

ケーキは崩れて粉になる

Cake Collapses and Transforms into Powder

中川 究也*

Kyuya Nakagawa



巻頭言執筆の依頼を頂いた。バックナンバーをめくりながら思う。歴々の面々が担当してきた栄誉ある巻頭の言の執筆を拝命するとは、小生もついに偉くなったかと。しかし手を胸に置いて聞こえてくる真実の声は、そんなことはないと言っている。ひょっとすると、粉体工学分野における研究者層の崩壊が始まり、小生のようなものに執筆依頼をまわさなくてはいけない程の危機に直面しているのか。ならば分不相応ながらも引き受けざるを得まい。皆様においては、筆者がもつ「崩壊」への危機感もしくは執着心が、本稿を書かせていることをどうぞご理解願いたい。

早速、崩壊について書かせて頂こう。工業的な凍結乾燥を扱う実務者にとって、崩壊（コラプス）とは、切っても切れない目の上のたんこぶのような現象である。同時に、凍結乾燥を研究する者にとっては宿命のライバルのようなものであり、その用語は甘美にすら響く。凍結乾燥とは凍結させた材料の水分を昇華によって取り除く乾燥法である。乾燥製品は凍結時のバルク形状が保持され、いわゆる乾燥ケーキができあがる。濃度 20% の糖溶液を凍結乾燥させれば、空隙率およそ 80% のケーキができあがる。この空隙はもともと氷があったところだ。凍結させた糖溶液は水結晶と凍結濃縮相に分相している。氷の抜けた後に残る凍結濃縮相は水と糖の混合物だが、多くの場合は過冷却（過飽和）が保持されたままガラス（もしくはラバー）状態で乾燥が進行していく。乾燥中の凍結濃縮相の温度がガラス転移点以上になると、これが流動して既に乾いた層を湿り戻し、いわゆる乾燥ケーキの崩壊（コラプス）を引き起こす。従って凍結乾燥はコラプスを発生させないように操作を進めることが重要課題である。

さて、凍結乾燥が上手くいったとしよう。糖溶液から作った凍結乾燥ケーキはふわふわのスポンジだ。この軽くて甘いケーキは、吹けば飛んでいってしまいそうだが、

それより前に早々に湿気を吸い、気づけばしぼんで水滴になってしまっただろう。これを湿度誘起崩壊という。吸湿が引き起こすこの崩壊は、あるタイミングでガラス・ラバー転移が起こることで進行する。

続いて、懸濁密度 20% の無機粉体の分散液を凍結乾燥させてみよう。やはり空隙率 80% のケーキができるはずだ。粉体の特性にも依存するだろうが、粒子同士は比較的弱い相互作用でケーキ構造を保持している。この状態の凍結乾燥ケーキを、とある学術論文で「砂の城」と表現されていた（どの文献だったか思い出せるといいのだが！）。無機粉体が構築する空隙率 80% の城。指の先で触れば直ちに崩れ、ただの粉に戻ってしまうだろう。「砂の城」で終わらせないために焼結させて多孔性材料をつくることがその論文の本意だった。だが、何よりもポストドク時代から凍結乾燥に触れてきた筆者にとって、「砂の城」と言う言葉は大きなイマジネーションを与えてくれた。当時、ナノ粒子の懸濁液を凍結乾燥させ、ナノ粒子によって構築されたマクロ細孔を持つ構造材料を作るなんて研究をしていた。何か面白いことに使えそうだなと思いながら取り組んでいたが、研究力の未熟な筆者にとっては「砂の城」のようなプロジェクトだった。作っている時は夢中で分からないけれど、ふと立ち止まって指でつついた途端に崩壊してしまう。

凍結乾燥研究はしぶとく続けている。乾燥過程での崩壊（コラプス）には外観からは判断できないミクロなコラプスがある。実はこれが製品の歩留まりに繋がっている。乾燥ケーキを構成する骨格構造の形状変化でミクロコラプスの程度を定量評価できそうだ。X線CTを使った分析でそれを明らかにできた。次のステップは製造現場で実施できる試験方法を考えること。形状が違う粉体は、充填特性が異なる。それならば、凍結乾燥ケーキの骨格を一度バラバラにし、粉を集めて充填特性（ハウスナー比）を評価してはどうか。せっかく凍結乾燥させて作ったケーキを破碎して粉にする。これを円筒形の容器に緩く充填してタッピングを繰り返す。破碎粒子の充填特性は、乾燥過程で発生したコラプスの度合ときれいに相関していた。そう、「砂の城」は崩れたとしても、その砂が城の成り立ちを語ってくれる時もある。

先に書いた粉体工学分野の研究者層の「崩壊」もきっと心配には及ばないだろう。それはいわゆる崩壊ではなく、きっと我々がまだ知らない何かを語ってくれているのだろう。だが、そもそもそこに「崩壊」があるのか、実は筆者は及び知らないのだ。少なくとも耳にしたことはない。

（著者紹介）

- 2003年 京都大学 工学研究科化学工学専攻博士後期課程修了・工学博士
 2003年 チュラロンコン大学（タイ） 博士研究員
 2004年 リヨン第一大学（仏） 博士研究員
 2006年 兵庫県立大学工学研究科 機械システム工学専攻・助教
 2011年 兵庫県立大学工学研究科ナノマイクロ構造科学研究センター・准教授
 2013年 京都大学農学研究科 食品生物科学専攻・准教授
 2019年 京都大学工学研究科 化学工学専攻・准教授
 2024年 九州大学工学研究院 化学工学部門・教授
 専門：乾燥プロセス、凍結乾燥、食品工学
 * 連絡先 kyuya@chem-eng.kyushu-u.ac.jp