

結合半經驗公式船舶失速預測方法與動態規劃法進行航路最佳化

劉上齊*¹

張灝瓊*

陳冠臻**

林宗岳**

辛敬業*

*國立海洋大學 系統工程暨造船學系

**財團法人驗船中心研究處研發組

關鍵詞：船舶失速、自推模擬、體積力方法、計算流力、動態規劃法

¹E-mail: ryusc9749@gmail.com

摘要

因應國際環保法規標準與船舶污染管理相關規範的修訂和船舶智慧化管理的趨勢，天氣定航應運而生。本文結合半經驗公式與計算流力，計算波浪航行中的船舶失速，通過航線規劃方法的研究，利用即時氣象數據求取最佳化航路。針對計算波浪航行中的船舶失速，本文共比較並評估三種不同方法進行計算，分別是計算流力方法，Kwon 的半經驗公式計算，以及國際海事組織應用的回歸經驗公式計算。國際海事組織的回歸公式，針對不同船型以及其大小，可以計算得到船舶失速。Kwon 的半經驗公式則考慮到船型、吃水、幾何與海況等因子。至於計算流力方法，失速的計算則建立於靜水中與波浪中相同馬力的自推模擬。本文並應用計算流力耦合體積力方法計算得到船舶在波浪中航行時的失速，針對 Kwon 半經驗公式進行改進，並以改進之方法為航路規劃模型提供計算之依據。本文採用動態規劃法建立航路最佳化模型，將航線航段劃分，以優化分段航速為基礎，使得計算步驟化繁為簡，節省計算時間。本文所探討的對象為貨櫃船，蒐集實際的氣象資料與貨櫃輪的航行案例，根據真實數據比較不同航線和天氣狀況下的模型，結果顯示船舶能有效地讓船舶避開風險高的航路，同時縮短船舶海上航行時間，以達至優化船隊營運的目標。

前言

隨著國際環保法規的修訂以及船舶管理智慧化，為了滿足不斷推陳出新的法規以及市場需求，各式優化航線的方法便相應而生；本文採用了半經驗公式進行船舶於波浪中失速的計算，並提出了一基於動態規劃法開發的程式，藉由天氣資訊，規劃最佳效率與航行安全性的航線。

本文的重點之一是對於船舶在不同海況中失速的計算，失速是船舶性能以及其對環境影響的重要指標，近年來已有許多人對這項指標進行了研究，例如 Kashiwagi[1]等人利用 EUT(增強統一理論)自船舶運動理論中推導了螺旋槳在波浪中的性能；Chuang[2]利用船模試驗預測了波浪中的推力下降因子並得出了在側浪及斜浪下航向角對推力下降因子的影響大於波浪附加阻力的結論。而近年來，對於船舶失速的計算更多是利用 CFD 進行，例如 Kim[3]結合了 CFD 以及非穩態雷諾平均納維爾史托克方程(URANS)法計算了不同浪向下的附加阻力以及船舶運動；Hsin 等人([4]-[7])則進行靜水以及波浪中的自推模擬試驗計算了船舶失速。另一方面，Kwon[8]以及 MPEC[9]分別提出了計算船舶失速的半經驗公

式，兩種方法都以主機轉速恆定為前提而不需對阻力增加或是推進器的特性進行複雜的計算。

本文應用不同的方法計算波浪航行中的船舶失速，並比較與評估其計算結果。將展示三種不同方法進行失速的計算，分別是計算流力方法，Kwon 的半經驗公式計算，以及國際海事組織應用的回歸經驗公式計算。三種方法於[10]有細節的描述。文中將展示應用不同方法計算所得之貨櫃輪 KCS 以及散裝貨輪 JBC 的結果，並進行比較與分析，提出修正的 Kwon 方程式。

本文的另一個重點是最佳航線的規劃，航線規劃幾種常用的演算法，包含變分(calculus of variation)法[11]，等時線(isochrone)法[12]，修正等時線法[13]，等值線(isopone)法[14]，拉格朗日乘數(Lagrange multiplier)法[15]，基因演算(genetic algorithm)法[16]，戴克斯特拉演算(Dijkstra algorithm)法([17]-[19])等，這些方法於文獻[20]中皆有較詳細的描述。本文採用動態規劃法(Dynamic Programming)進行航路最佳化，該方法係基於 Bellman 最優性原理([21]-[23])。文中並利用網格系統進行逆向算法對在北大西洋航行的貨櫃船做評估。

船舶失速計算

$$\frac{\Delta v}{v_1} \cdot 100\% = C_\mu \cdot \Delta R \cdot C_F \quad (1)$$

在本文中，船舶速計算可分為計算流力方法、Kwon 的半經驗公式以及國際海事組織 IMO 應用的回歸公式計算三種方法。

上式中的失速 $\Delta v = v_1 - v_2$ ，其中 v_1 為靜水情況下船隻的設計航速， v_2 為船隻在所選擇的海況下的航行速度，兩者的單位皆為 m/s；其可展開為以下形式：

1. Kwon 半經驗公式

本文中介紹了 Kwon 的半經驗公式，此公式適用於方塊系數(block coefficient)介於 0.55-0.85 且福勞德數(Froude Number)介於 0.05-0.30 間的船隻，用於計算基於風況，船體運動及波浪附加阻力引起的船舶失速；由 Kwon 的結果可得知此公式計算結果與拖曳水槽試驗所模擬的結果比較有很高的準確性。

