

海運定期貨櫃航線之船型與 頻次決策研究

SHIP SIZE AND SAILING FREQUENCY DECISION-MAKING FOR CONTAINER LINERS

許巧鶯 Chaug-Ing Hsu¹

謝幼屏 Yu-Ping Hsieh²

(93 年 2 月 24 日收稿，93 年 9 月 27 日修改，94 年 3 月 25 日定稿)

摘 要

本研究以航運成本與貨物存貨成本最小化之雙目標，探討航商定期多港靠泊貨櫃航線的船型與頻次決策。航運成本函數含船舶時間成本、燃油成本與港埠成本，貨物存貨成本函數含等待時間成本與航運時間成本。本研究並推導航運成本與貨物存貨成本的數學關係式，求得雙目標的可行解與柏拉圖最佳解，並以圖示顯示在目標值空間上，於各種情境下進行決策之分析方法。研究結果不僅可得不同存貨成本水準下的最適船型，亦顯示貨物存貨成本、船舶規模經濟性與航速在決策中的影響。此外，本研究並推導船型決策臨界點隨貨物流量變動的數學關係式，並顯示隨貨物流量增加傾向使用最小航運成本較小船型的趨勢。最後，以一越太平洋航線為例驗證理論推導結果。

關鍵詞：貨櫃運輸；多目標分析；船型與頻次決策

-
1. 國立交通大學運輸科技與管理學系教授（聯絡地址：300 新竹市大學路 1001 號交通大學綜合一館運輸科技與管理學系；電話：03-5731672；E-mail：cihsu@cc.nctu.edu.tw）。
 2. 國立交通大學運輸科技與管理學系博士候選人；交通部運輸研究所副研究員。

ABSTRACT

On this study, we formulated a two-objective model by minimizing both shipping costs and inventory costs to decide ship size and sailing frequency for container liners. First, shipping and inventory cost functions are formulated for a multi- port calling route. Shipping costs include capital and operating cost, fuel cost, and port charges, while inventory costs include waiting time cost and shipping time cost. Furthermore, we derived a trade-off equation between shipping costs and inventory costs that shows all solutions of ship size and sailing frequency, and identified that it is a hyperbola function, which could be shown in objective value space. Accordingly, Pareto optimal solutions of the two-objective model are then determined, and ship size and sailing frequency decision analysis can be made. The optimum ship size for each level of inventory cost is shown and the effects of inventory costs, economies of ship size, and service speed on decision are also illustrated. Besides, we derived the relationship between the optimum ship size and container flow, and showed that the optimum ship size tended to be the ship with the minimum shipping cost as container flow increases. Finally, a case study regarding Transpacific Northwest Service justified the theoretical findings.

Key Words: Container shipping; Multi-objective analysis; Ship size and sailing frequency decision

一、緒 論

船型與頻次決策是航商最重要的航運規劃課題之一，決策結果直接影響航商航運成本與貨主託運意願。目前，航運市場上多以 2,000TEU³ 以下的小型貨櫃船服務近洋航線，4,000TEU 以上的大型貨櫃船服務主要的遠洋航線，然而貨櫃船的船型變化極大，2003 年 8 月首航高雄港的東方海外貨櫃航運公司 (Orient Overseas Container Line, OOCL) 東方長灘輪容量高達 8,000TEU，與 4,000TEU 貨櫃船的適用航線必不相同。在運送頻次方面，為滿足貨主運送需求，航商於各航線均安排兩週一班以上的航運服務，其中大多為每週一班，亦有每月三班、每週二班、每週三班等不同的運送頻次。

由於大型貨櫃船具有單位艙位成本 (slot cost) 降低的規模經濟性，故航商傾向採用大型船，然若航線貨物流量不大，造成船舶承載率過低，或運送頻次無法滿足貨主需求，則以使用小型船較佳，這也就是目前實務上航商聯營盛行的重要原因，航商透過共同派船、艙位互租、艙位互換等聯營合作策略來擴大航線流量、採用大型船運送以降低航運成本。因此，航商進行船型與頻次決策時，除考慮船型的規模經濟性，同時亦須注意貨物流量、

3. 20 呎國際標準櫃 (twenty-foot equivalent unit)，為貨櫃單位。

航程、航速、靠泊港費率與效率等相關影響因素，在航運服務品質達到一定水準後，安排航運成本最低或最具經濟效益的航運服務。本研究提出雙目標決策模式，在考慮上述因素間的交互影響下進行船型與頻次決策，不但可以決定在各航運服務水準下的最適船型與頻次，亦可因應各種貨物流量變動、港埠費率效率改變或航商聯營情況進行船型與頻次之最適化決策，且運用構建的模式亦可相當合理地說明為何航商會普遍採用聯營之經營模式。

關於航運規劃的文獻大多針對航線航點安排、船舶排班課題做探討，如盧華安^[1]、陳春益與邱明琦^[2]、謝尚行與張斐茹^[3]、Rana 和 Vickson^[4]、Ronen^[5,6]、Cho 和 Perakis^[7]、Powell 和 Perakis^[8]、Bendall 和 Stent^[9]、Mourão 等人^[10]等，這類研究著重於應用網路模式構建數學規劃模式與設計求解方法，然不考慮運送頻次變動的問題，對於船型決策亦少有著墨。

關於船型的研究主要分析船型大小與航運成本之關係，探討船型的規模經濟性。早期如 Jansson 和 Shneerson^[11]、董孝行^[12,13]等人研究指出隨著船舶增大，平均航行成本（cost per ton at sea）呈遞減趨勢，具有規模經濟的現象，而平均滯港成本（cost per ton in port）呈遞增趨勢，具有規模不經濟的現象，而由最小化兩成本之和可求得船舶平均成本最低的最適船型；近來 Cullinane 和 Khanna^[14,15]研究指出由於港埠生產力改善，使得貨櫃船每 TEU 貨櫃平均滯港成本之規模不經濟現象不顯著，各航線的最適船型呈增大之趨勢。

鑑於上述研究，大多未考慮貨物流量或貨主需求，僅由船舶供給與操作面說明航運經濟性，以決定航運成本最低的最適船型，本研究擬將貨物存貨成本視為船型決策之主要考量因素，以反映貨主需求，並構建與貨物流量、船型規模相依的成本函數，以顯示貨物流量變動對航線船型決策之影響，且在決定船型時同時決定頻次。基於航商在決策船型與頻次時，不僅考慮自身負擔的航運成本，亦須顧慮貨主的託運意願與運送需求，而貨主常依貨物存貨成本大小直接相關之航線頻次做為選擇航運服務之依據（如許巧鶯與彭美珠^[16]），故本研究提出以航運成本與貨物存貨成本最小化，為船型與頻次決策之雙目標，構建與貨物流量、船型相依的航運成本函數與貨物存貨成本函數，並進一步推導兩成本間的數學關係式，以求得雙目標的可行解與柏拉圖最佳解（Pareto optimal solutions），期在柏拉圖最佳解中找到滿足託運不同價值貨物之貨主需求的最適船型，並深入了解貨物存貨成本、貨物流量與船型經濟性在決策中扮演的角色，及分析航程、航速、港埠費率與效率等相關因素對決策之影響。構建之雙目標決策模式並非純航商或純貨主之決策行為，而係兼顧貨主存貨成本之航商行為。

將貨物存貨成本納入運送服務決策之主要考量因素是一般物流研究文獻的基本概念，這類研究由最小化總儲運成本以決定最佳的運送頻次，如 Daganzo^[17]、Hall^[18]、許巧鶯與王志青^[19]等。在海運上，Jansson 和 Shneerson^[11]亦提出將貨主存貨成本與接駁運輸

4. 關於船舶大小與航運成本之關係於書中第五章探討。

成本 (feeder transport cost) 納入航運服務決策考量的經濟分析模式，當在貿易量大的地區，直接由最小化航運成本決定最適船舶大小，而在貿易量小的地區，將藉擴大集貨區 (cargo catchment area) 或降低運送頻次以達船舶滿載，由於擴大集貨區將增加接駁運輸成本，且降低運送頻次將增加貨主存貨成本，此二成本隨船舶增大而增加，而航運成本隨船舶增大而減少，由兩者間的權衡取捨可同時決定最適船舶大小、集貨區大小與運送頻次。不同於該研究須在船舶滿載情況做分析，且通常將運送頻次視為限制條件，求得符合頻次限制的集貨區與船舶大小，本研究針對一航線進行決策分析，可處理船舶未滿載的問題，並求出所有運送船型與頻次方案之柏拉圖最佳解供航商決策。此外，該研究以航運成本與貨物存貨成本和最小化為目標，將求得航商與貨主共同成本最低的航運服務，雖為總社會成本最低的決策，卻不一定是航商的最佳選擇，而本研究基於航商雖將貨物存貨成本納入決策考量，但對於貨物存貨成本的重視程度則不一定等同於其自身負擔的航運成本，因此，提出將航運成本與貨物存貨成本視為兩分別的目標，以取代以總社會成本最小化的單一目標決策方式，如此將求得在不同航運成本與貨物存貨成本目標達成程度下的最適船型與頻次，不但使航商決策更具彈性，並可分析兩成本間的權衡取捨關係，另單一目標決策亦可視為本研究雙目標決策之特例。

本研究首先運用解析性方法分析多港靠泊航線的貨櫃運送過程，構建貨物流量、船型規模相依的航運成本與貨物存貨成本函數。其中，在航運成本方面，考慮航商擁有與使用貨櫃船須固定花費或分攤的時間成本，以及貨櫃船航行須耗費的燃油成本、灣靠港口須支付的港埠成本；在貨物存貨成本方面，考慮因航運服務所發生的存貨成本，包括貨櫃在出發港的等待時間成本，以及在運送途中的航運時間成本。進一步，本研究並分析船型規模經濟性、貨物流量、航程、航速、港埠費率與效率等相關因素對船型與頻次決策之影響。

本研究依據所構建的成本函數，推導航運成本與貨物存貨成本的數學關係式，求得雙目標的可行解與柏拉圖最佳解，並以圖示方式顯示在以兩目標為座標軸的目標值空間 (objective value space) 上。然後，在目標值空間上分析兩型貨櫃船的所有可能決策情況，以深入了解貨物存貨成本、船型經濟性與航速等因素在決策中扮演的角色。另並將函數形式作適度簡化以探討貨物流量變動之影響，期能求得在不同貨物流量下的最適船型，以推論船型決策隨貨物流量變動之趨勢。

最後，以一越太平洋航線為例進行範例分析。範例中，求算該航線各型貨櫃船的可行解與柏拉圖最佳解，並進一步考慮實務可行頻次以求得實務可行解，及分析船型決策隨貨物流量變動之情形，推估在不同航程、靠泊港數與港灣效率情況下的最適船型，期能驗證理論推導結果，並說明模式之實用價值。

第二節將運用解析性方法構建多港靠泊航線的航運成本函數與貨物存貨成本函數。第三節推導航運成本與貨物存貨成本的數學關係式，據以決定雙目標的可行解與柏拉圖最佳解，深入分析可行決策，並探討貨物流量對決策之影響。第四節以一越太平洋航線為例，

計算該航線的各型貨櫃船可行解、柏拉圖最佳解與實務可行解，分析船型決策隨相關因素變動之情形。最後，第五節做一綜合結論與建議。

二、成本函數

海運定期貨櫃航線由於船舶運量大，為擴大集貨區通常靠泊多個港，因此本研究針對一多港靠泊航線做分析。考慮一航線共靠 $n(n \in N)$ 個港，運送路線如圖 1 所示，從港 1 開始，經過港 2、港 3、 $\dots$ 、至港 n 後返回港 1。此 n 港可完全不同 (如圖 1(a))，或部分港在去程與回程時各靠泊一次而部分相同 (如圖 1(b))。航商使用 t 型船提供每季 f 次之航運服務。此外，文中船舶係指全貨櫃船 (full container ship)，貨櫃以普通乾櫃為討論對象，且以 TEU 為單位。

