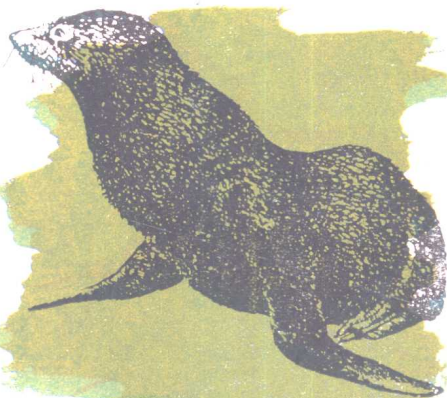
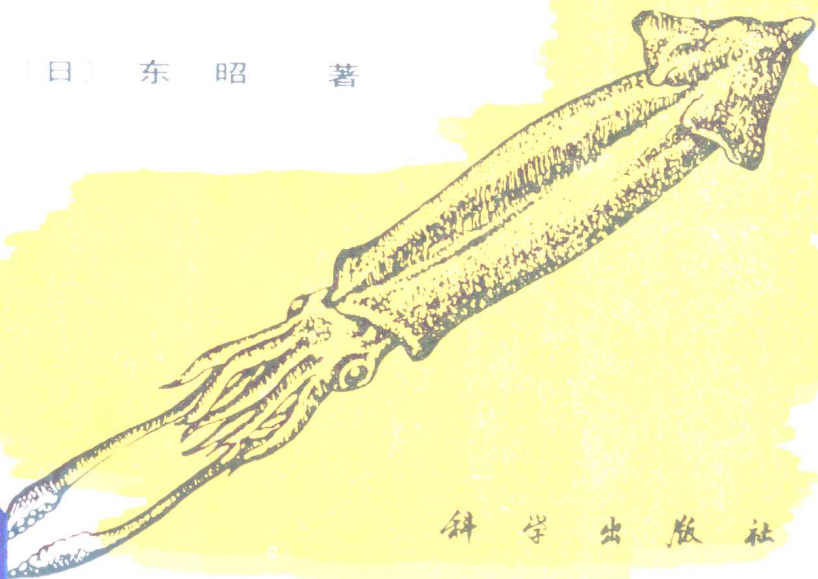


5843
D Z



生物的游泳

〔日〕 东 昭 著



科学出版社

生物的游泳

〔日〕 东 昭 著

丁尚瑾 译

张 明 校

科 学 出 版 社

1 9 8 6

内 容 简 介

水是生命的摇篮。水中生活着无数生物，它们各有各的运动方法。本书以现代物理学和流体力学的最新观点，阐述了各种各样生物的游泳机理，从细菌一直到人类在水中活动的方式方法，还涉及到划船、冲浪和帆板等人们喜爱的水上运动。

本书可供大中学校生物学教学参考及有关科研人员阅读，对水上运动工作者也有一定参考价值。

東 昭

生 物 の 泳 法

講 談 社，1980

生 物 的 游 泳

〔日〕东 昭 著

丁尚瑾 译

张 明 校

责任编辑 朱博平

科 学 出 版 社 出 版

北京朝阳门内大街137号

北京市通县印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1986年8月第 一 版 开本：787×1092 1/32

1986年8月第一次印刷 印张：6

印数：0001—2,500 字数：130,000

统一书号：13031·3253

本社书号：4864·13-18

定价：1.15元

译 者 的 话

本书作者东昭，现任日本东京大学宇航研究所教授、工学博士，著有《生物的飞行》和《生物的游泳》等蓝皮小丛书，都是当前日本博得了广大读者好评的科普读物。本书以通俗易懂的文笔对生物游泳运动的机理，用现代物理学和流体力学的最新观点作了阐述。我们可以通过这本《生物的游泳》，从中得到饶有兴趣的有关基础知识。

本书在翻译过程中承蒙代忠翔、郭定一、夏春豪同志给予指教，在审校过程中又得到了华中工学院王平明等同志大力协助，谨在此一并表示感谢。由于译者水平所限，缺点和错误在所难免，恳请读者批评指正。