式(1)為以 Kwon 公式計算得到的船舶失速百分比。

$$v_2 = v_1 - \left(\frac{\Delta v}{v_1} \cdot 100\%\right) \frac{1}{100\%} v_1 \quad (2)$$

$$v_2 = v_1 - (C_\mu \cdot \Delta R \cdot C_F) \frac{1}{100\%} v_1 \quad (3)$$

式(2)及式(3)中 v_1 可展開為以福勞德數，垂標間距長 L_{PP} 以及重力加速 $g = 9.80665 \text{ m/s}^2$ 組成的形式，如下式

$$v_1 = Fr \cdot \sqrt{L_{PP} \cdot g} \quad (4)$$

為了應用上述的公式，需要使用表.1 至表.5 中所示的蒲式風級 BN、計算速度校正因子 ΔR 所需的方塊系數、福勞德數以及天氣方向縮減系數 C_μ 。

表 1 天氣航向因子 C_μ

波浪方向	與船艏夾角 β	航向縮減係數 C_μ
頂浪(非規則波)	0 °	$2C_\mu = 2$
斜浪(非規則波)	30 ° to 60 °	$2C_\mu = 1.7 - 0.03(B_N - 4)^2$
側浪(非規則波)	60 ° to 150 °	$2C_\mu = 0.9 - 0.06(B_N - 6)^2$
隨浪(非規則波)	150 ° to 180 °	$2C_\mu = 0.4 - 0.03(B_N - 8)^2$

表 2 船型係數 C_F

裝載狀態	Ship form coefficient C_F
貨櫃船以外的船種於滿載狀態	$0.5BN + BN^{6.5} / (2.7\sqrt{3})^2$
貨櫃船以外的船種於輕載狀態	$0.7BN + BN^{6.5} / (2.7\sqrt{3})^2$
貨櫃船於滿載狀態	$0.7BN + BN^{6.5} / (22.0\sqrt{3})^2$

表 3 速度校正因子 ΔR

方塊系數 C_B	船隻裝載條件	速度校正因子 ΔR
0.55	Normal	$1.7 - 1.4F_n - 7.4(F_n)^2$
0.60	Normal	$2.2 - 2.5F_n - 9.7(F_n)^2$
0.65	Normal	$2.6 - 3.7F_n - 11.6(F_n)^2$
0.70	Normal	$3.1 - 5.3F_n - 12.4(F_n)^2$
0.75	Loaded or normal	$2.4 - 10.6F_n - 9.5(F_n)^2$
0.80	Loaded or normal	$2.6 - 13.1F_n - 15.1(F_n)^2$
0.85	Loaded or normal	$3.1 - 18.7F_n - 28.0(F_n)^2$
0.75	Ballast	$2.6 - 12.5F_n - 13.5(F_n)^2$
0.80	Ballast	$3.0 - 16.3F_n - 21.6(F_n)^2$
0.85	Ballast	$3.4 - 20.9F_n - 31.8(F_n)^2$

表 2 風級強度

Bft	Wind description	Wind speed (m/s)
0	No wind	< 0.3
1	Gentle current of air	0.3 – 1.5
2	Gentle breeze	1.5 – 3.3
3	Light breeze	3.3 – 5.5
4	Moderate breeze	5.5 – 8.0
5	Fresh breeze	8.0 – 10.8
6	Strong wind	10.8 – 13.9
7	Stiff wind	13.9 – 17.2
8	Violent wind	17.2 – 20.7
9	Storm	20.7 – 24.5
10	Violent storm	24.5 – 28.4
11	Hurricane-like storm	28.4 – 32.6
12	Hurricane	≥ 32.6

表 3 海面風浪強度表

浪級	蒲式風級	海況	近似值	
			波高 (m)	波長 (m)
0	0	Smooth sea	0 – 0.1	0
1	1	Calm, rippling sea	0.1 – 0.3	$H_{1/3} < 0.1$
2	2-3	Gentle sea	0.3 – 0.9	$0.1 \leq H_{1/3} < 0.5$
3	4	Light sea	0.9– 1.25	$0.5 \leq H_{1/3} < 1.25$
4	5	Moderate sea	1.25– 2.5	$1.25 \leq H_{1/3} < 2.5$
5	6	Rough sea	2.5 – 3	$2.5 \leq H_{1/3} < 4.0$
6	7	Very rough sea	3 – 4	$4.0 \leq H_{1/3} < 6.0$
7	8-9	High sea	4 – 9	$6.0 \leq H_{1/3} < 9.0$
8	10	Very high sea	9 – 11	$9.0 \leq H_{1/3} < 14.0$
9	11-12	Extremely heavy sea	>11	$14.0 \leq H_{1/3}$

2. MEPC 回歸公式

國際海事組織(IMO)所屬海洋環境保護委員會(MEPC)引入了利用回歸曲線計算得到的 f_w (天氣因子)，此公式是由日本專門為了計算蒲式風級 6 級下對應的浪況，輸出為 75%馬力時所產生的失速；越高的 f_w 代表的是越低的失速以及在不規則波及風浪下船隻擁有更好的性能。計算 f_w 在 IMO-EEDI 的定義如下式(5):

$$f_w = a \times \ln(\text{displacement}) + b \quad (5)$$

此式由排水量、表 6 所示之船型因子 a 以及裝載量因子 b 組成。

表 6 Parameters a and b to determine standard f_w

船型	a	b
散裝貨輪	0.0429	0.294
油輪	0.0238	0.526
貨櫃船	0.0208	0.633

3. 計算流力方法

計算流力方法不同於 Kwon 的半經驗公式以及 MEPC 的回歸公式，而是實際求解了船體週遭流場並藉由自推模擬以及計算波浪附加阻力的方式預測了船體航行於不規則波中的失速。計算船舶失速時，首先須先分別計算船體航行於靜水條件以及頂浪下的船體阻力，再根據螺旋槳在波浪中的性能來估算不同海況下的船速，在本文中，我們利用商用計

