

- 刪除:
- 刪除:
- 格式化: 底線
- 刪除:
- 刪除:
- 刪除:
- 刪除:
- 刪除:
- 刪除:
- 刪除:

## 潛艦帆罩接面渦漩之數值研究

郭真祥\* 陳彥均\*\* 蔡昇佑\* 簡鴻斌\* 趙修武\*\*\*

\*台灣大學工程科學及海洋工程學系  
\*\*龍華科技大學多媒體與遊戲發展科學系  
\*\*\*中原大學機械工程學系

### 摘 要

本文利用計算流體力學之方法，研究潛艦帆罩之接面渦漩流場。首先，本文計算了圓柱體前端的接面渦漩，並且與實驗量測結果進行比較，驗證了數值分析結果的正確性。接著，本文計算了一個等剖面形狀三維翼所產生的接面渦漩，並且利用不同網格點密度的數值網格，探討準確解析接面渦漩所需要的網格點密度。完成基礎的分析工作之後，本文仿製了德國 209-1400 型柴油動力潛艦的帆罩幾何外形，並且以此帆罩外形，進行了全尺寸帆罩的接面渦漩計算。本文最後研究了接面渦漩的消滅機制，從數值計算結果中發現，在帆罩前端安裝 30 ~ 40 度之斜坡，將能夠有效地消除接面渦漩。

**關鍵字：**潛艦，帆罩，接面渦漩，計算流體力學

## Numerical Study on Juncture Vortex of Submarine's Sail

Jen-Shiang Kouh\*, Yen-Jen Chen\*\*, Sheng-Yo Tsai\*,  
Hung-Pin Chien\*, and Shiu-Wu Chau\*\*\*

\*Department of Engineering Science and Ocean Engineering, National Taiwan University  
\*\*Department of Multimedia and Game Science, Lunghwa University of Science and Technology  
\*\*\*Department of Mechanical Engineering, Chung Yuan Christian University

### ABSTRACT

In this paper, the juncture vortex flow around the submarine's sail is studied using a computational fluid dynamics method. In order to validate the applied method, the juncture vortex in front of a cylinder is calculated and compared with the measured data at first. Then, the juncture vortex of a three-dimensional hydrofoil with constant foil sections is also computed. Using the numerical grids with different grid densities, the required grid density to obtain the accurate prediction is investigated. When the preliminary studies are accomplished, the geometry of the sail of German Type 209-1400 diesel submarine is imitated and the juncture vortex analyses for the full-scale sail are performed. This paper discusses the mechanism of eliminating the juncture vortex in the end. According to the computed results, the vortex can be obviously eliminated by installing a slope with 30 ~ 40 degree in front of the sail.

**Keywords:** submarine, sail, juncture vortex, computational fluid dynamics

文稿收件日期 94.3.21; 文稿修正後接受日期 95.3.1.  
Manuscript received March 21, 2005; revised March 1, 2006.

- 刪除: 4
- 刪除: 12
- 刪除: 28
- 刪除: December
- 刪除: 28

## 一、前言

潛艦在現今的海軍作戰系統中仍然佔有相當重要的戰略地位，對於所有水面船艦而言，在海面下活動的潛艦是個極大的威脅，而其威脅性主要是來自於潛艦的隱蔽性。由於潛艦所產生的噪音，乃是暴露自己行蹤的隱憂，故各國所發展之潛艦，無不以降低潛艦所產生之噪音為主要考量。在潛艦的外形方面，除了近似圓桶狀的船體之外，還具有一個突出於船體的帆罩(sail)，潛艦帆罩存在之目的，乃在於保護潛艦內部相關配件，如潛望鏡、天線等等。然而，由於帆罩的存在，在帆罩與船體之交界處，會因為兩組邊界層的交會而產生一個渦流。此渦流之原理如圖 1 所示，圖中的底部區域是物體表面，由於邊界層的效應，因此會有一組水平方向的低速區，然而在圓柱的前方，則會因為停滯點或者是圓柱表面邊界層的緣故，產生另一組垂直方向的低速區。當流體往圓柱處流動時，底部區域（水平邊界層內）的流體一直都在低速區內，速度並無顯著的改變，然而上層區域（水平邊界層之外）的流體則會由高速區流至低速區（停滯點或垂直邊界層內），由於水平邊界層內外流體的速度變化不同，因此會在圓柱前方產生向下的流速，並且產生一個渦流，稱為接面渦流(juncture vortex)。又因此種渦流在障礙物的前方產生後，會由帆罩兩側繞過帆罩，由上方觀之，其形狀近似一塊馬蹄鐵，因此又被稱為馬蹄形渦流(horseshoe vortex)。根據 Praisner [1]的量測結果，接面渦流的架構如圖 2 所示，除了一個主要的渦流之外，還會在主要渦流的前方，產生次要的渦流結構。

