



流动的固体

〔日〕中川鹤太郎 著



科学出版社

037
1 流

037
1

流动的固体

〔日〕中川鹤太郎 著

宋玉升 译

科学出版社

1983

内 容 简 介

固体会流动吗？这个问题乍听起来似乎不太可能，但实际上，许多看来坚实的固体都是会流动的，只是不象液体那样流畅罢了。研究固体为什么会流动，怎样流动，不仅很有趣、很有用，而且对于了解物质的弹性、粘滞性、粘弹性等性能并利用这些性能为人类服务都是很有意义的。

作者是多年从事流变学研究工作的。他在本书中用浅显易懂的笔调结合大家比较熟悉的生动事例一步一步地深入分析了各种现象，阐明了许多科学道理，例如橡胶为什么能伸得那么长？有些东西为什么能拔丝？有些液体为什么能向上爬？冰川为什么能流动？在湿沙滩上走路为什么比在干沙滩上容易？蚕丝是怎样形成的？鱼为什么能在水中高速游动？使读者看后既感到兴味盎然，而且也丰富了许多知识。

本书适合于具有中等文化程度的广大读者阅读，也可供中学和高等学校教师以及从事流变学工作的科技工作者参考使用。

中川鶴太郎

流れる固体

岩波書店，1975

流 动 的 固 体

〔日〕中川鶴太郎 著

宋玉升 译

责任编辑 鲍建成

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1985年9月第一版 开本：787×1092 1/32
1983年9月第一次印刷 印张：4 7/8
印数：0001—7,700 字数：110,000

统一书号：13031·2356

本社书号：3228·15—3

定价：0.65 元



目 录

序言——物体的流动和形变·····	1
第一章 弯了的棒为什么又能直起来——关于弹性·····	8
第二章 橡胶为什么能伸得那么长？——橡胶的弹性与 气体的压力相似·····	21
第三章 搅动的水为何能静止下来？——关于粘滞性·····	40
第四章 各种奇怪的流变现象——振动时可“溶解”的液 体，能“成型”的液体，能裂缝的液体·····	58
第五章 可流动的固体——冰川能流动，岩石也能流动 ·····	79
第六章 有弹性的液体——能收缩的液体，能拔丝的液 体，能向上爬的液体·····	93
第七章 弹簧和活塞模型——用模型来研究问题·····	109
第八章 蚕丝是怎样形成的——蚕不是吐丝，而是拉丝， 蜘蛛也是这样·····	126
第九章 粘液的用处——蛋清是蛋黄的摇篮·····	137
结束语——流变学是什么学问·····	147

序 言

——物体的流动和形变——

1. 会有这样的事情吗？

是否有什么固体会悄悄地发生形变？既然我们把坚固的物体叫作固体，大概谁都会认为，不会发生这样的事情。的确，不能认为金刚石和钢铁也在悄悄地形变。但是，如果我们仔细观察一下就会发现，悄悄发生形变的固体确实存在。“七五三”饴糖¹⁾和沥青就是这样的东西。你把它们放在那里不动，过几个月再去观察，它们变形了。人们把这种连续不断的形变叫作“流动”。



液体能够产生裂缝吗？对此问题持有怀疑的人不妨到厨房去拿些淀粉，用少量的水把它搅拌均匀后作个实验试试看。这时的淀粉是白浆糊状态。你把它倒在盘中，然后用手指使劲按它一下看，它出现裂纹了。如果把它放在手里使劲一捏，它成了碎块，落到盘中后又成为糊状的流动的物体了。

液体能顺着圆棒爬上去吗？这真是不可思议。可是这样的事情确实存在。桐油和亚麻仁油经过长时间的加热后能变

1) 这种糖类类似于北京地方的“关东糖”。——译者

成很粘的褐色液体。拿一根圆棒在这种液体中转动，你会看到液体顺着圆棒爬上去了。圆棒停止转动时，液体又慢慢地流下来。圆棒再转动，液体又爬上去。如果用一根玻璃管代替圆棒作这个实验，那么液体不仅能爬上圆管的外侧，而且管的内侧也爬上了这种液体。

