

LNG 船舶液態艙橫搖數值模擬之研究

柯瀚晟*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：液化天然氣(LNG)、晃蕩現象(Sloshing)、船舶運動、甲烷、自由液面、數值分析

摘要

液化天然氣(Liquefied Natural Gas, 簡稱 LNG)是從地底油氣田中或煤層中，開採出來的碳氫化合物和非碳氫化合物的混合氣體，是一種潔淨的高效能源，主要成份為甲烷，因應國際天然氣需求量大增，也使得 LNG 的海路運輸成為貿易市場上一個極其重要的環節，考慮到 LNG 行業的巨大前景，船東的新船投資意願逐年增加及大型化的發展趨勢且需遠距離運送，據統計截至 2022 年全球共約有 465 艘液化天然氣船。LNG 船航行於變化莫測的汪洋大海上且因海上環境複雜、氣象多變，隨時可能遇上狂風、巨浪、暴風、雷電、海嘯等人力難以抗衡的天然災害襲擊，因而造成劇烈的晃動使得液艙內產生晃蕩(Sloshing)現象。

本研究將採用分析軟體進行液貨艙在不同船舶運動下所造成的晃蕩進行數值分析。本文研究針對藉由 LNG 船舶於航行中之水動力現象，探究現今 LNG 船舶在不同航速時波浪交互作用下的影響和情形。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將以三維方式呈現，以期藉由本研究模擬數據可提供後續高風險船舶在操作實務相關之應用與船舶設計參考。

前言

台灣是個四面環海的島嶼，不管是貨物的運輸或海洋資源的運用，都是需要船舶來幫助我們在海上的作業。尤其是政府大力提倡藍色公路的開發，還有兩岸的三通，客貨船及遊艇等相關造船產業將積極的發展舒適性的船舶來服務未來民眾於海上的觀光旅遊。不過船在海面上會因海浪或風力的影響而造成搖晃，這將會使旅客產生暈船的不適，也因此造船業首先要克服這船舶搖晃的問題。

船舶在海上航行，由於風浪的影響下而產生六個自由度的運動，且彼此之間又會相互影響。這六個自由度分別為縱移(surge)、橫移(sway)、起伏(heave)、俯仰(pitch)、橫搖(roll)和平擺(yaw)，如圖 1 所示[1]。對這些運動已有許多研究利用牛頓第二運動和拉格朗日的方法(Lagrange's method)，並配合流體力學和動力學建立了基本的運動方程式[2]。不過要對於這六個自由度的運動作精確的分析其之間的關係，尤其是應用於實際海上的情況，實在有許多未知的變數而使之不容易；故一般都是對於船舶的橫向搖擺(roll)來做研究[3-4]，除了在這個方向的翻覆機率較大，也可以應用於縱向的俯仰減搖。

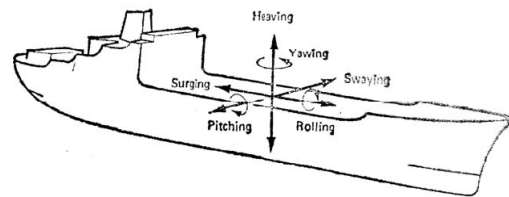


圖1. 船舶六個自由度[1]

文獻回顧

當船隻在波浪中航行時，船體運動與在平靜水面的截然不同，主要是因為波浪、風和潮流等外力所產生的作用力。在這些外力的作用下，船隻的運動反應會變得更加複雜，而各維度的運動會互相影響。正因為波浪中的船體運動方程式很複雜，早期的研究藉由各種假設把船體運動區分為耐海性與操縱性。因此，如要模擬船舶航行在波浪中的運動反應時，除了要了解平靜水面的操縱性能之外，還必須知道船舶在波浪中的耐海性能，如此才有辦法模擬出波浪對船體運動的影響[5]。在操縱性方面，有

