

高雷諾數及中高攻角下 6 : 1 橢球體表面流場可視化之實驗研究

高浩鈞* 楊鈞堯* 邱振綸* 李耀輝*,** 周一志*,**1

*國立臺灣海洋大學 系統工程暨造船學系

**國立臺灣海洋大學 延平水下科技中心

關鍵詞：大型空蝕水槽、高雷諾數、中高攻角、表面流場可視化、多色油墨法、激紊器、6 : 1 橢球體、流體分離

摘要

臺灣目前正積極推動潛艦國造，相關實驗量測技術的建立至為重要。本研究於國立臺灣海洋大學延平水下科技中心的大型空蝕水槽(Large Cavitation Tunnel, LCT)，在兩種高雷諾數($Re_L = 1.16 \times 10^7$ & 4.88×10^6)及 12° 中高攻角之條件下，利用表面流場可視化(surface flow visualization)技術之多色油墨法(Multi-Color Ink Tracing Method, MCITM)，探討(1)無激紊器、(2)砂紙及(3)尼龍線等三種激紊器(turbulence stimulator)條件，對於代表潛艦船身外型幾何的 6 : 1 橢球體之流場的影響。實驗結果顯示，在所有實驗條件下，皆於橢球體尾部背風面(leeward side)形成封閉式分離區域(close separation zone)，以及在較上游的位置，左右舷皆有兩條開放式分離線(open separation line)形成。

前言

臺灣目前正積極推動潛艦國造，因此潛艦相關研究逐漸受到重視，相關實驗量測技術的建立至為重要。當流體流經潛艦時，會產生多種渦流，例如：分離渦流(separation vortices)、馬蹄渦(Horse-Shoe Vortex, HSV)、根渦(Root Vortex, RV)、尖渦(Tip Vortex, TV)等；這些渦流會引發振動、噪音等問題，抑或是與後方推進器交互作用產生空化現象(cavitation)，對於潛艦隱匿性、推進性能與操縱性能等造成負面的影響。

扁長形橢球體(prolate spheroid)，其外型近似潛艦及無人水下載具，在水下的運動及航行姿態會使其表面周圍區域產生複雜的三維流動現象，包括：邊界層分離、軸向分離渦流、尾跡流不穩定性及不對稱性等；在 Ahn [1]及 Wetzel [2]的研究顯示，這些三維流動現象會使橢球體受一垂向力及俯仰力矩，若在潛艦流場中，則是對於潛艦的操縱系統造成巨大的影響；根據 Jiang et al. [3]前言所述，在 0° 攻角(長軸與入流方向平行)，當扁長形橢球體長短軸比例為 6 : 1 時，外形之幾何為流線型，表示其所承受之總阻力最小；綜上所述，6 : 1 橢球體的相關研究是相當重要且最為廣泛與常見。

橢球體文獻的相關研究，多著重於橢球體的分離現象，1976 年 Wang [4]詳細統整並描述橢球體的三維分離現象，其中 Maskell [5]於 1955 年提出「三維流場分離模型」，分成泡狀型(bubble type)與

自由漩渦型(free vortex layer type)，而 Wang 則稱為封閉式分離(closed separation)與開放式分離(open separation)。封閉式分離現象詳述如下：當流體流經物體時，於物體表面會形成邊界層，當邊界層內動量無法抗衡逆壓梯度時，就會造成邊界層剝離，而邊界層重新附著於物體形成的分離表面，為一封閉的循環流動區域，Maskell 稱為泡狀型分離，Wang 稱為封閉式分離，與二維流場分離原理相同。開放式分離現象詳述如下：當橢球體在較大攻角的情況下，會形成兩股流，一從迎風面往背風面，二從背風面往迎風面，兩股流交匯形成交叉流(cross flow)，此分離表面為一軸向低速的自由漩渦(free vortex)，產生於橢球體左右舷並向下游無限延伸，Maskell 稱為自由漩渦型分離，Wang 稱為開放式分離。於物體表面流場，Lighthill [6]說明摩擦阻力線(skin-friction line)即為極限流線(limiting streamline)，並提出「分離線(separation line)」概念：封閉式分離現象，會於物體表面形成封閉式分離線(closed separation line)；開放式分離現象，會於物體表面形成開放式分離線(open separation line)，Wang [4]利用表面流場可視化技術之油墨實驗成功驗證此概念。

1991、1994 年，Kim and Patel [7-8]以雷諾數 5.0×10^4 (層流)、 0° 到 30° 攻角下的 6 : 1 橢球體進行數值模擬，計算出橢球體表面的摩擦阻力線圖，以此繪製極限流線圖並解釋流場拓撲學(Flow Topology)，呈現不同攻角下的橢球體表面流場結構。

¹ 聯絡作者 周一志 (ycchow@email.ntou.edu.tw)

