

潛艦幾何外形與流場特性之基礎研究

郭真祥* 陳彥均* 簡鴻斌* 趙修武**

*台灣大學工程科學及海洋工程學研究所

**中原大學機械工程學系

摘 要

本文研究了一艘真實柴油潛艦的幾何外形與其流場特性，首先仿製出德國 209-1400 型潛艦（含帆罩與控制翼）之三維幾何外形，並利用計算流體力學方法研究此潛艦之流場，分別針對實船尺寸與模型尺寸雷諾數，進行仿德國 209 型潛艦之穩態紊流場計算。從計算所得的結果，本文針對與潛艦性能相關的幾個重要課題加以分析，其中包含了潛艦之阻力成份、不同雷諾數下的形狀因子、潛艦帆罩對阻力之影響、潛艦螺旋槳跡流、潛艦帆罩之接面渦漩等，本文並且進一步探討能夠改善潛艦相關性能的方法，以便因應未來開發先進潛艦之相關關鍵性技術之需求。

關鍵字：潛艦，實船尺寸雷諾數，形狀因子，接面渦漩

Preliminary Study on Submarine's Geometry and Flow Characteristics

Jen-Shiang Kouh*, Yen-Jen Chen*, Hung-Pin Chien*, and Shiu-Wu Chau**

**Institute of Engineering Science and Ocean Engineering, National Taiwan University*

***Department of Mechanical Engineering, Chung Yuan Christian University*

ABSTRACT

The geometry and flow characteristics of a practical diesel submarine are studied in this paper. First, the 3D geometry of Germany type 209-1400 submarine, including its sail and control fins, is imitated. Furthermore, computational fluid dynamics method is applied to analyze the flow around the submarine. The steady turbulent flow is computed at both model-scale and full-scale Reynolds numbers. According to the CFD results, several important topics, such as the resistance components, the form factor at different Reynolds numbers, the influence of the sail on the submarine's resistance, the propeller wake, and the juncture vortex induced by the sail, are investigated. The strategies of performance improvement are also discussed. This will be helpful for developing key technologies of modern submarine in the future.

Keywords: submarine, full-scale Reynolds number, form factor, juncture vortex

文稿收件日期 92.8.14;文稿修正後以短文接受日期 93.1.13.

Manuscript received Aug. 14, 2003; revised as short paper Jan. 13, 2004.

**通訊作者 chau@cycu.edu.tw

**Corresponding author chau@cycu.edu.tw

一、前言

由於台灣過去並無實際設計與建造潛艦之經驗，基於國艦國造之理念，以及受到向美國採購潛艦政策之衝擊，相關設計之能力、知識與資料之建立，自有其重要性與急迫性。潛艦許多部份的幾何外形都對其性能有顯著的影響，例如船體幾何外形與潛艦阻力、螺槳幾何外形與潛艦噪音等等之間都有密切的關係，然而國外先進潛艦在這些部分的詳細幾何外形資料，以及藉由調整幾何外形以改善潛艦性能的相關技術，幾乎皆屬軍事機密，無法取得其詳細的內容，再加上國內過去缺乏深入的研究，所以對於潛艦許多關鍵技術之突破造成極大的障礙，因此本文利用計算流體力學 (CFD) 之方法，針對一艘實際的柴油潛艦，進行潛艦黏性流場之計算，建立潛艦幾何外形與流場特性的基礎知識，以便未來進行相關性能的改善工作。

在考慮我國海軍之作戰需求與台灣海峽之地形後，本文決定採用德國 209-1400 型柴油動力潛艦做為研究之對象。二次世界大戰之後，德國於 1962 年發展出 205 型潛艦，並於 1971 年開發出 206 型與 209 型潛艦，其中 209 型潛艦成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。近年，德國開發出最新的 212 型與 214 型潛艦，預計將會在 2003 年底之後，陸續汰換在德國海軍中服役的 209 型潛艦。

二、潛艦之幾何外形

德國 209 型潛艦曾先後進行數次改良，且針對各國之特殊作戰需求略加調整，因此在某些幾何外形參數之數值 (如船長、排水量等) 上並不統一，本文依據所蒐集到的潛艦構造圖 (圖 1) 等資料，建立出一艘仿 209-1400 型潛艦之三維幾何外形 (圖 2)，其主要尺寸如表一所示。

