

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

## 含同軸中心柱體之流場不穩定特性研究 A study on the instability phenomena of fluid flow over a coaxial center-body

計畫編號：NSC 88-2112-M-002-018

執行期限：87年8月1日至88年7月31日

主持人：沈弘俊 台灣大學應用力學研究所

### 一、中文摘要

本計畫以實驗方法探討具中心擋體的環形噴流在自由邊界下之流場結構與其不穩定現象。在定性分析上，利用煙霧產生器產生煙霧，配合雷射切頁顯影技術以觀察流場型態，並透過攝影機記錄整個流場隨時間變化過程。在定量量測上，應用雷射都卜勒測速儀，進行速度隨時間與空間位置變化的量測，獲取流場速度結構和速度頻譜特性。發現具中心擋體將使流場提早進入紊流狀態，且擋體後方迴流泡產生渦流流逸，而向下游發展的尾流結構，會由環形噴流的內部區域影響到外部區域，並且主導整個環形噴流流場。由流場視察及頻譜分析發現週期流逸及擬似週期流逸二種流逸。改變雷諾數的過程中，流場型態變化的過程為：穩定流狀態，週期狀態，擬似週期狀態，非週期狀態，終至紊流狀態。

**關鍵詞：**環形噴流、中心擋體、剪流層、流場結構

### Abstract

An experimental investigation is described to study the structures and the instability phenomena of fluid flow over a coaxial center-body. Flow visualization by using laser light sheet and a video camera is applied to observe the transient phenomena of the flow. Laser-Doppler anemometer was also used to measure the velocity information at different locations of the flow. The velocity fluctuations and their spectra are obtained from the LDA measurements.

Results show that the wake structure, generated downstream of the center body and evolved downstream, will affect the inner shear layer and finally influence the outer shear layer of the annular jet flow. The characteristics of the annular jet structure are affected accordingly. Flow will become earlier turbulent state with a center body than that without a center body. It is also noted that two modes of vortex shedding behind center body were found in this experiment, namely, periodic shedding and quasi-periodic shedding. The experiments for various Reynolds numbers conditions were carefully carried out many times. It was found that the only route to turbulence for this flow was in the following sequence: stable state, periodic state, quasi-periodic state, non-periodic state, and finally turbulent state.

**Keywords:** annular jet, center body, shear layer, flow structure

### 二、緣由與目的

在自由環形噴流中，中心擋體後方渦流流逸(vortex-shedding)向下游發展的尾流結構(wake structure)，對整個流場而言舉足輕重。Chan & Ko (1978)的研究指出，環形噴流出口中心擋體產生的迴流泡以及尾流渦流(wake vortices)會導致環形噴流比純噴流(single jet)更快進入一個完全發展狀態(fully developed state)。Ko & Chan (1979)發現內部迴流區和其下游附近區域受到駐渦流(standing vortices)及其傳遞行為(propagation)所控制。但經過下游一段距離之後，會發現由勢流核心(potential core)與迴流區之間的剪層所發展的另外一種渦流結構，將壓制駐渦流的發展。因此造成

沿軸向向下游量測的史卓赫數發生階差(jump)的現象。Ko & Lam (1985)和 Lam & Ko (1986)更進一步探討環形噴流的特性，發現中心擋體有以下之效應：(1) 提供一個低壓迴流區(迴流泡)。(2) 渦流流逸引誘出向下游發展的尾流渦流，並且增強(enhance)外部自由流的捲入機制(entrainment)。(3) 內部的尾流渦流刺激(excite)噴流外部剪層區域產生擾動並向下游發展渦流結構。

Sheen et al. (1997)探討具中心柱體的環形噴流流經軸對稱突張管的流場結構。發現在雷諾數上升及下降的路徑之間存在分歧現象，此分歧範圍可由觀察再接觸長度得到，約在  $200 < Re < 440$ 。雷諾數小於 440 流場型態是穩定，雷諾數大 440 以上時變得比較不穩定而且週期性愈來愈明顯。依附在中心柱體後中心迴流區內的渦流流逸則扮演了影響再接觸長度的角色。

