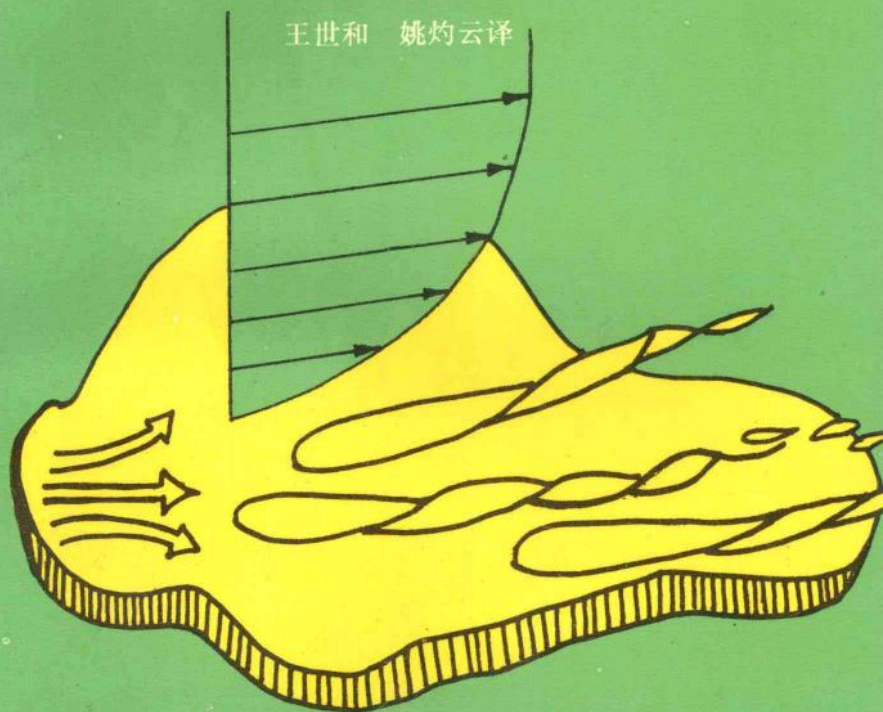


流体力学的发展

——边界层

〔日〕谷一郎 著

王世和 姚灼云译



海洋出版社

流体力学的发展 ——边界层

〔日〕 谷一郎 著
王世和 姚灼云 译

海洋出版社
1991·北京

内容简介

边界层理论初于 19 世纪, 至 20 世纪已具有相当丰硕的成果。该书以流体力学的发展为主线, 详细论述近年来边界层理论的进展, 及其通常采用的研究方法, 为读者提供权威性的综述。全书分为五章, 分别介绍了边界层理论的发展, 渐近匹配展开法, 边界层的不稳定, 分离流, 传热等具有实际应用的尖端课题。

该书内容丰富, 可作为高等院校教师、研究生、高年级大学生及科研人员的参考书。

(京) 新登字 087 号

责任编辑 杨绥华

流体力学的发展——边界层

〔日〕谷一郎 著

王世和 姚灼云 译

陈泽卿 校

海洋出版社出版 (北京市复兴门外大街 1 号)

新华书店北京发行所发行 南航飞达印刷厂印刷

本: 787×1092 1/32 印张: 9.125 字数: 200 千字

1992 年 1 月第一版 1992 年 1 月第一次印刷

印数: 0001—1,000

*

ISBN 7-5027-2186-x / P · 181 定价: 6.00 元

译 · 序

1904年8月的海达尔贝克国际数学会议及路德维希·普朗特 (Ludwig Prandtl) “关于粘性极小的流体的运动”的论文, 开创了边界层理论的发展历史, 打开了通向理解真实流体运动的崭新道路。80多年来, 边界层理论经历了创立、发展、普及、完善乃至各工业领域实际应用的漫长、迂回的过程。边界层理论的深入研究和应用已经或正在丰富着流体力学的知识宝库, 促进着相关科学技术的发展。当前, 理论研究仍在不断深入, 应用范围不断开拓。为了加强对边界层理论的了解, 推进研究进程, 我们即兴将此书译出, 以飨广大读者。