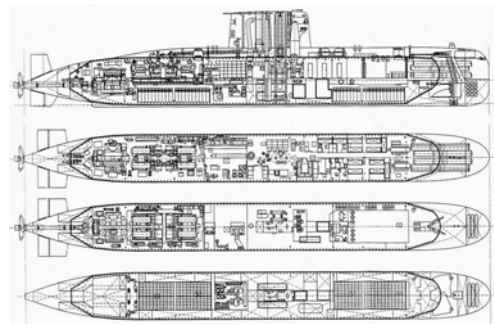


圖1. 德國209-1400型潛艦之構造圖。

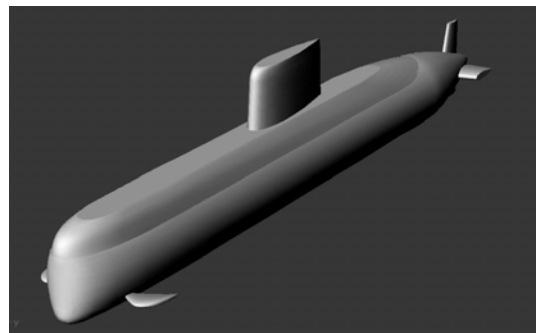


圖2. 仿製之德國209-1400型潛艦。

表一 仿德國209-1400型潛艦之主要尺寸。

全長 (L)	60.08 m
全寬 (B)	6.20 m
全高 (H)	11.75 m
排水體積 (∇)	1789.26 m ³
浸水表面積 (S)	1295.45 m ²

在潛艦的船體部分，其幾何外形主要是受到壓力殼之限制，一般柴油潛艦大多採用圓筒型的壓力殼，並將平衡水櫃等裝備安置於壓力殼的上方，因此柴油潛艦的橫剖面大多呈現圓形。德國 209 型潛艦內部具有一個直徑為 6.2 公尺的壓力殼，依此便可以建立仿 209 型潛艦的船體中段，再依據構造圖中的輪廓，仿製出船體前段、艉段與上層船體，便可以得到完整的仿 209 型潛艦船體。

在潛艦帆罩部分，在本文所蒐集的資料中，雖然沒有 209-1400 型潛艦帆罩的剖面形狀，然而從 205 型潛艦的構造圖中，發現 205 型潛艦帆罩的剖面形狀與二維 NACA 翼形接近，所以推斷 209-1400 型潛艦之帆罩斷面應該也是 NACA 翼形，因此本文選用 NACA 0018 翼形建構潛艦帆罩。

在船艙控制翼、水平舵與垂直舵的部分，本文也是採用 NACA 0018 翼形，並且依據構造圖中的輪廓建立其外形。潛艦所使用的控制翼有兩種，其中一種位於船艙處，且控制翼能夠收藏於船體之內，其主要功能是提供潛艦俯仰運動時所需要的力矩。另一種控制翼位於帆罩上，且不具有收藏的機制，此種控制翼可以提供適當的垂向力，平衡潛艦之重力與浮力。209 型潛艦具有一組船艙控制翼，與其他潛艦之船艙控制翼所不同的是，其幾何外形並非傳統的三維翼，反而比較類似魚類的胸鰭，從同系列德國潛艦的船艙控制翼更可以發現其演進過程，漸漸地從三維翼改變至魚鰭狀，這種船艙控制翼是此系列潛艦的一大特點，其優點不明，值得進一步研究。

至於螺槳方面，由於螺槳對於潛艦的匿蹤性能有極為重要的影響，因此各國均將潛艦螺槳之幾何外形與相關技術列為最高機密，無法從一般管道取得其資料，針對 209 型潛艦所採

用的七葉高歪斜螺槳，本文並沒有蒐集到足夠的參考資料，無法進行螺槳的仿製工作，因此沒有將螺槳幾何外形的相關問題列入本文的討論範圍。

三、潛艦流場計算

本文使用 CFD 之方法分析潛艦周圍之黏性流場，研究潛艦幾何外形與潛艦流場特性之關係，並且探討藉由調整幾何外形以改善流場特性的方法。本文採用泛用 CFD 軟體 *Comet* 進行潛艦流場之計算模擬，此軟體是由 Institute of Computational Continuum Mechanics GmbH (ICCM) 所開發，此軟體藉由求解 Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS) 方程組來模擬潛艦之穩態紊流場，以有限體積法 (FVM) 進行數值離散工作，並透過 Simple 法 [1] 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 $k-\epsilon$ 模型。

由於本文將進行實船尺寸諾數之潛艦流場計算，在實船尺寸雷諾數之下，潛艦表面的邊界層厚度遠比船模尺寸時更薄，需要更密的網格方能正確地捕捉其流場特性，以現今個人電腦之計算能力與記憶體容量，單一的個人電腦難以負荷如此複雜之計算模擬。近年來個人電腦叢集被廣泛地運用於科學計算上，以其低廉的價格與強大的運算能力，在某種研究領域上能夠降低吾人對於超級電腦的依賴。在個人電腦叢集與平行計算方面，我國之高速電腦中心曾對於個人電腦叢集進行一系列之研究 [2][3]，趙修武等人 [4][5] 也曾對個人電腦叢集在船舶流場計算上進行研究。本文在一組由 16 個節點所組成的個人電腦叢集上進行潛艦之流場解析，根據測試結果 [5]，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、潛艦之阻力性能

