

具控制翼之小水面雙體船運動性能探討

謝侑雯* 呂玲* 林均達** 辛敬業*¹

*國立臺灣海洋大學 系統工程暨造船學系
**財團法人中國驗船中心 研究處研發組

關鍵詞：小水面雙體船(SWATH)、RANS、船模阻力模擬、耐海性能模擬

摘要

為瞭解小水面雙體船(SWATH)運動性能，本文將應用勢流與黏性流兩種計算工具進行探討。雙體船因波浪激發之運動所造成的耐海性問題，是開發時不能迴避的問題，而控制翼是最廣泛被應用於減少波浪造成船體運動的裝置---近來的發展，使得控制翼可以減少船隻垂直加速度達 50%至 60%。本文將應用勢流與黏性流的計算工具，計算船舶運動與控制翼的受力與平衡。將分別應用勢流與黏性流的計算工具，對於阻力與運動進行計算，並比較兩者計算結果的差異，探討物理的效應。本文選擇 SWATH6 系列船型進行計算，因其擁有控制翼，並具有阻力與運動性能的實驗資料。文章中首先對於其阻力進行計算，其次應用勢流截片法與黏性流分別計算其運動性能，並進行比較，藉由勢流與黏性流的計算結果，評估兩者的差異，並探討有效的控制翼設計計算方法。

前言

目前國內造船技術發展很重要的一環是快速雙體船的開發，在快速船的開發上，除了船型的研發外，由於速度的增快，不免相對帶來運動、耐海性能等問題。雙體船因波浪激發之運動所造成的耐海性問題，更是各先進國家在開發雙體船時不能迴避的問題。目前控制運動的機構包了控制翼(control fin)、減搖水艙、陀螺儀穩定器與舵等，而控制翼是最廣泛被應用於減少波浪造成船體運動的裝置---近來的發展，使得控制翼可以減少船隻垂直加速度達 50%至 60%。高速雙體船運動控制所牽涉的研發包含了許多議題，本論文將應用勢流與黏性流的計算工具，計算船舶運動與控制翼的受力與平衡。將分別應用勢流與黏性流的計算工具，對於阻力與運動進行計算，並比較兩者計算結果的差異，探討物理的效應。本論文的目的有三：首先是對於中高速雙體船運動計算的探討，其次是希望藉由此研究瞭解控制翼對於雙體船運動的影響，最後則是希望藉由勢流與黏性流的計算結果，評估黏性效應的影響。

具有高速、高穩定性、較大艙容空間與甲板等特點，是雙體船被廣泛應用的原因，相較於同樣噸位的單體船，其細長的船體使得阻力也相對較小。但當海面風浪較大時，船體起伏與橫搖運動容易造成乘客的不適，限制了雙體船僅在平靜海況下才能具有高穩定性的優點。1938 年 Creed 提出了小水線面雙體航空母艦的概念，但因未被美國海軍採納而

沒有實踐。1968 年美國海軍的第一個小水線面雙體船計畫提出[1]，並以 Lang 所發展的概念進行分析，其中確切的定義 SWATH (Small Waterplane Area Twin Hull)為小水線面雙體船，由全潛沒入水中的兩個下船體連接流線型的穿面式支柱來支撐上層甲板，並於艏部配有控制翼，艉部配有穩定翼。1973 年全世界第一艘 SWATH---SSP KAIMALINO 下水，其魚雷型的潛式下船體，由流線支柱連接作為甲板的橫跨結構，艏部配有兩個可控制前翼(canard)，能夠輔助運動控制與穩定翼的減震，艉部有一全展穩定翼並配有兩個控制襟翼，以抵抗孟克力矩(Munk Moment)，提供動態俯仰穩定性。透過此船型在設計階段累積的數個模型試驗資料，以及實船的航行的驗證，證實其優異的耐海性能，並奠定 SWATH 的發展基礎，試驗結果同時也證實在高速航行下，SWATH 縱搖運動的不穩定，需以搭載穩定翼來調整。此不穩定性是由於波浪中，SWATH 縱搖運動周期較小所導致，而有此特徵的船型又被稱為 RMFS (Resonance -Motion-Free SWATH) [2]，為一艘配有艏艉各兩對控制翼於下船體接近底部處的船型。但因船模的回復力矩係數為負值，為維持運動測量時的穩定性，於實驗中採用彈簧模型支撐系統。這導致實驗結果並不如預期，Kihara[3]認為設計一套翼片控制系統，使其有效應用負值回復力矩，可以得到更好的縱搖運動穩定性。