¹ 聯絡作者 柯瀚晟 (a96658661@gmail.com)

關平靜水面的操縱運動方程式已有相當完整的發展，例如 Hirano[4]和 Inoue 等人[5]以縱移、橫移、橫搖、平擺和螺旋轉速變化組成平水中的操船運動方程式，線性與非線性的操縱性導數則由眾多船模實驗結果歸納成經驗公式，再以數艘船舶進行迴旋、zig-zag 和螺旋試驗的模擬來驗證此操縱程式的可靠性。

Kijima & Nakiri [6]以縱移、橫移和平擺組成操縱運動方程式，除了把船艙形狀的影響納入操縱性導數中，也對舵力的公式進行修正。藉由與船模實驗結果的比較，操縱性導數與舵力公式的修正可以更準確的推測出迴旋運動，而這些修正對實船的適用性則仍待驗證。目前市面上之減搖方式及相關文獻資料如下：

1. 舳龍骨：

是一種裝於船中兩舷舳部外側，與舳部外板垂直的長條形板材結構。在船橫搖時擾動船體周圍的流場，使船產生附加阻尼，通過增加橫搖阻尼來達到減搖的目的。它在任何情況下都有效，減搖效果，效果大約為 20%~25%。舳龍骨結構簡單、造價低、效能高、沒有運動部件、便於維護，被廣泛的應用到各類船舶。目前幾乎所有海船都毫無例外地裝有舳龍骨，它已成為海船船體的一部分。所以，在一般情況下所謂減搖裝置系指舳龍骨以外的減搖措施和設備[7]。

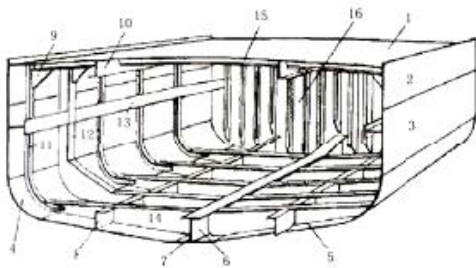


圖2. 參考文獻 Bilge Keels[8]

2. 減搖水艙：

自從 1911 年佛拉姆成功推出被動 U 型水艙以來，這種減搖裝置已經有 100 多年的發展歷史，減搖水

艙從結構上可以分為兩大類型：U 型減搖水艙和槽型水艙圖，通常也稱為 Frahm 水艙和 Flume 水艙。U 型水艙在控制上可以是完全被動的，也可以是由氣閥和壓縮機進行部分控制的可控被動式水艙，還可以是水艙液壓泵或者渦輪送風機完全控制的主動控制式水艙[9]。槽型水艙通過改變水艙的形狀或通過內部障礙物或兩者兼用把阻尼結合到液體中去。實際應用的減搖水艙在結構形式上可能千差萬別，但都可以歸結到 U 型水艙和槽型水艙兩大類型之一而應用最多的是可控式 U 型被動減搖水艙 [10]。

3. 舵減搖：

由於作用在舵上的水動力的作用中心與船重心之間存在一定高度差，轉舵時不僅會產生改變航向的艏搖力矩，同時還會產生橫搖力矩。另外，由於船體繞艏搖軸的質量慣性矩比船體繞橫搖軸的質量慣性矩大得多，一般為幾倍至數十倍，因此橫搖的自搖周期比艏搖周期小，這種差異變現為橫搖對操舵的響應比艏搖快。舵減搖的原理正是基於這兩點差異，在航向控制舵(低頻)上疊加橫搖減搖操舵(高頻)，正確控制舵的動作(包括幅度、方向、相位)，有效地利用舵產生的橫搖力矩部分抵消波浪產生的橫搖擾動力矩，實現在控制航向的同時減小橫搖 [11]。

4. 減搖重塊：

通過移動重物來改變船體重心的位置，從而保證船舶的平穩性。這種減搖裝置在船上布置難度很大，且功率太大，現在很少有船願意選裝。資料表明，日本有技術人員在研究對該技術進行改進，以便更適合在船上應用。