算流力軟體 Star CCM+求解雷諾平均應力納維爾-史托克方程式(RANS)以計算貨櫃船 KCS 以及散裝貨輪 JBC(如圖 1 與 2, 表 7)的船體阻力, 圖 3 及圖 4 分別為計算 KCS 時的計算域邊界條件以及網格配置; 在本文中計算均使用 SST $k-\omega$ 紊流模型。

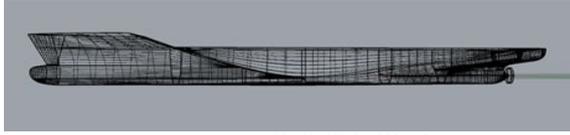


圖 1: KCS 船體幾何模型

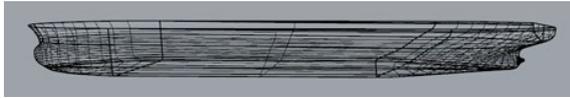


圖 2: JBC 船體幾何模型

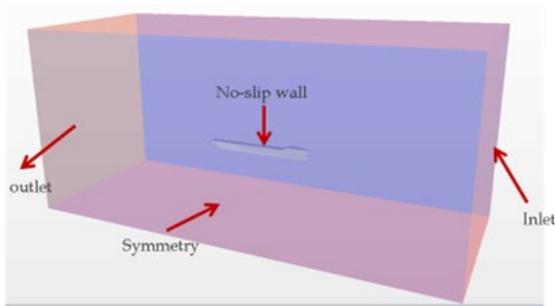


圖 3: 數值模擬邊界條件的設定

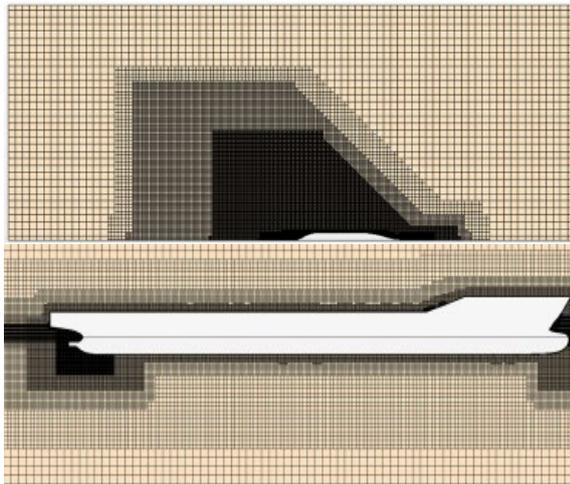


圖 4: 計算 KCS 包含自由液面模型的網格配置

進行自推模擬的數值方法為以下步驟:

1. 利用 RANS 法求解裸船流場以及阻力至收斂; 計算螺槳單獨實驗之 K-J 圖。
2. 將螺槳未作動時中心平面速度擷取以作為螺槳

入流, 放入螺槳邊界元素法中計算受力以及流場, 若為第一次迭代則設定一初始 J 值(螺槳前進速度)。

3. 將螺槳受力轉換為體積力並放入圖 5 所示之網格中並計算含體積力之流場。

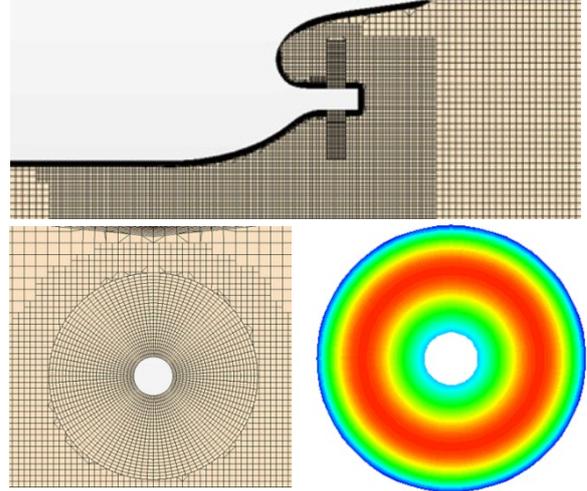


圖 5: 體積力網格配置以及制動盤上的體積力分布

4. 求解加入體積力後的船體流場, 並再次得到螺槳中心平面之速度, 此速度為總速度 \mathbf{U}
5. 將上一步中所計算得到的螺槳周向平均速度($\bar{\mathbf{U}}$)中扣除由勢流邊界元素法(BEM, Boundary Element Method)計算得到的螺槳周向平均誘導速度 $\bar{\mathbf{U}}_P$, 便得到有效跡流 $\bar{\mathbf{U}}_E$ 。

$$\bar{\mathbf{U}}_E = \bar{\mathbf{U}} - \bar{\mathbf{U}}_P \quad (6)$$

6. 將 $\bar{\mathbf{U}}_E$ 作為螺槳邊界元素法中的螺槳入流並再次計算螺槳受力與流場。
7. 重複步驟 5 及 6 直到收斂, 此時即可得到船體阻力以及螺槳推力。
8. 利用牛頓法內插得到新的 J 值, 反覆迭代直到滿足式(22)即達到自推點

$$T = R_T - F_{SFC} \quad (7)$$

在式(7)中, F_{SFC} 表示校正尺度效應之摩擦阻力修正量。當在靜水中的自推模擬完成後, 其可以藉由式(8)延伸成含有波浪附加阻力的自推模擬。

$$T = R_T + \Delta R_{add} - F_{SFC} \quad (8)$$

其中 ΔR_{add} 為波浪附加阻力。

表 7 KCS 及 JBC 實船主要尺寸

	KCS	JBC
垂標間距長, L_{PP} (m)	230.0	280.0
船寬, B (m)	32.2	45.0
吃水深, T (m)	10.8	16.5
方塊系數, C_B	0.651	0.81
排水量, ∇ (m^3)	52,030	178,370
85% MCR 下航速 (m/s)	12.35	7.46
85% MCR 下航速(knots)	24	14.5