¹ 聯絡作者 (hsin@mail.ntou.edu.tw)

為了追求更好的適航性，許多學者投入研究在設計階段預測 SWATH 動態特性的方法。1977 年 Lee[4]提出一套用來預測波浪中運動、垂向穩定性與波浪負載的方法，其中波浪運動是基於勢流假設下，截片理論(strip theory)、經驗方法與細長體理論(slender-body theory)於運動方程的應用。隨著科技的進步，數值模擬方法也被應用在 SWATH 的水動力評估中。2014 年 Krishna[5]利用 CFD 工具——SHIPFLOW 預估 SWATH 的阻力與動力，並應用以截片理論為基礎的分析軟件 SEDOS 估算 SWATH 的運動特性。2015 年 Begovic、Bertorello 與 Mancini[6]利用 CFD 商業軟體 StarCCM+進行小型 SWATH 在靜水下的阻力、自推以及有無俯仰與下沉條件下的運動模擬，證實 CFD 在初步設計階段作為評估工具的可行性，以及在高速航行下，俯仰的校正與穩定翼的控制。

阻力計算與驗證

本文選用 SWATH 6A 船型進行阻力驗證，SWATH 6A 為公開船型，有較多的試驗資料可以進行比對。表 1 為船型幾何參數與計算條件，表 2 為控制翼的幾何參數，圖 1 為 SWATH 6A 船型圖，(a) 船型尺寸圖，(b) 為裸船船型、(c) 為加裝穩定翼的船型。

表 1: SWATH 6A 船型幾何參數與計算條件

Main Features	Model scale (1 : 22.5)
Displacement(m^3)	0.246
L_{WL} (m)	2.33
L_{DA} (m)	3.250
Draft(m)	0.359
Beam of Each Hull at the Waterline(m)	1.018
Transverse Strut Separation (m)	1.020
Max Diameter of Main Hull(m)	0.204
Transverse GM(m)	0.129
Longitudinal GM(m)	0.302
Radius of Gyration for Pitch(m)	0.75
Radius of Gyration for Roll(m)	0.45
V_m (m/s)	2.168
Fn	0.384

表 2: SWATH 6A 船型幾何參數與計算條件

Fin Section NACA 64-015				
	Chord	Span	Thickness(max)	1/4 Chord Pivot
Forward Fin	2.59 (m)	3.11 (m)	0.39 (m)	0.762 (m)
Afterward Fin	4.48 (m)	5.36 (m)	0.67 (m)	2.766 (m)

