

## 帆罩頂端流場量測與探討

高浩鈞\* 楊鈞堯\* 陳柏翰\* 陳睿杰\* 曾偉哲\* 周一志\*\*\* 李耀輝\*\*\*<sup>1</sup>

\*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：帆罩，立體式質點影像測速系統，水聽器，尖渦

國科會計畫編號：MOST 111-2221-E-019-065

### 摘要

本研究以實驗探討「新型帆罩」之特性，採用傳統帆罩和新型帆罩兩種不同幾何外形之帆罩(sail)，在雷諾數  $Re_c$  為  $1.6 \times 10^6$  以及攻角 0、5、10 度的條件下，使用立體式質點影像測速系統(Stereoscopic Particle Image Velocimetry System, SPIV System)進行跡流場量測，同時以 B&K 8103 水聽器(hydrophone)進行聲場量測，探討新型帆罩其特殊外型幾何對於帆罩頂端流場的影響，和聲場特性上的差異。綜合流場與聲場的量測結果，雖然新型帆罩形狀不規則且產生眾多小渦流，但其頂端尖渦(tip vortex)的最大渦度相對較小，顯示新型帆罩的不規則形狀有助於抑制帆罩頂端的渦流，進而降低聲場方面的聲壓位準。此外，新型帆罩在不同攻角下能夠維持一定的聲壓位準，而傳統帆罩隨攻角增大而噪音增加，顯示新型帆罩具有較穩定的航行聲噪。

### 前言

水下載具噪音的來源主要可分為三個部分：載具本身的振動、流體的擾動、以及載具與流體交互作用所產生的噪音，其中流體擾動的噪音為渦流造成，水下載具(例如潛艦艦體)的外型幾何造成許多渦流的產生。造成渦流產生的主要部分為帆罩(sail)、控制面和推進器系統。本研究針對帆罩進行探討，由於這些構件長度是有限的，因此會造成尖渦(tip vortex)的產生，這些渦流則會產生特徵噪音。研究計畫採用實驗方法進行探究水下載具之帆罩頂端的渦流特性與水下聲場，實驗於國立臺灣海洋大學的中型空蝕水槽(Medium Cavitation Tunnel, MCT)進行帆罩外型測試，雷諾數約為  $10^6$ 。

近年來設計的「新型帆罩」，例如瑞典紳寶考庫姆公司(Saab Kockums)於 2017 公開 A26 潛艦，又稱布萊金厄(Blekinge)級傳統動力攻擊潛艦；其網頁[1]宣稱：A26 潛艦是新一代潛艦，具有模塊化設計、靜音航行，使用最新的隱形技術和先進的戰術通信，使其能夠執行各種任務。瑞典已經訂購 2 艘，預計 2024 下水。此外中共最新潛艦 039D 型潛艦[2]其帆罩亦是類似 A26 型潛艦。

根據新型帆罩的幾何外型[3]，完全悖離流線設計，而靜音的水下載具設計上全都是考量如何減少

表面渦流產生，因此本計畫將探討「傳統帆罩」與「新型帆罩」頂端流場之特性，將此模型於空蝕水槽測試段進行量測，採用立體式質點影像測速系統(Stereoscopic Particle Image Velocimetry System, SPIV System)量測尖渦跡流場，並以水聽器(hydrophone)量測聲場。

本計畫著重於實驗解析帆罩頂端渦流場與聲學的特性，此部分量測的高雷諾數流場與聲場實驗數據，在公開領域中幾乎沒有，因此我們必須建立此實驗資料，以利數值模型之建立，並提供數值模擬結果可以進行比對與驗證的數據，進而有效地調校數值模式與方法，提升數值模擬的精準度。

針對以上研究的背景及目的，相關的參考文獻回顧如下。文獻中關於美國國防先進研究計畫署(Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)委託美國海軍 CDNSWC(Carderock Division, Naval Surface Warfare Center)進行一「有和無附加物之軸對稱體」(axi-symmetrical body with and without appendages)的實驗測量，稱為 SUBOFF 計畫([4]-[6])，可說是最為系統化的研究。在實驗流場量測技術的方面，首先看到 SUBOFF 計畫測試一編號 DTRC Model 5470 and 5471 (兩者幾何完全相同，但用於不同的實驗量測)之模型，在主要有 8 種附加物格式之下，一在風洞(Anechoic Flow Facility, AFF)中

<sup>1</sup> 聯絡作者 李耀輝 (lyh@email.ntou.edu.tw)

測量，一在拖曳水槽(Towing Tank)中測量。在風洞中測量的有：(1)在船艉(stern)區域、6 處軸向(axial)位置上之邊界層測量(Boundary Layer Survey)，測量儀器為單元熱線速度儀(single-element hot-wire anemometer)，可測量單向瞬時速度(instantaneous velocity)，進而推算出單向平均速度(mean velocity)以及相關雷諾應力(Reynolds stress)；(2)在船艉及艉跡流(wake)區域、6 處軸向位置上之周向跡流測量(Circumferential Wake Survey)，測量儀器為 3 分量熱線速度儀(3-component hot-wire anemometer)，可測量瞬時速度向量，進而推算出平均速度向量以及相關雷諾應力；(3)在船艉及艉跡流區域、5 處軸向位置上之靜壓力測量(Static Pressure Survey)，測量儀器為靜壓力探管(static pressure probe)；(4)在船體表面數處位置上進行壓力及剪切應力(shear stress)測量。在拖曳水槽中主要測量船模阻力。這套稱為 DARPA SUBOFF 的公開實驗數據成為許多水下載具之數值模擬研究用來對比的對象，然而，DARPA SUBOFF 只進行了船艉到艉跡流區域的流場量測，缺乏控制面區域的流場數據，這是因為其所用的量測技術(熱線速度儀、靜壓力探管)為侵入式(intrusive)，若用這樣的侵入式技術量測控制面的流場，勢必會顯著地干擾船體的入流(inflow)而造成這些區域的流場之改變。

因此若欲量測控制面的流場，須採用非侵入式(non-intrusive)的量測技術。而非侵入式的流場量測技術主要為雷射都普勒測速法(Laser Doppler Velocimetry, LDV)和質點影像測速法(PIV)。LDV 為單點式量測(single-point measurement)方法，也就是無法同時得到多點分佈的場域(field)數據，例如 Devenport and Simpson [7]所使用的就是 LDV；而 PIV 至少量測一 2D 光頁(light sheet)平面上的 2 速度分量(2 velocity components, 2C)分佈，故就此觀點 PIV 是優於 LDV 的。而立體式質點影像測速法(SPIV)則是將兩台 PIV 相機所拍攝的二維質點影像 2C 位移向量組合並轉換成 2D 量測面上的 3C 完整速度向量，是較 2D-2C 基本型 PIV 更為完整呈現流場的實驗技術(2D-3C)，例如 Falchi et al. [8]和 Mori et al. [9]。

關於水中高雷諾數流場下尖渦文獻不多，尖渦文獻多是在探討飛機機翼流場，Zimmerman et al. [10]於風洞進行實驗，以 SPIV 量測 Rood 翼型接面流(junction flow)，其結果發現尖渦對翼型下游流場影響很大，因此尖渦值得進一步探討對於水下載具之影響。渦流噪音部分參考 Choi and Ceccio [11]針對單一空化氣泡實驗研究，發現空化產生之聲壓與空化氣泡半徑有相關性。宋等人[12]由實驗得到葉尖渦聲壓位準與葉尖渦空化半徑之量化關係為  $P^2 \propto r^{-1.5}$ 。