本书著者谷一郎系日本东京大学名誉教授, 日本学士院会员、工学博士、老一辈航空及流体力学专家和卓有成效的研究者, 几十年的教学、科研生涯给了他流体力学界公认的声望。本书是由他主编并组织日本流体力学界名流分担完成的, 是以“边界层”为主题的专著, 是5年前出版的《流体力学的发展: 紊流》的姊妹篇, 是对边界层理论的系统论述和对近年来发展的补充。

本书于1984年脱稿初版。全书共分五章, 即: 第1章边界层理论的发展; 第2章渐近匹配展开法; 第3章边界层的不稳定; 第4章分离流; 第5章传热。每章均列出主要参考文献, 书末附有索引。全书涉及内容广泛、具体, 收集了至本书出版前国际及日本众多学者的主要研究成果及观点, 并作精心的筛选和组织, 使其成为一个完整的整体。本书作为一本专著, 表现出与普通教科书的区别和特点, 因此, 尤其适合于作为高等学校教师、研究生、高年级大学生及科学研究人员的参

考书，用作研究生或流体力学专业大学生的专门教材也不无特色。

本书由东南大学王世和、姚灼云合译，其中：王世和译 1、5 章，姚灼云译 2、3、4 章，并由王世和负责全书统稿。翻译过程中，曾蒙不少流体力学界前辈与同行的热诚鼓励与帮助，使本书翻译工作得以顺利进展。海洋出版社为本书的出版提供了机会，并为提高本书质量做了一些有益的工作，在此一并致以诚挚的谢意。限于译者水平，译本中疏漏和不切之处在所难免，恳请读者指正。

译 者

1991 年 8 月

原 序

本书是继 5 年前出版的《流体力学的发展：紊流》之后，以“边界层”为主题而编写的专著。虽说流体力学是一门古老的学科，但其发展远未终结，如今，活跃的研究仍在继续，因此，目前的流体力学教科书至少在局部范围、在一定时期内落后于时代的发展。为此，正如前刊序言中所述^①。希望将最新的研究进展以专著的形式予以补充。

“边界层”的概念是本世纪初德国科学家 L. 普朗特引入的，他以水、空气等低粘性流体的运动为对象，将粘性的影响局限于接近固体边壁的称为边界层的薄层内，由于层厚很薄，因而可近似地求解运动方程。对伴有压强上升的流动，阐明了边界层从固体壁面分离，有产生旋涡的可能，对迄今只能依赖于实验的粘性流体的大雷诺数运动，提供了分析的新途径和正确理解现象的基础。不久，这一概念推广到边界层流动为紊流的场合、气体高速流动时必须考虑压缩性的场合及伴有热与物质输送的场合等，在广阔范围的流体力学的近代发展方面，作出了无可比拟的贡献。

本书第 1 章“边界层理论的发展”为历史概述，由编者（东京大学名誉教授）执笔。前半部分为边界层理论的创立与初期发展，是编者曾投稿于 *Annual Review of Fluid Mechanics* 9 卷

