

徵收碳稅對船舶減速與營運成本間之 影響評估

ASSESSMENT OF THE IMPACT OF A CARBON TAX ON SPEED REDUCTIONS AND OPERATING COSTS IN SHIPPING

張瀞之 Ching-Chih Chang¹

王志敏 Chih-Ming Wang²

(99 年 7 月 1 日收稿，99 年 9 月 8 日第一次修改，99 年 11 月 8 日第二次修改，
99 年 11 月 18 日第三次修改，99 年 12 月 12 日定稿)

摘 要

本文依據船舶燃油消耗量與燃油排放係數，進行分析國際海運產業主要船型（包括海岬型散裝船、輕便型散裝船、超大型油輪、輕便型成品油油輪、次巴拿馬型貨櫃輪與輕便型貨櫃船）之溫室氣體排放量，並模擬在徵收碳稅的情境下，對於航運業者營運成本之影響。首先估計各種船舶之溫室氣體排放量時，發現高速貨櫃船與小型船舶之單位排放量（公克／延噸海涅）高於其他船舶。而在模擬徵收碳稅對營運成本之影響時，燃油費用支出較高之船舶營運者會受到碳稅徵收之誘導，採取降速策略，以獲取降速節省之營運支出，降低碳稅之衝擊。本文同時也建構溫室氣體排放矩陣，有效檢視各種船舶排放量所屬區域，可以作為分級徵收碳稅的參考。

關鍵詞：海運；燃油消耗；碳稅；溫室氣體

-
1. 國立成功大學交通管理科學系暨電信研究所助理教授（聯絡地址：701 臺南市大學路 1 號成功大學交通管理科學系；連絡電話：06-2757575 轉 53225；E-mail：chan5305@mail.ncku.edu.tw）。
 2. 國立成功大學交通管理科學系暨電信研究所博士生（E-mail：wang8200@mail.nkmu.edu.tw）。

ABSTRACT

This paper presents an analysis of greenhouses gas emissions (GHG) for major ship types (capsize bulk carriers, handy-size bulk carriers, very large crude oil tankers, product tankers, sub-panamax container vessels and handy-size container vessels) based on the fuel consumption and emission factors for the fuel, and a simulation of the impact on shipping operating costs from adding a carbon tax to the fuel cost. The estimated GHG (grams of CO₂ per ton per nautical mile) showed that the small-sized and high speed container vessel had higher emission volumes than the other types of ships. The adoption of a fuel tax will lead to higher fuel costs for vessel owners and operators, who will thus need to offset these by reducing the speed of the ships. This paper also establishes an emission assessment matrix that makes it possible to evaluate the level of emissions for different types of ships, thus enabling the determination of an appropriate level of carbon tax on fuel.

Key Words: *Shipping; Fuel consumption; Carbon tax; Greenhouse gas emissions*

一、前言

二氧化碳為影響氣候變遷的重要物質，其被視為一種對公眾健康造成間接影響的空氣污染物，尤其石化燃料燃燒，產生大量二氧化碳吸收太陽輻射，過多的輻射使地球表面溫度上升，形成溫室效應，造成地球溫度上升。2007 年英國石油公司 (British Petroleum, BP) 與德國威斯靈「物理學與大氣研究院」的調查顯示，船舶產生的二氧化碳排放物是飛機所產生的兩倍，排放的數量並將隨著全球海上貿易量增長而上升。IMO³ (International Maritime Organization, IMO) 估計在 2007 年全球 3.3% 的二氧化碳排放來自遠洋船舶，如果未採取適當的策略，在 2050 年排放量將成長 150% 至 250%。Lauer 等人 (2007)^[1] 之研究顯示，為了對抗氣候變化，要即時採取行動，減少來自各個源頭的二氧化碳，當中尤以船舶為甚，因此國際海事組織已針對後京都時期之國際海運溫室氣體排放，納入排放交易體系進行研究，有關於船舶主要空氣污染物，所提出的方案包括規範不同的減量目標與排放交易方式，例如與基金連結的排放權交易、碳稅系統及能源效率設計指標，作為設定船舶減碳目標的起點，並透過成熟的技術與運轉措施，希望能獲致顯著節能減碳效果。

近年來多數研究集中在以船東或航運公司的觀點，來進行船舶降速減少溫室氣體排放之成本效益評估，Corbett 等人 (2009)^[2] 研究抵達美國港口的船舶，降低船速減少二氧化碳之溫室氣體的排放，其成本效益介於 30 至 200 (美元／噸)。本研究運用敏感度分析，進

3. International Maritime Organization, Second IMO GHG Study 2009 Update of the 2000 GHG Study: Final Report Covering Phase 1 and Phase 2, MEPC 59/INF.10, 2009.

行碳稅對海運產業成本之影響評估，藉由敏感度分析可觀察評估模式的變數在某特定範圍內變動，以便深入了解模式行為或變化情形，並由此擬定適當的管理重點及因應之道，作為決策及執行時的參考。

研究船型主要依據 UNCTAD⁴ 統計 2009 年全球船隊組成，其中貨櫃輪 (13.1%)、散裝輪 (35.1%) 與油輪 (35.1%) 三種船舶合計佔全球船隊的 83.2%，IMO (2009) 也提到貨櫃輪、散裝輪與油輪為海運溫室氣體排放量前三大的船舶種類，因此實證分析時，以上述三種船舶為主，並將船舶依據載重噸位區分為大型與小型，分析探討以下四個問題：

1. 主要船舶種類與船型大小，其溫室氣體排放量差異如何？降低船速對於主要船舶，可降低多少之溫室氣體排放量？
2. 徵收碳稅對於船舶營運成本會產生什麼影響？不同碳稅其影響結果如何？
3. 模擬徵收碳稅，並採取降低船速之策略，對於船舶營運成本會產生何種影響？不同降速策略對成本會產生何種變化？
4. 建立船舶排放矩陣，提供識別船舶排放量，作為徵收碳稅的分級參考。

二、模型建構

本章回顧學者研究，並融合海運業者的經驗，選擇最適切的理論與實務為基礎，逐步架構估算船舶溫室氣體排放模式，以及降低船速所能減少之排放量，並由僱船人之觀點評估降速對其營運之影響，最後模擬徵收碳稅對成本之影響，在假設徵收碳稅之情況下，以降低船速的策略評估對於僱船人成本變動情形。

2.1 船舶溫室氣體排放量評估模式建構

WBCSD⁵ 建議對於移動源溫室氣體之 CO₂ 排放量的計算方法，可依距離或燃油消耗為基礎進行衡量，其中以距離計算 CO₂ 排放量之不確定性高，以燃料為計算基礎較可靠，因此本研究以燃油消耗為基礎，進行船舶溫室氣體排放評估。Climate Action Network Europe (2010)^[3]、Eide 等人 (2009)^[4]、Psaraftis 等人 (2009)^[5] 曾建立航次燃油消耗標準式以計算排放量。Entec⁶ 在分析船舶溫室氣體排放之研究中，強調應將船舶動態 (operation activities) 分別設定為：(1) 航行狀況 (at sea)：為航行啟動主機推動螺旋槳，並以輔助發電機，提供船舶設備等電力，例如航行儀器、空調、冷凍與機艙輔助設備等，此狀況耗費燃

4. United Nations Conference on Trade and Development, Review of Maritime Transport 2009, 2009.

5. World Business Council for Sustainable Development, WRI: The Greenhouse Gas Protocol, Calculating CO₂ Emissions from Mobile Sources, Guidance to calculation worksheets World Business Council for Sustainable Development, 2002.

6. Entec., Quantification of emissions from ships associated with ship movements between ports in the European Community, Entec for the European Commission, UK Limited, 2002.