4.1 潛艦之總阻力

本文建立了四組不同密度的網格，進行仿德國 209-1400 型潛艦（含帆罩與控制翼）的流場計算，如圖 3 所示，數值網格採用了「子彈型」的計算域。在中央對稱面上，潛艦前方為 C 型網格，潛艦後方則是 H 型網格，至於潛艦表面的網格則如圖 4 所示。四組網格的網格點總數為 66 萬、100 萬、200 萬以及 400 萬點，分別進行了實船尺寸與模型尺寸（縮小比例為 1/15）之流場計算，計算條件如表二所示。以這四組網格所計算出的潛艦總阻力係數（ C_T ）列於表三，在模型尺寸狀態下，隨著網格點由 66 萬點增加至 400 萬點，總阻力係數呈現震盪的情況，這表示本文所使用的計算網格已經具有足夠的密度，能夠捕捉相關的物理現象，因此總阻力係數達到「收斂」的狀態，不會隨著網格點密度的增加而有明顯的改善。至於實船尺寸部分，由於邊界層之厚度會隨著雷諾數之增加而變薄，因此在計算實船尺寸之流場時，將會需要更密的計算網格，才能得到與模型尺寸相同品質之計算結果，所以表三之中除了最粗糙的網格（66 萬點）之外，隨著網格點密度的增加，計算所得之總阻力係數呈現持續下降的趨勢，而沒有像模型尺寸一樣，呈現「收斂」的情況。若要計算出「收斂」的實船尺寸阻力，必須再度大幅度地增加網格密度，然而受到相關計算資源的限制，無法進行此項工作，因此本文採用 Richardson 外插法[6]來預估實船尺寸之網格獨立解（Grid Independent Solution），即網格點密度趨近於無限密之計算值，其計算結

果如表三中所示。

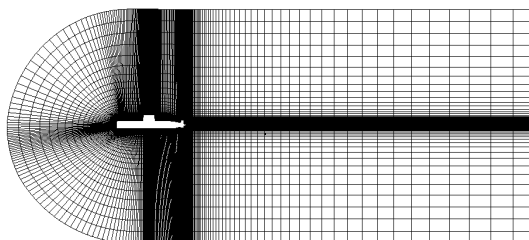


圖3. 潛艦周圍之網格分佈。



圖4. 潛艦表面之網格分佈。

表二 潛艦之流場計算條件。

	模型尺寸	實船尺寸
船長 (L)	4.00 m	60.08 m
船速 (U)	1.00 m/s	11.32 m/s (22 knots)
雷諾數 (Re)	4.00×10^6	6.79×10^8

表三 不同網格計算所得之潛艦總阻力係數。

網格點總數	模型尺寸	實船尺寸
66 萬	4.83×10^{-3}	2.77×10^{-3}
100 萬	4.93×10^{-3}	2.80×10^{-3}
200 萬	4.87×10^{-3}	2.70×10^{-3}
400 萬	5.02×10^{-3}	2.67×10^{-3}
網格獨立解	N/A	2.66×10^{-3}

4.2 阻力分量與形狀因子

完成潛艦的阻力計算之後，本文接著探討形狀因子 (form factor, k) 的相關問題，當 ITTC

於 1987 年訂定船模試驗準則之時，假設形狀因子只與船舶的幾何外形有關，並不會受到雷諾數的影響，然而近年來有許多研究卻提出不同的看法，所謂的形狀因子便是壓力與摩擦力兩者的比值，理論上，當雷諾數增加時，壓力項的比重也會隨著升高，因此對於一般船舶而言，實船尺寸的形狀因子應該會比模型尺寸更大。Bruzzone 等人[7]的實驗顯示形狀因子的確會受到雷諾數的影響，在某些範圍中，形狀因子隨著雷諾數的增加而增加，但在某些範圍則相反；Kasahara 與 Masuda [8]的實驗中發現，當船模長度大於七公尺時，形狀因子隨著雷諾數的增加而增加，當船模長度小於七公尺時，則量測到相反的結果。除了以實驗方法所進行的研究之外，Gothenburg 2000 研討會中，八個研究單位利用 CFD 方法計算一艘 Kriso VLCC 在實船尺寸與模型尺寸的流場，在形狀因子的問題上，八個研究單位有一致的計算結果，都顯示實船尺寸的形狀因子較大。基於以上的研究結果，在第 22 屆 ITTC 會議的報告中，阻力委員會確認了形狀因子的確會受到雷諾數的影響，至於形狀因子與雷諾數之明確關係，則有待進一步的研究才能確定。

