

一种强螺旋流现象的实验研究

熊鳌魁 魏庆鼎

摘要：螺旋流一般通过切向进流、安装导流片或旋转管道三种方式产生，但Horii等人通过实验发现有三种装置也产生了非常稳定的螺旋流。笔者利用激光测速仪针对其中一种装置产生的螺旋流进行了时均速度分布测量。实验结果表明，本例情况下时均流动先是形成不对称双涡结构然后过渡到单一涡结构而形成螺旋流的。

关键词：螺旋流；实验测量；多普勒激光测速仪

中图分类号：V211.7; TN249 **文献标识码：**A

文章编号：1007-3124(1999)04-0008-06

Experiment study on a sort of strong swirling flow

XIONG Ao-kui, WEI Qing-ding

(Dept. Mech. & Eng. Science, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract : In general, swirling flows in pipes are generated by three means: tangentially inletting medium; guiding fluid by vanes with a certain angle and axially rotating pipe. Horii and his co-workers have in experiments discovered that there exist other three kinds of apparatuses that can also cause strong swirling flows. In this paper, the velocity distributions of the swirling flow taking place in one of the three apparatuses are measured by LDV and the feature of the flow is drawn from the results which illustrate that the swirling is formed in the evolution of asymmetric double vortices into single vortex.

Key words : swirling flow; experiment measurement; LDV

0 引言

螺旋流在工业方面的应用范围极广，如在射流技术、燃烧技术、气力输送、旋风分离及水力浮选等方面均广泛应用了螺旋流。在各种分离器、旋流水雾干燥器、涡管、搅拌器及管道系统中常可见到螺旋流。螺旋流对传热的强化作用也已在理论和实验两方面得到证实。因此在发动机燃烧或其它火炉中，常通过引入螺旋流来稳定火焰及强化燃料和空气的混合，同时起到加强热量以及质量的交换。螺旋流技术也进入了人们日常生活领域，如螺旋流节能煤气灶等。此外，螺旋流在自然界也是十分常见的，如龙卷风等。

一般来说，螺旋流常规产生方法有三种：切向进流、安装导流片及旋转管道。但

日本白百合女子大学Kiyoshi Horii等人^[1]用空气作为流动介质，在雷诺数分别为 1.0×10^5 及 1.6×10^5 的条件下，在如图1示的装置中，通过子午面内小孔径向向心射入的进流方式，用粒子显示出非常稳定的螺旋流的存在。其后又发现流体通过扩散管+弯头+收缩管（如图2示）的装置后也产生了螺旋流^[2]，并对所发明弯头的抗磨损性能进行了对比试验，发现材料的使用时间大幅提高，大约是常规弯头的100倍，而且能有效地防止阻塞的发生^[3]。Horii等人认为前者是由于扩张段的效果，后者的原因之一是由于收缩段产生螺旋流的效果。随后再次提出了一种螺旋流发生装置^[4~6]，即环状轴对称开口径向进流加锥形收缩管（如图3示）。并对其在纤维运输、等离子体喷涂等工程应用中的效果进行了研究，发现完全沿径向垂直进流的效果要比向轴向前倾偏斜进流的效果好。后来进一步的工程应用研究表明，将该装置应用于亚微米粉状物的分装、光纤的安装以及输送传感探头等方面均获成功，克服了原有技术的不足^[7,8,10]。此外，通过对这种装置所产生的射流情况用激光进行的观测，发现较一般湍流射流的扩散角减少45%，而且湍流脉动也小了55%^[9]。说明这种射流的聚拢性和稳定性都较好。

