

日本流体力学研究现状*

今井功**

今天我要讲的题目是关于日本流体力学研究现状。正好七天前我在这里作了第一次报告¹⁾。今天的报告是作为团员的最后一个报告。人们常讲“龙头蛇尾”这句话。我的两次报告可能是“蛇头蛇尾”²⁾。我要讲的题目虽然是日本流体力学研究现状，但这个题目太大，对我来说很难讲全面。只能限于代表团成员所从事的工作和他们了解的一些情况，因而肯定不全面而且是很片面的，对此请大家谅解。下面分理论研究和实验研究两部分作介绍。

理论研究

为了方便起见，按教科书的顺序那样讲一讲。先讲完全流体、二维流。关于这个问题有几个利用复变函数的方法。这里有Blasius得到的有关物体和力的公式，也就是作用于物体上的力和力矩的Blasius公式。作用于物体上的力和力矩(图1)，可用流体流动参数来表达。这个公式是对于定常无旋流动情况的。但对非定常、有旋流，即 $\frac{\partial}{\partial t} \neq 0$, $\text{rot}V \neq 0$ 时，怎样确定一般公式？这时用函数论方法求出非定常、有旋流作用于物体的力与力矩的公式。

另外，根据流体力学原理，可用超函数加以简化。这里的超函数不是超越函数，例如迪拉斯的 $\delta(x)$ 函数，是在二元情况下的，原点上有涡量的流动就是这种。这虽然是很简单的情况，但我使用超函数把上述流动加以简化。

下面讲粘性流体力学，首先讲二维问题。对低速运动或低雷诺数的情况，即低速运动 $\approx \text{Re} \ll 1$ ，也可用函数论。

众所周知，这里有Stokes近似和Oseen近似。对这两种近似也可用函数论把问题简化。用这种方法可以把完全流体的问题变成类似于位势流的形式。从数学上讲就是Stokeslet是Stokes近似的基本解，同样Oseenlet是Oseen近似的基本解。我们把Stokeslet和Oseenlet叫做Stokes源和Oseen源。这相当于完全流体的点源。

通过这样的处理，对任何二元物体的力和力矩，可以得到与Blasius公式一样的公式。Kutta-Joukowski的定理也可以用类似的途径表达出来。

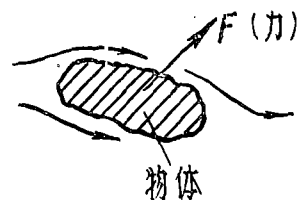


图1

* 日本流体力学者访中团一行16人于1979年10月20日—11月3日访问我国。本文是团长今井功教授11月2日在中国科学院力学研究所作的报告。

** 东京大学名誉教授、工学院大学教授。

1) 10月22日在力学所作了题为“流体力学的类比”的学术报告。

2) “龙头蛇尾”是日本的成语，意思与我国“虎头蛇尾”一样。这里用“蛇头蛇尾”一词表示自谦。

从这个意义上说,对二维低速流动,可用与完全流体二维流几乎相同的形式表达出来。对低速粘性流体Oseen方程的各种准确解方面,已故的友近晋教授(S.Tomotika)和他的同事们做了大量工作,例如对任意攻角、圆柱、椭圆柱和球等的绕流的研究等。还研究了圆柱格栅和平板格栅绕流,这是以前的工作。最近由桥本(Hasimoto)教授对任何形状物体重复排列时的绕流进行了研究,这类似于对晶格的Madelung的工作。对完全流体来说,晶格问题中的基本解是库伦位势流;而对粘性流体的场合,基本解是Stokes的解。