實驗方法

在 10° 攻角結果顯示橢球體在後半部迎風面(windward side)及背風面(leeward side)上，於左右舷各產生一對螺旋狀節點(N)和一個馬鞍點(S)，連同對稱面上的一個節點(N)和兩個馬鞍點(S)，一起形成一封閉式分離區域，再加上橢球體前端的節點(N)，其結果符合流場拓撲學規則，即節點(N)總數減掉馬鞍點(S)總數必須為 2；在封閉式分離區域更上游位置，來自迎風面與背風面之流線將交匯於一線，即為開方式分離線，且延伸至下游與封閉式分離區域合併，似乎會流入迎風面之螺旋狀節點，此結果也驗證橢球體的分離模式有開放式分離(自由漩渦)與封閉式分離(泡狀型分離)。而 15° 攻角之結果，與 10° 攻角結果相似，但是開放式分離與封閉式分離皆會提早發生，且在橢球體的中部位置，除已形成的主要(primary)開放式分離線，會出現次要(secondary)開放式分離線，也就是說，會於橢球體左右舷各產生兩個自由漩渦。

儘管理論、實驗與數值模擬已有大量的研究，但於水槽中進行 6:1 橢球體模型之實驗研究相當少見，多數都是於風洞中進行，且本次實驗雷諾數最高可達 1.12×10^7 更是少見，而針對模型前端加裝激紊器對於模型後方周圍流場影響之實驗研究幾乎沒有。因此本研究以表面流場可視化(surface flow visualization)技術之多色油墨法(Multi-Color Ink Tracing Method, MCITM)，利用國立臺灣海洋大學的大型空蝕水槽(large cavitation tunnel, LCT)，針對 6:1 橢球體模型在 12° 中高攻角，以及兩種雷諾數、三種激紊器條件下的表面流場進行實驗探討。

多色油墨法(MCITM)，為國立成功大學陳政宏教授實驗室所發展的一種改良型油墨流場可視化方法，此方法重點在於使用不同顏色的油墨色帶，來辨識出從不同區域所拖曳出的軌跡線(極限流線)，陳教授的團隊在一系列研究[9-12]中以不同的油墨配方與重量比例進行實驗，後經本人研究[13]成功發展出適用於高速入流的油墨配方(二行程機油+碳粉+潤滑油)，並應用於 5.62° 攻角與高雷諾數 1.29×10^7 (入流速度為 9.0 m/s) 條件下，6:1 橢球體模型的表面流場可視化實驗，結果顯示在橢球尾部 ($x'/L = 0.933$ 後與刺狀支柱接合處) 之油墨流線呈現出一對螺旋狀節點和一個馬鞍點，並與對稱面上的一個節點和兩個馬鞍點(應在刺狀支柱上)，一起形成一封閉式分離區域。

以下為本文的內容組織：多色油墨實驗之實驗設備、實驗條件以及研究方法將呈現於「實驗方法」；在大型空蝕水槽以 12° 中高攻角條件下進行 6:1 橢球體模型表面多色油墨流場可視化之結果呈現於「實驗結果」；根據所有實驗結果形成之結論呈現於「結論」。

1. 實驗水槽

本實驗研究於國立臺灣海洋大學延平水下科技中心的大型空蝕水槽(LCT)進行，其結合(1)瑞典國家船舶實驗室(SSPA)之基本設計、(2)財團法人船舶暨海洋產業研發中心(SOIC)之結構細部設計，以及(3)本校系統工程暨造船學系之噪音控制設計，由台船(CSBC)基隆廠承製，於民國 91 年 4 月完成基本性能測試。LCT 為一封閉式的循環水槽，測試段截面為 $2.6 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}$ 、長度 10.0 m ，最高入流速度可達 12.15 m/s ，水槽卡氏座標系統定義為 (x, y, z) 。

2. 實驗模型

本次實驗所用模型為 6:1 橢球體，其表面方程式如式(1)所示：

$$\frac{(x')^2}{a^2} + \frac{(y')^2 + (z')^2}{b^2} = 1, \quad a = \frac{L}{2}, \quad b = \frac{L}{12} \quad (1)$$

， a 為長軸半徑， b 為短軸半徑，實際模型全長 $L = 2a$ 為 1.5 m ，最大直徑 $2b$ 為 0.25 m ；攻角 α 為 12° ， Re_L 是基於橢球體長度 L 、入流速度 U_0 、流體密度 ρ 以及流體動力黏度 μ 所定義的雷諾數，如式(2)所示：

$$Re_L = \frac{\rho U_0 L}{\mu} \quad (2)$$

橢球體的卡氏座標系統定義為 (x', y', z') ，圓柱座標系統定義為 (x', r', θ') ，如圖 1 所示。橢球體模型表面處理依序以(1) 1020 合金底漆、(2) 1008 (EP-09) 鉍鉻黃底漆、(3) 1001 (EP-04) 檸檬黃面漆、(4) 羅丹名 6G 調漆進行塗裝，安裝示意圖如圖 2 所示。

