

拖船航行與波浪交互作用之研究

余孟儒*¹

陳冠綸*

林瑞國**

*國立臺灣海洋大學 輪機工程學系 研究生

**國立臺灣海洋大學 輪機工程學系 助理教授

關鍵詞：拖船、波浪交互作用、數值模擬、實驗測試、航行性能

摘要

本研究主要是利用計算流體力學本研究探討拖船航行與波浪交互作用的相關問題，旨在深入了解這些交互作用對拖船運動和性能的影響。研究方法包括數值模擬和實驗測試，以評估在不同波浪條件下拖船的運動行為。在數值模擬方面，我們使用先進的計算流體力學（CFD）方法模擬拖船在不同波浪狀態下的流場，以分析船體受波浪影響的力和運動特性。實驗測試方面，我們進行了模型試驗和實尺寸試驗，以驗證數值模擬結果，並獲得更現實的運動數據。研究發現表明，波浪條件對拖船的運動穩定性和速度性能有著明顯的影響。在特定波浪頻率和方向下，拖船可能會受到波浪激勵引起的搖晃和滾動，進一步影響其操作和航行效率。我們的研究結果對拖船的設計和運營提供了重要的參考，以應對不同海況條件下可能面臨的挑戰。

前言

在航行領域中，拖船是一種極具特殊性和挑戰性的船隻，其應對波浪的能力直接影響到海上作業的順利進行。隨著海上交通的日益繁忙和多變的海象條件，我們迫切需要深入了解拖船在波浪中的行為，以提高其安全性和效能。

波浪對拖船的影響涉及多個方面，包括但不限於速度、姿態、穩定性和船體的疲勞。拖船必須應對來自不同方向和高度的波浪，這使得其航行行為更加複雜。此外，拖船在進行拖曳作業時，波浪對牽引力和船隻與牽引物之間的關係也產生了直接的影響。

為了解決這些問題，我們將進行一系列系統性的實驗。這些實驗將涉及模型試驗和水槽實驗，以模擬不同海象條件下的實際情境。透過豐富的實驗數據，我們將能夠詳細分析拖船在波浪中的運動特性，揭示波浪引起的各種變化。

本研究的目的是不僅在於理解拖船與波浪的交互作用，更重要的是提出改善策略，以應對不同波浪環境下的挑戰。這可能涉及到改進船體設計、優化操控系統、引入先進的波浪預測技術等方面。透過這些改進，我們期望能夠提高拖船在波浪中的整體性能，從而促進海上運輸的順利進行。總的來說本論文的研究內容將有助於填補現有文獻中的知識空白，為拖船操作和設計提供實用的指南。這不僅對

拖船行業具有實質的影響，同時也對整個船舶工程領域的發展具有一定的參考價值。

許多國家的研究機構及學者對操船模擬系統的研究與發展逐漸受到關注。操船模擬機在船舶性能設計上應用已成為一個明顯的趨勢。由於操船模擬機具有真時性和便利性，大幅降低了成本，對使用者產生極大效益。為了提升模擬機在數值運算和船舶數值模型的真實性，系統需要使用更廣泛的實船基本性能資料和實船試俾記錄進行驗證。建立操船模擬機的船舶數值模型，進而提高真實性及可靠性。

研究使用 CFD 分析軟體 ANSYS Fluent® 模擬產出模擬數據後予以分析，以提供操船實務上之參考應用。本研究應用 CFD 模擬拖船與港內波浪的交互作用，不但可以補操船模擬機之不足，應用於海事教學或航海人員之訓練，提供船舶遭遇大浪時，在大浪時操船應注意船舶航行安全，及早規避船舶傾覆的危險發生。

文獻回顧

1944 年德國學者 Davison 利用數學運動方程式將船舶迴旋與操舵之關係明確定義，使船舶關於操縱性能的問題，開始確切之依據。

1993 年蘇發表隨著船舶因體積愈大其排開同體積的水愈大，所以大船會比小船所產生興波效應愈明顯，船速愈快產生的興波愈明顯，水深愈低，由於淺水效應，所產生的興波愈明顯。船舶在航行時，船艏