## 研究方法

本研究使用「傳統帆罩」與「新型帆罩」兩種模型，探討帆罩頂端跡流場的渦流特性以及水下聲場特性。主要研究方法為：(1)利用立體式質點影像測速系統(Stereoscopic Particle Image Velocimetry (SPIV) System)進行跡流場量測；(2)流場量測的同時，使用 2 支 B&K 8103 水聽器(CH1、CH2)進行聲場量測；並利用攻角特性，能更佳且有效的比較「傳統帆罩」與「新型帆罩」頂端跡流場及水下聲場的差異。

### 1. 實驗帆罩

本計畫之實驗模型為「傳統帆罩」和「新型帆罩」，如圖 1 及圖 2 所示，其翼型斷面幾何皆相同，為對稱翼型，如圖 3 及表 1，最大厚度位在  $x/C = 0.3393$ ，帆罩底部弦長  $C$  皆為 278.29 mm，厚度  $t_0$  皆為 62.36 mm；帆罩中心面如圖 4，高度  $H$  皆為 100.8 mm；帆罩橫截面以厚度最大  $x/C = 0.3393$  位置呈現，如圖 5 所示，設計時盡可能使此最大橫截面面積相同(傳統帆罩：5362.52 mm<sup>2</sup>，新型帆罩：5362.55 mm<sup>2</sup>)，且此截面位置之中心軸為帆罩攻角之旋轉軸。

本次實驗帆罩模型放置於壓克力平板上，平板厚度為 2 cm，其底部距離水槽壁面 10 cm；帆罩底部前緣(leading edge)距離平板前緣約 1392 mm；另加裝激紊器於平板前緣下游  $x = 6.3$  cm 處(目標  $Re_x = 5 \times 10^5$ )，使用 2.5 cm 寬砂紙條。



圖 1 傳統帆罩模型



圖 2 新型帆罩模型

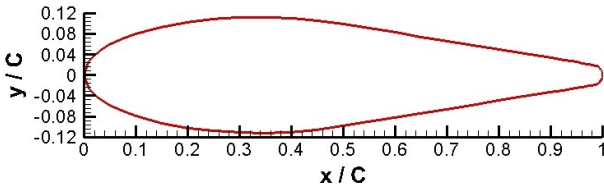
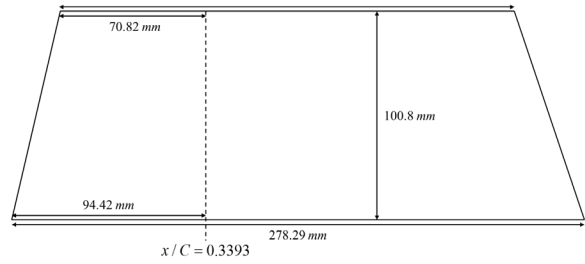


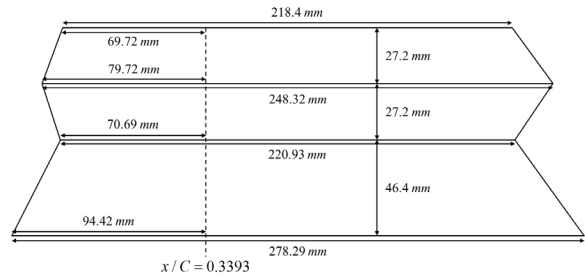
圖 3 翼型斷面幾何

表 1 翼型斷面厚度分布

$x/C$	$t/t_0$	$x/C$	$t/t_0$
0.0000	0.0000	0.6500	0.6619
0.0100	0.2410	0.7000	0.5887
0.0125	0.2690	0.7500	0.5156
0.0200	0.3383	0.8000	0.4424
0.0250	0.3768	0.8500	0.3693
0.0300	0.4111	0.9000	0.2961
0.0400	0.4711	0.9250	0.2596
0.0500	0.5225	0.9500	0.2230
0.0750	0.6271	0.9600	0.2084
0.1000	0.7090	0.9700	0.1937
0.1500	0.8299	0.9750	0.1864
0.2000	0.9118	0.9800	0.1791
0.2500	0.9648	0.9875	0.1641
0.3000	0.9933	0.9900	0.1534
0.3393	1.0000	0.9950	0.1174
0.3500	0.9995	0.9975	0.0860
0.4000	0.9839	0.9980	0.0775
0.4500	0.9453	0.9990	0.0556
0.5000	0.8813	0.9995	0.0397
0.5500	0.8082	0.9998	0.0255
0.6000	0.7350	1.0000	0.0000

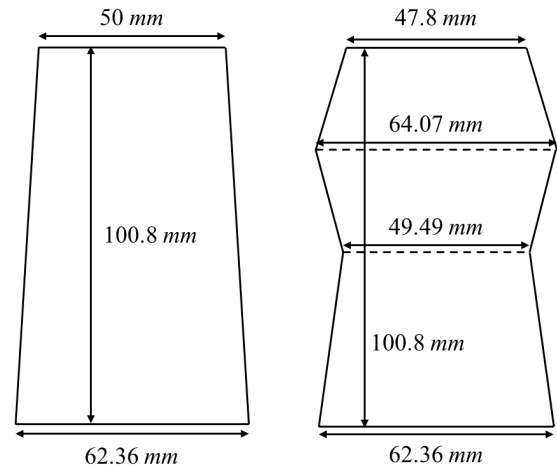


(a)



(b)

圖 4 帆罩中心面示意圖：(a)傳統帆罩，(b)新型帆罩



(a)

(b)

圖 5 帆罩最大橫截面( $x/C = 0.3393$ )示意圖：(a)傳統帆罩，(b)新型帆罩

## 2. 實驗水槽

本實驗採用國立臺灣海洋大學系統工程暨造船學系的中型空蝕水槽，其水槽的測試段截面積為  $0.5\text{ m} \times 0.5\text{ m}$ ，長度為  $2.2\text{ m}$ ，為一封閉式的循環水槽。水槽之實驗壓力可整調整範圍為  $20 \sim 170\text{ kPa}$ ，最大實驗流速約為  $11\text{ m/s}$ 。

此水槽主要功能有：螺槳單獨性能試驗、空化試驗、空化起始/終結試驗、水動力試驗、跡流量測等，亦可進行各式水下載具之研發。

### 3. 實驗條件

本計畫之實驗條件，傳統帆罩和新型帆罩皆未加裝激紊器時，分別搭配 3 種實驗攻角，共 6 個條件，以及在 0 度攻角時傳統帆罩加裝激紊器的條件，因此本計畫總共進行 7 個實驗條件。

實驗攻角有 3 種，分別為 0°、5°、10°，以距離帆罩前緣 94.42 mm ( $x / C = 0.3393$ ) 為旋轉軸順時針旋轉(俯視)。

傳統帆罩加裝的激紊器，使用 1 cm 寬砂紙條，黏貼於帆罩  $x / C = 5\%$  (參考 Gand et al. [13])。

實驗目標入流速度  $U_0$  為 5.0 m/s，實際入流速度  $U_0$  及雷諾數  $Re_C$  如表 2 所示，其中實驗溫度為 24.5 ~ 27.7°C，因此以 26°C 查表[14]，流體密度  $\rho = 996.8 \text{ kg/m}^3$ ，流體動力黏度  $\mu = 0.0008701 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。