在应用方面,有很多固体粒子混在流体中时,可以讨论胶体(Colloid)的流动,还有多孔介质流体流动等。

上面谈到的是基本方程为线性的情况。但众所周知,N-S方程是非线性的,因此求其准确解是很难的。当然作为特殊情况的个别解还是有的,但对任意形状的物体,求准确解是不可能的,因此要尽可能找出接近于解的渐近解。所以把上述的Stokes近似和Oseen近似作为第一近似,然后逐步得到更高阶近似值。二十多年前,已经对任意形状物体的粘性绕流,在离物体很远的地方得到了渐近解。用它可以得到作用于物体的力和力矩。虽然这是渐近解,但有关力和力矩的公式完全是正确的。使用这种渐近解,可以说明Filon难题。Filon难题不怎么出名,大家可能不大熟悉,因此在这里稍加说明。与此有关的有一个Stokes难题。利用Stokes近似对任意二元物体是得不到解的。这里Oseen近似是以Stokes近似作为基数构成的,Oseen近似是把Stokes近似中被忽略的,与惯性有关的项,在一定程度上考虑了进去的。所以利用Oseen近似,可以处理任意形状的物体绕流。

但Oseen近似仍然是近似方法,因此用Oseen近似作为第一近似,然后逐步进行更高阶近似。

如果物体上下不对称时(图2),用Oseen近似得不到好的结果。我们把它叫做Filon难题。这些问题使用上述的近似方法可以完全解决。通过这样的方法,我们可以知道N-S方程中没有可疑的余地。

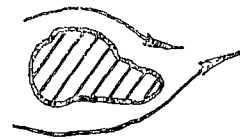


图2

这里使用匹配展开法(matched expansion method)把流场分成几个区,然后在每个区得到解,通过匹配方法把它们连接起来。通过这样的方法,可以对粘性流体力学进行很有效的研究。在日本,成濑文雄教授使用这种方法,对各种形状物体或物体系得到了近似程度很高的解。

下面讲一讲N-S方程本身在数学上的研究方法。刚才说了N-S方程是非线性的,所以对给定的边界或者初始条件,存在不存在解是未知的。所以数学工作者对这种方程的解的存在和唯一性很感兴趣。可是对我们流体力学工作者来说,对这种数学基本方程的解的存在、正则性不怎么关心。原来是这样想的,但最近改变了这种想法,越来越多的人认为这些问题与流动状态为层流或湍流有关。但也人反对这样的想法。所以对此我们相互之间还有不同意见。

对这种数学问题,日本藤田宏教授进行了很细致的研究。这个研究和苏联女科学家Ladyjenskaya(音译)的工作内容差不多。

从数学上去求解N-S方程是很困难的,但流体力学工作者想方设法,通过这个方程去处理流体的问题。所以需经过努力,通过数值计算来解决这个问题。幸好电子计算机的发展,使得数值计算越来越可能。关于这个方面使我回想起二十多年前,我的助手川口光年对

Re = 40的圆柱绕流进行的数值计算，是用手摇计算机进行计算的。通过冗长的计算，得到了如图 3 所示的这种漂亮的流线。直到现在，对川口先生用手摇计算机进行耐心的计算，我感到很钦佩。这个计算花了一年多时间。可是随着电子计算机的发展，现在可以很快算出来。

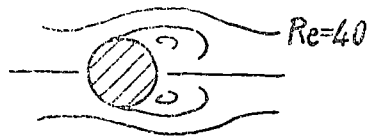


图 3



图 4

对同样的问题，日本高见颖郎教授进行了工作，对各种Re数做了计算。我认为他的工作中得到的流动图案，很有参考价值。他的同事桑原邦郎对Re数高的流动和完全流体，用涡数来表达。Re > 1000时，物体后面有湍流性尾流。他把涡量的分布用很多孤立的涡代替，尾流 (Wake) 用涡系来表达 (图 4)。这样一来，雷诺数Re的大小不成其为问题，除尾流外的流动，可用完全流体来处理。

这样，对任意形状物体在均匀流场中的边界层的分离，可用这种涡代替 (图 5)。这样可以观察涡的运动随时间的变化。所以这些问题的计算很简单，就是说一个涡的运动看作是由其他涡的诱导力的作用下的运动，因此最适于用电子计算机来进行计算。

