

變動需求下貨櫃船排艙最佳化之研究¹

OPTIMIZATION OF CONTAINER SHIP STOWAGE PLANS WITH VARIABLE DEMAND

顏上堯 Shangyao Yan²

杜宇平 Yu-Ping Tu³

張耿宗 Keng-Chung Chang⁴

(93年5月3日收稿，93年9月17日第一次修改，93年11月10日第二次修改，
93年12月23日第三次修改，94年7月18日定稿)

摘要

船舶的大型化為目前貨櫃運輸的趨勢，亦使得傳統人工經驗的排艙困難度大幅增加。過去的學術研究皆假設航線上各港口的出口貨櫃需求為固定，簡化了實際的變動需求，因此本研究針對變動需求下貨櫃船排艙規劃問題，發展一排艙架構，其核心為一個二階段求解程序，內含二個零壹整數規劃模式，以幫助海運業者有效進行其排艙規劃。在第一階段中，本研究將貨櫃船的艙位分區，且將性質相近的貨櫃編為同組，以翻櫃成本最小化為目標，考量船舶平衡、壓櫃及其他相關營運的限制條件，構建一貨櫃組艙區指派模式。在第二階段中，本研究構建一艙位指派模式，依據第一階段的指派結果對每一艙區內的貨櫃進行指派。本研究利用數學規劃軟

-
1. 本研究承行政院國家科學委員會專題研究補助 (NSC 92-2416-H-366-007)，特此致謝。作者感謝二位審查委員寶貴的修正意見，使本文更為嚴謹。
 2. 國立中央大學土木工程學系教授 (聯絡地址：320 中壢市五權里中大路 300 號中央大學土木工程學系；電話：03-4227151 轉 34141；E-mail：t320002@cc.ncu.edu.tw)。
 3. 樹德科技大學工業管理系助理教授。
 4. 國立中央大學土木工程學系碩士。

體發展一演算法進行求解。為測試本研究模式及演算法的實用績效，本研究參考一國籍海運業者的營運資料進行測試，其模式結果與演算效率均頗佳，顯示本研究模式與演算法應可為實務業者之參考。

關鍵詞：貨櫃；排艙；變動需求；零壹整數規劃問題

ABSTRACT

Recently, container ship capacity has been increased and thus significantly aggravates the difficulty in stowage planning which is usually performed manually in practice. In addition, former studies usually assumed container demand to be constant, that simplifies demand variations in actual operations. Therefore, to solve the problem of container ship stowage plan to meet various demand, in this study we developed a stowage planning framework that contained two 0-1 integer programs embodied in a two-stage process to help naval carriers effectively perform their stowage plans. In the first stage, by assigning container groups with the same OD into the blocks, we developed a contain-block assignment model to minimize the number of container shifting, subject to the ship stability constraint, the container overstay constraint, and the other related operating constraints. In the second stage, a container-slot assignment model was established to assign each container into a slot according to the solution from the first stage. We used mathematical programming software to develop a solution algorithm. To evaluate the models and the solution algorithm in practice, we conducted case study referring to the data obtained from a Taiwan ocean container liner. The results were positive, showing that models and the solution algorithm could be useful for carriers in practice.

Key Words: *Container; Stowage planning; Variable demand; 0-1 integer program*

一、緒 論

歷經數十年的發展，貨櫃運輸提高了貨物運輸的速度及便利性，已成為當今海運貨物運送的主流。為了提高營運效率及降低運送成本，船商在船型構造上不斷精進以提高船舶的貨櫃裝運容量。自從 1970 年代出現容量超過 1,000 TEU (twenty-foot equivalent unit) 的貨櫃船以來，目前全球前十大海運公司均採用運量超過 4,000 TEU 的船舶進行營運。正在建造中的新貨櫃船容量甚至可達 8000 TEU，顯示貨櫃船大型化已成目前貨櫃運輸的趨勢。

然而，船舶大型化代表船舶在港口的貨櫃裝卸量和貨櫃種類將隨之增加，裝卸作業亦趨龐大而複雜，並使得大型船舶靠港進行裝卸作業的時間及成本大幅增加。對海運公司而

言，若裝卸作業耗費的時間及成本過多，則使用大型船舶所帶來的相關效益亦將相對減少，因此亟需改善現有的裝卸作業，以因應船舶大型化所帶來的衝擊，使海運業者能獲得更大的利益。

對海運公司而言，用以決定各個貨櫃在船舶上的存放位置之貨櫃排艙計畫 (stowage plan) 對貨櫃的裝卸成本有極大的影響，例如港口的貨櫃堆放作業及裝卸機具、搬運機具和相關人力的調度，皆取決於貨櫃積載圖。至於積載圖的優劣，可從對船隻安全性的影響及翻櫃成本的多寡進行評估。設計不佳的貨櫃積載圖會導致貨櫃船上發生嚴重的壓櫃 (over-stowage)，產生大量的翻櫃 (shifting) 成本，進而使總裝卸成本增加。因此，產生貨櫃積載圖的排艙規劃 (stowage planning) 為影響貨櫃裝卸效率的關鍵因素。

目前國內大多數的海運公司均沿襲傳統的人工方式進行排艙規劃。此人工排艙可視為一試誤法，係依照規劃人員的經驗進行排艙規劃，在排艙規劃的過程中，利用輔助性的電腦軟體及其他工具檢核所規劃的貨櫃積載圖是否符合相關限制 (例如船舶平衡、視距限制等)。然而，此種以人工經驗為主的排艙方式主要僅求得一可行解，缺乏系統最佳化的考量，且在船舶大型化的趨勢下，人工排艙的效率將面臨挑戰，翻櫃成本 (含起重機在不同 bay 間之移動成本等) 的控制難度將因此增加，故發展最佳化排艙模式及求解電腦演算法，以有效完成積載圖製作，應有其必要性。

以往相關的排艙規劃研究所提出之演算法，大多忽略貨櫃需求量的變動特性。一般假設在航程中所停靠港口的進出口貨櫃量在貨櫃船出發前皆為已知，且在貨櫃船完成整個航程前不會改變。然而，實務上排艙規劃所面臨的大都是一變動需求問題，亦即貨櫃船出發後，未來各港口的起迄貨櫃需求量可能與出發前的預測量不同。另外，船舶平衡限制為積載圖是否可行的重要考量，因此本研究主要針對變動需求下，考量船舶平衡及相關限制，以數學規劃方法建構貨櫃船舶排艙最佳化模式，並發展有效之演算法進行求解，以幫助海運業者進行貨櫃排艙規劃，期能增進其貨櫃裝卸作業的效率。

本研究以海運業者為立場，在出口貨櫃需求變動的情形下，利用系統最佳化的概念，發展一排艙架構，其核心為一個二階段求解程序，內含二個零壹整數規劃模式，以幫助海運業者有效進行其排艙規劃。在第一階段中，本研究將貨櫃船的艙位分區，且將性質相近的貨櫃編為同組，以最小化翻櫃成本為目標，考量船舶平衡、壓櫃及其他相關營運的限制條件，構建一貨櫃組艙區指派模式。在第二階段中，本研究構建一艙位指派模式，依據第一階段的指派結果對每一艙區內的貨櫃進行指派。本研究並利用數學規劃軟體 CPLEX 分別求解二階段模式，並整合兩階段演算法發展一整合求解程序以求解整個航線之貨櫃船排艙規劃。至於有關港口貨櫃場站的貨櫃裝卸機具、車輛與人員的調度問題，在實務上大多由港埠業者處理，故不在研究範圍內。本文其餘內容如下：第二節回顧排艙作業之相關文獻，第三節構建模式及設計求解演算法，第四節進行測試範例，第五節提出結論及對後續研究的建議。

二、文獻回顧

排艙問題的研究起於 1970 年代，早期主要以經驗法則或模擬方式為之，晚近則主要以數學規劃技巧為之。前者如 Shields^[1] 曾提到排艙規劃不能只針對航線上的單一個停靠港口的貨櫃特性（如貨櫃規格、貨物重量、目的地等）來設計，必須考慮到航線上所有未到達的港口的貨櫃特性。其排艙演算法主要將排艙作業人員常用的經驗法則加以匯整，並進行多次求解產生出一定數目的排艙計畫後，再利用選定的指標來評估各個排艙計畫的優劣。此演算法的缺點在於需要大量的計算時間，難以求解較大的問題，且無法保證最終解的品質。