根據前人的研究，不具渦漩作用下，純環形噴流流逸究竟是中心擋體後方渦流流逸及下游發展的尾流所控制，還是受到外部剪流層(outer layer)所影響，抑或是兩者相互作用的混合機制所主導？本文將詳加探討。

實驗設備如圖 1 所示。

### 三、結果與討論

圖 2 為環形噴流在不同雷諾數下的流場顯影照片，在  $Re=100$  時，如圖 2(a)所示，因迴流泡區和中央渦流核心的低壓區造成外部剪流層漸縮。當雷諾數增加到  $Re=150$  時，自由流區的傳遞動量足以克服中心擋體後方所形成的低壓區；流場上游微縮之後，便呈穩定的傳遞，且下游非常的平順，如圖 2(b)所示，環形噴流游迴流泡下剪流層保持相同的截面。 $Re > 350$ ，如圖 2(c)所示，可以發現渦流流逸型態，中心擋體後左邊分離層剪流層有一小渦漩在發展，隨後渦漩繼續發展並往下游移動，當移動到接近中心迴流泡的頂端，渦

漩開始伸展並脫離分離層，渦漩往下游流逸之後，另一個新生成的渦漩在左邊的迴流泡邊緣出現。圖 2(d)和圖 2(e)為在不平衡的狀態下，迴流泡呈不對稱且右邊膨脹，隨後膨脹開始向下拉伸，接下來另一渦漩生成，並在迴流泡內發展，大約經過三個週期渦流流逸的過程，迴流泡保持穩定，之後又回到不平衡狀態。雷諾數增加至 1600 之後，環形噴流出口狀況進入了過渡範圍，而且介於中心擋體後方迴流區和自由流之間的速度梯度也增加。圖 2(f)為  $Re=2200$  之顯影照片。由於流場已進入紊流區，使得流場擾動增加。

為了進一步探討中心擋體後方產生的渦流流逸與外部剪流層(outer layer)之間的關係，本文嘗試使用不具中心擋體的圓管(circular pipe)，其水力直徑  $D_1=30$  mm，與環形噴流水力直徑相近。以流場視察和速度頻譜分析，探討流場在不同雷諾數下，其外部剪流層發生的機制，並與具中心擋體的流場比較。

由流場視察發現，當  $Re < 700$  時，流場呈穩定狀態，剪流層保持相同的截面，如圖 3(a)和圖 3(b)所示。 $Re > 800$  時，外部剪流層始產生渦流結構；並隨著雷諾數的增加，其渦流釋出頻率與剪流層擴張角都隨之增加；因此造成橫向速度的增加，使外界大量流體捲入，造成混合。圖 3(c)為  $Re=1160$  於下游  $x/D=2.5$ ，始有渦流結構；圖 3(d)則為  $Re=2200$  於下游  $x/D=1$  出現。在同一雷諾數，環形噴流的擴張角遠比圓管噴流為大，也就是具中心擋體噴流將使流場提早進入紊流狀態。

由上述的分析，可發現一項事實：環形噴流在  $350 < Re < 1500$  發生渦流結構流場，比圓管噴流( $Re > 800$ )來得低。換言之，環形噴流在  $Re < 1500$  時，中心擋體扮演重要的角色。中心擋體後方迴流泡產生渦流

流逸，而向下游發展的尾流結構，會由環形噴流的內部區域影響到外部區域。起源於中心擋體底部，沿著迴流泡的邊緣，經自由流向下拉伸而釋出的渦流，會影響環形噴流的外部區域，捲出(roll-up)一連串個別的渦流(discrete vortices)。然而，當  $Re > 2000$  時環形噴流在中心擋體下之渦流流逸與外部剪流層之渦流就顯得複雜。Lam & Ko (1986) 在高雷諾數範圍的環形噴流實驗中，也發現中心擋體後方的尾流結構會刺激(excite)噴流外部剪流層產生渦流結構。