通過自推模擬計算，我們能獲得靜水以及特定海況下不同船速的制動馬力 BHP，將結果繪製成如圖 6 及圖 7，再由表 7 中 KCS 及 JBC 兩艘船的主要尺寸計算兩艘船在靜水以及海況 5 下不同航速的主機制動馬力(表 8)，即可由圖 6 及圖 7 求取兩艘船在 85%輸出馬力下的失速。

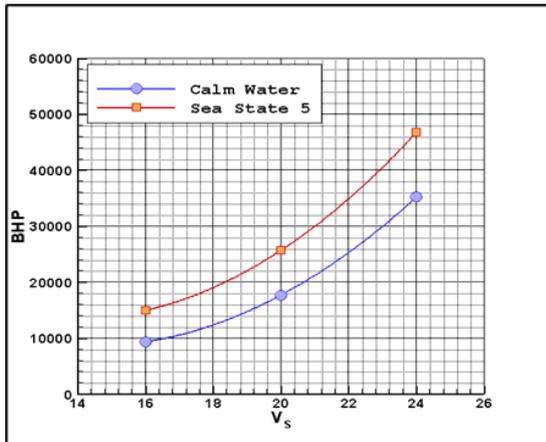


圖 6：CFD 計算所得 KCS 在靜水條件下及海況 5 下之馬力曲線

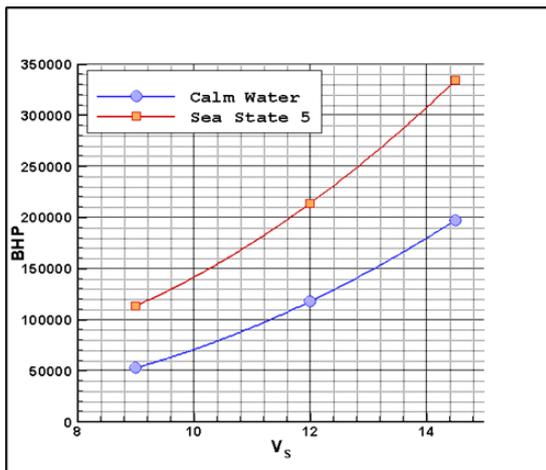


圖 7: CFD 計算所得 JBC 在靜水下及海況 5 下之馬力曲線

表 8 在靜水及海況 5 下進行自推模擬所得制動馬力

	Vs (knots)	BHP in calm water	BHP in sea state 5
KCS	16	9,359	14,953
	20	17,665	25,666
	24	35,178	46,721
JBC	9	52,674	113,194
	12	117,434	213,379
	14.5	196,983	333,871

表 9 失速計算結果

State	KCS	JBC
85% MCR 下主機馬力	BHP= 35,178 (ps)	BHP= 196,969 (ps)
靜水下船速 (knots)	24.00	14.50
海況 5 下船速(knots)	22.05	11.59
船舶失速	1.95	2.91
f_w	0.919	0.800

表 10 不同方法下計算 KCS 及 JBC 失速係數比較

	MEPC	CFD	Kwon
	75% MCR 下主機馬力	85% MCR 下主機馬力	
KCS	0.859	0.919	0.932
JBC	0.813	0.800	0.835

表 11 比較計算流力法及 Kwon 公式計算結果

		CFD	Kwon	Diff(%)
KCS	f_w	0.919	0.932	1.4
JBC		0.800	0.835	4.4
KCS	v_2 (knots)	22.05	22.39	1.5
JBC		11.59	12.11	4.5

4. 對 Kwon 半經驗公式的修正

比較以上三種計算方法，顯示於表 10 及表 11，由比較結果可以發現，與 MEPC 公式以及計算流力方法計算結果比較下，Kwon 公式高估了天氣因子。雖然計算流力的計算結果未必正確，但為了顯示 Kwon 公式的彈性，我們以計算流力方法計算所得到的船舶失速做為參考，對 Kwon 公式進行了修正。

我們對於公式的修正，係基於廣義既約梯度法 (Generalized Reduced Gradient method)，此方法是用於解決非線性問題優化的算法，透過對表 3 中公式

係數得調整得出與計算流力方法計算結果相符合的公式；式 9 及 10 分別為 KCS 及 JBC 的修正公式。

$$C_F = 0.7 \cdot 1.2BN + \frac{BN^{6.5}}{22 \cdot 0.827^{\frac{2}{3}}} \quad (9)$$

$$C_F = 0.5 \cdot 1.2BN + \frac{BN^{6.5}}{22 \cdot 0.827^{\frac{2}{3}}} \quad (10)$$

自下表 12 以及表 13 之結果可以看到修正之後由修正 Kwon 公式計算得出之結果與計算流力方法之結果完全吻合；本文接下來將利用此修正後的公式對航線進行最佳化規劃。

