特集 あかちゃんこうぶんし

子供とレオロジー

増渕雄一

名古屋大学大学院工学研究科物質科学専攻
[464-8603]名古屋市千種区不老町
教授，博士(工学).
専門はレオロジー，高分子計算科学.
mas@mp.pse.nagoya-u.ac.jp
http://rheology.jp/nagoya/

子供が生まれて、飲んで食べて、出して寝て、遊んで学んで、育つ、それぞれの過程でのレオロジーにまつわる話を収集した。人体はもちろん、食品や排泄物など複雑な混合系のため分子論に踏み込んだ議論は少ない。しかし現象論的に見るだけでも興味深い事柄が多く、大いに発展の余地がある「分野」と言えよう。

1. はじめに

はじめにお断りしなければならない。筆者はレオロジーと計算科学を専門とするが[1)~4)]、子供向けの何かを自分自身の研究で扱ったことはない。しかし拙著[5)]・拙稿[6)]をご覧になった編集委員の先生方から表題の内容でご依頼をいただき、面白そうなのでネタ集めのつもりで勉強してみた。専門の研究者・開発者・教育者・医療関係者などからご覧になると、程度の低い内容や正確でない記述があるかもしれない。また、別に子供に限った話ではない内容も多分に含まれている。筆者の力不足によるこれらの事柄についてあらかじめお詫びする。また、本稿では粘度、シアシニング、などのレオロジー用語を説明なしに用いる。

2. 生まれて

まず子供ができるときの話から始めよう。

精子は自ら運動する粒子、すなわちアクティブマターの例として研究されている[7)]。液体中の粒子の運動は(アクティブか否かにかかわらず)周囲の流体のレオロジー特性に依存する。ニュートン流体に近い性質の流体中では精子の運動は乱雑であり、複数の精子がある場合でも個々に独立に運動する。一方、生殖器内の環境を模した高分子溶液中(強いシアシニング性と粘弾性をもつポリアクリルアミド水溶液中)では、精子は直線的に運動し、またいくつかの精子が協調運動する。

このような精子の運動が受精とどのように関係するかはまだわかっていないが、ひとまず無事に受精できたとする。受精後の万能細胞は、培地の硬さが分化に影響する[8),9)]。培地が硬いと骨になり、柔らかいと神経になる。いわゆるメカノバイオロジーである。この現象には細胞内部の原形質のレオロジーと培地のレオロジーとの相関が関係すると考えられている。

胎児が育つには母体から栄養分を摂る必要がある。母体と胎児の血液が混ざることはないが、それぞれの血液のレオロジーを測ると粘度はシアシニング性まで含めてほとんど同じであるとの報告がある[10)]。これは双方の血液が胎盤で同程度に滞留して栄養分のやりとりを行うためと考えると納得がいく。ただし興味深いことに血液の成分は違っていて、胎児の血液のほうが酸素を多く運ぶ必要があるためか赤血球の比率が高く、かつ赤血球の体積が大きく、逆に血漿中のタンパク質の量は母体にくらべて低い。粘度の変化分を補うための巧妙な仕組みと言えよう。

3. 飲んで食べて

無事に生まれた子供は乳を飲む。

子供の乳の飲み具合には飲み口の硬さが重要である。ゴムやシリコンの飲み口が開発される前、陶器などで乳児に乳を飲ませようとしても十分に飲まなかったそうである。哺乳瓶メーカーであるピジョンの創業者は、乳児にとって最適な飲み口は母親の乳首であると考えた。そこで1,000人もの経産婦に頼み込み、その乳首を自ら咥えて唇の感度を養い、鍛えられた唇をもって飲み口の開発に勤しんだという[5)]。

©2023 The Society of Polymer Science, Japan

飲み口を通る母乳は単純なニュートン流体ではなく、シアシニングとチキソトロピーを示す[11),12)]。赤ん坊は夢中で乳を飲み、途中で咽せることがある。そのような嚥下挙動とレオロジーは関係がある。子供ではなく高齢者の話ではあるが、誤飲を防ぐために飲み物には適度なシアシニング性をもたせる。母乳のレオロジーにも同様の効果があるものと思われる。また母乳は時間をおくと粘度が上がるのに対して、多くの人工ミルクは粘度が下がる。ミルクは飲ませる直前に作らなければならず、作り置きできないものかと思ったことがある。当時は衛生面の問題かと思ったが、この粘度の時間変化も重要なのかもしれない。