圖 4 是在  $x/D=0.09$ 、 $Re=250\sim 5800$  中心軸上所做的定點量測。當雷諾數很低時，如圖 4(a) 所示，只有設備所產生的電子雜訊，沒有特殊頻率，可知流場十分穩定。當雷諾數大於 350，流場變化開始有週期性，而且可以看出單一高聳尖峰及其諧和頻率。如圖 4(b) 所示， $Re=405$  時，速度的擾動類似正弦波，其頻譜有一尖峰，與流場觀察結果比較，可知此為週期渦流頻率。在雷諾數大於 570，則有兩個互不呈倍數關係的頻率，如圖 4(c) 所示，有兩基本頻率以及其線性組合頻率。為了方便辨識，將  $Re=570$  和  $Re=660$  的頻譜繪在圖 5，而水平軸為線性座標，可以很清楚的看到兩個基本頻率  $f_1$  及  $f_2$ ，所有頻峰是這兩頻率的線性組合，可以如下表所示：

$$f = m_1 f_1 + m_2 f_2$$

其中  $m_1$  和  $m_2$  為整數， $f_1$  和  $f_2$  分別為週期流逸頻率及擬似週期流逸頻率。

當雷諾數繼續增加，如圖 4(d) 所示，寬帶分佈的雜訊開始出現，但尖銳的頻譜峰依然存在。當雷諾數繼續增加，峰寬逐漸加厚， $f_1$  和  $f_2$  逐漸增加，直到雷諾數 2000 以上，沒有任何特徵頻率出現。 $Re=5800$  時，如圖 4(e) 所示，中心擋體後

的尾流已經完全屬於紊流。

本實驗發現一條由層流往紊流發展的途徑：穩定狀態(圖 4(a))  $\Rightarrow$  週期狀態(圖 4(b))  $\Rightarrow$  擬似週期狀態(圖 4(c)~(d))  $\Rightarrow$  紊流(圖 4(e))，此結果與 Gollub & Benson (1980) 對熱流實驗的路徑類似。

#### 四、結論

(1) 中心擋體後方迴流泡產生渦流流逸，而向下游發展的尾流結構，會由環形噴流的內部區域影響到外部區域，並且主導整個環形噴流流場。

(2) 圓管噴流流場中， $Re > 800$  剪層流才會形成有條理的渦流結構。渦流結構的頻率隨著雷諾數的增加而增加，擴張角也隨之增大。

(3) 比較環形噴流與圓管噴流流場，在同一雷諾數，環形噴流的擴張角遠比圓管噴流為大，也就是具中心擋體噴流將使流場提早進入紊流狀態。

(4) 週期流逸速度頻譜出現了一個特徵頻率  $f_2$  及其高階諧和頻率，屬於週期性。擬似週期流逸包含數個週期流逸之組合，速度頻譜中有兩個特徵頻率  $f_2$  和  $f_1$  及其這些頻率的線性組合頻率，屬於擬似週期性。

#### 五、參考文獻

- Chan W. T. & Ko, N. W. M. (1978) "Coherent structures in the outer mixing region of annular jets," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 89, pp. 515-533.
- Gollub, J. P. & Benson, S. V. (1980) "Many routes to turbulent convection," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 100, pp. 449-470.
- Ko, N. W. M. & Chan, W. T. (1979) "The inner regions of annular jets," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 93, pp. 549-584.
- Ko, N. W. M. & Lam, K. M. (1985) "Flow structures of a basic annular jet," *AIAA*

Lam, K. M. & Ko, N. W. M. (1986)  
 "Investigation of flow structures of a basic annular jet," AIAA Journal, Vol. 24, No. 9, pp. 1488-1493.

Sheen, H. J., Chen, W. J. & Wu, J. S. (1997)  
 "Flow patterns for an annular flow over an axisymmetric sudden expansion," Journal of Fluid Mechanics, Vol. 350, pp. 177-188.

