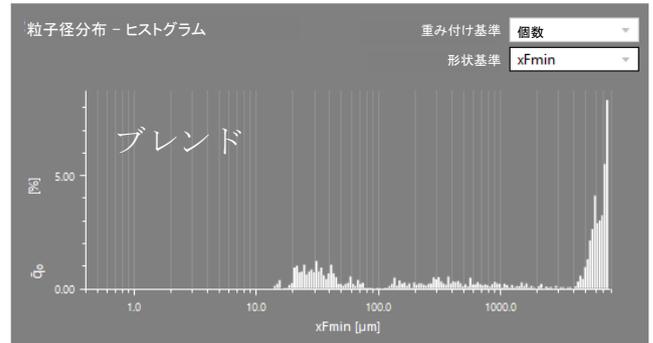
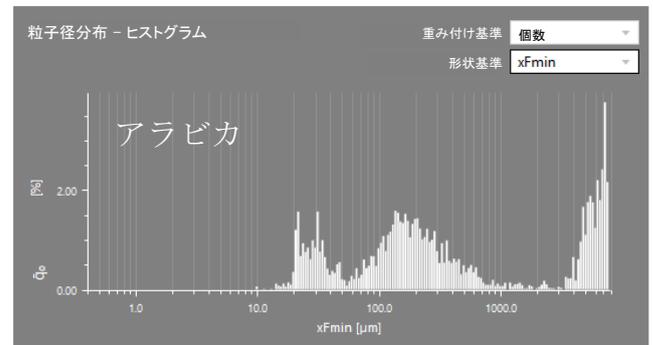


図3：乾式自由落下分散測定したコーヒー豆サンプルの最小フェレー径 (x_{Fmin}) の個数基準粒子径分布上：アラビカサンプル、下：ブレンドサンプル

サンプル	$Q_{10} (x_{Fmin})$ [μm]	$Q_{50} (x_{Fmin})$ [μm]	$Q_{90} (x_{Fmin})$ [μm]
アラビカ	30.5	279.7	7769.6
ブレンド	32.0	6522.3	7986.1

表2：乾式自由落下分散測定した2種類のコーヒー豆サンプルの最小フェレー径 (x_{Fmin}) の個数基準 Q 値

このことから、アラビカサンプルは、ブレンドサンプルに比べ、微粒子の混入が著しく多いことがわかります。

3.1.2 粒子形状解析によるコーヒー豆破損の確認

コーヒー豆の破損度合いを評価するために、上記の結果を用いて粒子形状解析を実施しました。

この解析では、サンプルのコーヒー豆を表す部分のみを考慮し、混入した微粒子分を考慮しないように、結果をフィルタリングします。

Litesizer DIA ソフトウェアでは、すべての粒子を個別に解析し、すべての粒子の属性を粒子の画像と一緒にデータベースに保存することで、このフィルタリング機能を実現しています（図4）。

粒子径パラメータ	形状パラメータ	画像パラメータ
xA: 7100,088 μm	アスペクト比: 0,7	シャープネス: 21,8
xFmin: 5844,595 μm	楕円比: 0,7	コントラスト: 1,0
xFmax: 8754,790 μm	不規則度: 0,7	
xLF: 8724,002 μm	長短度: 0,0	
xLG: 0,000 μm	円形度: 0,9	
xE: 0,000 μm	形状因子: 0,0	
xLmax: 875,404 μm	コンバクト度: 0,8	
xLmin: 614,979 μm	エクステント: 0,8	
	充塞度: 1,0	
	凸度: 1,0	

粒子径パラメータ	形状パラメータ	画像パラメータ
xA: 3660,461 μm	アスペクト比: 0,4	シャープネス: 17,6
xFmin: 2118,623 μm	楕円比: 0,8	コントラスト: 1,0
xFmax: 6568,071 μm	不規則度: 0,3	
xLF: 6542,840 μm	長短度: 0,3	
xLG: 1658,109 μm	円形度: 0,7	
xE: 6346,707 μm	形状因子: 0,0	
xLmax: 558,381 μm	コンバクト度: 0,6	
xLmin: 444,426 μm	エクステント: 0,8	
	充塞度: 1,0	
	凸度: 1,0	