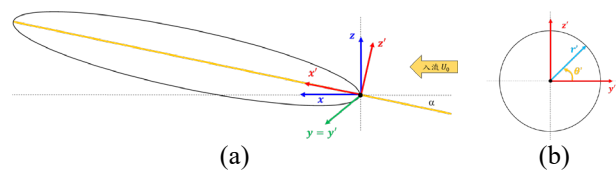


圖 1 座標定義：(a)橢球體卡氏座標系統，(b)橢球體圓柱座標系統。

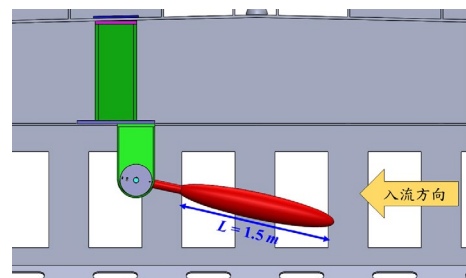


圖 2 6:1 橢球體模型於 LCT 測試段之安裝示意圖

3. 實驗條件

本研究使用 6 : 1 橢球體模型在兩種高雷諾數 $Re_L = 1.16 \times 10^7$ 、 4.88×10^6 與 12° 中高攻角條件下，於大型空蝕水槽(LCT)進行實驗，探討(1)無激紊器、(2)砂紙、(3)尼龍線等三種激紊器條件，對於 6 : 1 橢球體模型的表面流場之影響。詳細實驗物理條件如表 1 所示，其中實驗水溫為 24 至 25°C，水槽測試段中心壓力為 112 至 113 kPa。

表 1 實驗物理條件(24.5°C 查表[14]線性內插而得)

| 物理參數 | 數值 | |
|------------------|-----------------------------------|--------------------|
| 模型 | 6 : 1 橢球體 | |
| 全長 (L) | 1.5 m | |
| 入流速度 (U_0) | 7.00 m/s | 2.94 m/s |
| 流體密度 (ρ) | 997.15 kg/m ³ @ 24.5°C | |
| 流體動力黏度 (μ) | 0.00090035 Pa·s @ 24.5°C | |
| 實驗雷諾數 (Re_L) | 1.16×10^7 | 4.88×10^6 |
| 目標雷諾數 (Re_L) | 1.00×10^7 | 4.20×10^6 |

4. 激紊器

進行模型實驗時，會有尺度效應(scale effect)產生，使用激紊器能夠改變模型邊界層發展，讓其短時間內從層流(laminar)快速激發成紊流(turbulent)，使流場更加貼近真實流況，於模型實驗中起到非常大的作用。本次實驗使用較為常見、取得方便且可牢固黏著於橢球體模型表面的激紊器，分別為砂紙(sandpaper)及尼龍線(wire)。

激紊器黏貼位置，理想上需對應原型的邊界層自然過渡(transition)位置，而模型實驗很難取得此位置，因此需借助計算流體力學，根據數值模擬結果取得激紊器黏貼位置；實驗方面多以前人文獻之經驗為參考，通常選擇模型全長的 5%、10%或是 20%進行黏貼。由於本次實驗攻角為 12° ，屬於中高攻角，因此參考文獻[2]、[15]，裝置於 6 : 1 橢球體 $x'/L = 0.100$ 位置處，如圖 3 所示，

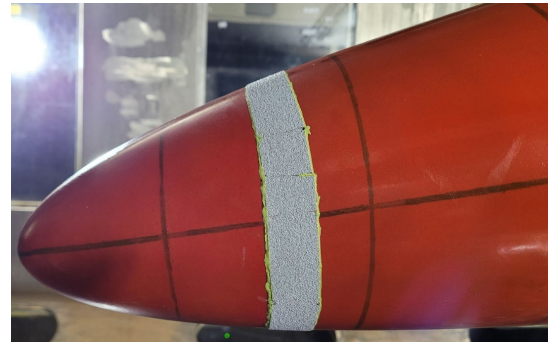
由於高雷諾數時激紊器容易脫落，因此採用美國海軍研究辦公室(Office of Naval Research, ONR)的建議，以環氧樹脂油漆當作黏著劑，使激紊器黏著牢固於橢球體表面，根據實驗觀察，完整實驗結束後激紊器皆未脫落，效果顯著。