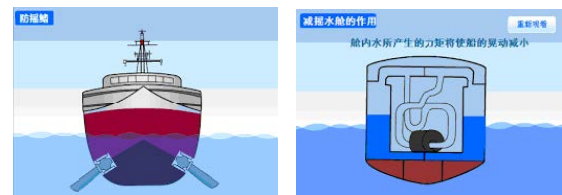


圖3. 通過移動重物來改變船體重心的位置

液化石油氣液艙動態橫搖的設計首先要考慮與船體的適配，同時在設計中要重點考慮水艙的阻尼與週期特性，其中週期特性是水艙最基本的特性參數，適用週期範圍越寬，減搖效果越理想。針對變週期減搖水艙的相當長度與一般 U 型水艙相當長度計

算的不同之處—其連通道寬度可調且邊艙面積隨邊艙外壁角變化而變化，通過積分方法推導出了可變週期減搖水艙相當長度的計算公式，提出了一種適用於變週期減搖水艙的估算方法。所設計的變週期減搖水艙採用連通道擋板控制改變週期，避免了氣閥控制的時間延遲問題，還可根據船體運動規律調整連通道阻尼擋板以提高減搖效果。

5. 肋骨系統(framing system)：

分為橫向肋骨系統、縱向肋骨系統及混和肋骨系統，用於承受海水壓力和承受橫桁(Beam)所傳遞之壓力並支撐甲板上層結構重量，橫向肋骨、底肋板、橫樑構成之環狀結構，連接船底與甲板，可抵擋橫搖(roll)及海浪衝擊造成之橫向變形，散裝貨輪常用橫向肋骨因其船長較短縱向強度問題較低，油輪、貨櫃輪常用縱向肋骨因其船長較長或船寬較大縱向強度問題較大，特種功能船(LNG 船)因考慮其航行穩定度而常用混和肋骨系統。

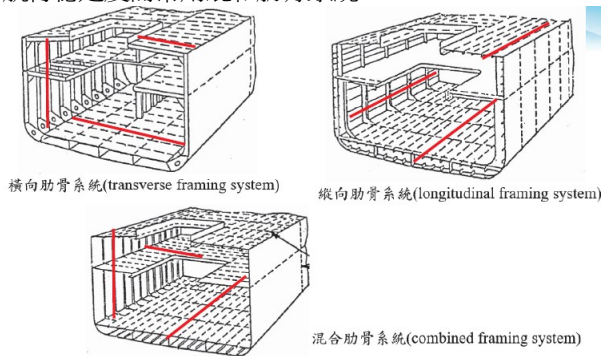


圖 4. 肋骨系統(framing system)簡圖

研究方法

當船隻在波浪中航行時，船體的運動與在平靜水面截然不同，主要是因為波浪、風力和潮流等外力所產生的作用力。在這些外力作用下，船隻的運動反應會變得更加複雜，而各維度的運動亦會相互影響。因此，近年來有學者以簡化過的數學模式，或由眾多實驗結果歸納成的經驗公式，作為其模擬船舶的非線性運動方程式。

一般來說，船舶在波浪中產生的搖盪運動，影響著船舶的使用性能和安全性。其中，橫搖的運動顯著而影響嚴重，為了減少船舶在波浪中的搖盪，船上一般都會加裝減搖裝置，如減搖水艙等。橫搖受粘性作用影響，減搖水艙中流動複雜且有強非線性和隨機性，目前對此的理論計算還不能用於工程實際。橫搖受粘性作用影響，減搖水艙中流動複雜且有強非線性和隨機性，目前對此的理論計算還不