^①指已出版的“紊流”一书，译者注。

(1977) 的评论性日语翻译稿, 后半部分将重点放在层流, 概要介绍边界层理论在主要课题方面的发展。将重点放在层流, 是基于理论的发展在历史上是从层流开始的, 从而, 介绍创立以来 80 年中有概要意义的过程。与此同时, 关于紊流边界层, 还考虑到与前刊《紊流》中的“紊流剪切流的结构”(小桥安次郎) 及“紊流的计算”(大路通雄) 有很多重复的内容。继第 1 章之后的第 4 章是关于边界层新发展方面典型课题的论述。第 2 章“渐近匹配展开法”由玉田玢(京都大学名誉教授, 大阪产业大学教授) 执笔; 第 3 章“边界层的不稳定”由伊藤信毅(航空宇宙技术研究所、低速空气动力性能研究室长) 执笔; 第 4 章“分离流”由有江幹男(北海道大学校长) 及木谷勝(北海道大学教授) 执笔; 第 5 章“传热”由森康夫(东京工业大学名誉教授, 电气通信大学教授) 执笔。其中的“渐近匹配展开法”深入探讨了边界层理论的数学结构, 可以说是一种新的解析方法, 是进一步应用于更广阔范围所期待的课题。与此相对应, 层流的“不稳定”也未必只限于边界层, 但是关于边界层由层流向紊流过渡的许多研究结果说明, 边界层给予外部层流的不稳定以重要影响。“分离”是与边界层密切相关的现象, 但是边界层理论仅仅启示了分离的可能性。因此, 对所产生的“分离流”的研究目前还处于不得不依赖于实验观察或数值计算的阶段。最后一章“传热”虽也并非限于边界层, 但与“不稳定”一样, 与边界层相关联的课题也取得了重要的发展, 热量输送引起的传热与动量输送引起的摩擦阻力类似, 对这一现象的深入理解是十分有用的, 承蒙各位造诣颇深的执笔者的大力协助, 使我们有可能继续进行如此卓有成效的研究, 作为编者尤感兴奋。本书与已经出版的《流体力学的发展: 紊流》一样,

若能对我国流体力学的发展有所裨益，同样是非常幸运的。

谷一郎

1984年3月

目 录

第 1 章	边界层理论的发展	1
1.1	边界层理论的创立与早期的发展	1
1.2	边界层理论在主要课题方面的发展	15
第 2 章	渐近匹配展开法	80
2.1	阻尼振动与渐近匹配展开法	81
2.2	绕圆柱的缓慢粘性流	91
2.3	流动分离问题	99
第 3 章	边界层的不稳定	119
3.1	序论: 平板边界层的过渡过程	119
3.2	线性稳定的计算	123
3.3	弱非线性效应	132
3.4	波束型扰动的发展	142
3.5	三元边界层的不稳定: 旋转圆盘问题	153
3.6	沿凹曲面边界层的不稳定	158
3.7	二次不稳定理论	163
第 4 章	分离流	168
4.1	分离流的典型示例	168
4.2	分离·再附着流——分离泡	174
4.3	两个分离剪切层的干扰——钝体尾流	190
4.4	用离散涡法解非定常分离流	217
第 5 章	传热	236
5.1	总论	236
5.2	强迫对流传热	240

5.3	自然对流传热	260
5.4	管流边界层	276

第 1 章 边界层理论的发展

1.1 边界层理论的创立与早期的发展

边界层理论开始于普朗特(1875—1953)“关于粘性极小的流体的运动”的论文。1904年8月在海达尔贝克召开的第3次国际数学会议上提出并收入了翌年发行的会议录。这篇论文,可以说开创了流体力学历史的新纪元,打开了通向理解真实流体运动的道路。然而,即使这样,边界层理论的创立完全是孤立的。在此论文之前,没有类似的论文发表,在此论文后的近20年间,除了普朗特学生的数篇论文之外,也未有其他建树。

上世纪的前半叶,由于纳维埃 (Navier, 1823), 泊依松 (Poisson, 1831), 圣-维南 (Saint-Venant, 1843) 及斯托克斯 (Stokes, 1845) 的研究, 产生了粘性流体的运动方程式, 并被确立为现在称之为纳维埃-斯托克斯方程的形式。斯托克斯运用这一方程, 计算了粘性流体中作微幅振动的球所受到的阻力, 采用球表面上无滑动, 即: 球面与流体间没有相对运动的条件。对于在固体壁面上流体必须满足的条件, 至此尚无理论根据, 斯托克斯感到, 无滑动条件对管内流适用的结果与当时所知道的实验不一致, 对边界条件也犹豫不定。所以他在后来的论文中, 勉强采用了无滑动的假说, 而作此假定的时候, 根据是流体与固体间的摩擦应力(剪切应力)应和流体与流体