译 者

序 言

哺育了日本人民的美丽的瑞穗之国——日本列岛，是由延伸于南北，星罗棋布的一千几百个岛屿组成。北方来的寒流——千岛海流和南方涌来的暖流——黑潮，冲刷着这些岛屿悠然流去。由于列岛幅度狭小，从山地到海岸线的距离较短，在一天的旅程里就可以看到水花溅起飞沫的川流、冲击着岩石的飞瀑，也能看到云影倒映，有水鸟漫游的悠然江河。

列岛上春花秋叶，四季变化分明，每个季节都有特有的鱼类和贝类。不仅在大海里，而且在河川、湖沼也都能渔获很多。它们与色调和谐的海草、山菜一起，以色鲜味美的佳肴丰盛了我们的餐桌。日本人生来就与鱼有不解之缘。

今天，在挂着“江户风味”牌匾的鱼菜饭卷——“寿司”（日本特有的风俗食品）。饭店里也都是进口原料占优势，能够尝到昔日风味的食品，只是在海洋和河川里捕获的鱼和贝类。为了吃到鲜鱼，也得要到西伊豆去垂钓。如同在原野和森林里会对鸟类和昆虫发生兴趣那样，在大海和河川中，也会被鱼类和贝类的生态强烈地吸引。它们的活动，从工程学的角度来看是无与伦比的。

在本套蓝皮丛书的《生物的飞行》中，我对飞翔在空中的生物的运动机理进行了解释。本书可以说是它的姐妹篇，它对水中生物的生态及游泳的机理加以描述。

在天空中飞和在水里游，两者最大的差别是：在空中飞，首先要为怎样悬浮于空间作出很大努力，而在水中，则

这一点基本上不成问题，可全力地去克服阻力，前进。这大概是由于生物原来就起源于大海并由此进化而来，体内大部分是水分（就人类来说占70%），比重近于1的缘故。

其次，还可以指出：空气和水的物理性能有很大差异。不仅它们的密度不同，而且在粘性、含氧量、声音的传播速度等许多方面也都各不相同。因此，在空中飞翔的与在水中或水上游泳的生物，在形态和运动方式上自然也会有所差别。

生物的游泳方式极为多样。与生物的飞行相比，游泳要复杂得多。不管怎么说，羽翼的上下搏动在飞行中总是处于主导地位，昆虫也好，鸟类也好，都是以这种方式飞行。

如前所述，水中游泳基本上可以无须为悬浮花费力气。不论是鱼类，还是哺乳类，只要一心解决前进问题就可以了，它们都各自掌握了与本身的体形相适应的独特的游泳方法。

是空中，还是陆上适于栖息，或者是在水中生活舒适呢？这我不知道。但是，许多种生物确实是从水中爬上了陆地，而且有一部分又再次回到水中去了。我想通过与天上飞的生物作一些对比，说明一下游泳生物的特征。

读过本书之后，再去垂钓或参观水族馆时，如果有了新的见解，则对作者来说，将是很大的欣慰。假如能与上面提到的《生物的飞行》一起读，我确信，定能更有裨益。

对于搞流体力学和飞行力学专业的人来说，一定会对本书没有使用更多的数学感到不满足。关于在写《生物的飞行》和《生物的游泳》两书时所应用的，包括大量解析、计算在内的数学、力学依据，近期内将整理成专著。

在编写本书时，曾获得多位先生的协助：在计算和制图上，得到了研究室的渡部勋和大学研究院的佐藤真知子两位

的很大帮助。在资料收集上得到了黑木敏郎(东京水产大学)、渊秀隆(东海大学)、平本幸男(东京工业大学)、加藤洋治(东京大学)各位教授和松田晴男(第四银行)、田中昭德(浅草寺)、工藤昌男(海中开发技术协会)、大岛壮夫(富士重工)等各位先生以及中下财团日本档案所冈田桑三所长、平野真知子各位先生的大力协助。本书由小幡章(日本飞机公司)、福井日出子、山口惠美子几位先生担任审校。此外,在编辑上得到了生越孝(讲谈社)先生的很大帮助。这里谨对上述各位以及曾经给予鼓励的其他许多先生表示诚挚的谢意。