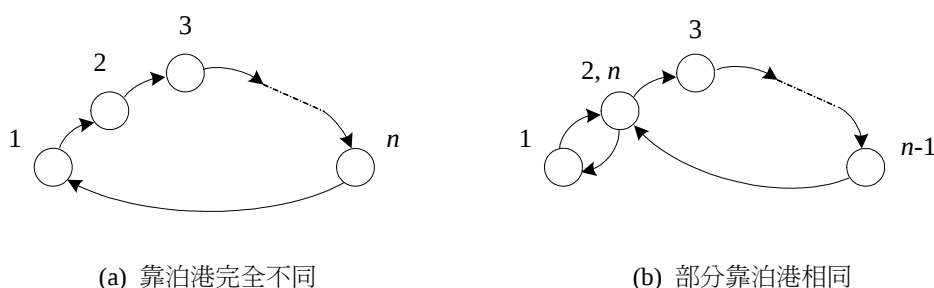


圖 1 定期貨櫃航線之運送路線

假設各港間貨物流量確定，以 $Q_{ij}(i, j = 1, 2, \dots, n)$ 表示由港 i 至港 j 的一季貨物流量，當 $i = j$ 時 $Q_{ij} = 0$ ，則在任一港 i 一航次 (per round voyage) 的貨櫃船裝櫃量為 $\frac{1}{f} \sum_{j=1}^n Q_{ij}$ ，卸櫃量為 $\frac{1}{f} \sum_{j=1}^n Q_{ji}$ 。

以下探討各項成本之影響因素，推導航運成本函數與貨物存貨成本函數。

2.1 航運成本函數

航運成本包含航商擁有與使用船舶須固定花費或分攤的船舶時間成本，以及船舶航行須耗費的燃油成本、灣靠港口須支付的港埠成本。

2.1.1 船舶時間成本

船舶時間成本表示航商對於所屬船舶每日須固定花費或分攤的各項費用之總和，包括

了擁有船舶須負擔的資本成本，以及船員薪資、伙食、船舶修理與維護、保險、物料配件、淡水、潤滑油、分攤之管理費用等營運成本。通常大型船的建造成本較高，使得大型船的平均每日船舶時間成本高於小型船，因此，船舶時間成本基本上因船型 (t) 而異，且隨船型增大而增加。此外，船舶時間成本與船舶營運時間長度成正比，貨櫃航線一航次的總航行時間愈長，運送頻次愈高，則船舶時間成本亦愈高。

一航次總航行時間包括船舶在海上的時間以及在各港的滯港時間。貨櫃船在港的滯港時間可分為二部分，一是裝卸時間，為船舶靠泊碼頭之貨櫃裝卸時間，包括等待裝卸的時間、實際裝卸時間與裝卸過程中的暫停時間 (如換班或用餐)，此一時間可由貨櫃裝卸量與該港的工作效率推估，以 R_i 表示港 i 的毛裝卸效率 (gross handling rate, TEU/日)，則船舶在港 i 的裝卸時間為該港的貨櫃裝卸量除以毛裝卸效率，即 $\frac{1}{fR_i} \sum_{j=1}^n (Q_{ij} + Q_{ji})$ ；二是進

出港時間，包括船舶進出港的內港航行時間與進出港可能發生等待延誤的時間，此一時間可由港口的平均貨櫃船進出港等待時間與航行時間估算，以 W_i (日) 表示在港 i 的進出港時間，則貨櫃船在港 i 的滯港時間為 $W_i + \frac{1}{fR_i} \sum_{j=1}^n (Q_{ij} + Q_{ji})$ ，將 n 個港的滯港時間加總，

可求得一航次總滯港時間為 $\sum_{i=1}^n W_i + \frac{1}{f} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left(\frac{Q_{ij} + Q_{ji}}{R_i} \right)$ 。

考慮船舶在海上多保持固定服務航速，則貨櫃船在海上的時間可用總航程除以服務航速估算。以 D_i 表示航線上港 i 與港 $i+1$ 間的航行距離， V_t 表示 t 型船的服務航速 (海浬/日)，則一航次總海上時間為 $\frac{1}{V_t} \sum_{i=1}^n D_i$ 。加總總滯港時間與總海上時間，求得一航次總航行

時間為 $\sum_{i=1}^n \left(W_i + \frac{D_i}{V_t} \right) + \frac{1}{f} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left(\frac{Q_{ij} + Q_{ji}}{R_i} \right)$ 。

以 S_t 表示 t 型船的平均每日船舶時間成本，則整季的總船舶時間成本為平均每日船舶時間成本 (S_t)、每季運送頻次 (f) 與一航次的總航行時間三者之乘積，即

$$f S_t \sum_{i=1}^n \left(W_i + \frac{D_i}{V_t} \right) + S_t \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left(\frac{Q_{ij} + Q_{ji}}{R_i} \right) \quad (1)$$

2.1.2 船舶燃油成本

船舶燃油成本表示船舶航行須耗費的燃料費用，分為海上航行與在港埠之燃油成本。考慮船舶在海上航行時多保持固定服務航速，燃油成本與航行距離成正比，並隨船型 (t) 增大而增加，而船舶在進入港區時將減速慢行，耗油狀況與在海上不同，且由進港至靠泊碼頭尚須航行一段距離，當港域愈大時，相對的港內航行距離增加，則船舶在港燃油成本

除與船型相關外，並將因港而異。以 F_t 表示 t 型船在海上的單位距離燃油成本， B_{it} 表示 t 型船在港 i 的燃油成本，則一航次的船舶燃油成本為 $\sum_{i=1}^n (F_t D_i + B_{it})$ ，整季的總船舶燃油成本為

$$f \sum_{i=1}^n (F_t D_i + B_{it}) \quad (2)$$

2.1.3 港埠成本

港埠成本為船舶靠港須支付的費用，可分為港灣費用與棧埠費用兩部分。其中，港灣費用為船舶在港埠須支付的各項費用，一般包括領航費、曳船費、帶解纜費與碼頭碇泊費等；棧埠費用為處理貨櫃裝卸須支付之人工與機械費用，一般包括貨櫃裝卸費、貨櫃碼頭通過費、機具使用費與貨櫃場租金等。

在港灣費用方面，各港收費標準不同，通常依船舶總噸位（或容量）、靠碼頭時間長短收取，故港灣費用隨船型 (t) 增大而增加，且隨靠碼頭之裝卸時間增長而增加。以 α_{it} 與 β_{it} 表示 t 型船進港 i 之港灣費用的固定部分與隨靠碼頭裝卸時間變動部分，則整季在港 i 的港灣費用為固定費用 ($f\alpha_{it}$) 加上變動費用 (β_{it}) 與靠碼頭裝卸時間 $\left(\frac{1}{R_i} \sum_{j=1}^n (Q_{ij} + Q_{ji}) \right)$ 乘積，為 $f\alpha_{it} + \frac{\beta_{it}}{R_i} \sum_{j=1}^n (Q_{ij} + Q_{ji})$ ，則整季的總港灣費用為所有港的港灣費用之和，為 $f \sum_{i=1}^n \alpha_{it} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{\beta_{it}}{R_i} (Q_{ij} + Q_{ji})$ 。

在棧埠費用方面，考慮貨櫃係利用岸上機具進行裝卸，以 G_i 表示在港 i 處理單位貨櫃 (TEU) 的平均處理成本，則在港 i 的棧埠費用為在該港的貨櫃總裝卸量 ($\sum_{j=1}^n (Q_{ij} + Q_{ji})$) 與單位貨櫃處理成本 (G_i) 之乘積，為 $G_i \sum_{j=1}^n (Q_{ij} + Q_{ji})$ ，整季的總棧埠費用為所有港棧埠費用之和，為 $\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n G_i (Q_{ij} + Q_{ji})$ 。

總港埠成本為總港灣費用與總棧埠費用之和，即

$$f \sum_{i=1}^n \alpha_{it} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left[\left(\frac{\beta_{it}}{R_i} + G_i \right) \cdot (Q_{ij} + Q_{ji}) \right] \quad (3)$$

總航運成本為船舶時間成本 (式(1))、船舶燃油成本 (式(2)) 與港埠成本 (式(3)) 三者之和，以 $TC1$ 表示整季的總航運成本，則

$$TC1 = f \sum_{i=1}^n \left[\alpha_{it} + S_t W_i + B_{it} + D_i \left(\frac{S_t}{V_t} + F_t \right) \right] + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left[\left(G_i + \frac{\beta_{it}}{R_i} + \frac{S_t}{R_i} \right) (Q_{ij} + Q_{ji}) \right] \quad (4)$$

再以 $AC1$ 表示單位貨櫃航運成本，單位貨櫃航運成本為總航運成本 ($TC1$) 除以總航線貨物流量 ($\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n Q_{ij}$)，則

$$AC1 = \frac{f \sum_{i=1}^n \left[\alpha_{it} + S_t W_i + B_{it} + D_i \left(\frac{S_t}{V_t} + F_t \right) \right] + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left[\left(G_i + \frac{\beta_{it}}{R_i} + \frac{S_t}{R_i} \right) (Q_{ij} + Q_{ji}) \right]}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n Q_{ij}} \quad (5)$$

2.2 貨物存貨成本函數

存貨成本表示貨物在運送過程中由於不能被使用、出售的價值損失或所需負擔的機會成本，與儲存量、貨物價值和存貨時間呈正向關係。在此僅考慮因航運服務發生的存貨成本，包括了貨櫃在出發港的等待時間成本與在船上的航運時間成本。前者為運送頻次多寡造成貨櫃在出發港或產地等待時所發生的等待時間成本，若航班密集則此項成本低，若航班稀少則此項成本高；後者為貨櫃在船上運送時所發生的航運時間成本，整個航運時間愈長，存貨成本愈高。至於貨物到達目的港後，雖可能因為通關或檢疫等因素而延遲貨物的運送，但此與航商航運服務已無關係，故不考慮此部分的存貨成本。

2.2.1 等待時間成本

假設貨物到達出發港的到達率為均勻分配，則貨櫃在出發港等待船舶的平均等待時間為二分之一個運送週期，若一季以 13 週 (91 日) 表示，則平均等待時間為 $\frac{91}{2f}$ 日。以 H 表示單位貨櫃貨物的每日平均時間價值，則整季的總等待時間成本為總貨物流量 ($\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n Q_{ij}$)、單位貨櫃平均等待時間 ($\frac{91}{2f}$) 與貨物時間價值 (H) 三者的乘積，為

$$\frac{91H}{2f} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n Q_{ij} \quad (6)$$

2.2.2 航運時間成本

貨櫃在船上運送時所發生的航運時間成本可由貨櫃在船上的航運時間乘以貨物時間價值 (H) 估算。不過，貨櫃在船上的航運時間因起迄港不同而異。以 T_{ij} (日) 表示在航線

上貨櫃由港 i 至港 j 的航運時間，則 T_{ij} 包括由港 i 至港 j 間所有經過航段的航行時間與所有經過港口的滯港時間。其中貨物在出發港與目的港的時間不易估算，基於起迄端時間相對於整個航運時間而言不大，以出發港的滯港時間概算，則貨櫃由港 i 至港 j 的航運時間 (T_{ij}) 可表示如下：

$$\begin{aligned} T_{ij} &= \sum_{k=1}^n \delta_{ijk} \left[W_k + \frac{1}{f R_k} \sum_{l=1}^n (Q_{kl} + Q_{lk}) + \frac{D_k}{V_t} \right] \\ &= \sum_{k=1}^n \delta_{ijk} \left(W_k + \frac{D_k}{V_t} \right) + \frac{1}{f} \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n \frac{\delta_{ijk}}{R_k} (Q_{kl} + Q_{lk}) \end{aligned} \quad (7)$$

式中 δ_{ijk} 為 0,1 變數，

$$\delta_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{起迄為港 } i, j \text{ 之貨櫃經過港 } k \text{ 與港 } k+1 \text{ 間之航段,} \\ 0, & \text{沒有經過。} \end{cases} \quad (8)$$

則起迄為港 i 、 j 之貨櫃的航運時間成本為貨物流量 (Q_{ij})、運送時間 (T_{ij}) 與貨櫃時間價值 (H) 三者之乘積，為 $HQ_{ij} \sum_{k=1}^n \delta_{ijk} \left(W_k + \frac{D_k}{V_t} \right) + \frac{HQ_{ij}}{f} \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n \frac{\delta_{ijk}}{R_k} (Q_{kl} + Q_{lk})$ 。所有貨櫃的航運時間成本為 $H \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (Q_{ij} T_{ij})$ ，即為

$$H \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n Q_{ij} \delta_{ijk} \left(W_k + \frac{D_k}{V_t} \right) + \frac{H}{f} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n \frac{Q_{ij} \delta_{ijk}}{R_k} (Q_{kl} + Q_{lk}) \quad (9)$$

總貨物存貨成本為等待時間成本 (式(6)) 與航運時間成本 (式(9)) 之和，以 $TC2$ 表示總貨物存貨成本，則

$$TC2 = \frac{91H}{2f} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n Q_{ij} + H \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n Q_{ij} \delta_{ijk} \left(W_k + \frac{D_k}{V_t} \right) + \frac{H}{f} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n \frac{Q_{ij} \delta_{ijk}}{R_k} (Q_{kl} + Q_{lk}) \quad (10)$$