雷諾數 Re_k 是基於實驗入流速度 U_0 與激紊器實際平均高度 k 所定義，如式(3)所示：

$$Re_k = \frac{\rho U_0 k}{\mu} \quad (3)$$

根據文獻 Gibbins [16]建議， Re_k 需大於等於 826，對於流場才會有激紊效果；本次多色油墨實

驗的雷諾數 Re_k 皆大於 826，如表 2 所示，均達到一般激紊器的尺度要求。



(a)



(b)

圖 3 激紊器裝置於橢球體 $x'/L = 0.100$ 位置處：(a) 砂紙，(b)尼龍線

表 2 激紊器實際高度 k 與 Re_k

| 激紊器種類 | 激紊器實際高度 k | Re_L | Re_k |
|----------------|-------------|--------------------|--------|
| 砂紙 (Sandpaper) | 0.578 mm | 1.16×10^7 | 4470 |
| | | 4.88×10^6 | 1880 |
| 尼龍線 (Wire) | 0.509 mm | 1.16×10^7 | 3936 |
| | | 4.88×10^6 | 1656 |

5. 多色油墨實驗方法

油墨實驗，為流場可視化技術的實驗方法之一，其方法與原理為將油墨塗抹在模型表面上，當水流經模型表面時會產生摩擦剪應力，而由於油墨不易溶於水且黏滯力高，因此在摩擦剪應力與黏滯力相互作用下，使油墨會緩慢沿流場流動方向被拖曳出油墨線條。

本研究使用多色油墨實驗，定性探討模型表面流場結構及特徵，其優點為可快速獲得模型全域表面流場資訊，且相較傳統單色油墨方法，當油墨線條相互重疊時具有較好的油墨線條辨識度，在色帶

上的流場結構也因顏色不同可清楚呈現，圖 4 為多色油墨實驗進行前後之照片。

本次實驗找出適合入流速度 U_0 為 7.00 m/s 及 2.94 m/s 的油墨配方，為二行程機油、碳粉、白臘油，詳細油墨成份的重量比例如表 3 所示，其中改變白臘油之重量比例來調整油墨黏稠度，舉例：增加白臘油重量比例使油墨黏稠度降低。

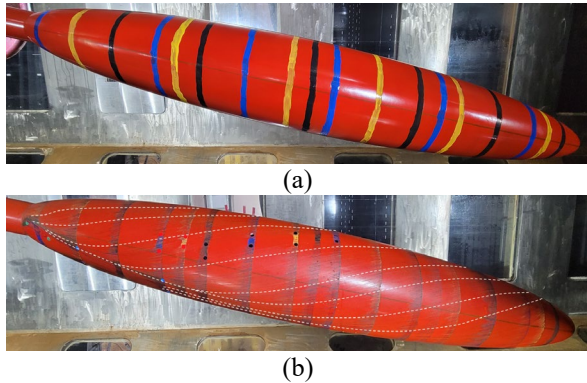


圖 4 多色油墨實驗應用於 6：1 橢球體表面流場可視化：(a)實驗前，(b)實驗後(白色虛線為根據油墨線條繪製的極限流線)

表 3 多色油墨實驗的油墨成份重量比例

| 物理參數 | 數值 | |
|----------------------------|--------------------|--------------------|
| 實驗雷諾數 (Re_L) | 1.16×10^7 | 4.88×10^6 |
| 入流速度 (U_0) | 7.00 m/s | 2.94 m/s |
| 油墨成份重量比例 (二行程機油：碳粉：白臘油) | 1：1：0.30 | 1：1：0.45 |

實驗結果

如上所述，本次研究係於 LCT 進行多色油墨實驗，以模型表面流場可視化之方法，在兩種高雷諾數 $Re_L = 1.16 \times 10^7$ 、 4.88×10^6 與 12° 中高攻角條件下，探討(1)無激紊器、(2)砂紙、(3)尼龍線等三種激紊器條件，對於 6：1 橢球體模型的表面流場之影響，其中激紊器加裝於 $x'/L = 0.100$ 的位置。

多色油墨實驗結果將以照片形式呈現，並於照片中標示出封閉式分離區域的一對螺旋狀節點(N1、N2)和一個馬鞍點(S)，以及較靠近迎風面的主要(primary)開放式分離線(O1-O3)，與較靠近背風面的次要(secondary)開放式分離線(O2-O4)，接著把其位置 x'/L 、 θ' 以圖進行統整並分析比較，完整實驗結果與分析請參考作者碩士論文[17]。

1. 高雷諾數 $Re_L = 1.16 \times 10^7$ 的實驗結果

在高雷諾數 $Re_L = 1.16 \times 10^7$ ，無激紊器、砂紙、尼龍線等三種激紊器條件下，於 6：1 橢球體模型右舷尾部背風面的多色油墨可視化結果，如圖 5 至圖 7 所示，並將封閉式分離區域的一對螺旋狀節點(N1、N2)和一個馬鞍點(S)，以及主要開放式分離線(O1-O3)與次要開放式分離線(O2-O4)之位置 x'/L 、 θ' 統整於圖 8 和圖 9。

