

規則波對散裝船橫搖之研究

鄭力齊*¹ 吳正謙* 林瑞國**

*國立臺灣海洋大學輪機工程學系碩士生
*國立臺灣海洋大學輪機工程學系助理教授

關鍵詞：散裝船、計算流體力學、流體體積法、橫搖、六自由度船舶運動

摘要

隨著全球經濟和科技的發展，智慧化是船舶發展的必然趨勢。將自動控制用於船舶航態控制系統以達到改善其水動力性能的目的是當前的研究熱點。臺灣為海島國家，缺少原物料等資源，因此原物料大多仰賴進口輸入我國，散裝船舶便在其中擔任重要角色。本研究利用計算流體力學(Computational Fluid Dynamics, CFD)軟體建置散裝船船舶模型，航行中於規則波作用下，分析船模於航行中與波浪交互作用流場特性分析其所產生的橫搖之運動。選用流體體積法(Volume of Fluid, VOF)追蹤自由液面或流體界面捕捉船舶在規則波作用下六自由度船舶運動的數學模型，並計算其船舶阻力、船舶興波效應以及流場相關變化，再把數據加以分析不同船速以及不同波浪狀況下的流場速度、壓力場、船舶阻力，最後透過後處理軟體將船模所受阻力及橫移力相關變化及船模的速度和壓力、阻力與橫搖力等變化場呈現，以期藉由本研究模擬數據可提供後續散裝船舶在操作實務相關之應用與船舶設計參考。

前言

隨著今日全球化的發展,使航運業在世界貿易中佔據著核心地位。全球的國際貿易約 80%經由海運來達成，其中散裝船通常用於運輸散裝貨物，如煤炭、礦砂、穀物、礦石等，這些貨物沒有被裝箱或包裝，而是以散裝形式裝載到船上。對於大宗散裝貨物的運輸更加有效率。相較於其他類型的船隻，散裝船可以容納更多的貨物，從而減少了單位貨物的運輸成本。

隨著散裝船的噸位雖然不斷增加,但在海上航行的風險卻從未消失,尤其當遭遇惡劣氣候時,船舶運動姿態的大幅變化,更加危及船上人員、器械設備及載運貨櫃的安全。由於波浪會造成包含六個自由度(six degrees of freedom, 6-DOF)的船體運動，其中橫搖(Rolling)運動是船舶最常見的運動形式,也是最危險的運動模態,因為船舶傾覆大多都是由於橫搖運動幅度過大所引起的[1]。

由於船舶航行於在波浪中反應之實際量測花費時間較長，因此實際量測數據並不普遍[2]。雖然船舶在波浪中的耦合運動為一非常複雜的問題，但隨電腦計算能力的增強、網格生成技術的提高以及數值演算法的改進，許多商業軟體在實務上的應用已變成現今的一種趨勢。目前計算流體力學(Computational Fluid Dynamics, CFD)對流體的數值模擬已可達到相當高的可信度與精確度，因此普遍運用於船舶與流體耦合運動的數值計算[3]。

本研究使用 CFD 分析軟體 ANSYS Fluent®模擬將可以大幅加速結果預測與減少時間與人力成

本，且將船舶運動相關現象運用 ANSYS Fluent®軟體得到模擬數據後予以分析，進行航行時會遭遇規則浪況下進行船舶模擬相關實驗。



圖 1. 波浪造成船舶橫搖引發散裝船傾斜之情況
(資料來源：2nd Officer KOSTIANTYN POGORELTSEV - Seafarer Profile)

文獻回顧

耐海性能為船隻在海上抵禦風浪的程度，考慮耐海性能的基本因素是船舶在波浪中運動反應的預測，在船體的六個自由度運動中，又以橫搖縱搖(rolling & pitching)及起伏(heaving)的問題對耐海性能影響最為最大。在 19 世紀時 Froude (1861)[4]和 Kriloff (1896) [5]已有探討船舶運動之衡搖及縱搖，Korvin-Kroukovsky[6]在空氣動力學中細長體理論的基礎上將船舶勢流理論中的三維問題化簡為二維問題，假設船體沿船長方向切分成不同等分，將每一截片求得積分後及可得出船體所承受的總力，初期只能計算迎浪情況下的起伏和縱搖運動。在 1970 年左右，Salvesen 等[7]在此基礎上提求解船舶運動量