再以 $AC2$ 表示單位貨櫃存貨成本，單位貨櫃存貨成本為總貨物存貨成本 ($TC2$) 除以總航線貨物流量 ($\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n Q_{ij}$)，即

$$AC2 = \frac{91H}{2f} + \frac{H \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n Q_{ij} \delta_{ijk} \left(W_k + \frac{D_k}{V_t} \right)}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n Q_{ij}} + \frac{H \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n \frac{Q_{ij} \delta_{ijk}}{R_k} (Q_{kl} + Q_{lk})}{f \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n Q_{ij}} \quad (11)$$

2.3 成本函數之特性

在構建的航運成本函數與貨物存貨成本函數中，貨物流量 (Q_{ij})、港埠間航距 (D_i)、在港貨物處理成本 (G_i)、港埠毛裝卸效率 (R_i)、進出港時間 (W_i)、貨物運送經特定航段變數 (δ_{ijk})、貨物時間價值 (H)、港灣費用之固定費用 (α_{it})、港灣費用之變動費用 (β_{it})、每日船舶時間成本 (S_t)、海上單位距離燃油成本 (F_t)、在港燃油成本 (B_{it})、航速 (V_t) 等均為外生的參變數。其中，在港貨物處理成本 (G_i)、港埠毛裝卸效率 (R_i)、進出港時間 (W_i)、港灣費用之固定費用 (α_{it})、港灣費用之變動費用 (β_{it}) 與在港燃油成本 (B_{it}) 等六項為港埠相關參變數，由其數值大小可反映港埠費率與效率之高低，而每日船舶時間成本 (S_t)、海上單位距離燃油成本 (F_t)、在港燃油成本 (B_{it})、航速 (V_t)、港灣費用之固定費用 (α_{it})、港灣費用之變動費用 (β_{it}) 等六項為船舶相關參變數，對任一特定船型 (t) 而言，這些船舶相關參變數為外生的定值，但隨船型 (t) 改變而變動，由不同船型的船舶相關參變數之相對大小，可反映船舶的規模經濟性或船價成本、船舶耗油量隨航速增快而增加之現象。在航線確定、灣靠港口已知情況下，航運成本與貨物存貨成本將僅隨船型 (t) 與頻次 (f) 兩決策變數改變。

由兩成本函數的數學式可知，對於任一特定 t 型船而言，降低運送頻次可降低貨物的航運成本，但卻使貨物存貨成本增加，顯示兩成本之間存在替換關係，且此一替換關係可透過頻次加以連結。當有多種船型時，船型與頻次兩決策變數互相關聯，共同決定航運成本與貨物存貨成本，對於運送一固定的貨物流量，航商可以選擇以大型船提供較低頻次的服務，或以小型船提供較高頻次的服務。一般而言，頻次為正整數，不過由於在實際的航運市場中貨櫃航線的頻次通常以週或月為單位，安排每週一班、每週二班、兩週三班或每月三班等不同運送頻次，這些頻次在理論模式中不易以整數表示，因此，本研究在理論推導時考慮頻次為正實數，而後在範例分析時再進一步考慮實務可行的運送頻次。

此外，構建的成本函數可反映貨櫃運送的規模經濟性。一方面透過港灣費用 (α_{it} 、 β_{it})、每日船舶時間成本 (S_t)、燃油成本 (F_t 、 B_{it})、航速 (V_t) 等六項船舶相關參變數因船而異之特性，以反映船舶規模經濟性。另方面構建的成本函數為貨物流量相依的函數，可反映航運成本與貨物存貨成本隨貨物流量變動之情形。雖然因成本為多港靠泊航線之成本，不易直接由構建的數學式看出流量規模經濟特性，若假設各港埠相關參變數不因港而異，即令 $G_i = G$ 、 $R_i = R$ 、 $W_i = W$ 、 $B_{it} = B_t$ 、 $\alpha_{it} = \alpha_t$ 、 $\beta_{it} = \beta_t$ ，則單位貨櫃航運成本的數學式 (式(5)) 可改寫如下：

$$AC1 = \frac{f \left[n(\alpha_t + S_t W + B_t) + \left(\frac{S_t}{V_t} + F_t \right) \sum_{i=1}^n D_i \right]}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n Q_{ij}} + 2 \left(G + \frac{\beta_t + S_t}{R} \right) \quad (12)$$

上式顯示單位貨櫃航運成本 (AC1) 隨總貨物流量 ($\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n Q_{ij}$) 增加而減少，顯示成本函數的流量規模經濟特性。

三、船型與頻次決策

航運成本與貨物存貨成本兩目標間存在替換關係，即當航線頻次密集時貨物存貨成本低而航運成本高，當航線頻次稀疏時航運成本低而貨物存貨成本高，故決策不存在能同時最佳化兩目標的完全最佳解，而將得到許多柏拉圖最佳解。柏拉圖最佳的觀念是多目標規劃的一個基本概念，亦即，沒有任一目標值能在不損及其他目標值下能更改善時，即為柏拉圖最佳解。依此，本研究進一步求得各型船的可行解與柏拉圖最佳解，並在以航運成本與貨物存貨成本為座標軸的目標值空間 (objective value space) 上進行船型與頻次決策分析。此外，由於後續分析均針對單位貨櫃航運成本 (AC1) 與單位貨櫃存貨成本 (AC2) 做探討，以下將分別簡稱為航運成本與貨物存貨成本。

3.1 雙目標替換關係分析

本研究構建的航運成本與貨物存貨成本函數為頻次相依函數，任一型船航運成本隨運送頻次增加而增加，貨物存貨成本隨運送頻次增加而減少，可反映兩成本間的替換關係。依據兩成本的數學式 (式 (5)、式 (11))，可進一步推導兩成本的數學關係式。首先，基於成本函數因考慮因素多、數學式複雜，先進行變數轉換以簡化。令 γ_t^{11} 表示以 t 型船營運之基本航運成本， γ_t^{12} 表示頻次增加一航次所增加的航運成本， γ_t^{21} 表示以 t 型船營運之基本貨物存貨成本， γ_t^{22} 表示頻次增加一航次所增加的貨物存貨成本。 γ_t^{11} 、 γ_t^{12} 、 γ_t^{21} 與 γ_t^{22} 的數學式如下所示：

$$\gamma_t^{11} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left[\left(G_i + \frac{\beta_{it}}{R_i} + \frac{S_t}{R_i} \right) (Q_{ij} + Q_{ji}) \right]}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n Q_{ij}} \quad (13)$$

$$\gamma_t^{12} = \frac{\sum_{i=1}^n \left[\alpha_{it} + S_t W_i + B_{it} + D_i \left(\frac{S_t}{V_t} + F_t \right) \right]}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n Q_{ij}} \quad (14)$$

$$\gamma_t^{21} = \frac{H \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n Q_{ij} \delta_{ijk} \left(W_k + \frac{D_k}{V_t} \right)}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n Q_{ij}} \quad (15)$$

$$\gamma_t^{22} = \frac{91H}{2} + \frac{H \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n \frac{Q_{ij} \delta_{ijk}}{R_k} (Q_{kl} + Q_{lk})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n Q_{ij}} \quad (16)$$

則航運成本函數與貨物存貨成本函數可改寫如下：

$$AC1 = \gamma_t^{11} + \gamma_t^{12} f \quad (17)$$

$$AC2 = \gamma_t^{21} + \gamma_t^{22} (f)^{-1} \quad (18)$$

由上述改寫後的成本函數數學式可推導出兩成本間的關係式為

$$(AC1 - \gamma_t^{11})(AC2 - \gamma_t^{21}) = \gamma_t^{12} \gamma_t^{22} \quad (19)$$

式 (19) 明確顯示兩成本間的反向變動關係。對任一型船而言，當貨物流量、船舶相關參變數與港埠相關參變數均不變時，隨著貨物存貨成本 (AC2) 的增加，航運成本 (AC1) 減少，且減少比率隨貨物存貨成本增加而遞減，當貨物存貨成本趨近於無限大 ($AC2 \rightarrow \infty$) 時，航運成本趨近於 γ_t^{11} ($AC1 \rightarrow \gamma_t^{11}$)；相同的，隨著航運成本 (AC1) 的增加，貨物存貨成本 (AC2) 減少，且減少比率隨航運成本增加而遞減，當航運成本趨近於無限大 ($AC1 \rightarrow \infty$) 時，貨物存貨成本趨近於 γ_t^{21} ($AC2 \rightarrow \gamma_t^{21}$)。

式 (19) 的數學式為基本的數學函數——雙曲線函數，雙曲線如同圓形、橢圓形、拋物線等數學圖形，具有中心點、頂點、焦點、焦距、漸近線等特性，故只要導出函數的數學式，即可決定這些特性，將曲線精確顯示在二維圖上。因此，在以貨物存貨成本 (AC2) 為橫軸、航運成本 (AC1) 為縱軸的二維目標值空間上，依式 (19) 之數學式可得到雙曲線的中心點為 $(\gamma_t^{21}, \gamma_t^{11})$ 、頂點為 $(\gamma_t^{21} + \sqrt{\gamma_t^{12} \gamma_t^{22}}, \gamma_t^{11} + \sqrt{\gamma_t^{12} \gamma_t^{22}})$ 、漸近線為 $(AC1 - \gamma_t^{11} = 0$ 、 $AC2 - \gamma_t^{21} = 0)$ 、焦距為 $\sqrt{2\gamma_t^{12} \gamma_t^{22}}$ ，以精確繪出雙曲線圖形，如圖 2 所示。此一雙曲線不僅表示任一 t 型船之航運成本與貨物存貨成本的關係 (以下簡稱為成本關係曲線)，亦表示 t 型船的所有運送頻次方案。不過，由於船舶容量有限，在容量限制下任一 t 型船的運送頻次 (f) 必大於或等於航段流量最大值 ($\text{Max}_k \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \delta_{ijk} Q_{ij}$) 除以船舶容量 (U_t)，即

$f \geq \frac{\text{Max}_k \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \delta_{ijk} Q_{ij}}{U_t}$ 。令 $f_t^{\min}$ 表示 t 型船的最小運送頻次， $f_t^{\min} = \frac{\text{Max}_k \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \delta_{ijk} Q_{ij}}{U_t}$ ，並

令 $\overline{AC1_t}$ 與 $\overline{AC2_t}$ 分別表示在最小運送頻次時的航運成本與貨物存貨成本，目標值空間上 $(\overline{AC2_t}, \overline{AC1_t})$ 點以最小運送頻次點稱之。由 $\overline{AC1_t}$ 是航運成本最小值（以下以最小航運成本稱之）、 $\overline{AC2_t}$ 是貨物存貨成本最大值，得到任一 t 型船的頻次可行解位於成本關係曲線之最小運送頻次點 $(\overline{AC2_t}, \overline{AC1_t})$ 左上方的實線部分，如圖 2 所示。

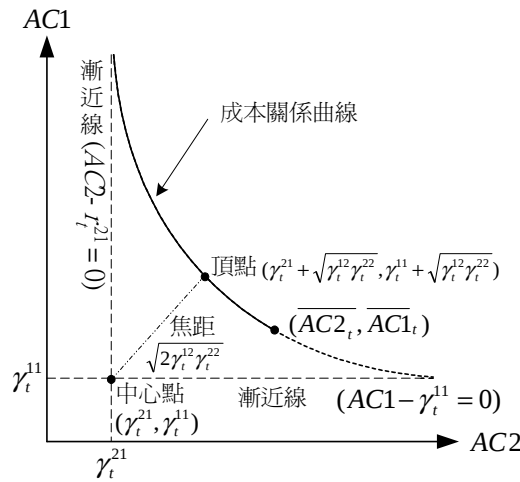


圖 2 任一 t 型船的可行解

實線上各點代表 t 型船在不同頻次時的航運成本與貨物存貨成本。其中以最小運送頻次點 $(\overline{AC2_t}, \overline{AC1_t})$ 的航運成本最低、貨物存貨成本最高，若航商在規劃航運服務時僅考慮航運成本而不在乎貨物存貨成本的大小，即以航運成本最小化為航運規劃之單一目標，在此情況下，最小運送頻次點 $(\overline{AC2_t}, \overline{AC1_t})$ 的航運成本最低，為航商安排運送頻次的最佳選擇。不過，在實際航運市場中，航線頻次若低於兩週一班將無法被貨主接受，且航商必須提供足以與市場競爭者相抗衡的航運服務，因此，航商可能不採用航運成本最低的最小運送頻次點 $(\overline{AC2_t}, \overline{AC1_t})$ 提供服務，而選擇其他貨物存貨成本較低、航運成本較高的運送頻次可行解。