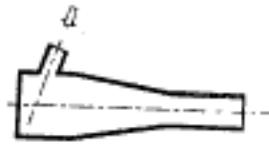


图1 子午面内小孔径向向心射入的进流方式

Fig.1 Inletting along meridian plane

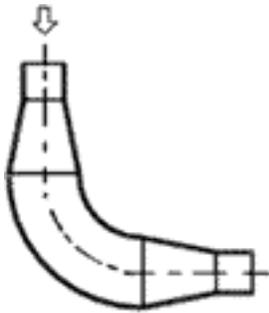


图2 能产生螺旋流的弯头

Fig.2 the bend causing swirling flow

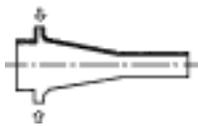


图3 环状轴对称开口径向进流方式

Fig.3 Inletting by annular slit

然而，上述三种类型的装置为何会产生螺旋流以及管道结构形状、几何参数对螺旋流的形成与发展有何影响却不甚清楚。除 Horii教授等人作过系列研究外，未见报道。Horii虽也试图解释这种流动现象，如初步认为Coanda效应与流动不稳定性是产生螺旋流原因，然而根据还很不充分。事实上Horii等人的工作主要集中在螺旋流在工业方面的应用以及流动显示方面。因此从实验上探讨这种特殊的强螺旋流的产生与形成过程以及弄清各种影响参数的作用显得十分重要。这不仅有助于给人们提供一种进一步提高螺旋流性能的思路，亦能帮助人们进一步认识流体流动中的一些非线性流体力学现象。

1 实验模型和实验设备

仔细分析一下Horii的三种装置，可以发现他们有两个共同点：一是在装置几何形状上都有一段收缩段；二是流体都经过较大角度的转弯流动。特别是第一种（图1）和第二种（图2）装置的共同特征更为明显（不妨把前者看成一种特殊的弯头）。而收缩段不可能是产生螺旋流的直接原因^[11]，因此对于第三种装置（图3）而言，螺旋流在进流断面形成后（其原因尚不清楚，有待于今后的深入研究），在其后的过程中并无特别之处。Horii的测量结果也说明了这一点^[12]。但对于前两种装置，情况有所不同。从形式上看，他们的流动条件并不具备轴对称性。在这种情况下流动何以会形成具有轴对称特点（不一定是严格的轴对称）的螺旋流？其演化过程又是怎样的？由于还没有这方面的测量数据和相关结论，笔者将重点研究这些内容。

与第二种装置相比，第一种装置在速度分布测量及数值模拟两方面都要方便些。因此本次实验选择了第一种装置，即通过子午面内小孔径向心射入的进流方式。实验模型（图4）均用厚度为10mm的透明有机玻璃材料制做，其基本尺寸为：入水管内径30 mm、长1000 mm；出口平直管内径55 mm、长1000 mm；根部圆管内径80 mm、长90 mm；收缩段长140 mm。入水管轴线与出口平直管轴线夹角 63.43° 。

Horii的实验均是以空气为介质，气源由空气压缩机提供。本次实验则以水为介质，含有排除介质压缩性影响的目的。实验中，基于平直管内断面平均轴向速度及直径的雷诺数为 1.1×10^5 。