油較多；(2) 機動狀況 (maneuvering)：進出港口或行經狹窄水域，需隨時改變速率，靈活地操控船舶，主機與輔機都啟動，以維護船舶安全；(3) 靠泊港口狀況 (in port)：此時船舶以纜繩繫泊於碼頭，主機停用只需提供船舶一般設備與裝卸貨所需的電力。以上三者動態所需要的動力不同，因此消耗燃油量也不相同，所以在評估時分別估計船舶航行、機動與泊港之耗油量，作為溫室氣體排放計算基礎，可符合實際船舶消耗，另外船舶老舊、油源品質等都是影響船舶排放變數之一，但是經由良好監督與機械維護，也可避免增加船舶排放，此影響屬不確定變數無法量化，因此本研究未列入評估模式中，以下為模型建構說明：

1. 船舶每航次燃油消耗計算模式

如式 (1) 所示：

$$FC^{ij} = FC_{as}^{ij} + FC_m^{ij} + FC_{ip}^{ij} = \frac{D}{24V} \cdot [MEF_{as} + AEF_{as}] + \frac{T_m}{24} \cdot [MEF_m + AEF_m] + \frac{T_{ap}}{24} \cdot AEF_{ip} \quad (1)$$

其中，

FC^{ij} ：由 i 港至 j 港航次燃油總消耗量；

FC_{as}^{ij} ：由 i 港至 j 港航次航行時燃油總消耗量；

FC_m^{ij} ：由 i 港至 j 港航次機動時燃油總消耗量；

FC_{ip}^{ij} ：由 i 港至 j 港航次在港時燃油總消耗量；

D ：由出發港 i 至目的港 j 距離 (海浬)；

V ：航行船速 (海浬／小時)；

MEF_{as} ：航行時主機每日燃油消耗 (噸)；

MEF_m ：機動時主機每日燃油消耗 (噸)；

AEF_{as} ：航行時輔助發電機每日燃油消耗 (噸)；

AEF_{ip} ：泊港時輔助發電機每日燃油消耗 (噸)；

AEF_m ：機動時輔助發電機每日燃油消耗 (噸)；

T_m ：機動總時數 (小時)；

T_{ip} ：泊港總時數 (小時)。

2. 船舶航次溫室氣體排放量計算模式

溫室氣體排放量計算為燃油消耗量與排放係數之乘積，Lauer 等人 (2007)^[1]指出溫室效應氣體 (greenhouse gas emissions) 包括：氮氧化物 (nitrogen Oxides：NO_x)、二氧化碳 (carbon dioxide：CO₂)、二氧化硫 (sulphur dioxide：SO₂) 和碳氫化合物 (Hydrocarbon：HC) 以及粒狀污染物質 (particulate matter：PM) 等。依據 Entec⁷、IMO⁸ 等所提出燃油消耗對

7. Entec, European Commission Service Contract on Ship Emissions: Assignment, Abatement and Market-based Instruments. Task 2 – General Report, Entec UK Limited, 2005.

8. International Maritime Organization, Report of the Drafting Group on Amendments to MARPOL

於各種溫室氣體轉化的排放係數 (如表 1)，係依不同用途之船舶類型與船舶動態(航行、機動或泊港)，再依據船型、船舶大小與燃料類別所收集之航程距離之數據。IMO⁹設定運輸產業 CO₂ 排放指標為公克／延噸里 (g/tonne-km)，本研究考慮海運距離單位為海浬，因此以海浬與載重噸位作為計算排放量單位指標 (公克／延噸海浬) 排放量，其模式如式 (2) 所示：

$$E_k = (EF_{kas} \cdot FC_{as}^{ij} + EF_{km} \cdot FC_m^{ij} + EF_{kap} \cdot FC_{ip}^{ij}) / (D \times DWT) \quad (2)$$

其中，

E_k ：溫室氣體單位載重噸距離之排放量 (公克／延噸海浬)， k 為 NO_x 、 SO_2 、 CO_2 、 HC 、 PM 等溫室氣體；

EF_{kas} 、 EF_{km} 、 EF_{kap} ：某種溫室氣體之航行、機動與泊港排放係數 (公克／噸)；

FC_{as}^{ij} 、 FC_m^{ij} 、 FC_{ip}^{ij} ：由 i 港至 j 港航次之航行、機動與泊港燃油消耗量 (噸)；

D ：由出發港 i 至目的港 j 距離 (海浬)；

DWT ：船舶載重噸位 (噸)。

表 1 不同船型每噸燃油之溫室氣體排放係數

單位：公克／噸

船舶動態	船 型	NO_x	SO_2	CO_2	HC	PM
航 行	散裝船	92,000	54,000	3,179,000	3,000	6,700
	油 輪	75,000	54,000	3,179,000	25,000	6,700
	貨櫃船	89,000	54,000	3,179,000	3,000	6,700
機 動	散裝船	66,000	54,000	3,179,000	7,800	10,600
	油 輪	55,000	54,000	3,179,000	6,400	9,700
	貨櫃船	64,000	54,000	3,179,000	7,600	10,400
泊 港	散裝船	61,700	69,500	3,179,000	1,700	3,500
	油 輪	61,700	69,500	3,179,000	1,700	3,500
	貨櫃船	61,700	69,500	3,179,000	1,700	3,500

資料來源：ENTEC UK Limited (2002)、IMO (2008)、IMO (2009)。

Annex VI and the NO_x Technical Code. MEPC 58 /WP. 9, 2008.

9. International Maritime Organization., A Mandatory CO₂ Design Index for New Ships. MEPC 57/INF.12, 2007.

2.2 實施碳稅 (carbon tax) 對船舶營運之敏感度評估模式建構

國際海事組織 (IMO) 所屬之海洋環境保護委員會 (MEPC) 在第 57 次會期，溫室體相關議題的期中工作小組 (Intersessional Correspondence Group) 提出短期性最具可行性的減量對策，即對個別業者的排放量徵以碳稅 (亦稱 GHG 排放費)，而簡單的徵收方法可隨油徵收 (購買時即由燃油供應商代為收取，但也有提議依海運燃油運送量，定時向船東或船舶營運者收取)，收取之排放費回到海運業成立基金，專供研發溫室氣體減量技術或自其他產業購入排放權，所以本研究模擬將碳稅徵收併入燃油價格，探討對減少排放量產生之效益。

Stopford (2008)^[6] 指出船舶論時傭船，固定費用由船舶所有人負擔，航程費用由定期傭船人負擔，傭船人除依契約支付租金外，最主要費用支出為燃油費用，因此本研究將租金與燃油費兩者歸納為營運成本。碳稅徵收一定會導致海運業者成本增加，為檢測影響大小，本研究評建構估模式如式 (3)：

$$EFT\% = \frac{FC^{ij} \cdot CT}{\left(\frac{D}{24V} \cdot TC + FC^{ij} \cdot FP\right)} \cdot 100\% \quad (3)$$

其中，

$EFT\%$ ：對營運成本之影響比例 (%)；

FC^{ij} ：由 i 港至 j 港航次燃油總消耗量；

CT ：碳稅 (美金) = 燃油價格 $\times n$ ($n = 10\%, 20\%, 30\%, \dots, 90\%, 100\%$)；

D ：由 i 港至 j 港之航行距離；

TC ：一年期論時傭船租金 (美金/日)；

FP ：燃油價格 (美金/噸)。

2.3 降低船速對船舶營運之敏感度評估模式建構

國際海事組織秘書長 Mitropoulos (2009)^[7] 提到溫室氣體排放和燃料效率直接相關，燃料消耗越少，溫室氣體的排放量就越小。減少海上溫室氣體排放最直接的方法是降低船速，對於現成船而言可以立即收到成效，而且依據學者研究只要船舶減速 10%，二氧化碳排放量即可減少 23%，但是貨運速度減慢的話，傭船人勢必多付租金，增加的租金費用將導至成本增加，而且降速也影響整體航行時間，因此式 (4) 中，可計算航行中降速前後所減少之溫室氣體排放量。但是在整體航程中，減速只影響全速航行的時間，並不會增加機動與在港時間，因此模式可簡化為只計算航行中降速前後之燃油消耗差距，再乘以溫室氣體排放係數，即可評估所減少之溫室氣體排放量。

$$\Delta E_K = EF_K (FC^{ij} - RFC^{ij}) = EF_{kas} \cdot (FC_{as}^{ij} - RFC_{as}^{ij}) \quad (4)$$