表 2 實驗實際入流速度  $U_0$  及雷諾數  $Re_C$

條件	實際入流速度 $U_0$ (m/s)	入流速度相對誤差(%)	實際雷諾數 $Re_C$
傳統帆罩 攻角 0 度	5.020	0.40	$1.600 \times 10^6$
傳統帆罩 攻角 5 度	5.034	0.68	$1.605 \times 10^6$
傳統帆罩 攻角 10 度	5.039	0.78	$1.607 \times 10^6$
新型帆罩 攻角 5 度	5.030	0.60	$1.604 \times 10^6$
新型帆罩 攻角 10 度	5.026	0.52	$1.602 \times 10^6$

### 4. 實驗設備與架構

#### 4.1 質點影像測速系統

本次計畫使用一台 Phantom V310 的高速相機 (high speed CMOS camera)，最高解析度(maximum resolution)為  $1280 \times 800 \text{ pixel}^2$ ，搭配最高功率為 10 W 的連續雷射(CW laser)，光源為波長 532 nm 的綠光，以質點影像測速系統(Particle Image Velocimetry System, PIV System)，來確認實際入流速度是否與實驗目標入流速度( $U_0 = 5.0 \text{ m/s}$ )接近，以及流場是否穩定，實驗架構示意圖如圖 6 所示。

確認方法為：量測邊界層的同時取邊界層以外速度  $V_x$  進行平均，得實驗實際入流速度  $U_0$ ；本次數據以顆粒影像圖分析後得到的 8000 個瞬時速度向量進行平均。

量測位置於平板前緣(leading edge)下游 14.7 cm，也就是翼型前緣上游 115.3 cm，實驗結果如表

2、表 3 及圖 7 所示，結果顯示實際流速與目標流速的相對誤差不超過 1%，誤差極小；由於時間緣故以及各條件差異即小，部分實驗條件未量測。

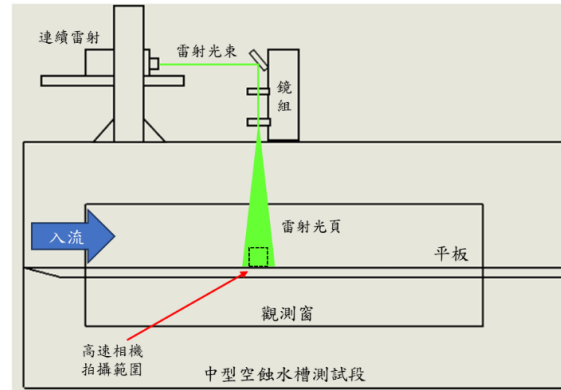


圖 6 高速相機入流拍攝實驗架構示意圖(測試段前半部分)

表 3 入流量測的邊界層厚度  $\delta$

條件	實際入流速度 $U_0$ (m/s)	邊界層厚度 $\delta$ (mm) (取 $u = 0.99U_0$ )
傳統帆罩 攻角 0 度	5.020	38.51
傳統帆罩 攻角 5 度	5.034	35.03
傳統帆罩 攻角 10 度	5.039	36.89
新型帆罩 攻角 5 度	5.030	37.91
新型帆罩 攻角 10 度	5.026	34.61

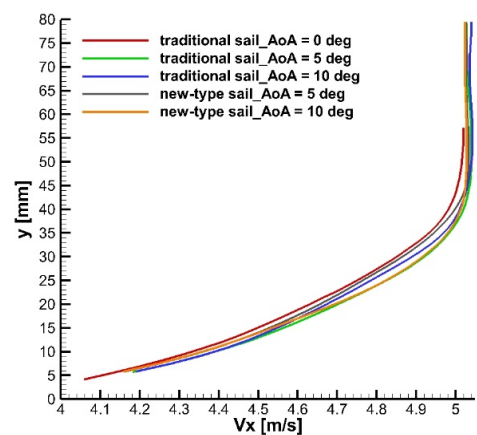


圖 7 入流量測的速度曲線( $y = 0$  為平板邊界)(傳統帆罩為 traditional sail，新型帆罩為 new-type sail)

#### 4.2 立體式質點影像測速系統

立體式質點影像測速系統(Stereoscopic Particle Image Velocimetry System, SPIV System)，使用兩台 CCD 相機，在不同的位置以斜拍的方式拍攝流場中的同一個平面，藉由兩台相機空間位置的投影與視差經由校正板將影像重建(圖 8)，從兩張二維影像映射為空間中的三維座標，再藉由相關性分析得到速度場。

本文採用楊等人[15]的實驗儀器與方法在中型空蝕水槽進行實驗，使用 CCD 相機為 LaVision 公司所提供的 Imager SX 4M，解析度為  $2360 \times 1776 \text{ pixel}^2$ ，拍攝速率為每秒 15 張影像；脈衝雷射(pulsed laser)使用型號為 EverGreen200，其最高脈衝能量強度為  $200 \text{ mJ}$ ，最高脈衝重複頻率為  $15 \text{ Hz}$ 。

本計畫為針對帆罩頂端跡流場，以距離帆罩  $0$  度攻角時的尾緣(trailing edge)下游固定位置， $x/C = 0.10、0.15、0.30、0.50$  之橫截面及  $0、5、10$  度角度和固定目標流速  $U_0 = 5 \text{ m/s}$  來進行 SPIV 實驗拍攝(圖 9、圖 10)，兩台 CCD 相機從水槽左右側進行拍攝，脈衝雷射放置水槽測試段上方，由上往下打出光頁。

SPIV 實驗拍攝及分析相關參數設定，如表 4 所示，SPIV 顆粒影像圖分析使用 LaVision 公司出的 DaVis10.2.1 軟體，每個位置分析 5000 組影像形成瞬時向量圖，當中會有些許的不良向量產生，原因可能是顆粒影像圖之顆粒品質不夠好之緣故，因此利用中值濾波器(median filter)當中的 Universal Outlier Detection 算則，來篩選過濾並替換向量，降低不良向量產生的影響，詳細算則參考軟體手冊[16]以及 Westerweel and Scarano [17]。