總結高雷諾數 $Re_L = 1.16 \times 10^7$ 的多色油墨實驗結果，首先觀察封閉式分離區域，可看到有無加裝激紊器對馬鞍點(S)影響不大，以及比較橢球體尾部封閉式分離區域之大小，砂紙條件 > 尼龍線條件 > 無激紊器條件。當分離線較靠近迎風面時，可說明較早發生開放式分離現象，先觀察主要開放式分離線(O1-O3)，可判斷出無激紊器條件早於尼龍線條件早於砂紙條件；而次要開放式分離線(O2-O4)，則是尼龍線條件早於砂紙條件早於無激紊器條件。綜合開放式分離線的結果，會發現加裝激紊器後，此 2 條開放式分離線之距離縮小，更加靠近彼此。

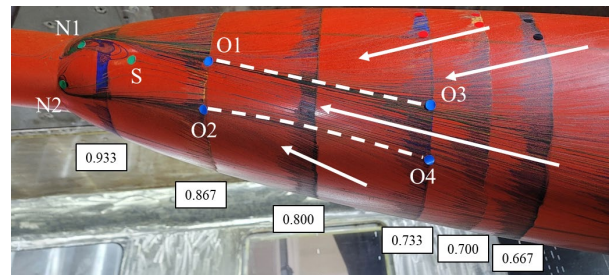


圖 5 高雷諾數 $Re_L = 1.16 \times 10^7$ 無激紊器，右舷尾部背風面的多色油墨實驗結果

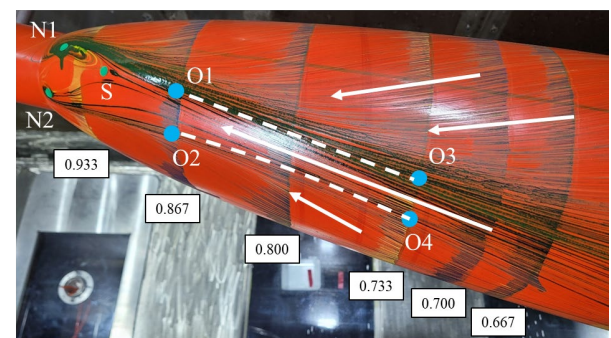


圖 6 高雷諾數 $Re_L = 1.16 \times 10^7$ 加裝激紊器砂紙於 $x'/L = 0.100$ ，右舷尾部背風面的多色油墨實驗結果

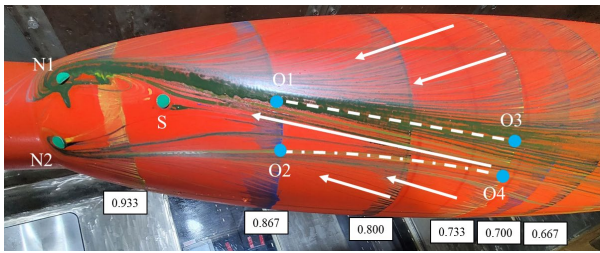


圖 7 高雷諾數 $Re_L = 1.16 \times 10^7$ 加裝激紊器尼龍線於 $x'/L = 0.100$ ，右舷尾部背風面的多色油墨實驗結果

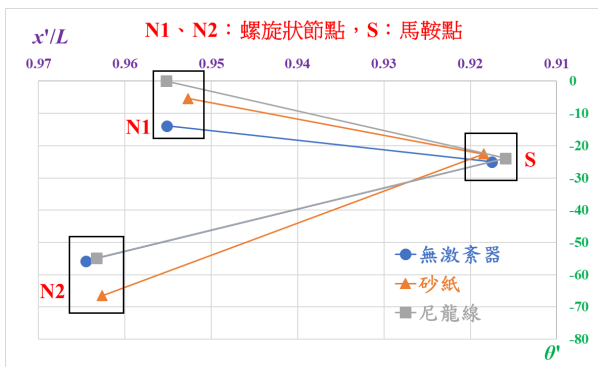


圖 8 高雷諾數 $Re_L = 1.16 \times 10^7$ 於不同激紊器條件下的多色油墨實驗結果(右舷)：一對螺旋狀節點(N1、N2)和一個馬鞍點(S)之比較圖