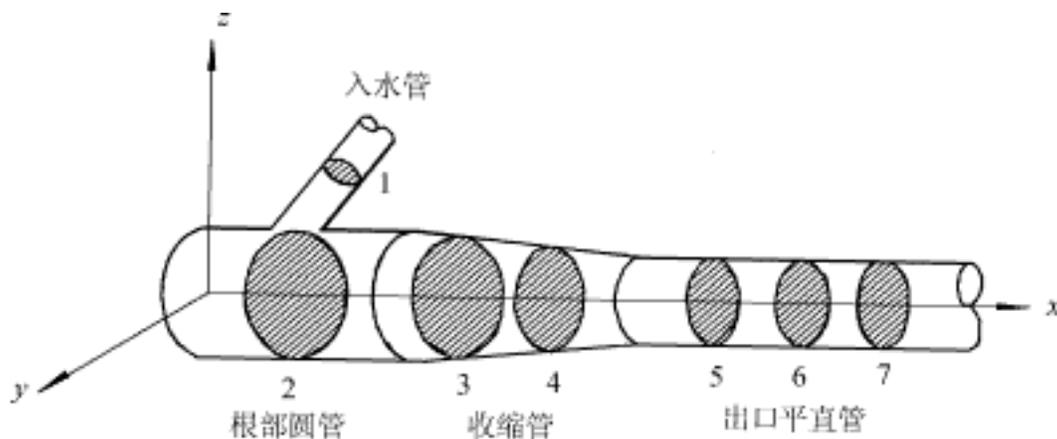


图4 实验模型及测量断面示意图

Fig.4 The sketch of the experimental apparatus and the test sections

本次实验的目的是通过测量管内的速度分布来了解螺旋流的生成与发展演化特点。而在测速计具有线性特性好、空间分辨率高、动态响应快、对流场无干扰等优点，特别适合于内部流场的测量。本文所用测速设备为TSI公司生产的三维激光多普勒测速成仪，该系统主要性能参数为：最大功率4W，测量使用功率1W。速度测量范围0.1~350m/s，测量精度0.1%~20%。本次实验设定一次平均的数据采样频率为2kHz，一次采样时间为40s。

这里还需说明的是，由激光管发出的三种波长分别为514.5nm（绿光），488nm（蓝光），476nm（紫光）的激光，在每种波长的激光经光学系统分成两束一对后，每对用来测量一个方向上的速度。三对六束光可以同步测量三个方向上的速度，但这三个方向的其中两个方向并不正交（第三个方向则垂直于不正交两方向所组成的面）。由测速系统投影处理后，才输出三个正交方向的速度值。三个方向信号数据的采集，其样本既可是彼此独立，也可是三者复合。前者对样本的认可是分开的，即一个通道认可的样本，另外的通道可以排除。后者则必须三个通道均认可才作为样本进行统计。本次实验采用了复合方式同时测量三维速度分布。

尽管激光测速有许多优点，但由于激光测速是利用运动粒子的光散射多普勒效应测量流体流速的仪器。因此它实际上测得的是微粒的运动速度，这就要求被测流场中的微粒有一定的浓度。在自然微粒达不到浓度要求时，就需人为地添加粒子。本文通过在泵的引水管中引入一定量的空气，经过泵叶片的打碎形成很多的微小的空气泡来形成示踪粒子。另外一个问题是当用置于空气的激光探头来测量以水为介质的流场时，光线不可避免地将要穿越多重介质，会存在折射问题。本次实验将模型安放于一有水的循环水槽中（水槽中的水静止），这样当激光穿射循环水槽的有机玻璃壁及水槽中的水再进入模型管内时，他们能起到补偿的作用。此外实验用水亦可直接从水槽中抽取又排入水槽，从而形成一个供水循环。

实验循环用水的动力由水泵提供。所用水泵为ISG65-125离心泵，额定流量25m³/s，扬程20m，吸程6.94m，电机功率3kW。

2 实验结果分析及结论

本次实验共测量了若干断面处(图4中的阴影断面)垂直于装置对称纵剖面直径上的时均速度分布。这些断面包括：入水管道上的一处断面(图5)；根部圆管流体入口正下方的一处断面(图6)；收缩段上的两处断面(图7,8)以及平直出水管道上的三处断面(图9~11)。这里定义(u, v, w)分别代表轴向方向x、垂直于对称面的右方向(面向于x方向)y以及对称面内的右手系方向z上的速度分量。在本情况下，除了入水管断面处，其余各断面处z方向上的速度分量w正好代表了周向速度分量。而y方向上的速度分量v则代表了径向速度分量(但在本次实验中，此速度分量的测量数据过于分散，本文未予采纳)。而从图6~11可见(图中速度单位为m/s，横坐标单位为mm。图中曲线均为10次多项式在最小二乘法基础上的测量数据拟合曲线)，轴向速度分布(图a系列)演化的主要特征是从起始的不均匀分布发展到后来的均匀分布。从研究螺旋流角度看，轴向及径向速度分量均不是主要的考虑对象(特别是后者)。因此本文仅对周向速度分量(图b系列)进行详细分析。