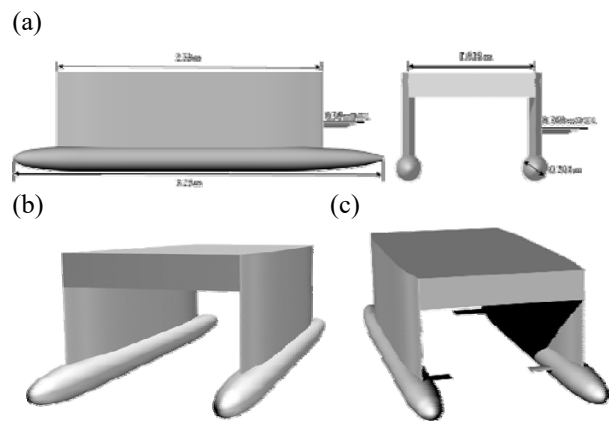


圖 1：SWATH 6A 船型圖，(a) 船型尺寸圖，(b) 裸船船型，(c) 加裝穩定翼的船型

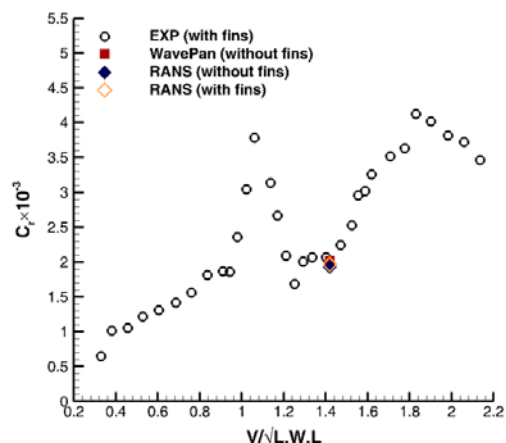


圖 2：剩餘阻力係數圖

首先分別利用勢流興波阻力程式(WavPan)與 RANS 軟體 Star CCM+進行剩餘阻力計算，並與實驗值比較，實驗值由 Hugh Y. H. Yeh and Eddie Neal(1977)[7]整理得出，如圖 2，其中橫向坐標軸為 $V/\sqrt{L \cdot W \cdot L}$ ， V 為船速， $L \cdot W \cdot L$ 為水線長，縱向坐標軸為剩餘阻力係數($C_R \times 10^{-3}$)。為了瞭解控制翼在靜水下對阻力的影響，我們針對有無控制翼裝置的條件進行計算。首先在無控制翼的條件下，由於實驗值僅有安裝控制翼的阻力資料，因此我們以 WavPan 與 RANS 相互驗證，兩者誤差為 4.268%。而在有控制翼的條件下，則以 RANS 與實驗值做比對，兩者誤差為 7.129%。由圖 2 可以看出在 $V/\sqrt{L \cdot W \cdot L} = 1.42$ ，因總體積中控制翼僅占很小的比例，RANS 計算下有控制翼的剩餘阻力略高於沒有控制翼的。由此可知，有無控制翼對於剩餘阻力的影響不大，所以我們直接以實驗值為基準與沒有控制翼的 WavPan 及 RANS 做誤差分析，WavPan 的

誤差為 4.9%，RANS 的誤差為 8.9%，兩者誤差皆小於 10%，故 WavPan 與 RANS 的計算雖有差異，但仍具可信度。

對於雙體船，兩船體間的交互作用也是需要關心的另一個重點，於是我們進行單體與雙體的計算。將計算結果繪成表面壓力分佈圖與波型圖。圖 3(a)、(b)分別為 RANS 與 WavPan 雙體的表面壓力分佈圖，圖 4(a)、(b)分別為 RANS 與 WavPan 單體的表面壓力分佈圖。兩組圖中動壓係數最大值皆位於艏鼻，同時也是停滯點。另外，因黏性流有考慮黏性效應，故相較於勢流，船殼上表面壓力更能清楚的描繪。圖 5(a)、(b)分別為 RANS 與 WavPan 雙體的波型圖，圖 6(a)、(b)分別為 RANS 與 WavPan 單體的波型圖。以水面為基準點，與自由液面的差值定義為波高，兩方法中經過船身的波浪個數相同，波峰與波谷發生的位置也大致相同。同時，兩組圖可以觀察出雙體與單體的差異，這是因為兩船體間波浪繞射所產生的現象。