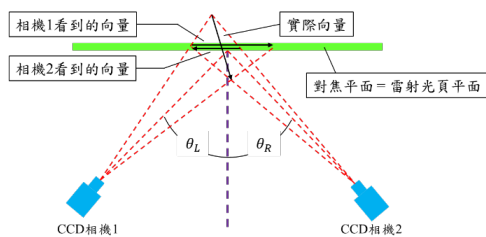


圖 8 SPIV 流場量測技術原理示意圖

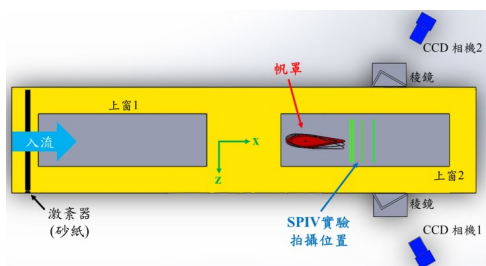
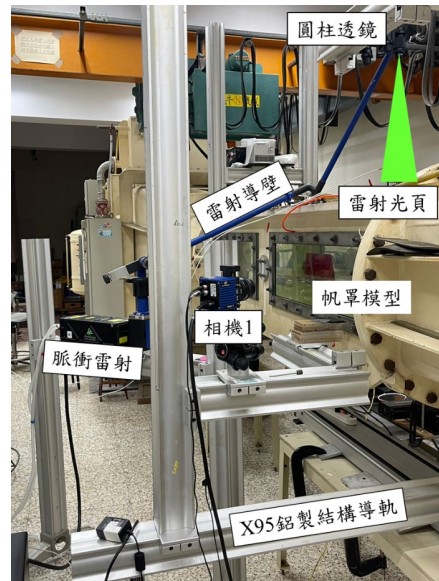
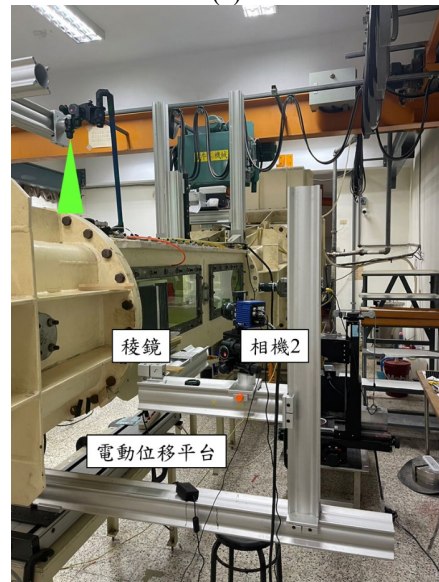


圖 9 SPIV 實驗架構示意圖(俯視圖)



(a)



(b)

圖 10 SPIV 實驗架構實體圖：(a)左側，(b)右側

表 4 SPIV 實驗拍攝及分析相關參數設定

類別	單位	設定
拍攝速率	Hz	15
拍攝組數	組	5000
影像比例尺 (scale factor)	pixel/mm	11.9
向量分析 初始質問窗大小	pixel <sup>2</sup>	48 × 48 50% overlap
向量分析 最終質問窗大小	pixel <sup>2</sup>	24 × 24 50% overlap
空間解析度 (向量間距)	mm	1.008

### 4.3 聲場量測系統

水下聲場與流場同時量測，量測流程如圖 11 所示，使用必凱(Brüel & Kjær) 8103 水聽器 2 支，分別為 CH1、CH2，量測頻率範圍為 0.1 Hz ~180 kHz；聲場分析使用 6 頻道分析儀 B&K 3050-A-060，量測頻率範圍(frequency range)為 51.2 kHz，取樣率(sampling rate)為 131000 samples/s，資料傳輸(data transfer)為 24 bit，訊號擷取與分析的軟體使用 B&K Pulse LabShop V.26。

水聽器實驗架構如圖 12、圖 13 所示，其中 CH1 距離帆罩頂部尾緣為 178.71 mm，CH2 距離帆罩頂部尾緣為 370.19 mm。

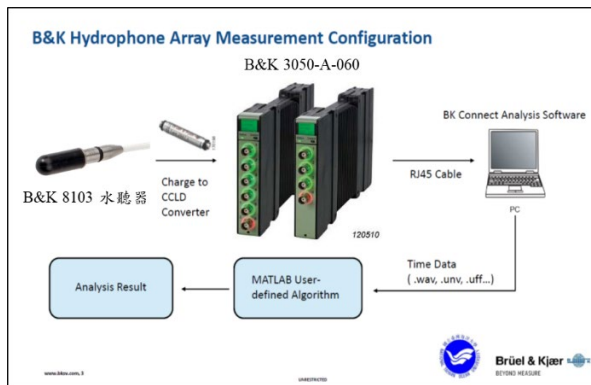


圖 11 水下聲場量測流程圖

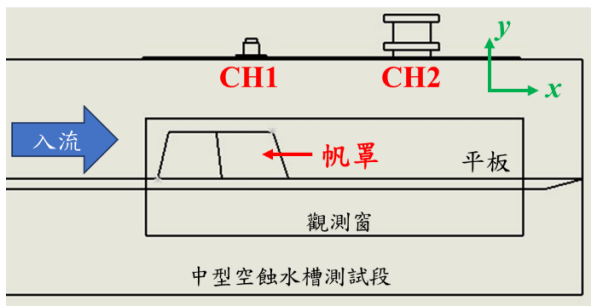


圖 12 水聽器架設示意圖(側視圖)

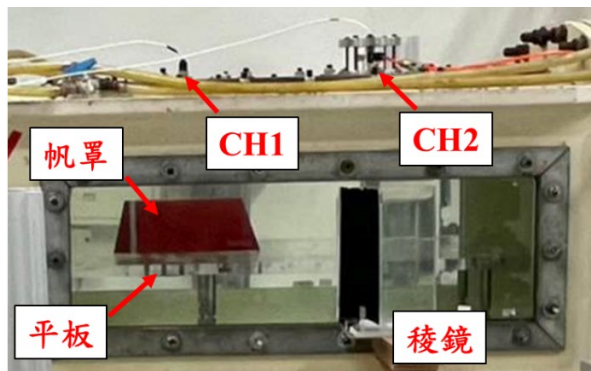


圖 13 水聽器架設實際圖(側視圖)

### 5. 量測與分析方法

#### 5.1 跡流場量測與分析方法

本計畫為針對帆罩頂端跡流場，以距離帆罩 0 度攻角時的尾緣(trailing edge)下游固定位置， $x/C = 0.10$ 、 $0.15$ 、 $0.30$ 、 $0.50$  之橫截面及  $0$ 、 $5$ 、 $10$  度角度和固定目標流速  $U_0 = 5 \text{ m/s}$  來進行 SPIV 實驗拍攝，每個橫截面拍攝  $N = 5000$  組顆粒影像圖。

每組顆粒影像圖，經由 LaVision 公司的 DaVis10.2.1 軟體，分析可得水槽卡氏座標  $(x, y, z)$  的瞬時速度分量，分別為  $(u_x)_k$ 、 $(u_y)_k$ 、 $(u_z)_k$ ，再針對  $N$  個瞬時速度分量進行平均，可得平均速度分量  $V_x$ 、 $V_y$ 、 $V_z$ ，如式(1)所示：

$$V_i = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (u_i)_k, \quad i = x, y, z \quad (1)$$

流體的旋轉運動，可以用渦度來呈現，而完整的渦度分量為軸向渦度  $\omega_x$ ，如式(2)所示：

$$\omega_x = \frac{\partial V_z}{\partial y} - \frac{\partial V_y}{\partial z} \quad (2)$$

時間上利用雷諾分解 (Reynolds decomposition)，可將每一瞬時速度分解成平均速度分量  $(V_x, V_y, V_z)$  與擾動速度分量  $((u_x)'_k, (u_y)'_k, (u_z)'_k)$  所組成，並利用擾動速度分量可計算雷諾正向應力 (Reynolds normal stress)，如式(3)、式(4)所示：

$$(u_i)'_k = (u_i)_k - V_i, \quad i = x, y, z \quad (3)$$

$$R_{ii} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N [(u_i)'_k]^2, \quad i = x, y, z \quad (4)$$