¹ 聯絡作者 鄭力齊 (cherry201599@gmail.com)

有著不錯的計算結論，並且也在文中提出較新的二維截片理論，可以求出更多船舶自由度運動結果。

勢流理論的三維船舶耐波性分析開始出現。三維船舶擾動速度勢求解的關鍵，在於非線性物表面條件和自由液面條件的滿足。早期對此問題的處理方法多採用所謂的 Neumann-Kelvin (N-K) 方法。N-K 法基於層流對非線性的物體表面條件和自由液面條件進行線性化，並要求速度勢在三維物體表面的平均位置上滿足線性化的物體表面邊界條件，而在平靜自由液面上滿足線性化的自由液面邊界條件。求解 N-K 問題最常用的數值方法是基於自由液面格林函數的邊界值積分方法。Garrison(1975)[8]就是使用頻域 Green's 函數針對海洋平台進行波浪耐波性研究，除此之外，另一種常見三維分析即為 Rankine 源點法，此方法主要針對興波效應計算船舶之興波阻力，Dawson(1977)[9]最初即使用此方法研究船舶自由液面興波問題，但是在預估小振幅運動量上，二維截片法相對計算效率高，三維小板法比較適合運用在船舶大幅度運動預估上[10]。

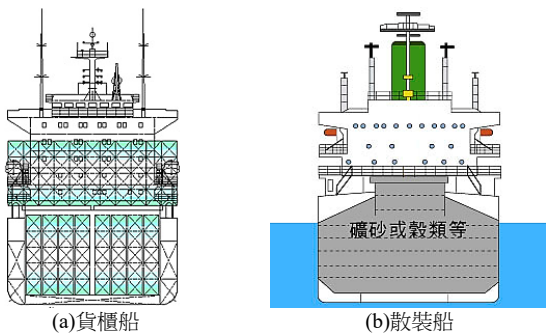


圖 2. 貨櫃船與散裝船貨艙剖面圖
(資料來源：國立海洋科技博物館)

計算流體力學 (CFD) 是求解黏性流場中船舶運動的重要方法，其過程主要是求解雷諾時均方程式 (Reynolds Averaged Navier-Stokes, RANS) 的方法，求解思路是將計算域劃分為不同等分的網格，在網格上對方程式進行離散，將偏微分方程簡化為代數方程組。1970 時大多是在勢流理論的基礎上利用邊界層理論來計算黏性流場。1978，Abdelmeguid 等[11]基於傳熱問題求解了船舶的三維粘性繞流問題。1980 年代，對黏性流的計算逐漸發展。Patel[12]透過流場試驗的測量結果，從物理上分析顯示了船舶 CFD 數值方法應採用何種近似方法。自 1990 年代以來，隨著電腦技術的進步，大量基於 CFD 的軟體被用於求解船舶耐波性問題，而國內近幾年也有許多學者針對船體運動與波浪阻力相關分析。張(2013)[13] 探討三體船在規則波中運動性能以及阻力分析，林義復[14]利用 CFD 軟體模擬貨櫃輪航行於狹窄水道中產生不對稱流於船舶與海岸之

間，分析其岸壁效應對流場的影響，Maki 與 Marc[15]曾依據分歧理論，利用數值預測船舶順浪時產生衝浪情況條件；林榮泰[16]則利用 CFD 軟體模擬船舶在航行中遭遇不同入射角度的波浪與波高時之相關數據對船舶運動進行研究。在以上各研究中，可發現 CFD 的技術於分析流體與船舶運動的交互作用已被廣泛的應用。

理論基礎

散裝船

散裝船主要作為黃豆、玉米，礦砂、鐵磚及煤炭等均質且大宗貨物以散裝運送之運輸船。因為散裝船的貨種單樣化，不需要包裝成捆、成包、成箱的裝載運輸，不怕擠壓，便於裝卸，所以都是單甲板船。用於糧食、煤、礦砂等大宗散貨的船，通常分為以下幾個級別：