表 12 比較以計算流力方法及修正 Kwon 公式計算失速後的船速 v_2 之差異

		CFD	Remodified Kwon	Diff (%)
KCS	v_2	22.05	22.05	0
JBC	(knots)	11.59	11.59	0

表 13 比較以計算流力方法與修正 Kwon 公式計算天氣因子 f_w 之差異

		CFD	Remodified Kwon	Diff (%)
KCS	f_w	0.919	0.919	0
JBC		0.800	0.800	0

天氣定航最佳化方法

1. 動態規劃法

在本文中，我們選擇動態規劃法來求解航線最佳化的問題，當一個大問題可以分成許相似的小問題時，動態規劃可以遞迴的方式解決相互關聯的這些小問題，並優化其整體效率。本文所應用的，正是動態規劃法中最短路徑問題的演算法。在動態規劃法中將一個複雜的問題轉換為數個更為簡單的問題，它的基本特性是多階段的過程優化(Bradley, 1977[24])。對於航線規劃而言，應用動態規劃法的最終目標不是避開所有不佳的天氣，而是在保證船隻及船員不受天氣影響而造成損失的前提下，尋找一條最為快捷的路線。

以下簡單介紹動態規劃法的運作方式及變數。

1.1 階段

動態規劃法的基本性質是將問題劃分成多個階段並逐一解決，各個階段看似作為獨立的問題，實際上各問題的解都能作為求解下個問題的條件之一。本文為了達到歸劃出最短航行時間的目標，因此選擇了航程作為階段變數，各個階段都代表了航線上的轉向點。

1.2 節點

動態規劃法的另一個性質是優化問題各階段的關聯狀態，而結點則是負責控制每個階段上有可能的選擇，節點數越多，相應的計算量就越大。設置節點前必須對目標問題有深入瞭解，在設置上並沒有明確的規則要求。本文中的節點是航路規劃時可供選擇的轉折點(即航路點)，以初始航路為中心延伸出一條垂直於航路的線作設置，如下一節所示，每一階段的每一節點皆能明確表達。

1.3 遞迴優化

動態規劃法最後一個基本性質是其在求解問題時，會一個階段開始求解，而後再陸續添加後續階段的解，最後完成 N 個階段的問題解答，此性質稱為遞迴優化。遞迴優化可分為正向歸納以及逆向歸納兩種；首先要解決最初或最後階段的問題，在一次移回一個階段進行求解；對於涉及不確定性的問題如本文的航線規劃問題，較簡單的方法是通過逆向歸納來求解。在未來的發展中，將延伸為三維、正像的方法。

遞迴優化中可計算出階段間航行的最短時間，而對天氣預報而言當時間跨度越大時，預報的精確度下降幅度就越大，因此在後續模擬中，除了以航線起點推估最佳航線外，也在每一階段上以該點及時天氣重新規劃路線，以避免預報精確度降低造成路線規劃失真。

2. 航線規劃

在進行航線規劃時，我們將以圖 8 的步驟進行：

1. 以大圈航法或是歷史航線作為初始航線，獲取初始航路；
2. 在各個階段上設置複數個節點，並利用半正矢公式計算得到各節點間距離；
3. 自起點開始以天氣預報資料及 Kwon 半經驗公式計算各節點間航速；
4. 將上一步計算所得距離及航速放入動態規劃程式中計算得到此點預測之最佳航線；
5. 以此航線之第二點作為新的起點，重複步驟 3 及步驟 4；
6. 重複計算至最終點前一點，即可獲得以各點即時資訊計算出的最佳航線。

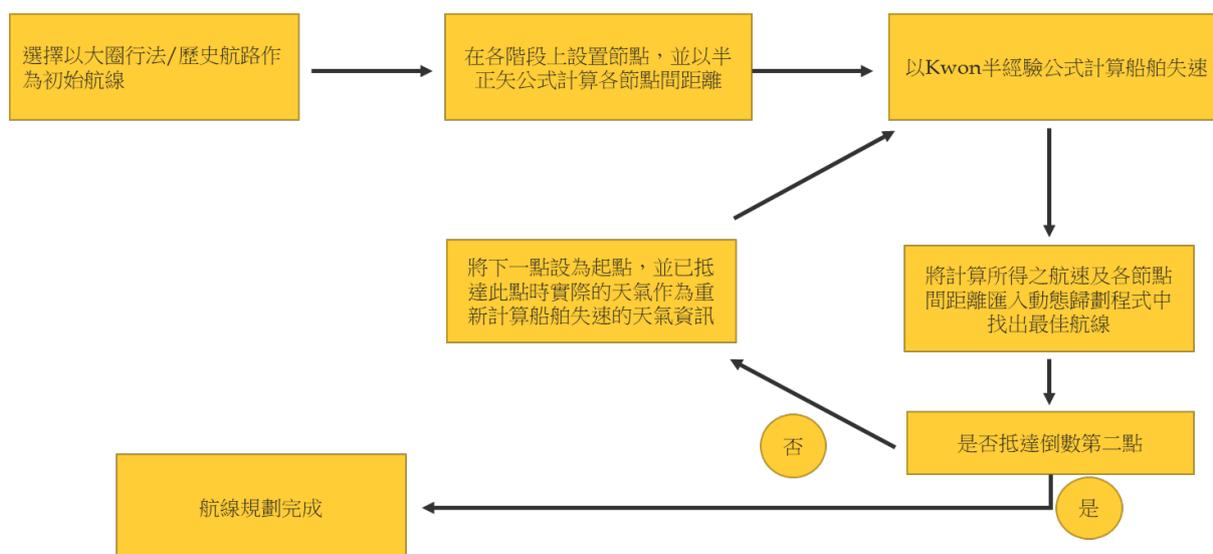


圖 8: 最佳航線規劃流程示意圖

案例分析

在本文中，選用一艘大小為 4600TEU 的貨櫃船做為模擬對象，去程航線為自加拿大哈利法克斯港(L. 44°39.0'N, λ 63°34.0'W)航行至荷蘭鹿特丹港(L. 51°55.0'N, λ 4°28.0'W)，回程航線為英國倫敦(L. 51°30.0'N, λ 0°07.0'W)至美國諾福克港(L. 36°51.0'N, λ 76°17.0'W)，以該船商轉時的歷史航線作為初始航線進行模擬。