东 昭

目 录

第一章 水与生物的关系	(1)
水与生物的起源	(1)
空气与水的差异	(4)
江河和湖沼造成的环境	(6)
海洋与海流	(8)
波浪的运动	(12)
在空中与在水中运动的差别	(15)
第二章 浮力与阻力的作用	(17)
水中与空中不同的浮力作用	(17)
气泡的活动	(17)
空泡的产生	(20)
浮游植物的繁殖	(21)
浮游动物的移动	(23)
鱼鳔的功能	(25)
气泡的作用	(27)
摩擦阻力对生物形态的影响	(27)
滨栗文蛤夜行三里	(29)
第三章 鞭毛和纤毛的运动	(31)
精子的鞭毛运动	(31)
细菌的鞭毛运动	(35)
纤毛的群体运动	(36)
向前发送变形波的沙蚕的游泳	(38)
第四章 喷射推进的生物	(40)
喷射的反作用力	(40)
水母的游泳	(42)

乌贼和章鱼的游泳.....	(43)
贝类的游泳.....	(46)
水蛭的推进装置.....	(49)
第五章 游泳时的蛇行运动.....	(50)
扇形的蛇行运动.....	(50)
蛇在水中的游泳.....	(52)
具有长鳍的鳗鲡类.....	(53)
使用尾巴的哺乳类的游泳.....	(54)
只用背鳍和臀鳍的游泳.....	(56)
魮的游泳.....	(58)
海牛的游泳.....	(59)
第六章 摄动式运动的机理.....	(61)
鱼的形态与游泳的方式.....	(61)
细长物体的流体力学.....	(62)
扁平鱼的游泳.....	(64)
上下、左右、前后运动.....	(65)
陆上和水生生物的平衡感.....	(68)
河鱼的分居栖居与体形.....	(70)
栖息于湖泊和池沼中的鱼类.....	(74)
鳍翼的运动方式.....	(75)
从流体力学看尾鳍的形状.....	(82)
最适于强力游泳的尾鳍.....	(88)
团扇和尾鳍的摆动.....	(90)
善于巡游的鱼类.....	(94)
张嘴高速游泳的鱼类.....	(97)
水翼船和鲨鱼的游泳方式.....	(99)
第七章 划船运动的机理.....	(103)
靠人力驱动的船.....	(103)
用桨划船的运动机理.....	(106)
用“荡桨”划行的生物.....	(108)

蹼的游泳方式	(112)
橹和摇桨的划动机理	(115)
盆船	(117)
兴波阻力和飞沫阻力	(120)
胸鳍的多种功能	(121)
起摇橹作用的足	(125)
第八章 水中生物的“振翅搏动”	(127)
振翅搏动的机理	(127)
鱼的“振翅搏动”	(129)
水中游泳的鸟类	(131)
渔民利用鸬鹚捕鱼	(133)
龟和贝在水中的“振翅搏动”	(135)
第九章 哺乳类的游泳	(138)
生活在海洋中的哺乳类	(138)
鲸和恐龙的重量分布	(139)
听觉灵敏的海豚	(142)
椭圆翼型的鲸尾	(144)
大小与速度的关系	(147)
鳍脚类的游泳	(151)
裂脚类的游泳	(152)
人类游泳的机理	(153)
重心移动的效果	(157)
第十章 冲浪运动、扬帆行驶及步行	(161)
新型的体育——冲浪运动	(161)
冲浪运动的驱动力	(164)
“扬帆”行驶的生物	(167)
浮游于水面的生物	(171)
水上滑行的机理	(175)
在水中行走	(176)

第一章 水与生物的关系

水与生物的起源

由颗粒状的陨石聚集而形成的地球，人们称之为原始地球，它通过部分熔融和凝聚逐渐形成了地壳。后来，随着温度下降，出现了海洋、大气和陆地，接着，生命诞生和发展了，从而大自然谱写了许多动人的难以想像的历史。