- (1) 總載重噸 (Dead Weight; 簡稱 DWT) 為 100,000 噸級以上，通常稱為好望角型散裝船：由於船型大，無法通過巴拿馬運河，必須繞道南非好望角，因此稱為好望角型船，亦稱海岬型。
- (2) 總載重噸為 60,000 噸以上，通常稱為巴拿馬型散裝船：這是一種巴拿馬運河所容許通過的最大船型，船長要小於 245m，船寬不大於 32.2 米，最大的容許吃水為 12.04m，目前巴拿馬型的總載重量大多為 76,000 噸級。
- (3) 載重噸為 35,000 噸級到 40,000 噸級，稱為輕便型散裝船：吃水較淺，世界上各港口基本都可以停靠。
- (4) 總載重噸為 20,000 噸級到 27,000 噸級，稱為小型散裝船：可駛入美國五大湖泊的最大船型。最大船長不超過 222.5m，最大船寬小於 23.1m，最大吃水要小於 7.925m。



圖3. 中鋼運通 175,600DWT 散裝船卓越成長輪
(資料來源：中鋼運通)

海運業依照其提供的服務性質，主要分為定期航運(liner shipping)與不定期航運(tramp shipping)。定期航運的航線固定，營運過程中應用國際海事組織所制定的船舶能源效率管理計劃(Ship Energy

Efficiency Management Plan)和能源效率營運指數 (Energy Efficiency Operational Indicator, EEOI)可有效地評估及改善船舶能源效率。然而，散裝船舶經營彈性大，營運過程中風險也較高，影響船舶能源效率之因素經常由於外部環境變動而不斷更迭，部份影響因素之間尚有一定程度上的相關性或因果性存在；並且散裝航運多無固定的船期與航線，每航次裝卸貨港口之間的航線差異性將直接影響 EEOI 的計算結果，因而加大了長期衡量散裝船舶能源效率管理成效的困難度。



圖4. EVER IMPERIAL, Kamsarmax 散裝船下水正式營運 (資料來源：First Steamship Group)

散貨船是一種專門運輸穀物、煤、礦砂、水泥等大宗貨物商船，具有容量大、安全、高效和耐久性等特徵。第一艘散貨船始建於 1852 年，如今，散貨船佔世界商船隊的 15%至 17%[2]。從小型散裝船到能夠攜帶載重噸 (DWT) 達 40 萬噸的大型礦砂船。大部分散貨船的船東來自希臘、日本和中國，超過四分之一在巴拿馬註冊。82%的散裝船在亞洲建造，其中韓國建造的總噸位最大。



圖5. 我國散裝船運市場(資料來源：慧洋海運)

雜貨船

載運其他雜類貨物或無法以標準包裝型式給予固定貨物之運輸船。雜貨船應用廣泛，在世界商船隊中噸位總數居首位。在內陸水域中航行的雜貨船噸位有數百噸、上千噸；而在遠洋運輸中的雜貨船可達 2 萬噸以上。雜貨船有良好的經濟性和安全性，不必追求高速。雜貨船有較強的縱向結構，船

體的底多為雙層結構，船艏和船艉設有前、後尖艙，平時可儲存淡水或裝載壓艙水以調節船舶縱傾，受碰撞時可防止海水進入大艙，達到安全作用。

船體以上設有 2~3 層甲板，並設置幾個貨艙，艙口以水密艙蓋封蓋住以免進水。機艙佈置在中部或在艉部，各有利弊，佈置在中部可調整船體縱傾，在後部則有利於載貨空間的佈置。在艙口兩側設有吊貨桿，為裝卸重大件貨，通常還裝有重型吊桿。為提高雜貨船對各種貨物運輸的良好適應性，能載運大件貨、貨櫃、雜貨及散貨，現代新建雜貨船常設計成多用途。



圖6. 四維航運 12,000 噸雜貨船 (資料來源：四維航運)

統御方程

本文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：

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

其中 ρ 為密度(density)、 t 為時間(time)、 \vec{v} 為速度向量(velocity vector)、 ϕ 為變數(dependent variable)、 Γ 為耗散數(diffusion coefficient)與 S 稱為源項(source term)，該方程式分為連續方程(continuity)、動量方程(momentum)等傳輸方程如下：

(a) 連續方程(continuity)