進行航線規劃時，除了大圈航法外，我們也採用被模擬船隻商轉時的歷史航線作為我們的初始航路；本次模擬所採用的路線轉向點皆是基於該船在航行日誌中所紀錄之座標點設置。由於航線規劃時不考慮進出港段以及河口航行路段，因此我們將路線的起點以及終點分別設在位於公海上的(L. 43°93.0'N, λ 61°90.0'W) 以及 (L. 49°69.0'N, λ 13°80.0'W)，將此次模擬建立為一 15 個階段動態規劃問題。本文在進行航線規劃時，使用 ECMWF 所提供每三小時更新一次的北大西洋的天氣資訊，在各階段間移動時採用不同的天氣資訊並帶入 Kwon 公式中計算船速。

除了路線的起點以及終點外，我們去程航線上各階段均設置了 11 個節點供規劃時做選擇，最外圍的節點距離初始航線緯度 0.25°。圖 9 為基於此貨櫃船在相同天氣條件下歷史航線與自起點開始進行預測的最佳航路進行的比較。白色線為初始航線(歷史航線)，深藍色線為在起點時，以當時航線經過點天氣，透過修正 Kwon 公式預測的最佳航線，而紅色線則為以通過各點即時天氣，由修正 Kwon 公式規劃出的最佳航線。

表 14 為去程各路線的總航程以及總耗時，由表可以看出，在去程航線上，如果不進行定航，可節省 7.93% 的時間；如果以出發時各點天氣規畫最佳航線，較歷史航線可節省約 4.38% 的時間，而利用各點即時氣象資訊所規劃所得的路線則須多消耗 0.35% 的時間，顯示此種以即時天氣定航的方法與歷史航線相同，也是最實際的方法。

表 14 去程各航線所需時間及總行程比較

	歷史航線	不考慮天氣	根據出發時之天氣	根據即時天氣
距離(km)	3805.6	3805.6	3801.5	3769.8
時間(day)	4.061	3.739	3.883	4.075
差異%		-7.93%	-4.38%	0.35%

表 15 回程各航線所需時間及總行程比較

	歷史航線	不考慮天氣	根據出發時之天氣	根據即時天氣
距離(km)	5832.1	5832.1	5785.4	5808.5
時間(day)	5.881	5.73	5.762	5.84
差異%		-2.57%	-2.02%	-0.70%

回程航線同樣在各個階段上設置 11 個節點供規劃做選擇，並分別記錄了自起點開始預測的最佳航線以及以各點即時天氣規劃出的最佳航線。圖 10 為回程各路線比較，同樣的，白色線為初始航線(歷史航線)，深藍色線為在起點時，以當時航線經過點天氣，透過修正 Kwon 公式預測的最佳航線，而紅色

線則為以通過各點即時天氣，由修正 Kwon 公式規劃出的最佳航線。表 15 為兩航線之比較，可看出如不進行定航，可節省 2.57% 的時間；以出發時各點天氣規畫最佳航線，可節省約 2.02% 的時間，而利

用各點即時氣象資訊則可節省 0.70% 的時間，與歷史航線接近，再度顯示此航線規劃是最合理與最實際的。也顯示出回程的天氣較去程時為佳，影響航線較小。

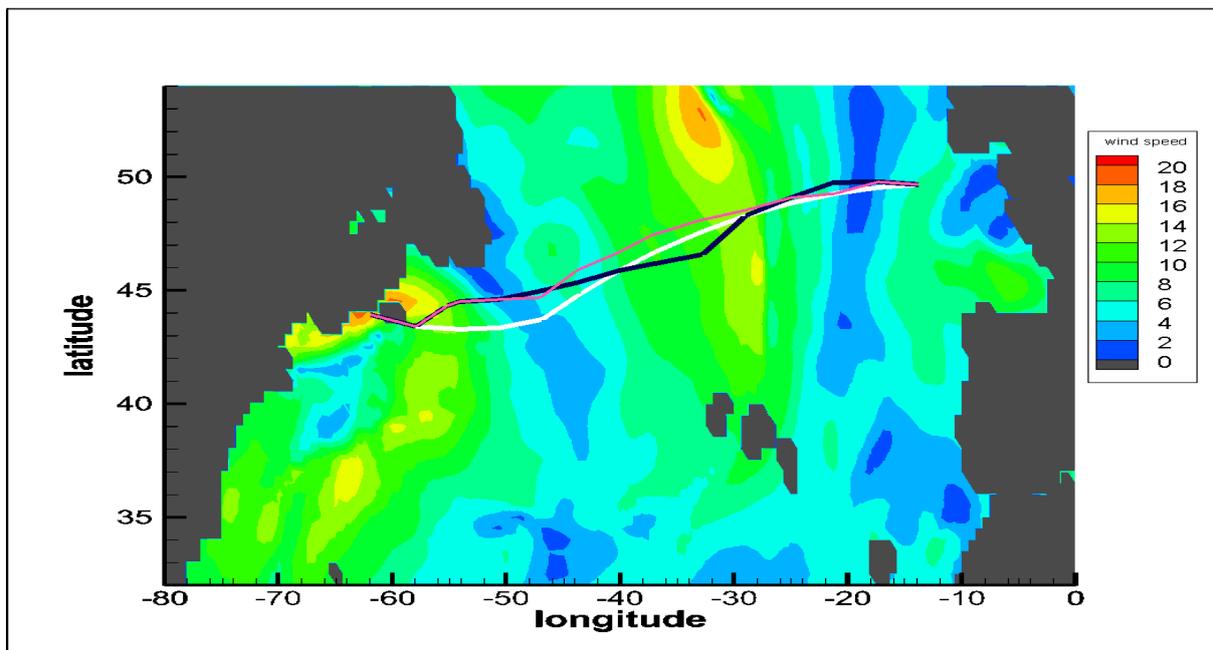


圖 9: 去程三種不同航線比較圖。白色線為初始航線(歷史航線)，深藍色線為在起點時，以當時航線經過點天氣，透過修正 Kwon 公式預測的最佳航線，而紅色線則為以通過各點即時天氣，由修正 Kwon 公式規劃出的最佳航線。