¹ 聯絡作者 余孟儒 (p2771607@yahoo.com.tw)

處水流被船艏切開擠向兩側及下方時,水流之流速會變慢,而後被擠向兩側及下方之水流,則以較快之速度流向船舫。當水流到船舫時,再以較慢之速度在船艏附近合成。

在一般天候條件下,船舶航行於海上,受到風壓及海水等阻力影響,而後者占總阻力的大部分。海水阻力是由摩擦阻力及興波阻力兩大主要項目所組成,當船艇在慢速航行時,摩擦阻力幾乎佔總阻力的80-90%,但當航速逐漸升高時,船舶興波阻力所占的比例會大幅增加。在有限馬力下,假如想使高性能船舶仍能高速航行,而有效降低船舶興波阻力是必須克服的課題,前人相關研究有 Wei(2006)三維碎波在岸邊造成高速船航行之分析及 Tarmo (2007)利用非線性探討船跡波相關研究。當船體質量愈大,在相同水域及水深航行所產生造成之興波效應及面積愈大,相同質量之船體在同一條件下的水域航行,速度較快所造成之興波效應與速度平方成正比,而本文探討船舶在不同船速航行的興波效應與船跡波。

1988年邱逢琛與曾國正根據日本 MMG 操縱運動數學模式,配合利用流體動力係數及相關計算資料之經驗預估法,以 FORTRAN 語言建構出一套船舶操縱運動模擬程式,藉此預估船舶操縱性能。再以 Vlcc Esso Osaka 計算與實船試航結果之比較,驗證此模擬計算系統。

1995年曾慶耀提出數學模式之建立可藉由系統鑑定技巧,處理實驗或現存物理現象之輸入、輸出觀測值來求得;其以船舶運動為討論對象,並說明在不同應用範圍考慮重點各異,因而將有不同複雜程度之數學模式來描述船舶運動特性。

1997年方銘川等人同樣利用 MMG®操縱運動數學模式以及相關流體動力係數,建立一套大型商船以及漁船用之船舶操縱性能預估方程式,藉由 Vlcc Esso Osaka 實測數據比較,驗證模擬計算程式之可信度。

1999年方銘川等人再以前述之研究為基礎,並假設影響模擬結果最大的因素在於阻力的預估及螺旋槳的推力、扭矩及相關係數。所以利用不同船型的預估表對其阻力、螺旋槳推力、扭矩及相關係數做預估,並且加入淺水效應以及風力的影響,進而帶入運動方程式中做模擬。再由實驗值,對流體動力係數的修正,以此來建立適合各類船舶的模擬計算系統。

1999年曾慶耀探討船舶迴旋運動時,相關之物理現象,以基本動力學速度分量之合成概念,說明迴旋運動時,船舶之旋轉軸心(pivoting point)係落於船艏附近。2000年曾慶耀等人以 Norrbin 非線性平擺方程式為基礎架構,探討不穩定船舶之動態特性。最後提出簡化之橫移非線性模式,與 Norrbin 非線性平擺模式結合,可繪出橫移-平擺之相位平面

圖,並藉以顯示船舶在給予不同初始狀況之收斂趨向,以進一步說明船舶動態在穩定平衡點與不穩定平衡點附近之行為。

理論基礎

1. 數值模式

本研究所使用的方程組係指在紊流模式下,分析二相流體的統禦方程,將紊流視為暫態流體(unsteady flow),以此觀念發展出之方程式,使得所使用之統禦方程式也非常適用於紊流模式中。這個統禦方程式是由質量、動量及在非等熵流的能量守恆下所組成的方程組,又稱為雷諾平均 Navier-Stokes 方程,通式如下:

其中 ρ 為密度(density)、 t 為時間(time), v 為速度向量(velocity vector)、 u 為變數(dependent variable), μ 為耗散數(diffusion coefficient)與 s 稱為源項(source term),該方程式分為連續方程與動量方程等傳輸方程如下:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \nabla \cdot (\rho\vec{v}\phi - \Gamma\nabla\phi) = S \quad (1)$$