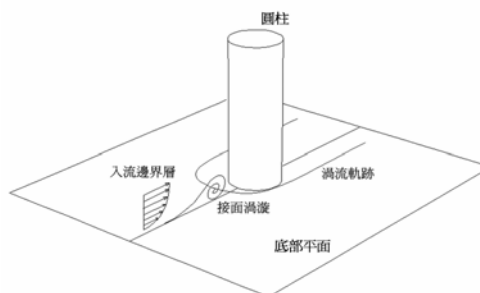


圖1. 接面渦流的發生機制。

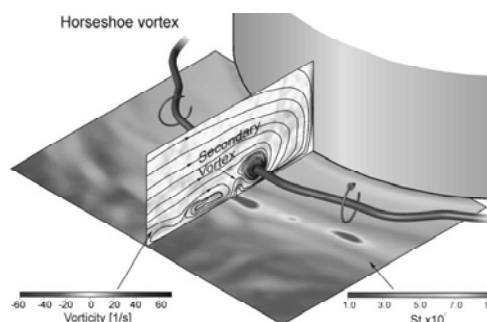


圖2. 實驗量測所得之接面渦流架構[1]。

對於橋樑之橋墩而言，接面渦流將會掏空其周圍的砂石，產生橋墩結構強度上之隱憂；對於飛機而言，此種渦流發生於機翼與機身結合處，嚴重時可能造成飛機失速(stall)之危險；對於潛艦而言，接面渦流可能流入螺槳的作動範圍之內，引發螺槳的震動噪音，因此如何降低接面渦流之影響，亦是達成低潛艦噪音的重要課題。因為接面渦流在工程上的重要性，在此一方面已有許多研究，Baker [2]、Menna 與 Pierce [3]、Pierce 與 Harsh [4]、Graf 與 Yulistiyanto [5]等以實驗方式進行接面渦流量測，研究了渦流流場速度向量分布、流線軌跡描繪、接面渦流之位置等流場特性。Steenart 等人[6]則針對以 NACA0015 翼形剖面建構之翼形柱體，進行柱體前端整流機構之設計，並分析不同大小整流機構其抵消接面渦流之成效，以實驗證明改變柱體前端幾何外形，確

- 刪除:
- 刪除:
- 格式化: 底線
- 刪除:
- 刪除:
- 刪除:
- 刪除:
- 刪除:
- 刪除:
- 刪除:

實可達到消滅接面渦流之明顯效果。Hung [7] 則以兩套程式針對馬赫數、雷諾數、網格大小、網格密度等，分析上述四種因素對馬蹄形渦流(horseshoe vortex)與底部平面接合處鞍部點(saddle point)之影響。至於潛艦帆罩之接面渦流研究，郭等人[8]利用計算流體力學(computational fluid dynamics, CFD)之方法，進行了仿德國 209-1400 型潛艦(含帆罩與方向舵)之穩態紊流場計算，並且探討在實船尺寸與模型尺寸之下，接面渦流的定性差異，然而受限於計算網格點的限制，可能無法提供準確的定量分析結果。

在渦流流場數值解析的研究上，黃等人[9]曾經利用 CFD 之方法計算三維翼的翼端渦流(tip vortex)，並且與實驗量測結果比較，其研究發現在渦流中，每一個軸向的網格點必須高達 20 點，甚至 30 點以上，CFD 之計算結果方能夠達到定量分析所需之準確度。由於接面渦流在空間上的尺寸極小，根據文獻[9]的結果推估，計算網格點總數可能需要達到數千萬點以上，才能夠在進行潛艦全船之流場解析時，於帆罩與船體交接處分佈足夠密度之網格點，並且準確地分析出接面渦流之強度，否則將與文獻[8]之研究(網格點總數為 400 萬點)相同，只能夠提供定性的研究結果。受限於現有之硬體資源，無法進行如此巨大網格之數值計算，因此，本研究只進行簡化之帆罩接面渦流解析，將潛艦帆罩安裝於一個平板之上，以此平板模擬潛艦船體甲板之效應，而不考慮潛艦之圓筒狀船體與其他附屬物，經過此一簡化之後，計算網格之密度便能夠達到文獻[9]中之要求，能夠提供定量上的預測。

## 二、潛艦帆罩之幾何外形

潛艦的幾何外形與某些性能之間具有非常密切的關係，各國在開發潛艦時，常會透過幾何外形之調整，以達到改善潛艦性能的目的。然而，為了保護其技術，先進潛艦之詳細幾何外形資料均被各國視為軍事機密，無法從一般管道取得。所幸，先進潛艦中的許多設計方法往往傳承自該系列的舊型潛艦，而在某些參考資料中，對於部分已除役之潛艦具有比較詳細的描述，因此，藉由研究這些舊型潛艦的幾何外形資料，能夠窺知潛艦的許多關鍵技術。

本研究的研究對象為德國 209-1400 型潛艦，德國 209 型潛艦為國際間知名的柴油潛艦，三十餘年來，德國總共建造了數十艘此型潛艦，分別售予南韓、土耳其、秘魯、希臘、印度等十餘個國家，在世界上各大海域中執行軍事任務，因此，此型潛艦可以算是這一個時代的代表性作品。雖然本文並未取得德國 209-1400 型潛艦帆罩之精確幾何外形資料，然而，209 型潛艦是傳承自 205 型潛艦，根據比對之結果，本文發現 205 型潛艦帆罩之剖面形狀近似於 NACA 0018 翼形，因此推斷在其設計理念中，是採用三維翼來做為帆罩之外型，根據相同之理念，本文採用 NACA 0018 翼形來仿製德國 209-1400 型潛艦之帆罩。

## 三、數值研究方法

在本文所使用的數值分析系統中，採用 CD adapco 公司之泛用 CFD 軟體 Comet 進行接面渦流之計算模擬，此軟體藉由求解 RANS (Reynolds-averaged Navier-Stokes) 方程組來模

擬船舶周圍之紊流場，其質量與動量守恆方程式為：

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial(u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \nu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (2)$$

並以有限體積法(finite volume method, FVM)進行數值離散工作，並透過 Simple 法[10]計算並修正流場中的壓力，至於紊流模型方面，本文選用一個可靠且廣泛使用的標準  $k-\varepsilon$  模型，其紊流動能( $k$ )與紊流動能消散率( $\varepsilon$ )之傳輸方程式為：

$$\begin{aligned} \frac{\partial k}{\partial t} + u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} &= \frac{\tau_{ij}}{\rho} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \\ &+ \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} - \varepsilon - D \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} &= c_{\varepsilon 1 f 1} \frac{\tau_{ij}}{\rho} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \frac{\varepsilon}{k} \\ &+ \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} - c_{\varepsilon 2 f 2} \frac{\varepsilon^2}{k} + E \end{aligned} \quad (4)$$

至於計算機硬體方面，由於近年來個人電腦叢集，以其低廉的價格與強大的運算能力，而被廣泛地運用於科學計算上，在某種研究領域上能夠降低吾人對於超級電腦的依賴，因此本文在一組由 16 個節點(node)所組成的個人電腦叢集上進行接面渦流相關計算，以期縮短處理時間，根據測試結果[11]，此個人電腦叢集可將 CFD 計算所需的時間，縮短至單處理器個人電腦的 1/10 至 1/12。