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

(b) 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：

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

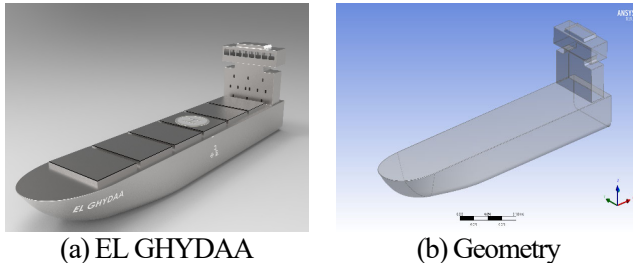
若流體為不可壓縮流時 $\nabla \cdot \vec{v} = 0$ ，故 $p' = p$ ，而且分子之黏滯性變數 μ 為常數，並從應力發散之後隨著消失。對於層流來說，其黏滯性變數 μ 與剪力率 (shear rate) 相關，如同在非牛頓性流體中， μ 值在非等溫流體中與溫度相關。

結果與討論

問題描述

本研究側重於規則波對散裝船橫搖之影響，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衝擊的分析來獲得其船型的相關數據，進而做後續的分析。

本研究所採用船模，分別為 EL GHYDAA 散裝船 (bulk carrier) 幾何外型如圖 7。根據 KCS 船線座標表，以軟體來繪製船模，取靜水面與舢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 STL (Stereo Lithography) 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。



(a) EL GHYDAA (b) Geometry

圖7. 散裝船 (bulk carrier) 船模外觀 CAD 圖

與網格無關測試

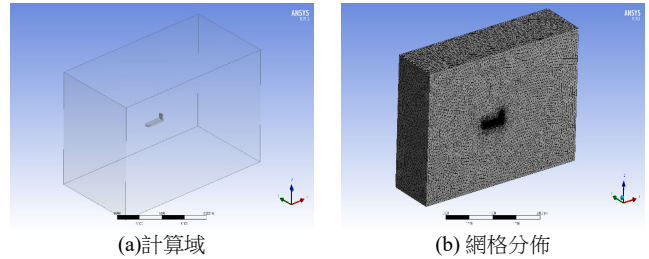
首先，我們先以散裝船 (bulk carrier)，測試船舶航行中與波浪水動力交互作用，以證明本模型設計及答案正確性與否。船舶航行速度設定：散裝船的航行速度為 10 節 (knots) 約 5.144 m/sec，底部 (water) 為無滑移 (no-slip) 壁面，頂部 (air) 與左右兩邊均為無窮遠處，出口處 (outlet Pref=0 Pa)，數值模擬模式選定：VOF (二相流體，air/water) 及幾何外型示意圖如圖 8 所示及表 1-2。

表 2. 實船航行船速數據

節(knots)	kph	m/s	節(knots)	kph	m/s
5	9.26	2.57	12	22.22	6.17
8	14.82	4.12	15	27.78	7.72
10	18.52	5.14	20	37.04	10.29

表 2. 散裝船於平均航行船速 10 (knots) 不同網格數

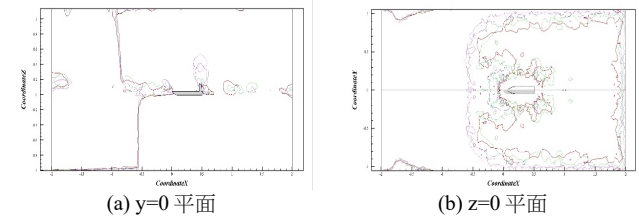
mesh	coarse	middle	fine-1	fine-2
Element	0.06	0.05	0.04	0.03
Face sizing	0.005	0.005	0.005	0.005
Nodes	668,240	829,061	1,114,790	1,769,996
Elements	470,987	584,226	786,496	1,252,614



(a) 計算域 (b) 網格分佈

圖8. 散裝船 (bulk carrier) 船模計算域及網格分佈

如圖 9 所示，根據網格測試結果發現：散裝船 (bulk carrier) 網格數大小於 coarse 網格 (668,240)、medium 網格數 (829,061)、fine-1 網格 (1,114,790) 與 fine-2 網格 (1,769,996) 四組結果極為相似，而網格數越密其與實驗誤差越低，在網格數為 829,061 時，已經與 1,088,810 誤差在 5% 以內。

