

應用體積力方法進行船舶 於波浪中之自推模擬

¹黃斯寬,¹辛敬業,¹呂玲,¹毛耀堂,²陳紀川,²林宗岳

(1. 國立臺灣海洋大學 系統工程暨造船學系 ; 2. CR Classification Society, Taipei, Taiwan)

摘要 “能源效率設計指標”(EEDI, Energy Efficiency Design Index)中的氣候因子 f_w (weather factor)是一用來表示船舶因風浪失速的無因次化係數，而要進行船舶於波浪中的失速計算，就必須進行船舶於靜水與波浪中的自推模擬，本文主要在探討應用體積力方法進行船舶在波浪中自推之模擬。在 2015 年的“第五屆海峽兩岸水動力學研討會”中，我們進行了“應用計算方法預測船舶於波浪中之失速”的報告，進行了一些初步計算成果的報告，在本文中，我們將進行更多結果的報告，以及不同體積力方法的應用等。體積力方法整合了黏性流計算程式與勢流螺槳計算程式，用來模擬螺槳與船體互動的問題。本文在自推模擬上，螺槳的效應分別以定常流與非定常流的體積力方法進行計算，船體阻力的計算方法分為三種。第一種方法，靜水中船體的阻力直接應用黏性流 RANS 方法配合勢流方法進行興波阻力的計算，而波浪中的波浪附加阻力則應用勢流截片理論計算；第二種方法，靜水中船體的阻力直接應用考慮自由液面效應的黏性流 RANS 方法進行計算，而波浪附加阻力則仍應用勢流截片理論計算；第三種方法，則是靜水與波浪中的船體阻力皆以考慮自由液面效應的黏性流 RANS 方法進行計算，文中將比較這三種方法的計算時間與計算結果的準確度，以及對於流場的影響。

關鍵字 自推試驗，推進效率，船舶運動，失速，體積力方法，RANS

1 引言

“能源效率設計指標”(EEDI, Energy Efficiency Design Index)中的氣候因子 f_w (weather factor)是一用來表示船舶因風浪失速的無因次化係數，而要進行船舶於波浪中的失速計算，就必須進行船舶於靜水與波浪中的自推模擬，本文主要在探討應用體積力方法進行船舶在波浪中自推之模擬，而此模擬計算我們分為兩種計算方式，第一種方法應用黏性流對疊船模方法計算船舶與螺槳互動之阻力，勢流興波阻力程式計算興波阻力，波浪附加阻力也應用勢流方法進行計算；第二種方法則應用黏性流方法計算船舶與螺槳互動之阻力以及興波阻力，波浪附加阻力仍然應用勢流方法進行計算，第三種方法，則是靜水與波浪中的船體阻力皆以考慮自由液面效應的黏性流 RANS 方法進行計算。藉由靜水與波浪中二自推試驗模擬方法在三個不同船速的模擬結果，即可進一步的計算船舶在波浪中航行時的失速。在 2015 年的“第五屆海峽兩岸水動力學研討會”中，我們進行了“應用計算方法預測船舶於波浪中之失速”的報告，進行了一些初步計算成果的報告，在本文中，我們將進行更多結果的報告。

有關船舶失速的相關研究，Journée 在 1976 年即進行了研究[1][2]，應用近似的計算方法考慮船舶航行中船舶運動對於螺槳推進性能的影響，同時進行了實驗。Faltinsen[3]對於航行中阻力與推進的整體變化進行了研究。日本的學者對於此問題進行了一系列的研究，Nakamura[4]與 Naito[5]探討了螺槳於航行時負荷的變動，Nakatake[6]應用 source 與 sink 模擬船殼、螺槳與舵，並應用簡單的黏性修正，以計算方法探討波浪對於螺槳、舵以及船殼交互作用的影响，Ando[7]隨後並進行了實驗驗證數值計算的結果；並且應用了改進的以 Rankine source 為基礎的小板法推估波浪中船舶的興波阻力與螺槳的推力[8]。Kashiwagi[9]則由船舶運動理論，藉由所謂的 EUT(Enhanced Unified Theory)方法探討螺槳於波浪中的性能，Chuang[10]則由實驗與推估的方法探討波浪中馬力的變化。至於應用體積力方法進行自推的模擬，主要是以體積力的形式代表螺槳的受力。Schetzr 及 Favin[11]以“致動圓盤”(actuator disk)的模式模擬螺槳受力，將得到之受力作為黏性流方程中之體積力(body force)。Stern 等[12]首先利用升力面理論取代作動圓盤模型計算螺槳性能，並將螺槳受力轉換為雷諾平均方程式中的“體積力”項模擬螺槳於舵流場中的效應，進行舵流場與螺槳交互作用的探討，並分別對於軸對稱體以及船體進行計算。其後，MIT 的 Kerwin 教授以及其團隊[13]對於體積力重行詮釋，發展出“有效體積力”的觀念。臺灣海洋大學自 1995 年起應用黏性流程式與螺槳升力面程式進行螺槳與船體交互作用之計算，多年來陸續完成軸對稱體與船體與螺槳的互動計算([14]~[16])，並應用於不同的計算流體軟體中。