#### 四、圓柱體接面渦流之驗證

在進行真實帆罩所產生接面渦流之相關

數值研究之前，本文先針對已有實驗數據[5]之圓柱體（尺寸如表 1），進行接面渦流之計算，以驗證本文所採用計算工具之準確性。雖然知名的馮卡曼(von Kármán)渦流會呈現左右不對稱的現象，但是本文所研究的接面渦流與它有許多不同。首先，馮卡曼渦流的成因為流體繞過物體外形（如圓柱等）所產生的旋轉性，而接面渦流則起因於邊界層內外的速度變化差，由於邊界層厚度遠比物體寬度小，因此，接面渦流在空間上的尺寸大小會遠比馮卡曼渦流更小，左右兩個渦流不易發生相互影響。再者，馮卡曼渦流與接面渦流的旋轉方向不同，馮卡曼渦流的旋轉方向與入流方向垂直，而接面渦流的情況則與飛機機翼的翼端渦流(tip vortex)相同，與入流方向平行。在這種旋轉方向之下，左右兩側的接面渦流將會穩定地存在，而不會像馮卡曼渦流那般，左右兩個渦流交替出現。基於以上的原因，接面渦流並不會有明顯的左右非對稱性，本文也不將接面渦流的左右非對稱性列入考慮。本文的計算條件如圖 3 所示，圓柱體安置於一個平面之上，在數值計算中，將這個底部平面(bottom)的邊界條件設定為不可穿透且不可滑動(no slip)條件，以模擬潛艦船體之甲板。由於本文假設流場呈現左右對稱，因此本文僅針對一半的計算域進行數值解析，並且在中央對稱面上指定對稱之邊界條件。流體由圖 3 中的 inlet 邊界流入計算域，並由 outlet 邊界流出，至於遠端(far field)的邊界條件則是指定為不可穿透條件。在網格點數的佈置方面，以 3 個區塊 (I、II、III)，總格數為 150 萬個格點(cell)，來分配整個計算空間，其網格佈置如圖 3，各區塊之網格點分布見表 2。

- 刪除:
- 刪除:
- 格式化: 底線
- 刪除:
- 刪除:
- 刪除:
- 刪除:
- 刪除:
- 刪除:
- 刪除:

表1. 圓柱體之主要尺寸

剖面形狀	圓形
圓柱直徑(D)	0.22 m
圓柱高度(H)	0.50 m

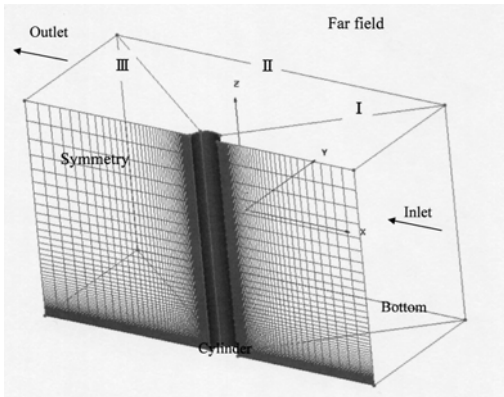


圖3. 圓柱體之數值計算網格。

表2. 圓柱體網格之各區塊網格點分布

區塊編號	網格點分布 (i * j * k)	網格數	總網格點數
I	101*51*101	50萬	150萬
II	101*51*101	50萬	
III	101*51*101	50萬	

在圓柱體接面渦漩的計算條件方面，本文採用與 Graf 與 Yulistiyanto [5]相同的條件進行計算，並將計算結果與其實驗量測所得之接面渦漩進行比較。在此，雷諾數之定義為：

$$Re_D = \frac{VD}{\nu} = 1.48 \times 10^5 \quad (5)$$

其中入流速度(V)為 0.67 m/s，圓柱體直徑(D)為 0.22 m，水之動黏滯係數(ν)為  $1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 。以實驗量測資料中，位於圓柱上游中央對稱面處之渦度(vorticity)圖，與數值模擬結果進行比對，以評估以此數值方法計算接面渦漩之合理性。實驗量測所得之渦度圖如圖 4 所示，渦度之定義為：

$$\vec{\omega} = \nabla \times \vec{V} \quad (6)$$

其中， $\vec{V}$  為流場之速度向量。在圓柱體前方的中央對稱面上，也就是接面渦漩產生的地方，側向速度(Y 方向速度)為零，所以只需要考慮 XZ 方向速度所造成之渦度，即 Y 方向之渦度，其定義為：

$$\omega_y = \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \quad (7)$$

在圖 4 中，可以發現一個主要之接面渦漩，與圓柱前緣之縱向距離為 0.143 m，在圖 5 的數值計算結果中，也存在著相同的接面渦漩。在這個接面渦漩的位置與渦度方面，數值計算結果與實驗量測值詳列於表 3 之中。由表中可知，兩者間的結果接近，差距僅 7% ~ 9%，驗證了數值計算方法之合理性。

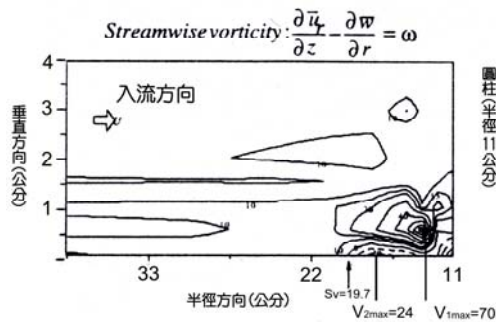


圖4. 圓柱中央對稱面上之渦度分佈[5]。

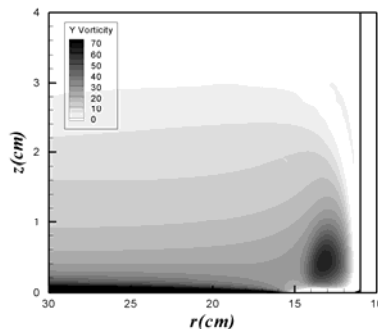


圖5. 圓柱中央對稱面上渦度分佈(CFD)。

表3. 圓柱體接面渦流之定性驗證

	主渦流中心之縱向位置	主渦流之最大渦度( $\omega_y$ )
實驗值	0.143 m	70.00
計算值	0.132 m	64.01
差距	-7.29 %	-8.55 %