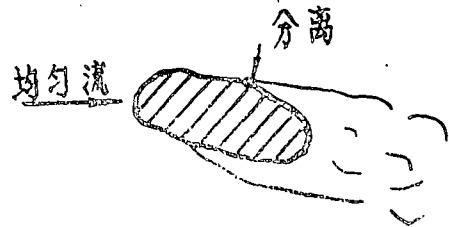


图 5

但随着时间的变化，涡的数目越来越多，所以计算时电子计算机的容量是个问题。根据他的计算，这些涡类似于卡门涡。通过同样的方法可以计算作用于物体上的力。因此，通过这样的计算，可以算出作用于物体上的非定常气动力。今天回国的神部勉副教授对涡 (环) 进行了数值计算。上面仅举了几个例子，在日本有很多这种计算。

下面谈谈雷诺数高时的粘性特性，也就是层流和边界层的干扰问题。

很早以前，我自己提出了这种想法：对层流的粘性流体问题，用涡粘性代替。因为动量输运很厉害，所以表面上看是粘性的问题，但是对高雷诺数流动，可用表面上是低雷诺数的方法处理 (图 6)。因此对 $Re_{\text{有效}} \approx 50-100$ 的流动进行计算，可得到与实验结果比较吻合的结果。这种方法是一种比较懒惰的研究工作者的做法。下面谈谈分析上比较严格的一种方法。



图 6

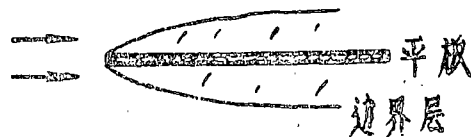


图 7

按照边界层理论，边界层的形状是抛物线 (图 7)。按照边界层理论，在局部的边界层会影响到下游，但不影响上游，这是因为基本方程是抛物线的，所以有限长的平板和半无限长平板的流场是一样的。但边界层理论是近似理论。如果把这个作为第一近似，然后进行逐次近似的话，那会成为什么样呢？

这个问题是大约十年前已故的郭永怀教授 (Kno, Y.H.) 开始做的。我第一次去康奈尔大学时, 在那里与郭教授一起渡过了一段时间。郭教授研究的主要问题是有限平板后面部分 (尾流) 对边界层的影响。他当时注意了对后缘的影响。我对前缘的影响做了研究。因为我们两人有这样的工作关系, 所以我对郭永怀教授有感情。如果他还活着, 今天在这里能见到他该多好啊。

下面讲讲可压缩流体力学。

可压缩流动可分为亚声速流、跨声速流和超声速流。在日本, 对亚声速流早有很多研究。其中有 M^2 展开法, 即 Janzen-Rayleigh 法另一个是薄翼展开法, 一般叫做 Prandtl-Glanert 方法。第三是速度图法 (Hodograph 法), 即著名的卡门-钱学森方法。这些方法的研究, 在日本也得到了广泛的发展。例如绕任意物体的有升力的绕流问题 (图 8), 其中有个环流。这样的问题在物理面上不好处理, 因此要变到速度图上来处理, 这在日本使用得较广泛。利用速度图法不仅能处理亚声速流问题, 而且也能处理跨声速流, 其中有友近-玉田 (Tomotika-Tamada) 的方法。后来几乎没有人继承他们的工作。最近由东京大学宇宙航空研究所恢复了与跨声速流有关的工作。

下面作为流体力学的一个问题, 谈谈波动问题。最近日本流体力学工作者对波动问题越来越感到兴趣。这是因为在波动的非线性现象中, 出现了很多在线性问题里不出现的现象。对这个问题, 今天在座的桥本教授和今天回国的角谷教授为中心做了大量研究工作。例如对孤立波 (Solitary waves), 孤立子 (Soliton), 非线性周期波, 非线性调制 (nonlinear modulation), 波的干扰, 水深的影响等问题进行了详细的研究。