粒子径パラメータ	形状パラメータ	画像パラメータ
xA: 182,357 μm	アスペクト比: 0,4	シャープネス: 21,7
xFmin: 123,595 μm	楕円比: 0,4	コントラスト: 1,0
xFmax: 288,029 μm	不規則度: 0,4	
xLF: 277,443 μm	長短度: 0,3	
xLG: 92,023 μm	円形度: 0,8	
xE: 283,816 μm	形状因子: 0,0	
xLmax: 29,792 μm	コンバクト度: 0,6	
xLmin: 12,857 μm	エクステント: 0,7	
	充塞度: 0,9	
	凸度: 0,9	

図4：代表的なアラビカサンプル粒子の粒子別データセット（データフィルタリング時に粒子データベースから見た場合）。

データセットに対してフィルタリングを行い、混入したと考えられる個数基準の x_{Fmin} が $3 \mu\text{m}$ 以下の粒子を除外しました。ソフトウェアで利用可能な 10 種類の形状パラメータのうち、豆の破損の可能性を最もよく表すのは円形度であると考えられます。

以下の図5に示すように、ブレンドサンプルはアラビカサンプルよりも全体的に高い円形度を示しています。さらに、円形度分布のスパン（曲線の幅）は、ブレンドサンプルよりもアラビカサンプルで有意に高く（表3参照）、より高い円形度プロファイルを示すことがわかります。

これらのことから、アラビカサンプルはブレンドサンプルよりも豆の破損が多いことが示唆されます。



図5：アラビカサンプル（緑色の曲線）とブレンドサンプル（黄色の曲線）の個数基準円形度分布個数基準 $x_{Fmin} \geq 3 \mu\text{m}$ の粒子でフィルタリングした結果

サンプル	Q ₁₀ (円形度)	Q ₅₀ (円形度)	Q ₉₀ (円形度)	スパン
アラビカ	0.775	0.870	0.909	0.154
ブレンド	0.825	0.893	0.924	0.111

表3：乾式自由落下分散測定したコーヒー豆サンプルの個数基準円形度 Q 値（個数基準 $x_{Fmin} \geq 3 \mu\text{m}$ の粒子でフィルタリングしたデータ）

3.2 コーヒー粉の乾式ドライジェット分散測定

コーヒー粉の粒子径は、抽出方法とともに、最終的な味に決定的な影響を与えます。抽出の際、コーヒーのさまざまな風味が同時に抽出されることはありません。酸味やフルーティーな香りが最初に出て、次に甘み、最後に苦みが出てきます。抽出方法に対して挽き方が粗すぎると、抽出が不十分となり、酸味に対して甘みや苦みが少なすぎることで、酸っぱい味になってしまいます。反対に、抽出方法に対して挽き方が細かすぎると、抽出が過剰になり、苦味が繊細な甘みや酸味をかき消してしまいます (2)。

そのため、抽出方法に合わせた挽き方が必要であり（表4）、工業的に挽かれたコーヒーの場合は、粒子径を厳密に管理する必要があります。

挽き方	平均粒子径	最適な抽出方法
粗挽き	1.8 - 3.0 mm	コールドブリューコーヒー
中粗挽き	1.4 - 1.8 mm	フレンチプレスコーヒー
中挽き	0.8 - 1.4 mm	フィルターコーヒー
中細挽き	0.5 - 0.8 mm	エアロプレスコーヒー
細挽き	0.2 - 0.5 mm	エスプレッソ、モカコーヒー
極細挽き	0.05 - 0.2 mm	トルココーヒー

表4：各抽出方法に最適な挽き方と対応する平均粒子径 (3)

ここでは、アラビカサンプルとブレンドサンプルについて、中粗挽き、中挽き、中細挽き、細挽き（以下、エスプレッソ挽きと記載）の 4 種類の挽き方を調査しました。

Litesizer DIA 500 に乾式ドライジェット分散ユニットを取り付けてサンプルの粒子径を分析しました。自由落下分散ではなくドライジェット分散を選んだ理由は、コーヒー粉は比較的凝集性の高い粉体であるため、粒子を完全に分散させるために圧縮空気を使用する必要があるからです。使用した圧縮空気圧は 200 mbar と低いですが、サンプルを完全に分散させるのに十分であり、同時に衝突による応力を最小限に抑えられることが証明されています。