しばらくすると離乳食を食べるようになる。

果物のペーストのレオロジーと、1〜2歳の幼児に対する官能評価（!）との関連に関する報告がある[13)]。これらのペーストはすべて指数則流体と呼ばれる挙動を示し、粘度ηはせん断速度$\dot{\gamma}$に対して$\eta=K\dot{\gamma}^{n-1}$とかける。ここでKとnはフィッティングパラメーターである。彼らの報告によれば、子供が気に入ってよく食べるペーストは、Kが小さくnが大きな傾向がある。つまりゼロせん断粘度が低めでシアシニング性が強いものが好まれている。この結果からすると、柔らかめのクリームやヨーグルトやケチャップが好まれ、逆に水飴は好まれない傾向である。これは筆者の子供との実体験に沿うように思われる。

なお現代の子供たちが成人するころにはフェイクミートや培養肉が日本でも広く受け入れられていると思われるが、関連する総説が本誌の2022年11月号に多数掲載されたのでここでは割愛する。

4. 出して寝て

食べたらいろいろ出る（子供の世話を通じて親は誰でもレオロジストである）。

赤子はしょっちゅうよだれを垂らしていて、糸を引く様子もよく見られる。この曳糸性は唾液に含まれる数種類のムチンがもたらしている[14)]。曳糸性はすなわち液体の弾性的な性質の発露であるから、唾液が液膜を形成して口や喉の粘膜を保護することに一役買っていると思われる。これらのムチンの分子量は唾液中での分解反応で低下し、10時間で1/3程度になり、曳糸性が低下する。つまり古くなった唾液は水膜を作れなくなって食道に落ち、新しい唾液に入れ替わる仕組みになっている。興味深いことに、ムチンは超分子構造を作るために、分子量低下の影響はせん断変形に対する応答には大きく出てこず、伸長変形に対する応答（要するに曳糸性）に非常に顕著にあらわれる。これもよくできていて、嚥下時の抵抗は唾液の古さによらないようである。なお唾液はシアシニング性を示すが、口腔内での舌と顎の潤滑や食物を飲み込むときの助けになっているものと思われる。

子供はよく泣く。

涙にもムチンが含まれていて、シアシニング性を示す[15)]。涙は液膜を形成して眼球を保護する必要があり、かつ瞬きや眼球の動きは妨げてはいけない（瞬きをするときのせん断速度は4,000 s^{-1}にもなる）。このような涙の働きとシアシニング性が関係すると考えられ、人造涙は化学的な成分だけでなくレオロジーも再現する必要がある[16)]。実際、目を水で洗うと違和感がある。粘度そのものは水のほうが涙より低いが、水はシアシニングしないためかと思われる。

おむつも汚す。

排泄物のレオロジーも当然重要である。ある報告[17)]における人糞（残念ながら成人のもの）のフローカーブを見ると、塑性を疑わせる強いシアシニング性があり、排便時のシアレートを肛門の開口と押し出し速度からおよそ1 s^{-1}としてそこでの粘度を見ると100〜1,000 Pasとする報告がある（参考までに練りワサビが100 Pasくらいであるから[6)]、この粘度は実感として少々高すぎるようにも思われるが）。温度依存性もあり、10℃から50℃まで温度を上げると40％程度の粘度低下が見られる。また、人糞の粘度は（経験的にも明らかなように）含水率に強く依存する。当該の報告では人糞の含水率は60〜90％まで分布しており、含水率が低い便の粘度は含水率が高い便の数百倍に達する。人糞の官能評価指標は国際的に確立されており、ブリストル便性状スケール、あるいはBSスコアと言う。便の形状と硬さで7段階に分類するものだが、いわく1は硬い木の実のような便、7は水様便であり、真ん中の4がバナナ様の好ましい（?）便である。このBSスコアと上記の粘度の関係を考えると、BSスコア1の便の粘度は10,000 Pas弱、7の便は100 Pasくらいといったところであろうか（実感としては水様便の粘度はもっと低いように思われる）。これらの便のレオロジー特性から楽な排便を考えると、十分に水分をとって便の含水率を高め、腹部を暖かく

©2023 The Society of Polymer Science, Japan

して便の温度を上げ、さらに腹圧を高めてシアレートを上げるのが良い。なるほど健康情報誌にありそうな排便指針（?）ではある。

尿にはムチンは含まれないようで、粘度は温度変化も含めてほぼ水と同じであるとする報告がある[18]。子供が自分でトイレに行くようになると、男の子の場合は尿の飛び散りがトイレ掃除係を悩ませる。そもそも尿の水柱はプラトー・レイリー不安定性によって液滴に分裂するので[19]、狙いを外さない（であろう）成人男性でも、発射口から着弾点までに15 cm以上の距離があると物理的に不可避な飛び散りが起きる[20]。よって座位での放尿が推奨されるというテレビ番組があった。子供のうちに座位を躾けたほうが良いかもしれない。