接下來特別針對最小航運成本 $(\overline{AC1_t})$ 的特性做探討與說明。由 $f_t^{\min} = \frac{\text{Max}_k \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \delta_{ijk} Q_{ij}}{U_t}$ 轉換為 $\text{Max}_k \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \delta_{ijk} \left(\frac{Q_{ij}}{f_t^{\min}} \right) = U_t$ ，可知在一航線以容量 U_t 船舶提

供最小頻次 ($f_t^{\min}$) 之航運服務時，船舶在流量最大之航段將達到滿載，即最小航運成本 ($\overline{AC1_t}$) 表示船舶於最大流量航段滿載之航運成本。故當航線上各航段貨物流量相同 (各航段均滿載) 時，最小航運成本 ($\overline{AC1_t}$) 就是單位艙位成本，而當各航段貨物流量不同時，最小航運成本 ($\overline{AC1_t}$) 略高但仍可反映單位艙位成本之意涵。由最小航運成本 ($\overline{AC1_t}$) 反映單位艙位成本之意涵，可進一步推論最小航運成本 ($\overline{AC1_t}$) 亦相當於船舶規模經濟文獻 (如 Jansson 和 Shneerson^[11]、董孝行^[12,13] 等) 中所指稱的船舶平均成本。因為此類文獻在分析時均假設貨物流量夠大而不致限制船舶增大，即探討船舶滿載情況，與本研究所定義的最小航運成本 ($\overline{AC1_t}$) 意義相同。因此，最小航運成本 ($\overline{AC1_t}$) 原則上應具有船舶規模經濟理論中船舶平均成本的特性。按船舶規模經濟理論，隨船舶增大，船舶的平均航行成本呈遞減的趨勢，發生規模經濟的現象，但是船舶的平均滯港成本呈遞增的趨勢，發生規模不經濟的現象，此兩項成本使得船舶平均總成本 (total costs per ton) 曲線呈一 U 型分布，即船舶平均成本先隨船舶增大而減少，當船舶超過某一臨界值 (最適船型) 之後，平均成本反呈遞增趨勢 (如圖 3)。依此，可以推測不同船型的船舶具有大小不同的最小航運成本 ($\overline{AC1_t}$)，任一航線存在一個最小航運成本 ($\overline{AC1_t}$) 最小的最適船型，當船舶小於此一船型時，最小航運成本 ($\overline{AC1_t}$) 隨船舶增大而減少，當船舶大於此一船型時，最小航運成本 ($\overline{AC1_t}$) 隨船舶增大而增加。

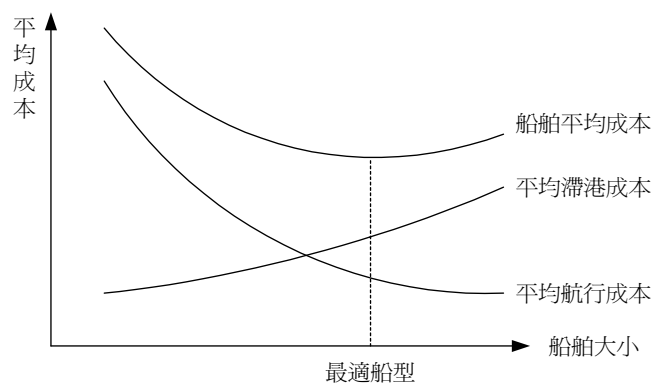


圖 3 船舶規模經濟理論

3.2 決策分析

當船型有兩種或兩種以上時，由於港灣費用 (α_{it} 、 β_{it})、每日船舶時間成本 (S_t)、燃油成本 (F_t 、 B_{it}) 與航速 (V_t) 等船舶相關參變數因船型而異，使得各型船的成本關係曲線、最小運送頻次點 ($\overline{AC2_t}$ 、 $\overline{AC1_t}$) 不相同，各型船可行解落在目標值空間上的不同位

置，此時，柏拉圖最佳解為各型船可行解中最接近原點 (0, 0) 之線段所組成。

在此，以兩種船型之情況為例做說明，分析兩型船成本關係曲線、最小運送頻次點的相對位置，在目標值空間上顯示兩型船的可行解，以決定柏拉圖最佳解。

首先分析兩型船成本關係曲線的相對位置。以下標 $t1$ 與 $t2$ 分別表示小型船與大型船。基於船舶愈大則噸位愈大，造價、耗油量與港灣費用均愈高，可知港灣費用 (α_{it} 、 β_{it})、每日船舶時間成本 (S_t)、燃油成本 (F_t 、 B_{it}) 等參變數值均以大型船較高，即 $\alpha_{i,t1} < \alpha_{i,t2}$ 、 $\beta_{i,t1} < \beta_{i,t2}$ 、 $S_{t1} < S_{t2}$ 、 $F_{t1} < F_{t2}$ 、 $B_{i,t1} < B_{i,t2}$ 。貨櫃船航速 (V_t) 一般介於 15 ~ 27 節，通常以大型船較快，不過由於新造船舶的引擎設計技術提升，航速往往較大小相同之舊型船快 1 ~ 2 節，而且已有相關研究 (Bendall 和 Stent^[9]) 探討以載運量小、航速高 (航速 > 40 海浬/小時) 的貨櫃船服務近洋航線，顯示雖然目前的貨櫃船航速多以大型船較快，但亦有少部分小型船的航速略高於大型船，且未來航運市場極可能發展出航速快、運量小的貨櫃船。因此，本研究不僅分析大型船航速較快 ($V_{t1} < V_{t2}$) 之目前普遍情況，並考慮小型船航速較快 ($V_{t1} > V_{t2}$) 或兩型船航速相同 ($V_{t1} = V_{t2}$) 之情況。

當小型船航速較快 ($V_{t1} > V_{t2}$) 時，由港灣費用 (α_{it} 、 β_{it})、每日船舶時間成本 (S_t)、燃油成本 (F_t 、 B_{it}) 等參變數值均是大型船較高，可推得

$$\gamma_{t1}^{11} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left[\left(G_i + \frac{\beta_{i,t1}}{R_i} + \frac{S_{t1}}{R_i} \right) (Q_{ij} + Q_{ji}) \right]}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n Q_{ij}} < \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left[\left(G_i + \frac{\beta_{i,t2}}{R_i} + \frac{S_{t2}}{R_i} \right) (Q_{ij} + Q_{ji}) \right]}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n Q_{ij}} = \gamma_{t2}^{11} \quad (20)$$

$$\gamma_{t1}^{21} = \frac{H \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n Q_{ij} \delta_{ijk} \left(W_k + \frac{D_k}{V_{t1}} \right)}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n Q_{ij}} < \frac{H \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n Q_{ij} \delta_{ijk} \left(W_k + \frac{D_k}{V_{t2}} \right)}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n Q_{ij}} = \gamma_{t2}^{21} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \gamma_{t1}^{12} \cdot \gamma_{t1}^{22} &= \frac{\sum_{i=1}^n \left[\alpha_{i,t1} + S_{t1} W_i + B_{i,t1} + D_i \left(\frac{S_{t1}}{V_{t1}} + F_{t1} \right) \right]}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n Q_{ij}} \left[\frac{91H}{2} + \frac{H \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n \frac{Q_{ij} \delta_{ijk}}{R_k} (Q_{kl} + Q_{lk})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n Q_{ij}} \right] \\ &< \frac{\sum_{i=1}^n \left[\alpha_{i,t2} + S_{t2} W_i + B_{i,t2} + D_i \left(\frac{S_{t2}}{V_{t2}} + F_{t2} \right) \right]}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n Q_{ij}} \left[\frac{91H}{2} + \frac{H \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n \frac{Q_{ij} \delta_{ijk}}{R_k} (Q_{kl} + Q_{lk})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n Q_{ij}} \right] \\ &= \gamma_{t2}^{12} \cdot \gamma_{t2}^{22} \end{aligned} \quad (22)$$

由成本關係曲線為雙曲線之特性，可決定目標值空間上兩型船成本關係曲線的相對位置，如圖 4(a)。圖中顯示：小型船曲線的水平漸近線 $AC1-\gamma_{t1}^{11}=0$ 位於大型船水平漸近線 $AC1-\gamma_{t2}^{11}=0$ 下方，小型船曲線的垂直漸近線 $AC2-\gamma_{t1}^{21}=0$ 位於大型船垂直漸近線 $AC2-\gamma_{t2}^{21}=0$ 左側，小型船曲線焦距較大型船短 ($\sqrt{2\gamma_{t1}^{12}\cdot\gamma_{t1}^{22}} < \sqrt{2\gamma_{t2}^{12}\cdot\gamma_{t2}^{22}}$)、小型船曲線中心點 $(\gamma_{t1}^{21}, \gamma_{t1}^{11})$ 與頂點 $(\gamma_{t1}^{21} + \sqrt{\gamma_{t1}^{12}\gamma_{t1}^{22}}, \gamma_{t1}^{11} + \sqrt{\gamma_{t1}^{12}\gamma_{t1}^{22}})$ 均位於大型船曲線中心點 $(\gamma_{t2}^{21}, \gamma_{t2}^{11})$ 與頂點 $(\gamma_{t2}^{21} + \sqrt{\gamma_{t2}^{12}\gamma_{t2}^{22}}, \gamma_{t2}^{11} + \sqrt{\gamma_{t2}^{12}\gamma_{t2}^{22}})$ 左下方，得到兩成本關係曲線不相交、小型船曲線恆低於大型船曲線。

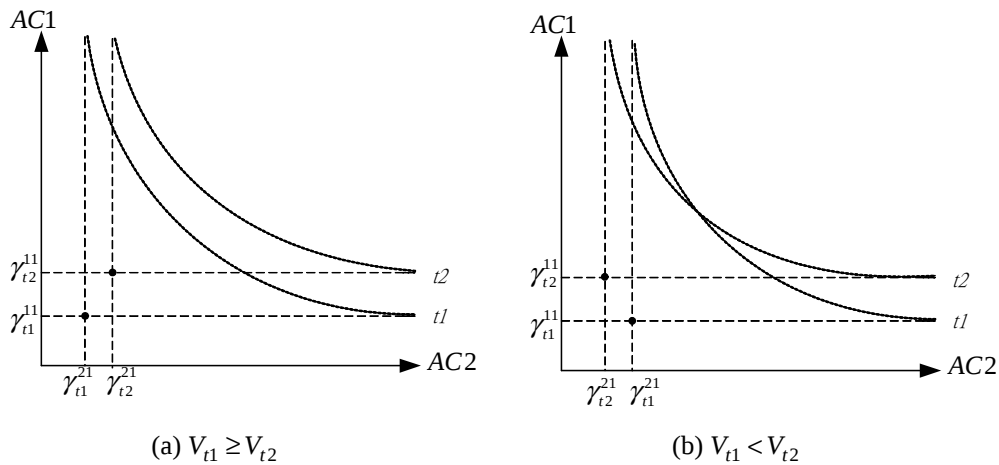


圖 4 兩成本關係曲線之相對位置

當兩型船航速相同 ($V_{t1} = V_{t2}$) 時，同樣由港灣費用 (α_{it} 、 β_{it})、每日船舶時間成本 (S_t)、燃油成本 (F_t 、 B_{it}) 等參變數值均是大型船較高，推論 $\gamma_{t1}^{11} < \gamma_{t2}^{11}$ 、 $\gamma_{t1}^{21} = \gamma_{t2}^{21}$ 與 $\gamma_{t1}^{12}\gamma_{t1}^{22} < \gamma_{t2}^{12}\gamma_{t2}^{22}$ ，可知兩型船曲線之相對位置與小型船航速較快 ($V_{t1} > V_{t2}$) 之圖形相似，均是兩成本關係曲線不相交、小型船曲線恆低於大型船曲線。惟在兩型船航速相同 ($V_{t1} = V_{t2}$) 時，兩型船曲線的垂直漸近線重合，小型船曲線中心點位於大型船曲線中心點的正下方，此二方面不同。

當大型船航速較快 ($V_{t1} < V_{t2}$) 時，由 $\gamma_{t1}^{11} < \gamma_{t2}^{11}$ 、 $\gamma_{t1}^{21} > \gamma_{t2}^{21}$ ，決定目標值空間上兩型船成本關係曲線的相對位置，如圖 4(b)。圖中顯示：小型船曲線的水平漸近線 $AC1-\gamma_{t1}^{11}=0$ 位於大型船水平漸近線 $AC1-\gamma_{t2}^{11}=0$ 下方，小型船曲線的垂直漸近線 $AC2-\gamma_{t1}^{21}=0$ 位於大