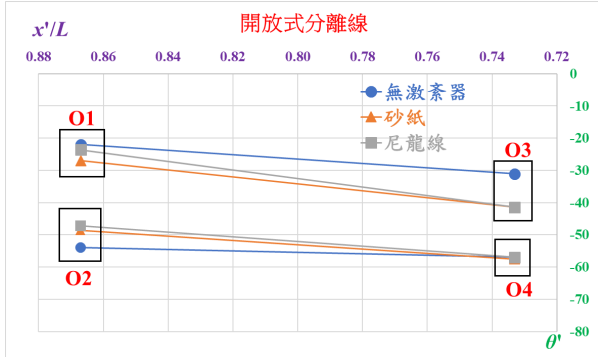


圖 9 高雷諾數 $Re_L = 1.16 \times 10^7$ 於不同激紊器條件下的多色油墨法實驗結果(右舷)：主要開放式分離線(O1-O3 連線，靠近迎風面)、次要開放式分離線(O2-O4 連線，靠近背風面)之比較圖

2. 高雷諾數 $Re_L = 4.88 \times 10^6$ 的實驗結果

在高雷諾數 $Re_L = 4.88 \times 10^6$ ，無激紊器、砂紙、尼龍線等三種激紊器條件下，於 6:1 橢球體模型右舷尾部背風面的多色油墨可視化結果，如圖 10 至圖 12 所示，並將封閉式分離區域的一對螺旋狀節點(N1、N2)和一個馬鞍點(S)，以及主要開放式分離線(O1-O3)與次要開放式分離線(O2-O4)之位置 x'/L 、 θ' 統整於圖 13 和圖 14。

總結高雷諾數 $Re_L = 1.16 \times 10^7$ 的多色油墨實驗結果，首先觀察封閉式分離區域，可看到有無加裝激紊器對馬鞍點(S)影響極大，接著觀察靠近背風面的 N2 節點可看出，有無加裝激紊器不影響 N2 節點位置，而觀察靠近迎風面的 N1 節點，則迎風面至背風面，依序是尼龍線條件、無激紊器條件、砂紙條件。觀察主要開放式分離線(O1-O3)，於 $x'/L = 0.867$ 位置，無激紊器的分離點 O1 明顯往背風面偏離，以及整體可判斷出尼龍線條件早於砂紙條件早於無激紊器條件；觀察次要開放式分離線(O2-O4)，於 $x'/L = 0.733$ 位置，無激紊器的分離點 O4 明顯往背風面偏離，而整體判斷同樣是尼龍線條件早於砂紙條件早於無激紊器條件。

