

3. 2003年度 共同・プロジェクト研究報告

高分子ゲル固体を用いた衝突現象の解明

研究代表者 研究員 松下 貢 (中央大学理工学研究科)
共同研究者 研究員 山崎 義弘 (早稲田大学理工学部)
共同研究者 客員研究員 田中 良巳 (北海道大学創成科学研究機構)
共同研究者 客員研究員 奥村 剛 (お茶の水女子大学理学部)
共同研究者 準研究員 小林奈央樹 (中央大学理工学研究科)

1 背景

固体の衝突は、惑星科学、材料力学 [1]、球技 (戯) [2] など、基礎科学から工学あるいは日常生活に至るまで広範囲の事柄に関わる現象である。その科学的な研究の始まりは、ヘルツによる弾性接触理論 [3] の提出とその結果の接触時間問題 (2 物体の衝突において、衝突速度とそれらが接触している時間の関係を問う問題) への適用にまで遡ることが出来る。20 世紀以降は、固体衝突の研究は主として応用的な観点から行われて、金属を中心とする構造材料の衝突特性について多くの知見が蓄積されてきた。さらに、1990 年代からは、粉体ダイナミクスを基礎づけることを目的として、球状固体の衝突現象が、再び基礎的・物理的な観点から研究されるようになってきている [4,5,6]。

一方、いわゆるソフトマターと総称されるような物質群における衝突現象には、それ固有の意義を見出すことができる。ソフトマターは緩衝材として用いられ、生体組織のモデル物質とみなされているからである。この研究では、ソフトマターの一つであるゲルにおける衝突を研究する。特に、ヘルツ理論 (あるいはその元になる線形弾性論) が破綻するであろう弾性的大変形を伴う衝突における、変形の時間変化を扱う。

2 実験

本研究では、水を溶媒 (膨潤媒) とするアクリルアミドゲルを用いた。蒸留水にモノマー状態のアクリルアミド

(acrylamid:AA) と架橋分子メチレンビスアクリルアミド (N, N'-methylenebisacrylamide:BIS) を溶解させ、ラジカル形成剤であるアンモニウムペルオキシサルフェート (ammonium peroxodisulphate:APS) と反応促進剤であるテトラメチルエチレンジアミン (tetramethylethylenediamine:TEMED) を加えることでゲルを合成する。この AA と BIS の濃度を変化させる (主には BIS 濃度) ことでゲルの Young 率 E をコントロールする。表 1 に、本実験で用いたゲルの組成を示した。(またこの表において、ゲルを区別するために A10B4 等の略称を導入した。)

また、この研究に先立って、同じゲルの粘弾性測定を行った。ここで用いられているゲル試料は、0.1Hz から 100Hz 程度までの振動数に対して力学応答はほとんど変化しなかった。表 1 には、50Hz の振動数における複素 Young 率の実部 E' と $\tan \delta$ の値を示した。このデータから、本実験におけるゲル試料は、非圧縮性の弾性体と見なすことができる。以下では、上の E' を、通常の Young 率 E と同一視する。さらに表 1 には E' とゲルの密度 ρ から決まる特徴的速度スケール $V_c = \sqrt{E'/\rho}$ の値も合わせて示した。

衝突実験には、半径 25mm の球状ゲルを用いた。まず、吸引チューブによってゲル球を基板 (厚さ 10mm のアルミ板) の上方に固定する。吸引を止めることでゲルの落下が開始し、基板と衝突する。衝突速度 V_i は、 h を吸引状態でのゲルの底部と衝突を受ける基板の表面との距離として、 $V_i = \sqrt{2gh}$ によって決定した。この衝突過程を、高

表 1 試料として用いたアクリルアミドゲルの組成、50Hz の振動数における複素 Young 率の実部 E' と $\tan \delta$ 、及び $V_c \equiv \sqrt{E'/\rho}$ (ρ はゲルの密度) で定義される特徴的速度スケール。

code	water[g]	AA[g]	BIS[g]	E' [10^4 Pa]	$\tan \delta$	V_c [m/s]
A6B6	100	6	0.06	0.61	0.07	2.40
A10B4	100	10	0.04	1.24	0.08	3.42
A10B7.5	100	10	0.075	2.09	0.03	4.45
A10B10	100	10	0.1	2.71	0.02	5.04
A10B15	100	10	0.15	3.88	<0.01	6.05
A10B30	100	10	0.3	6.46	<0.01	7.81

