

関節の「ポキ」音はなぜ鳴るのか？ ～流体力学に基づく考察～

Mechanism of Cracking Sound Generation Based on Fluid Mechanics

正 ○金川 哲也（筑波大） 平 久夫（北海道教育大札幌校）

Tetsuya KANAGAWA, University of Tsukuba. 1-1-1, Tennodai, Tsukuba 305-8573
Hisao TAIRA, Hokkaido University of Education, Sapporo Campus. 5-3, Ainosato, Kita-ku, Sapporo 002-8502

Key words: bubble dynamics, cavitation, forced oscillation, free oscillation, cracking sound

1. 緒 言

指、首、膝などの関節を曲げるとき、「ポキ」という音が聴こえる。これは、クラッキング音とよばれ、クラッキング音が発生すると、骨と関節包（関節を包む器官）に損傷を与える⁽¹⁾。それゆえ、クラッキング音を適切に抑制すべく、クラッキング音が、そもそも「なぜ」発生するののかの解明が強く望まれている。

発生理由の解明に向けて、整形外科医によって、関節を満たす関節液内に生成される気泡に原因があることが指摘された⁽²⁾。また、実験的研究⁽³⁾によって、関節液にキャビテーション⁽⁴⁾が生じていることも明らかにされた。他にも多くの仮説が提案されてきたが⁽⁵⁾、そのほぼ全てが、整形外科的な研究であり、生体力学や生体工学に根差すものは見受けられない。結果として、発生理由は、いまだ不透明なままの現状にある。

以上の背景のもと、著者は、ここ 5 年間にわたり、気泡力学⁽⁴⁾に基づく数値計算を行ってきた⁽⁶⁾⁽⁷⁾。本年、Suja & Barakat⁽⁸⁾によって、そのモデルの妥当性が報告された。本稿の目的は、気泡の自由振動と強制振動を比較し、クラッキング音がなぜ生ずるのか、その理由は我々の経験とどの程度一致するのかを調べることにある。

2. 数値解析

単一の球形気泡が、初期に静止平衡状態を保っており、気泡周囲液体は非圧縮性であるとする。初期時刻 $t=0$ において、気泡が球対称振動をはじめ。気泡の運動は、つぎの Rayleigh-Plesset 方程式⁽⁴⁾⁽⁶⁾⁽⁸⁾にしたがう：

$$R \frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 = -\frac{1}{\rho_0} \left[p_\infty(t) - p_V - p_0 \left(\frac{R_0}{R} \right)^{2\kappa} + \frac{2\sigma}{R} + \frac{4\mu}{R} \frac{dR}{dt} \right] \quad (1)$$

ここに、独立変数 t は時間、従属変数 R は気泡半径、 ρ_0 は気泡周囲液体の密度、 $p_\infty(t)$ は液相の駆動圧力、 p_V は蒸気圧、 p_0 は静水圧、 R_0 は初期気泡半径、 κ は比熱比、 σ は表面張力係数、 μ は液相の粘性係数である。

駆動圧力 $p_\infty(t)$ の関数形は次式を採用した (ω は駆動周波数)：

$$p_\infty(t) = p_0 \sin(\omega t) \quad , \quad \omega = \sqrt{3p_0 / (\rho_0 R_0^2)} \quad (2)$$

式 (1) を、4 次精度の Runge-Kutta 法で数値的に解いた。初期条件として、気泡壁の初期速度を 0 m/s、初期気泡半径は $R_0 = 1 \mu\text{m}$ とした（関節液が占める関節包の大きさよりも小さな値を想定）。結果を図 1 と図 2 に示す。図 1 と 2 は、それぞれ、自由振動と強制振動に対応し、(a) と (b) はそれぞれ気泡壁速度と半径の時間発展である。

図 1 で、初期時刻付近に速度の鋭いピークが見られることは、クラッキング音が一度だけ聴こえるという我々の経験と一致する。気泡壁半径が時間とともに単調増加することから、気泡が大きくなり、気泡が関節と衝突し、気泡の崩壊が予想される。実際、気泡の消滅が先行実験⁽⁹⁾で報告されており、これは本結果を支持する。

図 1 と図 2 の(a)、すなわち、自由振動と強制振動の気泡壁速度を比べる。どちらも速度は初期時刻付近で大きな値をとった後に時間とともに減少する。速度の複数のピークは、クラッキング音が複数回聴こえることを意味する。経験的にも 2, 3 回のクラッキング音が聴こえることがあるが、この場合、強制振動が適合するといえる。