其中，

ΔE_k ：降低船速後某種溫室氣體排放減少量 (噸)；

EF_k ：某種溫室氣體排放係數 (公克／噸)；

EF_{kas} ：航行時某種溫室氣體排放係數 (公克／噸)；

RFC^{ij} ：由 i 港至 j 港航次降速後燃油總消耗量；

FC^{ij} ：由 i 港至 j 港航次燃油總消耗量；

RFC_{as}^{ij} ：由 i 港至 j 港航次降速後航行 (at sea) 之燃油消耗量 (噸)。

對於傭船人而言，降低船速將增加海上航行時間、延長租期並增加支付租金，但降低船速同時亦減少燃油消耗，也節省燃油費用支出，因此，本文建構不同船速節能減碳影響模式，進行敏感度分析，可提供海運業者進行決策的參考資訊。IMO (2007) 指出，航速的變化與主機功率及燃油消耗量呈三次方關係；評估模式包括二部分，第一部分為降低船速減少燃油消耗，亦節省燃料費用支出；第二部分為降低船速延長海上航行時間，增加傭船人租金支出。式 (5) 為設計不同降速比率與降速產生之租金與燃油成本變動敏感度評估模式，如果 $EFT\%$ 為負數 (-) 則表示降速會減少成本支出，其結果是產生降速紅利 (reduce speed dividend) 或是 $EFT\%$ 為正數 (+) 則表示降速會增加成本支出。

$$EFT\% = \frac{[(VD_1 \cdot TC + NFC^{ij} \cdot FP) - (VD_0 \cdot TC + FC^{ij} \cdot FP)]}{OP} \times 100\% \\ = \frac{\left[\left[\left(\frac{D}{24S_1} \right) \cdot TC \right] + \left[\left(\frac{S_1}{S_0} \right)^3 \cdot FC \times FP \right] \right] - \left[\left(\frac{D}{24S_0} \right) \cdot TC \right] + (FC^{ij} \cdot FP)}{(VD_0 \cdot TC + (FC^{ij} \cdot FP))} \times 100\% \quad (5)$$

其中，

$EFT\%$ ：對營運成本之影響比例 (%)；

VD_0 ：原設計航速之航行日數；

VD_1 ：降速後新船速的航行日數；

S_1 ：降速後之新船速 (海浬／小時)；

S_0 ：主機設計船速 (海浬／小時)；

FC^{ij} ：由 i 港至 j 港航次燃油消耗量 (噸)；

NFC^{ij} ：由 i 港至 j 港航次降速後新航速的燃油消耗量 (噸)；

OP ：營運總成本 (美金)；

FP ：燃油價格 (美金／噸)。

2.4 降低船速與開徵碳稅對船舶營運之敏感度評估模式

本研究建構一個節能減碳影響評估模式，模擬當 IMO 訂定碳稅徵收時，海運業者如以降低船速方式因應，在不同船速下對業者成本所產生之敏感度變動情形，模式中加入以隨油徵收碳稅的方式，評估在不同船速中成本之變動，如式 (6) 所示。

$$EFT\% = \left[\left(VD_1 \cdot TC + (NFC^{ij} \cdot (FP + CT)) \right) - \left(VD_0 \cdot TC + (FC^{ij} \cdot FP) \right) \right] / OP \times 100\% \quad (6)$$

雖然減少海上溫室氣體排放可採取降低船速方式，但是運送速度減慢的話，在全球運輸需求不變之情況下，海運業者勢必增加船舶數目來滿足市場需求，增加船數同時亦會導至成本增加。因此實施船舶節能減碳相關策略分析，進行影響評估甚為重要，而且海運業者若能早期獲得足夠參考資訊，在未來 IMO 制定海運因應氣候變遷、溫室氣體減排之策略時，將可快速選擇適切因應方案，有助於降低營運所受之衝擊。

三、實證分析

本節實證以貨櫃輪、散裝輪與油輪三種主要船舶種類進行分析，Stopford (2008)^[6]提到海運景氣跟隨全球經濟呈現規則性週期循環，因此租金與燃油成本都存在高度變動風險，實證中為能夠評估真實的降低船速利益，將海運市場成本相關之時間序列資料，都納入模式之中，進行動態模擬降低船速減少溫室氣體排放量，檢視對於傭船人營運之影響，並進一步分析徵收碳稅與降低船速可能產生之利益或損失。

3.1 資料來源與設定

1. 資料說明

本研究變數之租金為各型船 1 年期論時傭船租金 (美元/日)，燃油則包括海運重油 (380cst 燃油) 與海運柴油，資料期間為自 2000 年 1 月至 2008 年 9 月止之平均值；各船型船速與燃油消耗資料如表 2 所示，其中散裝與油輪之載重噸位選擇與 Clarkson 標準船型相同之船舶，作為案例分析之樣本船舶資料，貨櫃船則以 20 呎貨櫃裝載量相同之貨櫃船作為樣本船舶資料，資料來源皆參考 Clarkson Research Services Limited 資料庫。

2. 航線距離與港口停泊時間

本研究依據船舶屬性分別設定其船舶動態，假設全部船舶泊港時間以每航次 240 小時計算 (包括裝卸貨時間)，船舶機動時間以每一次進出港，各耗費 3 小時計算；散裝船與油輪去程空載、回程滿載；貨櫃輪去程與回程，設定為相同載運貨櫃量。散裝船航線選擇運煤航線，海岬型船往返日本至南非、輕便型船往返日本至印度。超大型油輪航線往返日本至波斯灣運載原油、輕便型油輪航線往返日本至新加坡運載產品油。貨櫃船航線選擇，次

巴拿馬貨櫃輪航線為東北亞至波斯灣、輕便型貨櫃輪為東北亞至印度航線，各航線之航行距離依據 Reynolds 與 Caney (2007)^[8] 距離表計算（詳列於表 3）。

表 2 資料說明

項 目	資料名稱	載重噸位	平均船速 (kts)	平均燃油消耗 (噸／日)
1 年期論時備 船租金 (美元／日)	海岬型散裝船 (Capesize)	150,000 dwt	14.25	50.8
	輕便型散裝船 (Handysize)	30,000 dwt	14.05	26
	超大型油輪 (Duble Hull Modern)	310,000 dwt	16.0	96.8
	輕便型油輪 (Modern Products)	48,000 dwt	15.05	40.3
	巴拿馬型貨櫃輪 (Sub-Panamax)	43,198 dwt (2,750 teu)	20.5	74
	輕便型貨櫃輪 (Handysize)	26,288 dwt (1,700 teu)	18.8	47.5
燃油價格 (美元／噸)	海運重油 (380cst 燃油)	Intermediate Fuel Oil 380 cst		
	海運柴油	Marine Diesel Oil		

表 3 船舶動態與航線說明

船舶類別	單程距離 (海浬)	說 明
海岬型散裝船	7,791	日本↔南非 (Tokyo-RichardBay)
輕便型散裝船	5,852	日本↔印度 (Tokyo- Bomba)
超大型油輪	6,761	日本↔波斯灣 (Tokyo-Kuwait)
輕便型油輪	2,908	日本↔新加坡 (Tokyo-Singapore)
次巴拿馬型貨櫃輪	7,501	東北亞↔波斯灣 (Tokyo-Pusan-Shanghai-Singapore-Bombay-Abu Dhabi-Kuwait)
輕便型貨櫃輪	5,857	東北亞↔印度 (Tokyo-Pusan-Shanghai-HongKong- Singapore-Bomba)
每次進港機動時間	3 小時	航行抵港減速至第一條纜繩繫泊至碼頭止
每次出港機動時間	3 小時	最後一條纜繩解除至離港全速航行止
裝貨時間	120 小時	裝貨港
卸貨時間	120 小時	卸貨港

資料來源：本研究整理自 Reeds Marine Distance Tables, 10th ed.