紊流動能(turbulent kinetic energy, TKE)由雷諾正向應力組成，計算如式(5)所示：

$$TKE = \frac{1}{2} (R_{xx} + R_{yy} + R_{zz}) \quad (5)$$

上述物理量無因次化之特徵長度為帆罩底部弦長  $C$ 、特徵速度為入流速度  $U_0$ 。

#### 5.2 渦流擬合演算法

為使 SPIV 實驗數據之跡流場尖渦進行量化，採用 Yang and Chow [18]的渦流擬合演算法(vortex-fitting algorithm)，根據 Burgers vortex 模型[19]與渦流幾何特性，定量描述渦流的半徑、環量、渦流中心位置等資訊。

考量於渦流擬合演算時間成本與尖渦形狀變化，跡流場尖渦將採用兩種方法針對瞬時與平均流場進行探討，其分別為：(1) 視渦流為正圓型態之 Burgers vortex 模型的 BC 法，運用 BC 法找出 5000 組瞬時流場之尖渦特性後，再進行系集平均；(2) 視

渦流為橢圓型態且為高斯分布之 Burgers vortex 模型的 BGE 法，運用 BGE 法找出時間平均流場之尖渦特性。

本次計算以渦流中心向外展開網格設定為  $7 \times 7$  的比較區域，用來比較擬合結果之渦度分佈與實驗之差異；而後調整 Burgers vortex 渦流模型的參數來擬合出渦流在不同參數組合下的渦度分佈；最終在選定比較區域內，以擬合與實驗渦流兩者渦度分佈的最小誤差之參數組合，作為代表實驗渦流之物理參數。

其他數據  $X_i$  的分析方法， $N$  表示有  $N$  筆數據，平均值  $\bar{X}$  如式(6)所示，標準差  $\sigma_x$  如式(7)所示，變異係數  $(CV)_x$  如式(8)所示：

$$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N X_i \quad (6)$$

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (X_i - \bar{X})^2} \quad (7)$$

$$(CV)_x = \frac{\sigma_x}{\bar{X}} \quad (8)$$

### 5.3 聲場量測與分析方法

聲場量測，使用的水聽器校正器(hydrophone calibrator)為 B&K 4229；時域訊號量測設定，每筆數據錄製時間長度為 2 分鐘，錄製頻率範圍為 51.2 kHz，且錄製時使用高通濾波器(High-pass Filter)，設定為 7 Hz (0.1 dB)。

時域訊號處理，使用漢寧視窗進行加權；時域訊號轉換至頻域訊號，使用快速傅立葉轉換，最大頻率  $F_{max}$  為 1.6 kHz，頻率解析條數為 6400，轉換完將得到噪音頻譜  $p'(f)$ ，利用式(9)將  $p'(f)$  轉換成聲壓級，其中參考壓力  $p_{ref}$  在水中為  $10^{-6}$  Pa。

$$SPL(dB) = 10 \times \log_{10} \left( \frac{(p'(f))^2}{(p_{ref})^2} \right) \quad (9)$$

將聲壓級結果以平均的方式表示，如整體聲壓級(Overall Sound Pressure Level, OASPL)，以及部分聲壓級(Partial Sound Pressure Level, PSPL)，如式(10)及式(11)所示，式中積分離散化使用梯形法，本次計算 OASPL 的  $f_{min} = 5$  Hz， $f_{max} = 1.6$  kHz，PSPL 的  $f_1 = 5$  Hz， $f_2 = 100$  Hz。

$$OASPL = 20 \times \log_{10} \left[ \frac{\sqrt{E}}{p_{ref}} \right], E = \frac{\int_{f_{min}}^{f_{max}} [p'(f)]^2 df}{f_{max} - f_{min}} \quad (10)$$

$$PSPL = 20 \times \log_{10} \left[ \frac{\sqrt{E_s}}{p_{ref}} \right], E_s = \frac{\int_{f_1}^{f_2} [p'(f)]^2 df}{f_2 - f_1} \quad (11)$$

## 結果與討論

### 1. 跡流場結果與討論

本次 SPIV 跡流場量測結果，可以總結出以下幾點：

- I. 本次 SPIV 跡流場量測的平均流場圖中，可清晰辨識出尖渦(Tip Vortex, TV)、馬蹄渦(Horse-Shoe Vortex, HSV)以及根渦(Root Vortex, RV)，如圖 14 所示。
- II. SPIV 跡流場量測的平均流場圖，在攻角 0 度的跡流場較為複雜，可觀察出在傳統帆罩時有 1 對正反旋轉的尖渦，新型帆罩則由於其特殊幾何，會產生 2 對正反旋轉的尖渦，如圖 15 所示；而在攻角 5 度及 10 度的跡流場，因有攻角緣故只形成一個瞬時針旋轉的尖渦(軸向渦度為負)。
- III. 渦流擬合演算法計算瞬時流場的結果，以 5000 組數據針對傳統帆罩及新型帆罩在攻角 5 度時最後一個橫截面( $x/C = 0.50$ )進行分析，結果如表 5 所示，可以發現新型帆罩尖渦的環量遠低於傳統帆罩(兩者環量差約 1 倍)，原因為新型帆罩在攻角 5 度時尚不穩定，在此橫截面上長時間為 2 個渦流以上，而渦流擬合演算法的程式目前只能計算單一渦流，本次瞬時流場的計算結果，以最強渦流進行擬合。
- IV. 渦流擬合演算法計算平均流場的結果，如圖 16 至圖 21 所示，可大致總結出以下 3 點：
  - i. 越往下游，除了新型帆罩 10 度攻角以外，其他條件下尖渦的半徑越大，中心渦度以及環量皆越低；而新型帆罩 10 度攻角的结果，尖渦越往下游，半徑越大，中心渦度降低，但是尖渦的環量卻逐漸上升，詳細原因尚未釐清。
  - ii. 比較不同攻角下尖渦的中心渦度以及環量，會發現其量值：攻角 10 度 > 攻角 5 度 > 攻角 0 度，且攻角越大，尖渦中心越偏離水槽中心。
  - iii. 探討以渦流辨識法定義之渦流中心渦度  $\omega_x$ ，會發現新型帆罩跡流場形成的尖渦，中心渦度量值皆小於傳統帆罩，如圖 18 所示。
  - iv. 傳統帆罩在 0 度攻角，比較加裝激紊器與否，發現尖渦的半徑與中心渦度無明顯趨勢，但加裝激紊器後傳統帆罩跡流場形成的尖渦，其環量皆較小。

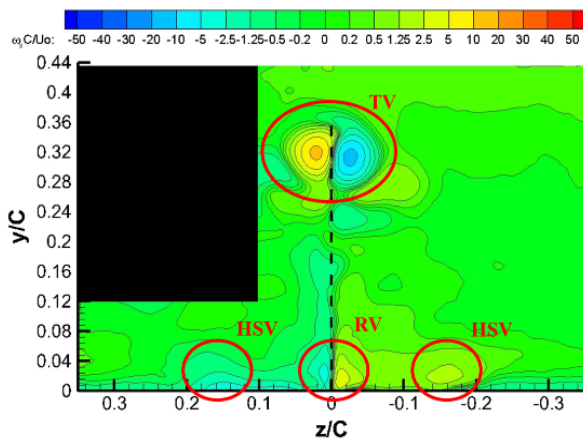


圖 14 傳統帆罩攻角 0 度在  $x/C = 0.10$  橫截面的 SPIV 量測結果：無因次化軸向渦度  $\omega_x C/U_0$  (黑色遮罩位置由於觀測窗壓克力變形導致顆粒影像分析有問題，但不影響尖渦判讀)(出平面為  $x$  方向， $z/C = 0$  為水槽對稱面)