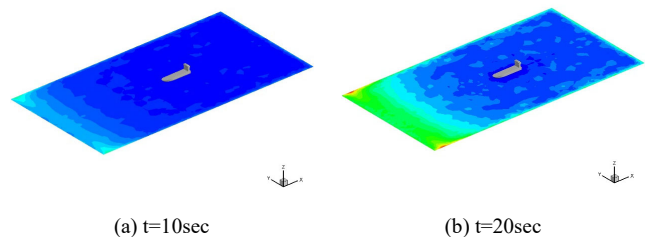


(a) y=0 平面 (b) z=0 平面

圖9. 散裝船 (bulk carrier) 於時間 t=50 秒 (y=0, z=0) 平面與網格數無關

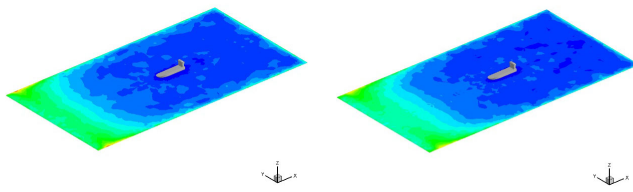
隨時間變化航行運動

散裝船 (bulk carrier) 波浪運動的航行速度分別 v 為 10 節 (knots)，共取實船航行常見船速，其上、下及出口邊界條件均為無窮遠處，如圖 9 為船舶在不同的航行速度下，隨著時間 $t=10\sim 40$ 秒變化時的流場速度變化 (等高線分佈)，截取位置為船舶的 $x-z$ 切面圖。圖 10 表示水面下 5 公尺的 $water-vof$ 變化 (等高線分佈圖)， $water-vof$ 變化利用色階的變化來顯示，紅色代表高壓區，藍色代表低壓區。

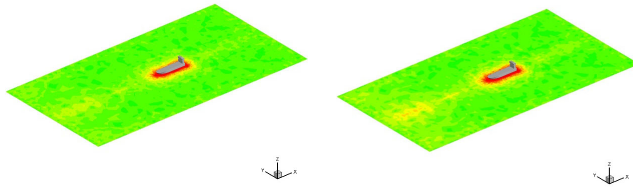


(a) t=10sec

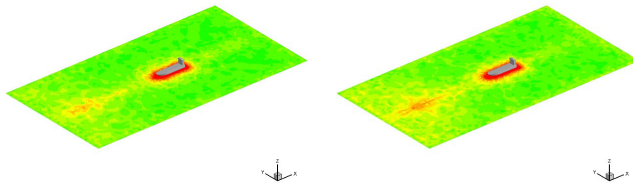
(b) t=20sec



(c) t=30sec (d) t=40sec
圖10. 散裝船(bulk carrier)於航行平均速度 10 節(knots)時，隨時間變化之速度等高線分佈

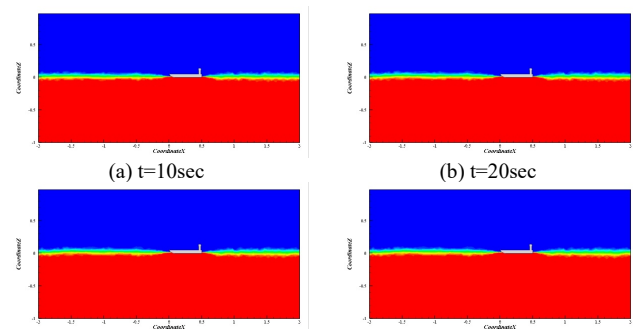


(a) t=10sec (b) t=20sec



(c) t=30sec (d) t=40sec
圖11. 散裝船(bulk carrier)於航行平均速度 10 節(knots)時，隨時間變化之 water-vof 等高線分佈

不同波浪週期和船舶角度變化(橫搖)；不同波浪週期和船舶角速度變化(橫搖)。而流場速度則使用矢形向量來呈現，速度大小則依線段長短來判別。由圖可看出波浪在傳動時，水底附近流速小，但流場壓力大，且以波峰對應底處流場壓力最大。另外由於規則波行進方向由左至右，速度向量在船舶右側明顯變小且呈現不規則，此係因船舶阻擋波浪傳動之故。



(a) t=10sec (b) t=20sec
(c) t=30sec (d) t=40sec
圖12. 散裝船(bulk carrier)於航行平均速度 10 節(knots)時，隨時間變化在對稱面(y=0)之 water-vof 等高線分佈