液体能够象橡胶那样拉伸吗？你到厨房去环视一下就会看到各种各样能拉伸的液体。把鸡蛋敲开，蛋清象橡胶那样伸长着流了出来。请你注意观察一下，当它流断的时候还能稍稍收缩回来。担子菌¹⁾的粘液也有这样的现象。纳豆²⁾也是如此。我们所说的“拔丝”就是指液体能象橡胶那样拉伸的现象。

液体能否刹那间变成纤维或固体呢？这里说的不是用某种电热器去煮鸡蛋。如果液体不加热，只是搅动，或者说只靠力的作用，它能否刹那间变成纤维状的东西呢？蚕就能够作到这样。它的肚子里装着粘粘糊糊的液体，当液体从它嘴中“吐出”的刹那间就能变成漂亮的丝线。蜘蛛吐丝也是如此。

上面讲的这些有趣的现象都是固体或液体发生的“流动”和“形变”（关于“流动”和“形变”的区别，在后面还要详细说明）。

物体的性质千差万别。例如，金属可以导电，而木头就不能导通电流。这是为什么？这是因为物体有不同的导电性能。玻璃是透明的，为什么金属不透明？这是因为它们有不同的光学性质。铁能成为磁铁，钢就不能，这是因为它们有不同的磁性质。水的比热大，金属的比热小，这又是为什么？这

1) 是一种树上长的可以食用的小蘑菇类。——译者

2) 是日本特有的一种食品。把大豆煮熟后用稻草包起来使之发酵，然后拌上葱花、芥子等食用。——译者

是因为它们有不同的热学性质。

本书不打算谈这些问题。书中要讲的是有关物体的“流动”和“形变”的种种性质。书中讲的内容都是本人迄今所作的一些研究和个人的经验。那么,对于物体的各种性质,我为什么对“流动”和“形变”产生兴趣呢?

2. 纳豆为什么能拔丝

——我的研究工作的开端

小学生时代的我,也和其它小伙伴一样,对昆虫和小鱼之类是顶喜欢不过了。盛夏炎热的当午正是大人午睡的时候,我们却跑到田间的小溪去捉泥鳅和小鱼,而且我自己还去追捕蝴蝶。在学校我很喜欢理科。虽然我爱读《阿丽思漫游奇境记》、《爱的学校》和《格林童话集》,但是《儿童物理化学故事集》这样的书就更加使我入迷。氢分子和氧分子相遇变成了水分子,这样的事促使一个还是孩童的我产生了种种幻想。

我上中学后,在厨房的角落里作了一个小实验台,开始热衷于我的化学实验。我兴致勃勃地观察着锌溶于盐酸时放出的氢气泡,还有那硫酸铜水溶液与稀氨水反应时沉淀出碧蓝色的氢氧化铜。

不久我进了大学,选择了化学系。最后一个学年当决定自己的专业时,我选择了“物理化学”。化学分为有机化学、无机化学、分析化学、生物化学和物理化学等。我选的这个“物理化学”是介于化学和物理之间的学科,是研究化学反应、分子结构和物质性质形成原因等的一门学科。

大学的最后一年,开始进行所谓的“毕业研究”了。老师给我的题目是研究“泡的寿命”,简单地说就是研究为什么肥皂水容易出泡,而水的表面上就不容易形成泡(这个问题与本书要讲的内容没有什么关系,所以本书没有讲它)。那时正是

太平洋战争时期。

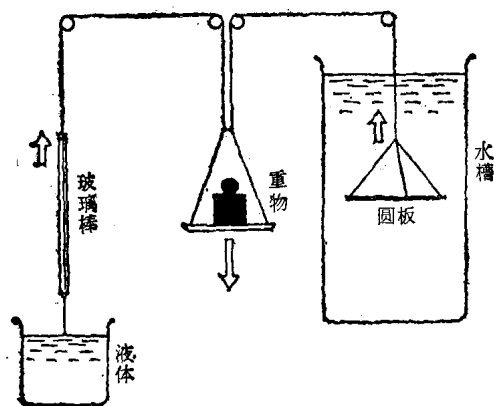
战争不久结束了，我从军队又回到了大学的研究室。在确定研究题目的时候，我感到当初那个毕业研究题目——“泡”的问题——现在对我来说有点复杂了，太困难了。我请求老师给我另外一个题目。当时老师给我的题目就决定了我后来的研究方向。这本书所讲的内容就是我在这方面所作的工作。老师给我的题目叫作“液体的拔丝性质”。所谓“拔丝性质”，用普通的话来说就是“纳豆和蛋清为什么能拉成丝”的问题。