Martin 等人^[2] 曾同時考慮貨櫃在河岸上堆放情形的排艙規劃，並以港口工人提供的經驗法則來設計演算法。其依序以翻櫃動作最少、起重機移動距離最短及船身穩定等三項評估標準，進行艙位及貨櫃的挑選。然而該研究對岸上的貨櫃並不進行預排，此作法雖可用於處理小量的貨櫃，但由於現今貨櫃場的貨櫃數量龐大，通常會對貨櫃進行預排，故其演算法較難適用於現在的大型貨櫃場。周建張^[3] 曾探討排艙規劃作業的決策原則，並利用知識庫系統 (knowledge-based system)，將相關的資料先行建立成資料庫，再利用經驗法則進行排艙作業。由於其設計一次只能處理一個貨櫃，故在應用上有所限制。

至於利用數學規劃方法研究排艙的文獻如 Avrial 和 Penn^[4] 曾簡化排艙規劃作業，以翻櫃次數最少為目標式，構建一零壹整數規劃問題。由於整個數學模式過於龐大難以求得最佳解，因此作者提出一「whole columns heuristic procedure」的啟發解法。然而，此作法乃將同一終點港的貨櫃以艙區中單一 Column 的容量為單位進行分組，再指派貨櫃到各個 Column，其在運算時間上仍較無效率，故只適用於求解小型問題。接著，Avrial 等人^[5] 提出了一個改良的啟發解法「suspensory heuristic procedure」，與之前的「whole columns heuristic procedure」一起運用可求解較大的問題。由於作者所提出之數學模式在建構時做了相當多的簡化，例如未考慮船舶平衡限制，因此較難以應用於實務上。另外，Avrial 等人^[6] 曾將其排艙規劃模式與節點著色問題 (coloring of circle graphs) 加以比較，證明排艙規劃模式可歸類為 NP-complete 問題。

Wilson 和 Roach^[7] 曾將排艙規劃分成兩個階段，第一階段為艙區指派問題：將整艘貨櫃船的艙位以艙蓋 (hatch cover) 為基準切割成不同艙區，以將所有迄點港口相同的出口貨櫃放在同一區域中為原則，利用分枝界限法 (branch and bound method) 進行求解；第二階段則為艙位指派問題：利用禁制搜尋法 (tabu search method) 求解各艙區內的各個貨櫃擺放位置。作者藉著分析兩階段的作業特性，提出可用於評估排艙成果的多項指標，以加總後的數值做為求解結果的評估標準。Wilson 等人^[8,9] 再針對之前提出的多項指標進行探討，並給予各指標不同的權重後再進行加總，使整個模式更符合排艙規劃人員的需要。

李選士與林志成^[10] 曾運用基因演算法 (genetic algorithm, GA) 進行排艙問題的求解。由於 GA 需要大量的計算時間，所以作者在編碼上是先將貨櫃船上的艙位加以分割成

區塊，再以區塊為單位加以編碼進行運算。Kang 和 Kim^[11] 曾將排艙規劃分成兩個階段分別建構模式並求解。第一階段是以固定費率之運輸問題 (fixed charge transportation problem) 為基礎，再加入了船舶平衡的考量做為額外限制式，構建排艙模式。而為了縮小問題規模，作者採取在每個港口求解一次的做法，然而，以系統最佳化而言，靠港的貨櫃排艙仍與後續港口的貨櫃需求相關，因此僅以靠港的貨櫃需求所求解的最佳化排艙，並非是真正的系統最佳解。由於此模式難以直接求出整數解，因此作者在求解上是先求取線性近似解，再調整成整數解。第二階段則採用一「tree search method」的演算法求解貨櫃艙位的指派問題。

陳春益與溫哲欽^[12] 曾將排艙問題視為一空間席位指派問題，利用時空網路建構艙位指派模式進行求解，其模式可視為 Kang 和 Kim^[11] 所提出的第一階段問題模式。Imai 等人^[13] 曾考量船舶的穩定性及最小翻櫃次數，探討船舶的排艙規劃。Dubrovsky 等人^[14] 曾以基因演算法求解 Avriel 等人^[5] 所建構的數學模式，其求解時間及目標值較之前的啟發解為佳，且作者以改變評估函數的方式，在不改變模式的前提下加入了船舶側傾平衡的考量。Ambrosino 和 Sciomachen^[15] 曾探討 MBPP (master bay plan problem) 之排艙問題，但並未針對此問題進行最佳化求解。之後，Ambrosino 等人^[16] 針對 MBPP 構建一零壹線性規劃模式，並提出一啟發式解法，以求解此一組合最佳化問題。

上述文獻中，我們發現過去的研究在貨櫃起迄需求的考量上，皆以固定的預測值為輸入，而未考量營運中出口貨櫃量變動的特性，然而當貨櫃船在一港口裝卸完貨櫃後，在抵達下一港口前，對該港的出口貨櫃量而言，其原先的預測值可能與實際值不同，因此原先規劃的貨櫃排艙必須作調整，而此可能失去其預期的最佳化規劃。對於此不確定性需求的處理上，Birge 等人^[17] 曾指出一般有二種方法：一為 wait-and-see solution (WS)，另一為 here and now solution (HN)。WS 是指等到實際的不確定因素皆可確定後再求解，或是假設在隨機的環境中，能精確的預知未來所有可能的隨機狀況，即每一隨機事件與其隨機變數皆為已知，則可以確定性規劃方式求解在每一隨機變數下之最佳解與其目標值^[18]。然而，在很多真實世界的運輸營運問題中，上述的假設不易達成，亦即事先難以精確的預知未來可能發生的隨機狀況，或一般需事先規劃其營運解 (如航空公司班表設計與排程規劃^[19])，而無法等待營運時點迫近時再做具體的營運設計，且此規劃一旦決定後在營運中便無法大幅更動，因此，一般較少發現有直接應用 WS 的作法於實際的運輸營運作業上。

至於 HN 則指在未來隨機因素尚未確定前即利用預測的確定值或隨機函數求解。前者一般稱為確定性規劃，後者則一般稱為隨機性規劃。傳統的確定性規劃通常以預測的平均值為輸入，求解未來的營運解，例如 Yan 和 Lin^[20] 曾以預測的機場關閉時間長度為輸入，考量航空公司營運資源及相關營運限制，構建一即時性飛航排程調整模式及演算法，求解短期系統擾動下之機隊排程及班表調整。由於傳統的確定性規劃未能精確掌握未來隨機因素的變化，可能導致規劃解與實際營運解有落差 (例如參考 Yan 等人^[21])，因此學界有利用隨機函數與方法，構建隨機規劃模式，期在隨機事件發生之前，預先求得一個較能符合實務上隨機事件的規劃結果。例如 Laporte^[22] 曾針對不確定的顧客需求建構一個兩階段的

隨機整數規劃問題及一 branch-and-cut 演算法，求解最佳的設施區位問題。值得一提的是，Wets^[23] 亦曾探討具有時間相關性的隨機最佳化模式，分別說明 here-and-now 及 wait-and-see 兩種模式之間的差異，並以 EVPI (expected value of perfect information) 的概念闡述隨機數學規劃價值。

值得一提的是，在時間遞延的動態決策上，若一決策問題之決策期僅為整體分析期之前段部分，則決策者在二相鄰的決策問題上，可重疊二者分析期之部分資訊，即在時間的遞延中，在現有系統的資訊中可動態的納入部分新增之資訊，並逐次的做出該決策期內之決策。此系統分析方法一般稱為 rolling analysis (RA)^[24]。相關 RA 的應用文獻中，例如 Yan 等人^[25] 曾利用時空網路構建一鐵公路複合運輸的營運模式，並利用 RA 觀念動態地求解各鐵路貨運線上，隨時間變動的營運變動成本，以為鐵公路複合運輸之貨運定價參考。另外 RA 在即時決策的應用中，決策者可等到部分資訊較明朗時 (即需決策之最後一刻) 再行決策，換言之，RA 可與 WS 綜合運用，例如 Powell 等人^[26] 曾針對北美一卡車業者之即時車輛指派問題，構建一即時車輛指派模式，並利用 RA 及 WS 觀念動態並即時地求解各卡車的路線指派，以及接受客戶訂貨與否之決策。

綜上所述，過去的研究中未發現有考量出口貨櫃量變動的特性，並進行航線上動態的貨櫃船排艙規劃，因此本研究針對變動性出口貨櫃量，考量相關的營運限制，綜合 WS 與 RA 的作法，發展一新的系統排艙架構，動態的處理貨櫃船排艙問題，以幫助海運業者有效進行排艙規劃。

三、模式構建

本研究建立一排艙架構，其核心為一個二階段的求解程序，內含二個零壹整數規劃模式。以下先說明國內一海運公司的排艙作業現況及本研究排艙架構，再分別構建兩階段的模式，最後介紹整合排艙架構之求解流程。