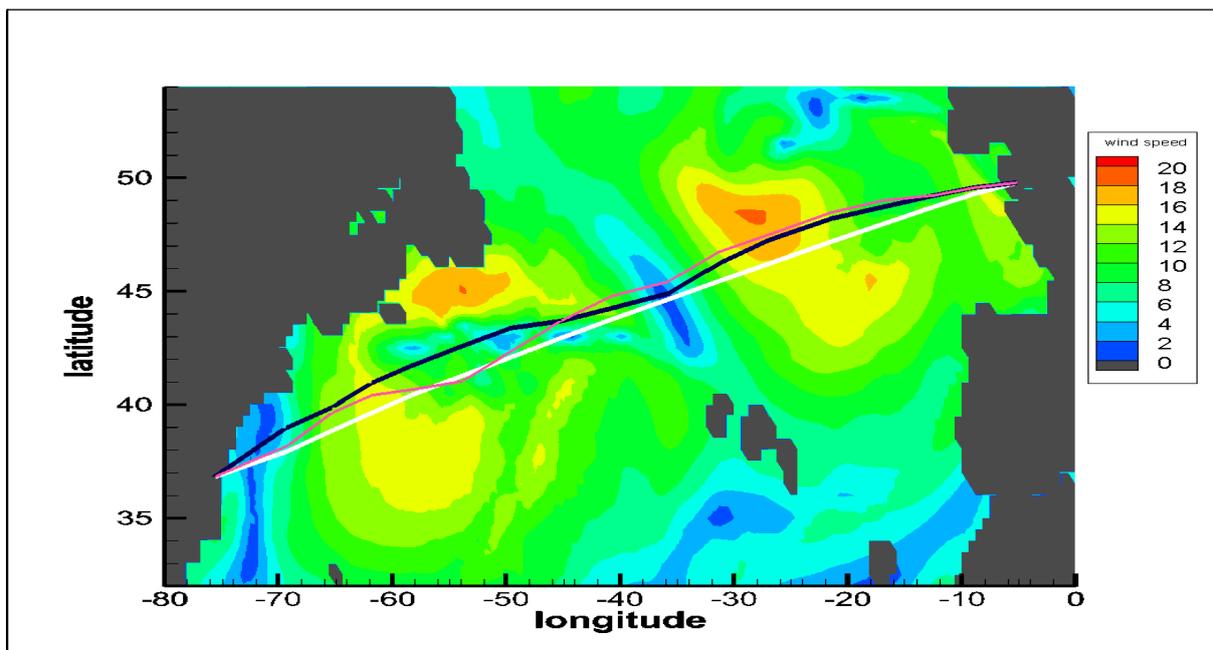


圖 10: 去程三種不同航線比較圖。白色線為初始航線(歷史航線)，深藍色線為在起點時，以當時航線經過點天氣，透過修正 Kwon 公式預測的最佳航線，而紅色線則為以通過各點即時天氣，由修正 Kwon 公式規劃出的最佳航線。

結論

本文主要集中於討論利用半經驗公式及動態規劃法進行航線最佳化的有效性以及可行性。透過不同計算方法對於失速的評估與比較，本文修正了 Kwon 半經驗公式的船型係數方程式以計算特定船型在不同海況下的航行性能。本文所應用的最佳化方法為動態規劃法，結合其與修正 Kwon 半經驗公式計算出最佳航線。文中通過對兩個貨櫃輪的案例研究，與大圈航法及歷史航線進行比較，發現都較為節省時間。因此，本文所提出的方法被證實路線最佳化方面是可行的。

就實際而言，除了航線最佳化外，本研究還有更多的可能性；最佳的航線對不同使用途徑的船舶而言有不同的標準，船隻的使用者可能更為注重安全性、穩定性亦或是燃油消耗量等指標，而在達成使用者要求的前提下規劃出最佳的航線便是接下來我們研究的重要方向。本研究未來的目標在於改進航線規劃方法，例如對於燃料消耗量、營運成本、碳排放、船速等進行航線最佳化，我們因此將能考慮更多不同的因素以及標準，以達到更精確的結果。