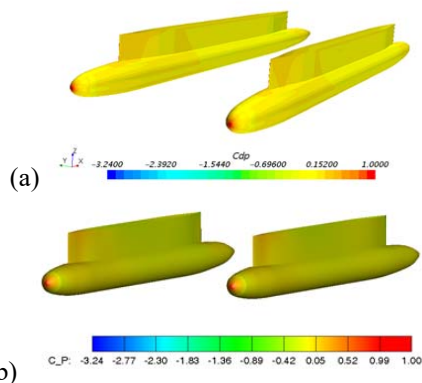


圖 3：雙體表面動壓係數分佈圖，(a)RANS，(b)WavPan

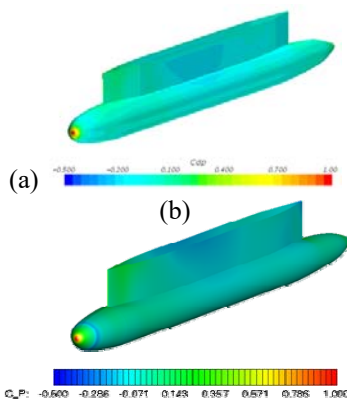


圖 4：單體表面動壓係數分佈圖，(a)RANS，(b)WavPan

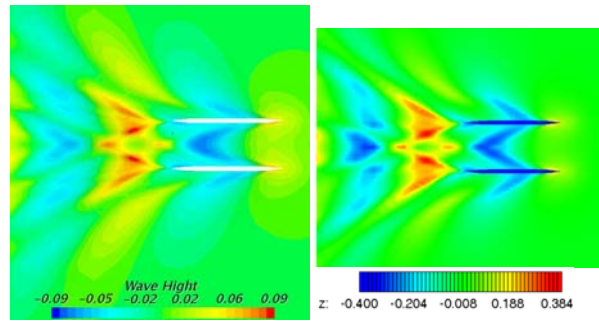


圖 5：SWATH6A 雙體波型圖，(a)RANS，(b)WavPan

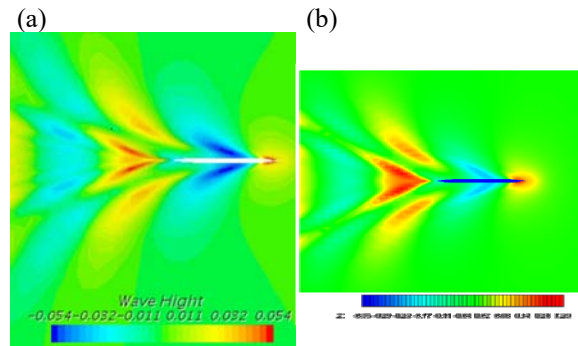


圖 6：SWATH 6A 單體波型圖，(a)RANS，(b)WavPan

運動之計算與驗證

我們仍選用 SWATH 6A 船型進行運動的計算與驗證，分別應用勢流截片法與黏性流方法進行規則波中的運動計算，並驗證計算結果。最後，我們將觀察黏性流計算之流場。

1. 勢流截片法之計算

SWA-SMP 是一套勢流截片法之程式，修改自單體船運動計算的截片法。為了驗證 SWA-SMP 的精準度與可信度，以 SWATH 6A 進行驗證，其中計算船速為 2.168 m/s ，波陡度為 $1/80$ 且入流角為 180 度之波浪條件，使其計算結果與實驗值進行比較。圖 7 與圖 8 則分別為有控制翼之起伏與縱搖反應振幅運算子結果比較圖，其中橫向坐標軸為 λ/L_{PP} ，縱向坐標軸分別為起伏反應振幅運算子 (Heave RAO) 及縱搖反應振幅運算子 (Pitch RAO)，其定義如下：

$$\text{起伏反應振幅運算子} = \frac{\text{起伏運動之振幅}}{\text{來波之振幅}}$$

$$\text{縱搖反應振幅運算子} = \frac{\text{縱搖運動之振幅}}{\text{來波之振幅} \times \text{波數}}$$

從圖 7 與圖 8 中，我們可以發現在 λ/L_{pp} 介於 3 到 7 之間，SWA-SMP 計算之結果與實驗值趨勢相近，反應振幅運算子皆會隨著 λ/L_{pp} 增大而逐漸增加，且在 λ/L_{pp} 約為 4.0 到 6.0 之間時，會產生最大值，另外，在長波($\lambda/L_{pp} > 7$)的情況下，截片法 SWA-SMP 計算的縱搖反應振幅運算子會不斷上升，但在一般情況中，並不會計算 $\lambda/L_{pp} > 7$ ，故目前暫時忽略 SWA-SMP 在長波之計算。

2. 規則波運動之計算

本節中運用 RANS 與 SWA-SMP 分別對於有無控制翼進行起伏與縱搖運動之預估。圖 9 與圖 10 為無控制翼之計算結果，圖 11 與圖 12 為有控制翼之計算結果。計算規則波之波陡度為 $1/60$ ，來波方向為 180 度頂浪方向，其中波陡度的定義為 $2A/\lambda$ ， A 為振幅， λ 為波長。

圖 9 為無控制翼之起伏反應振幅運算子數值模擬比較圖，圖 10 為無控制翼之縱搖反應振幅運算子數值模擬比較圖，橫向坐標軸為 λ/L_{pp} ，縱向坐標軸分別為起伏反應振幅運算子(Heave RAO)及縱搖反應振幅運算子(Pitch RAO)。從圖 9 與圖 10 中可以觀察出兩方法的起伏與縱搖反應振幅運算子趨勢相近，在 λ/L_{pp} 介於 4.0 到 6.0 之間，起伏與縱搖反應振幅運算子有最大值。圖 11 與圖 12 為有控制翼之起伏與縱搖反應振幅運算子數值模擬比較圖。我們可以發現縱使兩結果的趨勢接近，但實際上兩方法與實驗值有一定的差異，黏性流 RANS 方法在起伏運動的計算上優於截片法 SWA-SMP，而截片法 SWA-SMP 在縱搖運動的計算上是優於黏性流 RANS 方法的。透過上述有無控制翼的計算，我們發現反應最大值皆發生在 λ/L_{pp} 為 4.0 與 6.0 之間，因此可以推斷在此區間會發生共振，另外，在此區間有控制翼之起伏與縱搖反應運算子較無控制翼的小，可以確認控制翼有效降低 SWATH 在共振區的運動幅度，使得在航行過程中，有較高的穩定性。