3.1 國內海運排艙作業現況與本研究排艙架構

貨櫃船排艙規劃的目的在於求得貨櫃與貨櫃船艙位的對應關係，可視為一指派問題。實務上此排艙問題具下列二個主要特性：

1. 各港口的出口貨櫃需求量具變動性

實務上，在船舶出航前所規劃之積載圖，皆以預測的貨櫃資料為依據。由於貨櫃船的航行時間較長，因此到達下一個港口所需的時間一般遠大於該港口管理當局所規定的貨櫃結關期限，致使此預擬之積載圖通常僅可適用於船舶所在港口。當船舶到達其他港口時，若實際貨櫃資料與預測之資料差距過大，特別是貨櫃數量大量增加 (多櫃)，將會使得援用預測資料所規劃的積載圖不適用，而須進行調整。目前實務界對於此情況的因應方式，主要是以人工經驗的排艙作業方式先行挑選出多櫃機率較高的港口，在規劃積載圖時依經驗

先預留一些艙位，若預留艙位不足再於及時營運中進行積載圖的修改。經由文獻回顧可知在過去之研究中未發現有考慮此變動之需求，因此本研究發展指派模式及演算法以處理此變動需求。

2. 任一貨櫃的指派結果所造成的成本與其他貨櫃的指派結果有關

貨櫃裝卸的最大限制是所有貨櫃只能做垂直方向的移動，而常見之貨櫃船其艙區皆以艙蓋分為上下層，因此任一貨櫃的指派結果對裝卸總成本所造成的影響與其他貨櫃組的指派結果有關，故在模式建構時，貨櫃指派成本的決定需考慮其他的指派變數。如圖 1 所示，將貨櫃 1-4 (起點港口 1，迄點港口 4) 指派到下方的艙位後，若有起點小於 4 且迄點大於 4 的貨櫃 (例如圖 1 中之貨櫃 2-6) 被指派到其上方的艙位，則將造成壓櫃。此壓櫃會造成卸載貨櫃 1-4 時，需多進行至少一次的吊櫃動作，而此多出的吊櫃所造成的成本即為翻櫃成本。任一貨櫃的指派所造成的翻櫃成本，在計算上需考慮被指派至其上方及下方的艙位。若將此種特性以數學式表示，則需要大量的決策變數及限制式，將增加求解的困難度及時間，此為排艙問題的一大特色。

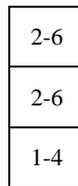


圖 1 產生翻櫃之貨櫃指派示意圖

目前國內海運公司的排艙作業一般交由專職人員以人工方式進行規劃，以國內一海運公司為例，負責排艙規劃的專職人員都是由貨櫃船船長轉任，以多年來的經驗配合相關輔助軟體進行貨櫃積載圖的規劃。輔助軟體的用途在於提供船舶基本資料及艙位狀況，可視為一試算表軟體，當使用者輸入貨櫃積載資料後，可利用此軟體檢驗目前的積載圖是否符合船舶安全性的限制。其他有關排艙的各種因素是由排艙規劃專職人員依其經驗考量，故排艙結果所造成的翻櫃成本多寡，取決於排艙規劃人員的經驗。目前此海運公司的排艙規劃人員的工作內容可分為：

1. 事前排艙計畫 (pre-stowage plan)

利用已知的訂單和歷史資料對航線上各個港口的貨櫃資料進行預測，使用預測的貨櫃資料進行預擬積載圖的製作，此工作在一般上班時間進行。

2. 修改積載圖

各個港口實際的進出口貨櫃資料在船舶到港前數小時才能確定，而海運公司為了提高收入，通常不會拒絕臨時增加的貨櫃。若因為貨櫃數量、種類的改變導致預擬積載圖失去功用，則由專職人員進行調整。由於此狀況經常發生，因此海運公司有 24 小時待命的專職人員負責這項工作。

由於目前實務界的排艙過程普遍缺乏效率，且難以掌握排艙績效，因此本研究利用整數規劃技巧 (integer programming techniques) 發展一系統性排艙架構，其核心為一個二階段的求解程序，內含二個零壹整數規劃模式，以改善實務的作法。此架構與二階段模式的設計如下所述。

由於貨櫃船的排艙營運方式特殊，一般在二港口間的行駛時間頗長（一般為數天），且各港口要運送的貨櫃需求在船舶進港前已經結關，因此貨櫃船在靠港前可確定該港出口貨櫃的真實起迄需求，且有足夠的時間（一般有數小時）可透過有效的決策輔助工具以決定該港出口貨櫃的最佳排艙方式，因此該港口的貨櫃排艙似可透過 WS 的作法求解。然而，以系統最佳化而言，當船舶離開該港口之後若仍須停靠其他港口裝載貨物，則該港口貨櫃的排艙仍與後續港口的貨櫃需求相關（此等需求在當時仍為變動需求）。緣此，本研究綜合 WS 與 RA 的作法，發展一新的排艙架構，以處理變動性需求之貨櫃船排艙問題，此架構簡述如下：

假設此航線共有 p 個停靠港口數，所有貨櫃起點港口編號為 $1, 2, 3, \dots, p-1$ （注意，第 p 港不為起點港口）， k_0 為即將進行裝卸的起點港口 ($1 \leq k_0 < p$)。此架構由第一港口開始求解，即 $k_0 = 1$ 開始。當船舶在停靠 k_0 前，可確定 k_0 的起迄需求資料，並同時更新預測後續港口（即 $k_0 + 1, k_0 + 2, \dots, p-1$ ）的出口貨櫃需求量，再以此等貨櫃需求及已裝載於船上的貨櫃為輸入，同時求解 k_0 及後續港口 ($k_0 + 1, k_0 + 2, \dots, p-1$) 的貨櫃排艙，並計算已裝載在船上貨櫃的翻櫃次數。在完成 k_0 的貨櫃裝卸後，船行至下一港口 ($k_0 + 1$) 前，再依上述作法重新決策後續所有港口的貨櫃排艙，亦即令 $k_0 = k_0 + 1$ ，並重複上述之求解，直到 $k_0 = p-1$ 後停止。值得注意的是，獲得 k_0 的確定性需求後所求得 k_0 的排艙解，其似屬 WS 作法，而以預測後續港口 ($k_0 + 1, k_0 + 2, \dots, p-1$) 的出口貨櫃需求量所求得此等港口的排艙解，當成參考，並與之後港口求解時的部分資訊重疊的方式，類似 RA 作法。值得一提的是，以系統最佳化而言，在求解港口 k_0 時，由於後續港口 ($k_0 + 1, k_0 + 2, \dots, p-1$) 的出口貨櫃量的排艙目的在預留艙位，以避免在後續港口 ($k_0 + 1, k_0 + 2, \dots, p-1$) 重新排艙時，造成過多的翻櫃次數，係為一參考的排艙解，其解在後續靠港 ($k_0 + 1, k_0 + 2, \dots, p-1$) 且起迄需求確定改變時，仍須藉重新求解而調整，而 k_0 的排艙解則為確定解，在停靠 k_0 時即可執行，因此此決策同時含部分確定性需求（指 k_0 的貨櫃需求）與部分預測需求（指 $k_0 + 1, k_0 + 2, \dots, p-1$ 的貨櫃需求）。綜上所述，本研究的排艙架構係綜合 WS 或 RA 之作法，其不同於以往貨櫃船排艙研究之規劃解，且亦未發現以往有相關的文獻探討類似本研究之排艙架構作法。

根據本架構，我們發現在停靠港 k_0 的排艙求解上，若要同時考量 k_0 及後續所有港口 ($k_0 + 1, k_0 + 2, \dots, p-1$) 的貨櫃需求，並在入港前的有限時間內求得最佳解，則難以直接引用以往的最佳化模式。例如若以 Avrial 和 Penn^[4] 的最佳化模式求解此系統排艙問題，則預期的規模將太大而無法求解，且其模式未考量船舶平衡限制式，亦難實用。另外，若應用 Kang 和 Kim^[11] 的模式求解時，則其第一階段模式雖有納入船舶平衡限制式，但僅針對一港口求解，欠缺考量後續港口 ($k_0 + 1, k_0 + 2, \dots, p-1$) 的貨櫃需求影響，因此不為

系統最佳解。另外，Kang 和 Kim^[11]之第二階段作法並無數學規劃模式，僅提出一啟發解，故亦不屬最佳解法。至於其他的文獻或不同於本研究問題，或雖類似本研究問題，但不考量船舶平衡限制式或不屬最佳解法，與本研究的最佳化排艙作法不符，因此無法直接引用於本研究。