參考文獻

1. Kashiwagi, M., K. Sugimoto, T. Ueda, K. Yamasaki, K. Arihama, K. Kimura, R. Yamashita, A. Itoh, and S. Mizokami, "An Analysis System for Propulsive Performance in Waves," *Int. Journal of the Kansai society of naval architects*, No. 241 (2004).
2. Chuang, Z., and S. Sverre, "Speed loss of a vessel sailing in oblique waves," *Int. Ocean Engineering*, 64, 88-99 (2013).
3. Kim, M., H. Olgun, T. Osman, D. Sandy, I. Atilla, "Estimation of added resistance and ship speed loss in a seaway," *Ocean Engineering*, 141, 465-476 (2017).
4. Ching-Yeh Hsin, Chun-Ta Lin, Ching-Pu Lee, Chiung-Chih Lin and Jiahn-Horng Chen, "Study of the Wave Effects on Propeller Performance by Computations", *Journal of Taiwan Society of Naval Architects and Marine Engineers*, Vol. 35, No. 4, 2016
5. Lin, C.-T, Hsin, C.-Y., Lin, L., Chen, C.-C. and Lin, C.-W., "Evaluation of the Speed Loss in Seaway by Computational Methods," *Proc. 7th PAAMES and AMEC*, Hong Kong (2016).
6. Ching-Yeh Hsin, Ling Lu, Suz-Kuan Huang, Yao-Tang Mao and Yu-Wen Hsieh, "Simulations of the Self-Propulsion Test in Seaway by Different Approaches", *The 32nd Symposium on Naval Hydrodynamics*, 5-10 August 2018, Hamburg, Germany
7. Ling Lu, Yao-Tang Mao and Ching-Yeh Hsin, "Computation of the Speed Loss in Seaway by Different Approaches". *The 28th International Ocean and Polar Engineering Conference (ISOPE 2018)*, Sapporo, Japan June 10-15, 2018
8. Kwon, Y. J., "Speed loss due to added resistance in wind and waves," *The Naval Architect*, RINA, London, March, 14-16 (2008)
9. MEPC.1/Circ.796. IMO, 12 October 2012
10. 張顯瓊,陳冠臻,林宗岳,辛敬業, "應用不同方法計算波浪航行中之船舶失速", 第三十二屆中國造船暨輪機工程研討會暨國科會成果發表會, July 17-18, 2020, 台北市
11. Bijlsma, S. J., "On minimal-time ship routing", PhD. thesis, Royal Netherlands Meteorological Institute, Delft University of Technology (1975)
12. James, R. W., "Application of wave forecast to marine navigation", *US Navy Hydrographic Office*, Washington (1957)
13. Lin, Y. H., and Fang, M. C., "The Ship-Routing Optimization Based on the Three-Dimensional Modified Isochrone Method", *Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, No. 10959 (2013).
14. Spaans, J. A., "New developments in ship weather routing", *Navigation*, Vol. 169, pp. 95-106 (1995)
15. Tsujimoto M., Tanizawa K., "Development of a weather adaptive navigation system considering ship performance in actual seas" *Proc. 25th Int Conf on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, Hamburg, Germany, pp. 4-9 (2006)
16. Bekker, J. F., and Schmid, J. P., "Planning the safe transit of a ship through a mapped minefield", *JORSSA*, Vol. 22, pp. 1-18. (2006)
17. Dijkstra, E. W., "Note on two problems in connection with graphs (spanning tree, shortest path)", *Numer Math*, Vol. 1 pp. 269-271 (1959)
18. Takashima, K., Mezaoui, B., and Shoji, R., "On the fuel saving operation for coastal merchant ships using weather routing", *International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, Vol. 3, pp. 401-406 (2009)
19. Padhy, C. P., Sen, D., and Bhaskaran, P. K. "Application of wave model for weather routing of ships in the North Indian Ocean", *Natural Hazards*, Vol. 44, pp. 373-385 (2008)
20. 張顯瓊, "結合半經驗船舶失速預測方法與動態規劃法進行航路最佳化", 國立臺灣海洋大學碩士論文, 2020
21. Bellman, R.E., "Dynamic Programming: Adoptive Control Processes", Princeton: Princeton University Press.
22. Avgouleas, J., "Optimal ship routing," MSc thesis, Massachusetts Institute of Technology (2008)
23. Shao, W., Zhou, P. L., and Thong, S. K.. "Development of a novel forward dynamic programming method for weather routing", *Journal of Marine Science and Technology*, Vol.17, pp. 239-251 (2012)
24. Bradley, S, Hax, A, Magnanti, T., *Applied mathematical programming*. Addison-Wesley, Reading, MA, 1977

APPLICATION OF SEMI-EMPIRICAL SPEED LOSS PREDICTION METHODS AND DYNAMIC PROGRAMMING FOR SHIP VOYAGE OPTIMIZATION

Shang-Chi Liu Ho-King Cheung* Kuan-Chen Chen** Tsung-Yueh Lin** Ching-Yeh Hsin**

*Department of Systems Engineering and Naval Architecture,
National Taiwan Ocean University

**Department of Research, CR Classification Society

Keywords: speed loss, self-propulsion, body force method, CFD, Dynamic Programming

ABSTRACT

Increasingly stringent maritime regulations and unpredictable market needs are placing more pressure on the shipping industry to further develop and improve voyage optimization and weather routing systems. In this paper, a semi-empirical speed loss prediction method has been developed to predict the added resistance caused by waves and wind for ocean going ships like container, bulk carrier, etc., as well as an optimal weather routing prototype based on dynamic programming, which can reduce voyage time to produce an optimization program. The speed loss in seaway is evaluated by three different methods, and the reliability and efficiency are analyzed. A ship performance model is formulated with the Computational Fluid Dynamic (CFD) and empirical formula to get a closer approximation of speed loss in seaway. A container ship KCS and a bulk carrier JBC are used to demonstrate the speed loss computations of the Kwon's and MEPC's empirical formula in addition to the CFD simulation, and results of all approaches are compared to each other and investigated. The weather data is combined with the realistic modelling of the vessel performance both in calm and rough seas in a computerized grid system to predict the optimal route in reasonable time and accuracy. The use of dynamic programming reduces the iterations required during optimization and is proven to be effective for saving computational time. Two container ships' simulations are based on great circle route and actual field data collected. Case studies are carried out based on this optimal weather routing prototype, then compared with the historical voyage performance. The successful results of the case studies clearly illustrate that the developed method on ship performance modeling with dynamic programming optimization is a promising direction. The proposed weather routing prototype has facilitated real-time comparisons, which can provide as reference showing an effective solution for related research in the shipping industry.