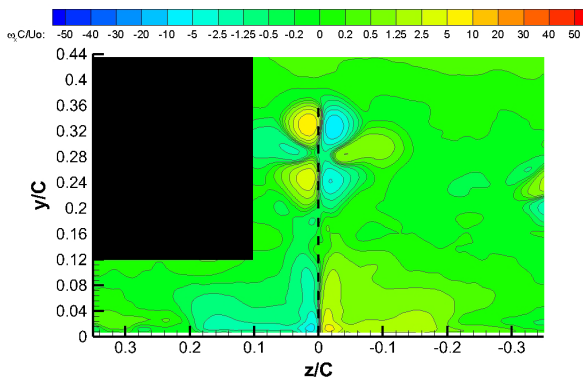


圖 15 新型帆罩攻角 0 度在  $x/C = 0.10$  橫截面的 SPIV 量測結果：無因次化軸向渦度  $\omega_x C/U_0$  (黑色遮罩位置由於觀測窗壓克力變形導致顆粒影像分析有問題，但不影響尖渦判讀)(出平面為  $x$  方向， $z/C = 0$  為水槽對稱面)

表 5 傳統帆罩及新型帆罩在攻角 5 度時，位於橫截面  $x/C = 0.50$  的瞬時流場，以 5000 組數據進行平均的渦流擬合計算結果(BC 模型)

條件	統計分析	渦流中心 (mm)		半徑 $r$ (mm)	中心渦度 $\omega_x$ (1/s)	環量 $\Gamma$ ( $mm^2/s$ )
		$z$ 座標	$y$ 座標			
傳統帆罩攻角 5 度	平均值	5.35	84.47	7.37	-537.48	72478
	標準差	1.38	1.45	1.18	86.57	15629
	變異係數 (%)	25.81	1.72	16.05	-16.11	21.56
新型帆罩攻角 5 度	平均值	8.56	84.61	7.07	-293.40	35519
	標準差	4.51	2.68	1.97	78.15	15676
	變異係數 (%)	52.67	3.17	27.90	-26.64	44.13

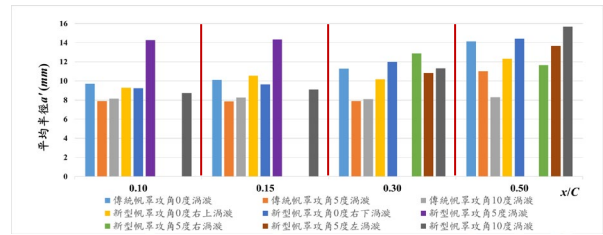


圖 16 平均流場的渦流擬合計算結果(BGE 模型)：傳統帆罩與新型帆罩的渦流平均半徑比較

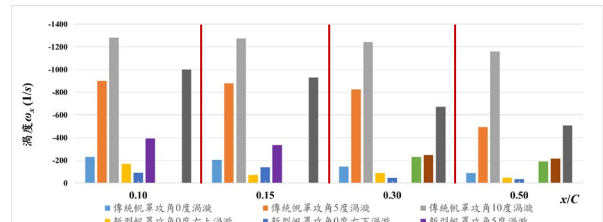


圖 17 平均流場的渦流擬合計算結果(BGE 模型)：傳統帆罩與新型帆罩的渦流中心渦度比較

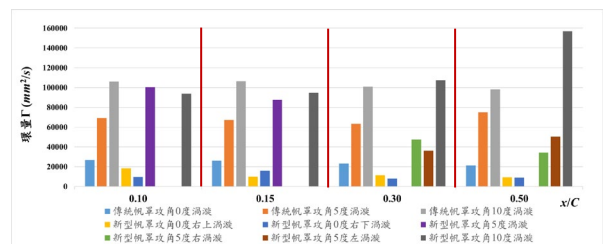


圖 18 平均流場的渦流擬合計算結果(BGE 模型)：傳統帆罩與新型帆罩的環量比較

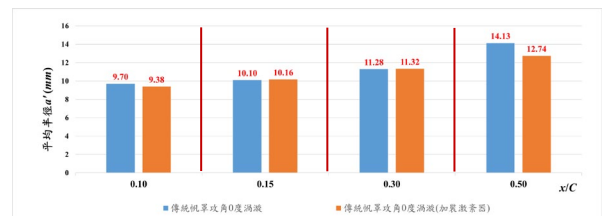


圖 19 平均流場的渦流擬合計算結果(BGE 模型)：傳統帆罩加裝激紊器與否的渦流平均半徑比較

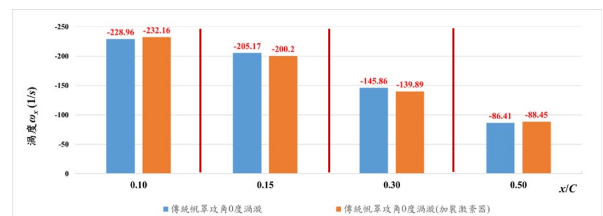


圖 20 平均流場的渦流擬合計算結果(BGE 模型)：傳統帆罩加裝激紊器與否的渦流中心渦度比較



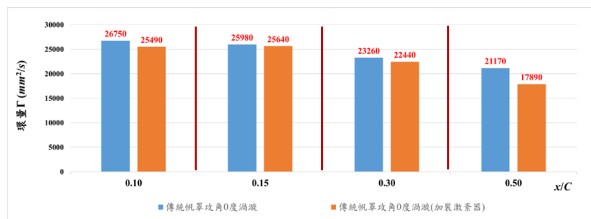


圖 21 平均流場的渦流擬合計算結果(BGE 模型)：傳統帆罩加裝激紊器與否的環量比較

## 2. 聲場結果與討論

本次水聽器 CH1、CH2 量測的聲場結果，以整體聲壓級(OASPL)以及部分聲壓級(PSPL)來呈現，如圖 22 至圖 28，可以總結出以下幾點：

- I. 傳統帆罩與新型帆罩的比較，如圖 22 至圖 24 所示，在 CH2 無明顯差異(差異小於 ± 2 dB)；在 CH1 攻角 0 度、攻角 5 度時的結果，一樣無明顯差異(差異小於 ± 2 dB)，但在 CH1 攻角 10 度時的結果，新型帆罩的整體聲壓級(5~1600 Hz)比傳統帆罩低 3.95 dB，新型帆罩的部分聲壓級(5~100 Hz)比傳統帆罩低 6.91 dB。
- II. 傳統帆罩與新型帆罩，各自在攻角 0、5、10 度的比較，如圖 25 至圖 28 所示，會發現不論是整體聲壓級(5~1600 Hz)還是部分聲壓級(5~100 Hz)，新型帆罩在 CH1、CH2 上皆能維持一定之聲壓位準，而傳統帆罩則隨著攻角變化而變化；此結果表示新型帆罩在不同攻角下，能有較穩定之航行聲噪，適用較廣航向範圍。
- III. 傳統帆罩加裝激紊器與否，水聽器 CH1 的整體聲壓級(5~1600 Hz)與部分聲壓級(5~100 Hz)皆無明顯差異(差異小於 ± 2 dB)；水聽器 CH2 的整體聲壓級(5~1600 Hz)，加裝激紊器比未加裝時低於 3.43 dB，部分聲壓級(5~100 Hz)，低於 4.15 dB，詳細原因還有待釐清。