本研究經文獻回顧後，發現難以一模式直接求解如此龐大的系統最佳化排艙問題，因此參考 Wilson 和 Roach^[7]與 Kang 和 Kim^[11]，發展一個二階段求解程序，第一階段為貨櫃組艙區指派，第二為各艙區內貨櫃指派。由於 Wilson 和 Roach^[7]的第一階段並無數學規劃模式，僅提出一啟發解，與本研究最佳化模式作法不同，故本研究參考 Kang 和 Kim^[11]的第一階段模式（其有含船舶平衡限制式，亦較實際），但修正此模式的目標函數，考量艙區間翻櫃次數（含一初估成本，詳如後述），並擴大一停靠港的排艙至所有港口的排艙。至於第二階段的作法上，則由於 Wilson 和 Roach^[7]及 Kang 和 Kim^[11]之第二階段均無數學規劃模式，僅各提出一啟發解，而我們發現 Avrial 和 Penn^[4]的模式雖然難以一次求解系統性排艙問題，然其模式假設貨櫃船的每個 bay 均為一個長方形的艙區，不考慮艙蓋的影響，亦未考量船舶平衡限制，雖不適用於整船的排艙求解，但經適當濃縮決策範圍至一艙區後，發現其模式頗適用於一般艙區內之貨櫃指派（由於本研究在第一階段已考量船舶平衡限制，因此第二階段模式在應用於艙區內之貨櫃指派上，恰可不需考量船舶平衡限制），因此本研究參考 Avrial 和 Penn^[4]的模式，從整船的排艙的決策範圍適當縮小至一艙區範圍，以構建第二階段艙區內貨櫃指派模式。

綜合上述分析，本研究基於貨櫃船的排艙營運特性，針對變動性出口貨櫃量，綜合 WS 及 RA 之處理變動需求作法，發展一系統最佳化貨櫃船排艙架構。此架構的核心為一個二階段的求解程序，含二個最佳化模式。本研究考量相關的營運限制，在參考及適當修正 Kang 和 Kim^[11]的第一階段模式及 Avrial 和 Penn^[4]的模式後，發展二個零壹整數規劃模式，以幫助海運業者有效進行排艙規劃。在第一階段本研究將貨櫃船的艙位分區，且將性質相近的貨櫃編為同組，以最小化翻櫃成本為目標，考量船舶平衡、壓櫃及其他相關營運的限制條件，構建一貨櫃組艙區指派模式。在第二階段本研究構建一艙位指派模式，依據第一階段的指派結果對每一艙區內的貨櫃進行指派。

3.2 第一階段模式構建

本研究的第一階段模式屬艙區指派問題，係將貨櫃進行分組，並將全船的艙位劃分為多個艙區，再構建包含船舶安全性考量之艙區指派模式，以求解貨櫃組與艙區的對應關係。

3.2.1 模式假設

為便於第一階段模式之構建並確立模式使用之限制，茲給定下列模式假設：

1. 假設貨櫃船的航線為一給定的單向非循環航線。值得一提的是，一般貨櫃船的航線可分為兩種：(1) 循環航線：貨櫃船在一給定的航線上，依序停靠航線上各港口重覆巡航運

送貨櫃，所運送貨櫃的目的地港口可為航線上的任一港口。(2)單向非循環航線：貨櫃船由起始港口出發，循序停靠各個未到達港口，最後停在終點港。貨櫃船在起始港無卸櫃作業；在終點港無裝櫃作業，亦即貨櫃船在終點港完成卸貨作業後，船上將不存在任何貨櫃。航線上所有的貨櫃的目的地港口為航線上尚未到達的港口。目前一般貨櫃船的航線以前者為主，通常為定期航線；至於後者則一般為單向非定期航線，目前實務上主要配合特殊任務而規劃並執行，此等任務例如船舶加入新航線、船舶撤出原航線、或需空載貨櫃至特別港口等任務。另外，若航商臨時遇有運送高價格貨物的需求時，則亦可考量執行此種航線，以期獲取利潤。

2. 欲進行排艙規劃之港口在結關時點後，其出口貨櫃數量及資料為已知，且在後續的航程中不會變動。本研究考慮各港口出口貨櫃數量變動的影響，亦假設貨櫃的目的地不會在航行過程中改變。
3. 各個港口的出口貨櫃數量不會超過船舶當時所能提供的艙位容量，亦即假設航線中船舶容量皆足夠運送貨物需求量。
4. 所有貨櫃（包括實櫃與空櫃）的外型、尺寸均相同，但重量可不同。
5. 所有貨櫃的裝卸成本皆相同，在本研究中以翻櫃次數做為翻櫃成本。翻櫃的定義為將貨櫃移至岸上再放回同一艙區中。實務上的翻櫃可分為將貨櫃移至岸上暫存再放回船艙，及直接將貨櫃放至船上的空艙位，此兩種翻櫃的成本不同，本研究中採取第一種翻櫃方式。
6. 貨櫃所在的艙區在運送過程中不會改變，亦即貨櫃在裝船後不論是否有翻櫃情形發生，貨櫃皆處於同一艙區。
7. 不考慮各個港口對貨櫃船貨櫃積載的相關限制，例如船舶吃水深度、貨櫃積載高度等。

3.2.2 模式相關事項

1. 每個港口求解一次

由於各個港口的出口貨櫃量為變動需求，需在出口貨櫃量確定後依照最新的貨櫃資料產生積載圖，以供在此港口裝櫃之用，因此本研究在每個港口船舶靠港前進行一次兩階段演算法。例如：今有一條由 10 個港口所組成之單向非循環航線，假設船隻在第 10 個港口將所有貨櫃卸下，則針對此航線求解排艙問題需進行 9 次的求解以產生 9 個積載圖。

為減少模式中描述決策變數之間相關性的限制式，本研究第一階段模式所採用的成本是依據在上個港口完成的船舶積載圖及貨櫃起迄點資料加以計算，對未指派的任一貨櫃組而言，隨著船舶停靠港口的不同，在第一階段模式中所給定的成本也將不同，利用更新後的成本進行指派以考慮貨櫃組之間的相互影響。此種做法的特色為：進行積載圖規劃時所面對的艙區可分為空艙區，以及已裝有未卸港貨櫃的半滿艙區。若將新貨櫃指派到半滿艙區必須考慮到艙區內原有貨櫃的迄點及其上方（或下方）艙區內的貨櫃迄點，以免新指派的貨櫃造成大量壓櫃的情形，使得翻櫃成本大量增加。

2. 以貨櫃組為單位指派進行指派

由文獻可知，過去的相關研究所發展之演算法，大都因模式過於龐大而導致求解時間過長。其原因之一是針對單一貨櫃進行指派，例如假設一單向航線係由 10 個港口所組成，每一起迄對的貨櫃量為 30 個，選定的貨櫃船有 40 個艙區，則對「單個貨櫃」進行指派的模式其決策變數的數量將達 54000 ($= (10 \times 9) / 2 \times 30 \times 40$) 個。請注意，由於此航線為單向航線，故此例共有 45 ($= 10 \times 9 / 2$) 個起迄對。然而，若是將每個起迄對的貨櫃分為 1 組 (含 30 個貨櫃)，設計成以「貨櫃組」為單位進行指派的模式，則決策變數的數量可大幅減少為 1800 ($= (10 \times 9) / 2 \times 40$) 個。值得注意的是，在設定分組時將「單一貨櫃」視為「一組」，則「貨櫃組」指派模式即等同於「單一貨櫃」的指派模式。雖然以單一貨櫃進行指派可得較精確的解，但是求解時間上卻較無效率，另一方面，以較大分組貨櫃進行指派，雖可節省運算時間，但可能會造成求解誤差大，致降低艙位的利用率。

本研究權衡求解精確度與運算效率，採取以適當分組的貨櫃指派方式。為得較佳之艙位利用率，本研究的分組方式係先列出當時貨櫃船上所有未裝滿艙區之剩餘容量，找出剩餘容量之最小值 H (簡稱最小貨櫃分組基準)，當任一分組貨櫃數量 N 大於 H ，則將此組貨櫃以 H 為單位進行分為 n 組，其中 $n-1$ 組數量為 H 的貨櫃組，剩餘的貨櫃分為另一組。經多次的測試及分析，本研究設 H 的最大值為空艙區容量的一半，以避免當同時存在於船上的貨櫃起迄對種類數目超過艙區數時，發生無可行解的現象。此 H 值的給定會影響求解時間，為加快求解速度，所有起點為初始港口的貨櫃，均以空艙區容量為分組基準進行分組。

3. 考慮所有起迄對的貨櫃量

在每個港口產生的第一階段模式均包含航線上所有起迄對的貨櫃量，對於將到達港口的出口貨櫃量係為已知值，至於後續未到達港口的出口貨櫃量則採用預估值。考慮航線上所有起迄對的貨櫃量的原因是貨櫃總重量與貨櫃的起迄港口有關，為避免當某些起迄對的貨櫃重量較大時，因無法滿足船舶平衡限制式而發生模式無解的情況。另外，納入預估起迄貨櫃量之預行指派，可保留未來貨櫃的指派空間，使最後的指派結果較佳。