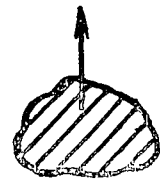


图 8

下面介绍与湍流有关的问题。对流动的稳定性问题, 日本非常关心。今天回国的巽友正教授做了很多工作。在线性稳定性理论方面巽友正教授处理了 Poiseuille 流动。他对 Poiseuille 流动的管道进口的流动稳定性 (图 9) 方面做了研究, 这是以前的工作。神部勉副教授处理了三维扰动问题。除此以外, 巽、角谷等人进行了自由界面方面的工作。

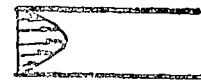


图 9

在旋转流体的稳定性、热对流、电磁流体的稳定性等方面, 京都大学的后藤副教授进行了长期的研究。关于稳定性问题, 进行线性处理是比较完整的, 所以现在转到非线性方面。稳定性的非线性问题正引起大家的兴趣。前面提到的后藤副教授和他的同事们对旋转流体、热对流等问题, 用非线性处理的方法进行了研究。今天在座的桑原教授是用完全不同的方法进行这方面的工作的。这是把流动展开为正交函数的数列, 然后进行数值计算。这种数值计算也是很麻烦的。我认为今后还是要进行这方面的研究工作。

最后谈谈湍流问题, 这是流体力学中很大的问题。日本流体力学工作者关心的是均匀湍流问题。这是从已发表的文章看到的, 对这方面巽友正教授起了先驱作用。他对各向同性流体首先提出 Cumulant 展开法。最近又对 Burgers 湍流不仅用 Cumulant 展开法, 而且用渐近展开法、Kolmogorov 相似律和湍流谱进行研究。还有一个轴对称湍流, 对这个问题, 在座的大路教授用的动量展开法进行了研究。最近还有用场理论方法 (field theoretic method) 的。在场的桑原教授和吉泽微 (Yoshizawa) 进行了艰苦的工作。最近还有稀薄流体力学的研究。对此曾根教授进行了很多工作。对等离子体的研究方面, 10月27日先期回国的丹生教授

做了大量工作。

实 验 研 究

日本利用实验方法对流体力学的基础和应用两方面进行了广泛的研究。从研究机构的性质、设备、人员和经费考虑，大学和大学附属的研究所主要侧重于基础研究和小规模的应用研究。大规模的应用研究是国立研究所和民间企业的研究所来承担。例如国立研究所中有航空宇宙技术研究所(科学技术厅)、机械技术研究所等。就大学来说，和理论研究情况一样，除国立大学外地方(郡、都、道、县、市)公立大学和私立大学进行了很多研究。

研究的内容是多方面的，因此不能简单地分类，但主要可分为基础和应用两个方面。在这里首先介绍一下对不可压缩流方面的基础和应用方面的研究工作。在不可压缩流的实验研究方面，目前最活跃的应用研究有飞机、特别是垂直起落飞机的研究，农场和市区局部的气象现象，建筑物受风力的研究，特别是高层建筑附近的风力很大，这在东京高层建筑林立的地方比较严重。与此有关的问题是高山附近的气流流动，例如日本富士山周围的绕流，飞机靠近这个区域时可能由于这些气流的影响而掉下来。还有日本比较严重的公害问题，其中有大气污染问题和海水中污水的扩散和移动问题。对这些问题进行实验和观察，或者进行模型试验。把这些问题中具有共同性的问题，分成如下几方面进行研究：边界层的分离和再附，物体和物体之间的干扰，物体和物面的干扰，湍流扩散，垂直方向上密度梯度引起的层流中的扩散问题，以及过去与泵、发动机有关的流动问题。还有船舶绕流，传热，海和湖的流动。围绕这些问题，作为基础研究主要开展湍流边界层问题。例如物面上有点源或汇的问题，又如椭圆形或更复杂形状物体的绕流问题，两股以上射流的相互干扰方面的基础研究。在湍流研究中引人注目的是湍流结构，因为湍流中有比较系统的、有秩序的运动。在湍流的特性中，热和动量的运输是不是由于系统的运动引起的结果？这种湍流和比较系统的运动之间的相互干扰是最近引人注目的话题。在日本，几年以前对这些问题进行过研究，特别是湍流边界层和物面相接的地方、粘性层的外缘部分有周期性的猝发现象(Bursting)引起人们的兴趣。正如前面所述，要从层流转到湍流，首先层流的稳定性遭到破坏，但层流里的扰动只增加其振幅的话，流动仍为层流，也就是表现为大振幅的振动现象。那么从层流过渡到湍流，到底有什么因素在起作用呢？研究表明，流动完全转变为湍流的过程中非线性效应或三维效应起很大作用。要通过实验方法研究湍流结构。对有秩序的层流运动转变到完全没有秩序的湍流运动，研究其结构和机理是个很重要的问题。关于这方面的问题，过一会儿请在场的佐藤浩教授来讲，因此我就不讲了。