在本文中，主要針對最密網格（400 萬點）計算所得的潛艦阻力進行分析，在模型尺寸與實船尺寸下，潛艦表面所受到之壓力與摩擦力佔總阻力的百分比列於表四，在模型尺寸中，摩擦力佔有極大的比例，但是隨著雷諾數的增加，壓力所扮演的角色也會愈來愈重要，因此在實船尺寸中，壓力項佔潛艦總阻力的比例提升至四成，與流體力學理論相符。如表五所示，利用 ITTC 1957 的平板摩擦阻力公式，即可算出德國 209 型潛艦的形狀因子，在實船尺寸與模型尺寸的狀態下，其形狀因子分別為 0.66 與 0.42，與一般商船之結果相較其值大了不少，唯實船尺寸的形狀因子大於模型尺寸，此一趨

勢也與前述的研究吻合。

表四 模型與實船尺寸狀態下之阻力分量比較。

阻力分量	模型尺寸	實船尺寸
壓力	26.39%	40.00%
摩擦力	73.61%	60.00%

表五 仿德國 209 型潛艦之形狀因子。

	模型尺寸	實船尺寸
總阻力係數 (C_T)	5.02×10^{-3}	2.67×10^{-3}
平板摩擦係數 (C_{FP})	3.54×10^{-3}	1.61×10^{-3}
形狀因子 (k)	0.42	0.66

4.3 帆罩對潛艦阻力之影響

現今的歐美潛艦大多使用直筒式帆罩，帆罩的剖面形狀則是採用傳統的二維翼形，此種帆罩在歐美國家已經沿用五十年以上，在外形上並沒有重大的改變。過去之所以使用此種形式的帆罩，應是受限於流體力學的分析技術，無法在設計過程中，將潛艦船體與帆罩一起分析，因此將帆罩視為一個獨立的物件，單獨設計並分析其流力性能。然而就流體力學之觀點，這種直筒式的帆罩並不是良好的設計，根據 CFD 的計算結果，仿德國 209 型潛艦在全速（22 節）航行時，其潛艦表面的壓力分佈如圖 5 中所示，船體與帆罩前緣會因為停滯點而產生高壓區，是船形阻力的兩個主要來源。對於仿 209 型潛艦為言，雖然帆罩之表面積只佔了潛艦總浸水面積的 8.84%，但是在本文的計算結果中，當潛艦全速航行之時，帆罩所造成的船形阻力佔總船形阻力的 12.71%，是一個必須重視的阻力成分。

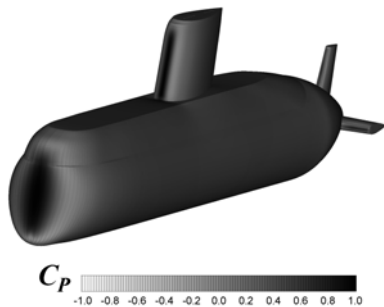


圖5. 仿德國209型潛艦表面壓力分佈（實船尺寸）。

如上段所述，帆罩的形狀阻力是潛艦阻力重要成分之一，因此潛艦船身與帆罩兩者外形之整合設計具有高度的重要性，例如前蘇聯於1970年所發展之705型Lira潛艦（北約之代號為Alfa級），此潛艦之帆罩外形即與直筒型帆罩有所的差異，應是經過整合而設計出的帆罩外形（圖6），Lira潛艦在水下的最高航速可達42節，大幅超越同期之歐美潛艦（約20~30節），由此再度印證帆罩外形在潛艦阻力性能上的確具有重要的地位。此外，美國近年來所進行的先進帆罩開發計劃，也是基於相同的理由，要捨棄傳統的直筒式帆罩，透過帆罩與船體的整合分析與設計，並利用CFD技術進行最佳化，發展出一種新型的潛艦帆罩（圖7），以降低潛艦之航行阻力，此新型帆罩預計將從2005年開始，實際應用於新型的維吉尼亞級（Virginia）核動力潛艦之上。對於我國而言，由於台灣海峽的地形並不適合大型潛艦活動，因此較小型的潛艦（例如本文所研究的德國209型潛艦）比較能夠我國的需求。然而相對於核動力潛艦，一般柴油潛艦的體積較小，帆罩在整體比例上也相對較大，以209型潛艦為例，其帆罩的高度為4.43公尺，佔全高的37.67%，帆罩所導致的船形阻力會在小型潛艦中比較顯著，因此在減低潛艦阻力的方面，藉由帆罩外形最佳化來減低船形阻力是一個值得研究投入

的項目。



圖6. 前蘇聯Lira潛艦（Alfa級）帆罩之外形。



圖7. 美國之先進潛艦帆罩之外形。

五、潛艦之靜音性能

5.1 潛艦噪音簡介

對於一般的商船而言，阻力推進性能對於其獲利能力有直接的影響，是最受到重視的性能項目之一，至於船舶的噪音，則只會影響到船員的舒適性，屬於比較次要的項目。然而對於潛艦則正好相反，潛艦最重要的是其匿蹤性能，因此必須十分嚴格地控制其噪音，而且為了達到靜音的目的，並不會發揮潛艦的最佳推進能力。舉歐系的柴油潛艦為例，雖然最高航速均在20節（10.29 m/s）以上，然而為了顧及潛艦的靜音性能與電瓶的蓄電量，其巡航速度大多設定在4~8節（2.06~4.12 m/s）之間。在與具有實務經驗的潛艦艦長討論中，也獲知相同的資訊，在一般的狀態之下，我國現有的潛艦多以約4節的低速航行，絕大多數的時間