造成表 3 中的差距有許多原因，其中之一為數值計算網格密度的問題，由於接面渦流在空間中的尺度極小，因此需要非常密的計算網格方能夠得到準確的結果，現階段所採用之網格（150 萬點）或許稍嫌不足，計算網格之影響將會在下階段中討論。第二個造成誤差的原因是紊流模型，接面渦流是由於邊界層效應所造成，故必須準確地模擬物體表面之邊界層，方能夠得到準確的接面渦流。在 CFD 計算中，利用紊流模型來模擬流場中的紊流現象，然而這些經過簡化的紊流模型並無法重現所有流場特性，對於某些積分量(integral properties)，例如阻力等，或許不會產生太大的誤差，然而對於接面渦流這些局部流場特徵，可能會產生較大的誤差。由於其他更準確的紊流模擬方法，如雷諾剪力模型(Reynolds stress model)，甚至是直接數值模擬(direct numerical simulation, DNS)，需要極大量的計算資源，遠超過吾人所使用計算機之負荷能力，再加上這些方法之穩定性不如本文所使用的標準  $k-\epsilon$  模型，在真實帆罩外形的計算上可能會產生穩定性的問題，基於這些原因，本文決定繼續使用標準  $k-\epsilon$  紊流模型。第三個原因則是非穩態(unsteady)現象，根據相關實驗[12]之觀察發現，圓柱前方之流場並不穩定，此處之流體速度會隨時間而改變，接面渦流也會在一定範圍之內移動。然而，數值計算是採用穩態的計算方式，因此完全沒有考慮非穩態效應；至於實

驗方面，由於渦度是根據量測所得之速度場所計算出，實驗所得之速度場是一個時間平均值(time-average)，理論上而言，它與穩態流場不完全一樣，因此，數值計算與實驗兩者的結果會有些許差異。

## 五、翼形柱體之接面渦流計算

由於潛艦帆罩之剖面形狀近似於一般翼形，所以，在完成數值分析工具之準確性驗證後，本文採用 NACA 0018 翼形，建構出一個翼形柱體（如圖 6，其尺寸列於表 4），此翼形柱體是一個三維翼，然而在翼展(span-wise)方向的剖面形狀完全相同。在入流條件方面，本節將入流速度設定為 0.5 m/s，以此條件進行接面渦流之相關計算。

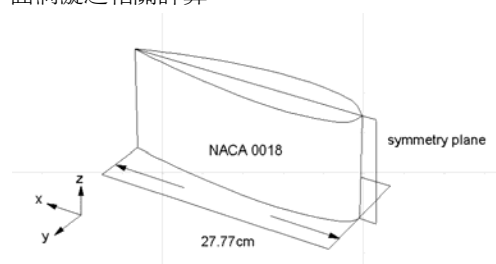


圖6. NACA0018翼形柱體之外形。

表4. 翼形柱體之主要尺寸

剖面形狀	NACA0018
翼形弦長	0.278 m
最大半寬	0.025 m

在本節之中，計算域與邊界條件兩方面，是採用與圓柱體相同之策略。至於計算網格的安排方面，則採用特殊的方式，以求能夠得到準確的接面渦流預測結果。由於本文所使用的電腦計算叢集具有 16 個節點，為了使 CFD 計算能夠在平行計算時獲得最高的效率，本文將整個計算域分割成 16 個子計算域，並且在所



- 刪除:
- 刪除:
- 格式化: 底線
- 刪除:
- 刪除:
- 刪除:
- 刪除:
- 刪除:
- 刪除:
- 刪除:

有子計算域中分佈網格數目相等之計算網格，每一個子計算域由個人電腦叢集中的一個節點負責進行計算工作。接面渦流是一個空間上尺度很小的物理量，因此，必須在兩個邊界層的交接處分佈密度很高的網格，方能夠準確地計算出接面渦流之強度。除此之外，對於潛艦而言，接面渦流之危害在於它對螺旋噪音之影響，所以，除了在上節中所比較的物體前方之中央對稱面之外，接面渦流往下游方向的發展也是一個重要的課題。為了準確地研究上述的兩個問題，在本節之中，將 8 個子計算域安排在這兩個區域，如圖 7 中的 I ~ VIII 所示，圖中以顏色表示不同的子計算域，塗滿墨綠色之區塊代表翼狀柱體，也就是說半數的網格將會佈置於這個內層區域，以求網格能夠集中於接面渦流產生及發展的重要區域。至於此一內層區域範圍的大小，本文是先利用一組網格進行計算，從計算結果中所估計而得。扣除這個內層區域之後，其他區域則由另外 8 個子計算域所組成，如圖 8 所示。

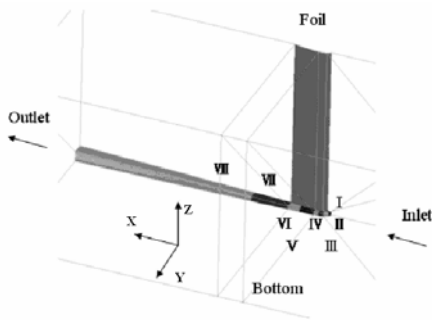


圖7. NACA0018翼形柱體之內層網格建構。

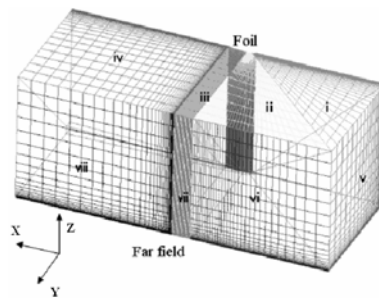


圖8. NACA0018翼形柱體外層網格建構。

在數值計算網格的產生方面，本文在每一個子計算域中建立一個單區塊結構化網格，所以，整體的數值網格是由 16 個區塊所組成，在每一個區塊中，三個方向( $i, j, k$ )上所分佈的網格點數均相同。如表 5 所列，本文在區塊中每一個方向上分佈 30 ~ 70 個網格點，依照網格點密度之不同，建立了五組計算網格，網格的總格點數為 43 萬 ~ 549 萬個，並且利用這五組網格，探討準確解析接面渦流所需要的網格點密度。