型船垂直漸近線 $AC2 - \gamma_{t2}^{21} = 0$ 右側，小型船曲線中心點 $(\gamma_{t1}^{21}, \gamma_{t1}^{11})$ 位於大型船曲線中心點 $(\gamma_{t2}^{21}, \gamma_{t2}^{11})$ 右下方，兩成本關係曲線相交於一點。

綜合上述分析可知：兩型船成本關係曲線的相對位置，依兩者之相對航速分為兩種情形。當小型船航速較快或兩型船航速相同 ($V_{t1} \geq V_{t2}$) 時，兩成本關係曲線不相交，且小型船曲線恆低於大型船曲線，而當大型船航速較快 ($V_{t1} < V_{t2}$) 時，兩成本關係曲線相交於一點。

進一步針對小型船航速較快或兩型船航速相同 ($V_{t1} \geq V_{t2}$) 與大型船航速較快 ($V_{t1} < V_{t2}$) 兩情況分別分析兩最小運送頻次點之相對位置，探討二種船型情況下的柏拉圖最佳解。

1. 小型船航速較快或兩型船航速相同 ($V_{t1} \geq V_{t2}$)

圖 5 顯示在小型船航速較快或兩型船航速相同 ($V_{t1} \geq V_{t2}$) 時，於不同的最小運送頻次點之相對位置下的船型與頻次決策分析。圖中以 $\overrightarrow{A_1A_1'}$ 、 $\overrightarrow{A_2A_2'}$ 表示小型與大型船的成本關係曲線， O_1 、 O_2 表示小型與大型船的最小運送頻次點 $(AC2_{t1}, AC1_{t1})$ 與 $(AC2_{t2}, AC1_{t2})$ ， c' 表示大型船曲線 $\overrightarrow{A_2A_2'}$ 上航運成本等於小型船最小航運成本 ($\overline{AC1_{t1}}$) 之點， c' 點的存貨成本以 $AC2'$ 表示。當小型船的最小航運成本較小 ($\overline{AC1_{t1}} \leq \overline{AC1_{t2}}$) 時，決策如圖 5(a)，不論 O_1 位於 $\overrightarrow{A_1A_1'}$ 上任意位置， O_2 將落在 $c'A_2$ 上，柏拉圖最佳解為圖中曲線 $\overrightarrow{O_1A_1}$ ，顯示無論如何均以使用船舶時間成本低且最小航運成本較小的小型船 ($t1$) 較佳；當大型船的最小航運成本較小 ($\overline{AC1_{t1}} > \overline{AC1_{t2}}$) 時，決策如圖 5(b)， O_2 位於 $c'A_2'$ 上，柏拉圖最佳解為圖中曲線 $\overrightarrow{O_2c'}$ 、 $\overrightarrow{O_1A_1}$ ，顯示在無貨物存貨成本限制時，以使用最小航運成

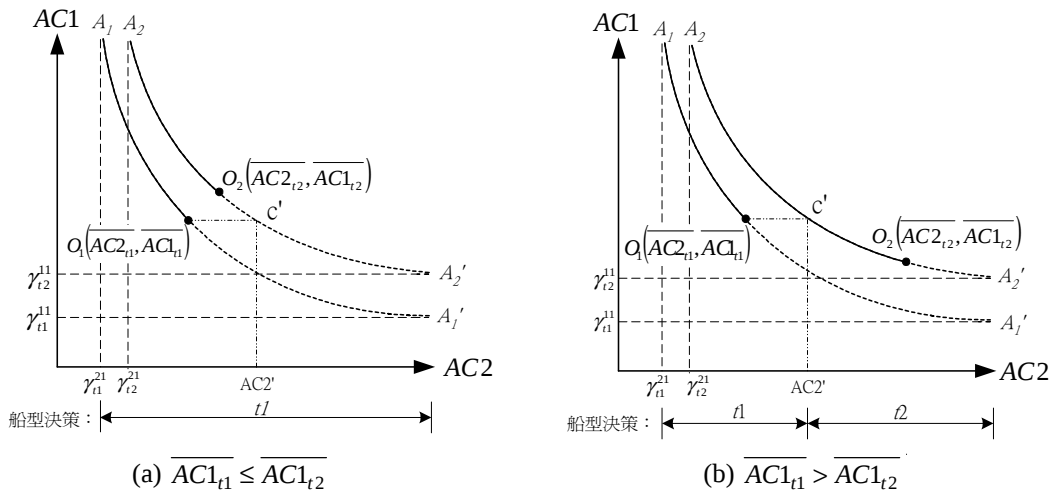


圖 5 兩型船在小型船航速較快或兩型船航速相同 ($V_{t1} \geq V_{t2}$) 時的船型與頻次決策

本較小 ($\overline{AC1_{t1}} \leq \overline{AC1_{t2}}$) 之大型船 ($t2$) 較佳, 若貨物存貨成本要求低於 $AC2'$ 時, 則改以船舶時間成本較低、運量較小的小型船 ($t1$) 提供較高頻次服務以降低貨物存貨成本。

2. 大型船航速較快 ($V_{t1} < V_{t2}$)

圖 6 顯示在大型船航速較快 ($V_{t1} < V_{t2}$) 時, 於不同之最小運送頻次點相對位置情況下的船型與頻次決策分析。圖中 $\overrightarrow{A_1A_1'}$ 、 $\overrightarrow{A_2A_2'}$ 、 O_1 、 O_2 、 c' 的意義與前述相同, 此外, 以 E 表示兩曲線交點, E 點貨物存貨成本以 $AC2''$ 表示, 並以 c'' 表示小型船曲線 $\overrightarrow{A_1A_1'}$ 上航運成本等於大型船最小航運成本 ($\overline{AC1_{t2}}$) 之點, c'' 點貨物存貨成本以 $AC2'''$ 表示。

當小型船的最小航運成本較小 ($\overline{AC1_{t1}} \leq \overline{AC1_{t2}}$) 時, 船型與頻次決策有三種可能情形: (1) 若 O_1 位於兩曲線交點 E 左側 ($\overline{AC2_{t1}} > AC2''$) 時, 決策如圖 6(a), O_2 位於 $\overrightarrow{c'A_2'}$ 上, 柏拉圖最佳解為圖中 $\overrightarrow{O_1c''}$ 、 $\overrightarrow{O_2A_2}$; (2) 若 O_1 位於兩曲線交點 E 右側 ($\overline{AC2_{t1}} > AC2''$) 且 O_2 位於 $\overrightarrow{Ec'}$ 上, 決策如圖 6(b), 柏拉圖最佳解為圖中 $\overrightarrow{O_1E}$ 、 $\overrightarrow{EA_2}$; (3) 若 O_1 位於兩曲線交點 E 右側 ($\overline{AC2_{t1}} > AC2''$) 且 O_2 位於 $\overrightarrow{EA_2}$ 上, 決策如圖 6(c), 柏拉圖最佳解為圖中 $\overrightarrow{O_1c''}$ 、 $\overrightarrow{O_2A_2}$ 。上述三種情形均顯示: 在沒有貨物存貨成本要求時, 以使用最小航運成本較小 ($\overline{AC1_{t1}} \leq \overline{AC1_{t2}}$) 的小型船 ($t1$) 較佳, 若要求貨物存貨成本須低於 $AC2''$ 或 $AC2'''$ 時, 則使用航速較快、可降低存貨成本的大型船 ($t2$) 較佳。

當大型船的最小航運成本較小 ($\overline{AC1_{t1}} > \overline{AC1_{t2}}$) 時, 船型與頻次決策有二種可能情形: (1) 若 O_1 位於兩曲線交點 E 左側 ($\overline{AC2_{t1}} \leq AC2''$) 時, 決策如圖 6(d), O_2 將位於 $\overrightarrow{c'A_2'}$ 上, 柏拉圖最佳解為圖中 $\overrightarrow{O_2A_2}$, 顯示無論貨物存貨成本要求為何, 均以使用最小航運成本較小的大型船 ($t2$) 較佳; (2) 若 O_1 位於兩曲線交點 E 右側 ($\overline{AC2_{t1}} > AC2''$) 時, 決策如圖 6(e), O_2 將位於 $\overrightarrow{c'A_2'}$ 上, 柏拉圖最佳解為圖中 $\overrightarrow{O_2c'}$ 、 $\overrightarrow{O_1E}$ 、 $\overrightarrow{EA_2}$, 顯示在沒有貨物存貨成本要求時, 以使用最小航運成本較小的大型船 ($t2$) 較佳, 在貨物存貨成本要求須低於 $AC2'$ 時, 則改以船舶時間成本較低、運量較小的小型船 ($t1$) 提供較高頻次服務以降低存貨成本, 若存貨成本更進一步要求須低於 $AC2''$ 時, 則必須使用航速較快的大型船 ($t2$) 提供更高頻次的運送服務以更進一步降低存貨成本。

以上分析了兩最小運送頻次點相對位置之所有可能情形, 可知無論是大型船或小型船航速較快, 在沒有貨物存貨成本限制時, 均以使用最小航運成本 ($\overline{AC1_t}$) 較小的船型較佳, 當貨物存貨成本限制不得高於某特定水準 ($AC2'$ 、 $AC2''$ 或 $AC2'''$) 時, 則選擇以船舶時間成本較低、運量較小的小型船 ($t1$) 提供較高頻次服務以降低貨物存貨成本, 或者採用航速較快的船型。不過, 在實際航運市場, 由於大型船具有單位艙位成本較低的船舶規模經濟性, 故通常以大型船的最小航運成本較小, 即圖 5(b) 與圖 6(d)(e) 之情形較常發生, 至於小型船最小航運成本較小之情形 (圖 5(a) 與圖 6(a)(b)(c)) 在比較特殊的情況下才會發生, 例如以超大型貨櫃船服務一條靠泊十數港之航線, 發生船舶規模經濟理論中因平

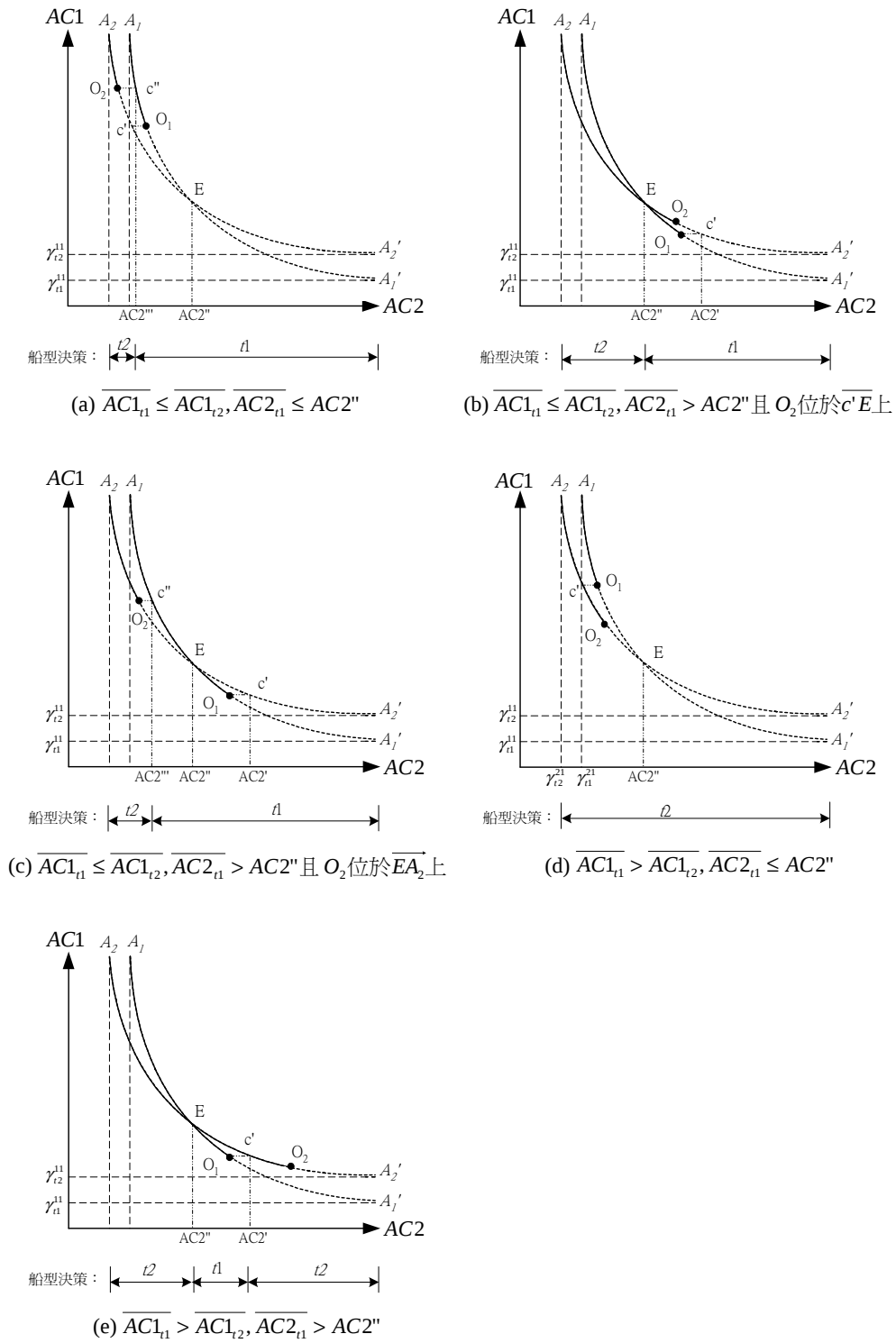


圖 6 兩型船在大型船航速較快 ($V_{t1} < V_{t2}$) 時的船型與頻次決策

均滯港成本隨船舶增大而增加致產生船舶規模不經濟現象之情況 (如 Jansson 和 Shneerson^[11])。因此，在實際航運市場上，若沒有貨物存貨成本限制，以使用具船舶規模經濟性的大型船較佳，若存在貨物存貨成本限制，則改採船舶時間成本較低、運量較小的小型船提供較高頻次服務或採航速較快的船以降低貨物存貨成本。