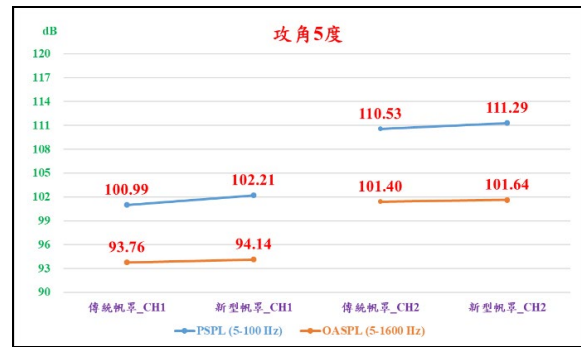


圖 23 傳統帆罩與新型帆罩在攻角 5 度，水聽器 CH1、CH2 量測的聲場結果比較

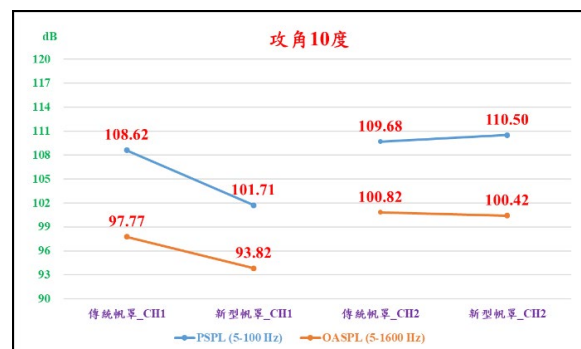


圖 24 傳統帆罩與新型帆罩在攻角 10 度，水聽器 CH1、CH2 量測的聲場結果比較

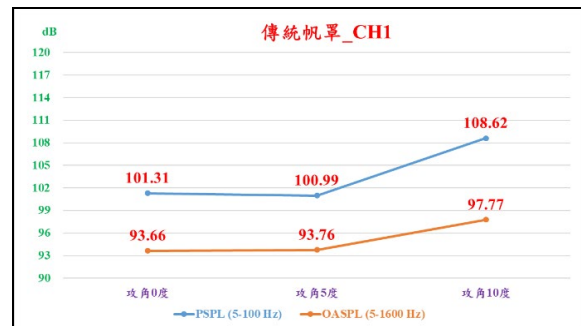


圖 25 水聽器 CH1 在傳統帆罩不同攻角下的聲場結果比較

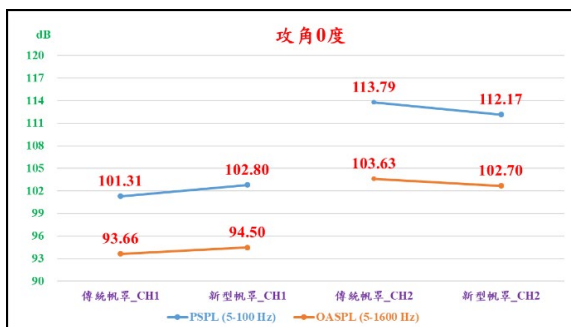


圖 22 傳統帆罩與新型帆罩在攻角 0 度，水聽器 CH1、CH2 量測的聲場結果比較

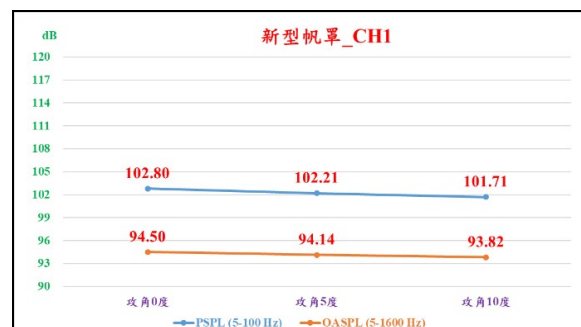


圖 26 水聽器 CH1 在新型帆罩不同攻角下的聲場結果比較

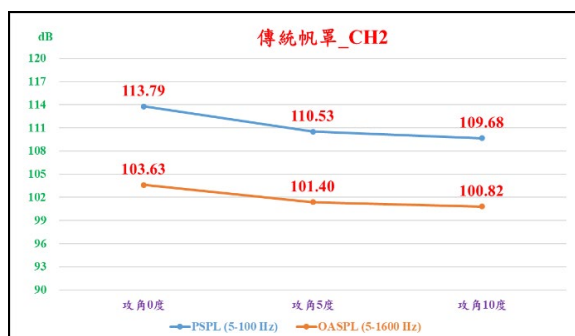


圖 27 水聽器 CH2 在傳統帆罩不同攻角下的聲場結果比較

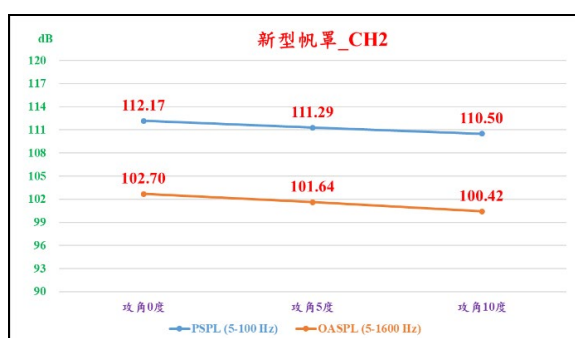


圖 28 水聽器 CH2 在新型帆罩不同攻角下的聲場結果比較

## 結論

本研究使用「傳統帆罩」和「新型帆罩」進行 SPIV 實驗和聲場的噪音差異特性。對新型帆罩的特殊造型並對流場下游的影響並進行帆罩頂端渦流 SPIV 流場量測與探討。比較傳統帆罩、新型帆罩的流場差異，以 SPIV 流場量測可以直接比對其差異。使用水聽器進行聲場噪音位準差距，可與渦流產生之噪聲比對。所有實驗入流使用高速相機進行 PIV 量測入流流場，確保流速穩定。

以帆罩頂端渦流來做定量比較，新型帆罩帆罩頂端渦度值均較低，原因可能是因為新型帆罩的特殊造型的產生。以 SPIV 流場結果來做定性比較，新型帆罩產生之渦流越往下游，渦流大小是較小的，反之，傳統帆罩產生之渦流大小是較大的。以渦流擬合演算法將 SPIV 所得之流場經由量化得到渦流中心渦度，也是新型帆罩帆罩的值小很多。以 SPIV 量測之流場探討新型帆罩，雖然新型帆罩因其不規則形狀產生眾多小渦流，但是其頂端最大渦度反而較傳統帆罩小，推論新型帆罩之不規則形狀能有效的削弱原帆罩頂端自身產生的渦流與噪音大小。

聲場探討新型帆罩以接近帆罩頂端之 CH1 為主，可以發現在不同攻角下，新型帆罩能維持一定之聲壓位準，傳統帆罩則隨著攻角變大而變大，代表新型帆罩有較穩定之航行聲噪，適用較廣航向範圍，同時這設計有疑似反射雷達功能，與拉法葉巡防艦傾斜設計功能意圖相同。另外，下游之 CH2 量測似乎有些差異，由於聲場量測複雜，聲波因環境影響有波峰波谷之現象，細節建議有待日後釐清。