其中 ρ 為密度(density)、 t 為時間(time)、 \vec{v} 為速度向量(velocity)、 ϕ 為變數, Γ 為耗散數與 s 為源項,該方程組分為連續(continuity)、動量(momentum)及能量(energy)等傳輸方程如下:

(1).連續方程(continuity)

$$\frac{\partial\rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\vec{v}) = 0 \quad (2)$$

(2).動量方程(momentum)

$$\frac{\partial\rho\vec{v}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\vec{v} \otimes \vec{v}) = B + \nabla \cdot \sigma \quad (3)$$

將上式(3)中應力發散耗散項置於等號左邊,可寫成對流耗散方程式,如下式:

$$\frac{\partial\rho\vec{v}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\vec{v} \otimes \vec{v}) = B - \nabla p' + \nabla \cdot (\mu(\nabla\vec{v})^T) \quad (4)$$

其中, p' 是壓力修正項,如下所示:

$$p' = p + \left[\frac{2}{3} \times \mu - \xi \right] \nabla \cdot \vec{v} \quad (5)$$

若流體為不可壓縮流時 $\Delta\vec{v}=0$, 故 $p'=p$, 且分子之黏滯性變數 μ 為常數,並從應力發散之後隨著消失。對於層流來說,其黏滯性變數 μ 與剪力率(shear rate)相關,如同在非牛頓性流體中, μ 值在非等溫流體中與溫度相關。

2. 紊流模式

所謂紊流(turbulent flows)就是速度場的擾動(fluctuating)特性,這個擾動特性是指流體的動量、能量及成份(species)濃度等傳輸量流經物體的壁面所產生,而有時這些擾動會是很小且具有高頻的現象,所以常會有計算成本太昂貴而無法模

擬的情形；為瞭解解決這方面的問題，可以在瞬間的統禦方程式中使用時間平均、整體平均或是其他的操控方法來去除小擾動，如此可大大地減少計算的成本，然而這些修改的方程式往往會衍生出許多未知的變數，因此紊流模式就是決定這些未知變數轉為已知數的關鍵。

紊流模式的種類很多，有的適合穩態流場，有的適合暫態流場，所以紊流模式的選用就必需視案例本身的情況而定，加上紊流模式本身是利用附屬的方程式來計算，不同的紊流模式就有不同的方程式數量，依照常理來判斷，方程式愈多，計算的結果就愈精確，但這不是最佳的使用憑據，因為譬如說一個很簡單的流場，若是用 Reynolds Stress Model (7 個方程式)來計算的話，就會造成計算成本的增加，且浪費時間，因此紊流模式的選用需經過測試，選擇最有利的模式來模擬實際案例。本研究使用的紊流模式是以通用的 Standard κ - ϵ 模式為主， $\kappa\epsilon$ 模式主要以紊流動能及耗散率二個方程式組成，是適合最初模擬使用，接著利用的兩個變化模式：RNG κ - ϵ 和 Realizable κ - ϵ 模式，找出最符合船舶艙流的紊流模式。以下分為介紹三種不同的 κ - ϵ 模式。

一般用以模擬水流的紊流模式優缺點如下：

- (1). Large Eddy Simulation (LED)：缺點為用以求解紊流特性較費時且需較大的電腦容量。
- (2). 紊流傳遞模式(turbulent transport models)：又稱為雷諾-應力模式(Reynolds-stress model)，其缺點為需較多的方程式來求解紊流特性，故求解過程較 k-e 紊流模式費時且複雜。
- (3). 渦流-黏度模式(eddy-viscosity model)：在工程上求解紊流特性，以 k-e 紊流模式為主流。在較早期的研究，k-e 紊流模式主要是被應用至高雷諾數流場中，但事實上實驗證明在靠近牆壁的地方為低雷諾數流場區。

