

図6-6 焙煎の進行とガラス転移現象

焙煎開始とガラス転移現象

加熱をはじめてしばらくすると、ある時点から、それまでとても硬かった豆の組織がいったん緩んだように軟化します。とは言っても指では潰れず、ペンチか何かで挟んで潰せる程度ですが……。これはコーヒー豆以外にもさまざまな食材や非晶性の物質に見られる現象で「ガラス転移現象」と呼ばれています(図6-6)。この性質を持つ物質は、温度が低いときはガラスのように硬く、ある一定の温度(ガラス転移温度)を越えるとゴムのように軟化します。ガラス転移温度は物質に含まれる水分の量によって変化し、含水量が高いほど低い温度でゴム化します。

コーヒー生豆も加熱によって、細胞壁が最初の硬い「ガラス状態」から軟らかい「ゴム状態」に変化します。細胞壁が軟化して伸縮しやすくなると、細胞内に発生した水蒸気やガスが原形質

連絡を通過して外に逃げ出しやすくなります。こうしてゴム化した生豆からは水分蒸発が盛んになり、どんどん縮んで表面に皺がよってきます。これが「水抜き」と呼ばれる段階です。焙煎機内部の湿度が上がって豆がふやける感じから「蒸らし」と呼ぶコーヒー関係者もいます。

加熱による変化は細胞壁だけでなく、細胞壁に囲まれた「小部屋」の内部でも生じます。焙煎前の生豆では、細胞膜に包まれた細胞の本体が、小部屋の中で干しブドウのように乾いて縮んだ状態になっていますが、加熱につれて残存している水分が煮立ち、やがて細胞を構成していたさまざまなものが混じり合って、ぐつぐつ煮込んだシチューのように変化していきます。

もともとコーヒー生豆は、ロブスタ種で8%、アラビカ種では11%前後の油脂分を含み、そのほとんどは細胞質に油滴として浮かんでいます。また、カフェインやクロロゲン酸は大部分が液胞の中、タンパク質や糖類などは細胞質など、生豆の細胞内ではそれぞれ別の場所に貯蔵されていますが、煮込んでいるうちにこれらが一つに融け合って、どろどろした餡状のものに変化します。加熱を続けるとこれが沸騰して、小部屋内部の壁や天井にまで飛び散り、最終的には周りに面がどろどろに覆われて、小部屋の中心にぽっかりと空間ができた状態になるのです。

再硬化と内圧上昇

こうしているうちにも、加熱によって豆の水分はどんどん蒸発していきます。水分が減るとガラス転移温度が上昇するため、やがて豆の温度と逆転し、ゴム化していた生豆の細胞壁が再びガラス化して硬くなります。するとそれまで細胞壁が伸縮、変形して逃がしていた圧力を逃がせなくなり、原形質連絡も餡状のどろどろで塞がれて、小部屋内の圧力（空隙内圧）が上昇していきます。なにしろ小さな空間なので正確な計測は不可能ですが、焙煎前後の豆の膨張率などから推算して、中煎り付近で8気圧、深煎りではなんと20〜25気圧にまで到達すると言われます。

この高い圧力で、小部屋の中のどろどろは細胞壁に押し付けられて圧縮され、その内部の高圧・高温下で焙焦反応が進行します。また内圧上昇で小部屋が大きく膨張し、焙煎豆全体も大きく膨らんで、表面の皺が伸びます。この結果、再び硬いガラス状態……とはいっても焙煎前とは異なり、内部に多数の空隙が生じ、指で挟めば碎ける「硬くて脆い」状態になるのです。

この段階まで焼けば、一応はコーヒーマイルで挽いて抽出して飲むことができます。コーヒード豆、すなわち「焙煎豆」と呼べるものになっています。あとは目的の香味になった時点で焙煎を止めれば、おいしい焙煎豆の出来上がり、というわけです。