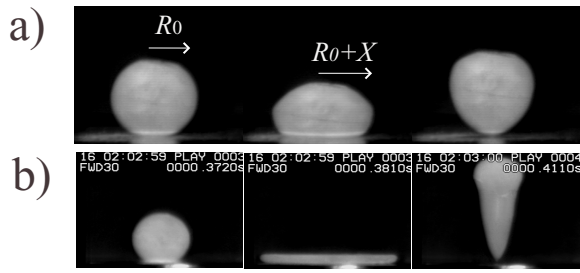


図1 衝突過程の例。(a)A10B30ゲル, $V_i/V_c = 0.31$ ($V_i = 2.4$ m/s)での衝突過程。左から接触開始直後 ($t = 0$ ms), 最大変形 ($t = 9$ ms), 跳ね返り直後 ($t = 21$ ms)でのスナップショットである。(b)A10B4ゲル, $V_i/V_c = 1.77$ ($V_i = 6.1$ m/s)での衝突過程。左から接触開始直後 ($t = 0$ ms), 最大変形 ($t = 9$ ms), 跳ね返り直後 ($t = 39$ ms)でのスナップショットである。最大変形は, 接触中にゲルの横方向のサイズ変化が最大となる状態として定義した。また, そのときのサイズ変化を X とする。

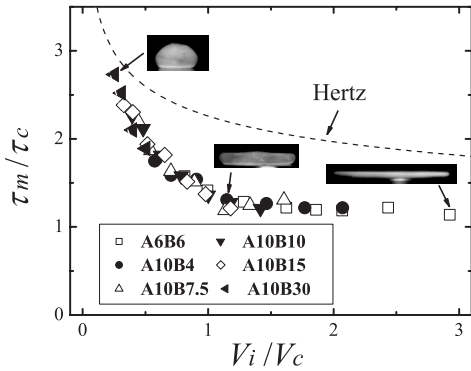


図2 V_i/V_c と τ_m/τ_c の関係。また, ヘルツ理論から定まる曲線も合わせて示した。挿入した3枚の写真は, それらが指すデータ点に対応する最大変形時のゲルの形状である。 V_c と τ_c によってスケールすることにより, 全てのデータは一つのマスターカーブに重なる。 V_i/V_c が大きい領域では, τ_m/τ_c は殆ど一定値である。

速 CCD ビデオカメラ (Motion Coder Analyzer : Kodak 社製) によって記録した (記録速度は, 1000FPS)。これらの記録画像上で, 接触時間 τ_f や最大変形時間 τ_m , あるいは, 衝突中のゲルのサイズ変化を計測した。(最大変形時間 τ_m は, 接触開始から衝突中にゲルの横方向のサイズが最大になる時までの時間間隔として定義した。)

3 結果

図1はゲル球の衝突過程の高速度ビデオカメラによる記録画像である。(a)は, 本研究において最も変形が小さい条件, (b)は比較の変形の大きい条件での衝突過程である。(a)においてさえ, 変形はゲル球全体に及んでいることがわかる。また, (b)のような速い衝突では, 最大変

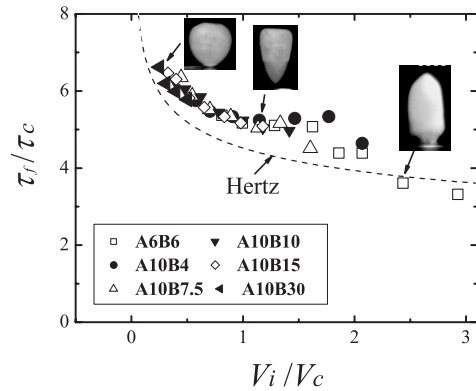


図3 V_i/V_c と τ_f/τ_c の関係。また, ヘルツ理論から定まる曲線も合わせて示した。挿入した3枚の写真は, それらが指すデータ点に対応する跳ね返りの瞬間におけるゲルの形状である。 V_i/V_c が大きい領域において, データの重なりが著しく悪くなっている。これは, 大変形において, ゲル球と基板との接着が起き, これが跳ね返り過程において一気に剥がれることによる。

形時のゲルは, 薄いパンケーキ状である。一方, 跳ね返りの瞬間には, 鉛直方向に大きく引き伸ばされており, かつ, そのときの形状は, 底部は尖っているのに対して頭部は丸みを帯びており, 基板と平行な面に関して非対称なものとなっている。

図2は, 各試料における τ_m と V_i との関係を示す。 τ_m は, 衝突後ゲル球の横方向のサイズが最大になる時刻 (接触開始を時刻 $t = 0$ として, そこから計って) として定義し, 衝突過程の記録画像から決めた。また, 図3は, τ_f と V_i との関係である。ただし, V_i を特徴的速度スケール $V_c = \sqrt{E/\rho}$ で, τ_m 及び τ_f を特徴的時間スケール $\tau_c = R_0/V_c$ で割って無次元化した量の間関係として示した。