能用於工程實際。利用計算流體力學(Computational Fluid Dynamic, 簡稱 CFD)的數值模擬方法為解決船舶橫搖預報、減搖水艙研究等問題提供了一種新的實現手段。本研究將以一艘化學液體船(VLCC、LNG 與 LPG 等)為例，以利用 CFD 的 RANS 方法，計入粘性和自由面的影響，透過數值模擬，針對其橫搖預報和減搖深入探討較為全面的分析研究。

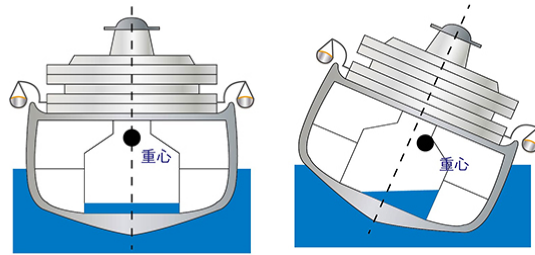


圖 5. 可控式減搖水艙系統

減搖水艙包含兩個邊艙和矩形截面的連通道結構簡圖如圖 6。茲將本文研究方法說明如下：

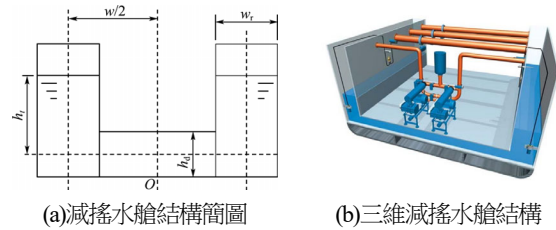


圖 6. 搖水艙結構與三維減搖水艙結構簡圖

統御方程式

本研究所採用之熱流分析方程式是使用層(紊)流流體運動下分析質傳及熱傳的統御方程式，而將紊流視為非常複雜之非定常流(unsteady flow)，以此觀念發展出之方程式，使得所使用之統御方程式也非常適用於紊流模式中。這個統御方程式是由質量、動量及在非等熵流的能量項皆遵守雷諾傳輸定理之守恆原則(conservation principle)下所組成的方程組，稱之為雷諾均值 Navier-Stokes 方程式，其通式(scalar advection-diffusion)可寫下式

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

其中 ρ 為密度、 t 為時間、 \vec{v} 為速度向量、 ϕ 為因變數、 Γ 為耗散係數(diffusion coefficient)及 S 為源項(source term)，該方程式分為連續、動量及能量等傳輸方程式，分別介紹如下：

(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)

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

流場之動量傳輸乃以動量傳輸方程式求解，將上式(2)中應力發散之耗散項部份置於等號左邊，可寫成對流耗散方程式，如下式：

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

其中 p' 是壓力修正項，如下所示：

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

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。

紊流模式

紊流現象常見於煙流擴散之氣流運動中，所以了解紊流特性是研究煙柱括散運動中非常重要的一環；紊流為三維 (three dimension)、紊亂 (random) 且不規則 (irregular) 的流體結構，它常隨時間與空間而變化，艦艇上層結構流場為具有層流 (laminar)、過渡流 (transition) 及紊流 (turbulence) 的複雜流場，很難用單一紊流模式 (turbulence model) 準確地模擬出此一流場。故欲以電腦準確地模擬其細微結構 (micro structure) 是相當不易且極具挑戰性的工作。

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 $\kappa - \epsilon$ 紊流模式說明如下：低雷諾數 $\kappa - \epsilon$ 紊流模式是標準型 (standard) 之 $\kappa - \epsilon$ 紊流模式之修正型，使得於低雷諾數 (5,000~30,000) 之流體運動中仍能準確計算。此模式應用於低雷諾數流體運動中時，包括渦流-黏滯之耗散 (damping) 項，據以修正紊性耗散 (ϵ) 之定義，使得於靠近牆邊時趨近於零，並修正方程式中之源項，這個方程式描述紊流模式

$$\mu_T = C_\mu f_\mu \rho \frac{\kappa^2}{\epsilon} \quad (6)$$

(d). 紊流動能方程

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} k) - \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] = f_1 \quad (7)$$