一般认为，大气层和水域的出现，是在40亿年以前。那时的场景，无疑是云层厚厚地包裹着地球，它对含有少量氧气、大量沼气和氨的大气起着保温的作用；酸性的海水溶解着大量的矿物质。

再往后，海水变成了中性，于是在水域中逐渐形成了无细胞核的生物。如果追踪其源，或许它们是在宇宙空间中形成，而被地球俘获来的物质。光合作用出现了，并开始产生氧气；据说，这种现象发生在距今20—30亿年以前。后来，氧气就在大气层中扩散开来。

水体既提供了形成生命过程中化学反应的重要场所，又保护了新产生的生命不为紫外线所杀伤，并成为安全培育生命的温床。

这个生物起源的宏伟序幕，是在太古的浓雾中揭开的，所以人们还无法对其作出确切的解释。下面，将依次从化石的历史痕迹来追溯生物的发展进程，边简单地阐述一下水对生物的重要影响(图1-1)。

在古生代开始，即进入前寒武纪时，地壳隆起，出现了

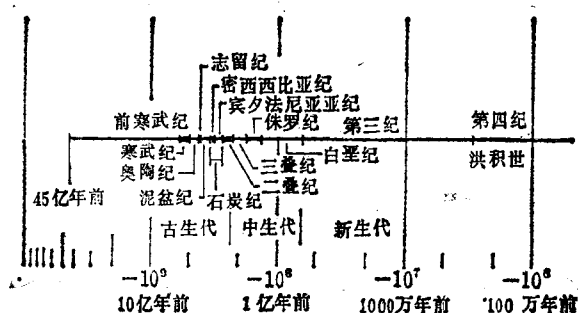


图 1-1 地质时代

有细胞核的生物。最早的具有明显生命迹象的生物是蓝藻，它出现在距今10亿年以前。从那时起二氧化碳逐渐地减少，当进入5—6亿年前的寒武纪时，陆地轮廓已初步形成，在海洋中则出现了三叶虫、软体动物、甲壳类等生物。

到了奥陶纪，温暖的气候促使绿色藻类繁茂起来，一些植物从海洋向陆地发展，从而导致文蛤、鹦鹉螺和脊椎动物的出现。

接着到了志留纪，珊瑚礁大量形成，于是真正地开始了陆上生物的活动。在此期间，三叶虫逐渐衰退，贝类却越来越繁盛。

这时，游离的氧显然增多，由氧带来的氧化作用也开始出现了。大气层中氧的增加促进了在上层空间形成臭氧层，所以生物即使不进入水中也能使身体受到保护，免遭紫外线直接辐射了。

到了3.5—4.0亿年前的泥盆纪时代，气候变化激烈，藻类减少了。环境的变化使生物中不能适应新环境的弱者消失了，另一方面，却促使一些生物进化形成新的种类，鱼、两栖类以及昆虫等出现了。

到了石炭纪，气候又变得温暖和潮湿了。同时，藻类再次增多，羊齿类植物十分繁茂，出现了巨大的昆虫和爬虫类群。

不久，进入了二叠纪。激烈的造山运动引起了气候的剧变。火山活动频繁，碳酸气增多，氧气被新岩石的氧化作用大量消耗，藻类再次减少，而三叶虫灭绝了。但是，从古生代末到中生代，爬行类却发展到了全盛时期。

到了大约二亿年前的三叠纪，象沙漠地带一样的气候来临了，海洋里出现了海龙(*Syngnathus*)、圆颌针鱼(*Tylosurus*)和海龟，陆地上出现了裸子植物，巨大的恐龙类到处走动。据说，小型昆虫和原始哺乳类的出现也是在这个时期。