本研究以流場與聲場方向探討新型帆罩之特性，Han et al. [20]以不同剖面的新型帆罩幾何形狀之聲散射特性進行探討；研究目的是降低指揮塔的目標強度，從而提高潛艇的聲隱身性能。文章使用 Kirchhoff 近似法(Kirchhoff approximation, KA)來模擬指揮塔的聲散射，並與有限元分析(finite element analysis, FEA)進行比較；研究設計了多種角度的指揮塔幾何形狀，用以分析流線型和側面數量對目標強度的影響；此外，還比較了充水彈性殼體和剛性殼體的聲學效應。研究結果表明，非流線型的四側面指揮塔幾何形狀在入射角度為 $-10^{\circ}$ 至 $10^{\circ}$ 範圍內具有最佳的聲隱身性能。

Han et al. [20]以幾何形狀對於聲散射特性之探討，本研究以幾何形狀產生之流場進行研究，均是得到新型帆罩有較佳之靜音，值得做為新一代潛艦設計參考。

## 參考文獻

- <http://www.navyrecognition.com/index.php/news/defence-news/2017/august-2017-navy-naval-forces-defense-industry-technology-maritime-security-global-news/5533-saab-expands-its-a26-submarine-offer-with-now-three-variants-to-choose-from.html>
- <https://www.chinatimes.com/realtimenews/20210809000814-260417?chdtv>
- <https://www.youtube.com/watch?v=pY4apzIiDgk>, "The Chinese Navy's 10 Types Of Submarine," October 23, 2021.
- Groves, N.C., Huang, T.T., Chang, M.S., "Geometrical Characteristics of DARPA SUBOFF models (DTRC Model Nos. 5470 and 5471)," DTRC/SHD-1298-01, March, 1989.
- Huang, T.T., Liu, H.-L., Groves, N.C., "Experiments of the DARPA SUBOFF Program," David Taylor Research Center, DTRC/SHD-1298-02, December, 1989.
- Liu, H.-L. and Huang, T.T., "Summary of DARPA SUBOFF Experimental Program Data," Naval Surface Warfare Center Carderock Division (NSWCCD), CRDKNSWC/HD-1298-11, June, 1998.

7. Devenport, W. J. and Simpson, R. L., "LDV measurements in the flow past a wing-body junction," Fourth Intl Symp. on Applications of Laser Anemometry to Fluid Mechanics, Lisbon, Portugal. 1988
8. Falchi, M., Grizzi, S., Aloisio, G., Felli, M., Di Felice, F., "Critical issues in the application of Stereo-PIV in large hydrodynamic facilities: study of a catamaran in steady drift," 10TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON PARTICLE IMAGE VELOCIMETRY – PIV13, Delft, The Netherlands, July 1-3, 2013.
9. Takayuki Mori, Risa Kimoto, Kenji Naganuma, "PIV Measurements of Propeller Flow Field in a Large Cavitation Tunnel," ASME-JSME-KSME 2011 Joint Fluids Engineering Conference, Hamamatsu, Shizuoka, Japan, July 24–29, 2011.
10. Zimmerman, S., Lee, J. H., Monty, J., Klewicki, J., "Flow Structure in the Wake of Turbulent Wing-Body Junction Flows," 33rd Symposium on Naval Hydrodynamics, Osaka, Japan, October 19-23, 2020.
11. Choi, J. and Ceccio, S. L., "Dynamics and noise emission of vortex cavitation bubbles," Journal of Fluid Mechanics, 575, 1-26. March, 2007. (DOI: [10.1017/S0022112006003776](https://doi.org/10.1017/S0022112006003776))
12. 宋明太、徐良浩、彭晓星、曹彦涛，椭圆水翼梢涡空化形态与噪声特征研究，中国造船工程学会船舶力学学术委员会水下噪声学组成立三十周年第十五届船舶水下噪声学术讨论会，2015。
13. Gand, F., Deck, S., Brunet, V., Sagaut, P., "Flow dynamics past a simplified wing body junction," PHYSICS OF FLUIDS, 22, 115111. November 18, 2010.
14. 水的黏度表，  
<https://blog.csdn.net/oop4587/article/details/120882016>，2023年8月8日擷取。
15. 楊鈞堯，李耀輝，陳建宏，吳俊賢，魏志宇，周一志。國立臺灣海洋大學大型空蝕水槽大尺度流場 SPIV 量測。中國造船暨輪機工程學刊第 38 卷第 2 期(2019.05)。
16. [24] LaVision. 1003005\_FlowMaster\_D10.2.pdf. <http://www.lavision.com>.
17. Westerweel, J. and Scarano, F., "Universal outlier detection for PIV data," Experiments in Fluids, 39, 1096-1100. August 12, 2005.
18. Yang, C.-Y. and Chow, Y.-C., "Experimental Investigation on Juncture Flow Associated with a Surface-Mounted Circular Cylinder Trailed by a Backward-Facing Step," Journal of Marine Science and Engineering, 10(10), 1494. October 14, 2022. (DOI: [10.3390/jmse10101494](https://doi.org/10.3390/jmse10101494))
19. Burgers, J. M. (1948). "A mathematical model illustrating the theory of turbulence," Advances in Applied Mechanics, 1, 179-199. 1948. (DOI: [10.1016/s0065-2156\(08\)70100-5](https://doi.org/10.1016/s0065-2156(08)70100-5))
20. Lin-Jiang HAN, Hao SONG, Chang-Xiong CHEN, Xi-Rui PENG, Zi-Long PENG, "Research on the Acoustic Scattering Characteristics of Multi-Sections Conning Tower Geometries in Monostatic Configuration," Archives of Acoustics, Vol. 47, No. 3, pp. 307–317, 2022. (DOI: [10.24425/aoa.2022.142005](https://doi.org/10.24425/aoa.2022.142005))

# MEASUREMENT AND DISCUSSION OF THE FLOW FIELD AT THE TOP OF THE SAIL

*H. C. Kao\* C. Y. Yang\* P. H. Chen\* R. J. Chen\* W. C. Tseng\* Y. C. Chow\*\*\* Y. H. Lee\*\*\**

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

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

*Keywords: Sail, Stereoscopic Particle Image Velocimetry System, Hydrophone, Tip vortex*

## ABSTRACT

This study investigates the characteristics of a new type of sail cover, focusing on its performance in various flow and acoustic fields compared to traditional sail covers. The experiments were conducted using two different geometrical shapes of sail covers: traditional and new-type. Measurements were taken of the flow and acoustic fields downstream of the sail cover top under Reynolds number  $1.6 \times 10^6$  and three different angles of attack: 0, 5, and 10 degrees. The flow field was measured using a Stereoscopic Particle Image Velocimetry System (SPIV System), and the acoustic field was measured using a B&K 8103 hydrophone. This was done to explore the differences in flow and acoustic properties due to the geometrical shape of the new-type sail cover, with particular attention to how its unique shape affects the flow field. Overall, combining the flow and acoustic results, although the new-type sail cover has an irregular shape and produces many small vortices, its maximum vorticity at the top of tip vortex is relatively smaller. This indicates that the irregular shape of the new-type sail cover helps suppress vortices at the sail cover top, thereby reducing sound pressure levels in the acoustic field. Moreover, the new-type sail cover maintains a consistent sound pressure level across different angles of attack, whereas the traditional sail cover exhibits increased noise with larger angles of attack. This demonstrates the new-type sail cover's stability in navigational noise, highlighting its potential for improved sail design, reduced environmental impact, and enhanced navigational efficiency.