因此，低雷諾數紊流模式在近年遂逐漸被發展出，利用壁面函數之引入，可以同時求解遠離牆壁的低雷諾數流場區及靠近牆壁的低雷諾數流場區。本研究之煙柱擴散氣流分佈模擬係採用低雷諾數紊流模式加以模擬流場特性，故低雷諾數 k-e 紊流模式說明如下：

流體流動的問題，所遵循的數學模式即為 Navier-Stokes 方程式，將 Navier-Stokes 方程式中的物理量對時間取平均，可以得到 Reynolds Average Navier-Stokes 方程式。由於在紊流場中，佈滿了各種大小尺度的渦流，而小尺度的渦流代表小尺度的擾動，但其非常微小且無規律的特性，必須使用非常細微的網格才能捕捉其物理現象，使得直接分析瞬時量的 Navier-Stokes 方程式

在計算電腦有限的速度和容量下，成為相當困難的問題，而 RANS 的概念即為使用統計的方法，將瞬時量分成時間平均量以及瞬時擾動量，使經過時間平均的 NavierStokes 方程式小尺度渦流結構消失，成為描述大尺度渦流的 Reynolds Average Navier-Stokes 方程式，可有效減少計算資源。

結果與討論

本研究側重於規則波對拖船之影響，單純僅探究單一線性波浪對船舶運動之影響，然實際海況遠比電腦模擬更加複雜多變，為求得船舶運動的模擬數值更加貼近實際海況，建議日後研究者在進行類此模擬時，波浪狀況應以不規則波來模擬船舶與波浪交互作用，並針對不同船型航行時的船舶興波分析及阻力與衡壺的分析來獲得其船型的相關數據，進而做後續的分析。

1. 幾何外型

本研究所採用船模，根據 KCS 船線座標表，以軟體來繪製船模，取靜水面與舭剖面的交線和艙垂線的交點為原點($x=y=z=0$)繪製橫剖面線，之後再將完成之船模外觀繪出。最終以 STEP 格式匯出，再利用網格修編工具軟體 DA Design Expert 確認船模的完整性，最後再以 ANSYS Fluent®建立網格。

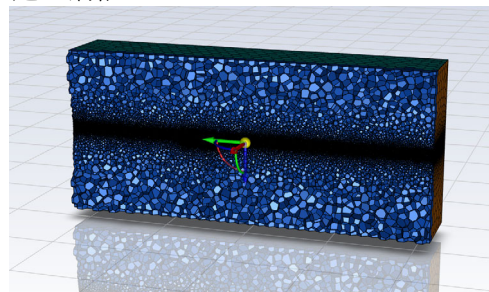


圖 1. 數值模擬體網格分佈剖面圖

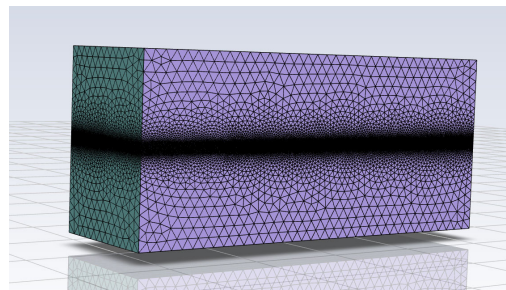


圖 2. 數值模擬面網格分佈

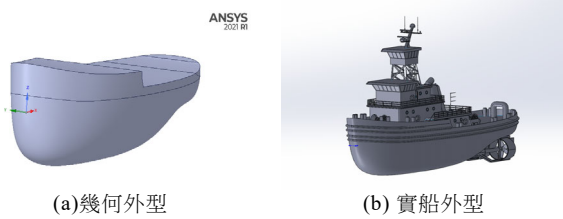


圖 3. 幾何外型圖

2. 邊界條件

針對拖船(Tugboat)依各海運公司航行中常見平均船速 V_{inlet} 設定為 10~12 節(knots)。研究拖船型與海浪交互作用時物理現象。

表 1. 研究之船速設定(ship velocity)