波浪尚未通過船模之前，壓力呈現規則狀分佈，當波浪通過船模之後，壓力則以不規則狀分

佈，且壓力明顯增強。本研究在波浪週期 10 秒時，浪入射角度為 0 度時(頂浪)船舶起伏位置隨著波浪長時間的作用，船舶起伏震盪有加大趨勢，因船舶起伏頻率與波浪頻率相進而造成的結果。

參考文獻

1. 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
2. 曾慶耀、林港富、李信德，「船舶在波浪中運動反應之量測」，國立海洋大學第二十屆海洋工程研討會論文，1998
3. 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
4. Froude, W., On the rolling of ships. 2nd Session of the Institution of Naval Architects, March 1861, 1861.
5. Kriloff, A., A new theory of the pitching motion of ships on waves, and of the stresses produced by this motion. (No Title), 1896.
6. Korvin-Kroukovsky, B. Investigation of ship motions in regular waves. in Stevens Institute of Technology, Experimental Towing Tank, Hoboken, New Jersey, USA, Annual Meeting of the Society of Naval Architects and Marine Engineers, SNAME Transactions, Paper No. 7, Paper: T1955-1 Transactions. 1955.
7. Salvesen, N., E. Tuck, and O. Faltinsen, Ship motions and sea loads. 1970.
8. Garrison, C., Hydrodynamics of large objects in the sea part ii: motion of free floating bodies. Journal of Hydro-nautics, 1975. 9(2): p. 58-63.
9. Dawson, C. A practical computer method for solving ship-wave problems. in Proceedings of Second International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics. 1977.
10. 張益銘(2023)，特殊船舶幾何外型流場與波浪運動之數值模擬，國立海洋大學輪機工程學系研究所，碩士論文
11. ABDELMEGUID A M, MARKATOS N C, SPALDING D B. A method of predicting three-dimensional turbulent flows around ship's hull[C]//Proceedings International Symposium on Ship Viscous Resistance SSPA. Goteborg, Sweden: Gotab Kungälv Ltd., 1978, 3: 1-24.
12. PATEL V C. Some aspect of thick three-dimensional boundary layers[C]//Proceedings of 14th Symposium on Naval Hydrodynamics. Ann Arbor, USA: National Academy Press, 1982: 999-1040.
13. 張育璋，高速三體船在規則波中的運動及阻力性能之研究，in 工程科學及海洋工程學研究所. 2013, 國立臺灣大學: 台北市. p. 108.
14. 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
15. Atsuo Maki, Naoya Umeda (2009), "Numerical prediction of the surf-riding threshold of a ship in stern quartering waves in the light of bifurcation theory," J. Mar. Sci. Technol, Vol. 14, pp.80-88.
16. 林榮泰(2009)，船舶航行中與波浪交互作用之研究，國立高雄海洋科技大學航海科技研究所，碩士論文

Research of Bulk Carrier Parametric Roll Motion in Regular Wave

Cheng, Li Chi* Wu, Cheng-Chien* Lin, Reui-Kuo**

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

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

Keywords: bulk carrier, Computational Fluid Dynamics (CFD), fluid volume method, Rolling, Six degrees of freedom ship motion

ABSTRACT

With the development of global economy and technology, intelligence is an inevitable trend in ship development. Applying automatic control to ship navigation control systems to improve its hydrodynamic performance is a current research hotspot. Taiwan is an island country and lacks resources such as raw materials. Therefore, most raw materials are imported into my country, and bulk ships play an important role. This study uses Computational Fluid Dynamics (CFD) software to build a bulk ship model. Under the action of regular waves during navigation, the flow field characteristics of the interaction between the ship model and waves during navigation are analyzed to observe the rolling effects caused by it. The Volume of Fluid (VOF) method is used to track the free liquid surface or fluid interface to capture the mathematical model of the six-degree-of-freedom ship motion under the action of regular waves, and calculate the ship resistance, ship wave forming resistance and related changes in the flow field. The data is then analyzed for flow field speed, pressure field, and ship resistance under different ship speeds and different wave conditions. Finally, the post-processing software is used to analyze the related changes in resistance and lateral force of the ship model, as well as the speed, pressure, and resistance of the ship model. It is expected that the simulation data of this study can provide reference for subsequent applications and ship design related to the operation practice of bulk ships.