2 自推試驗模擬之計算結果

在文獻[17]中，我們顯示了 KCS 船模於靜水中自推計算的結果，以及與實驗值的比較。方法是利用商用計算流體軟體 STAR-CCM+結合螺槳勢流邊界元素法(BEM)，進行迭代運算，以模擬船舶於靜水中的自推模擬。本文中，我們將進一步展示 KVLCC2 船模於靜水中自推模擬的計算結果。對於 KVLCC2 船模的計算，其方法與 KCS 相同。在阻力的驗證中，首先將對疊船模條件下與靜水中自由液面條件下得到的總阻力和實驗值進行比較，如表 1 所示，從計算結果中可以看到，在阻力的計算上僅有 1.86%的差異。另一方面，我們對有無自由液面的計算結果進行比較，如表 2 所示，我們可以看到對疊船模與自由液面模型間之摩擦阻力的差值為自由液面模型之摩擦阻力的 7.0%，而對疊船模與自由液面模型間之壓差阻力的差值為自由液面模型之壓差阻力的 29.5%，可知對疊船模與自由液面模型間之總阻力的差值大多都來自於興波阻力。

表 1：KVLCC2 阻力計算與實驗值比較

	總阻力	誤差(%)
實驗值(N)	20.6	
DB 計算值	17.8	
FS 計算值	20.2	-1.86%

表 2：KVLCC2 有無自由液面結果比較

阻力	摩擦	壓差	總阻力
DB 計算值	14.7	3.1	17.8
FS 計算值	15.8	4.4	20.2
差值(%)	7.0%	29.5%	11.9%

除了阻力的驗證外，還須比較船舵流場，圖 1 是加入自由液面的計算結果，其中黑線是實驗值，彩色線則是計算值。圖 2 為自由液面波高計算值與實驗值之比較。對於 KVLCC2 的自推模擬計算，我們同樣分別應用對疊船模與自由液面兩種模型進行自推模擬，而此處在對疊船模的計算中，船體興波阻力以勢流興波阻力程式計算得到，並將其加於迭代計算中。表 3 為對疊船模與自由液面計算結果，由於沒有實驗可以比較，我們比較兩種方法之計算結果的差異，可以發現推進效率的差異在 6%左右，這應該是由於對疊船模與自由液面在興波阻力計算上的差異所導致。

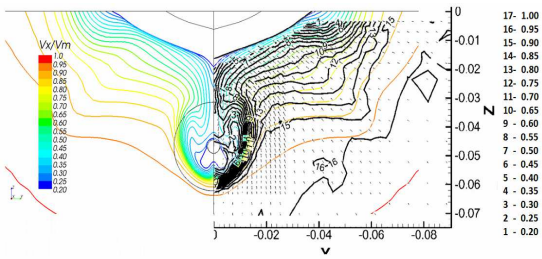


圖 1：加入自由液面計算所得 KVLCC2 艇流場與實驗資料比較

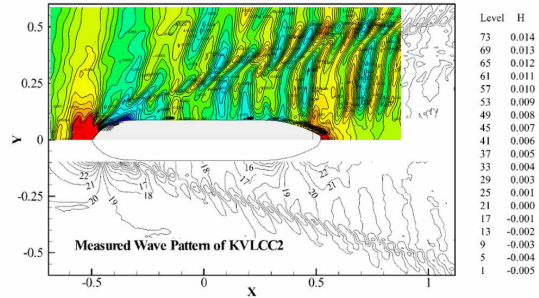


圖 2: KVLCC2 自由液面波高圖與實驗值比較

表 3: KVLCC2 應用對疊船模(DB)與自由液面(FS)方法進行自推計算結果與實驗值的比較

	$1-W_s$	K_{TB}	$10K_{QB}$	$1-t$	η_D	η_H	η_R	η_O
DB	0.698	0.1640	0.1840	0.853	0.769	1.222	1.008	0.624
FS	0.685	0.1550	0.1760	0.850	0.809	1.242	1.006	0.648
Diff(%)	1.90	5.81	4.55	0.35	4.94	1.61	0.20	3.70