子供は食べて出して満足すると寝る。

われわれの肉と骨の弾性率はそれぞれおおよそ10^{10}、10^{5} Paであり、この間にあるもの（つまり骨は変形せずに肉が変形するもの）を、柔らかく変形するものとして心地よく知覚する。寝具はその典型例で、とくにマットレスの硬さは業界により定められた10段階のスケールであらわされる。人により好みはあろうが、側臥位で寝る人は柔らかめで体に合わせて変形するスコア3、伏臥位の人は硬めで体が沈み込まないスコア8くらいが良いと言われている。ベビーベッドにおいては、米国小児科学会が8以上の硬さのものを推奨している。これは子供の頭が沈み込みすぎて呼吸や血行を阻害しないためで、突然死にかかる広範な調査によるものである[21]。

5. 遊んで学んで

子供は起きたら遊ぶ。

子供にとって最初の玩具は自らの手足であるとされる。視力が十分でなく、また自己認識も不十分なので、手や足を口に入れていろいろ確かめる。そのような「おさわり」から始めるためであろうか、玩具、とくに幼児用の玩具にはレオロジーに関係するものが多い。

まず泥団子である。そもそも泥の感触が手に楽しいが、泥の塑性やシアシックニング性を活かして形を作り、乾燥にともなう収縮の不均一によるひび割れを防ぎ、最後に表面の凹凸をなくしてピカピカになるまで磨き上げる。この一連の工程における手指の感覚や試行錯誤する過程が子供の発育に良い影響を与えるとする報告がある[22]。隣の子供がやっているさまを（先行研究として）学ぶ点も含めて、まったく研究の営みそのものである。

次に、大抵の子供は食べ物で遊んで親に叱られる。このことを逆手にとった商品群がある。材料の状態で店頭に出し、それを購入した子供が2液を混ぜたり粉末をかけたりして完成させる。このような菓子は筆者が子供のころからあり、ねだると親からは良い顔をされなかった。周りを汚すし、その菓子をまねてほかの食べ物で遊ぶからであろう。しかし近年では「知育かし」（漢字で書くと商標登録に引っかかる）などと呼ばれて子供の発育にむしろ肯定的に捉えられている。ほとんどの菓子では加熱の必要もなく、もちろん無害なので、きわめて安全な化学の実験操作である。しかも混ぜ合わせたときの抵抗や食感でレオロジーの物性測定もするので、あとは泥団子なみの試行錯誤の余地があれば理想的な科学者育成ツールと言えるかもしれない。

（家庭科での調理実習を別にしても）レオロジーは以前から学校教育に入り込んでいる。代表例はスライムである[23,24]。スライムは、もともとはグアーガムをホウ砂で弱く架橋させたものを指すが、小学校ではポリビニルアルコール（PVA）水溶液（洗濯糊）とホウ酸水溶液の混合物が多く用いられる。スライムが日本で発売されたのは1978年で、その当時、おなじく大ヒットしていたのはルービックキューブであり、ヨーヨーであった。これらの玩具では世界チャンピオンと称する白人がなぜか日本の田舎町にやってきて華麗なデモを繰り広げ、無知な小学生であった筆者は尊敬の眼差しで見ていた。それに対してスライムには技とかそういうものはなく、よく考えてみれば、単なる触感だけのおもちゃがなぜ子供に受けるのかまったく意味不明である。

しかし触感だけのおもちゃは地味ながら確固たる地位がある[5]。元祖はシリパテである。こちらはもともとゴムの代替品を研究する途中で生まれた失敗作であった。また風船に小麦粉などを詰めたもの（こむぎんとか、むにゅむにゅ星人などと言われる）も、スライムとならんで小学校などで作られている。

少し方向性が違うものとして、スーパーボールもレオロジー玩具に入れて良いだろう。素材は架橋されたポリブタジエンが多いが、スライムを作るときにPVAの濃度をうまく高めると似たようなものができる。スーパーボールの反発係数は0.9程度もあり、これで遊んだ

©2023 The Society of Polymer Science, Japan

経験があると物理でエネルギー保存則が出てきたときに無理なく受け入れられる。逆のものとしてハネナイトボールがある。手で触った感じはスーパーボールと変わらないが、床に落としても弾まない。これは粘弾性固体のエネルギー散逸による。100円ショップでも手品のタネとして売られている。