3.2.3 初估成本

在第一階段艙區指派模式中，由於各個決策變數所對應的指派成本難以事先計算，因此本研究以一「初估成本」代替真正的指派成本。初估成本 a_{kmij} 表示若屬於起迄對 k 到 m 的貨櫃組 i 被指派到艙區 j ，所造成之初步估計額外成本。對已載有貨櫃的船舶而言，將貨櫃組指派到任一艙區中均有可能造成壓櫃，壓櫃情形可分為艙區間及艙區內兩種。初估成本即考量艙區內及艙區間壓櫃情形所造成的總翻櫃成本，本研究令 $a_{kmij} =$ 艙區間的概估翻櫃成本 $+ f \times$ 艙區內的概估翻櫃成本，其中 f 為一折減係數，其預設值為 1，此初估成本的求解結果可視為「指派結果可能造成的翻櫃成本最大值」。

值得一提的是，此初估成本中 f 值係依二階段模式架構而設計，若依航商實際營運後

之資料估計，則因實務營運的指派係以經驗為之，並非系統最佳化，以此所估計之 f 值，在理論上難以確保能將模式目標引導至真正最少翻櫃數。另外，由於最佳 f 值之估計與問題特性與模式參數（如最小貨櫃分組基準）等相關，在本研究模式為 NP-hard 問題下，甚難以事前分析得知，故本研究將在後文中特別針對此值進行參數分析。在實際應用上，業者亦可及時測試不同 f 值以得較佳值。

本研究初估成本的計算方式可依即將求解的港口是否為出發港口而分成兩種如下：

1. 非出發港口

在計算時先令貨櫃組 kmi 指派到艙區 j 造成的 a_{kmij} 初始值為 0，再依序考量艙區內的壓櫃及艙區間壓櫃情形所造成的概估翻櫃成本。其計算方式如下：

(1) 艙區內的概估翻櫃成本

將貨櫃組 kmi 指派到某一甲板上（或下）艙區 j ，如圖 2 中的艙區被甲板（粗黑線）分成上下兩層，將起迄對 2-5 的貨櫃組指派到已裝有起迄對 1-4 的貨櫃組的甲板上艙區，將增加了 2 單位的初估成本。

由於此階段之模式係以貨櫃組集體指派至一艙區，故可能在估算艙區內的翻櫃成本時會發生高估的現象。例如在圖 3 中，調離貨櫃 1-4（需移動其上面之貨櫃 2-5）的實際翻櫃次數為 1，然若依照上述計算方法時，則初估成本可能的增加量為 3。故在計算初估成本時，可令 f 值小於 1，以減少對求解結果的影響。此 f 值在實際求解時可經測試以決定較佳值。

2-5	2-5
1-4	1-4

圖 2 艙區內概估翻櫃成本說明

2-5	2-5
2-5	1-4

圖 3 艙區內概估翻櫃成本之高估示意圖

(2) 艙區間的概估翻櫃成本

- a. 甲板上艙區：將貨櫃組 kmi 指派到某一甲板上艙區 j 時，如圖 4（左圖），起迄對 2-5 的貨櫃組指派後的結果增加了 2 單位的初估成本，其值為放置於下艙區之貨櫃數量。
- b. 甲板下艙區：將一貨櫃組指派到某一甲板下艙區時，若該艙區上方艙區內原有的貨櫃需先行翻櫃，其總初估成本的加總，又可分為兩種情形。如圖 4（中圖），當上方

艙區為起迄對 1-4 的貨櫃時，起迄對 2-5 的貨櫃組指派後的結果產生了 2 單位的初估成本，即貨櫃組 kmi 指派到某一甲板下艙區 j 時，增加的初估成本為放置於艙區 j' (j 的上層艙區) 的貨櫃數量。而在圖 4 (右圖)，當上方艙區為起迄對 1-7 的貨櫃時，起迄對 2-5 的貨櫃組指派後的結果產生了 4 單位的初估成本，其值為放置於艙區 j' 之貨櫃數量的兩倍。

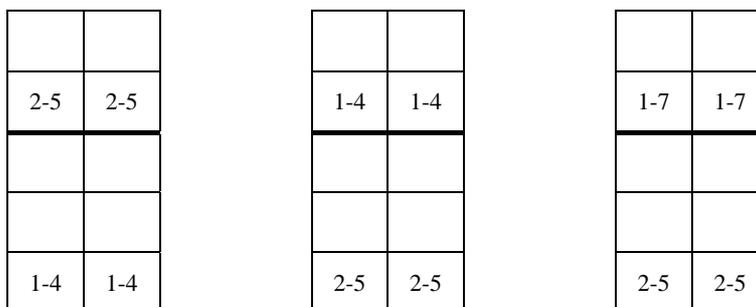


圖 4 艙區間概估成本說明

2. 出發港口

由於船隻在出發前船上並無貨櫃存在，無法以上述原則設定初估成本，因此對出發港口的各起迄貨櫃組，本研究經多次測試後，發現各起迄貨櫃組若被指派至上層艙區時，則其隨後所產生的翻櫃數甚少，然而若被指派至下層艙區時，則該起迄貨櫃組隨後產生的翻櫃數，大致上與其包含的貨櫃數量成正相關，而與該起迄間停泊的港口數成負相關，因此對於出發港口各起迄貨櫃組的初估成本，本研究改以另一種方式設定，如表 1 所示：

表 1 初始解的初估成本給定值

放置的艙區位置	初估成本 a_{kmij}
甲板上	0
甲板下	$n_{kmi}/(m-k)$

其中， k 及 m 分別為起迄港口編號， n_{kmi} 為起點港口 k 迄點港口 m 的貨櫃組 i 所包含的貨櫃數量。若貨櫃組指派於甲板上的艙區，則其初估成本設為 0，若貨櫃組指派於甲板下的艙區，則其初估成本設為 $n_{kmi}/(m-k)$ ，且其值可為非整數。值得注意的是，由上表所求出的初估成本不等於翻櫃成本，僅用於在求解出發港口之積載圖時，產生較好的解，以利於後續求解。

3.2.4 數學式

本研究以總翻櫃成本最小化為目標，然而第一階段模式係以整組貨櫃為單位進行指派，難以事前得知真實翻櫃成本，因此本研究以前述之初估成本構建模式，待第二階段演算法完成後再計算真實的翻櫃成本。至於限制式則包括容量限制、指派限制及船舶安全性限制，如重心限制式、側傾限制式及俯仰差限制式等。另外，對即將進行貨櫃裝載之港口 k_0 ，假設已知其貨櫃起迄資料，故針對起點為 k_0 的貨櫃組本研究亦加入壓櫃限制式。本研究第一階段模式的設計，係參考並適當修正 Kang 和 Kim^[11] 的第一階段模式的目標式及限制式，並新增數個特有的限制式。在構建數學式後，我們再綜合比較此二模式間的差異。本研究第一階段模式的數學式如下所示：

$$\text{Min} \quad \sum_{k \in K} \sum_{m \in M} \sum_{i=1}^{I_{km}} \sum_{j \in J} a_{kmij} X_{kmij} \quad (1)$$

$$\sum_{k \leq k' < m > k'} \sum_{i=1}^{I_{km}} n_{kmi} X_{kmij} \leq c_j, \quad \forall k_0 \leq k' < p, \forall j \in J \quad (2)$$

$$\sum_{j \in J} X_{kmij} = 1, \quad \forall i \leq I_{km}, \forall k \in K, \forall m \in M \quad (3)$$

$$X_{k_0 m i j} + X_{k_0 m' i' j'} \leq 1, \quad \forall i \leq I_{k_0 m}, \forall m < m' \leq p, \forall j \in J, j' \in J_l \quad (4)$$

$$\sum_{k \leq k' < m > k'} \sum_{i=1}^{I_{km}} \sum_{j \in J} w_{kmi} e_j X_{kmij} \leq g, \quad \forall k_0 \leq k' < p \quad (5)$$

$$-u \leq \sum_{k \leq k' < m > k'} \sum_{i=1}^{I_{km}} \sum_{j \in J} w_{kmi} t_j X_{kmij} \leq u, \quad \forall k_0 \leq k' < p \quad (6)$$

$$v_a \leq \sum_{k \leq k' < m > k'} \sum_{i=1}^{I_{km}} \sum_{j \in J} w_{kmi} l_j X_{kmij} \leq v_f, \quad \forall k_0 \leq k' < p \quad (7)$$

$$X_{kmij} = 1, \quad \forall kmij \in FS \quad (8)$$

$$X_{kmij} \in \{0,1\}, \quad \forall k \in K, \forall m \in M, \forall i \in I, \forall j \in J \quad (9)$$