表5. 五組不同密度之計算網格。

網格編號	區塊數	$i * j * k$	總格點數
1	16	30 * 30 * 30	43 萬
2	16	40 * 40 * 40	102 萬
3	16	50 * 50 * 50	200 萬
4	16	60 * 60 * 60	346 萬
5	16	70 * 70 * 70	549 萬

在此，本文討論表 5 中五組不同密度之網格，所得到的接面渦流計算結果。在翼形柱體前方的接面渦流方面，圖 9 與圖 10 分別為最粗網格（網格 1，43 萬個格點）與最密網格（網格 5，549 萬個格點）計算所得的渦度分佈圖，比較兩者可知，網格密度對於渦度的分佈影響不大，這意味著不需要使用密度很高的計算網格，便能夠大致上預測出接面渦流所在的位置。至於主要接面渦流的最大渦度，如表 6 與

圖 11 所示，表 6 中的差距是指各組網格的計算結果，與最密網格（網格 5）計算結果的差距。從圖 11 之中，可以看出此趨勢已經達到「收斂」的階段，這代表了即使網格密度再大幅度地增加，也不會對渦度有明顯的改變，而最密網格的計算結果，已經接近網格獨立解 (grid-independent solution)，即無限密網格計算所得的數值解。從表 6 中的比較可以得知，雖然最粗網格（網格 1）已經能夠大致掌握接面渦流的所在位置，但是在渦流的強度方面，仍然有 10% 的誤差，因此，有必要使用較密的網格，以準確地預估接面渦流的強度。

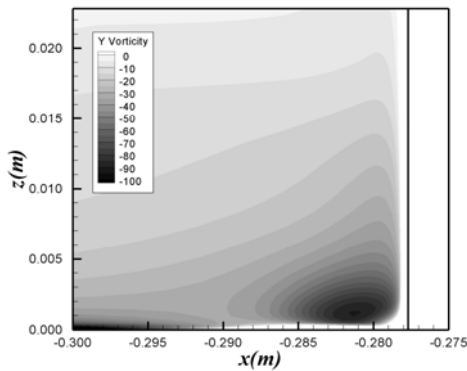


圖9. 翼形柱體前端之渦度分佈圖（網格1）。

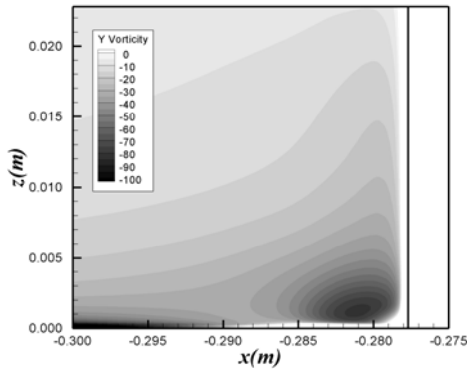


圖10. 翼形柱體前端之渦度分佈圖（網格5）。

表6. 翼形柱體前端渦流強度與網格密度之關係

網格編號	總網格數	主渦流之最大渦度( $\omega_y$ )	差距
1	43 萬	90.467	10.22%
2	102 萬	86.887	5.86%
3	200 萬	84.608	3.08%
4	346 萬	83.136	1.29%
5	549 萬	82.081	-

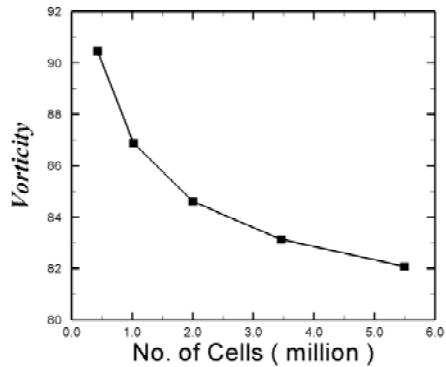


圖11. 翼形柱體前端接面渦流與網格密度之關係。

雖然接面渦流產生於帆罩的前端，但是它對潛艦最主要的危害在於，它會繞過帆罩到達船艙螺槳所在之位置，導致螺槳發出噪音。因此，除了探討帆罩前端的接面渦流流場之外，也有必要研究下游區域的渦流流場。根據 209 型潛艦的幾何外形資料，其螺槳所在位置與帆罩尾緣間的距離約為 2.5 倍的帆罩長度，故在此討論距此翼型柱體尾緣 2.5 倍弦長位置之渦流。圖 12 與圖 13 分別為最粗與最密網格計算所得的渦度分佈圖，這兩張圖為流場之  $X$  剖面圖，圖中的等高線所表示的是  $X$  方向之渦度，其定義為：

$$\omega_x = \frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \quad (8)$$

由於本文採用了內外兩層的計算網格，在計算渦度時，會在兩層網格交界之處產生些許的誤差，導致圖中的等高線有不連續的現象。比較



- 刪除:
- 刪除:
- 格式化: 底線
- 刪除:
- 刪除:
- 刪除:
- 刪除:
- 刪除:
- 刪除:

兩者的計算結果，可以發現最密網格（圖 13）計算所得的高渦度區範圍較大，而最粗網格（圖 12）則僅有一個小區域存在著很高的渦度。利用數值方法分析流場時，會產生數值消散(numerical diffusion)的現象，此現象會影響下游或遠端區域流場的準確度，當網格密度不足時，數值消散的情況將會非常嚴重，導致物理量（如本文的渦度）由中心區域消散至外圍區域。由此可知，在帆罩接面渦流對於螺槳的影響方面，必須採用密度很高的計算網格，以改善數值消散的現象。渦流中心的渦度則如表 7 與圖 14 所示，其特性大致與表 6 類似，比較表 6 與表 7 後可以發現，在數值大小方面，表 7 中的渦度遠低於表 6 中的渦度。為了讓計算結果在未來可以提供相關實驗印證之用，因此本計算例的雷諾數相當低，在這種情況之下，黏性效應相對較高，減弱了螺槳位置處的接面渦流強度。在全尺寸的潛艦流場中，其雷諾數約為本計算例的 800 倍，此時，黏性效應較小，螺槳位置處的接面渦流強度也會比較接近於帆罩前端的渦流強度。