(e). 紊流動能消散率方程

$$\frac{\partial \rho \epsilon}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \epsilon) - \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\epsilon} \right) \nabla \epsilon \right] = C_1 \frac{\epsilon}{\kappa} \cdot [P + C_3 \max(G, 0)] - C_2 f_2 \rho \frac{\epsilon^2}{\kappa} + E \quad (8)$$

其中 $f_1 = P + G + \rho \epsilon - D$ 、 $D = 2\mu(\nabla \kappa^{0.5})^2$ 、區域性雷

諾數定義為 $R_T = \frac{\rho \kappa^2}{\epsilon}$ 、 $f_2 = 1 - 0.3 \exp(-R_T^2)$ 、 $E = 2 \frac{\mu \mu_T}{\rho} (\nabla \nabla \vec{v})^2$ 、及 $f_\mu = \exp \left[\frac{-3.4}{(1 + R_T/50)^2} \right]$ 。

數值模式

本文應用 CFD 商務軟體 ANSYS Fluent[®] 對減搖水艙進行數值模擬計算：

1. Gambit[®] 建模：

首先在 Gambit 中進行 3D 建模，網格均為六面體形狀，尺寸為 0.1m，在氣液交界處對網格進行適當加密，以保證計算精度。

2. 控制方程和湍流模型：

在水艙的數值模型中，對於水艙中的水和空氣的相互作用，作為兩相 (水和空氣) 流處理，自由面就是水和空氣的交界面，自由面使用 VOF 方法處理。這樣，該數學模型的控制方程包括連續性方程、體積分數方程、動量方程，以及 Standard $k - \epsilon$ 湍流模型，模型常數 $\sigma_k = 1.0$ 、 $\sigma_\epsilon = 1.0$ 、 $C_1 \epsilon = 1.44$ 、 $C_2 \epsilon = 1.92$ 、 $C_\mu = 0.09$ 。

3. 水艙的運動形式：

為計算簡便，將水艙的運動形式進行簡化，令水艙繞其底艙中心軸處進行幅值為 5° ，週期分別為 7.5、10 和 14s 的簡諧運動。本研究利用 Fluent 裡的用戶自訂 (UDF) 功能，借助 Fluent 所提供的預定義巨集編制 C 語言程式 (簡稱 UDF 檔)，通過解釋性編譯使該 UDF 檔動態地連接到 Fluent[®] 中進行求解。

4. 初始條件及求解：

採用有限體積法來對控制方程進行離散求解。瞬態項、對流項和擴散項均採用二階迎風格式，壓力-速度項採用 PISO (pressure implicit split operator) 演算法進行反覆運算計算。計算初始條件：壓強採用靜水壓強，其他所有待求變數均為零。

5. Fluent[®] 求解器設定：

在模擬中採用基於壓力 (pressure-based) 的求解器，選用隱式求解方式 (高斯/賽德爾對稱塊方法)，對流形式的內插方案採用一階迎風 (first order upwind) 演算法。單元體重心處結構變數的梯度應用格林-高斯基於單元體 (Green-Gauss cell based) 方法；對於壓力項的插值，採用 PRESTO 插值方式，該方式對於像水艙這樣的有劇烈彎曲區域的流體計算有很好的計算效果。壓力-速度耦合採用 PISO 演算法進行反覆運算計算。在 operation condition 選項中設置重力，

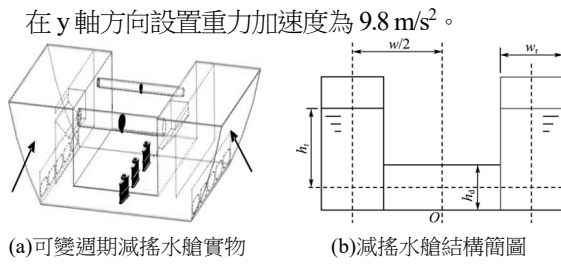


圖 7. 可變週期減搖水艙實物與減搖水艙結構

結果與討論

模型建立

本文參考實際 LNG 球形(Moss Type)船體，繪製出縮小比例之二維幾何模型，船寬 0.45m ，船底到 LNG 圓形艙間中心高度維 0.28m ，LNG 圓形艙間直徑(D)為 0.38m ，如圖 8 所示。