	knots	kph	m/s
Case1	10	18.52	5.1444
Case2	12	2.224	6.1733

實船航行常見船速(10 及 12 節，共 2 個 case)，其上、下及出口邊界條件均為無窮遠處。

表 2. 拖船航行間波浪運動設定條件

transient	cushion (m)	controls
front ($y>0$)	+2	pressure
back ($y<0$)	-1.5	density
left ($x>0$)	+1	body forces
upper ($z>0$)	+1	momentum
bottom ($z<0$)	-1	volume fraction
free-surface (m)	0.05	kinetic energy
velocity magnitude (m/s)		specific dissipation rate
bottom level (m)	-1	turbulent viscosity

3. 數值結果

根據規劃方案模擬的結果呈現，模擬的船速為 10 節與 15 節，船速 1 節表示為 0.514m/s，水深為 100m。波浪波高為 5m、週期為 10 秒。船舶質心座標、船舶 6 DOF 的角速度和位移、船舶阻力等物理量，再分別利用繪圖軟體進行數據的整理和繪圖。探討船速的阻力、起伏位置、起伏速度、縱搖角速度、縱搖角度。並呈現船舶與波浪作用、自由水面變化等。

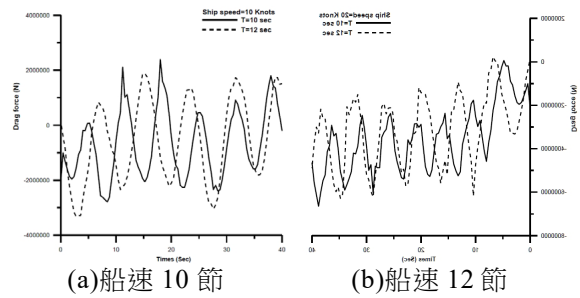


圖 4. 船舶阻力變化

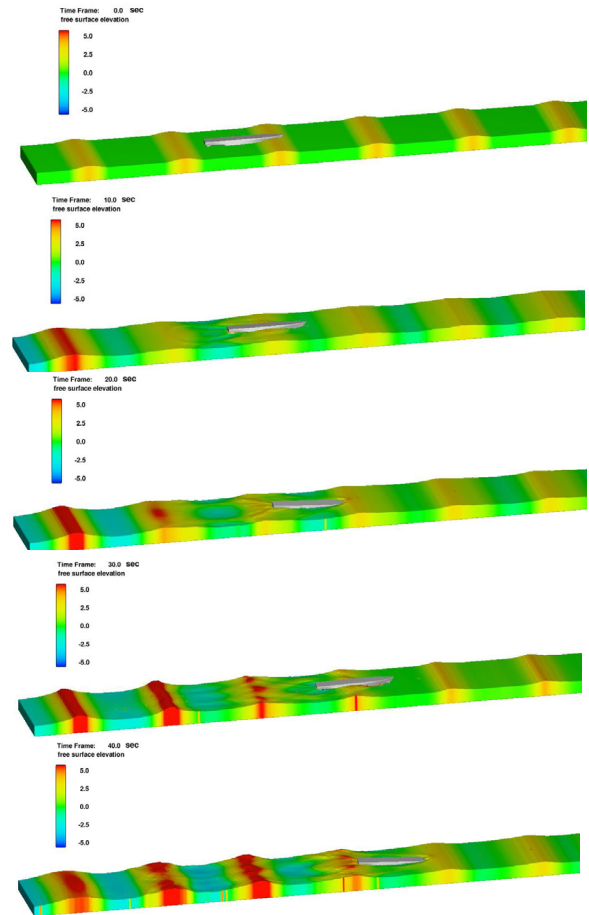


圖 5 船舶與波浪交互作用自由水面變化 ($v_s=10$ knots; $t=10$ s)