六、附圖

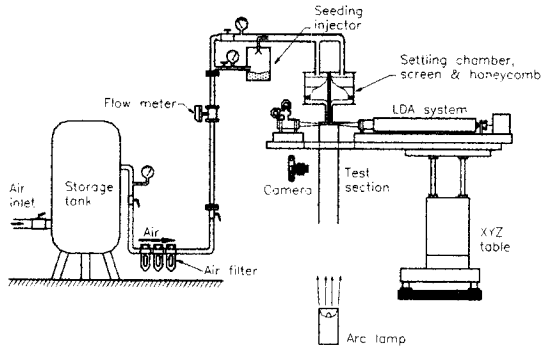


Fig. 1. Schematic diagram of the experimental set-up.

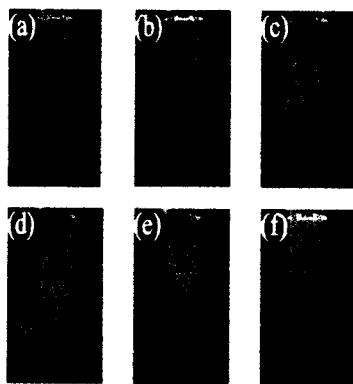


Fig. 2. Video images of the annular jet for (a) Re=100, (b) Re=300, (c) Re=480, (d) Re=660, (e) Re=1160, (f) Re=2200.

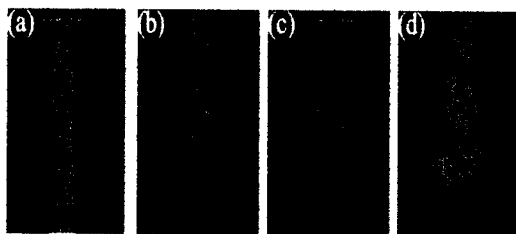


Fig. 3. Video images of the single jet for (a) Re=100, (b) Re=660, (c) Re=1160, (d) Re=2200.

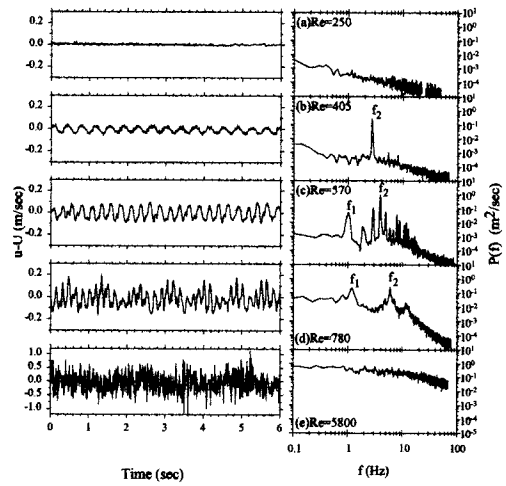


Fig. 4. Velocity records and power spectra showing the sequence of instabilities leading to non-periodic flow (measurement position at  $x=80$  mm and  $r=0$  mm). (a) stable flow state with low energy level and without any predominant peak when  $Re=250$ ; (b) a periodic state with a single peak and its harmonic when  $Re=405$ ; (c) a quasi-periodic state with two incommensurate frequencies and many of their linear combinations when  $Re=570$ ; (d) a periodic state with relatively sharp peaks just above the onset of noise when  $Re=780$ ; (e) a turbulent state with no sharp peaks showing the broadband noise above its onset when  $Re=5800$ .

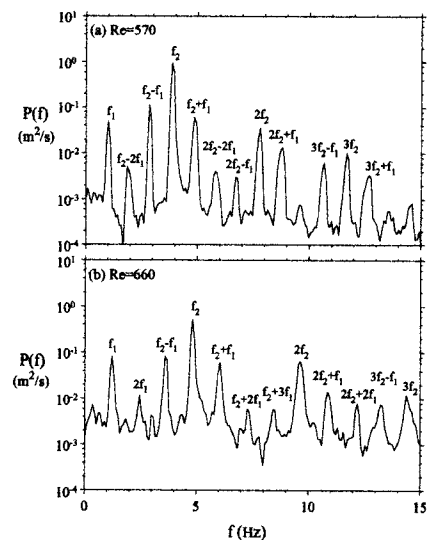


Fig. 5. A quasi-periodic state with two incommensurate frequencies  $f_1$ ,  $f_2$  and many of their linear combination. (a)  $Re=570$ ; (b)  $Re=660$ .