3.2 節能減碳策略對海運產業之敏感度分析

(一) 船舶溫室氣體排放量評估

船舶溫室氣體排放以 CO₂ 排放量佔比例最高，次為 NO_x 與 SO₂，HC 再次之，PM 最小。表 4 顯示比較船舶大小之單位溫室氣體排放量，大型船舶因為能夠裝載較多的貨物，具有經濟規模，耗油量較小，平均每一海浬運送一噸貨物之單位排放量，大型船舶都較小型船排放量少，特別是低速之超大型油輪，平均單位溫室氣體排放量最少 (CO₂ = 2.7061 公克／延噸海浬)、海岬型散裝船平均單位排放量次之 (CO₂ = 3.3164 公克／延噸海浬)、高速之輕便型貨櫃輪溫室氣體單位排放量最多 (CO₂ = 13.8047 公克／延噸海浬)。如從船型種類比較，油輪與散裝船單位之排放量都較貨櫃輪少。

表 4 各種船型之溫室氣體單位排放量

船型 \ 溫室氣體種類	溫室氣體單位排放量 (公克／延噸海浬)				
	NO _x	SO ₂	CO ₂	HC	PM
海岬型散裝船	0.0954	0.0564	3.3164	0.0032	0.0070
輕便型散裝船	0.2353	0.1400	8.2100	0.0079	0.0174
超大型油輪	0.0635	0.0460	2.7061	0.0022	0.0057
輕便型油輪	0.1875	0.1374	8.0526	0.0067	0.0171
次巴拿馬型貨櫃輪	0.3270	0.2016	11.8515	0.0119	0.0256
輕便型貨櫃輪	0.3796	0.2351	13.8047	0.0140	0.0298

(二) 實施碳稅 (carbon tax) 對船舶營運成本之敏感度分析

本研究設定三種情境，包括資料期間最高燃油價格 (679.5 美金／噸)、最低燃油價格 (101.9 美金／噸) 與平均燃油價格 (225.62 美金／噸)，其價格之 10% 至 100% 的比例為碳稅，採隨油徵收方式，進行影響各種船型營運成本敏感度分析。圖 1 顯示為油價在最高價時，實施徵收碳稅，無論徵收碳稅稅率高低，對貨櫃輪成本影響最大 (增加幅度由 6.6% 至 67.8%)、油輪次之 (增加幅度由 5.7% 至 57%)、散裝船最小 (增加幅度由 4.4% 至 52%)；圖 2 顯示當油價在最低價時，實施徵收碳稅，無論徵收碳稅稅率高低，對貨櫃輪成本影響最大 (增加幅度由 2.3% 至 24%)、油輪次之 (增加幅度由 1.68% 至 16.8%)、散裝船最小 (增加幅度由 1.08% 至 14.2%)；圖 3 顯示當以平均油價實施徵收碳稅，無論徵收碳稅稅率高低，對貨櫃輪成本影響最大 (增加幅度由 4% 至 40%)、油輪次之 (增加幅度由 3% 至 30%)、散裝船最小 (增加幅度由 2% 至 25%)。從上述分析發現，在高油價與低油價時徵收碳稅，其影響營運成本差異達 10 倍之鉅；另外大型船舶單位成本較低，平均燃油消耗較少，因而營運成本受到徵收碳稅之影響程度亦較小型船舶小。

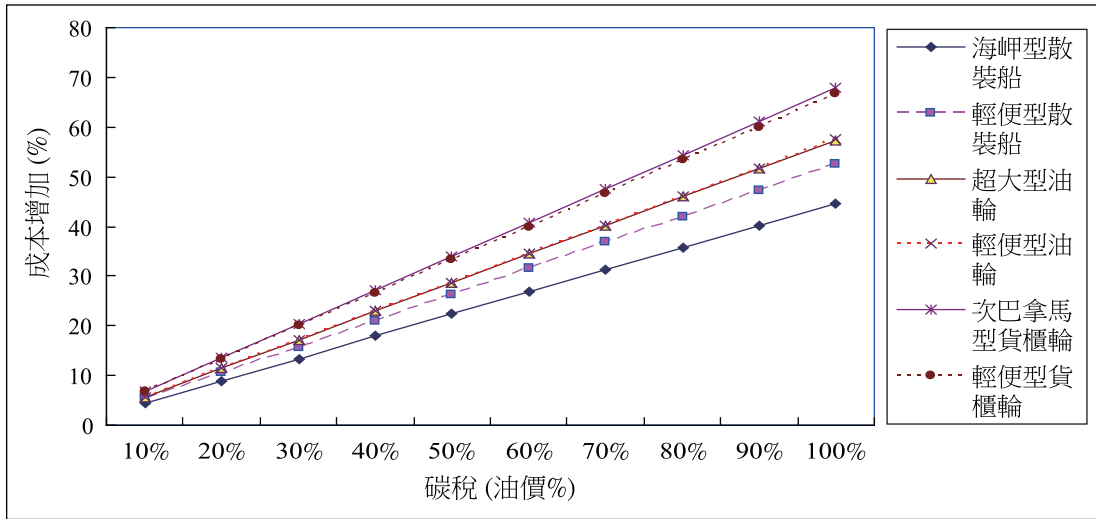


圖 1 最高油價時實施碳稅對各種船型之營運成本影響

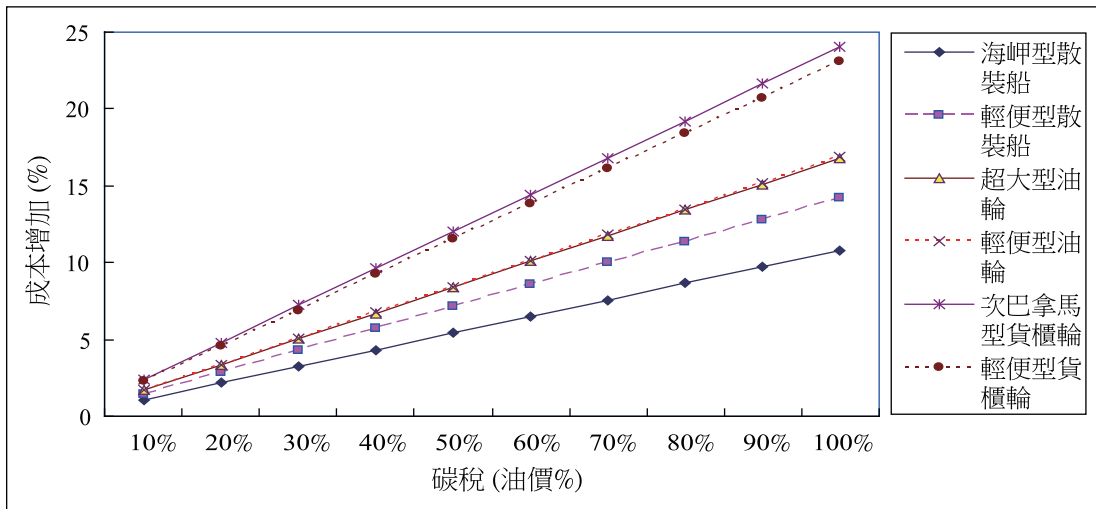


圖 2 最低油價時實施碳稅對各種船型之營運成本影響

(三) 降低船速對船舶營運之敏感度評估

降低船速對於現成船是最有效的節能減碳方法，本節將探討降速可以減少多少溫室氣體排放量，同時也探討在不同降速條件下，對於船舶營運成本產生的衝擊情形。

1. 降低船速之溫室氣體排放量評估

降低船速減少燃料油消耗，也同時減少溫室氣體的排放量，表 5 為各種船型降低船速 20% 之溫室氣體排放量，以次巴拿馬型貨櫃輪之 CO_2 排放量為例，未降速時排放量為