接着到了侏罗纪，气温再次转暖，出现了鸟类的祖先——始祖鸟。到了中生代末的白垩纪，在陆地上，裸子植物丛中甚至出现了高等的被子植物；在海洋里迎来了浮游植物的第二次繁盛。同时，在这一时期也出现了哺乳类。可是，到了白垩纪的末期，又发生了陆地下沉现象。物质由陆地流向海洋的速度减弱了，海洋的物质循环变得缓慢起来，引起石灰质和有机浮游生物的急剧衰退。因此，以这些作为饵料而生活的菊石类(*Ammonite*)和箭石类(*Belemnite*)等软体动物灭绝了。

进入6300万年前的新生代第三纪，再次形成了大陆。在这个时期，动物方面，鸟类和哺乳类发展很快；植物方面已进入被子植物时代。虽然哺乳类中鳍脚类和裂脚类(参阅第九章)繁殖很快，但一到第四纪的洪积世，又经历了四次冰河期，当时的大多数哺乳类灭绝了。智人的出现则是距今50万年前的事。

在上述生物发展史中，水和空气的作用极为重要。因此，为了了解生物的生存，让我们先来看一下水和空气的物

理性质。

空气与水的差异

空气也好，水也好，都是能自由改变形状的“流体”。在通常的温度和压力范围内，前者是“气体”，后者是“液体”，而它们的物理性质大不一样。这种性质上的不同给在空中飞行的生物和在水中游泳的生物带来了生态上的重大差异。现将两者的主要差别列举于表 1-1。

表1-1 标准状态(1个大气压, 15°C)的水和空气的性质

项 目	水	空 气
密 度 (公斤/米 ³)	淡水 1,000 海水 1,026	1.225
定压比热 (卡/克·度)	淡水 1.00 海水 0.94	0.24
粘性系数 (公斤·秒/米 ²)	淡水 1.16×10^{-4} 海水 1.25×10^{-4}	1.82×10^{-6}
动粘性系数 (米 ² /秒)	淡水 1.14×10^{-3} 海水 1.19×10^{-6}	1.46×10^{-5}
声 速 (米/秒)	淡水 1,460 海水 1,500	340
热 导 率 (卡/厘米·秒·度)	淡水 1.40×10^{-3} 海水 1.35×10^{-3}	6×10^{-5}

注：卡=4.1868焦

(1) 形态——水最令人惊叹的特征之一是它的三态，即固态(冰)、液态(水)和气态(蒸气)能够共存。纯水在一个大

气压下，在零摄氏度以下结冰，在100摄氏度以上便沸腾。而空气在生物能生存的温度、压力范围内保持气态不变。

(2) 密度——水是以在一个大气压下，4摄氏度时的密度作为标准的。水和其他的物质不一样，在4摄氏度时，密度最大。在一个大气压和15摄氏度的标准状态下，空气的密度大约是水的 $1/820$ 。

(3) 比热——将1克的水从14.5摄氏度升高到15.5摄氏度所需要的热量的单位为克·卡。在物质中水的比热最大，是太阳能理想的贮藏库。空气的比热大约是海水的 $1/4$ 。因此，海流能搬运的能量比空气要大得多。但是，空气也同样能够以云的形式大量运载水和冰，所以大气的循环对地球热能的平衡起着非常重要的作用。另外，水的气化热和融解热都是很高的，它们分别为539卡/克和80卡/克，这也可以说是水的独一无二的特征。

(4) 粘性——水的粘性系数比空气高两个数量级。然而，用密度除粘性系数(如果采用表1-1上所列的单位还需乘以重力加速度)所得的动粘性系数，水却要比空气小一个数量级，这一点非常重要。也就是说，同样大小的物体，以同样的速度在水中和在空中运动时，表示惯性力和粘性力的比的雷诺数(速度 $\times$ 长度/动粘性系数)，在水中比在空中大一个数量级，所以，这表明在水中粘性力比惯性力小。

(5) 声速——水的传声速度大约是空气的4倍。这就是说，同样频率的声波在水中波长为空气中的4倍，同时在水中很少衰减，甚至比电波和光波传播得更远。这些现象，对水中生物的生态都有很大的影响。