虽然说从老师那里接受题目后高高兴兴地回来了，可是仔细一想，这个“丝”的复杂程度并不亚于那个“泡”。拔丝性质当然是物质的一种性质，但是要弄清楚它的形成原因，必须测量其它一些性质。我想测量一下表面张力。可是，关于这个问题，德国的一位叫奥普林的学者曾经说过，拔丝性质与表面张力无关。看来，与拔丝性质最可能有关系的是粘滞性（参看第三章）。我们知道，糊状的粘性液体容易拔丝，可是奥普林对此也作过详细的研究，并且认为，与拔丝性质有关的不仅仅是粘滞性，而是粘滞性加上“某种性质”。这个“某种性质”是什么呢？以奥普林为首的几位学者当时认为，这个“某种性质”也许是象弹簧那样的伸缩性或者象橡胶那样的拉伸性（即弹性）。“液体有弹性吗？”这个问题在当时还只是一种设想，因为那时还没有人测量过拔丝液体的弹性。

爱好实验的我总是喜欢用手做点什么或测量点什么。我决定制作一个能测量拔丝性质的实验装置。

当时是处于战争刚刚结束的时期，吃的东西很缺乏，当然也买不到实验用的电动机之类的东西。即使能弄到手，无奈研究室内几乎每天停电。因此，最可靠的办法是利用地球引力来作实验装置的动力。于是我作了这样一个实验装置：让

一个重物下落时牵拉着一根玻璃棒向上移动，用它来测量液体拔丝到几厘米时才断开。由于拔丝长度与玻璃棒向上移动的速度有关，所以需要调节玻璃棒的运动速度。但这只靠重物下落是不行的，还要在重物上再系一条拉线，此拉线的另一端拴着一个小圆板，让小圆板浸在水槽中。当小圆板被拉动时，它在水中有一个阻力作用。这个装置如图所示。



拔丝性质的测量装置

改变重物的重量和小圆板的尺寸就可任意调节玻璃棒的上升速度。此装置的全部组件都是手工做成的。用重力作为动力，停电也就无关紧要了。用这个方法测量液体的拔丝长度，结论如何呢？为什么是这样的结论呢？关于这些问题，在第六章再详细介绍。

简单地说，粘液之所以能拔丝是因为它同时具有液体的粘滞性和橡胶那样的伸缩性(弹性)，这是很清楚的。

讲到此，我只是介绍了其它学者曾经考虑过的问题。但是，我还想再前进一步，直接去测量弹性和粘滞性。总之，为了弄清拔丝性质的原因，只测量拔丝长度是不够的，还必须弄

清并测量构成这个原因的特性，这是进行科学研究的一般途径。

怎样测量拔丝液体的粘滞性和弹性呢？关于液体粘滞性的测量方法，作为一个化学工作者，我是知道的。但是，液体有弹性吗？如果说有，怎样测量它呢？如果是测量固体的弹性，那么只要查阅一下物理学和机械力学的参考书就可解决问题，例如测量一下固体受力时弯曲多少，伸长多少就可以了。但是现在需要测量的是“流动液体的弹性”。

正在困难当头之际，我在岩波书店出版的一本《科学》杂志上看到了东京大学理学部地球物理学系的久山多美男先生写的一篇“粘弹性系数的新测量方法”的简短报告。这是战争结束的第二年，即1946年的事。报告中讲到，这个方法不仅可以测量粘性液体的粘滞性，而且可以测量它的弹性。初次看到“粘弹性”这个名词还觉得很新鲜。我想，久山先生也许是在日语中首次使用这个名词的人了（关于“粘弹性”的含意在第五章以后再讲）。用地球物理学家想出的测量方法来研究“拔丝性质”这个化学问题，对于我这个学习物理化学并专门从事物理性质研究的人来说，确实是件愉快的事。当时对于物体的流动与形变性质作过专门研究的化学家几乎还没有。关于这方面的知识我也是开始学习，同时制作了前面讲的那套测量装置，对拔丝液体的粘滞性和弹性进行了测量，研究了粘弹性与拔丝性质之间的关系，作了拔丝性质的研究（见第六章）。