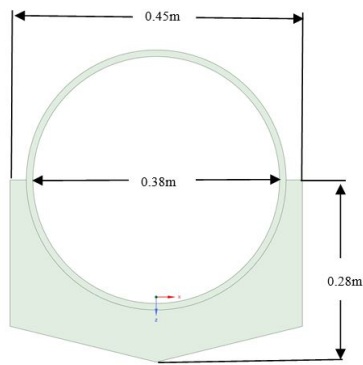


圖 8. LNG 船體幾何模型

流場網格建構

由於後續進行數值模擬時，運用了 Fluent OVERSET 新的網格內插運算，因此這裡將網格分為三個區域，分別為 background、component、LNG，如圖 9 與圖 10，運算時三個區域分開運算，在 background 與 component 的交界區域部分重疊，並且進行資料交換，以達到模擬的準確性。

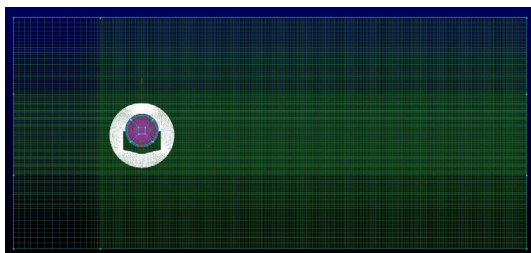
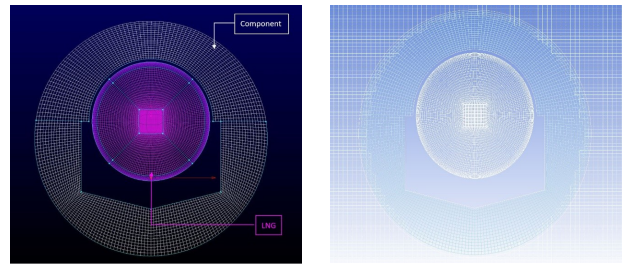


圖 9. 整體網格與流域範圍



(a) Component 與 LNG

(b) Overset interface

圖 10. Component 與 LNG 及 Overset interface 網格分佈圖

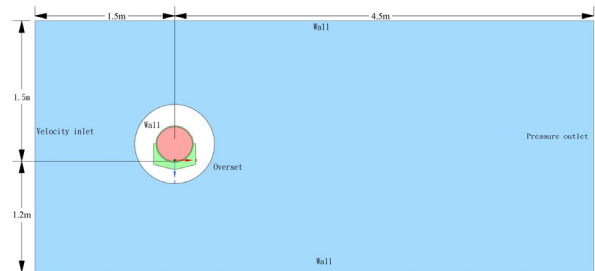
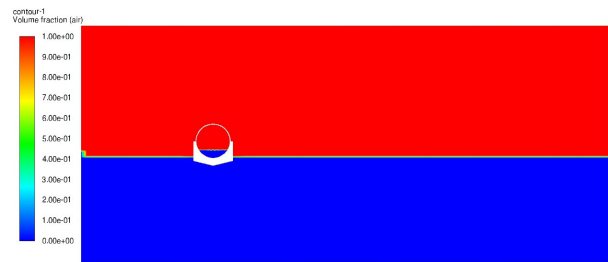