それぞれのデータの全体的な傾向として以下の点を指摘することが出来る。 τ_m の実験結果を示すデータ点 (列) は, ヘルツ理論が予測する曲線 $\tau_m/\tau_c = 2.26 \times (V_i/V_c)^{-1/5}$ (図2中で 'Hertz' と記されている) より下側にある, 即ち, ある V_i/V_c の値に対して, ヘルツ理論の予想より小さな τ_m/τ_c を与えている。一方, τ_f の実験結果を示すデータ点列は (すくなくとも, データの乱れが始まる $V_i/V_c = 1.5$ 程度までは), ヘルツ理論が予測する曲線 $\tau_m/\tau_c = 4.52 \times (V_i/V_c)^{-1/5}$ より上側に存在する。このこと (もっと端的には, τ_m と τ_f の比が $1/2$ から大きくずれていること) は, 本研究におけるような変形の大きな条件下では, 衝突の前半 (接触開始から最大変形まで) と, 後半 (最大変形から跳ね返りまで) が, 非常に非対称であることに由来している。

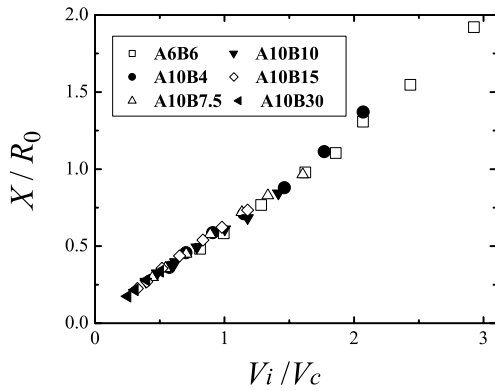


図4 図1に示された変形量 X と衝突速度の無次元化プロット. 異なる試料ゲルからのデータは非常によく一本の直線に重なる.

τ_m のグラフを詳細に観察すると, V_i/V_c が小さな領域 (≈ 0.3) では, 実験値はヘルツの予想に近いが, V_i/V_c が増加するにしたがってヘルツ理論の予測より早く減少し ($V_i/V_c = 1$ 程度まで), さらに V_i/V_c が大きい領域では, ほぼ一定値となることがわかる (高衝突速度側におけるプラトー域の存在).

図4は, 図1において示されている水平方向で最大変位 X と衝突速度との関係を示している。(ただし, それぞれ R_0 と V_c でスケールされている。) 異なる試料からのデータが全て一本の直線上に重なっている。

4 考察

大きな (無次元化) 衝突速度 V_i/V_c では, 最大変形時において, ゲル球は著しく扁平化する。各部分の運動が鉛直方向から水平方向に転換した結果である。この領域では, τ_m にプラトーゲルが生じる。このことを, 変形の大きな極限を考えスケールリングの観点から論じる。まず, 図1に示した横方向のサイズ変化 X , 或いは, $R_m \equiv R_0 + X \equiv \beta R_0$ は以下で与えられる。

$$\begin{aligned} \rho R_0^3 V_i^2 &\cong E R_0^3 (2\beta^2 + 1/\beta^4 - 3) \\ &\approx E R_0^3 \beta^2 = E R_0 R_m^2, \end{aligned} \quad (1)$$

ただし, 変形を一様なものとし, 変形エネルギーとして理想ゴムタイプのものを用いた。次元的には, τ_m のスケールリング形は $\tau_m \cong R_m/V_i$ で与えられる。これから,

$$R_m \cong \sqrt{\frac{\rho}{E}} R_0 V_i \quad \tau_m \cong \sqrt{\frac{\rho}{E}} R_0. \quad (2)$$

が得られる。即ち, 最大変形時の横方向のサイズと衝突速度が比例すること, そして, 大変形領域では, τ_m は V_i によらない一定値になることが説明される。

本研究のより詳細な報告が, [7] に掲載されている。助成を認めてくださった関係各位に感謝いたします。

参考文献

- [1] Goldsmit W., *Impact*, Arnold, London, 1960.
- [2] ディシュ C. B., ボール・ゲームの物理学, 岡村浩訳, みすず書房, 1978.
- [3] Hertz H., *J. Reine Angew. Math.* **92**, 156(1882).
- [4] Labous L., Rosato A. D. and Dave R. N., *Phys. Rev. E*, **56**, 5717(1997).
- [5] Gerl F and Zippelius A., *Phys. Rev. E*, **59**, 2361(1999).
- [6] Hayakawa H. and Kuninaka H., *Chem. Eng. Sci.*, **157**, 239(2002) and references therein.
- [7] 田中, 小林, 山崎, 奥村, 松下, 中央大学工学研究所論文集, **9**, 1(2003).