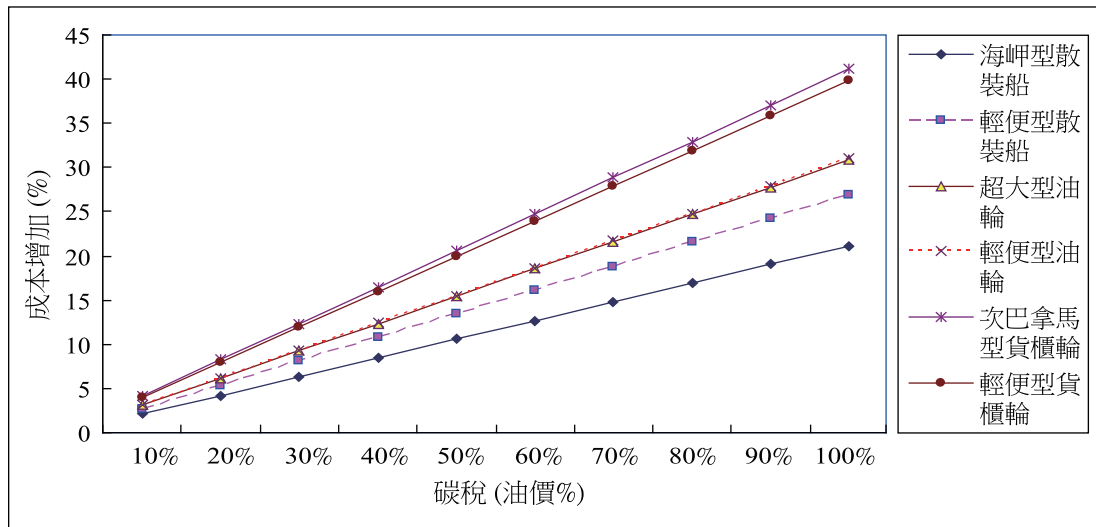


圖 3 平均油價之實施碳稅對各種船型之營運成本影響

表 5 各種船型降低船速 20%之溫室氣體排放量

船型 \ 溫室氣體種類	溫室氣體單位排放量 (公克／延噸海裡)				
	Nox	SO ₂	CO ₂	HC	PM
海岬型散裝船	0.0607	0.0361	2.1172	0.0021	0.0045
輕便型散裝船	0.1494	0.0896	5.2434	0.0051	0.0111
超大型油輪	0.0401	0.0292	1.7170	0.0014	0.0037
輕便型油輪	0.1197	0.0885	5.1762	0.0044	0.0111
次巴拿馬型貨櫃輪	0.2104	0.1309	7.6873	0.0080	0.0168
輕便型貨櫃輪	0.2453	0.1536	9.0072	0.0095	0.0197

11.8515 (公克／延噸海裡)，降速 20%之後排放量減少為 7.6873 (公克／延噸海裡)，其他溫室氣體的排放量也都呈現下降，不同船型亦都出現相同下降情形，驗證降速是可以減少溫室氣體排放量的方法。

圖 4 比較各種船型之正常船速與降速 20%之 CO₂ 排放量，在降速 20%之下，各種船型平均減少 35%，尤其是 CO₂ 排放量較大之貨櫃輪，降速顯著可減少對空氣的污染。

2. 不同降速對於船舶營運成本敏感度評估

降低船速影響船舶營運成本變動，主要有兩項，一為增加租金，另一為節省燃料費用，特別是航速的改變與主機功率及燃油消耗量呈三次方關係，因此調整主機在適當速度下，可以獲得最佳化的耗油效益。表 6 顯示貨櫃輪在降低 20%以內的船速，可以獲得降速紅利，以次巴拿馬貨櫃船為例，最多可節省 1.29%營運支出，此亦為目前貨櫃海運市場船東競相採取減速策略，藉由降速獲得節省燃油支出之利益。至於油輪與散裝船降低船速，其租金

支出遠大於節省之燃油費，導致總成本支出增加，尤其是降速比例越多影響越大，圖 5 顯示海岬型散裝船降低船速 50%，成本增加將高達 62.9%，所以適切的降速對於高速船（燃油消耗量大）有降低營運成本的正面效果，但對於低速船，尤其是大型船舶，將使其增加營運成本，降速比例越大損失越多，因此降速並不適合所有船舶營運者都採用。

(四) 降低船速與開徵碳稅對船舶營運之敏感度影響評估

碳稅假設以平均油價之 20% 作為徵收稅率，在隨油徵收每一噸燃料油之碳稅 45 美金／噸之情形下，探討降低船速對船舶營運成本之影響，圖 6 顯示加徵碳稅之後，燃油費用

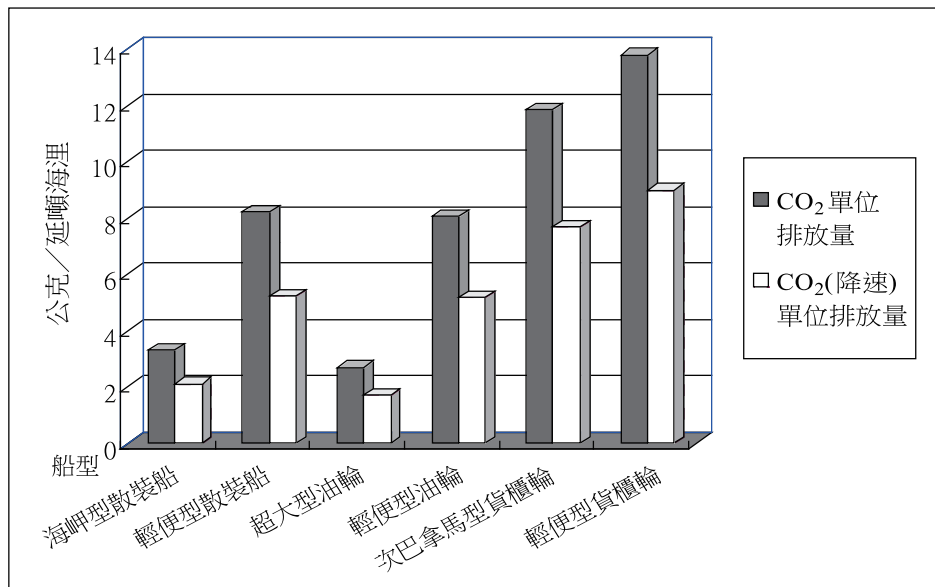


圖 4 正常船速與降速 20% 之各種船型 CO₂ 排放量比較

表 6 各種船型降低船速對之營運成本影響比較

降速	成本增加(%)	貨櫃輪		散裝船		油 輪	
		次巴拿馬型	輕便型	海岬型	輕便型	VLCC	輕便型
1%		-0.23	-0.19	0.38	0.20	0.08	0.08
5%		-0.92	-0.72	2.09	1.23	0.62	0.61
10%		-1.29	-0.90	4.74	3.01	1.81	1.78
15%		-1.05	-0.46	8.04	5.44	3.62	3.58
20%		-0.12	0.68	12.09	8.60	6.15	6.10
21%		0.16	0.99	13.00	9.33	6.76	6.70