コーヒード豆は2度ハゼる

煎り止めが近づくころ、コーヒード豆には大きな、そして不思議な変化が生じます。それが「ハゼ」です。「パチツ」と音をたてる一ハゼと、それが収まった後に再び訪れる「ピチピチ……」という二ハゼ。このとき、コーヒード豆の中ではいったい何が起きているのでしょうか。

加熱すると「ハゼる」食べ物と言えば、ポップコーンが真っ先に思い浮かぶのではないのでしょうか。しかしポップコーンとコーヒード豆のハゼ方はかなり異なります。トウモロコシの中でもポップコーン用の品種は皮が非常に堅く、加熱するとこの皮で粒の内部に水蒸気が閉じ込められて内圧が約10気圧まで上昇し、圧力に耐えられなくなった瞬間に「ボン」と大きな破裂音を出してハゼます。それと同時に、粒の内部でゴム化していた高圧・高温の胚乳が一気に膨張しながら噴出し、次の瞬間には大量の空気を含んだままガラス化して、軽い食感のポップコーンが出来上が

ります。破裂からガラス化までわずか90ミリ秒の出来事です。ハゼる瞬間、爆発的に大きく膨張するのが特徴で、しかもハゼは一粒につき必ず1回生じます。

一方、コーヒー豆ではこのような「爆発」は見られず、一ハゼが起きる時期と前後して豆の皺が伸び始め、以降次第に膨らんでいきます。また豆の個数と比べるとハゼ音の回数は少なく、ほとんど一ハゼの音が聞こえないこともあります。それでも豆はちゃんと膨らみます。そして何よりも「2度ハゼる」のが大きな特徴です。このコーヒー独特のハゼが生じる仕組みを解明した研究はまだありません。でもせつかくなので、状況証拠から推理してみたいと思います。

2回のハゼのうち、後から生じる「二ハゼ」の方が判りやすいので、順番は前後しますが、まずはそちらを見てみましょう。二ハゼが起きるのは、豆がガラス化して硬くなった後です。高くて小さな音がたくさん聞こえることから、かなり高い割合の豆がハゼていると考えられます。二ハゼ中に煎り止めして豆を取り出すと、手網の外でもしばらくハゼが続きます。これを注意深く観察すると、ハゼ音と同時に、胚芽の真上あたりから、小さな楕円形の豆のかけらが剥がれて飛んでいるのがわかるでしょう。よく見ると、すでにその部分が剝離した豆のかけらが剥がれて飛んでいるのがわかります。また豆を切って断面を見ると、内乳の板の中央付近に、ぼっかりとした空隙ができているのがしばしば見られます。この空隙は二ハゼ前には見られません。これらが二ハゼの原因だと思われれます。

コーヒー豆の内乳は、組織の中央部分(内部内乳)よりも外側(外部内乳)が丈夫で、しかも中心部に細かい隙間があります。二ハゼの少し手前から、煙の色が少し変わって二酸化炭素などの燃焼ガスの発生が急増しますが、このガスの一部が内部の隙間に閉じ込められて逃げ場を失い、どんどん内圧が上がって限界を越えた瞬間、破裂音を発しながらハゼるのです。なお剝離が起きる胚芽の真上は、豆組織が特に薄いので、ここから壊れやすいのだと考えられます。

一方、一ハゼは二ハゼより音が低くて大きいことから、音響的には二ハゼよりも大きな空間から発する破裂音だと考えられます。じつはそんな広い空間は、豆の中には一つしかありません。くるると丸まった内乳の間、センターカット奥の隙間です。一ハゼは、豆がガラス化して硬くなり膨張しはじめる頃に起きますが、このとき隙間の一部が塞がると、そこに溜まった水蒸気やガスが逃げ場を失って内圧がどんどん上がり、やがてそれが破裂音とともにハゼるのだと考えられます。隙間が完全に塞がるかどうかは、内乳の丸まり方や膨らみ方、乾燥途中に豆のひび割れが起きるかどうかわかるため、すべての豆が一ハゼの音を立てるわけではないことの説明もつきまします。本当にこの推理が正しいかどうかは、今後科学的に検証したいことの一つです。