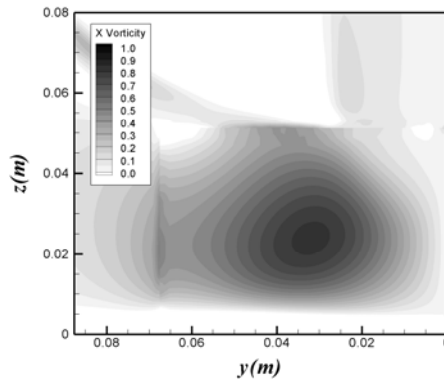


圖13. 翼形柱體後方之渦度分佈圖（網格5）。

表7. 翼形柱體後方渦流強度與網格密度之關係

網格編號	總網格數	主渦流之最大渦度( $\omega_x$ )	差距
1	43 萬	0.9068	10.45%
2	102 萬	0.8722	6.24%
3	200 萬	0.8521	3.79%
4	346 萬	0.8127	-1.01%
5	549 萬	0.8210	-

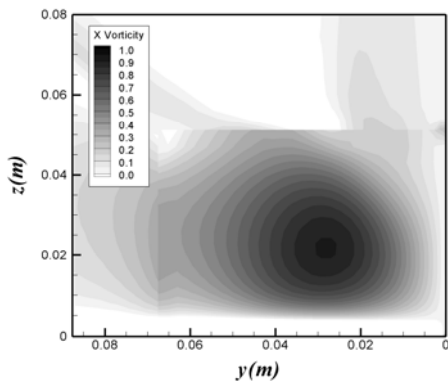


圖12. 翼形柱體後方之渦度分佈圖（網格1）。

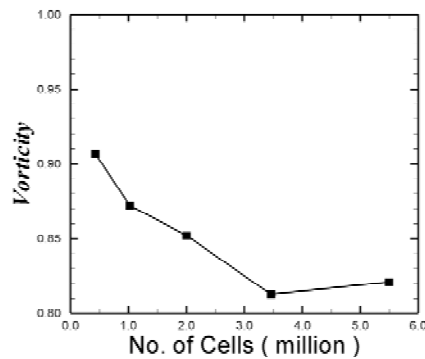


圖14. 翼形柱體後方接面渦流與網格密度之關係。

## 六、潛艦帆罩之接面渦流計算

完成翼形柱體計算與網格密度測試之後，本文參考相關資料，仿製出德國 209-1400 型潛艦的帆罩外形，其幾何外形如圖 15 所示，

主要尺寸如表 8 所列，並且進行全尺寸潛艦帆罩之接面渦流計算。在數值計算網格的建立方面，如圖 16(a)及(b)所示，本文將整個計算域分割成 12 個區塊，分別是區塊 a ~ l。根據圓柱體與翼形柱體的計算經驗，本文採用了總格點數為 200 萬點的計算網格，以進行真實潛艦帆罩外形的接面渦流流場計算。

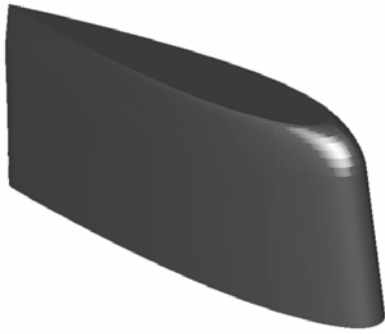


圖 15. 仿德國 209-1400 型潛艦帆罩幾何外形。

表 8. 仿德國 209-1400 型潛艦帆罩之主要尺寸

剖面形狀	NACA0018
帆罩長度( $L$ )	10.4 m
帆罩高度( $H$ )	4.64 m

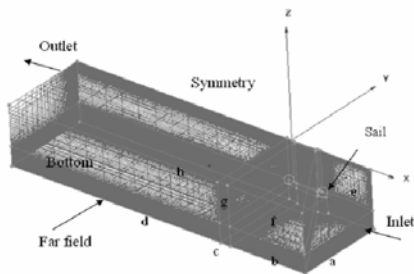


圖 16(a). 帆罩之網格架構 a。

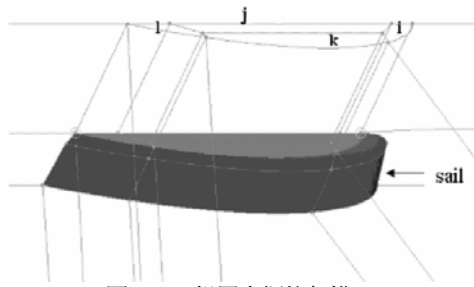


圖 16(b). 帆罩之網格架構 b。

有別於一般商用船舶，軍事艦艇常常需要變換船速與航向，而不會長時間地以固定的速度直線行駛，因此，有必要分析不同船速（入流速度）時的接面渦流流場。根據 209-1400 型潛艦的基本資料，此型潛艦的水下最高船速為 22 節，然而，在與潛艦艦長的討論中，得知潛艦在大部分的時間中，均以 2 ~ 4 節的低速行駛，只有在特殊狀況才會以全速前進。根據上述的資料，本文針對 2 ~ 22 節的入流速度，進行全尺寸潛艦帆罩的接面渦流流場計算。在船速等於 2 與 22 節時，帆罩前端的接面渦流渦度分佈如圖 17 與圖 18 所示，為了方便比較，本節中的物理量已經經過無因次化之處理，在長度方面以帆罩長度( $L$ )為基準，在速度方面則以船速( $U$ )為基準，帆罩的首緣位於圖中  $x/L = 0$  之處。至於不同船速時，主渦流之中心位置與最大渦度值則列於表 9 之中。如本文的前言部份所述，接面渦流是由邊界層內外之速度差所造成，在船速較高時，雷諾數較高且邊界層厚度相對較薄，因此，接面渦流將會略為靠近帆罩之前緣，最大渦度也會比低雷諾數時略高，正如表 9 之中的趨勢所示。