其中，各參數的定義如下：

p ：船舶停靠的所有港口數；

k, K ： k 為所有貨櫃起點港口編號 $k = 1, 2, 3, \dots, p-1$ ， K 為貨櫃起點港口之集合；

k', k_0 ： k' 為尚未進行貨櫃裝卸的起點港口編號， k_0 為即將進行裝卸的港口， $\forall k_0 \leq k' < p$ ；

m, m', M ： m, m' 為所有貨櫃迄點港口編號 $2, 3, 4, \dots, p$ ， M 為貨櫃迄點港口之集合。由於本研究航線為單向非循環航線，故對任一貨櫃而言， $k < m$ ；

i ：貨櫃組編號；

I_{km} ：起點 k 迄點 m 的貨櫃組數目，在進行模式構建前先將同一起迄對 km 的貨櫃分成 I_{km} 組；

j, j' ： j 為分割後的艙區編號，若艙區 j 位於甲板下，則 j' 為位於艙區 j 正上方之艙區編號；

J, J_l ： J 為所有艙區的集合， J_l 為所有位於甲板下艙區的集合；

FS ：不需求解的決策變數之 $kmij$ 的集合。由於在每個港口本模式均需求解一次，每次求解均需考慮到之前的求解結果，故將不需在此模式中再次求解的決策變數編號記錄在 FS 。因此當 $k_0 = 1$ ，則 $FS = \emptyset$ 。在全部求解完畢後， FS 即是不為 0 的決策變數之 $kmij$ 之集合；

c_j ：船舶艙區 j 的貨櫃容量；

e_j ：艙區 j 的垂直面座標；

t_j ：艙區 j 的橫剖面座標；

l_j ：艙區 j 的縱剖面座標；

g ：船舶重心變化量容許值；

u ：船舶側傾量容許值；

va, vf ：船舶俯仰差容許值；

w_{kmi} ：起點港口為 k ，迄點港口為 m 的貨櫃組 i 的重量；

n_{kmi} ：起點港口為 k ，迄點港口為 m 的貨櫃組 i 所包含的貨櫃數量；

a_{kmij} ：起迄對 km 的貨櫃組 i 被指派到艙區 j 所造成之初估成本。

而決策變數的定義如下：

X_{kmij} ： $X_{kmij} = 1$ 代表起點為 k 迄點為 m 的第 i 組貨櫃被分配到艙區 j ；否則， $X_{kmij} = 0$ 。

目標式 (1) 為總翻櫃成本最小化。(2) 式為容量限制式，代表在所有貨櫃起點港口 (即 $\forall k_0 \leq k' < p$)，存放於艙區 j 的貨櫃總數量不超過船舶的艙位容量。注意，此限制式數目為艙區總數的 $(p - k_0)$ 倍。(3) 式限制所有起迄港口 (即 $\forall k \in K, \forall m \in M$) 的貨櫃組均需被指派。(4) 式為壓櫃限制式，限制起點為港口 k_0 的貨櫃在指派時不可有壓櫃的情形，如圖 5 中，若將貨櫃 2-5 放在貨櫃 2-4 之上，則造成一壓櫃情形。(5)、(6)、(7) 式分別為貨櫃裝載後船舶重心、側傾及俯仰差之船平衡限制式。注意，此等限制係針對所有後續到達的貨櫃起點港口 (即 $\forall k_0 \leq k' < p$) 設計，每一種限制式均有 $p - k_0$ 條。(8) 式為固定部分已經求解的變數值之額外限制式。由於在先前港口已指派裝載的貨櫃組 (即 $\forall kmij \in FS$)，在後續航程中所在的艙區不會改變，因此需固定其之前已被指派之艙位。(9) 式限制決策變數為 0 或 1。

在上述各式中，除限制式 (4) 僅針對即將進行貨櫃裝載的港口 (k_0) 而設外，其餘限制式均包含航線中後續所有的港口，代表在模式中針對航線上所有起迄對的貨櫃進行指派，即包括已指派 ($k < k_0$)、即將指派 ($k = k_0$) 和未來 ($k > k_0$) 的貨櫃。此考慮未來的貨

櫃指派之原因，主要係透過預留艙區給未來貨櫃的方式，以避免因未來的貨櫃重量不平衡而導致無可行解。另外，由於已預先考量整體最佳化之指派，因此應能得到較佳的指派結果。值得注意的是，若未加上限制式 (4)，則雖然對後續港口的預估貨櫃可能產生潛在的壓櫃情形，但此情形可透過到達該港口前的重新求解，至少可以調整上下艙方式，避開真正的壓櫃情形。如此，本研究不再針對其他後續港口加上限制式 (4)，以避免大幅增加模式的限制式數及問題的複雜度。

2-5	2-5
2-4	2-4

圖 5 壓櫃限制式說明

值得一提的是，不同於 Kang 和 Kim^[11] 之第一階段模式僅針對一港口求解，本研究第一階段模式係配合所提出的排艙架構，針對所有港口求解，因此本研究第一階段模式雖參考 Kang 和 Kim^[11] 之第一階段模式構建，但數學式需做適當修正，其差異如下所述：本研究的決策目標為總翻櫃次數最小化，而 Kang 和 Kim^[11] 為總裝卸成本最小化，其裝卸成本除包含總額外翻櫃次數，亦包括起重機在不同 bay 間之移動成本，因此本研究決策變數項較少（僅有一項 X_{kmij} ），而 Kang 和 Kim^[11] 之第一階段模式則含三項決策變數。然而比較於 Kang 和 Kim^[11] 之第一階段模式，本研究之第一階段模式考量了所有港口的起迄貨櫃，因此決策變數的下標需增加起迄港口的標記。另外，配合本研究之二階段求解程序，本研究在第一階段係設計一初估成本值以估算艙區內或艙區間的翻櫃次數，而此設計不同於 Kang 和 Kim^[11] 的作法。

至於限制式方面，本研究的容量限制式 (2) 及船舶平衡限制式 (5)、(6)、(7) 雖與 Kang 和 Kim^[11] 的容量限制式與及船平衡限制式類似，但因本研究在一停靠港 k_0 的求解中，需同時考量 k_0 及其後續各港口（即 $\forall k_0 \leq k' < p$ ）的容量限制及船舶平衡限制，因此此等限制式均需對 k_0 及其後續各港口（即 $\forall k_0 \leq k' < p$ ）而構建。另外，針對所有的貨櫃組均需被指派之限制上，雖然本模式中式 (3) 與 Kang 和 Kim^[11] 的限制類似，但本模式在各港口均需滿足所有起迄港口貨櫃的限制，因此對所有起迄港口（即 $\forall k \in K, \forall m \in M$ ）及各起迄對 (k, m) 的所有貨櫃組（即 $\forall i \leq I_{km}$ ）而言，均需滿足此限制式。值得注意的是，壓櫃限制式 (4) 及固定部分已經求解的變數值之額外限制式 (8) 係根據實務作業及本研究提出的排艙架構而設計，此等限制未見於 Kang 和 Kim^[11] 的模式中。至於 Kang 和 Kim^[11] 的模

式中所定義的三項決策變數間的相關性限制，由於與本研究採一項決策變數之定義方式不同，故本研究第一階段模式沒有此等限制式。最後，本研究第一階段模式與 Kang 和 Kim^[11] 之第一階段模式之差異，摘要如表 2 所示。

表 2 本研究第一階段模式與 Kang 和 Kim^[11] 之第一階段模式之差異摘要

比較事項	本研究第一階段模式	Kang 和 Kim ^[11] 之第一階段模式
考量港口	航線上所有港口	裝卸之港口
指派之貨櫃	航線上所有起迄貨櫃組	裝卸港口之起迄貨櫃
艙區內或之間的翻櫃成本估算	初估成本 (含出發港口及非出發港口之初估)	按各貨櫃擺放位置直接估算成本
決策變數項	一項 (航線上所有起迄貨櫃組之艙區指派)	三項 (裝卸港口的起迄貨櫃之艙區指派、各艙區是否被指派、各 bay 是否被指派)
決策變數範圍	航線上所有起迄貨櫃組	以裝卸港口為起點之貨櫃
目標函數	總翻櫃次數最小化	總裝卸成本最小化 (含翻櫃成本及起重機移動成本)
容量限制式	有 (航線上所有港口)	有 (裝卸之港口)
貨櫃均需被指派限制式	有 (航線上所有起迄貨櫃組)	有 (裝卸港口之起迄貨櫃)
船舶平衡限制式	有 (航線上所有港口)	有 (裝卸之港口)
壓櫃限制式	有 (裝卸之港口)	無
固定部分已經求解的變數值之額外限制式	有	無
不同項決策變數間的相關性限制	無 (僅一項變數)	有

3.2.5 模式求解

本研究利用數學規劃軟體 CPLEX^[27] 進行求解。由於本研究的兩階段模式在每個進行裝櫃的港口均需求解一次，故第一階段模式參數值、變數數量、問題規模隨著船隻所在港口的不同而不同，本研究經多次測試採最適合的參數求解。