油脂分の滲出

一ハゼを過ぎ、二ハゼが盛んになる頃には、豆の表面に油脂分がにじみ出し、テカテカとした

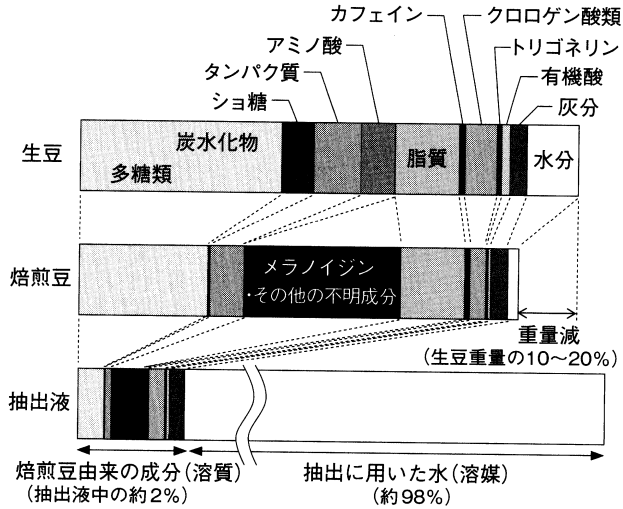


図6-7 コーヒーの成分組成

けです。焙焦反応のほとんどは、ろど、ろの中

中で進行するため、細胞壁を構成するヘミセルロース、セルロース、リグニンの大部分はそのまま残ります。これらの成分は、ただけ煮出しても溶け残る「豆の骨格」、すなわち「コーヒー滓^{ヌグ}」として抽出時の粉の層を支える役割も果たします。

変化しない成分は、ろど、ろの内部にも存在します。その代表がカフェインです。カフェインは非常に熱に強く、焙煎中に分解されたり他の化合物と反応したりすることはありません。ただしカフェインには昇華性があり（昇華点178℃）、焙煎時の温度が130℃を越える頃から直接気体になって少しずつ豆から抜けていきます。とは言え、その減少率は生豆に含まれていた量



成分の化学変化

ここまでは焙煎中の物理的な変化を追ってきましたが、このときコーヒー中の成分は、どう化学変化しているのでしょうか。

変わらないもの、変わるもの

コーヒー豆の成分組成を焙煎前後で比較すると（図6-7）、水分以外の成分の3~4割が焙煎で変化すると考えることができます。逆に言えば、6~7割は焙煎前後であまり変化しないわ

光沢が見られるようになります。細胞壁の一部が壊れたり焼け焦げたりすることで、細胞内の油脂分が移動しやすくなり、表面ににじみ出てきたものです。このあたりが「フレンチロースト」と呼ばれる深煎りです。また、もつと浅い焙煎度の豆でも、焙煎後に時間が経つと、中の油脂分が徐々に拡散して表面ににじみ出てきます。このため一昔前は「表面に油が浮くのは豆が古い証拠だ」と言う人もいたようです。ただ実際は、焙煎直後でも深煎りなら表面に油がにじみずし、生産国で精製後に生豆表面の薄皮を取るための、「磨き」を強くかけると、表面のワックス層が傷ついて油の滲出が増します。このように油脂分がにじみ出ていても一概に古い豆とは言えませんが、同じ生豆を同じ条件で焙煎した場合なら、鮮度の目安として使えることがあります。