3.3 貨物流量變動對決策之影響分析

接下來針對模式中的重要參變數—貨物流量做分析，探討其變動對船型與頻次決策之影響。為利數學推導，將對模式做適度假設以簡化問題複雜度，雖然計算結果與運用完整模式的計算結果略有差異，但兩者的變動方向與趨勢一致，分析結果可確實掌握貨物流量變動對決策之影響。

令整條航線的總貨物流量為 Q ， $Q = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n Q_{ij}$ ，總航距為 D ， $D = \sum_{i=1}^n D_i$ 。假設各港埠相關參變數值不因港而異，令 $G_i = G$ 、 $R_i = R$ 、 $W_i = W$ 、 $B_{it} = B_t$ 、 $\alpha_{it} = \alpha_t$ 、 $\beta_{it} = \beta_t$ 。並令

$$\phi_1 = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n Q_{ij} \delta_{ijk}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n Q_{ij}} \quad , \quad \phi_2 = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n Q_{ij} \delta_{ijk} D_k}{D \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n Q_{ij}} \quad , \quad \phi_3 = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n Q_{ij} \delta_{ijk} (Q_{kl} + Q_{lk})}{2 \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n Q_{ij} \right)^2} \quad ,$$

$$\eta = \frac{\max_k \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \delta_{ijk} Q_{ij}}{Q} \quad , \quad \phi_1、\phi_2、\phi_3、\eta \text{ 為定值，不隨靠泊港數、貨物流量或航距改變。}$$

依據上述假設，成本關係曲線的數學式 (式(19)) 中的 γ_t^{11} 、 γ_t^{12} 、 γ_t^{21} 、 γ_t^{22} 可分別改寫如下：

$$\gamma_t^{11} = 2 \left(G + \frac{\beta_t}{R} + \frac{S_t}{R} \right) \quad , \quad \gamma_t^{12} = \frac{n(\alpha_t + S_t W + B_t) + D \left(\frac{S_t}{V_t} + F_t \right)}{Q} \quad ,$$

$$\gamma_t^{21} = H \left(\phi_1 W + \phi_2 \frac{D}{V_t} \right) \quad , \quad \gamma_t^{22} = \frac{91H}{2} + \frac{2\phi_3 QH}{R} \quad , \quad \text{最小運送頻次} (f_t^{\min}) \text{ 亦改寫如下：}$$

$$f_t^{\min} = \frac{\eta Q}{U_t} \quad .$$

由 γ_t^{11} 、 γ_t^{21} 不隨總貨物流量 (Q) 變動，而 $\gamma_t^{12} \gamma_t^{22} = \left[n(\alpha_t + S_t W + B_t) + D \left(\frac{S_t}{V_t} + F_t \right) \right] \left(\frac{91H}{2Q} + \frac{2\phi_3 H}{R} \right)$ 隨總貨物流量 (Q) 增加而減少，可知當總貨物流量增加時，成本關係曲線的兩漸近線不變、中心點不變、焦距變短、頂點往左下方移動，整條曲線往中心點方向移動。最小運送頻次點為 $(\overline{AC2_t}, \overline{AC1_t})$ ，由

$$\overline{AC2_t} = H \left(\phi_1 W + \phi_2 \frac{D}{V_t} \right) + \left(\frac{91H}{2Q} + \frac{2\phi_3 H}{R} \right) \frac{U_t}{\eta} \quad (23)$$

$$\overline{AC1_t} = 2 \left(G + \frac{\beta_t}{R} + \frac{S_t}{R} \right) + \left[n(\alpha_t + S_t W + B_t) + D \left(\frac{S_t}{V_t} + F_t \right) \right] \frac{\eta}{U_t} \quad (24)$$

可知 $\overline{AC2_t}$ 隨總貨物流量 (Q) 的增加而減少, $\overline{AC1_t}$ 不隨總貨物流量 (Q) 變動, 最小運送頻次點 $(\overline{AC2_t}, \overline{AC1_t})$ 往左平移。任意 t 型船的可行解隨總貨物流量 (Q) 變動之情形如圖 7 所示。以下同樣以兩型船之分析為例, 說明貨物流量變動對船型決策之影響。

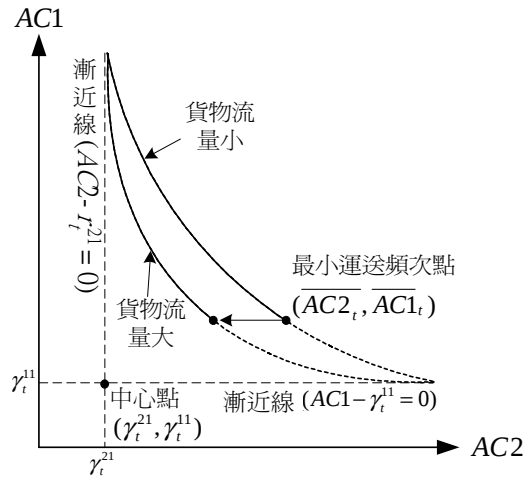


圖 7 任意 t 型船可行解隨總貨物流量變動圖

由於最小航運成本 ($\overline{AC1_t}$) 不隨總貨物流量 (Q) 變動, 使得兩型船之最小航運成本的相對大小不變。故兩型船之船型與頻次決策情形仍如前述分析之圖 5 與圖 6 所示, 惟船型決策臨界點 ($AC2'$ 、 $AC2''$ 與 $AC2'''$) 隨總貨物流量 (Q) 變動而改變。

船型決策臨界點 $AC2'$ 為 c' 點之貨物存貨成本值, 由 c' 位於大型船成本關係曲線上, 且其航運成本值為 $\overline{AC1_{t1}}$, 可推導 $AC2'$ 的數學式如下:

$$\begin{aligned} AC2' &= \gamma_{t2}^{21} + \frac{\gamma_{t2}^{12} \cdot \gamma_{t2}^{22}}{\overline{AC1_{t1}} - \gamma_{t2}^{11}} \\ &= H \left(\phi_1 W + \phi_2 \frac{D}{V_{t2}} \right) + \frac{\left[n(\alpha_{t2} + S_{t2} W + B_{t2}) + D \left(\frac{S_{t2}}{V_{t2}} + F_{t2} \right) \right] \left(\frac{91H}{2Q} + \frac{2\phi_3 H}{R} \right)}{2 \left(\frac{\beta_{t1} - \beta_{t2}}{R} + \frac{S_{t1} - S_{t2}}{R} \right) + \frac{\eta}{U_{t1}} \left[n(\alpha_{t1} + S_{t1} W + B_{t1}) + D \left(\frac{S_{t1}}{V_{t1}} + F_{t1} \right) \right]} \end{aligned} \quad (25)$$

由 $\overline{AC1_{t1}} > \overline{AC1_{t2}} > \gamma_{t2}^{11}$ ，可知 $\overline{AC1_{t1}} - \gamma_{t2}^{11} > 0$ ，即 $2\left(\frac{\beta_{t1} - \beta_{t2}}{R} + \frac{S_{t1} - S_{t2}}{R}\right) + \frac{\eta}{U_{t1}} \left[n(\alpha_{t1} + S_{t1}W + B_{t1}) + D\left(\frac{S_{t1}}{V_{t1}} + F_{t1}\right) \right] > 0$ ，得到 $AC2'$ 隨總貨物流量增加而減少。

相同的，船型決策臨界點 $AC2'''$ 為 c'' 點之貨物存貨成本值，由 c'' 點位於小型船成本關係曲線上，且其航運成本值為 $\overline{AC1_{t2}}$ ，可推導 $AC2'''$ 的數學式與 $AC2'$ 相似：

$$AC2''' = \gamma_{t1}^{21} + \frac{\gamma_{t1}^{12} \cdot \gamma_{t1}^{22}}{\overline{AC1_{t2}} - \gamma_{t1}^{11}} \quad (26)$$

$$= H\left(\phi_1 W + \phi_2 \frac{D}{V_{t1}}\right) + \frac{\left[n(\alpha_{t1} + S_{t1}W + B_{t1}) + D\left(\frac{S_{t1}}{V_{t1}} + F_{t1}\right) \right] \left(\frac{91H}{2Q} + \frac{2\phi_3 H}{R} \right)}{2\left(\frac{\beta_{t2} - \beta_{t1}}{R} + \frac{S_{t2} - S_{t1}}{R}\right) + \frac{\eta}{U_{t2}} \left[n(\alpha_{t2} + S_{t2}W + B_{t2}) + D\left(\frac{S_{t2}}{V_{t2}} + F_{t2}\right) \right]}$$

可知船型決策臨界點 $AC2'''$ 亦隨總貨物流量之增加而減少。至於第三個船型決策臨界點 $AC2''$ ，其為兩成本關係曲線交點 E 之貨物存貨成本值，由兩曲線的數學式可推導出 $\frac{\partial AC2''}{\partial Q} < 0$ ，得到 $AC2''$ 亦隨貨物流量增加而減少。亦即，三個船型決策臨界點 ($AC2'$ 、 $AC2''$ 與 $AC2'''$) 均隨總貨物流量 (Q) 增加而減少。

總貨物流量的變動可以是流量本身隨經貿環境轉變而改變，或是航商運用聯營合作策略所促成的流量增加，變動對船型決策的影響可以圖形作說明。以小型船航速較快或兩型船航速相同 ($V_{t1} \geq V_{t2}$) 且大型船的最小航運成本較小 ($\overline{AC1_{t1}} > \overline{AC1_{t2}}$) 之情況為例作說明，總貨物流量 (Q) 增加對船型與頻次決策的影響如圖 8(a)，柏拉圖最佳解往左平移，船型決策臨界點 $AC2'$ 亦往左平移，原本以使用小型船為最佳船型的部分，轉變為以使用大型船為最佳船型。進一步將船型決策臨界點 $AC2'$ 隨總貨物流量變動之曲線 (式(25)) 表示在以總貨物流量 (Q) 為橫軸，貨物存貨成本 ($AC2$) 為縱軸的二維決策圖上，如圖 8(b)，圖中顯示：在 $AC2'$ 曲線上方以使用大型船 ($t2$) 較佳，而在曲線下方以使用小型船 ($t1$) 較佳，亦即，隨總貨物流量的增加， $AC2'$ 曲線下降，則使用最小航運成本較小的大型船之可能性逐漸提高。

由以上分析可知當大型船的最小航運成本較低 ($\overline{AC1_{t1}} > \overline{AC1_{t2}}$) 時，使用大型船的可能性隨貨物流量的增加而增加；而當小型船的最小航運成本較低 ($\overline{AC1_{t1}} \leq \overline{AC1_{t2}}$) 時，使用小型船的可能性隨貨物流量的增加而增加。亦即，隨貨物流量增加，最小航運成本 ($\overline{AC1_t}$) 較小之船型是較佳決策的可能性提高。在實際航運市場上，由於通常以大型船的最小航運成本較低，因此隨貨物流量增加，大型船是較佳決策的可能性提高。