3.3 第二階段模式構建

3.3.1 問題描述

第二階段模式屬艙位指派問題：依照第一階段艙區指派問題的求解結果，將指派於各個艙區中的貨櫃組打散為單一貨櫃，並求解各個貨櫃在已指派艙區中的擺放位置。此模式的求解目標係針對各艙區求取在整個船舶的航行過程中裝卸總成本最小的艙位配置方式。由於在第一階段的模式中已考慮到貨櫃重量對船舶安全性的影響，因此本模式中不再考慮相關貨櫃重量的限制。另外，雖然第一階段的初估成本計算有考慮到艙區內的翻櫃成本，但由於採取較為高估的成本方式計算，因此可經由第二階段的求解加以改善。本研究參考 Avrial 和 Penn^[4] 建立第二階段的模式，細節說明如下。

3.3.2 模式假設

第二階段模式的假設與第一階段模式的假設大致相同，僅有以下二不同處：

1. 若貨櫃在港口 k 中發生翻櫃的情形，則在求解時將此貨櫃視為起點為 k 的貨櫃。
2. 所有起迄對的貨櫃數量為已知。此假設與第一階段求解結果可分為以下兩種關係：(a) 當貨櫃船位於港口 k 時，若艙區 j 的第一階段求解結果與在港口 $k-1$ (即前一港口) 所求得相同，則無需針對艙區 j 進行第二階段求解。(b) 若艙區 j 在港口 k 的求解結果與港口 $k-1$ 不同，則對艙區 j 進行第二階段求解，並依照在港口 $k-1$ 所得到的第二階段求解結果，以增加類似限制式 (8) 的額外限制方式固定部分變數解。

3.3.3 數學式

第二階段模式係針對一艙區進行貨櫃之指派，每一艙區的指派類似。由於 Kang 和 Kim^[11] 之第二階段並無構建數學規劃式，僅直接設計一啟發解法求解，且本研究係參考 Avrial 和 Penn^[4] 的作法，以縮小其指派範圍的方式，類似的構建第二階段艙區內指派模式，因此本研究參考並適當修正 Avrial 和 Penn^[4] 模式的目標式及限制式，以設計第二階段數學規劃式，並在構建數學式後，再綜合比較此二模式間的差異。給定一艙區，本研究第二階段模式之數學式如下所示：

$$\text{Min} \quad \sum_{k \in K} \sum_{m \in M} \sum_{v=k+1}^{m-1} \sum_r^R \sum_c^C S_{kmvrc} \quad (10)$$

$$\sum_{v=k+1}^m \sum_{r=1}^R \sum_{c=1}^C S_{kmvrc} - \sum_{l=1}^{k-1} \sum_{r=1}^R \sum_{c=1}^C S_{lmkrc} = T_{km}, \quad \forall k \in K, \forall m \in M \quad (11)$$

$$\sum_{l=1}^k \sum_{m=k+1}^p \sum_{v=k+1}^m S_{lmvrc} = Y_{krc} \quad \forall k \in K, \quad \begin{matrix} r = 1, \dots, R \\ c = 1, \dots, C \end{matrix} \quad (12)$$

$$Y_{krc} - Y_{k(r+1)c} \geq 0 \quad \forall k \in K, \quad r = 1, \dots, R-1 \quad (13)$$

$$c = 1, \dots, C$$

$$\sum_{k=1}^{m-1} \sum_{q=m}^p S_{kqmr} + \sum_{k=1}^{m-1} \sum_{q=m+1}^p \sum_{v=m+1}^q S_{kqv(r+1)c} \leq 1, \quad \forall m \in M, \quad r = 1, \dots, R-1 \quad (14)$$

$$c = 1, \dots, C$$

$$S_{kmvrc} = 1, \quad \forall m \leq k_0, \quad \forall kvrc \in SS \quad (15)$$

$$\sum_{v=k_0}^m S_{kmvrc} = 1, \quad \forall m > k_0, \quad \forall kvrc \in SS \quad (16)$$

$$S_{kmvrc} \in \{0,1\}, \quad \forall k \in K, \quad m \in M, \quad v = k+1, \dots, m \quad (17)$$

$$r = 1, \dots, R \quad c = 1, \dots, C$$

$$Y_{krc} \in \{0,1\}, \quad \forall k \in K, \quad r = 1, \dots, R \quad (18)$$

$$c = 1, \dots, C$$

其中，部分參數已於第一階段模式中定義，其餘的參數定義如下：

l ：為貨櫃起點港口編號， $l = 1, 2, 3, \dots, p-1$ ；

v ：當貨櫃發生翻櫃時的暫存港口編號，對任一貨櫃而言， $k+1 < v \leq m$ ；

R ：艙區的總列數；

C ：艙區的總行數；

r ：艙區的列編號， $r = 1, 2, \dots, R$ ；

c ：艙區的行編號， $c = 1, 2, \dots, C$ 。注意，由於此模式適用於長方形的艙區，故艙區中每一個艙位都以二維座標 (r, c) 表示；

T_{km} ：起點為 k 迄點為 m 的貨櫃總數。由第一階段的求解結果可知有哪些貨櫃組被指派到哪些艙區中，將一艙區中的各貨櫃組相同起迄港口之數量加以統計即可得 T_{km} 值。非零的 T_{km} 越多，代表艙區中的貨櫃起迄組合越複雜，因此第一階段的求解結果將影響第二階段的求解難度；

SS ：已知決策值之決策變數的 $kvrc$ 之集合。由於本模式在每個港口均求解一次，每次求解均需考慮到之前的求解結果，故將不需在此模式中再次求解的決策變數之 $kvrc$ 編號記錄於 SS 。因此在出發港口進行求解時， $SS = \emptyset$ 。在全部求解完畢後， SS 即是不為 0 的決策變數之 $kvrc$ 之集合；

至於決策變數的定義如下：

S_{kmvrc} ： $S_{kmvrc} = 1$ 代表起點 k 迄點 m 的貨櫃且在港口 v 卸載的貨櫃被分配到艙區內第 r 列第 c 行的位置；否則， $S_{kmvrc} = 0$ 。若 $v = m$ ，代表無翻櫃發生。若 $v = m-1$ ，則代表起點 k 迄點 m 且位在第 r 列第 c 行的貨櫃在港口 $m-1$ 發生翻櫃。翻櫃動作完成後，則將此貨櫃的起點視為 $m-1$ ；

Y_{krc} : $Y_{krc} = 1$ 代表當船舶於港口 k 完成卸載時, 有貨櫃存在於艙區內第 r 列第 c 行的位置; 否則 $Y_{krc} = 0$ 。

目標式 (10) 為此艙區內總翻櫃成本最小化。(11) 式為貨櫃數量限制式, 表示所有貨櫃皆被指派。(12) 式描述決策變數 S 與 Y 的關聯。(13) 式限制所有的貨櫃皆不可懸空堆放。(14) 式限制在同一行中不可發生壓櫃情形, 如圖 6 所示。(15) 式及 (16) 式類似 (8) 式, 為固定部分已經求解的變數值之限制式。其中限制式 (15) 用於固定已進行卸櫃的貨櫃, 保存之前港口 (即 $\forall m \leq k_0$) 的求解結果 (不影響目前港口之貨櫃指派), 例如在港口 5 進行求解時, 代表之前港口如起點 1 至迄點 4 的貨櫃已經卸下, 故加入限制式: $S_{14411} = 1$ 。至於限制式 (16) 則用於未進行卸櫃的港口 (即 $\forall m > k_0$) 貨櫃, 例如在港口 2 求解時加入限制式: $S_{14211} + S_{14311} + S_{14411} = 1$, 代表有一個起點為 1 迄點為 4 的貨櫃在港口 1 被裝載到第 1 行第 1 列的位置。(17) 式及 (18) 式限制決策變數為 0 或 1。

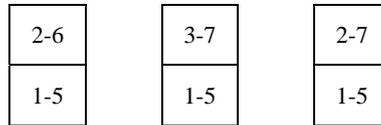


圖 6 壓櫃示意圖

值得一提的是, 本研究第二階段模式雖參考 Avrial 和 Penn^[4] 的模式而設計, 然 Avrial 和 Penn^[4] 的模式係針對所有港口一次求解, 不同於本研究的排艙架構中, 需動態的靠港並針對該港及後續港口求解各港口的排艙作法。另外本研究第二階段模式係針對一艙區內的貨櫃指派, 以縮小決策範圍, 因此第二階段模式的數學式與 Avrial 和 Penn^[4] 的模式略有不同。其中式 (10)、(11)、(12)、(13)、(14)、(17) 及 (18) 雖與 Avrial 和 Penn^[4] 的模式表示相同, 但應用於一艙區內之貨櫃指派, 而式 (15) 及 (16) 則配合本研究的排艙架構而增設, 不含於 Avrial 和 Penn^[4] 的模式中。