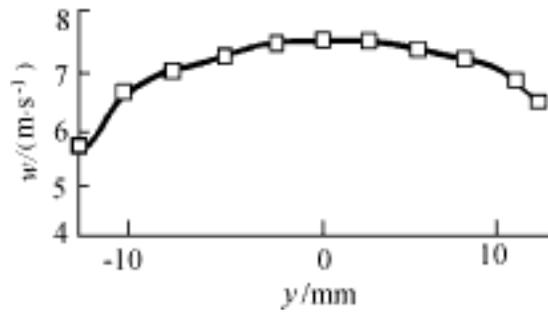
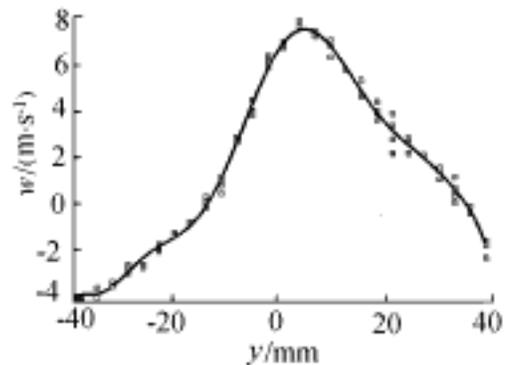
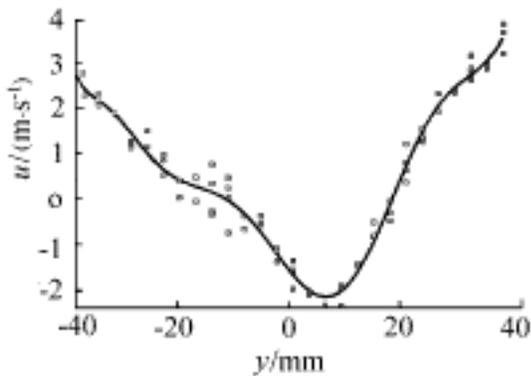


图5 入水管道断面1处的速度分布
Fig.5 Velocity distribution on the Section 1

尽管入水管道内垂直于x-y平面的z向流速在直径上的分布基本对称（图5），但在实验装置流体入口正下方的断面 $x/D=0.625$ （ D 为根部圆柱的直径）处，周向速度分布仍出现了一定程度的不对称性（图6(b)）。从速度分布的正负号变化来判断，可以肯定时均流场在这一断面有左右不对称两涡存在。随着向下游的发展，在收缩段内 $x/D=1.875$ （图7(b)）、 $x/D=2.250$ （图8(b)），周向速度分布基本上已形成从负到正的单调增形态，且在一边管壁附近有一较大峰值。单调增形态说明时均流场此时已无两涡结构，而是只有一个不对称的涡。也就是说已从双涡结构演化为单涡结构。进入平直出水管后，如图9(b)（ $x/D=4.1875$ ）、图10(b)（ $x/D=4.8125$ ）、图11(b)（ $x/D=5.4375$ ），周向速度分布在大部分直径位置上都呈直线分布，属于强迫涡形态。这表明已形成了较稳定的螺旋流。

根据上述对周向速度分布演化的分析，基本上可得出这样的结论：本次实验证实本装置产生螺旋流的过程是非对称导致的不对称双涡在相互作用后卷并为一个涡。但形成不对称性的原因目前尚不清楚，而这一原因很可能正是下游最终形成螺旋流的根本机制。有待于进一步实验研究。



(a) (b)
图6 根部圆柱流体入口正下方断面2处的速度分布($x/D=0.625$)