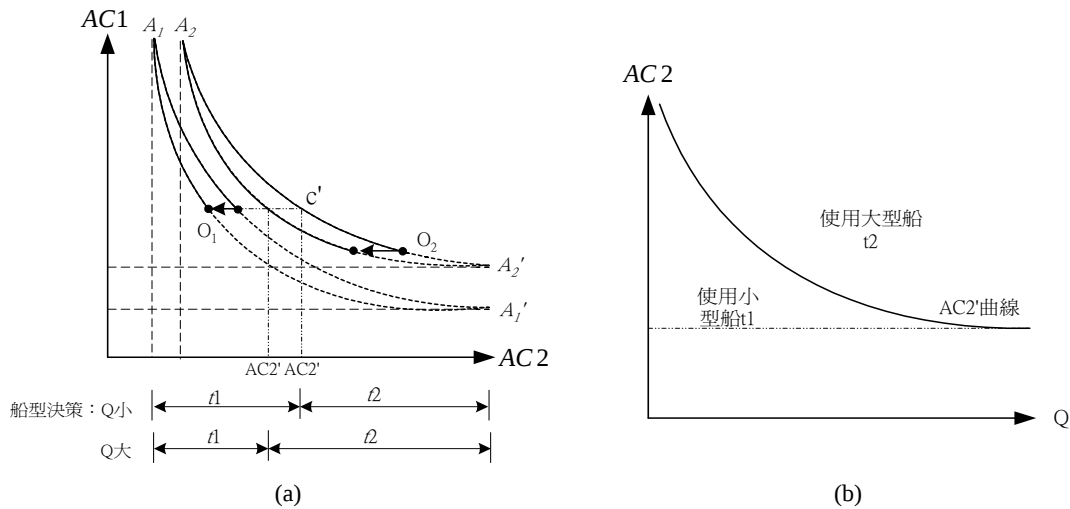


圖 8 貨物流量變動對船型決策之影響

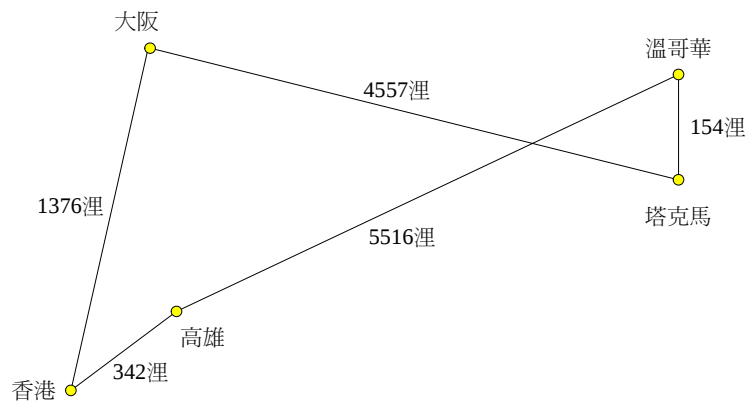
此外，由圖 8(a) 中成本關係曲線移動之現象，可知當存貨成本之限制水準小於 $\overline{AC1_{t2}}$ 時，在任一特定的貨物存貨成本水準下，相對應的航運成本 ($AC1$) 隨貨物流量的增加而減少，此一流量增加而航運成本下降的現象可合理說明實務上航商普遍採用聯營之經營模式。例如：兩航商經營同一條航線，在提供相同的貨物存貨成本水準之服務目標下，若兩航商以共同派船方式聯營，將可以擴大航線流量、提高運送頻次，甚至增大運送船型，比各自經營一條航線的航運成本低，兩航商均可獲得航運成本降低的利益。

四、範例分析

為了解上述模式的運作情形，本研究以一航商的越太平洋航線 (Transpacific Northwest Service，簡稱 TPN 航線) 為例進行船型與頻次決策分析，並探討貨物流量、航程長度、靠泊港數與港埠效率等因素對船型決策之影響。

TPN 航線由高雄港出發，經香港、大阪、塔克馬 (Tacoma) 至溫哥華而後返回高雄港，總共靠泊五個港口，航線總航程 11,945 浬，各航段航程如圖 9 所示。假設航商可用船型有五種，分別以 $T_i (i = 1 \sim 5)$ 表示由小至大的船型，各型貨櫃船的船舶容量 (U_i)、服務航速 (V_i)、船舶時間成本 (S_i)、船舶燃油成本 (F_i, B_{it}) 如表 1 所示，各型船在港口的港灣費用固定部分 (α_{it})、變動部分 (β_{it}) 與單位貨櫃處理成本 (G_i) 如表 2 所示，各港口間的貨物流量如表 3 所示。另外，模式中各港的平均毛裝卸效率 (R_i)、平均等待時間 (W_i) 在此範例分析中暫不考慮港埠差異，均按高雄港 2001 年的船舶動態資料與棧埠作業資料估算，分別為 1680TEU/日 (70TEU/時) 與 0.125 日 (3 小時)，貨物時間價值 (H) 則參考

相關資料假設為每 TEU 貨櫃 30 美元／日。



航程資料來源：Caney and Reynolds^[20]。

圖 9 TPN 航線的各航段航程

將上述各項參變數值代入，求得各型船的成本關係曲線數學式、最小運送頻次點 ($\overline{AC2_t}, \overline{AC1_t}$) 與各型船成本關係曲線的交點，如表 4 所示，推論得到各型船的可行解如圖 10 所示。表 4 的最小運送頻次點值顯示各型船的最小航運成本 ($\overline{AC1_t}$) 值隨船型的增大而減少，以 T5 船型最小為 240 美元／TEU，其次是 T4 船型為 255 美元／TEU，然後是 T3、T2 與 T1 船型，分別是 297、324 與 385 美元／TEU。圖 10 中五曲線分別表示五型船的成本關係曲線，曲線圖形如同第三節所推論為雙曲線數學函數。T4 型 (4,211TEU) 船的成本關係曲線最接近原點 (0, 0)，顯示該型船在相同貨物存貨成本水準下的航運成本最

表 1 各型船之船舶相關參變數值

船 型	T1	T2	T3	T4	T5
船舶容量 U_t (TEU)	1,810	2,728	3,428	4,211	5,652
服務航速 V_t (浬／日)	504.0	492.0	496.8	600.0	600.0
每日船舶時間成本 S_t (美元)	21,940	22,865	23,571	24,360	25,813
單位距離燃油成本 F_t (美元／浬)	15.51	20.81	24.32	23.57	29.89
進港燃油成本 B_{it} (美元／次)	77.62	104.05	121.59	117.84	149.44

註：1. 此五種船型均為長榮海運公司所使用之船型，表中各船型的服務航速 (V_t) 引用自該公司網站^[21]。

2. 各船型的每日船舶時間成本 (S_t) 與船舶燃油成本 (F_t 、 B_{it}) 依據王鴻仁^[22]估算 1,687TEU、5,200TEU 貨櫃船的每日時間成本與每日燃油成本值，以線性法推估，並假設進港燃油成本各港相同為單位距離燃油成本的五倍。

表 2 各型船之港埠相關參變數值

船 型	T1	T2	T3	T4	T5
港灣費用固定部分 α_{it} (美元/次)	3,377	3,497	3,859	3,987	4,241
港灣費用變動部分 β_{it} (美元/日)	2,151	2,151	2,868	2,868	4,302
單位貨櫃處理成本 G_i (美元/TEU)	53	53	53	53	53

註：在此範例分析中暫不考慮港埠差異，假設各港埠相關參變數值 α_{it} 、 β_{it} 、 G_i 相同，且以各型船在高雄港之費用計算，各種使用費依據「高雄港港埠業務費率表」(高雄港務局^[23])計算。

表 3 各港口間貨物流量

單位：TEU

起 \ 迄	高 雄	香 港	大 阪	塔克馬	溫哥華
高 雄	—	0	0	9,663	8,166
香 港	0	—	0	23,553	19,904
大 阪	0	0	—	1,918	1,621
塔克馬	6,026	14,689	1,196	—	0
溫哥華	5,093	12,413	1,011	0	—

註：1. 基於此一越太平洋航線以服務遠東與美西間的遠洋貨櫃往來為目的，不考慮近洋貨物流量，因此假設遠東區域內、美西區域內港口間的貨物流量為零。
 2. 以五個港口的港埠貨櫃作業量 (引自 Containersation International Yearbook 2002^[24]) 表示各港口貨櫃裝卸量之相對比率，據以計算各港口間的貨物流量比率，並以該航線 2001 年第二季在高雄港的貨櫃實櫃裝卸量計算各港口間的貨物流量。

表 4 各型船的成本關係曲線數學式、最小運送頻次點與各曲線交點

單位：美元/TEU

船型	成本關係曲線數學式	最小運送頻次點	成本關係曲線交點			
			T1	T2	T3	T4
T1	(AC1-134)(AC2-365)=22732.5	(456, 385)				
T2	(AC1-135)(AC2-374)=25812.8	(511, 324)				
T3	(AC1-137)(AC2-370)=27538.1	(542, 297)				
T4	(AC1-138)(AC2-308)=24771.0	(519, 255)	(725, 197) 不可行	(1358, 162) 不可行	(3787, 145) 不可行	
T5	(AC1-141)(AC2-308)=28067.3	(592, 240)	(549, 258) 不可行	(727, 208) 不可行	(911, 188) 不可行	不相交

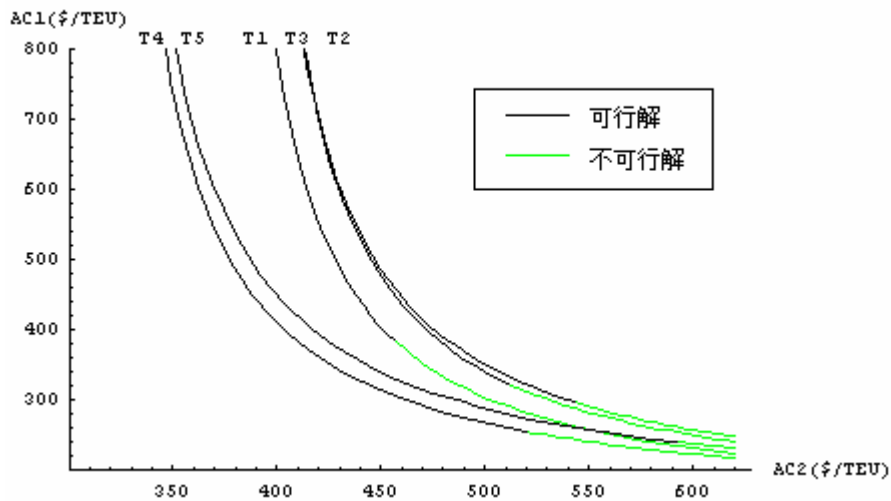


圖 10 TPN 航線之各型船的可行解

低，其次是 T5 型 (5,652 TEU) 船，兩曲線不相交，容量較大的 T5 型船的曲線恆位於 T4 型船的右上方，與前述理論推導之兩型船航速相同 ($V_{t4} = V_{t5} = 25$) 情況一致，其次是 T1 型 (1,810 TEU) 船，其曲線與 T4、T5 的曲線分別相交於一點：(725, 197)、(549, 258)，不過此兩點均已位在不可行解處。另 T3 型 (3,428 TEU) 與 T2 型 (2,728 TEU) 船，兩型船的成本關係曲線相當貼近，由於 T3 型船的航速略高於 T2 型船，兩曲線相交於一點(424, 650)，兩型船的航速低於 T1 與 T4、T5 船型，與 T1 型的曲線沒有交點，而與 T4 型、T5 型的曲線均相交於一點。

柏拉圖最佳解為各型船中最接近原點 (0, 0) 之曲線所組成，由圖 10 中各型船的可行解，可求得 TPN 航線之柏拉圖最佳解，由 T4 型船的所有可行解與 T5 型船之部分可行解所組成，如圖 11 中實線所示。船型決策臨界點可由式 (25) 計算得到，為 555 美元/TEU，顯示柏拉圖最佳解包含 T4 與 T5 兩種船型，當貨物存貨成本沒有限制時以使用 T5 型船較佳，當貨物存貨成本要求須小於 555 美元/TEU 時以使用 T4 型船較佳。

進一步考慮在實務上航商安排的運送頻次大多以週為單位，提供兩週一班以上的航運服務。則 TPN 航線實際上可選擇的船型與頻次如表 5 與圖 11 中的離散點所示。表 5 顯示當航商提供兩週一班至每日一班之航運服務時的最適船型、航運成本與貨物存貨成本。兩週一班與每月三班之航運服務無法將所有貨物完全運送，航運成本最低的選擇是安排每週一班的航運服務，此時以 T5 船型服務的航運成本為 254 美元/TEU，貨物存貨成本為 558 美元/TEU，此外航商亦可以選擇安排每週二班、每週三班或更高頻次的運送服務，此時以 T4 船型服務較佳。