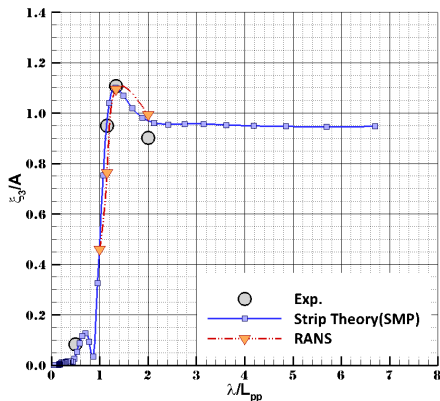


圖 3：應用不同法計算 KCS 起伏(heave)運動的結果與實驗的比較

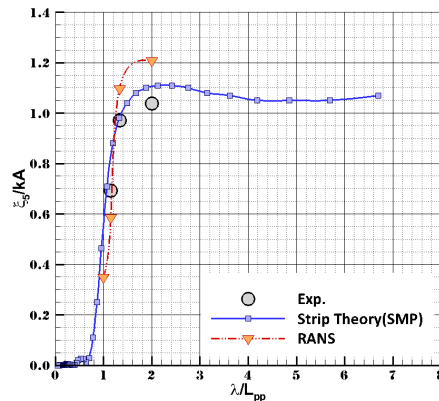


圖 4：應用不同法計算 KCS 縱搖(pitch)運動的結果與實驗的比較

完成靜水中的自推模擬後，必須進行波浪中的自推模擬，以進行船舶失速的計算，因此我們必須進行船舶運動的計算，圖 3 與圖 4 分別顯示應用不同方法計算 KCS 起伏(heave)與縱搖(pitch)運動的結果與實驗的比較，圖 5 與圖 6 則分別顯示應用不同方法計算 KVLCC2 起伏(heave)與縱搖(pitch)運動的結果與實驗的比較，皆顯示計算結果的可信度。由於應用黏性流 RANS 方法計算的結果與截片法差異不大，在本文中，我們將僅利用截片法進行船舶於波浪中的自推模擬計算。本文將應用皮莫二氏波譜(Pierson-Moskowitz spectrum)應用於計算模擬，PM 波浪頻譜將蒲福風級分為 9 個等級，由於 IMO 對於波浪中失速規定的是海況 5(Sea State 5)時與靜水時的比較，因此我們也選用此區間作為模擬條件，並將分別計算靜水與海況 5 狀況下三個不同船速的自推模擬，以比較出在相同馬力下的速度差異。我們因此可以得到對疊船模與自由液面兩種自推試驗模擬方法在海況 5 條件下的失速計算：在給定馬力的情形下，內插

可得在靜水條件與海況 5 條件時的船速，進而可得到失速，並可由兩者船速的比例可以得一係數。我們計算所得 KCS 在不同馬力下的失速，兩種方法計算的結果如表 4 與圖 7 所示，我們發現兩者計算結果有些微的不同，其造成的原因主要來自於興波阻力計算結果的差異；就船舶失速而言，對疊船模的計算值失速較低，而就計算時間而言，對疊船模的計算時間相較於自由液面來得快很多，由於沒有實驗值佐證，對疊船模與自由液面的結果可用來相互比較，基本上其計算值與差異都是可以接受的。我們同樣將 KVLCC2 船舶在靜水中進行額外兩個速度點的自推試驗模擬計算，以及在海況 5 條件下的自推試驗模擬計算，以此來計算船舶於海況 5 條件下的失速。對疊船模與自由液面的計算結果如表 5 與圖 8 所示，兩種方法計算結果同樣存在差異，尤其是海況 5 的結果。就船舶失速而言，KVLCC2 則是對疊船模的計算值失速較大。