中，均不會以其最高速度行駛。

在潛艦的噪音之中，除了潛艦內部相關機械設備運轉所發出的噪音之外，因為流體所引發的噪音也是不可忽視的一項成分，此項噪音主要有兩大部分，其一是由螺槳的葉端渦漩(tip vortex)所引發的噪音，另一個則是螺槳在螺槳跡流中運轉所造成的振動噪音。螺槳的葉端渦漩噪音與螺槳的幾何外形有極大的關係，由於本文並未蒐集到詳細的 209 型潛艦螺槳資料，尚無法進行進一步相關的研究，因此只討論螺槳的振動噪音部分。

5.2 潛艦之艦跡流

艦跡流是一個重要的船舶流場特性，它對於螺槳的許多流體動力性能有密不可分的影響，對於潛艦螺槳的振動噪音也是如此。由於潛艦本身並非一個十足的軸對稱體，流體通過潛艦船體之後，會產生一個不均勻的艦跡流，螺槳在這個不均勻的跡流中運轉時，當螺槳葉片轉動到不同角度時，葉片表面的壓力也會隨著變化，這個不穩定的壓力便會造成螺槳葉片的振動，進一步引起噪音。因此對於潛艦而言，螺槳跡流是一個重要的指標，可以用來評估潛艦的靜音性能。然而由於雷諾數對於船舶的跡流有不可忽視的影響，就本文所研究的仿 209 型潛艦而言，在實船尺寸與模型尺寸雷諾數之下，由 CFD 計算所得的中央對稱面軸向速度分布繪於圖 8 與圖 9 之中，比較二者的計算結果可知，在潛艦後方的跡流區中有很明顯的差別。在實船尺寸狀態下，由於雷諾數較高，黏性效應較弱，所以船體後方的低速區較小，不像模型尺寸狀態下，會在船體及帆罩後方，產生一個明顯且大範圍的低速區。

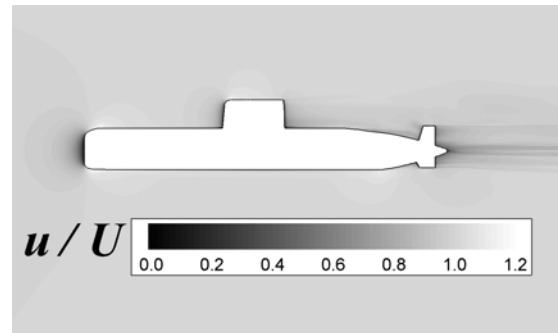


圖8. 仿德國209型潛艦中央對稱面軸向速度分佈。
(實船尺寸)

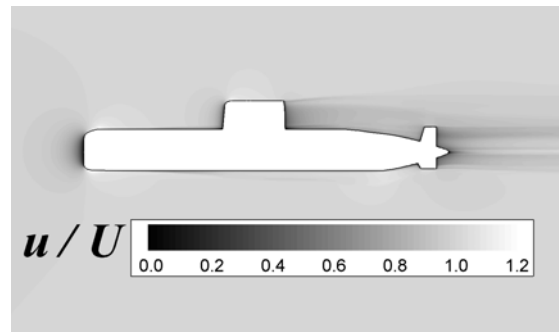


圖9. 仿德國209型潛艦中央對稱面軸向速度分佈。
(模型尺寸)

至於螺槳平面的軸向速度，則如圖 10 所示，受到潛艦船體的影響，在中央區域的流速較低，而且因為螺槳平面前方的水平舵與垂直舵，所以會出現十字型的跡流形式。比較實船尺寸與模型尺寸下的計算結果，可以發現在螺槳半徑(圖中虛線)內部，實船尺寸的螺槳跡流在角度方向較不均勻，圖 11 是潛艦螺槳葉端($r/R = 1.0$)的圓形中，不同角度的軸向速度分佈，圖中也可以看出在實船尺寸下，軸向速度在不同角度時有較大的變化，這代表當螺槳葉片轉動至不同角度時，葉片表面的壓力變化也將會較大，螺槳的振動噪音也會略大於模型尺寸之情形。

