

「化学ゲルの延性破壊」 まえがき

パリ第7大学 物理教室 関本 謙¹

(2009 年 12 月 14 日受理)

このたび、「化学ゲルの延性破壊」に関して田中良巳氏にご自身のお仕事を中心に寄稿をお願いしました。北大のゲン研究室で作られた DN (double network) ゲルはそのタフさ、延びやすさについて従来知られていたゲルにみられない性質をもっていますが、化学架橋されたゲルであるにもかかわらず破壊が脆性 (brittle) でなくて延性 (ductile) であることも興味の一つです。以下の本稿ではその一見矛盾するように見える性質をメゾスコピックな視点から分かりやすく説明していただきます。

各地編集委員として解説記事の執筆をお願いしたかったのは、破壊をマクロとメゾという異なる尺度で複眼的に見る、という田中氏のアプローチが DN ゲルに限らない適用性を持つのではないかと思うからです。そのサポートとして以下に私が遭遇した例を簡単にご紹介させていただきます。

私の勤務する大学では学部3年生に半年1テーマの実験演習を行います。2004年後期(2005年の冬)に Patrice Lynch, Dehbia Osmani, Sarika Mamodaly の3人がシリカガラスの破壊実験を行いました。顕微鏡観察に通常使う厚さ1ミリのスライドガラスを、長い辺が地面に密着するよう垂直に支え、反対側の長い辺の中央を上から自由落下させたハンマーで割るという簡単な設定です。地面は重い鋼鉄の板、ハンマーの先も鋼鉄で90度の角をもつ楔形をしています。ハンマーの重さと落とし初めの高さを変える事により、衝突時のエネルギーと運動量の一方を変えずに他方を変えることができます。実験でわかった事は、破壊には部分破壊—ハンマーの当たった周辺が砕ける—と貫通破壊—ハンマーの衝突点から1本以上の亀裂がスライドガラスを貫通して地面に達する—の2種類ある事、そうしてその二者を区別するのは、衝突時の運動量ではなくエネルギーだという事です。衝突時のハンマーが持っていた運動エネルギーの臨界値はほぼ1.3Jでした。ただし破壊表面自体のエネルギー*は約 10^{-5} ジュールとハンマーの与えたエネルギーの0.01パーセント程度にすぎませんでした。貫通破壊も同程度です>(*部分破壊で生じる延べの破壊面積は約 $10\text{mm}^2 \times 2$ 、文献によるシリカガラスの表面エネルギーは約 0.7J/m^2)。定性的結果はガラス工業や自動車の安全性などの分野でつとに知られているのですが理論的説明は不勉強にして知りません。以下は私の推測です。運動量(あるいは力積)が破壊の種類の決め手でないという事は一瞬のインパクトが現象のすべてではないという事を示唆すると思います。実際にインパクト周辺の破壊は複雑に細かく砕けており、マクロに見れば砕けた体積領域ができたと思えるほうが自然です。破壊表面のエネルギー自体は無視できるくらい小さいことと考え合わせると、ハ

¹「物性研究」各地編集委員。第2所属: ESPCI, Physico-Chimie Théorique.
E-mail: ken.sekimoto@espci.fr, sekimoto@yukawa.kyoto-u.ac.jp

ンマーは最初のインパクトの後にも弾性波を地面とやり取りしながら、ズズズッと徐々にガラス試料に食い込み、その過程でエネルギーを失ったと考えられます。砕氷船のイメージです。そこで (1) ある深さ u_c まで食い込んだところで貫通破壊が可能になる事、その深さまでは (2) 深さ u に応じた反作用力 $F(u)$ をハンマーに返す事、の2点を仮定すると臨界の運動エネルギーは $F(u)$ の $u=0$ から u_c までの積分で与えられます。とってつけたような仮定ですが、(2) はクーロン摩擦や延性破壊での散逸エネルギーが摩擦や亀裂進展の速度でなく進行距離で決まる事に類推的です。周知のように乾いたシリカガラスの破壊は脆性破壊ですが、これは破壊領域の詳細を記述するけれども、マクロな現象としてはガラス破壊といえども延性的に扱えるのではないかと思います。思い返せば、「燃える／燃えない」「切れる／切れない」といった日常的には区別が明らかな事柄も、酸化反応の時間尺度や、分子尺度の結合解離などまで考えるとマクロでの区別をそのままメゾ・ミクロに持ち込めない場合がいろいろあると思います。田中氏の解説では破壊現象に関してこのような複眼的なアプローチをどうやって実験と理論を比較できるレベルまで深化するかが語られています。

以下は余白を埋める蛇足ですが、直線上に互いにちょうど接触して並んでいる要素（ステンレス球など）に同じようなクラスターを正面衝突させる、いわゆる「ニュートンのゆりかご (Newton's cradle)」の問題で、要素間の相互作用次第で運動量の再配分のされ方が非常に異なることが、最近わかっています。高速度カメラや計算機のパワーアップによって、従来よりうんと豊富な情報がえられる今日、古典力学の世界でさえ従来のマクロの直観・通念が通じなくなるのは愉快的なことだと思います。

以下の田中氏の本文ができればソフトマター関係以外の読者の方々にも関心をもって読まれれば幸いです。