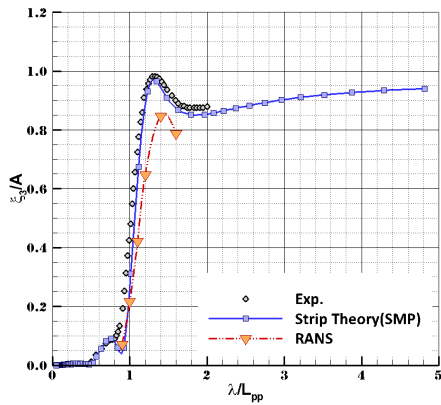


圖 5: 應用不同方法計算 KVLCC2 起伏(heave) 運動的結果與實驗的比較

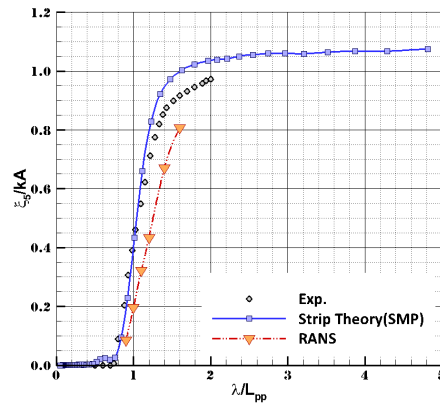


圖 6: 應用不同方法計算 KVLCC2 縱搖(pitch) 運動的結果與實驗的比較

表 4: KCS 應用對疊船模(DB)與自由液面(FS)方法進行失速計算結果與比較

Model	State	20000 PS	30000PS
DB	Calm Water	21.034 kts.	23.588 kts.
	Sea State 5	18.736 kts.	21.606 kts.
	Speed Loss	-2.30 kts.	-1.98 kts.
	f_w	0.891	0.916
FS	Calm Water	20.675 kts.	22.994 kts.
	Sea State 5	18.024 kts.	20.991 kts.
	Speed Loss	-2.65 kts.	-2.00 kts.
	f_w	0.872	0.913
Diff.	Speed Loss	0.35 kts	0.02 kts
	f_w	-2.2%	-0.4%

表 5: KVLCC2 應用對疊船模(DB)與自由液面(FS)方法進行失速計算結果與比較

Model	State	43000 PS	48000PS
DB	Calm Water	15.236 kts.	23.588 kts.
	Sea State 5	13.621 kts.	21.606 kts.
	Speed Loss	-1.62kts.	-1.60 kts.
	f_w	0.894	0.899
FS	Calm Water	16.842 kts.	17.415 kts.
	Sea State 5	14.753 kts.	15.388 kts.
	Speed Loss	-2.09 kts.	-2.03 kts.
	f_w	0.876	0.884
Diff.	Speed Loss	0.47 kts	0.43 kts
	f_w	-2.0%	-1.7%