间有同样的性质，并且也与实验结果相吻合这一点。关于管内流动。斯托克斯（1845）最初的计算结果，经不少后人的反复计算，确认与后来所进行的实验相吻合。

尽管如此，斯托克斯解也只限于极特殊的场合，即纳维埃-斯托克斯方程的非线性项小得可以忽略，或恒等于零，以致可以求得方程精确解的场合。由于实际碰到的问题往往不是这样，因此，为了求解方程，必须引入某些近似。最简单的近似是忽略流体的粘性，但是这样一来结果又重蹈了均匀流中的物体不受阻力这一达兰贝尔疑论的覆辙。对水、空气等低粘性流体的运动，由于粘性影响认为很小，因而这种疑论的意义的确让人难于理解。根据大英百科全书 1888 年版，将略去粘性，从数学上求解流体运动的科学称为“流体力学”，而研究实际流体运动的科学称为“水力学”。

为了求解方程，略去纳维埃-斯托克斯方程式的非线性项有时是不得已的。采用这一近似，对速度缓慢的运动是允许的，而在速度较快的运动中也采用这种近似方法，其所得到的解比起忽略粘性的情况可以较好地表达实际流体的运动（Bassett, 1888）。由此得到了不为零的阻力，无疑是一个进步，但与实际实验结果相比，其值甚小。关于固体壁面的边界条件，在速度缓慢的情况下，对无滑动这一事实几乎没有疑义。而在快速运动的情况下则有意见分歧，一些人假定这种情况下也是无滑动的。如果那样，速度应该从壁面处的零开始连续的变化，对此，并无详细的分析（Lighthill 1963）。另外一部分人，考虑到壁面上滑动的存在，并假定滑动速度的大小及壁面的性质依赖于摩擦应力的作用（Unwin 1888）。

1.1.1 普朗特的论文

在 1905 年的论文中, 普朗特基于固体壁面附近流体状态的明确认识, 阐述了低粘性流体运动的最重要问题。在粘性小的情况下, 由于距壁面极近处为无旋运动, 从无旋运动的速度到无滑动条件所要求的壁面速度为零, 其变化应该在极薄的薄层内。粘性越小过渡层越薄, 速度梯度则越大。如果以粘性系数与速度梯度之积表述的剪切应力与惯性力具有同一程度的大小, 则过渡层厚度必须与运动粘性系数的平方根成正比地变薄。无论如何粘性的影响应该局限在很薄的过渡层内, 并将此取名为“边界层”^①。在边界层外部, 几乎看不出粘性的影响, 无旋运动的近似完全适用。

由于边界层很薄, 在边界层内纳维埃-斯托克斯方程式可以简化。也就是说, 在与壁面相垂直方向上的压强变化很小, 可以忽略不计, 而平行于壁面方向上的速度变化比起垂直方向的变化也可以忽略, 对于二元流动, 在壁面曲率不大的情况下, 沿壁面取作 x 轴, 与壁面相垂直的方向为 y 轴, 各方向速度分量分别为 u 、 v 时, 纳维埃-斯托克斯方程的 x 向分式可简化为

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}$$

^①在这篇论文中, “边界层” (Grenzschicht, boundary Layer) 这一名词只使用一次, 代之, 多次用到过渡层 (Uebergangsschicht, transition Layer)。“边界层”更明朗的使用是在布拉修斯 (Blasius, 1908) 论文以后, 普朗特 (1925a) 认为, “边界层”也未必是一个合适用语, 而是因已在专门论文中引用了, 因此必须继承。