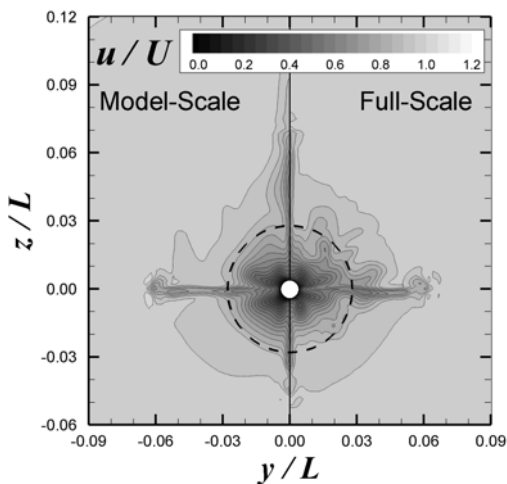


圖10. 仿德國209型潛艦螺槳平面之軸向流速分布。

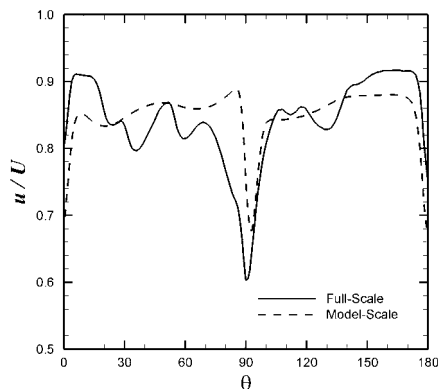


圖11. 德國209型潛艦螺槳平面之軸向流速分布。

5.3 潛艦帆罩之渦旋流場特性

除了上述的螺槳跡流外，當潛艦相關附屬物所造成的渦旋進入螺槳區域時，也會造成螺槳的振動噪音，此部分以潛艦帆罩所引發的渦旋最為重要。基本上，潛艦帆罩是一個凸出於船體外的物體，當流體通過這種凸出物時，會產生複雜的渦旋流場，稱為髮簪形渦旋(hairpin vortex)，從圖 12 中 Tufo 等人[9]針對半球形凸出物的 CFD 計算結果便可看出，潛艦帆罩等凸出物會對後方的流場，造成很大的影響。髮簪

形渦旋是由兩個部分所組成，第一個部分是流體繞過凸出物上方所造成的垂向渦旋，然而由於柴油潛艦的帆罩頂端與螺槳之間具有一定的垂向距離，舉 209 型潛艦為例，兩者的垂向距離約為 5.85 公尺，因此這個垂向渦旋並不會對潛艦螺槳造成太大的影響。至於另一個渦旋則是發生於帆罩與船體之間的連接點前方，稱為接面渦旋(juncture vortex)，由於此渦旋發生於船體表面，因此容易流入螺槳區域，是造成螺槳噪音的一個重要因素。

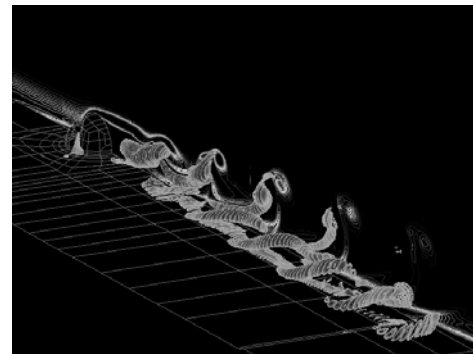


圖12. 半球形凸出物後方之髮簪形渦旋[9]。

接面渦旋的發生機制如圖 13 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，並且產生一個渦旋，這就是接面渦旋。接面渦旋在障礙物的前方產生後，會由兩側繞過障礙物，因為其移動路徑接近馬蹄鐵之形狀，所以也稱為馬蹄形渦旋(horseshoe vortex)。根據 Praisner [10]的量測結果，接面渦旋的架構如圖 14 所

示，除了一個主要的渦漩之外，還會在主要渦漩的前方，產生次要的渦漩結構。

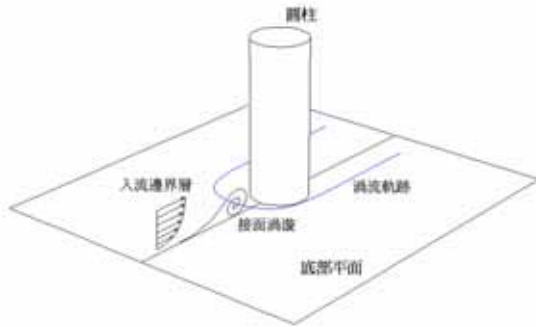


圖13. 接面渦漩的發生機制。

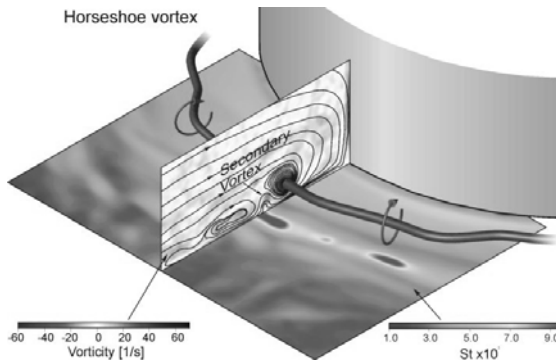


圖14. 實驗量測所得之接面渦漩架構[10]。

5.4 潛艦帆罩之接面渦漩

在本文的潛艦流場計算結果中，也能夠看出潛艦帆罩接面渦漩的存在，實船尺寸與模型尺寸下的接面渦漩分別繪於圖 15 與圖 16，圖中右側是潛艦帆罩，底部是潛艦船體，圖中所繪的是中央對稱面上之速度向量。根據三維翼葉端渦漩的數值計算經驗[11]，在渦漩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。由於接面渦漩在空間上的尺寸極小，即使本文使用了 400 萬點的計算網格，仍然無法在接面渦漩內分佈足夠的網格點，在主要渦漩中，每一個座標軸方向上的網格點不到 10 點，