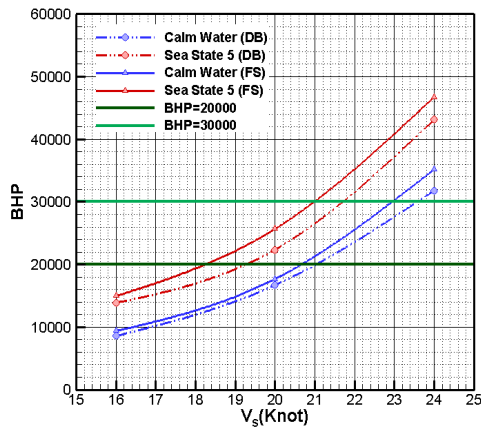


圖 7: KCS 應用對疊船模(DB)與自由液面(FS)方法進行失速計算結果與比較

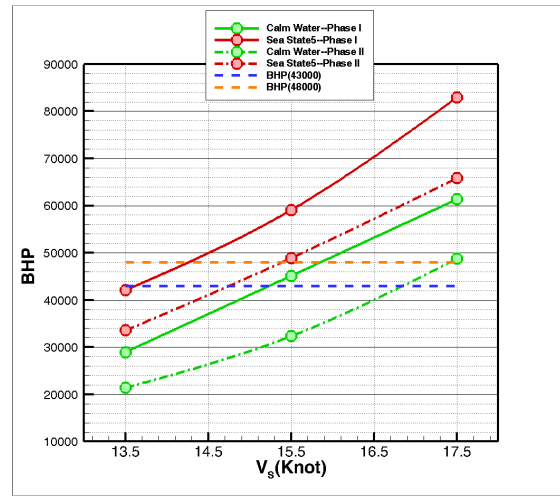


圖 8: KVLCC2 對疊船模(DB)與自由液面(FS)方法進行失速計算結果與比較

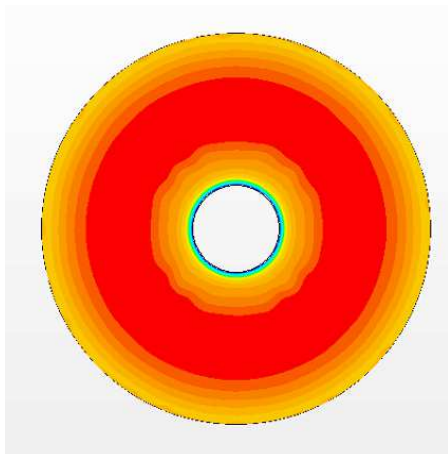


圖 9: 一五葉螺槳 KP505 應用定常體積力在在均勻流中所造成螺槳平面上的跡流

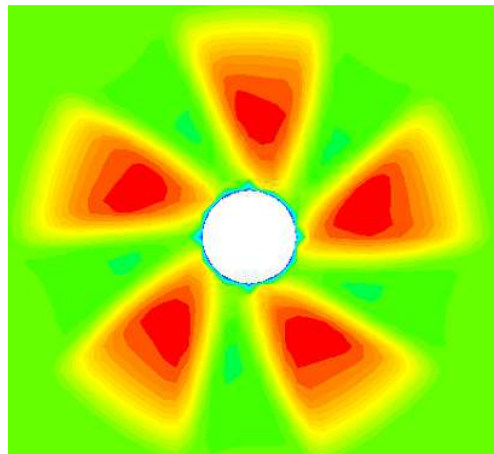


圖 10: 一五葉螺槳 KP505 應用非常體積力在在均勻流中所造成螺槳平面上的跡流

3 非常體積力模擬計算

在完成靜水中與波浪中的自推模擬計算程序後，我們發現由於使用的是定常體積力模擬螺槳受力，其所造成是周向平均的效應，並沒有辦法完整模擬在船尾跡流與運動狀況下變化的流場，因此我們繼續發展了非常體積力的方法。圖 9 及圖 10 為一五葉螺槳 KP505 應用定常體積力以及非常體積力在均勻流中所造成螺槳平面上跡流的差別。接下來，我們應用非常體積力進行 KCS 船模於靜水中的自推模擬，探討在非均勻流的自推模擬中定常體積力與非常體積力兩者之間的差異。由圖 11 與圖 12，我們可以看到應用定常體積力以及非常體積力的計算結果所造成的跡流有一定的差異，應用非常體積力的計算結果可以明顯看出每一葉片螺槳受力的效應。