- 刪除:
- 刪除:
- 格式化: 底線
- 刪除:
- 刪除:
- 刪除:
- 刪除:
- 刪除:
- 刪除:
- 刪除:

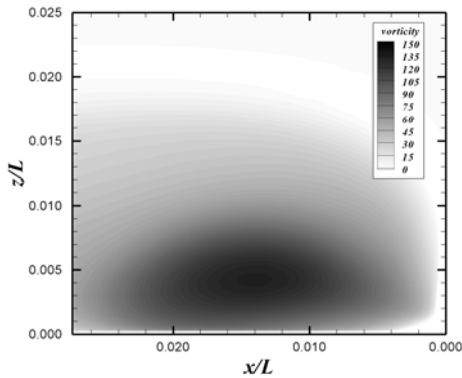


圖17. 船速2節時帆罩介面渦流之渦度分佈。

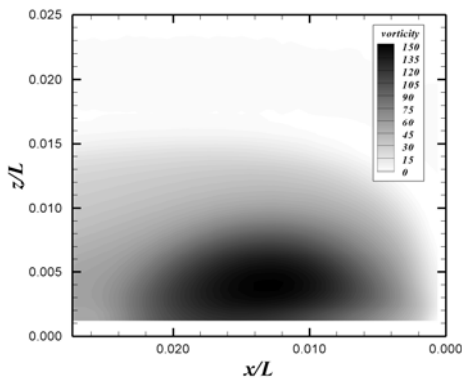


圖18. 船速22節時帆罩介面渦流之渦度分佈。

表9. 不同船速下之渦心位置及最大渦度

入流速度 (節)	主渦流中心 之縱向位置 ( $x/L$ )	主渦流之 最大渦度 ( $\omega_y$ )
2	0.0142	133.012
4	0.0135	138.411
6	0.0135	141.856
8	0.0135	144.738
12	0.0134	147.179
22	0.0126	151.684

## 七、介面渦流消滅機制之研究

由於帆罩所產生的介面渦流會對潛艦的靜音性能造成危害，近年來，許多新型的潛艦都開始採用特定的機制，以消滅帆罩的介面渦流。從表 9 中的數據可以發現，介面渦流之位置與強度對於船速並不敏感，船速從 2 節提升至 22 節時，僅有約 10% 左右的變化。這意味著不需要採用可控制式的介面渦流消滅機制，隨著船速的不同，調整此機制以求達到最好的效果；而是可以藉由固定式的介面渦流消滅機制時，便能夠在所有船速時，都得到不錯的消滅效果。

本文所研究的介面渦流消滅機制，乃是參考美國海狼級(Seawolf)核子動力潛艦其消滅介面渦流之方法，如圖 19 所示，在不改變原本帆罩幾何外型前提下，於帆罩前端設置一導角結構物，藉此讓帆罩前端的流體產生一個向上的速度，以抵消原本的向下速度，達到消滅介面渦流的效果。為了進行量化的研究，本文在帆罩底部加裝一個「斜坡」的構造，其幾何造型如圖 20 所示，並藉由斜坡外罩坡度之調整，來探討其消滅介面渦流之效果。



圖19. 美國海狼級潛艦之帆罩外形[13]。



圖20. 帆罩接面渦旋消滅機制之建立。

根據 209-1400 型潛艦之帆罩外形資料，帆罩前緣之傾斜度為 85 度，在此，本文建立了五個不同坡度的接面渦旋消滅機制，其坡度分別為 30、40、50、60 與 70 度，其幾何外形改變範圍乃局限於帆罩底部 1 m 垂直範圍之內。進行 CFD 計算分析時，計算網格之架構與上節中之網格架構相同，總格點數也是 200 萬點，以船速 4 節作為本節中所有計算例之計算條件。五組消滅機制之帆罩前端渦度分佈圖繪於圖 21 至圖 25，主渦旋之最大渦度列於表 10，從計算結果可知，加裝斜坡能夠有效地消滅接面渦旋，當斜坡之坡度等於 30 與 40 度時（圖 24 與圖 25），已經沒有顯著的接面渦旋存在。根據此計算結果，可以採用 30 ~ 40 度之斜坡，作為潛艦帆罩接面渦旋的消滅機制。

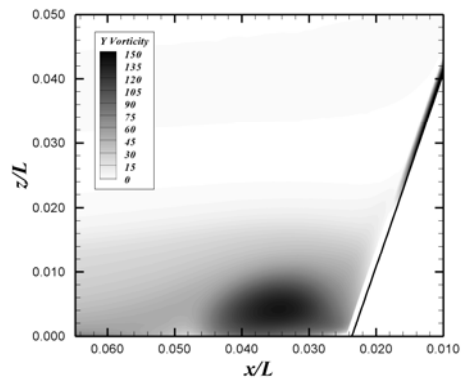


圖 21. 加裝 70 度斜坡之接面渦旋。

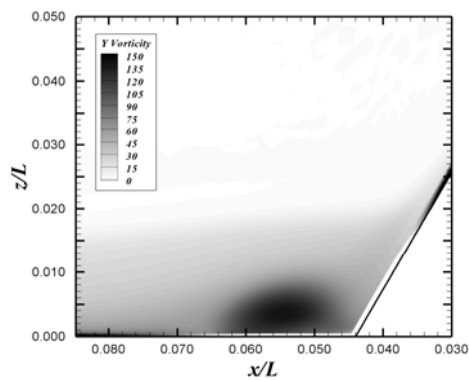


圖22. 加裝60度斜坡之接面渦旋。

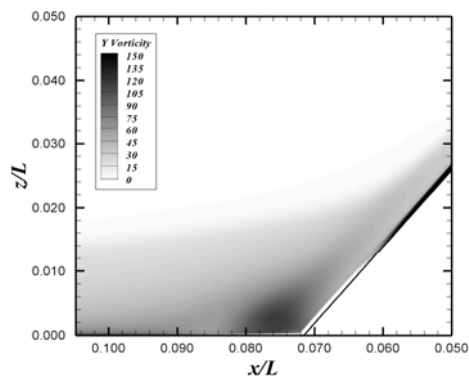


圖23. 加裝50度斜坡之接面渦旋。

- 刪除:
- 刪除:
- 格式化: 底線
- 刪除:
- 刪除:
- 刪除:
- 刪除:
- 刪除:
- 刪除:
- 刪除:

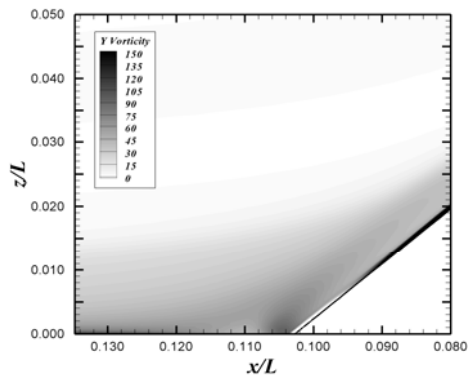


圖24. 加裝40度斜坡之接面渦流。

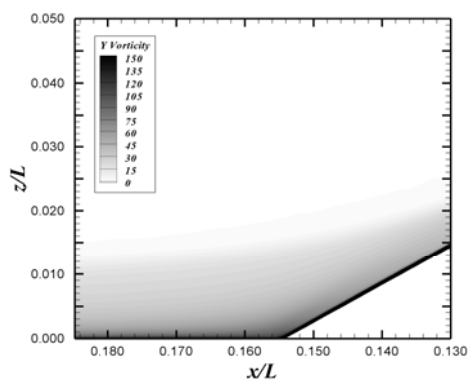


圖25. 加裝30度斜坡之接面渦流。

表10. 不同坡度之渦流消滅效果

坡度 (度)	主渦流之最大渦度( $\omega_v$ )
85	138.411
70	139.335
60	141.045
50	116.393
40	-
30	-

## 八、結論

本文利用計算流體力學方法，研究潛艦帆罩所產生的接面渦流流場。首先，本文計算了圓柱的接面渦流流場，並且與實驗量測結果進行比對，驗證了數值分析結果的正確性。接著，本文針對剖面形狀為 NACA0018 翼形的翼形柱體，進行接面渦流計算，並且利用五組密度不同的數值計算網格，探討網格密度對於數值計算結果的影響，並且評估能夠準確預測接面渦流所需要的網格密度。

完成以上兩個基礎研究之後，本文仿製出德國 209-1400 型柴油動力潛艦的帆罩，並且針對不同的船速，進行全尺寸帆罩的接面渦流流場計算，從計算結果中發現，船速並不會對接面渦流之位置與強度造成巨大的影響，不同船速間的差距約為 10%。最後，本文研究了接面渦流的消滅機制，透過在帆罩底部加裝斜坡，以減低接面渦流之強度。在五組不同坡度的計算結果中，發現採用 30 ~ 40 度的斜坡，能夠得到最佳的效果。

## 致謝

本研究承蒙行政院國家科學委員會提供相關之研究經費，計劃編號為 NSC 91-2611-E-002-004。

## 參考文獻

- [1] Praisner, T. J., Investigation of Turbulent Juncture Flow Endwall Heat Transfer and Flow Field, Ph. D. Thesis, Lehigh University, 1998.

- [2] Baker, C. J., "The Laminar Horseshoe Vortex," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 95, Part 2, pp.347-367, 1979.
- [3] Menna, J. D. and Pierce, F. J., "The Mean Flow Structure Around and Within a Turbulent Junction or Horseshoe Vortex, Part I: The Upstream and Surrounding Three-Dimensional Boundary Layer," *ASME, Transactions, Journal of Fluids Engineering*, Vol. 110, pp. 406-414, 1998.
- [4] Pierce, F. J. and Harsh, M. D., "The Mean Flow Structure Around and Within a Turbulent Junction or Horseshoe Vortex, Part II: The Separated and Junction Vortex Flow," *ASME, Transactions, Journal of Fluids Engineering*, Vol. 110, pp. 415-423, 1998.
- [5] Graf, W. H. and Yulistiyanto, B., "Experiments on Flow around a Cylinder; the Velocity and Vorticity Fields," *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 36, No. 4, pp.637-653, 1998.
- [6] Steenaert, C. B., van Oudheusden, B. W., and Boermans, L. M. M., "Simplified Design Method for a Symmetrical Wing-Body Fairing," *Proceedings of The International Council of the Aeronautical Sciences (ICAS)*, Toronto, Canada, 2002.
- [7] Hung, C. M., Sung, C. H., and Chen, C. L., "Computation of Saddle Point of Attachment," *AIAA Journal*, Vol. 30, No. 6, pp. 1561-1569, 1992.
- [8] 郭真祥、簡鴻斌、陳彥均、趙修武，"潛艦幾何外形與流場特性之基礎研究"，*中正嶺學報*，第 32 卷，第 2 期，第 209-220 頁，2004。
- [9] 黃正利、蔡進發、陳紀川，翼端渦流流場數值解析，NTU-NAOE Tech. Report 677，2001。
- [10] Pantankar, S. V., Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Hemisphere Publishing, 1980.
- [11] Chau, S. W., Kouh, J. S., and Chen, Y. J., "Speed-Up of CFD for Marine Industry Using PC-Cluster," *Proceedings of New S-Tech*, Kobe, Japan, 2002.
- [12] 丁肇隆、蔡進發，"潛體含帆罩之流場量測解析(2/3)"，*國家科學委員會專題研究計劃報告*，NSC92-2611-E-002-012-，2004。
- [13] United States Navy, <http://www.chinfo.navy.mil/navpalib/ships/submarines/seawolf/seawolf1.html>, 1996.