Fig.6 Velocity distributions on the section 2

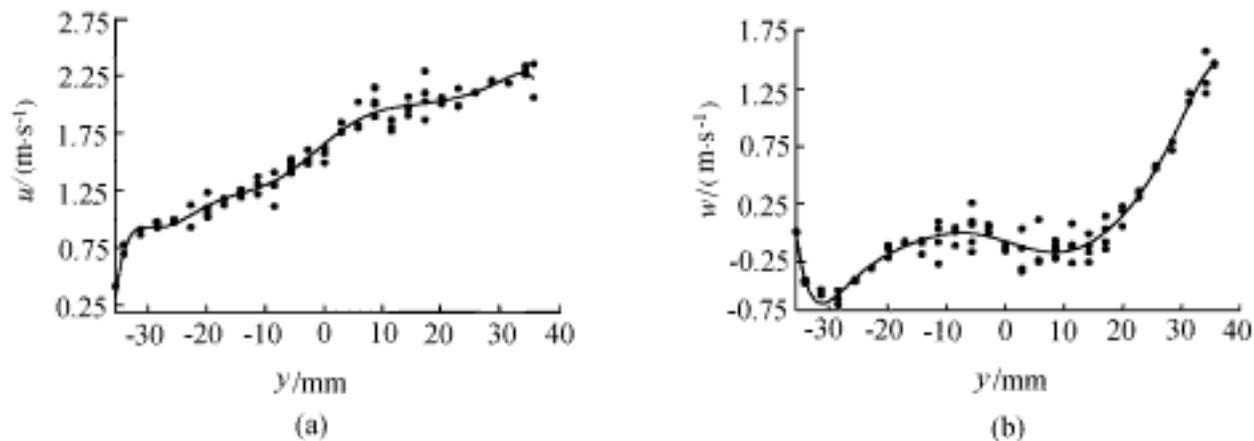


图7 收缩段内断面3处的速度分布($x/D=1.875$)

Fig.7 Velocity distributions on the section 3

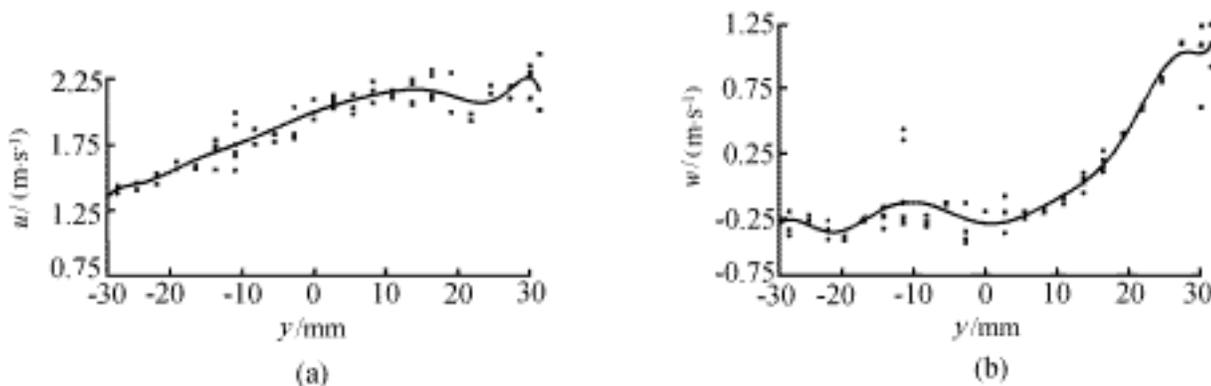


图8 收缩段内断面4处的速度分布($x/D=2.250$)