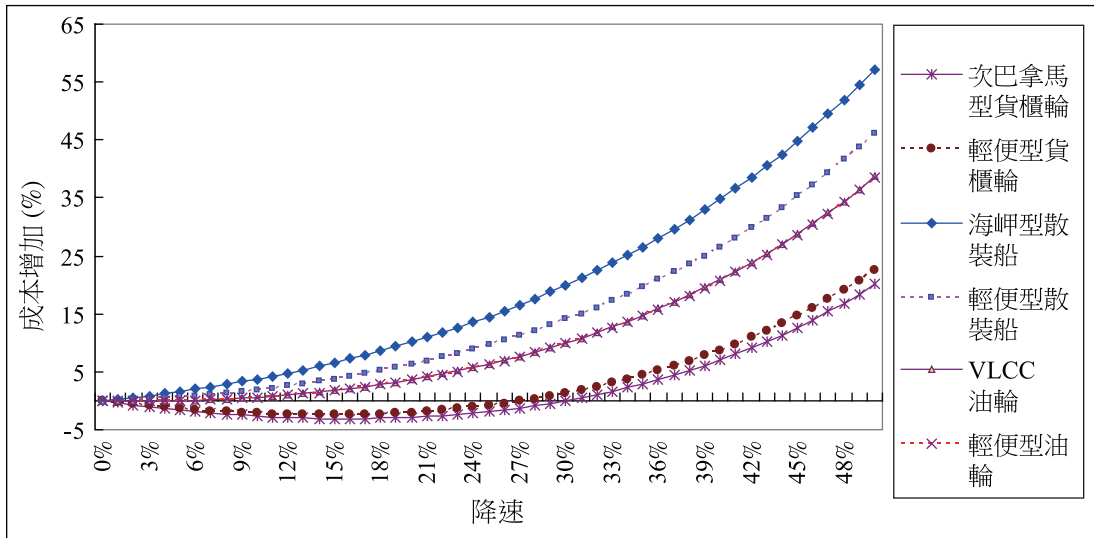


圖 5 降低船速對各種船型之營運成本影響

增加為原油價之 120%，三種船型在模擬採取降低 0~30% 之船速時，除散裝船外，其他船型在降速都出現降速紅利，特別是次巴拿馬型貨櫃輪在降速 16% 時，獲得最大的降速紅利（減少 3.1% 的營運成本）；輕便型貨櫃船在降速 14% 時，可獲得最大的降速紅利（減少 2.5% 的營運成本），大型與小型油輪也出現 0.06%~0.07% 的降速紅利，只有散裝船呈現成本增加，因此，比較降速與徵收碳稅加降速，兩者所獲得之降速紅利，有顯著不同，開徵碳稅後會對營運成本形成更大的壓力，業者必須更積極尋求降低成本的方法。

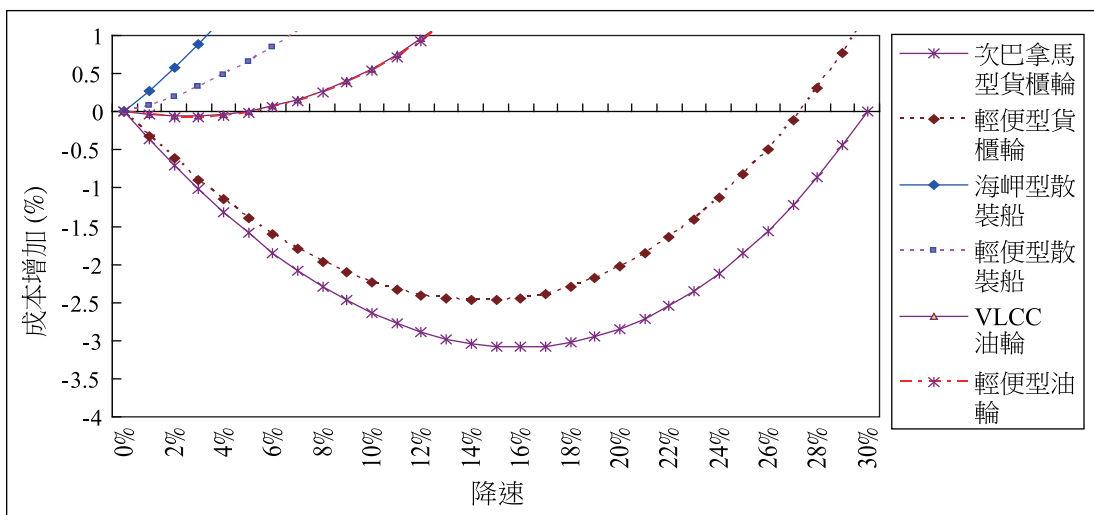


圖 6 徵收碳稅 (20%) 而採取降低船速 (0~30%) 對各種船型之營運成本影響

由以上分析，可以發現貨櫃船航行速度較快，其燃料消耗量高，因此溫室氣體單位排放量亦顯著高於其他船舶，尤其是小型貨櫃船不具經濟規模，排放量最高，而大型散裝船與大型油輪，因低速航行較為省油，溫室氣體單位排放量也顯著較低。綜合上述結果，未來規劃徵收碳稅或其他減少排放策略，應以排放量高的船舶，採取較高的碳稅，抑制其高污染的發生。而在徵收油價的 20% 為碳稅的假設下，模擬降低船速對船舶營運成本的影響分析，可以獲得一重要訊息，高速貨櫃輪採取適切的降速策略，不僅不會增加成本，更可獲得較多減少燃油費用的回饋，對於營運衝擊可以降低，證明徵收碳稅可以引導高污染船舶採取降速策略，進行規避徵收碳稅的損失，也可因減少耗油，達到降低溫室氣體排放量的目的，至於其他船型在徵收碳稅之下，亦可採取微幅降速、改善船舶能源效益，降低徵收碳稅對成本衝擊。

3.3 徵收碳稅前後降低船速對營運成本影響比較

以貨櫃輪為例，選擇降低船速策略或加徵碳稅時之降低船速策略，對營運成本影響差異比較如圖 7 所示。次巴拿馬型貨櫃輪模擬沒有加徵碳稅時，降速 11% 之情境下，可以達到最高降速紅利 1.29%；而在加徵碳稅 10% 時，降速 13% 之情境下，降速紅利增加至 2.14%；而在加徵碳稅 20% 時，降速 16% 之情境下，降速紅利增加至 3.09%。輕便型貨櫃輪模擬沒有加徵碳稅時，降速 9% 之情境下，可以達到最高降速紅利 0.91%；而在加徵碳稅 10% 時，降速 12% 之情境下，降速紅利增加至 1.63%；而在加徵碳稅 20% 時，降速 14% 之情境下，降速紅利增加至 2.48%。兩種船型在不同情境比較降速之效益，顯示次巴拿馬型貨櫃輪明顯大於輕便型貨櫃輪，而且適當的降速可以獲得良好的降速營運成本效益，但是不當的降速，降速紅利逐漸減少，模擬次巴拿馬型貨櫃輪在降速至 30% 時，降速紅利趨近於 0，再持續降速營運成本則出現增加之現象，因此選擇適切的降速比例，可以獲得最大的降速紅利，尤其在因應碳稅徵收時降速所獲得之紅利明顯增加，應可以誘導為船舶營運人，優先考量的降低碳稅徵收衝擊之良好方法。