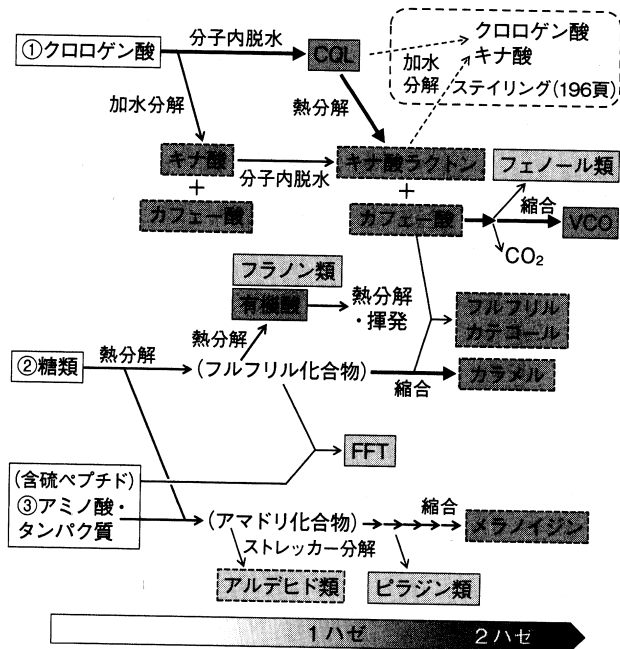


図6-8 焙煎中の主な成分変化 濃い灰色は味、薄い灰色は香りに関係する成分

複雑怪奇な焙焦反応

の5〜10%に留まり、深煎りと浅煎りでの違いはごくわずかです。焙煎豆の断面を電子顕微鏡で観察すると、固体に戻ったカフェインの針状結晶がしばしば見られます。また焙煎機の釜にも同様の結晶が付くことがあります。

カフェインと並んで変化が少ない成分は油脂類です。天ぷら油の例からもわかるように、油脂は長期間酸素に触れると劣化しますが、短時間ならかなりの高温でも比較的安定です。油脂は、焙煎中に内部で生じるどろどろの4分の1〜5分の1を占め、自分自身はあまり変化せずに、他の物質を溶かし込んで反応させる「場」として働きます。また揮発性の香り成分や炭酸ガスを溶け込ませたり、表面に吸着したまま保持して安定化する働きもあります。このほかミネラル（灰分）などの無機物も焙煎では変化しない成分です。つまり生豆の成分のうち、細胞壁の成分、カフェイン、脂質、ミネラルが「変わらないもの」で、それ以外が「変わるもの」。言い換えれば、後者は焙焦反応を経てコーヒーの色や香味へと変わる「前駆物質」に当たります。

一口に「焙焦反応」と言っても、その実態は何百種類もの前駆物質が、たくさんの化学反応を経て、最終的には何千もの複雑な化合物が生まれるという、じつに混沌とした化学反応の集まりです。その科学的な全容解明にはまだまだ程遠く、判っていることはほんの一部分にすぎませ

ん。しかし前駆物質の中でも3種類、①クロロゲン酸、②糖類、③アミノ酸（タンパク質）、の変化を理解できれば、大まかな流れを掴めます（図6-8）。

もっとも重要なのは、クロロゲン酸（①）から苦味成分が生まれる一連の化学変化です。ほかではあまり見られないコーヒー特有の機構で、本書では、以下「（コーヒーの）苦味生成反応」と呼ぶことにします。

この反応を経て生豆中のクロロゲン酸から、コーヒー

らしい苦味成分（CQLやVCOなど）に変化します。また褐色色素、焙煎後期の香り成分であるフェノール類（146頁）なども、ここから生成します。これに次いで重要なのが「メイラード反応」。別名アミノカルボニル反応、褐変反応とも呼ばれ、還元性の糖類②がアミノ酸③と反応して、最終的に高分子の褐色色素であるメラノイジンを生み出す一連の反応です。調理科学分野では真つ先に名前が挙がる有名な反応で、ほかの食品と同様、コーヒーでも焦げ色や、ピラジンやアルデヒドなどの香り成分の生成に関与します。このメイラード反応と似た褐変反応が「カラメル化」。こちらはアミノ酸が介在せずに糖類②だけで進みます。最終的には糖類同士が重合して黒褐色色素であるカラメルが生成され、反応途中で酢酸などの有機酸や、フラノン類などの香り成分も生じます。

また、それぞれの反応経路で生成した生成物が互いに反応することで、「第三の苦味」フルフラルカテコールやFFTなども生み出されます。これでもまだほんの一端ですが、コーヒーの色や香味はこうして生成されているのです。