就这样，我对流动与形变的问题逐步深入，知道了有“流变学”这门学问，它是研究有关物体的“流动”和“形变”的各种性质的一门学问。流变学不仅对于我研究的拔丝性质，而且对于熔岩的流动，塑料、合成橡胶、合成纤维的性质的研究都是有用的。此外，对于食品的硬度、糕点的松软程度以及生物粘液的性质的研究也是有用的。

换言之,把一切物体的流变性质与“弹性”和“粘滞性”联系起来进行研究的学问就叫“流变学”。因此,本书经常用到弹性和粘滞性这两个名词。如果对弹性(第一章)和粘滞性(第三章)这两个概念没有很好地理解,恐怕阅读本书就没有多大趣味了。此外,物质的这两种性质比起其它的性质,如密度、比热、沸点、熔点等,还要更难理解一些。

本书是先从物质的基本性质——弹性和粘滞性开始讲的。开头也许有点难懂,但是我相信,如果读者按章节读下去,书中的内容是不难明白的。虽然开头有点困难,也请你一定读到最后,以便对这些有趣的物质性质有所了解,这是我所希望的。

第一章 弯了的棒为什么又能直起来

——关于弹性——



1. 蒟蒻¹⁾和钢弹簧有相似之处

我们大家使用着各种各样的弹簧。自行车的车座下面安装着螺旋弹簧。当你骑车走在坎坷不平的路上时，振颤一次，弹簧就伸缩一次，把来自车轮的振动减缓下来。火车的车架上也装着弹簧。这些弹簧一伸一缩，不使强烈的振动直接传到车厢内。

自行车和汽车的轮胎也可说是一种弹簧。压偏的橡胶有恢复原状的性质，被压缩的空气有恢复原来体积的性质。轮胎就是利用着这种性质。这种性质与弹簧的性质是一样的。

钟表的发条也是弹簧。松弛了的发条拧紧后还能再松开。钟表就是利用发条松开时的力来走时间的。拧紧发条就是贮存能量。要想使弹簧伸长或弯曲，必须对它施力使之形变，这个形变就以“弹性能”的形式被贮存在弹簧中。请你想一下带发条的活动玩具，或许更容易理解这一点吧。

弹簧秤是利用弹簧的作用测量物体重量的工具。弹簧的

1) 也叫蒟芋或鬼芋，是一种蒸熟后有弹性的食品。——译者

伸缩程度与所加的外力有关。我们正是利用了这个原理来测量放在秤上的物体重量。

一个橡皮球被扔到桌面上时能弹跳起来（不一定要充气的皮球，实心的橡皮球就可以了），这是因为橡皮球有与弹簧相同的性质。橡皮球在同桌面碰撞的瞬间稍稍瘪进去。如果橡皮球瘪下后不变，那么它就会象一块肥皂或黄油扔到桌上时一样，不会弹跳了。可是橡皮球的瘪进的部分象弹簧那样要恢复原状，因此球从桌面弹跳起来。停止了弹跳的橡皮球不再有瘪进去的地方。

让我们回到本节标题来谈吧。如果仔细想一下，蒟蒻和鱼糕¹⁾确实与弹簧有相似之处。但是，钢铁是金属，而蒟蒻和鱼糕完全是另一种物质。就“物质”来说，它们毫无相似之处，那么相似之处指何而言呢？那就是它们受外力作用时表现出的“性质”相似。我们归纳一下各种弹簧、蒟蒻和鱼糕等受力时的性质，可以看出它们有下面这些相似之处：

(1) 受外力时发生形变，并表现出要恢复原状的反弹力。
(2) 外力消失后便立刻恢复原状。(3) 伸长或压缩的程度与所加外力的大小有一定的关系。而且，这些物体形变时都贮有能量。