因此本文只能對接面渦漩進行定性上的探討，無法進行定量分析。在本文的計算結果之中，除了主要渦漩之外，在其前方也可以約略看出次要渦漩的存在，與實驗量測所得[10]的接面渦漩架構大致相符。由於接面渦漩是由於邊界層效應所引起，因此雷諾數對於接面渦漩將會有所影響，比較圖 15 與圖 16 可以發現，在實船尺寸（高雷諾數）下接面渦漩的尺寸略小，這因為接面渦漩是由邊界層內外的速度差所引起，在高雷諾數時邊界層的厚度較薄，接面渦漩的尺寸自然也較小。在本文的計算結果之中，並沒有發現圖 14 中次要渦漩的存在，造成這種結果的主要原因有二：首先，文獻[10]所量測的雷諾數極低，僅在 $10^3 \sim 10^5$ 的範圍之內，因此會產生較明顯的次要渦漩。其次，次要渦漩的尺寸遠較主要渦漩更小，因此，需要極密的網格才能夠解析次要渦漩，以本文所採用的網格密度，並無法升任此一工作。

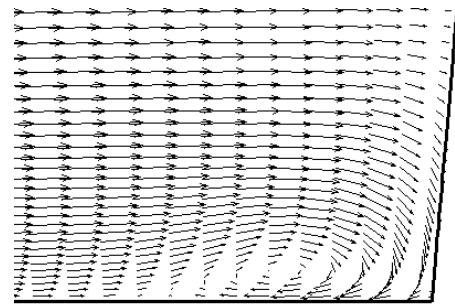


圖15. 潛艦帆罩之接面渦漩（實船尺寸）。

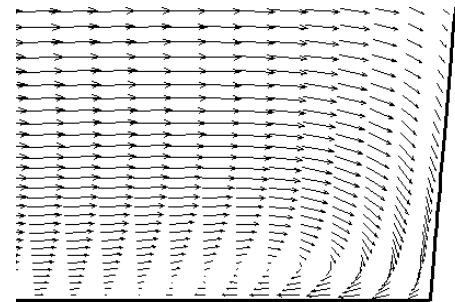


圖16. 潛艦帆罩之接面渦漩（模型尺寸）。

5.5 界面渦漩之抑制

至於潛艦帆罩界面渦漩的抑制，由於界面渦漩是由帆罩前方流體的向下速度所造成，因此可以對潛艦帆罩與船體連接處進行圓角化，在帆罩前緣產生一個「斜坡」，藉此讓流體產生一個向上的速度，抵銷原本的向下速度。在圖 17 中，美國海狼級 (Seawolf) 核動力潛艦便是利用此一方法，在不變更原有直筒形帆罩的前提下，改善了界面渦漩的強度。至於前述的美國先進帆罩計劃 (圖 7)，其帆罩前端呈現傾斜狀，這也是為了利用相同的原理，消除帆罩的界面渦漩。



圖 17. 美國海狼級潛艦之帆罩前緣圓角化。

在此，本文將測試上述的「斜坡」機構，在改善潛艦帆罩界面渦漩上的效果。首先，本文進行了簡化的潛艦帆罩流場解析，忽略潛艦船體之影響，只考慮一個安裝於平板之上的全尺寸潛艦帆罩，並以 200 萬點的數值網格計算，進行船速 4 節時的流場計算，此狀態下的界面渦漩如圖 18 所示。為了得到較好的顯示效果，在圖 18 之中，僅繪出 1/4 網格點的速度向量，因此，在網格密度方面，已經能夠達到文獻[11]中的要求。在未裝設斜坡之前，原始 209 潛艦帆罩與底面之夾角為 85 度，本文在帆罩底部加裝一個 30 度之斜坡，加裝斜坡後的流場如圖 19 所示，在此圖中已經沒有界面渦漩，由此