式中 t 为时间, p 为压强, ρ 为密度, ν 为运动粘性系数。由于 p 在 y 方向不变, 其值等于边界层外无旋流动的压强, 并可作为 x 及 t 的已知函数处理。纳维埃-斯托克斯方程为椭圆型, 边界层方程因引入近似而变成抛物型, 致使向上游的影响受到了抑制。为此, 在每一 x 值下, u 作为 y 及 t 的函数而给定时, 可在 x 方向上一步一步地向前进行积分。对 p 为常数的最简单情况, 普朗特给出了边界层方程的相似解, 该解恰好与速度为 U_0 的均匀流中平行放置的半无限薄板周围的流动相符。根据此解, 普朗特推算出长为 x 的平板两侧表面所受的摩擦阻力为 $1.1\rho\nu^{1/2}x^{1/2}U_0^{3/2}$, 第一次给出了摩擦阻力的理论解。式中的系数 1.1 后经布拉修斯 (1908) 的进一步工作修改为 1.33。

这篇论文从应用角度所得出的重要结论是, 由于具体情况的不同, 流动有时会从壁面处分离, 分离点的位置仅仅取决于边界层外部的流动状态。分离的结果, 由于壁面的摩擦作用, 带涡度的流体层离开壁面, 从而使流场条件发生显著的变化, 这与海姆霍兹不连续层有同样的作用。当运动粘性 ν 改变时, 只有边界层厚度与 ν 平方根成正比地改变, 因此, 即使在 $\nu \rightarrow 0$ 的极限情况下, 流场也不改变。普朗特深入进行数理分析, 阐明了流动方向上的压强增高是造成分离的原因。此外, 普朗特还将边壁表面的流动过程作为相互联系的两部分来处理。一部分是依据海姆霍兹涡定理, 作为无粘性考虑的外部流动; 另一部分则是邻接固体壁面的边界层, 其运动由外部流动决定, 与此同时, 由于带涡度的流体层从壁面离去, 也给外部流动一定的影响。最后, 为了证明以上的理论分析, 普朗特还列举了循环水槽中拍摄的流动性状的照片。

1.1.2 边界层概念的原型

普朗特 1905 年的论文可以说是一篇极不寻常的论文，理由至少有三点。首先，毫无先例的新概念的提出显得非常成熟，并且作为论文提出。尽管在此之前，有关边界层这类过渡区的存在及其与摩擦阻力的关系不能断言无人涉及。但与普朗特的上述研究相比，确实可以说是微不足道的。正如以下将要介绍的，如果没有边界层方程，就很难谈得上对流动分离给予什么解释。

为了确定航船按计划所需要的动力，兰金 (Rankine, 1864) 曾经提出：“船的摩擦阻力可以看作船体外表面及附着在其上的滑行水质点间的直接或间接的影响。这种附着与水粘性的共同作用，在接近船体的水薄层中产生无数的小涡，而水质点在涡中旋转的速度可认为与质点的滑行速度具有一定的比例关系。如果这样，消耗船的推进动力而对一定质量的水给予的涡运动的能量，应与速度的平方成正比，亦即与滑行速度的平方成正比。这样，兰金实际上已经将船表面上形成边界层这一事实形象化了。不过，摩擦阻力与速度的平方成正比这一认识仅在表面相当粗糙的情况下成立。根据洛强斯基 (Loitsianskii, 1970) 的研究，应如俄罗斯化学家门德列夫 (Mendeleev) 的专著《流体的阻力与飞行问题》(St. Petersburg, 1880) 中对光滑表面与粗糙表面的区别所描述的那样。门德列夫认为，薄流体层紧贴固体壁面，拖曳相邻流体层，从而在光滑表面上产生摩擦阻力，由此可推论，粗糙表面上的阻力与垂直于流动方向的平板所受阻力的产生原因完全相同。