这些就是弹簧、蒟蒻和鱼糕的共同性质。弹簧伸长或压缩后能够立刻复原，蒟蒻和鱼糕被按一下后也能马上恢复原状。这样的性质就叫作“弹性”。

对于“蒟蒻和弹簧相似”这句话，也许有人会觉得好笑。弹簧是用钢制成的一种部件，而蒟蒻只是一种材料，把“材料的性质”与“弹簧的作用”相比确实有点不合道理。下面，我想解释一下为什么要那样说。

弹簧之所以有弹性是因为制作弹簧的材料有弹性。但是

1) 把生鱼肉磨成糊状加佐料煮熟的一种食品，有弹性。——译者

钢的弹性非常强,用手按它一下不会凹进去,平时感觉不出它是否有弹性。把钢做成钢丝再卷成螺旋线圈状就可清楚地看出钢的弹性,从而比较容易与蒟蒻比拟了。我们还可以再举一个使形变“扩大”的例子:取一根竹竿,当你用手拉伸它时,它基本上不会变长;如果用手弯它,就容易变形,同时手上感到它有弹性。这是因为弯它比拉伸它更容易使之形变。

“蒟蒻与弹簧相似”这句话说得确切些应该是“蒟蒻与钢相似”。这里所说的相似,是指它们都是具有弹性的物体而言。刚才说过,用手按一下钢块,形状毫无变化,但是按一下蒟蒻,它很容易凹进去。这是因为钢的弹性比蒟蒻大 100 万倍的缘故。

什么东西表现出与钢弹簧、蒟蒻、鱼糕有不同的性质呢?让我们把水、油和糖稀等受力时的情况同弹簧比较一下看。糖稀受力时确实会变形,这一点与钢弹簧、蒟蒻相似。但是受力以后的情况就不同了。糖稀不具有恢复原状的弹力,“流”成什么样就是什么样。只要有外力作用,它就继续“流”下去。就是说,糖稀受外力作用时有形变,但不贮存能量。说得通俗些就是,糖稀会流掉,而鱼糕按一下后能恢复原状。

这样看来,物体形变时表现出的性质可分为两类:第一,弹性,即外力消失后能恢复原状的性质。第二,流动性,即形变成什么样就什么样,不能恢复原状的性质。关于流动性质,即水、油和糖稀的性质,将在第三章中详细讲述,这一章先讲“弹性”。

具有弹性的钢、蒟蒻和鱼糕,受力时会形变,但不象水、油那样是流动的。当外力消失后,它们能恢复原来形状。这种性质是“固体”的特征。说到“固体”,人们往往会想到“坚固的物体”、“不易形变的物体”,但在这本书中主要是指“有弹性的物体”,就是说,它们是“虽有形变,但不是流动的,能够恢复原

来形状的物体”。因此我们说，无论是钢和水晶，或者是茼蒿、鱼糕和果子冻等都是固体或近似固体。它们形变的难易和弹性的强弱各不相同。不仅有象金属那样“坚固的物体”，而且还有象鱼糕、果子冻这样“柔软的固体”。总之，在本书里，把有弹性的物体称作固体。

在这里，顺便把“硬度”稍微讲一下。为表明矿物的“硬度”，有一种叫作“莫氏硬度”的度量标准。它规定金刚石的硬度为10，蓝宝石为9，水晶为7……，方解石为3……等等。未知硬度的矿石与它们摩擦，看被什么划出了伤痕来确定属于哪一级的硬度。

此外还有一种确定金属硬度的方法，即把金刚石放在被测金属的上面，用一定大小的压力压下，根据压痕的大小确定该金属的硬度。

不论用“划痕法”还是用“压痕法”，总是要使被测材料稍受损伤，所以说这是在测量物体的“易损性”。弹性的测量不是这样，物体不受损伤，只是观察受力时的形变如何。外力消失后，被测材料能恢复原状。

这里讲一个有趣的例子来说明“弹性”和“硬度”是两个不同的概念。用金刚石去摩擦一块橡皮，结果什么划痕也没有。用金刚石去按压也毫无压痕。是否能说“橡皮比金刚石的硬度还大？！”摩擦是否产生划痕，按压是否有压痕，这种鉴定“硬度”的方法对于橡皮来说是不适用的。但是，测量弹性大小的方法无论对于金刚石和钢铁，还是橡皮和果子冻都是适用的。在这种情况下我们可以说，弹性大的物体比弹性小的物体更“坚硬”，即不易形变的物体比容易形变的物体更“坚硬”。