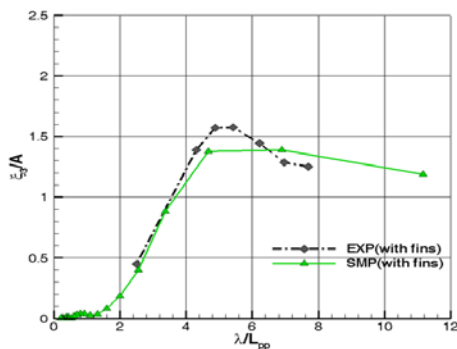


圖 7：有控制翼之起伏反應振幅運算子結果比較

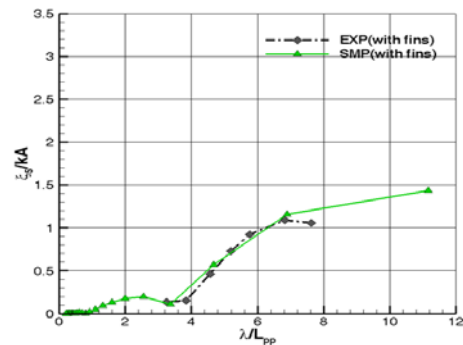


圖 8：有控制翼之縱搖反應振幅運算子結果比較

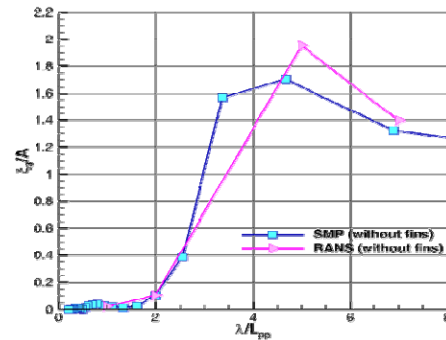


圖 9：無控制翼之起伏反應振幅運算子數值模擬比較

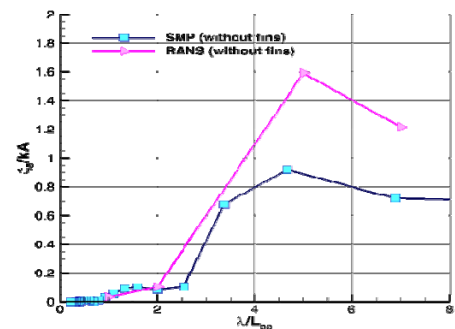


圖 10：無控制翼之縱搖反應振幅運算子數值模擬比較

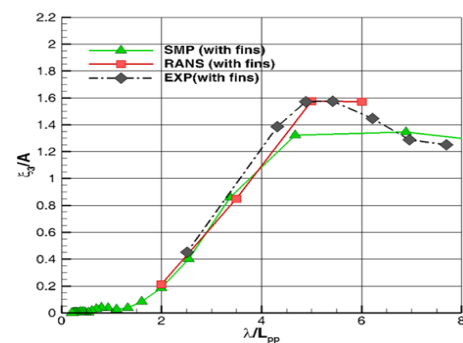


圖 11：有控制翼之起伏反應振幅運算子數值模擬比較

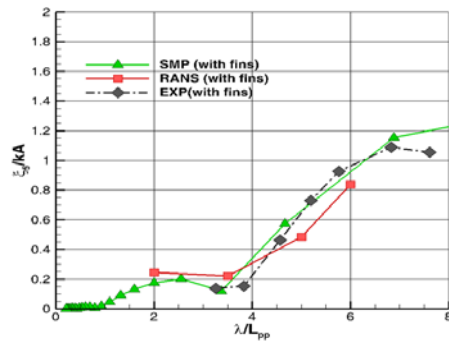


圖 12：有控制翼之縱搖反應振幅運算子數值模擬比較

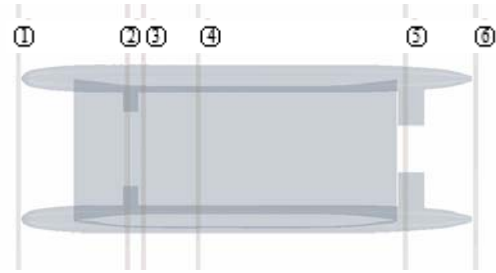


圖 14：流場擷取的位置示意圖

3. 跡流流場分析

本節將以黏性流計算結果，進行有控制翼情況下，起伏與縱搖運動之計算中， λ/L_{pp} 為 5.0 的跡流流場。首先，我們在一個起伏與縱搖運動週期中取三個不同的時間點，a、b 與 c(如圖 15 所示)，並於 SWATH 上選擇六個不同的位置(如圖 16 所示)截取流場。