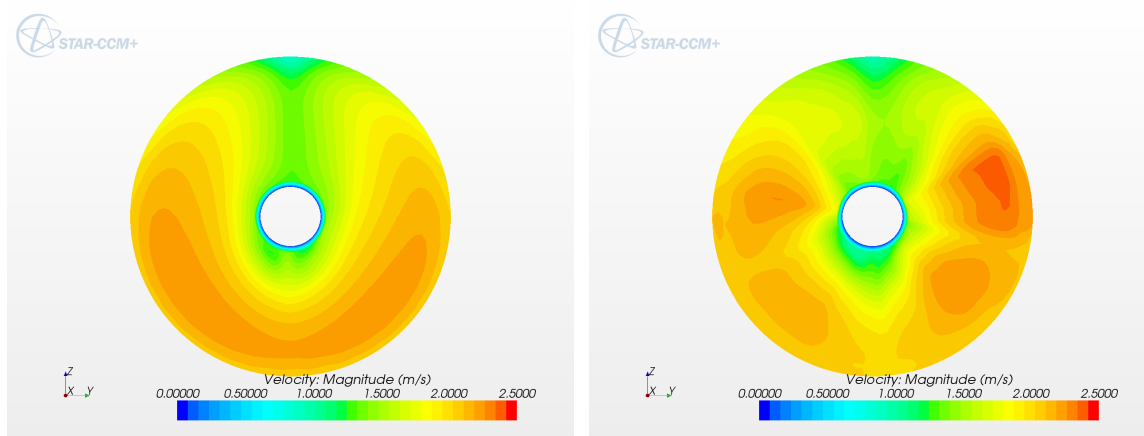


圖 11：應用定常體積力(左圖)以及非常體積力(右圖)的計算結果所造成的跡流

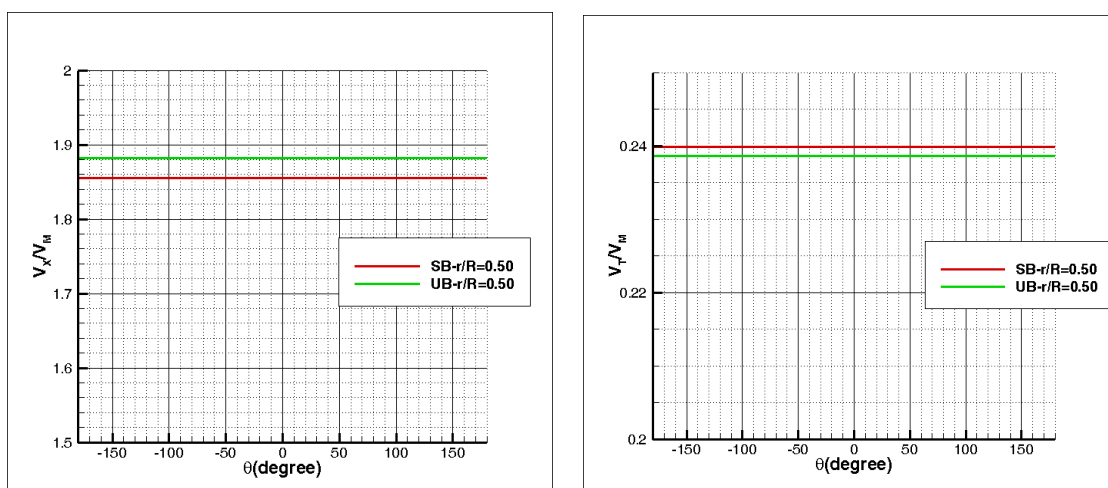


圖 12：在自推模擬中，應用定常體積力以及非常體積力在螺槳平面 $r/R=0.5$ 處的周向平均速度比較。左圖是軸向速度，右圖是切向速度。

應用不同體積力方法，進行自推模擬的計算結果差異不大，其原因是兩種體積力方法所造成的周向平均效應差異不大。圖 12 顯示在自推模擬中，應用定常體積力以及非常體積力在螺槳平面 $r/R=0.5$ 處的周向平均速度之比較，可以看出不論是軸向速度或是切向速度，兩者的差異都很小。

4 結論與展望

本文在自推模擬上，螺槳的效應分別以定常流與非常流的體積力方法進行計算，船體阻力的計算則分別應用不同的計算方法。由本文所完成的計算結果，可以發現應用截片法與黏性流方法計算所得之船舶運動結果差異不大，而在 KCS、KVLCC2 船舶於海況 5 狀況下之船舶失速計算中，以對疊船模與自由液面方法進行自推試驗模擬，兩種方法所得之船舶失速

因子皆相差不大，爾後希望能有實船之量測數據來驗證計算方法的結果。本文並顯示了所發展非定常體積力的計算結果，可以由流場與自推模擬的結果看出，兩者周向平均效應非常接近，而對於流場的影響上，非定常體積力則比較能夠反應實際跡流的現象。