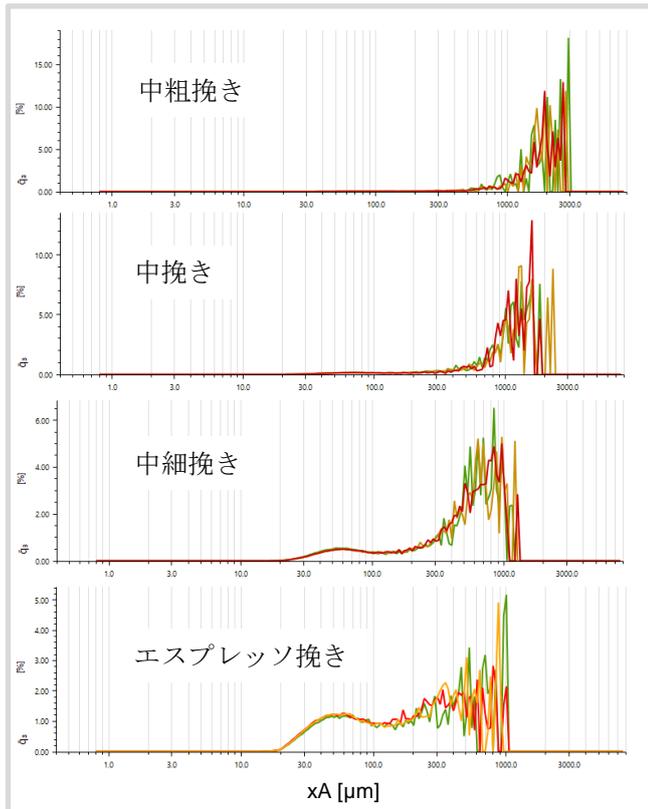


図6：投影面積円相当径 (xA) で表す、アラビカサンプルの各挽き方の体積基準粒子径分布 3回の繰り返し測定結果の重ね合わせ

挽き方	Q ₁₀ (xA) [μm]	Q ₅₀ (xA) [μm]	Q ₉₀ (xA) [μm]
中粗挽き	991.4 ± 93.6	1949 ± 70.9	2791 ± 134.5
中挽き	474.3 ± 45.1	1226 ± 55	1821 ± 284.3
中細挽き	88.3 ± 5.9	601.8 ± 9.8	1005 ± 34.5
エスプレッソ挽き	42.7 ± 1	242.5 ± 14.2	794.4 ± 42.8

表5：アラビカサンプルの各挽き方における投影面積円相当径 (xA) の体積基準 Q 値 3回の繰り返し測定 of 平均値 ± 標準偏差

挽きの効率を最もよく表すために、ここでは粒子径の結果を体積基準の投影面積相当径で示しています。

図6 と表5 に示すように、挽いたアラビカサンプルのメディアン径は、中粗挽きで 1.9 mm、中挽きで 1.2 mm、中細挽きで 0.6 mm、最後にエスプレッソ挽きで 0.24 mm でした。これらの値は、それぞれフレンチプレス、フィルターコーヒー、エアプレス、エスプレッソの抽出方法で推奨される粒子径によく対応しています (表4 参照)。