圖 17 至圖 23 分別顯示不同位置在三個時間段的流場，由這些圖中可以觀察出速度會隨著起伏與縱搖運動改變，而以控制翼面上的改變尤為明顯。

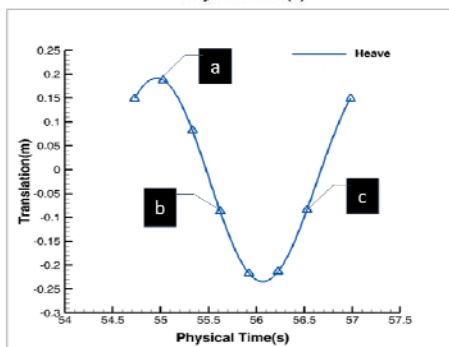
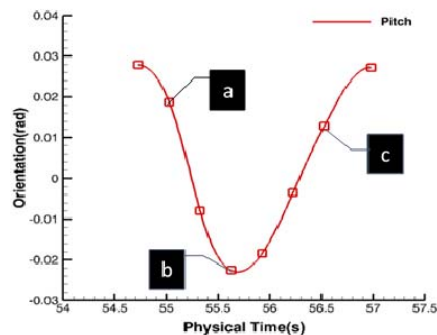


圖 13：有控制翼的情況下，單位週期的縱搖(上圖)與起伏(下圖)運動圖

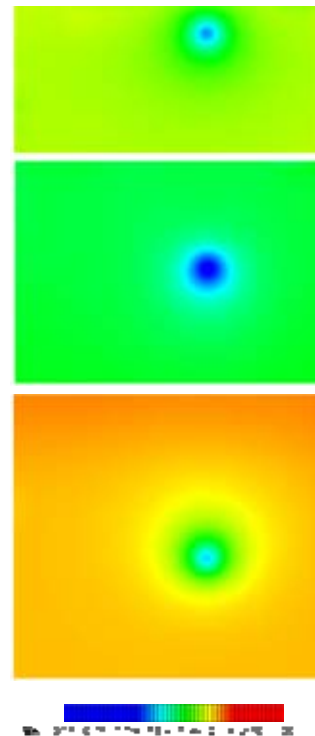


圖 15：由上至下方別為在 a、b、c 三個不同時間點時，1 號位置的跡流流場圖

圖 17 與圖 18 分別顯示船艏前與前翼導緣附近的流場，可以觀察到當運動時，流場速度的變動。圖 19 則可清楚看到前翼所產生的葉尖渦與船殼流洩出的渦旋。為了瞭解渦旋是否會影響後方流場，我們接著分析 4 號位置，從圖 20 中可以發現，前翼產生的渦旋逐漸減小，因此可以推測其所造成的影響不大。圖 21 顯示後翼導緣附近的流場，同樣可以觀察到當運動時，流場速度的變動。但圖 22 顯示船艉後的流場，可以觀察到後翼生成的葉尖渦與流洩渦旋相互影響的效應，而且比較前翼更為明顯，我們此圖疊加上向量，如圖 23，可以更容易得觀察出兩渦旋如何互相干擾。