近年来，在流体力学方面登场的引人注目的课题有：

1. 生理流体力学——主要处理生体内的流动问题，在场的松信教授研究了血管内阻碍物附近的流动问题；
2. 生物流体力学——主要对鸟、鱼、昆虫等生物和飞行有关的流动，目前进行对这些问题的观察、理论分析和实验，很多研究者在做这方面的工作；
3. 有相变的流动问题——这在工程上有广泛的应用，一个例子就是云形成过程中蒸汽变成水滴，然后水滴与大气相互作用的问题，这些问题引起了人们很大的注意；
4. 空气动力学噪声——这在流体力学方面来说是不可压缩流和可压缩流二者之间的边

缘问题,因此这些问题具有不可压缩流特性的同时又具有可压缩流的特性。在工业上有待于解决的问题很多,但实验研究开展得还很不够。关于这方面的情况,在场的板尾教授了解得很多,因此我就省略了。有一种很有趣的现象是当两个涡环相碰时产生声音,对此目前正进行理论研究。还有湍流与声波的干扰(吸收与反射)问题等。

下面讲讲流体力学实验中使用的实验装置。各种内容的实验研究当然需要各种实验装置,但是今天不能一个一个地介绍这些实验设备,因此只把风洞和有关的测试装置作一个简单介绍。

日本有各种各样的风洞,最大的风洞直径为10米。这些设备直接用在应用研究和实验研究中,例如汽车可以用实物进行实验。这种大型风洞,在建设需要很多经费,而且在运转的过程中也需要很多经费。因为运转费用高,因此这种实验要在很短的时间内得到实验数据,为此要使用电子计算机。另外把测得的数据要换成所需的气动参数,也需要电子计算机。电子计算机不仅能收集和整理模型实验的数据,而且还用到实验中改变参数等一系列控制装置中。

与此相反,在基础研究中使用的是小型风洞。这种小型风洞的试验段一般为 $400 \times 400 - 1000 \times 1000$ 毫米²,风速大约十到几十米/秒的范围。

对基础研究中用的实验装置,其大小和风速不是最主要的,而气流的质量是主要的,也就是风速要稳定,流场要均匀,湍流度小,能附加湍流扰动等。例如从层流转到湍流的研究时,要求有

$$\sqrt{\frac{u'^2}{u}} < 0.1\%$$

一般是0.03%。

在特殊的研究中风速要随时间而改变,或者温度、速度梯度也能调整。在基础研究中,不仅要测出平均流,而且速度的变动分量也要测出来。

这些测量仪器中,有的使用激光测速仪(多普勒流速计),而大部分是使用热线风速计。湍流研究者根据各自的要求,自己设计制造适合于湍流测量的热线风速计。整理测量数据时除使用频谱分析和相关测量外,还使用电子计算机只取某一工况下数据的所谓带条件的标本抽样法(Conditional Sampling)。