辿った過程でおいしさは変わる

焙焦反応が進行するには、まず一定以上の温度が必要です。その上で水分が多い状態ならばさまざまな分子が水と反応して分解（加水分解）されやすく、少ない状態ならばその逆反応である脱水縮合や熱分解が進みやすくなります。このため水抜き段階では主に加水分解が、煎り込み段階では脱水縮合や熱分解などが進行しますが、コーヒーの香味や色の大部分は、後半の煎り込み段階で生み出されます。「乾煎り」にならないとコーヒーにならないのはこのためです。

ただ、後半の条件が同じなら同じ香味になるかと言うと、そんなことはありません。そこに辿り着くまでに成分がどう変化したかも重要です。例えば、水抜きのとときに「高温多湿」の領域に長く留まると、クロロゲン酸の加水分解が促進されて減少し、強い渋みのカフェー酸とシヤープな酸味のキナ酸が増加します。1分子の酸が2分子になる分、酸味は増加し、後半にクロロゲン酸の脱水縮合で生成する「中煎りコーヒーの苦味」代表のCQL（132頁）は減少します。またメイラード反応中間体の加水分解（ストレッカー分解）が促進してアルデヒド（145頁）が増加すると蒸れた匂いが強まります。その結果、加水分解が進みすぎると「渋酸っぱくて蒸れた匂い」になるというわけです。手網焙煎で「生焼け」にならないようにと注意したのはこのためです。

ただし加水分解も適度に進めば、決して悪いことばかりではありません。タンパク質や多糖類が加水分解されて生じるアミノ酸、単糖類は、元の高分子よりも反応性に富むため、その後の反応が進みやすくなって香味が強まります。また生豆中の精油には「配糖体」という、糖と結合した状態のものがあ、それが加水分解されると精油が遊離して香りが強まります。このように、どういいう温度、水分帯をどれくらいの間を掛けて通過するかという「豆が辿る焙煎の道筋」

も、おいしさに大きく影響します。例えば手網焙煎でも、最初に全体をアルミホイルなどで覆って「蒸らし」、途中で外して焙煎するとかかなり香味が変わりますので、一度試してみてください。



焙煎後の経時劣化

最初の頃はおいしかった焙煎豆も、時間が経つと膨らまなくなり、風味もどんどん劣化します。俗に「酸化してまずくなる」と言われますが、焙煎豆の劣化は3タイプに大別され、厳密には酸化が関わるものはその一つ（酸敗）だけ。しかも、むしろ他の2タイプの方が重要です。

A ステイリング・焙煎時に生じたクロロゲン酸ラクトンやキナ酸ラクトンは水分子と反応すると容易に加水分解されてクロロゲン酸やキナ酸に戻り、pHが低下してすっぱくなります。水分が多いときのみ生じる反応ですが進行は早く、ホットプレートで保温しているコーヒー液なら数十分、焙煎豆が吸湿したときにも常温1〜2日で違いがわかるくらいに変化します。

B 香りとガスの損失・焙煎した直後から、コーヒー豆からは炭酸ガスと一緒に香り成分が抜けていきます。揮発性が高い香り成分ほど消失が早く、繊細な香りを持ち味とするコーヒーほど特長を失って凡庸になりがちです。またガスが抜けた豆はお湯をかけても膨らみにくく、豆の組

織が「開きにくく」なるため、成分の抽出効率が悪くなります。水分が少ない条件下ではもともと早く生じる劣化で、常温なら10〜15日で違いがわかるくらいに変化します。品質重視の自家焙煎店で「おいしく飲めるのは焙煎後2週間以内」と言うのはこのためです。

C 酸敗・油脂分を構成する脂肪酸が空気酸化を受けると不飽和度（分子中の多重結合の割合）の高い脂肪酸になり、それがさらに酸化されると炭素数6〜9程度の低級脂肪酸に分解され、油の傷んだ嫌な臭い（酸敗臭、ランシッド）とpHの低下をもたらします。これが酸化による劣化ですが、進行は意外に遅く、違いがわかるくらいに変化するには常温で7〜8週間かかると言われています。