3.4 降低船速對各種船型之碳稅減少之淨效益

為比較降速後，各船型所增加時間成本相對於碳稅減少之淨效益，以各船型每日租金為時間成本之標準，並計算減速所增加航行時間，此時間再乘以前述租金，即可得到降速之時間成本。降速會減少燃油消耗，因此隨油徵收之碳稅亦隨油耗減少而減納。表 7 為碳稅依油價 10% 與 20% 計價，降速由 1% 至 50% 之淨效益率（減納碳稅／時間成本），經計算發現降速如果未考慮燃油支出之節省，單純考量碳稅減納，對於傭船人而言，是非常不利，以次巴拿馬型貨櫃輪為例，降速 1% 將產生 -0.86% 淨效益率，海岬型散裝船將產生 -0.95% 淨效益率，而且降速比例越高，損失就越大；如果比較徵收不同的碳稅時，對傭船人降速產生之淨效益率，高碳稅時（油價的 20%）損失會比低碳稅時（油價的 10%）小，再以次巴拿馬型貨櫃輪為例，高碳稅時，降速 1% 淨效益率為 -0.72%，當低碳稅時，降速 1% 淨效

益率為-0.86%，也就是高碳稅採取降速是比較有利，但是在不考慮減少燃油費下，可以確認降速對於傭船人或船東，就時間成本而言，是會增加營運支出，不利於營運利益之提升。

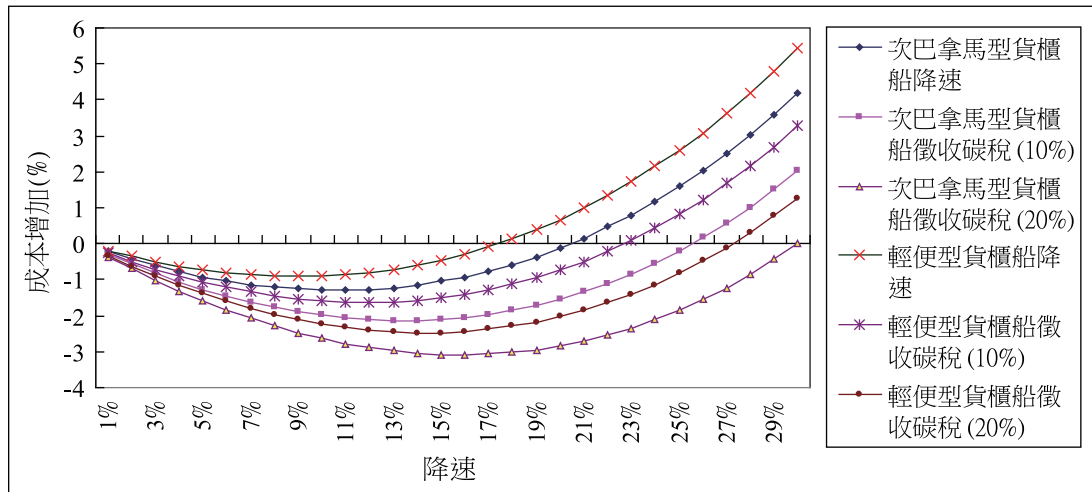


圖 7 徵收碳稅前後之貨櫃輪降低船速對營運成本影響比較

表 7 碳稅依油價 10%與 20%徵收之碳稅減納淨效益比較

船型 \ 降速%		1%	2%	3%	4%	5%	10%	15%	20%	30%	40%	50%
碳稅為油價 10%	次巴拿馬型貨櫃輪	-0.86	-1.73	-2.60	-3.47	-4.35	-8.80	-13.35	-17.98	-27.50	-37.31	-47.37
	輕便型貨櫃輪	-0.87	-1.74	-2.62	-3.50	-4.39	-8.87	-13.44	-18.09	-27.63	-37.45	-47.51
	VLCC 油輪	-0.91	-1.83	-2.74	-3.66	-4.59	-9.24	-13.95	-18.71	-28.40	-38.28	-48.32
	輕便型油輪	-0.91	-1.83	-2.74	-3.66	-4.58	-9.23	-13.94	-18.71	-28.40	-38.28	-48.32
	海岬型散裝船	-0.95	-1.90	-2.85	-3.80	-4.75	-9.54	-14.37	-19.23	-29.04	-38.97	-48.99
	輕便型散裝船	-0.93	-1.86	-2.79	-3.72	-4.66	-9.37	-14.13	-18.94	-28.69	-38.59	-48.62
碳稅為油價 20%	次巴拿馬型貨櫃輪	-0.72	-1.46	-2.20	-2.95	-3.70	-7.61	-11.70	-15.97	-25.00	-34.62	-44.75
	輕便型貨櫃輪	-0.74	-1.49	-2.24	-3.00	-3.77	-7.73	-11.87	-16.18	-25.26	-34.91	-45.03
	VLCC 油輪	-0.82	-1.65	-2.49	-3.33	-4.17	-8.47	-12.89	-17.42	-26.81	-36.57	-46.65
	輕便型油輪	-0.82	-1.65	-2.49	-3.32	-4.17	-8.46	-12.88	-17.41	-26.80	-36.55	-46.63
	海岬型散裝船	-0.89	-1.79	-2.69	-3.60	-4.50	-9.08	-13.73	-18.45	-28.08	-37.94	-47.99
	輕便型散裝船	-0.86	-1.71	-2.58	-3.45	-4.32	-8.74	-13.26	-17.88	-27.37	-37.18	-47.24

3.5 徵收碳稅分級與減少排放量策略

1. 運用船舶 CO₂ 排放分級矩陣作為徵收碳稅分級標準

船舶 CO₂ 排放分級矩陣可作為衡量碳稅徵收高低標準。依據表 4 計算之 CO₂ 單位排放量 (公克／延噸海裡) 高低與使用燃油種類，將各種船型以圖 8 之排放矩陣來說明，目前所有船舶皆以 IFO380 作為主機燃料，因此從油耗值判定，貨櫃輪、小型油輪與小型散裝船，屬於高 CO₂ 排放區；大型油輪與大型散裝船屬於中度 CO₂ 排放區，而在虛線之右下方區域，為低度與微量 CO₂ 排放區，屬於可接受範圍之排放區域，因此對於高度與中度排放區域內之船舶，則需研擬對策誘導其排放量降低。例如考慮分級碳稅徵收制度，可採用高 CO₂ 排放區徵收高碳稅，中度 CO₂ 排放區徵收中碳稅，低度或微幅 CO₂ 排放區可徵收低碳稅或免碳稅，此種分級將促使營運者採取必要與適合措施，例如更換燃油油品、使用低硫燃料等，以減少其碳稅負擔。

燃油別 耗油情形		燃油 CO ₂ 排放係數				
		IFO – 380 IFO – 180 非常高(5)	IFO – 080 高(4)	IFO – 030 中(3)	海運重柴油 低(2)	海運輕柴油 低(1)
單位油 耗值	非常高 (V)	V5 (貨櫃輪)	V4	V3	V2	V1
	高 (IV)	IV5	IV4	IV3	IV2	IV1
	中 (III)	III5 (小型油輪、小 型散裝船)	III4	III3	III2	III1
	低 (II)	II5	II4	II3	II2	II1
	非常低 (I)	I5 (大型油輪、大 型散裝船)	I4	I3	I2	I1

圖 8 船舶 CO₂ 排放分級矩陣

2. 碳稅分級徵收之營運策略

從排放分級矩陣可以發展出 3 種類型之因應策略，如表 8 所示，船舶經營者可以考量其成本原則，採取適宜方法達到排放減量的目的。值得注意的是，Thomas (2009)^[9] 提出長期降低船速可能導致燃燒不完全與汽缸積碳等問題，因此在採用降速策略時需同時考量適切船速並能維護主機保持良好狀態。