6. 育て！

子供は育っていく。

子供の頭は柔らかいと言うが、通常は考え方の柔軟さについて言われるこの表現は物理的にも正しい。ヒトの脳組織の粘弾性を直接レオメーターで測定した研究[25]によると、成人の脳の弾性率はおよそ5 kPaであり、柔らかめの豆腐に相当する。一方、生後2カ月の乳児の脳はその半分以下の硬さしかなく、1〜2歳にかけて急激に変化して成人と同程度の硬さとなる。脳の粘弾性は臨界ゲルの応答に近く、$G'\sim G''\sim\omega^n$となる。MRエラストグラフィという非破壊的な方法で10〜90歳までの幅広い年齢層について行われた実験[26]によると、弾性率は年齢により徐々に低下するが、指数nは変わらない。一方、同じ手法で9〜17歳までの子供の脳の粘弾性を調べた研究[27]によると、逆に弾性率は変わらないが、指数nは年齢とともに徐々に上昇する。nは臨界ゲルの構造がもつフラクタル次元d_fに関係し、nの上昇はd_fが小さくなることに対応する。これらのレオロジーから考えると、子供の成長とともに脳の構造の流動性や複雑さは失われていき、20歳くらいであるところに収束し、そこから徐々に柔らかくなる（架橋点密度が減る？）ように見える。

7. おわりに

子供という観点でレオロジーにまつわる事柄をまとめてみた。人体はもちろん食品や排泄物など複雑な混合系が多いため困難はあるが、高分子科学的に分子レベルの解析ができるとおもしろそうな話題が多い。「子供のレオロジー」は学際分野として成立するかもしれない。広く文献探索するこのような機会をいただいたことに感謝する。また誌面の都合で参考文献リストが不十分なことをお詫びする。なお本稿はデータなどを掲載するには不向きな話題と感じたので、「いらすとや」[28]から絵を転載していることをお断りする。

文　献

1）増渕雄一, 高分子, **56**, 412（2007）
2）増渕雄一, 高分子, **60**, 85（2011）
3）増渕雄一, 化学工学, **83**, 446（2019）
4）増渕雄一, オレオサイエンス, **19**, 461（2019）
5）増渕雄一, “おもしろレオロジー”, 技術評論社, 東京（2010）
6）増渕雄一, 高分子, **67**, 579（2018）
7）百武　徹, 生物物理, **62**, 175（2022）
8）A. J. Engler, S. Sen, H. L. Sweeney, and D. E. Discher, *Cell*, **126**, 677（2006）
9）木戸秋悟, 膜, **42**, 78（2017）
10）W. H. Reinhart, S. J. Danoff, R. G. King, and S. Chien, *Pediatr. Res.*, **19**, 147（1985）
11）G. W. S. Blair, *Biochem. J.*, **35**, 267（1941）
12）D. Alatalo and F. Hassanipour, *Fluids*, 5,（2020）
13）A. M. Inarejos-García, V. Mancebo-Campos, P. Cañizares, and J. Llanos, *J. Food Sci.*, **80**, E1005（2015）
14）C. E. Wagner and G. H. McKinley, *J. Rheol.*（*N. Y. N. Y.*）, **61**, 1309（2017）
15）J. M. Tiffany, *Int. Ophthalmol.*, **15**, 371（1991）
16）S. Arshinoff, I. Hofmann, and H. Nae, *J. Cataract Refract. Surg.*, **47**, 649（2021）
17）S. M. Woolley, R. S. Cottingham, J. Pocock, and C. A. Buckley, *Water SA*, **40**, 273（2014）
18）R. Burton-Opitz and R. Dinegar, *Am. J. Physiol. Content*, **47**, 220（1918）
19）J. Eggers, *Rev. Mod. Phys.*, **69**, 865（1997）
20）R. Hurd, K. Hacking, B. Haymore, and T. Truscott, Urinal Dynamics, in 66th Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics（2013）p.BAPS.2013.DFD.E9.3.
21）R. Y. Moon, R. F. Carlin, and I. Hand, *Pediatrics*, **150**, 1（2022）
22）加用文男, “光る泥だんご”, ひとなる書房, 東京（2001）
23）尾崎邦宏, “キッチンで体験 レオロジー”, 裳華房, 東京（1996）
24）尾崎邦宏, “レオロジーの世界”, 森北出版, 東京（2011）
25）S. Chatelin, J. Vappou, S. Roth, J. S. Raul, and R. Willinger, *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.*, **6**, 166（2012）
26）I. Sack, B. Beierbach, J. Wuerfel, D. Klatt, U. Hamhaber, S. Papazoglou, P. Martus, and J. Braun, *Neuroimage*, **46**, 652（2009）
27）E. Ozkaya, G. Fabris, F. Macruz, Z. M. Suar, J. Abderezaei, B. Su, K. Laksari, L. Wu, D. B. Camarillo, K. B. Pauly, M. Wintermark, and M. Kurt, *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.*, **115**, 104229（2021）
28）“いらすとや”, 閲覧日：2022/12/02

©2023 The Society of Polymer Science, Japan