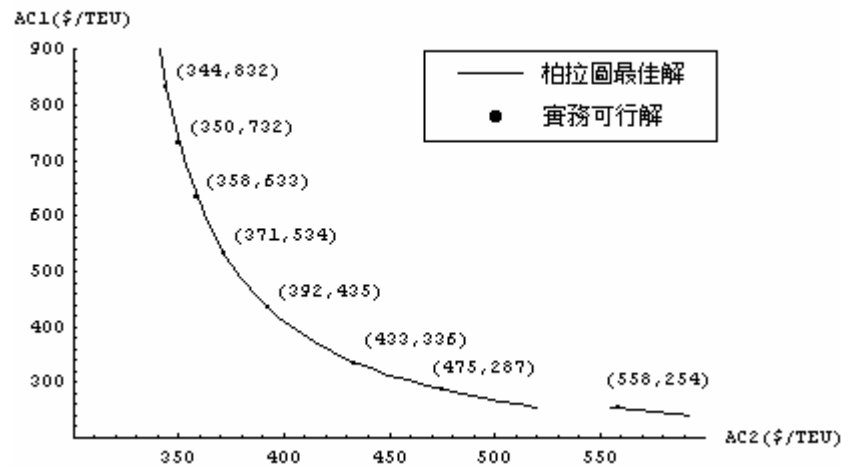


圖 11 TPN 航線之柏拉圖最佳解與實務可行解

表 5 TPN 航線實際可行之航運服務

單位：美元／TEU

運送頻次	船型	航運成本	存貨成本	運送頻次	船型	航運成本	存貨成本
兩週一班 (f = 6.5)	不可行	-	-	每週三班 (f = 39)	T4	435	392
每月三班 (f = 9)	不可行	-	-	每週四班 (f = 52)	T4	534	371
每週一班 (f = 13)	T5	254	558	每週五班 (f = 65)	T4	633	358
兩週三班 (f = 19.5)	T4	287	475	每週六班 (f = 78)	T4	732	350
每週二班 (f = 26)	T4	336	433	每日一班 (f = 91)	T4	832	344

貨物流量變動對船型決策之影響如圖 12。圖中顯示：在 TPN 航線之不同貨物存貨成本 (AC2) 與總航線貨物流量 (Q) 時的最適船型決策，當貨物存貨成本低、航線貨物流量低時，採用 T4 型船較佳，而當貨物存貨成本高、航線貨物流量高時，採用 T5 型船較佳，也就是說，隨著貨物流量的增加，決策傾向於使用大型船。

進一步，本研究探討不同的航程長度、靠泊港數目，以及港埠效率對船型決策之影響。表 6 顯示當航線貨物流量為 20,000TEU 時，不同航程、靠泊港數與港埠效率情況下頻次為每週一班的最適船型，可知最適船型將隨著航程長度的增加而增大，隨著靠泊港數的增加而減少，且隨著港埠效率的提高而增大。

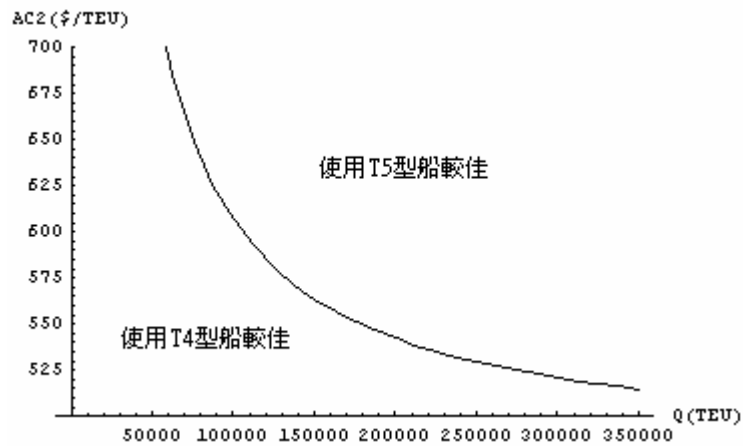


圖 12 貨物流量變動對船型決策之影響

表 6 航程、靠泊港數與港埠效率之影響分析

(a) 目前港埠效率 ($W_i = 3\text{hr.}$, $R_i = 70\text{TEU/hr.}$) 下的最適船型

航程 靠港數	2,000 哩	2,500 哩	3,000 哩	3,500 哩	4,000 哩	4,500 哩	5,000 哩
5 港	T1	T1	T1	T4	T4	T4	T4
10 港	T1	T1	T1	T1	T4	T4	T4
15 港	T1	T1	T1	T1	T4	T4	T4
20 港	T1	T1	T1	T1	T4	T4	T4

(b) 港埠效率提高 ($W_i = 1\text{hr.}$, $R_i = 140\text{TEU/hr.}$) 下的最適船型

航程 靠港數	2,000 哩	2,500 哩	3,000 哩	3,500 哩	4,000 哩	4,500 哩	5,000 哩
5 港	T1	T1	T4	T4	T4	T4	T4
10 港	T1	T1	T4	T4	T4	T4	T4
15 港	T1	T1	T1	T4	T4	T4	T4
20 港	T1	T1	T1	T4	T4	T4	T4

(c) 港埠效率降低 ($W_i = 6\text{hr.}$, $R_i = 35\text{TEU/hr.}$) 下的最適船型

航程 靠港數	2,000 哩	2,500 哩	3,000 哩	3,500 哩	4,000 哩	4,500 哩	5,000 哩
5 港	T1	T1	T1	T1	T1	T1	T4
10 港	T1	T1	T1	T1	T1	T1	T4
15 港	T1	T1	T1	T1	T1	T1	T4
20 港	T1	T1	T1	T1	T1	T1	T4

五、結論與建議

本研究以航運成本與貨物存貨成本最小化之雙目標，探討航商定期貨櫃航線的船型與頻次決策。航運成本與貨物存貨成本雙目標的數學函數，係運用解析性方法分析多港靠泊航線的運送過程加以構建，其中航運成本包括航商擁有與使用船舶須固定花費或分攤的船舶時間成本、船舶航行所須耗費的燃油成本，以及船舶在各港口灣靠與裝卸貨櫃所支付的港埠成本，而貨物存貨成本則包括貨櫃在出發港等待運送之等待時間成本，以及在船上運送途中的航運時間成本。構建的成本函數與貨物流量及船型相依，可反映流量與船型的規模經濟性。

進一步，本研究推導航運成本與貨物存貨成本的數學關係式，由於該式即為所有船型與頻次方案的集合，且函數形式為雙曲線數學函數，得明確以圖示方式顯示在二維目標值空間，因此，本研究在目標值空間上決策雙目標規劃的可行解與柏拉圖最佳解，分析兩型貨櫃船的所有可能決策結果，並探討貨物流量變動之影響。研究結果顯示：透過在目標值空間上的分析，可以求得雙目標模式的柏拉圖最佳解，且得以圖示顯示出各貨物存貨成本水準下的最適船型。貨物存貨成本對於船型決策之影響亦由圖形明確顯示，當沒有貨物存貨成本限制時，以使用最小航運成本較小的船型較佳，若有限制則改以小型船提供高頻次服務，或使用航速較快的船型較佳。而貨物流量增加將使成本關係曲線往中心點平移、最小運送頻次點左移，雖然船型決策之各情況圖形不變，但船型決策臨界點左移，因此，隨貨物流量增加，將使最小航運成本較小之船型是較佳決策的可能性提高，此一推論經推導船型決策臨界點隨貨物流量變動的數學關係式，得明確以船型決策隨貨物流量變動而改變的圖形顯示。此外，由貨物流量增加使得成本關係曲線移動的現象，亦可說明航商藉聯營合作得擴大航線流量、增大運送船型或提高運送頻次，以降低航運成本，解釋實務上航商普遍採用聯營之經營模式。

最後，在範例分析中計算得到 TPN 航線的柏拉圖最佳解與實務可行解，以圖示方式顯示該航線的船型決策隨貨物流量變動之情形，且推估在不同航程、靠泊港數與港埠效率情況下的最適船型，除驗證理論推導結果，並闡釋構建的雙目標決策模式可反映航程、靠泊港數等因素對船型與頻次決策之影響。

綜上，經本研究的理論推導與數值驗證，可確認構建的決策分析模式，基本上可以處理船型與頻次決策問題，運用雙目標模式不但使航商決策更具彈性，並可分析兩成本間的權衡取捨關係。建議未來可進一步闡釋模式在實務上的應用性，蒐集航商、港埠與貨櫃船的相關資料，分析各型貨櫃船的潛在市場，探討超大型貨櫃船、高速貨櫃船投入營運的經濟性，以提供航商調整船隊規模與組成，或提供造船廠做為建造設計船型之參考。

參考文獻

1. 盧華安，「定期貨櫃航線設計之研究」，**運輸計劃季刊**，第三十一卷，第一期，民國九十一年，頁 121-142。
2. 陳春益、邱明琦，「貨櫃航線網路設計模式之研究」，**運輸計劃季刊**，第三十一卷，第二期，民國九十一年，頁 267-298。
3. 謝尚行、張斐茹，「軸輻路網模式在定期貨櫃船定線之應用」，**運輸計劃季刊**，第三十卷，第四期，民國九十年，頁 871-890。
4. Rana, K. and Vickson, R. G., "A Model and Solution Algorithm for Optimal Routing of a Time-Chartered Containership", *Transportation Science*, Vol. 22, No. 2, 1988, pp. 83-95.
5. Ronen, D., "Cargo Ships Routing and Scheduling: Survey of Models and Problems", *European Journal of Operational Research*, Vol. 12, 1983, pp.119-126.
6. Ronen, D., "Ship Scheduling: The Last Decade", *European Journal of Operational Research*, Vol. 71, 1993, pp. 325-333.
7. Cho, S. C. and Perakis, A. N., "Optimal Liner Fleet Routing Strategies", *Maritime Policy and Management*, Vol. 23, No. 3, 1996, pp. 249-259.
8. Powell, B. J. and Perakis, A. N., "Fleet Deployment Optimization for Liner Shipping: An Integer Programming Model", *Maritime Policy and Management*, Vol. 24, No. 2, 1997, pp. 183-192.
9. Bendall, H. B. and Stent, A. F., "A Scheduling Model for a High Speed Containership Service: A Hub and Spoke Short-Sea Application", *International Journal of Maritime Economics*, Vol. 3, 2001, pp. 262-277.
10. Mourão, M. C., Pato, M. V., and Paixão, A. C., "Ship Assignment with Hub and Spoke Constraints", *Maritime Policy and Management*, Vol. 29, No. 2, 2001, pp. 135-150.
11. Jansson, J. O. and Shneerson, D., *Liner Shipping Economics*, First published, Chapman and Hall Ltd., London, 1987.
12. 董孝行，「貨櫃船規模經濟的分析」，**運輸計劃季刊**，第十五卷，第二期，民國七十五年，頁 279-299。
13. 董孝行，「貨櫃船最適船型之研究」，**運輸計劃季刊**，第十五卷，第三期，民國七十五年，頁 435-459。
14. Cullinane, K. and Khanna, M., "Economies of Scale in Large Container Ships", *Journal of Transport Economics and Policy*, Vol. 33, Part 2, 1999, pp. 185-208.
15. Cullinane, K. and Khanna, M., "Economies of Scale in Large Containerships: Optimal Size and Geographical Implications", *Journal of Transport Geography*, Vol. 8, 2000, pp. 181-195.
16. 許巧鶯、彭美珠，「海運公司之複合快速運送營運策略分析」，**運輸計劃季刊**，第三十二卷，第四期，民國九十二年，頁 715-744。
17. Daganzo, C. F., *Logistics System Analysis*, Springer-Verlag Press, Berlin, Heidelberg, 1991.

18. Hall, R. W., "Direct Versus Terminal Freight Routing on a Network with Concave Costs", *Transportation Research B*, Vol. 21, No. 4, 1987, pp. 287-298.
19. 許巧鶯、王志青，「軸輻航空貨運網路之直接與轉運路線選擇」，**運輸計劃季刊**，第二十六卷，第一期，民國八十六年，頁 95-118。
20. Caney, R. W. and Reynolds, J. E., *Reed's Marine Distance Tables*, Eighth Edition, Thomas Reed Publications, Printed in Great Britain, 1995.
21. 長榮海運公司 (<http://www.evergreen-marine.com/tw/>)。
22. 王鴻仁，「以高雄港為中心之貨櫃轉運航線分析」，國立臺灣海洋大學航運管理學系碩士論文，民國八十七年。
23. 高雄港港埠業務費費率表，三版，高雄港務局印，民國九十一年。
24. *Containerisation International Yearbook 2002*, London, 2003.