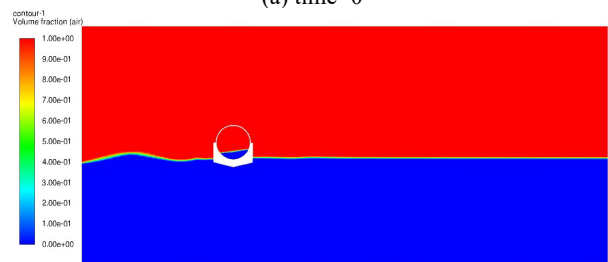
圖 11. 邊界條件設定

LNG 船體受浪及艙間內液體作用力橫搖現象

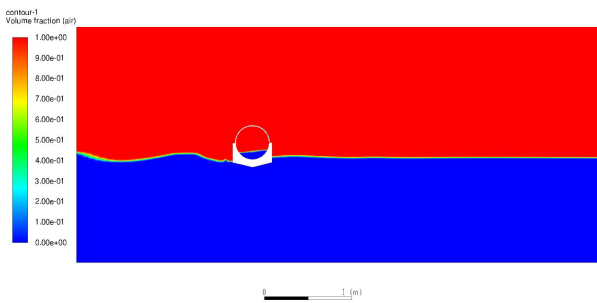
相同入流速度、波長及波高流過 LNG 船體，受力後產生不同晃動現象，下列分別以圖呈現艙間內液位高為 $1/4$ 、 $1/2$ 、 $3/4$ 倍船艙直徑(D)的計算結果，3 個案例皆個別取出由 0~8 秒，時間間隔為 1 秒，每個案例共九張圖片表示。圖片上部區塊及艙間內紅色區塊為空氣；圖片下部藍色區域為水；艙間藍色區域為密度是 420 kg/m^3 艙間液體，如圖 12-13 所示。



(a) time=0

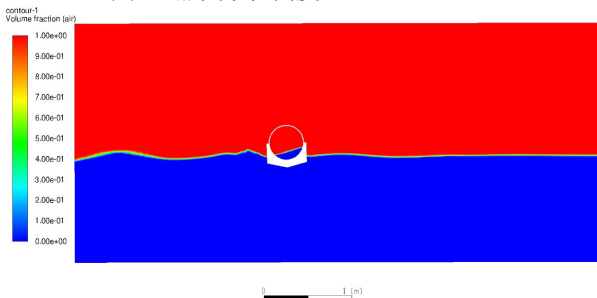


(b) time=1 sec

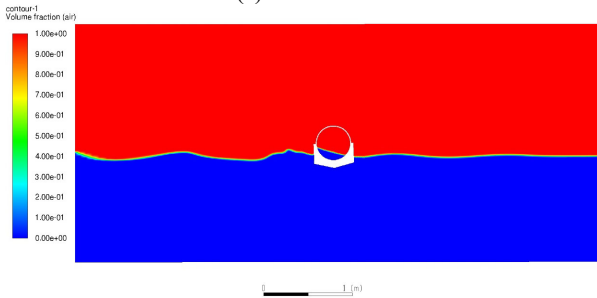


(c) time=2 sec

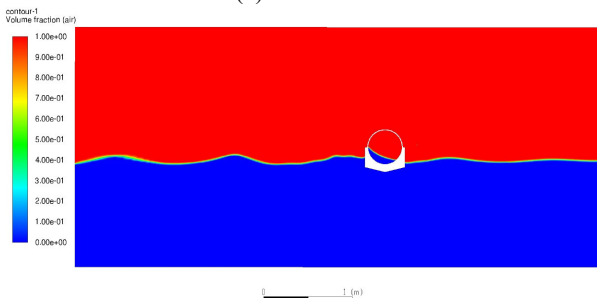
圖 12. 艙間液位高度 $1/4 D$, Time:0~2



(a) time=3 sec



(b) time=4 sec



(c) time=5 sec

圖 13. 艙間液位高度 $1/4 D$, Time:3~5

本研究依據質量的守恒性，對流項次離散算則的通用性，邊界條件設定的正確性與避免非物理性震盪的條件下，率先提出採用保有色散關係作為求解算則，以非交錯式網格配置的有限差分方法，建構多維