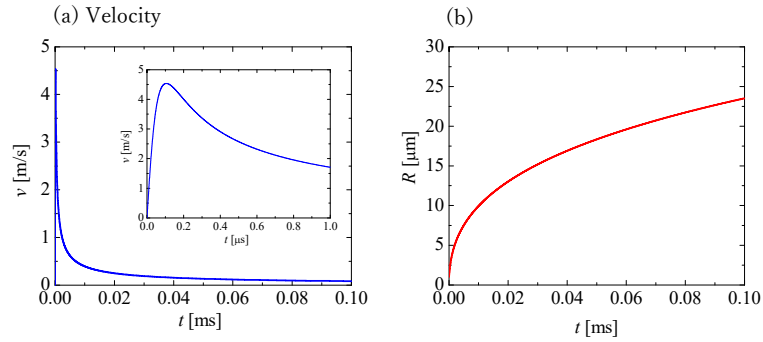


Fig. 1 (a) Velocity and (b) Radius of the bubble for the case of $p_{\infty}(t) = 0$ (i.e., free oscillation)

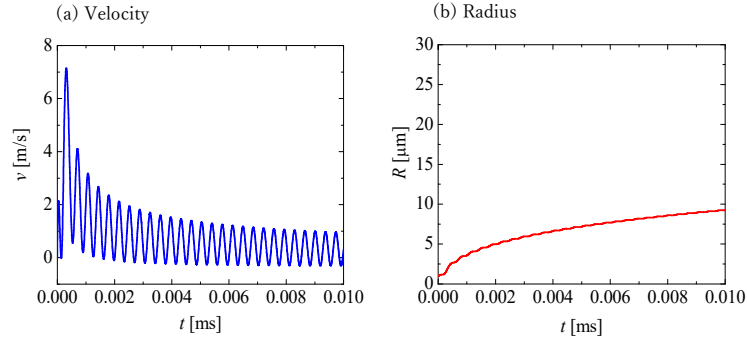


Fig. 2 (a) Velocity and (b) Radius of the bubble for the case that $p_{\infty}(t)$ is given by Eq. (2) (i.e., forced oscillation)

3. 結 言

クラッキング音の起源の解明に向け、気泡の自由振動と強制振動のモデルを考え、Rayleigh-Plesset 方程式を数値解析した。得られた知見を以下に要約する：(i) 自由振動モデルは、クラッキング音が一度しか聴こえないという経験的事実を裏付けた。(ii) 強制振動のモデルは、クラッキング音が2~3回聴こえる場合があることを示唆した。(iii) 両モデルともに、時間の経過につれて、気泡が関節と衝突し、消滅することが示唆された。

文 献

- (1) Kellgren, J.K., Larence, J.S., and Bier, F.S., “Genetic Factors in Generalized Osteoarthritis”, *Annals of the Rheumatic Diseases*, Vol. 22 (1963), pp. 237-255.
- (2) 南 和文, 深井靖雄, 小林俊之, “クラッキングフィンガーにおけるキャビテーション現象の画像学的検討”, 東日本整形災害外科学会雑誌, Vol. 16 (2004), p. 333.
- (3) Dunning, J., Mourad, F., Barbero, M., Leoni, D., Cescon, C., and Butts, R., “Bilateral and Multiple Cavitation Sounds during Upper Cervical Thrust Manipulation”, *BMC Musculoskeletal Disorders*, Vol. 14 (2013), pp. 16-20.
- (4) Plesset, M.A. and Prosperetti, A., “Bubble Dynamics and Cavitation”, *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 9 (1977), pp. 145-185.
- (5) Miller, M.W., Miller, D.L., and Brayman, A.A., “A Review of in vitro Bioeffects of Inertial Ultrasonic Cavitation from a Mechanistic Perspective”, *Ultrasound in Medicine and Biology*, Vol. 22 (1996), pp. 1131-1154.
- (6) Kanagawa, T. and Taira, H., “Numerical Consideration of Cracking Sound Generation in Human Joint Based on Bubble Dynamics”, *Proceedings of the 21st International Congress on Sound and Vibration* (2014), No. 119.
- (7) Taira, H. and Kanagawa, T., “Cavitation Bubble Dynamics Based on Keller Equation in Human Joint”, *AIP Conference Proceedings*, Vol. 1978 (2018), No. 210007.
- (8) Suja, V.C. and Barakat, A.I., “A Mathematical Model for the Sounds Produced by Knuckle Cracking”, *Scientific Reports*, Vol. 8 (2018), No. 4600.
- (9) Unsworth, A., Dowson, D., and Wright, V., “Cracking Joints; Abioengineering Study of Cavitation in the Metacarpophalangeal Joint”, *Annals of the Rheumatic Diseases*, Vol. 30, (1971), pp. 345-348.