除了测量外,还用电子计算机对特定工况处理数据。这是在湍流中有系统的运动时运用的方法。这在东京大学宇宙航空研究所佐藤浩教授的实验室中是不可缺少的。在湍流谱和相关测量中,现在使用小型电子计算机和其他数字电子计算机。使用电子计算机的重点不在于提高实验的效率,而主要在对实验数据的分析上。

最后简单讲讲可压缩流的实验研究。日本有关可压缩流体力学实验研究的设备是从1950年以后开始建立的,包括各种高速风洞和激波管风洞,到了60年代基本建成。也就是说50年代的末期开始建设,60年代建设好了。这一点跟中国的情况比较相近。

这些风洞建成以后,有效地应用于基础研究和应用研究以及实用研究中。建设这些大型风洞设备和激波管时,先在大学和附属研究所中建设比较小型的设备,做些基础研究。其目的是在这些单位中先积累一些有关建设和运转的经验的基础上,由政府机关的研究单位例如航空宇宙技术研究所进行大型设备的建设。日本现有的高速风洞、激波管都比中国力学研究所和绵阳气动中心的设备小,我们认为日本运转和操作这种设备的经验对中国的大型设备的

边界层研究进展^{*1)}

中国科学院力学研究所 卞荫贵

自从本世纪初边界层理论问世以来,七十多年的发展历程充分表明它在近代流体力学中所起的重要作用。边界层理论现已广泛应用于航空、航天、航海、叶轮机、化学工程以及气象学、环境科学及对流传热传质学等方面,并且在应用中又不断得到充实和提高。在这期间人们写过不少专论和述评性文章,对边界层的研究工作进行了总结和评论。最近十年内就有 Goldstein (1969), Smith (1970), Schlichting (1974), Tani (1977) 等人的一些很好的总结报告。由于边界层这个课题牵涉面很广,若干年来文献又很多,所以笔者除了对边界层理论早期发展过程作极为简要的说明外,重点介绍最近十五年内边界层研究进展较为突出的方面。

一、边界层研究的简要历程

边界层理论的发展过程可以分成三个阶段来叙述。从本世纪初的1904年开始到30年代中期的第一个三十年为初始阶段。这是创造新理论,开展基本研究的阶段。在这之前,描述带有粘性的真实流体的纳维尔-斯托克斯方程(以下简称N-S方程)建立了已有半个多世纪。人们普遍认为这种非线性的偏微分方程组的求解当时几乎是不可能的。Prandtl以他特有的才能以及对问题的透彻理解,对N-S方程进行了合理的,大幅度的简化,如下式所示(以二维定常不可压缩流为例):

* 1980年2月22日收到。

1) 本文曾在第二届全国流体力学学术会议(1979年11月9—16日,无锡)全体会上报告。

运转可能有些参考价值。反过来,我们也期望着中国大型设备的研究成果。

日本的大型风洞及其设备应用于研制实际飞机或火箭的实验研究中。当然,这些设备的运转、控制和数据处理都用电子计算机进行。

在实际飞机的设计中,风洞实验结果和数值计算结果结合起来进行设计,因此风洞实验就作为这种设计的一部分。

在比较小型的高速风洞、激波管、炮风洞,还有低密度风洞中流动进行三维物体绕流的超声速流、激波和边界层的干扰、带有物形变化的高焓流动、稀薄气体流动等研究。

利用这些小型装置进行基础研究时,也要实现实验的计算机化。所谓实验的计算机化就是利用传感器(Sensor)和小型计算机采集数据,送到中央大型计算机处理。我们叫做“检出器的智能化(Intelligent)”。计算机采集数据,在中央处理;传感器传递的数据,经处理后存在计算机中。这就是一般所说的“计算机利用法的阶层化(Hierarchy)”。

(金哲学根据今井功报告和钱福星口译录音整理)