Fig.8 Velocity distributions on the section 4

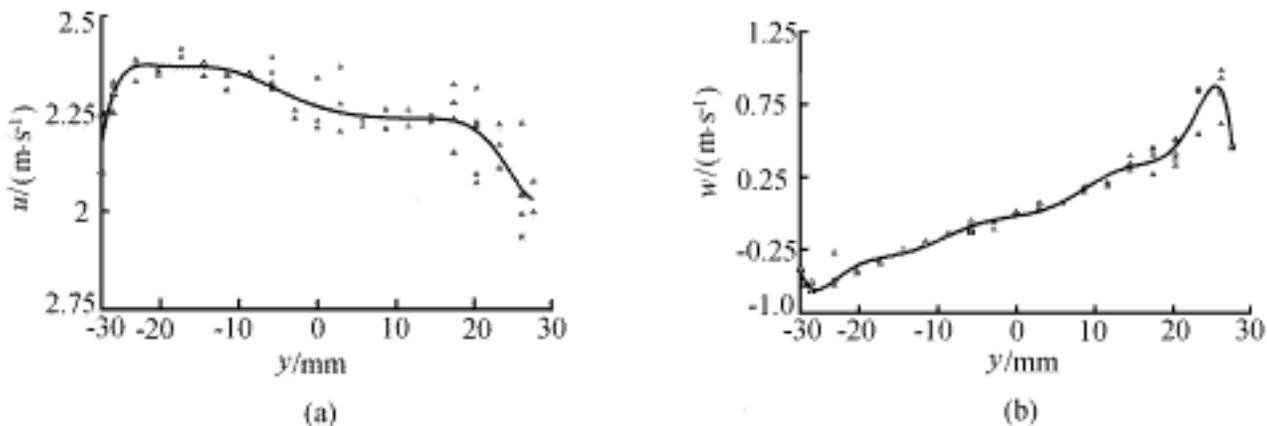


图9 平直管道内断面5处的速度分布($x/D=4.1875$)

Fig.9 Velocity distributions on the section 5

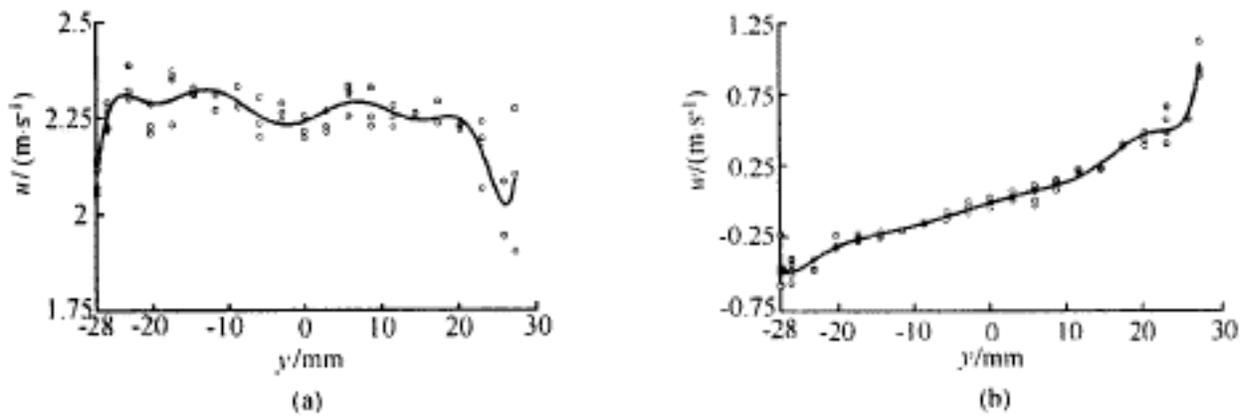
图10 平直管道内断面6处的速度分布($x/D=4.1825$)

Fig.10 Velocity distributions on the section 6

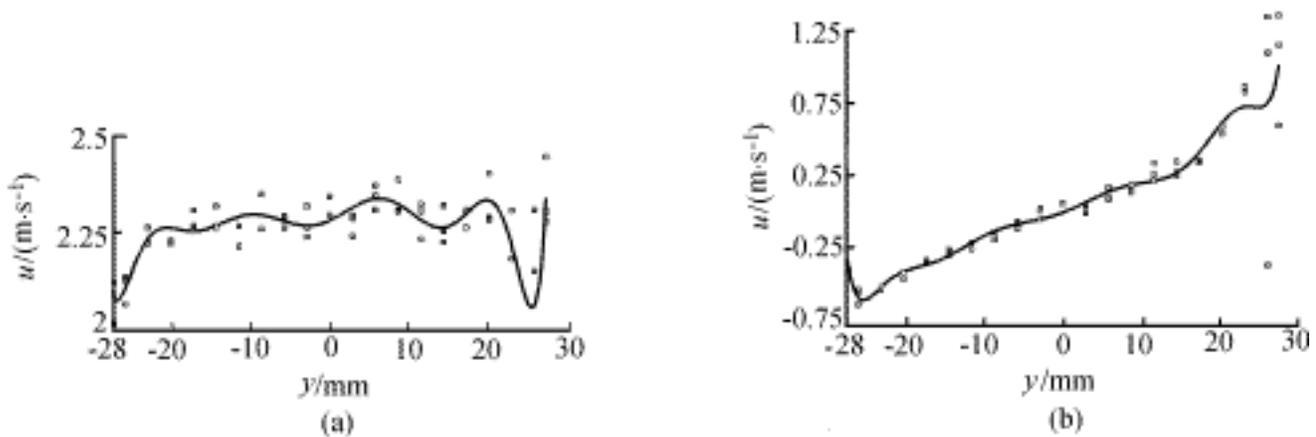
图11 平直管道内断面7处的速度分布($x/D=5.4375$)