下面让我们来看看回声探测定位法(echolocation)。与光速30万公里/秒相比，水中的声速显然要慢得多，往返相同距离所需的时间约等于光的 2×10^5 倍。在水中依靠声波活动时，

水中生物的运动速度和响应速度，显然要比在空中飞行的生物慢得多。另外，水中的声波较长，所以食物要有一定的大小才能被发现。对于毫米数量级那样微小的生物，只能通过提高振荡频率或直到非常靠近时，用眼睛来确认。另外，在水中每提高水温1摄氏度便能增加4米/秒的声速；每增加1%的盐分即能增加1.5米/秒的声速；而每增加1000米的水深，同样能增声速1.8米/秒。因此，水中的声波波速也不一样。能够有效接受的信号(S)与波浪、生物和船舶等产生的背景噪声(N)的比例，即信噪比 S/N ，可以想像要比光波差得多。

(6)溶解度——水由于具有渗透、溶解和流动等性质，所以水是构成整个生命系统新陈代谢所必需的重要的组成部分。水具有溶解固体的能力，介电常数也较大；海水的盐分浓度平均为3.5%。

气体的溶解度也是很重要的。在标准状态下，1000毫升的海水中，氮、氧和碳酸气的含量分别为12.0、6.4和0.35毫升。氮和氧的比例在大气中是4比1，而在海水中是2比1。氧与碳酸气的比例，大气中是700比1，海水中是21比1。海水能充分吸收大气中多余的碳酸气。

根据上述情况，在溶解于水的气体中，氧气所占的比例并不小，但其绝对量，与同量空气中的含氧量相比，大约仅为后者的3%，显得非常之少。

(7)热导率——海水的热导率大约比空气高20倍，但与金属相比则要小两个数量级。所以，在大海中热的传导，主要是通过湍流、对流、潮流等水的混合来进行的。

江河和湖沼造成的环境

降落到地表面上的雨和雪，大多被蒸发或被植物所吸

收，而一部分通过地表面流失或渗入地下存贮在表层部分。特别是森林，吸收了大量水分后，能形成更多的地下水，以后再渗到更深的地层或在低地形成小溪流。不论在地表面还是在地下，水都是在重力作用下缓慢地向低处流的。

从山上下落的“山地溪流”大多是急流，一些支流逐渐汇集成为主流。所谓“急流”，是指它的流速大于后面所述的重力波的传播速度 $\sqrt{gh}$ ，这里 g 为重力加速度， h 为水的深度。

山地溪流的水，一般温度在10摄氏度以下，发凉，浮游生物和漂浮的泥沙很少，所以除下大雨后水都是清澈见底。水由陡峭的斜坡奔驰而下，其流速达每秒2—3米，有时甚至达到每秒10米，形成奔腾的湍流。于是，水流侵蚀岩崖，冲击谷底，冲掉山岩巨石，发出轰隆轰隆的响声。

水从山上流向平原，汇成了山脚地带的“中部溪流”，在支流汇集的同时，溪流变宽，形成川流。由于坡度变小，流速随之缓慢下来。河面在白天大半时间受到日光照晒，所以

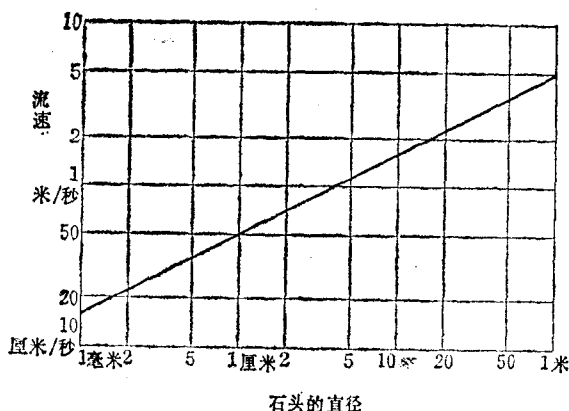


图1-2 石头的直径与移动石头的流速之间的关系