此外，根據 IMO (2009)、Sven 等人 (2002)^[10] 和 Attwood 等人 (2006)^[11] 之研究成果可知，船舶溫室氣體的減排策略可依執行者歸類如下，提供業者與政府參考。

- (1) 船舶營運者：追求創新的船舶優化的運載效能、提升燃料效率、主機效益升級、推行船上再生能源，以及船上滌氣淨化系統 (dynamic wave system)。
- (2) 國際組織與政府管理單位的策略：排放管制區 (emissions control area, ECA)、開徵碳稅 (carbon taxes)、海運碳排放權交易 (maritime emissions trading)，以及限制使用低硫燃料 (low sulphur fuel)。

表 8 船舶節能減碳因應策略

策略型態	策略方法	策略效益
減少油耗值	燃油效率提升	節省 3 至 5% 燃料
	主機效益升級	節省 4 至 8% 燃料
	再生能源	節省 5 至 7% 燃料
更換燃油	限用低硫燃料	強制更換低排放燃油
	低排放區	可減少 NO _x 23%、PM _{2.5} 74% 與 SO _x 86%
其他型態	泊港使用岸電	可減少港區空氣污染
	開徵碳稅或實施碳排放權交易制度	誘導降低船速或更換低排放燃油
	滌氣淨化系統	降低 90% 的二氧化硫、3-5% 的氮氧化物和 50% 的粒狀物

四、結論與建議

4.1 結論

海運溫室氣體排放減量，可從科技的改良或是從管理面方案執行。本研究從國際海運三種主要船舶類型進行分析，並比較各船型之排放量，獲得重要結果如下：

1. 貨櫃輪之溫室氣體 CO₂ 單位排放量是油輪與散裝船的 2-3 倍；小型貨櫃輪在所有船舶中其 CO₂ 單位排放量最高；若貨櫃船實施降速 20%，可以減少 35% 的 CO₂ 排放量。
2. 若課徵之碳稅為平均油價之 10% 至 100%，模擬結果顯示貨櫃輪受到影響最大 (成本最高增加 40%)，油輪次之，散裝船最小。
3. 有關降速與營運成本之敏感度分析可發現，降低貨櫃輪船速在 20% 以內，會使貨櫃輪船舶營運成本減少，其他船型皆造成營運成本增加。因此，降速對於燃油費用支出較高之船舶有利。

4. 降速有助於貨櫃輪傭船人降低受到徵收碳稅之衝擊。

整體而言大型慢速船舶，會因徵收碳稅導致成本增加，小型快速船舶可藉由降速減少衝擊，兩者呈現相反的影響結果，因此利用降速避免徵收碳稅的衝擊，並不適用於每種類別的船舶，而且 Corbett 等人 (2009)^[2] 模擬徵收碳稅每噸 60 元美金，可以減少 10% 至 20% 的碳排放量，可是本研究顯示同時也增加船舶 12% 至 20% 的成本，在並非所有船舶都能透過降速策略來減少衝擊之際，本研究建構之船舶排放量矩陣，測量船舶所屬排放矩陣區域，可供國際海事組織或政府在徵收碳稅時，依船舶所屬之排放矩陣區域，訂定不同碳稅標準，低排放量區域船採取低碳稅，高排放量區域船採取高碳稅的原則，例如：高速船可採取高碳稅，低速船採取低碳稅；新船可採取低碳稅，舊型船採取高碳稅；使用高污染的燃油開徵高碳稅，低污染的燃油採取低碳稅或免徵碳稅，誘導降低船舶空氣污染。船舶排放量矩陣亦可提供營運者，從使用低污染油品或減少油耗量兩個降低排放量的策略，在衡量成本效益的原則下，選擇適合的方法，例如：良好船舶機械設備與船體維護保養，以及減少滯港時間之優質船隊管理；有效降低船舶排放，避免危害地球環境，或是利用風力或太陽能等節能設備減少耗油，來達到減少碳稅的目的；也可以改用低碳稅、低污染的燃油與滌氣淨化系統，減少碳排放與避免高碳稅的衝擊。

本研究之模擬結果顯示，在碳稅實施且景氣低迷時，最佳的降速比例可節省燃料費用以及排放量，產生船舶營運最大利潤並減緩運輸供給過多的壓力；如果在市場熱絡時實施碳稅，降低船速會大幅度增加成本且加重運輸供給不足之衝擊。因此，降低船速並不是抑制船舶最佳的方法，所以國際海事組織與聯合國氣候變化框架公約 (United Nations Framework Convention on Climate Change) 在建立船舶能源效率管理發展計畫 (Ship Energy Efficiency Management Plan, SEEMP) 時，應顧及溫室氣體排放議題與全球海運經濟兩者之關係和發展，考量全球可行之節能減碳策略，例如新造船舶排放標準、海運碳排放總量管制與交易制度 (cap and trade) 等法規，規範國際海運船舶溫室氣體的排放。

4.2 建議

本研究僅從徵收碳稅與降速兩個議題進行模擬分析，在全球海運節能減碳的管理策略方面，還包括海運排放交易制度 (maritime emission trading system, METS) 與船舶低排放區 (low emissions zone, LEZ)，都將影響海運市場，若能夠建構影響評估模式，以量化的方式表現策略執行的衝擊，將可提供海運業者充分資訊，作為降低溫室氣體衝擊之策略。

參考文獻

1. Lauer, A., Eyring, V., Hendricks, J., Jockel, P., and Lohmann, U., "Global Model Simulations of the Impact of Ocean-going Ships on Aerosols, Clouds, and the Radiation Budget", *Atmospheric Chemistry and Physics*, Vol. 7, 2007, pp.1-19.

2. Corbett, J. J., Wang, H. F., and Winebrake, J. J., “The Effectiveness and Costs of Speed Reductions on Emissions from International Shipping”, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Volume 14, Issue 8, 2009, pp. 593-598.
3. Climate Action Network Europe, “Seas at Risk: Going Slow to reduce Emissions: The Study”, <http://www.climnet.org/resources/member-publications.html?start=5&limit=100>, 2010.
4. Eide, M., Endresen, Ø., Skjong, R., Longva, T., and Alvik, S., “Cost Effectiveness Assessment of CO₂ Reducing Measures in Shipping”, *Maritime Policy and Management*, Vol. 36, No.4, 2009, pp. 367-384.
5. Psaraftis, H. N. and Kontovas, C. A., “CO₂ Emissions Statistics for the World Commercial Fleet”, *WMU Journal of Maritime Affairs*, Vol. 8, No.1, 2009, pp.1-25.
6. Stopford, M., *Maritime Economics*, 3rd Ed., Routledge, London, 2008.
7. Mitropoulos, E. E., “Challenges Facing Shipping and IMO”, <http://www.marinelink.com/news/article/challenges-facing-imo/322670.aspx>, 2010.
8. Reynolds, J. E. and Caney, R. W., *Reeds Marine Distance Tables*, 10th Ed., Miranda Delmar-Morgan, London, 2008.
9. Thomas, T., “Poor Fuel Quality and Increased Maintenance Costs Can Tax Savings from Slow Steaming, DNV Bulk Carrier Update No.2”, <http://www.dnv.com/industry/maritime/publications>, 2010.
10. Sven, B., Isensee, J., Krause, K., and Michaelowa, A., “Climate Policy: Analysis of Ecological, Technical and Economic Implications for International Maritime Transport”, *International Journal of Maritime Economics*, Vol. 4, 2002, pp.164-193.
11. Attwood, C., Mackay, E., Skinner, I., and Fergusson, M., “All at Sea, Institute for European Environmental Policy 2006”, <http://www.ieep.eu/publications/publications.php?search=5&page=5&limit=5>, 2010.