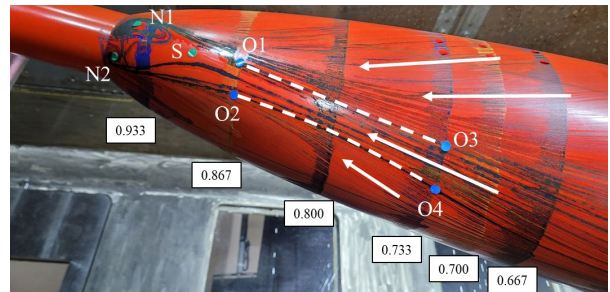


圖 10 高雷諾數 $Re_L = 4.88 \times 10^6$ 無激紊器，右舷尾部背風面的多色油墨實驗結果

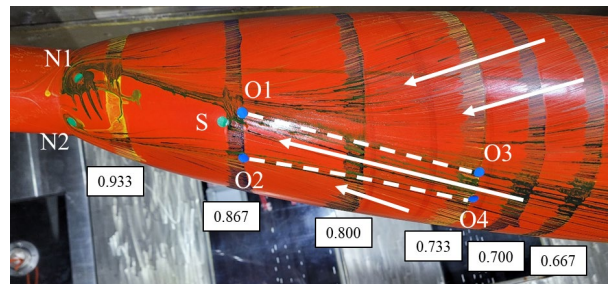


圖 11 高雷諾數 $Re_L = 4.88 \times 10^6$ 加裝激紊器砂紙於 $x'/L = 0.100$ ，右舷尾部背風面的多色油墨實驗結果

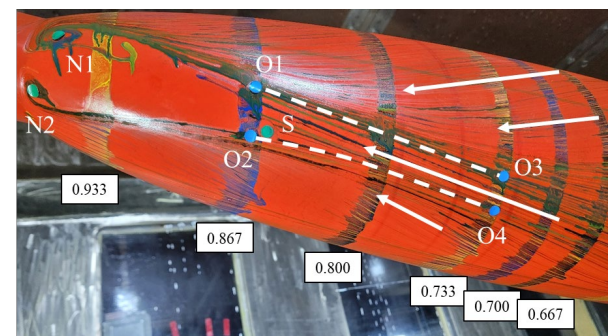


圖 12 高雷諾數 $Re_L = 4.88 \times 10^6$ 加裝激紊器砂紙於 $x'/L = 0.100$ ，右舷尾部背風面的多色油墨實驗結果

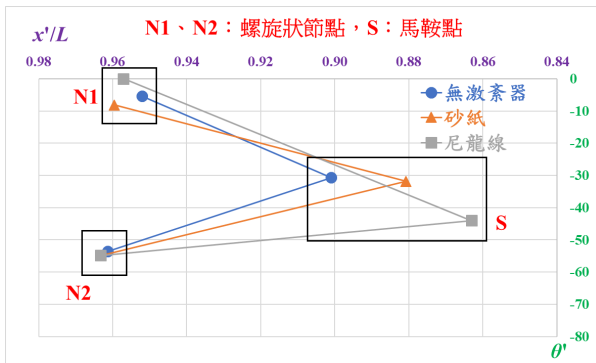


圖 13 高雷諾數 $Re_L = 4.88 \times 10^6$ 於不同激紊器條件下的多色油墨實驗結果(右舷)：一對螺旋狀節點 (N1、N2)和一個馬鞍點(S)之比較圖

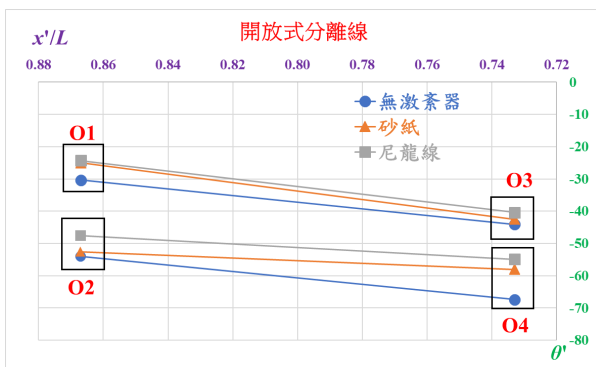


圖 14 高雷諾數 $Re_L = 4.88 \times 10^6$ 於不同激紊器條件下的多色油墨實驗結果(右舷)：主要開放式分離線 (O1-O3 連線，靠近迎風面)、次要開放式分離線 (O2-O4 連線，靠近背風面)之比較圖

結論

1. 本研究在兩種高雷諾數 $Re_L = 1.16 \times 10^7$ 、 4.88×10^6 與 12° 中高攻角條件下，於大型空蝕水槽(LCT)進行 6：1 橢球體模型表面流場可視化之多色油墨實驗結果，皆呈現出如文獻[7-8]所述之封閉式分離現象與開放式分離現象。
2. 比較不同雷諾數流場的封閉式分離現象，發現雷諾數 $Re_L = 4.88 \times 10^6$ 流場的封閉式分離區域明顯大於雷諾數 $Re_L = 1.16 \times 10^7$ 流場，而雷諾數 $Re_L = 1.16 \times 10^7$ 流場的封閉式分離區域，砂紙條件 > 尼龍線條件 > 無激紊器條件；接著比較封閉式分離起始點(馬鞍點(S))位置，在雷諾數 $Re_L = 1.16 \times 10^7$ 流場幾乎相同，而雷諾數 $Re_L = 4.88 \times 10^6$ 則差異較大。
3. 比較不同雷諾數流場的開放式分離現象，發現次要開放式分離線位置，皆為尼龍線條件早於砂紙條件早於無激紊器條件；開放式分離線則

不同，在 $Re_L = 1.16 \times 10^7$ 流場，無激紊器條件早於尼龍線條件早於砂紙條件；而 $Re_L = 4.88 \times 10^6$ 流場則是尼龍線條件早於砂紙條件早於無激紊器條件。

4. 根據所有 12° 攻角的多色油墨法實驗結果可以發現，主要開放式分離線(O1-O3)會與封閉式分離區域邊界(馬鞍點 S 至靠近迎風面的螺旋狀節點 N1 之極限流線)合併，次要開放式分離線(O2-O4)會與封閉式分離區域邊界(馬鞍點 S 至靠近背風面的螺旋狀節點 N2 之極限流線)合併，與文獻 Kim and Patel [7-8] 所描述的結果相同。
5. 本研究的多色油墨實驗結果，可提供數值模擬進行比對，並對於細部流場的光學量測實驗，給出大致的量測位置建議。

致謝

承蒙美國海軍研究署(ONR)的經費支持，得以於大型空蝕水槽(LCT)應用多色油墨法進行 6：1 橢球體模型表面流場可視化研究。亦感謝其他實驗團隊成員與水槽技術人員的協助，使得本研究能順利進行。