參考文獻

1. Journée, J.M.J., "Prediction of Speed and Behaviour of a Ship in a Seaway", Report 0427-P, 1976, Delft University of Technology, Ship Hydromechanics Laboratory, Delft, The Netherlands.
2. Journe, J.M.J., "Motions, Resistance and Propulsion of a Ship in Regular Head Waves", Report 0428, 1976, Delft University of Technology, Ship Hydromechanics Laboratory, Delft, The Netherlands.
3. Faltinsen, O.M., "Prediction of Resistance and Propulsion of a Ship in a Seaway", Proc. 13th Symposium on Naval Hydrodynamics, 1980, Tokyo, Japan
4. Nakamura, S., Naito, S. and Inoue, R., "Open Water Characteristics and Load Fluctuation of Propeller in Waves", 關西造船協會誌，第 159 號，1975
5. Naito, S. and Nakamura, S., "Open Water Characteristics and Load Fluctuation of Propeller at Racing Condition in Waves", 關西造船協會誌，第 192 號，1979
6. Nakatake, K., Oda, K., Kataoka, K., Nishimoto, H. and Ando, J., "Free Surface Effect on the Propulsive Performance of a Ship (1st Report)", 西部造船會第 72 回例會，1986
7. Ando, J., Kataoka, K., and Nakatake, K., "Free Surface Effect on the Propulsive Performance of a Ship (2nd Report)", 西部造船會第 77 回例會，1988
8. Ando, J., Shiota, H., Kataoka, K., and Nakatake, K., "Free Surface Effect on the Propulsive Performance of a Ship (3rd Report)", 西部造船會第 79 回例會，1989
9. Kashiwagi, M., Sugimoto, K., Ueda, T., Yamasaki, K., Arihama, K., Kimura, K., Yamashita, R., Itoh, A. and Mizokami, S., "An Analysis System for Propulsive Performance in Waves", 關西造船協會論文集，第 241 號，2004
10. Chuang, Z. and Steen, S., "Prediction of Speed Loss of a Ship in Waves", Second International Symposium on Marine Propulsors (smp'11), Hamburg, Germany, June 2011
11. Schetz J.A. and Favin S., "Numerical solution for the near wake of a body with Propeller", Journal of Hydronautics, 11(4):136-141, October 1977
12. Stern, F.S., Kim, H.T., Patel, V.C. and Chen, H.C., "A viscous flow approach to the computation of propeller-hull interaction", Journal of Ship Research, 32(4), pp.246-262, 1988
13. Kerwin, J.E., Keenan, D.P., Black, S.D. and Diggs, J.G., "A coupled viscous/potential flow design method for wake-adapted, multi-stage, ducted propulsors", SNAME Trans., Vol.102, 1994
14. 辛敬業，黏性流場中船體與螺槳之相互作用，國科會報告 NSC-87-2611-E-019-019, 1998
15. Hsin, Ching-Yeh, Wei, Wei-Che, Ko, Chun Ko, Tseng, Yi-Hui and Chen, Po-Fan, 2014, "Using Body Force Method in the Simulations of Propeller and Wind Turbine Flow Field", The 30th Symposium on Naval Hydrodynamics, November 2-7, 2014, Hobart, Australia
16. Wei, Wei-Che, Hsin Ching-Yeh, Chen, Po-Fan, Li, Jyh-Yih, Shieh, Sheng-Ann and Chien, I-Chung, 2012, "The Influence of the Propeller Loading Distributions to the Propulsive Efficiency", The 6th Asia-Pacific Workshop on Marine Hydrodynamics (APHydro2012), Sep. 3-4, 2012, Malaysia
17. 李勁甫, 洪凡婷, 辛敬業, 林均達, 林正文, 陳紀川, "應用計算方法預測船舶於波浪中之失速", 第五屆海峽兩岸水動力學研討會，中國南京，2015

Applying the Body Force Method to the Ship Self-Propulsion Simulation in Waves

Suz-Kuan Huang¹, Ching-Yeh Hsin¹, Ling Lu¹, Yao-Tang Mao¹,
Chi-Chuan Chen², Tsung-Yueh Lin²

(1. Department of Systems Engineering and Naval Architecture, National Taiwan Ocean University, Keelung,
2. CR Classification Society, Taipei)

Abstract: The weather factor, f_w , in EEDI (Energy Efficiency Design Index) is an indication of the speed loss, and it is necessary to compute the self-propulsions in calm water and in waves to obtain the weather factor. In this paper, the focus is on the application of body force method to the self-propulsion simulation in waves. In last CSHydro conference, we have presented some preliminary results of the self-propulsion simulations, and more results are presented in this paper. The body force method integrates the RANS method and the propeller boundary element method to compute the interactions between ship hulls and propellers, and both the steady and unsteady body force methods are demonstrated in this paper. In the present method, the ship hull resistance is computed by three different approaches, the first one is the combination of by viscous flow RANS method and wave making boundary element method, and the second approach is by only using the viscous flow RANS method. For the above two approaches, the added resistances are computed by strip theory, and the third approach is that all the resistances are computed by RANS method. The computational results from three approaches are compared and investigated in the paper for both forces and flow field..