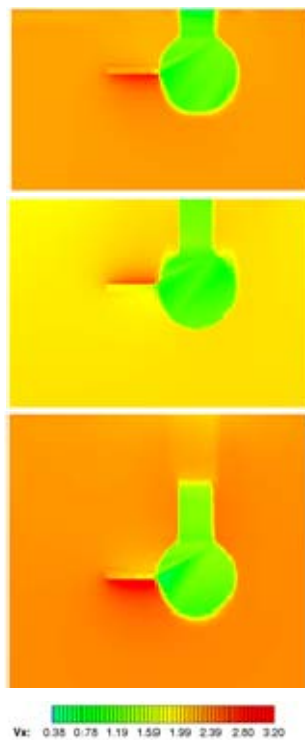


圖 16：由上至下方別為在 a、b、c 三個不同時間點時，2 號位置的跡流流場圖

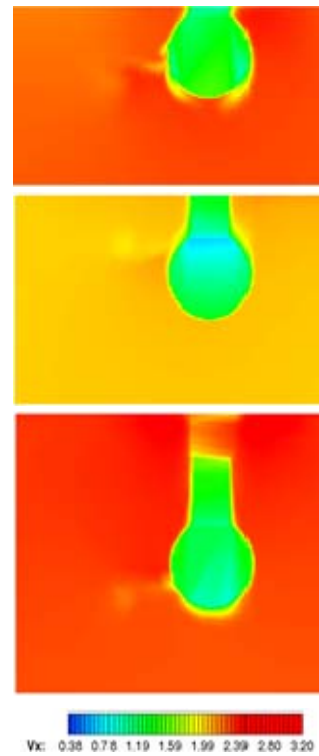


圖 18：由上至下方別為在 a、b、c 三個不同時間點時，4 號位置的跡流流場圖

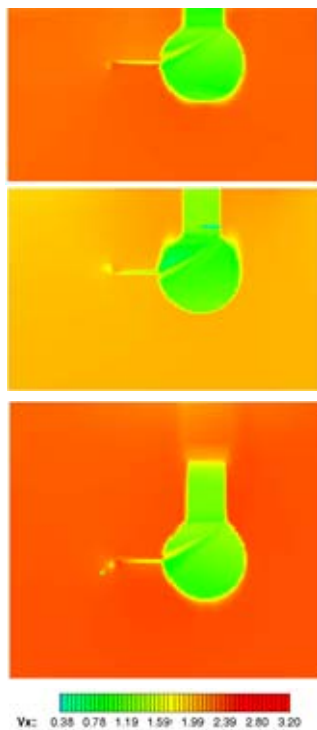


圖 17：由上至下方別為在 a、b、c 三個不同時間點時，3 號位置的跡流流場圖

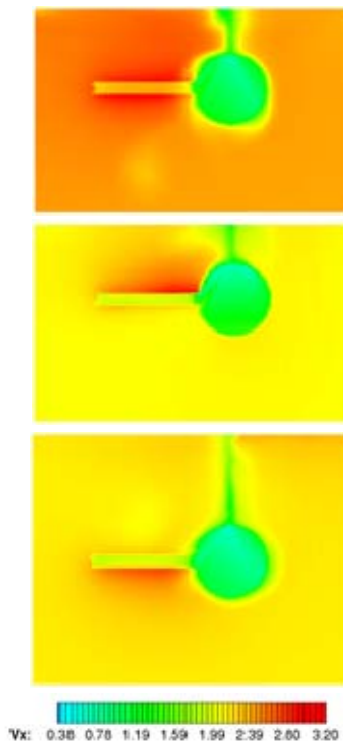


圖 19：由上至下方別為在 a、b、c 三個不同時間點時，5 號位置的跡流流場圖

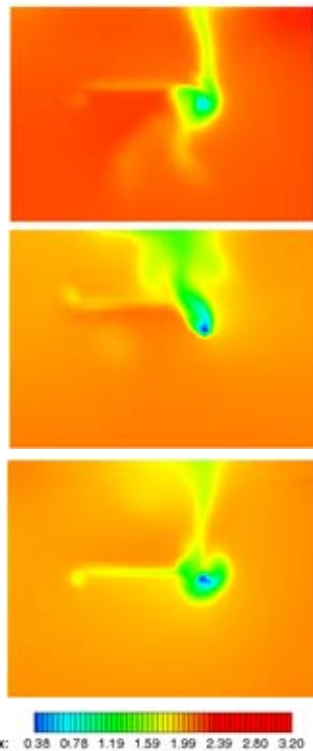


圖 20：由上至下方別為在 a、b、c 三個不同時間點時，6 號位置的跡流流場圖

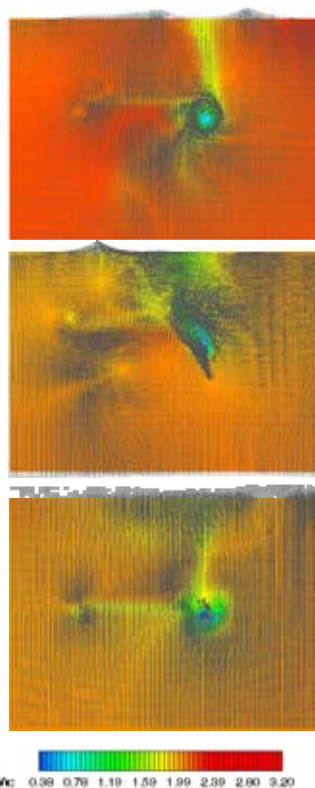


圖 21：由上至下方別為在 a、b、c 三個不同時間點時，6 號位置的跡流流場向量圖

結論

本文主要應用勢流與黏性流方法建立小水線面雙體船的船舶阻力與運動之預估，透過兩方法與實驗資料相互驗證，並分析勢流軟體與黏性流軟體預估之差異，在阻力驗證與分析中，我們得到以下的結論：

1. 兩方法計算結果與實驗值相近，且有無控制翼對於剩餘阻力的影響不大。
2. 勢流與黏性流之波型圖所預估的波個數相同，且波峰與波谷分佈位置相近。
3. 雙體與單體的差異在於波型，這是因為兩船體間波浪繞射所產生的現象。

在運動的計算上，我們得到以下的結論：

1. 在起伏與縱搖運動中，兩方法計算結果之趨勢與實驗值相似，當 λ/L_{PP} 介於 4.0 與 6.0 之間時，因波浪與 SWATH 的共振現象，進而產生最大反應振幅。
2. 控制翼能夠降低共振現象，有助於降低波浪對 SWATH 的影響。
3. 與實驗值相比，勢流截片法 SWA-SMP 在縱搖運動預估有較好的表現，而黏性流 RANS 方法在起伏運動的預估優於勢流方法。
4. 前翼後端的葉尖渦與流洩渦旋消逝較快，對後方流場影響較小，因此推測其不會對後翼入流產生干擾。
5. 後翼的葉尖渦與流洩渦旋相互影響的現象較為顯著，會對螺槳入流及後方流場造成一定程度的影響，但是否會對船體造成損壞或是降低航行效率，在未來可以做更進一步的探討。

參考文獻

1. T. Lang, "SWATH Evolution: From ideas to Ships," Semi-Submerged Ship Corp. Solana Beach, CA, Intersociety Advanced Marine Vehicles Conference Arlington, VA / June 5-7(1989).