本研究應用 ANSYS Fluent®技術模擬船舶遭遇規則波之阻力。透過觀察不同速度場下的等高線分布，可以看到不管是散裝或是貨櫃船周圍的水域相對於整個計算域有明顯的變化。應用 CFD 模擬船舶水動力效應首先必須建立船模，再匯入數值航道進行船速與波浪條件的設定。本研究模擬的船速為 10 與 12 節，水深為 100m。波浪波高為 5m，週期為 10s，對應波長為 110m 與 137m。船舶質心座標、船舶自由度如縱搖角速度與角度和起伏位移與速度、船舶阻力等物理量，再分別利用 Flow-3D®與

Graphex 等軟體進行數據的整理和繪圖。以船舶阻力而言，12 節航速比 10 節航速有較大的阻力；在相同波高不同週期對船舶阻力的影響為週期較長的波浪會增加船舶阻力，阻力是由興波阻力與摩擦力所合成，在此以興波阻力為主。

若是要清楚模擬本次實驗拖船在航行於波浪情形，就需要將水與空氣的體積分率(volume fraction)定義在控制體積內，在以後處理軟體 TECPLOT 呈現實驗結果，在海上的實際波浪情形可能較實驗中模擬複雜許多，若是未來在設定流場能增加波浪的多方向或是能模擬波浪不同強度下來探討船體受力情形及不同狀態，模擬出來結果就會更逼近實際情形。

參考文獻

1. 陳柏汎 (2004) 反算設計法於最適化船形預測之研究，國立成功大學造船暨船舶機械工程研究所博士論文，第 103-104 頁，台南，臺灣
2. 黃智偉 (2004) 自由液面影響下之水下潛體運動流場數值模擬分析，國防大學中正理工學院造船工程研究所碩士論文，第 59-76 頁，桃園，臺灣
3. 楊啟生 (2004) 鮪釣漁船艏艉船型創新設計之研究，國立成功大學造船暨船舶機械工程研究所碩士論文，第 53 頁，台南，臺灣
4. 卓永堂 (2003) 球型船艏對船舶運動與阻力之影響評估，國立成功大學造船暨船舶機械工程研究所碩士論文，第 30 頁，台南，臺灣
5. 李浩 (2012) 船舶橫搖運動特性研究，中國海洋大學機械電子工程研究所碩士論文，第 30 頁，大陸
6. 周家宏 (2002) 最佳化船型預估之研究，國立成功大學造船暨船舶機械工程研究所碩士論文，第 84-87 頁，台南，臺灣
7. 陳克仁、陳柏汎、李志義 (1999) 高速船艇之 CFD 流場分析，第 12 屆中國造船暨輪機工程研討會論文集，第 321-327 頁，桃園大溪，臺灣
8. 輪機工程研討會論文集，第 724-727 頁，高雄，臺灣
9. 羅志宏 (2001) 船隻在順波中航向穩定性與運動之分析，國立成功大學造船暨船舶機械工程研究所碩士論文，第 61-63 頁，台南，臺灣
10. 陳建志 (2012) 船舶於波浪中之參數橫搖運動分析，國立高雄海洋科技大學造船及海洋工程研究所碩士論文，第 34-36 頁，高雄，臺灣
11. 林義復 (2008) 應用計算流體模擬船舶岸壁效應之研究，國立高雄海洋科技大學航海科技研究所碩士論文，第 22-23 頁，高雄，臺灣
12. 陳彥志 (2009)，船舶追越與對遇的模擬研究，國立高雄海洋科技大學航海科技研究所，第 21-32 頁，高雄，臺灣
13. 黃智峰 (2016)，新北艦航行與大浪交互作用之研究，國立高雄海洋科技大學海事資訊科技研究所碩士論文，第 1-23 頁，高雄，臺灣
14. 洪添保 (2017)，規則波對貨櫃船橫搖之研究，國立高雄海洋科技大學海事資訊科技研究所碩士論文，第 61-63 頁，高雄，臺灣
15. Tasai F. and Takaki M. (1969), *Theory and Calculation of Ship Response in Regular Waves*, Sym on Deavorthiness of Ships, JSNA.
16. Salvensen N., Tuck E. O. and Faltinsen O. (1970), *Ship Motions and Sea Loads*, SNAME.
17. Wilson R.V., Carrica P.M. and Stem Fred. (2007), Simulation of ship breaking bow waves and induced vortices and scars, *International Journal for Numerical Method in Fluids*, Vol. 54, pp. 419–451.
18. Campana E.F., Peri D., Tahara Y. and Stern F. (2006), Shape optimization in ship hydrodynamics using computational fluid dynamics, *Computer Methods in Apply Mechanics and Engineering*, Vol. 196, pp. 634–651.
19. Eca L. and Hoekstra M. (2009), On the numerical accuracy of the prediction of resistance coefficients in ship stern flow calculations, *Journal of Marine Science and Technology*, Vol. 14: pp. 2–18.
20. Toxopeus S.L. (2009), Deriving mathematical manoeuvring models for bare ship hulls using viscous flow calculations, *Journal of Marine Science and Technology*, Vol. 14, pp. 30–38.
21. Delefortrie G., Vantorre M. (2009), Prediction of the forces acting on container carriers in muddy navigation areas using a fluidization parameter, *Journal of Marine Science and Technology*, Vol. 14, pp. 51–68.
22. Lo D. C, Su Dong-Taur and Chen Jan-Ming (2009), Application of computational fluid dynamics simulations to the analysis of bank effects in restricted waters, *Journal of Navigation*, Vol. 62, pp 477-491
23. Lo D. C. (2012), Numerical simulation of hydrodynamic interaction produced during the overtaking and the head-on encounter process of two ships, *Engineering Computations*, Vol. 29, pp. 83-101.
24. Hirt C. W., Nichols B. D. (1981), Volume of Fluid (VOF) method for free boundaries, *Journal of Computational Physics*, Vol. 39, pp.201-225.
25. Moraes, H. B., Vasconcellos, J. M. and Latorre, R. G. (2004) Wave resistance for high-speed catamarans, *Ocean Engineering*, Vol. 31, pp. 2253-2283.
26. Chen, P. F., Huang, C. H. (2004) An inverse hull design approach in minimizing the ship wave, *Ocean Engineering*, Vol. 31, pp. 1683-1712