正交曲線。最後以驗證本文所發展的數值程序對三維流場問題的分析能力，並與文獻作一詳盡的比對。由於以往的研究方法乃藉由因次分析和捲增積分模式作表徵性之探討，其物理觀念淺顯易明，且計算工作量少，對射流體運動特性能有相當地掌握，然而在與相關文獻之實驗數據比對下，這些方法的描述並不具預測流場中多維度之傳輸現象，故有再進一步探討的必要，是為本文研究的再出發。

參考文獻

1. Thompson J.M.T., Rainey R.C.T., Soliman M.S. (1993). Mechanics of ship capsize under direct and parameter wave excitation, Phil. Trans. R. Soc. London Ser. A, pp.1-19.
2. Hutchison B (1990). Sea-keeping studies: a status report, SNAME Transactions, pp.263-317.
3. Roberts J.B. (1982). A stochastic theory for nonlinear ship rolling in irregular seas, Journal of ShipResearch, Vol.26, No.4, pp.229-245.
4. Hirano, M. (1980). On the calculation method of ship maneuvering motion at initial design phase, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 147, pp. 144-153.
5. Inoue, S., Hirano, M., Kijima, K., Takashina, J. (1981). A practical calculation method of ship maneuvering motion, International Shipbuilding Progress, Vol. 28, pp. 207-222.
6. Kijima, K., Nakiri, Y. (2003). On the practical prediction method for ship manoeuvring characteristics, Transaction of the West-Japan Society of Naval Architects, Vol. 105, pp. 21-31.
7. Hamamoto M., Kim Y.S. (1993). A new coordinate system and the equations describing maneuvering motion of a ship in waves, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 173, pp. 209-220.
8. Stigter C. (1966). The performance of U-tanks as a passive anti-rolling device, International Shipbuilding Progress, Vol. 13, pp. 249-275.
9. Hamamoto M., Matsuda A., Ise, Y. (1994). Ship motion and the dangerous zone of a ship in severe following seas, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 175, pp. 69-78.
10. Treacle T.W., Mook D.T., Liapis S.I., Nayfeh, A.H. (2000). A time-domain method to evaluate the use of moving weight to reduce the roll motion of a ship, Ocean Engineering, Vol. 27, No. 12, pp. 1321-1343.
11. 植木修次, 織田博行 (1997). 船用減搖裝置の最近の動向(日文), 漁船, 第 327 號.

RESEARCH OF BULK CARRIER PARAMETRIC ROLL MOTION IN REGULAR WAVE

*Ko, Han-Chen** *Chen, Guan-Lun** *Lin, Reui-Kuo***

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

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

Keywords: Liquefied Natural Gas (LNG), Sloshing, Ship Motion, Methane, Free Liquid Level, Numerical Analysis

ABSTRACT

In this study, the numerical analysis of the sloshing phenomenon in the cargo tanks under different ship motions is carried out by using analytical software. This study focuses on the hydrodynamic phenomena of LNG ships underway, and investigates the effects of wave interaction on LNG ships at different speeds. The Volume of Fluid (VOF) method is used to track the free liquid surface or the fluid interface to capture the mathematical model of the ship's motion in six degrees of freedom under the action of regular waves, and calculate the ship resistance, the ship's wave-raising effect, and the related changes in the flow field, and then analysis the data for the velocity of the flow field, the pressure field, and the ship resistance at different ship speeds and under different wave conditions, and then, finally, the drag force on the ship model is calculated and analyzed by the post-processing software. Finally, through the post-processing software, the changes in the resistance and transverse force of the ship model, and the changes in the velocity and pressure of the ship model, the resistance and the transverse force will be presented in a three-dimensional way, so that the simulation data of this study can provide a reference for the application of the high-risk ship in the operation and design of the ship in the future .