2. Yoshida, T., Fujita, Y. and Fujino, M. "A proposal of the CS-Swath as a Transocean High Speed Ship", Trans. RINA, Vol. 142(B), pp.136-149, (2000).
3. H. Kihara, M. Yoshida, H. Iwashita, and T. Kinoshita, "On an Oceangoing Fast SWATH Ship without Pitching Resonance", Proc.6th International Conference on High-Performance Marine Vehicles, pp.27-32 (2008).
4. Choung M. Lee, Member, and Richard M. Curphey, Visitor, "Prediction of Motion, Stability, and Wave Load of Small-Waterplane-Area, Twin-Hull Ships," SNAME Transactions, Vol. 85, pp. 94-130, (1977).

5. Y. Gopi Krishna* and Anuj Gupta, “Powering and Motion Analysis of Twin-Strut Swath Vessels” Department of Naval Architecture and Offshore Engineering, AMET University, India, Indian Journal of Science and Technology, Vol 7(S7), 28–40,(2014).
6. E. Begovic, C. Bertorello, S. Mancini, “Hydrodynamic Performances of Small Size SWATH Craft,” University of Naples Federico II, Department of Industrial Engineering, Via Claudio 21, 80125 Naples, Italy, (2015).
7. Hugh Y. H. Yeh and Eddie Neal, “Powering Characteristics of Swath-6A in Calm Water and Head Seas represented by Model 5337-A and using Propellers 4415-4416,” W. Taylor Naval Ship Research and Development Center,(1977).