27. Chen, P. F., Huang, C. H., Fang, M. C. and Chou, J. H. (2006) An inverse design approach in determining the optimal shape of bulbous bow with experimental verification, *Journal of Ship Research*, Vol. 50(1), pp. 1-14.
28. Kim, C. H., Chou, F. S. and Tien D. (1980) Motions and hydrodynamic load of a ship advancing in oblique waves, *Trans. SNAME*, Vol. 88, pp. 225-2

STUDY ON THE INTERACTION BETWEEN TUGBOAT NAVIGATION AND WAVES

*Meng-Ru Yu** *Guan-Lun Chen** *Reui-Kuo Lin***

* Department of Marine Engineering, National Taiwan Ocean University, Master student

**Department of Marine Engineering, National Taiwan Ocean University, Assistant Professor

Keywords: Tugboat, wave interaction, numerical simulation, experimental testing, navigational performance

ABSTRACT

This study focuses on the use of computational hydrodynamics. This study investigates the problems associated with the interaction between tugboat navigation and waves, aiming to gain insight into the effects of these interactions on tugboat motion and performance. The research methodology includes numerical simulations and experimental tests to evaluate the motion behavior of the tugboat under different wave conditions. For numerical simulation, we used an advanced Computational Fluid Dynamics (CFD) method to simulate the flow field of the tugboat under different wave conditions, in order to analyze the force and motion characteristics of the hull as affected by waves. For the experimental tests, model tests and real size tests were conducted to verify the numerical simulation results and to obtain more realistic motion data. The findings show that wave conditions have a significant effect on the stability of motion and speed performance of a tugboat. Under certain wave frequencies and directions, a tugboat may be subjected to rocking and rolling caused by wave excitation, which further affects its maneuvering and navigation efficiency. The results of our study provide important references for the design and operation of tugboats to cope with the challenges they may face under different sea conditions.