參考文獻

1. Ahn, S., "An Experimental Study of Flow Over a 6 to 1 Prolate Spheroid at Incidence," Ph.D. Dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University Aerospace Engineering Department (1992).
2. Wetzel, T.G., "Unsteady flow over a 6:1 prolate spheroid," Ph.D. Dissertation, Dept. of Aerospace and Ocean Engineering, Virginia Polytechnic Inst. and State Univ., Blacksburg, Virginia, U.S.A (1996).
3. Jiang, F., Gallardo, J. P., Andersson, H. I., "The laminar wake behind a 6:1 prolate spheroid at 45 degrees incidence angle," Physics of Fluids, 26, 113602 (2014).
4. Wang, K.C., "Separation of Three-Dimensional Flow," Proceedings of Lockheed-Georgia Co. Symposium, Marietta, Georgia, U.S.A., 341-414 (1976).
5. Maskell, E.C., "Flow Separation in Three Dimensions," RAE Aero, Report, 2565 (1955).
6. Lighthill, M. J., "Laminar Boundary Layers," Edited by L. Rosenhead, Oxford University Press, Oxford, England (1963).
7. Kim, S.E. and Patel, V.C., "Laminar flow separation on a spheroid at incidence," 22nd Fluid Dynamics, Plasma Dynamics and Lasers Conference, Honolulu, Hawaii, U.S.A. (1991).
8. Patel, V.C. and Kim, S.E., "Topology of laminar flow on a spheroid at incidence," Computers Fluids, Vol. 23, No.7, pp.939-953. (1994).
9. 王柏翔，「拖航水槽消波裝置改良與船模表面流場可視化之研究」，碩士論文，國立成功大學系統及船舶機電工程研究所，臺灣臺南 (2012)。

10. 莊詠勳，「以實驗方法探討低展弦具導緣突節翼型之流場結構特性」，碩士論文，國立成功大學系統及船舶機電工程研究所，臺灣臺南 (2014)。
11. 梁則撒，「兩種油墨實驗配方比較之研究」，碩士論文，國立成功大學系統及船舶機電工程研究所，臺灣臺南 (2015)。
12. 何溫庭、陳政宏，「多色油墨實驗應用於水翼流場之研究」，第二十八屆中國造船暨輪機工程研討會暨科技部成果發表會，臺灣臺南 (2016)。
13. Kao, H.C., Yang, C.Y., Wang, H.J., Lee, Y.H., Chen, J.H., Chow, Y.C., "Development and Application of the Multi-Color Ink Tracing Method to Surface Flow Visualizations of Models under High-Speed Inflow in a Large Cavitation Tunnel," Journal of Taiwan Society of Naval Architects and Marine Engineers, Vol.42, No.1, pp.11-24 (2023)。
14. 水的黏度表，2023 年 8 月 8 日擷取。
(<https://blog.csdn.net/oop4587/article/details/120882016>)
15. Ahn, S. and Simpson, R.L., "Cross-flow Separation on a Prolate Spheroid at Angles of Attack," 30th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, Nevada, U.S.A., AIAA-92-0428 (1992).
16. Gibbings, J.C., "On Boundary-Layer Transition Wires," Aeronautical Research Council, CP-462 (1959).
17. 高浩鈞，「激紊器影響在中高攻角下 6：1 橢球體背風面高雷諾數流場結構之實驗研究」，碩士論文，國立臺灣海洋大學系統工程暨造船研究所，臺灣基隆 (2023)。

EXPERIMENT STUDY ON SURFACE FLOW VISUALIZATION OF A 6:1 PROLATE SPHEROID AT HIGH REYNOLDS NUMBER AND AN INTERMEDIATE-HIGH ANGLE OF ATTACK

H. C. Kao C. Y. Yang* C. L. Chiu* Y. H. Lee**,** Y. C. Chow*,***

*Department of Systems Engineering and Naval Architecture, National Taiwan Ocean University

** Shih Yen-Ping Center for Underwater Technology, National Taiwan Ocean University

Keywords: Large Cavitation Tunnel, high Reynolds number, intermediate-high angle of attack, surface flow visualization, Multi-Color Ink Tracing Method, turbulence stimulator, 6:1 prolate spheroid, flow separation

ABSTRACT

Taiwan is currently actively promoting the domestic production of submarines, and the establishment of relevant experimental measurement technology is extremely important. This study is conducted at the Large Cavitation Tunnel (LCT) of Shih Yen-Ping Center for Underwater Technology (SYPCUT) of National Taiwan Ocean University (NTOU). We experimentally study the flow over a 6:1 prolate spheroid at two high Reynolds numbers ($Re_L = 1.16 \times 10^7$ & 4.88×10^6) with an intermediate-high angle of attack (12°). Surface flow visualization technology such as Multi-Color Ink Tracing Method (MCITM) is utilized to investigate the effects of three conditions of turbulence stimulator, i.e. (1) no-trip, (2) sandpaper, and (3) wire, on the surface flow fields of a 6:1 prolate spheroid representing the geometry of the submarine hull. The experimental results under all experimental conditions show that a distinct closed-separation region at the leeward side of the prolate spheroid stern, and two open-separation lines formed at upstream leeward positions of both port and starboard sides.