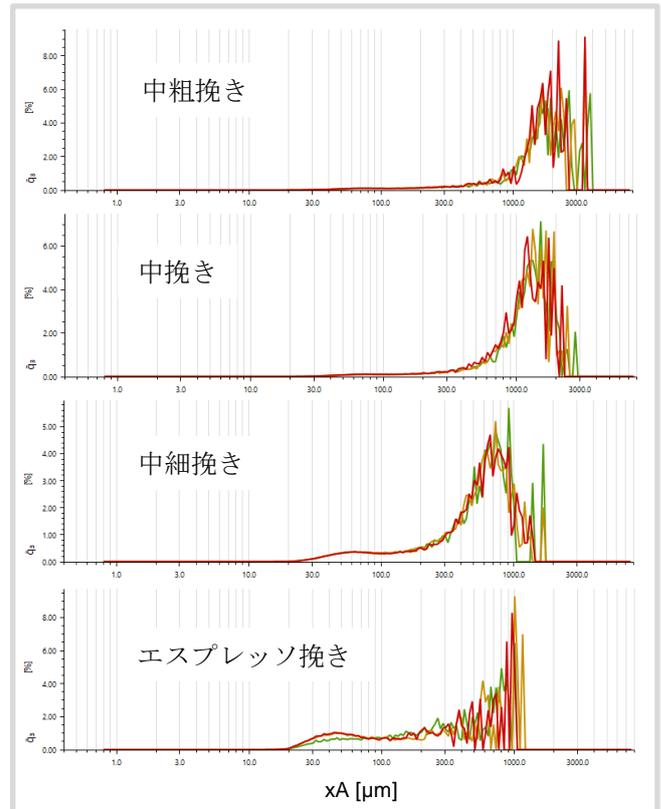


図7：投影面積円相当径 (xA) で表す、ブレンドサンプルの各挽き方の体積基準粒子径分布 3回の繰り返し測定結果の重ね合わせ

挽き方	Q ₁₀ (xA) [μm]	Q ₅₀ (xA) [μm]	Q ₉₀ (xA) [μm]
中粗挽き	688.1 ± 50	1759 ± 40.9	3007 ± 391.1
中挽き	564.2 ± 33.9	1287 ± 58.5	1967 ± 37.7
中細挽き	139.0 ± 3.3	621.1 ± 12.3	1029 ± 36.3
エスプレッソ挽き	48.4 ± 7.9	374.3 ± 20.9	983.2 ± 88.3

表6：ブレンドサンプルの各挽き方における投影面積円相当径 (xA) の体積基準 Q 値 3回の繰り返し測定 of 平均値 ± 標準偏差

ブレンドサンプルで得られた結果 (図7、表6) は、中粗挽き、中挽き、中細挽きについて、アラビカサンプルで得られた結果と同様でした。しかし、エスプレッソ挽きで得られた結果は顕著な違いが見られ、ブレンドサンプルはアラビカサンプルよりも微粒子の比率が少ない結果でした。これは、体積基準の Q₅₀ (xA) においても統計的に有意な差となって表れており、アラビカサンプルの 243 μm に対してブレンドサンプルのメディアン径は 374 μm となっています。

以上のことから、中粗挽き、中挽き、中細挽きに使用した場合、コーヒーサンプルの種類に関係なく、電動コーヒーグラインダーは効果的で、同じような径の粒子が作られることが示唆されます。一方で、エスプレッソ挽きの結果ではサンプルによって違いがあり、電動コーヒーグラインダーは、より破損しにくいブレンドサンプルを、よりろいアラ

ピカサンプルほど細かく挽くことはできないことが示唆されます。

4 まとめ

Litesizer DIA 500 は、コーヒー豆やコーヒー粉の粒子径と形状を、迅速かつ再現性の高い方法で分析することができます。

乾式自由落下分散ユニットは、流動性の高いコーヒー豆の分析に役立ちますが、コーヒー粉の分析には、凝集性のある粉体を圧縮空気で分散させる乾式ドライジェット分散ユニットが必要になります。

アラビカ種 100 % のサンプルと、アラビカ種 80 % とロブスタ種 20 % をブレンドしたサンプルで得られた結果から、アラビカ種のみの場合にはブレンドよりも破損しやすく、微粒子が多く混入していることがわかりました。また、アラビカサンプルの粒子は、電動コーヒーグラインダーで細挽き（エスプレッソ挽き）した場合、メディアン径がより細くなり、サンプルがよりもろいことが裏付けられました。

5 参考文献

1. **FAO.** Market and Trades: Coffee. *Food and Agriculture Organization of the United Nations*. [Online] [Accessed on: 27. March 2023.] <https://www.fao.org/markets-and-trade/commodities/coffee/en/#:~:text=Goodness%20in%20a%20cup,,80%20percent%20of%20world%20output..>
2. **Illy, Andrea & Viani, Rinantonio.** *Espresso Coffee: The Science of Quality*. Academic Press, 2005. 9780123703712.
3. **Severini, Carla, et al.** How Much Caffeine in Coffee Cup? Effects of Processing Operations, Extraction Methods and Variables. *The Question of Caffeine*. IntechOpen, 2017.

株式会社アントンパール・ジャパン 連絡先

Tel: 03-4563-2500

info.jp@anton-paar.com

www.anton-paar.com