Fig.11 Velocity distributions on the section 7

基金项目：自然科学基金(19572005)和攀登项目资助

作者简介：熊鳌魁(1960-), 男, 湖北省武汉市人, 北京大学博士研究生.

作者单位：北京大学湍流研究国家重点实验室, 北京大学力学与工程科学系, 北京100871

参考文献:

[1] HORII K, MURATA T, TAKARADA M and MARUI T. A study of spiral flow (Part 1): Phenomenon in a cylindrical pipe. Trans. Japan Soc. Aero. Space Sci., 1985, 28(81).

[2] HORII K, MATSUMAE Y, CHENG X M, MIYAMOTO M and TAKEI M. A study of spiral flow (Part 2): Vortex phenomena in a specially shaped bend. Trans. Japan Soc. Aero. Space Sci., 1988, 31.

[3] HORII K, MATSUMAE Y and TAKEI M. An erosion resistant bend-theory and development. -Industrial Appl. Fluid Mech. ASME FED-1988b Vol.70.

[4] HORII K, MATSUMAE Y, CHENG X M, TAKEI M and HASHIMOTO B. A study of spiral flow (part3): Opening and orientation control of fiber by spiral flow trans. Japan Soc. Aero. Space Sci., 1990a32(98).

[5] HORII K, MATSUMAE Y, CHENG X M, TAKEI M and HASHIMOTO B. A study of spiral flow (Part 4): The effect of radial reynolds number of spiral flow on plasma deposition of pipe. Trans. Japan Soc. Aero. Space Sci., 1990b, 32(98).

[6] HORII K, MATSUMAE Y, CHENG X M and HASHIMOTO B. A study of spiral flow (Part 5): Analysis of frictional force acting on short fiber. Trans. Japan Soc. Aero. Space Sci., 1990c, 32(98).

[7] HORII K, SAWAZAKI H, MATSUMAE Y, CHENG X M, TAKEI M, YASUKAWA E and HASHIMOTO B. New continuous system for dispersion and encapsulation of submicron powders using spiral flow. -Industrial Appl. Fluid Mech. ASME FED-1990d, Vol.100.

[8] HORII K, MATSUMAE Y, OHSUMI K, CHENG X M, KAGE S and HASHIMOTO B. Novel optical fiber installation by use of spiral airflow. -Industrial Appl. Fluid Mech. ASME FED-1991a Vol.132.

[9] HORII K, MATSUMAE Y, OHSUMI K, CHENG X M, TAKEI M, YASUKAWA E and HASHIMOTO B. Focusing phenomenon and stability of spiral flow jet. Trans. Japan Soc. Aero. Space Sci., 1991b, 33(102).

[10] HORII K, TOMITA Y, KATAOKA I, KUWANO H, SHIMO Y and ITO H. Sensor probe stabilized blowing system for telecommunication conduit using spiral airflow. -Industrial Appl. Fluid Mech. ASME FED-1994, Vol.186.

[11] 熊鳌魁. 强稳定螺旋流现象研究及非线性涡粘性模式的应用: [博士论文]. 北京: 北京大学 1998.

[12] HORII K, KIRCHHOFF R H and WHITE F M. Experimental investigation of spiral-Jet self-generation. Private communication. 1991.

收稿日期: 1999-06-07