可見，這種斜坡機構的確能夠消除界面渦漩。

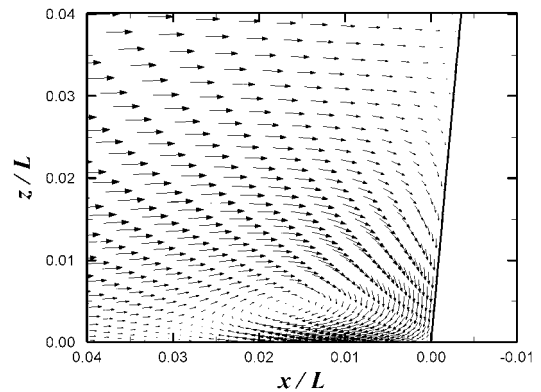


圖 18. 單獨潛艦帆罩之界面渦漩。

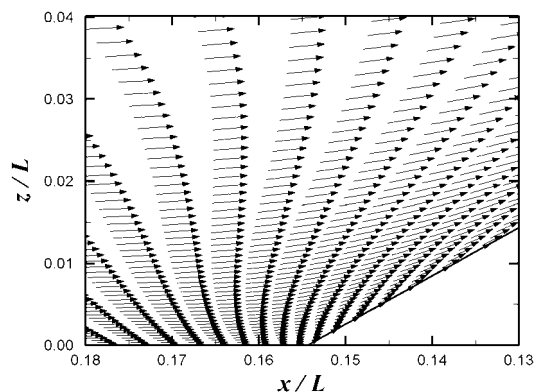


圖 19. 加裝 30 度斜坡之潛艦帆罩界面渦漩。

六、結論

本文進行了潛艦幾何外形與流場特性的相關研究，首先針對德國 209 型與其同系列柴油潛艦的構造圖，仿製出 209 型潛艦含帆罩與控制翼的幾何外形，並進一步利用 CFD 方法研究潛艦之穩態紊流場，分別計算仿 209 型潛艦在模型尺寸與實船尺寸雷諾數下的流場特性。

在潛艦阻力性能方面，本文發現在實船尺寸雷諾數下，潛艦的形狀因子較模型尺寸下之值大，此外，帆罩對於柴油潛艦的阻力具有一

定程度的影響，可以藉由調整帆罩外形來降低阻力。在潛艦的靜音性能方面，本文發現實船尺寸下的艇跡流較模型尺寸下更不均勻，更不利於螺槳振動噪音的降低。至於潛艦帆罩所造成的渦漩流場方面，本文計算所得的接面渦漩結構大致與實驗量測結果相符，在雷諾數對接面渦漩的影響上，實船尺寸雷諾數狀態下，接面渦漩的尺寸將會較模型尺寸時更小。在帆罩接面渦漩的抑制上，於帆罩底部加裝 30 度的斜坡，將會具有良好的效果。

柒、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。

捌、參考文獻

- [1] Pantankar, S. V., Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Hemisphere Publishing, Washington, D.C., 1980.
- [2] Chang, H. Y., Tsai, J. J., Shen, C. Y., Huang, K. C., and Chou, C. Y., "The Use of PC Cluster in Scientific Computing," Proc. 6th National Conference on Computational Fluid Dynamics, Tai-Tung, 1999.
- [3] 周朝宜、黃國展、鄭守成、張西亞，"高效能電腦叢集在計算流力的應用"，第八屆全國計算流體力學學術研討會，宜蘭，2000。
- [4] Chau, S. W., Chen, Y. J., and Kouh, J. S., "Parallelization of a RANS Code for Computing Hydrofoil Flows on a PC-Based System," Proc. 7th National Conference on Computational Fluid Dynamics, Ping-Tung, 2000.
- [5] Chau, S. W., Kouh, J. S., and Chen, Y. J., "Speed-Up of CFD for Marine Industry Using PC-Cluster," Proc. New S-Tech, Kobe, Japan, 2002.
- [6] Richardson, L. F., "The Approximate Arithmetical Solution by Finite Differences of Physical Problems Involving Differential Equations with an Application to the Stresses in a Masonry Dam," Transaction of Royal Society London Series A, Vol. 210, pp. 307-357, 1910.
- [7] Bruzzone, D., Cassella, P., Miranda, S., Pensa, C., and Zotti, I., "The Form Factor by Means of Multiple Geosim Model Tests," Proc. NAV'97, International Conference on Ships and Marine Research, Sorrento, Italy, 1997.
- [8] Kasahara, Y. and Masuda, S., "Verification of Simulated Flow Field around Ships by Using CFD Code," Proc. 3rd Osaka Colloquium Advanced CFD Applications to Ship Flow and Hull Form Design, Osaka, Japan, 1998.
- [9] Tufo, H. M., Fischer, P. F., Papka, M. E., and Blom, K., "Numerical Simulation and Immersive Visualization of Hairpin Vortex Generation," Proc. Supercomputing Conference 1999, Portland, U.S.A., 1999.
- [10] Praisner, T. J., "Investigation of Turbulent Junction Flow Endwall Heat Transfer and Flow Field," PHD Thesis, Lehigh University, 1998.
- [11] 黃正利、蔡進發、陳紀川，"翼端渦漩流場數值解析"，NTU-NAOE Tech. Report 677，2001。