佛劳德 (Froude, 1872) 在水槽中平行拖曳薄平板的实验表明, 随着平板长度的增加, 摩擦阻力以小于长度之比的比例增加。这一结论可以解释为由于平板前部与开始运动的水相接触, 因而, 平板后表面受不到象平板前部那样的摩擦阻力。此种情况下, 照理佛劳德应该预料到沿平板形成了边界层, 并且越向下游边界层厚度越厚。事实上, 在后来的论文 (Froude, 1874) 中, 作为摩擦阻力的回顾, 曾指出过沿平板流动的流体必须有动量损失。普朗特 (1927b) 引用了佛劳德的研究成果, 并称佛劳德是“将平板摩擦阻力归于表面附近速度梯度明显层的最初英国研究者”。如果从 1869 年在 British Association for the Advancement of Science 上的演讲要点来判断, 佛劳德在着手系统的水槽实验之前, 似乎对边界层已有某种程度的概念。

在分析静止空气中被加热的薄铅直半无限平板引起的自然对流问题时, 洛伦兹 (Lorenz, 1881) 假定, 流动与平板平行 ($v=0$), 速度 u 及温度 θ 都仅是 y 的函数, 并且, x 、 y 分别与平板平行及垂直, 坐标原点置于平板前缘。于是, 运动方程简化为 $0 = g(\theta - \theta_1) / \theta_1 + \nu d^2 u / dy^2$, 能量方程为 $u(\theta - \theta_1) / x = \kappa d^2 \theta / dy^2$, θ 表示周围静止空气的温度, g 是重力加速度, κ 表示温度传导系数。令平板表面温度为 θ_w , 在进行变量代换 $y = \alpha y'$, $u = \beta u'$, $\theta - \theta_1 = (\theta_w - \theta_1) \theta'$ 时, 为使方程式只用无因次量 y' 、 u' 及 θ' 表示, 必须有 $\alpha^4 = \nu \kappa x \theta_1 / g(\theta_w - \theta_1)$, $\beta^2 = \kappa g x (\theta_w - \theta_1) / \nu \theta_1$ 。这表明边界层厚度与 $x^{1/4}$ 成正比增大, 速度最大值与 $x^{1/2}$ 成正比增大。只是方程式的简化尚为不妥, 其中存在着一定的矛盾, 即, 运动方程中的惯性项被完全忽略, 而在能量方程中, 与之对应的对流项又近似

地被保留。尽管如此，上述结果与后来的正确结论 (Schmidt, Beckmann 1930) 仍然一致。再者，洛伦兹将无因次方程的解用 $z = 1 - \exp(-y')$ 的级数表示，计算了平板的传热效率，在 $\kappa = \nu$ 时，其值比精确值大 36%。

洛伦兹的论文^① 就其在温度边界层中传热项与对流项有同样程度大小这一点上，应作为边界层概念的原型。由于温度在能量方程中表现为线性关系，因此，考虑温度边界层或许比考虑速度边界层来得容易。普朗特 (1949) 引用这篇论文时指出：“这是有关自然对流的最早论文，并且，也是关于边界层的最早论文，只是边界层厚度以及最大速度在 x 方向的变化未能给出”。显然，作为自然对流的最早论文还算合乎情理，但作为边界层的最早论文似乎过奖了一些。况且，边界层厚度等沿 x 的变化关系也未能给出，这也许是普朗特的疏忽吧！

按笔者推测，普朗特在写第一篇关于边界层的论文 (1905) 之前，或许没有注意到洛伦兹的论文，如果有机会读过这篇论文，那么，在他的首篇论文中不会不提到这一点。这是一个关于历史，特别是关于构思的优先权，需要认真推测的问题。前面谈到的疏忽也支持了这一推测，可以设想，也许普朗特在首篇论文发表之后才得知了洛伦兹的论文，并不禁为两篇论文的思路如此一致而吃惊吧！

1.1.3 很晚才被接受的理论

普朗特论文不寻常的又一方面是很晚才被人们所接受。并

①对给笔者提供本论文的约翰·霍普金斯大学的柯尔辛 (Stanley Corrsin) 教授和东京大学工学部的甲藤好郎教授深表谢意。