“坚硬”和“柔软”这些词尽管我们经常使用，但仔细想一下，它们的含义并不那么简单。本书的目的正是要讨论它们

的意义。

2. 固体的形变和弹性

如前所述,差不多所有的固体受外力作用时都会立刻发生形变,不是伸长,就是变弯,或者凹了下去。但是,形变的同时还存在一个要恢复原状的反弹力,即形变的固体要恢复它原来的形状。当外力消失后,物体马上恢复其原来的形状。“物体受力时立刻发生有限的形变,去掉外力时马上又恢复原状”这种性质就叫“弹性”。有弹性的物体叫作“弹性体”。

如前所述,我们利用弹性的例子是很多的。例如,车轮下面利用的弹簧,纸夹上的弹簧,钟表的发条等等。此外,射箭的弓也是一种弹簧。游泳池的跳板也在利用着木材的弹性。我们说“受力时立刻发生形变”,但因形变的方式不同而有各种样的弹性。

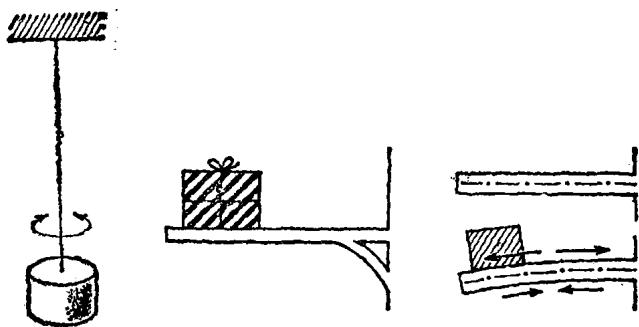
第一种是橡皮筋或乐器上的弦被拉紧时表现出来的弹性。这时的形变是拉伸,叫作“拉伸弹性”。

第二种是“扭转弹性”。把一根细钢丝拿来扭它一下,放开手后它就恢复原状。这里的形变不是伸长,不是拉伸弹性,这种弹性叫作“扭转弹性”。

第三种是体积变化时表现出的弹性。液体、气体这些自由流动的物体叫作流体。它们的形变比较容易,不产生拉伸弹性和扭转弹性。但当它们的体积被压缩时要恢复原状。由于体积变化而表现出的弹性叫作“体弹性”。

那么,“弯曲形变”(弓的例子)属于哪种形变呢?在这里我们想起了著名的“伽利略问题”。伽利略(1564—1642年)不仅发现了自由落体的运动规律和摆的运动规律,而且还推广了哥白尼的日心说。他是近代自然科学的奠基人。他对物体的形变问题也有所研究,曾想过这样一个问题:“如果把一

块横搁板一端固定，另一端放重物，搁板会发生什么变化呢？说得直截了当就是：搁板放上东西时，搁板会发生什么样的形变呢？



扭转弹性产生的振动。细钢丝吊一重物，令重物扭转。因钢丝有扭转弹性，于是产生了扭摆振动（不是一伸一缩的上下振动）。这种振子叫作扭摆

伽利略的问题。搁板的尽头处
放有重物时发生的形变

伽利略也许没有发现物体因有“弹性”而产生的形变（能恢复原状的形变）。他也许认为搁板上放了东西后没有发生任何变化，只是当非常重的东西放上后才突然一下子折断。是在何处折断呢？是靠近墙壁的地方，还是搁板的正中间呢？也许是在尽头处吧？这就是伽利略想要知道的问题。

如前所述，物体是有弹性的。搁板上放了东西后，先是因有弹性而发生了弯曲，并要恢复原状。当你放的东西过重了，搁板才最后折断。

“搁板究竟在何处折断”这个问题，只有弄清楚下面的问题才能解决：搁板靠近墙壁处、正中间和尽头处发生的弯曲有什么不同？搁板上下两面的形变有什么不同？搁板的哪一