3.3.4 模式求解

在以往文獻中, 為縮短求解時間, 此階段模式的求解多採用啟發解法, 本研究則以數學規劃軟體 CPLEX 進行求解。採用與過去研究作法不同, 主要有兩個原因:

1. 問題的規模較小。本研究有效的切割問題成為二階段問題, 在第二階段中所面對的是一艙區的艙位指派問題, 其問題的規模可大幅縮小。另外, 由於本研究第一階段是採用分組指派的模式, 因此同一起迄對的貨櫃較易被分在同一艙區, 亦即限制式 (10) 中的 $T_{km} = 0$ 的情形較常出現, 使得實際有效的限制式大為減少。例如, 假設每一艙區為 5 行 5 列之正方形, 總容量為 25 個貨櫃, 共有 10 個港口, 則在港口 1 的決策變數數量為 4350, 限制式依模式初估可有 630 條, 但實際有效的限制式通常遠少於此量。
2. 求解較為便捷。本研究每進行一次第一階段模式求解後, 必須進行多次的艙位指派問題

(第二階段中一艙區求解一次)。為有效求解整個問題，本研究利用 C 程式語言及 CPLEX 將兩階段模式的求解整合成一個程式。注意，本研究在利用 CPLEX 求解時不必大幅度修改產生輸入檔的程式，可充分利用在第一個港口所產生的 CPLEX 輸入檔，在每次求解時加入所需要的限制式即可，在程式的設計上較為簡便且節省求解時間。

3.4 整合演算法

3.4.1 兩階段演算法整合

綜上所述，本研究在排艙架構運用上，首先在航線初始港口上，利用所有起迄港的預測貨櫃需求量（含初始港口的已知貨櫃需求量）及本研究建立之最佳化排艙規劃模式，以求解初始港的積載圖，並依此積載圖裝上初始港的貨櫃需求量。之後啟航至下一港口前，依其餘起迄港的最近預測的貨櫃需求量（含下一港口的已確定貨櫃需求量）及已知下一港口的卸下貨櫃量，利用上述之最佳化排艙規劃模式求解並更新下一港口的積載圖，依此積載圖裝卸該港的貨櫃需求量。接著，重複此步驟，直到倒數第二港口完成求解其積載圖，並依此積載圖裝卸該港的貨櫃需求量為止（最後的港口僅卸下所有貨櫃量，不求解積載圖）。

至於各港口的排艙求解上，本研究係將排艙問題分成兩個模式分別求解，先求解第一階段模式，再依照各個艙區的求解結果分別產生各艙區的第二階段模式，求解各艙區的艙位指派問題後，即可得到積載圖。圖 7 說明如何連結兩階段模式以產生用於某一港口的積載圖。在完成此港口求解後，即依照產生之積載圖進行貨櫃裝載，接著進行下一個港口的卸載，然後再重覆圖 7 的流程。整個航線的求解步驟如下：

- Step 0. 進行排艙規劃的港口編號 $k_0 = 1$ ；
- Step 1. 產生港口 k_0 的第一階段的模式，以 CPLEX 進行求解；
- Step 2. 分別產生各個艙區的第二階段的模式，以 CPLEX 進行求解；
- Step 3. 產生港口 k_0 的積載圖，進行貨櫃裝卸；
- Step 4. 若港口 $k_0 < p - 1$ ，令 $k_0 = k_0 + 1$ ，回到 Step 1；若 $k_0 = p - 1$ ，則結束求解。

3.4.2 計算總翻櫃成本

總翻櫃成本為所有艙區間的翻櫃成本與所有艙區內的翻櫃成本加總，其計算需在完成二階段的求解後進行。由於第一階段所用的初估成本係針對當時船上已存在的貨櫃指派情形設計，所考慮的成本包含艙區間的翻櫃成本及一高估的艙區內翻櫃成本，因此其目標式無法完全代表實際裝載後的成本。至於第二階段模式的目標值為一艙區內的實際翻櫃成本，因此本研究設計一程式在完成二階段演算法後，先計算艙區間的真正的翻櫃成本，再與各艙區的第二階段目標值相加總，以得到總翻櫃成本。

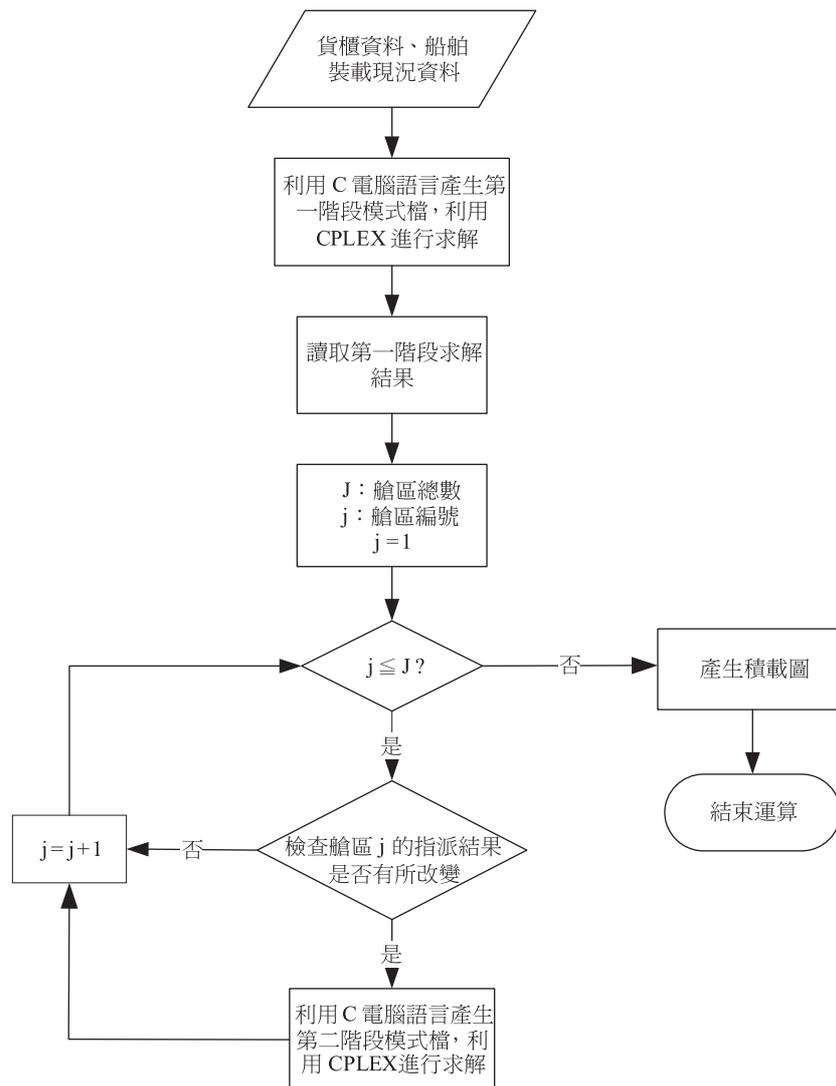


圖 7 針對某一港口進行求解的流程圖

四、範例測試

本研究參考國內一海運業者的營運進行範例測試。本研究利用 Microsoft Visual C++ 6.0 配合 CPLEX 7.1 的 Callable library 設計電腦演算法，並在 CPU 為 Intel P4-1.8G 及 1024Mb 記憶體的个人電腦上執行運算及分析結果。

4.1 測試資料設定

由於實際的船舶資料不易取得，且目前營運中貨櫃船的艙區形狀均不相同，船舶安全性限制亦不相同，為方便測試，故本研究參考國內一海運公司的亞洲航線營運資料並加上適當的假設，以電腦程式隨機產生類似實際營運的測試資料。此海運公司用於亞洲航線營運的船舶容量多介於 1000TEU 至 2000TEU 之間，航線上的港口數約為 9 到 13 個，本研究假設測試的航線係由 10 個港口所組成之單向非循環航線，港口編號依序為 1, 2, ..., 10，共有 45 個起迄對，每個起迄對均有貨櫃需求量，並以電腦程式產生測試資料。以下介紹測試資料之設定。

4.1.1 船舶資料設定

1. 船舶共有 10 個形狀相同的 bay，每個 bay 由四個大小相同之艙區組成，此四個艙區由艙蓋分為上下兩層，每一層由中心線水平分為對稱的兩艙區，每個 bay 的兩個艙蓋均可獨自開啟。
2. 每個艙區皆為立方體，所能存放的貨櫃數量 (即艙區容量) 皆為 25 個貨櫃，故每個 bay 可存 100 個貨櫃，而船舶容量則為 1000 個貨櫃。
3. 假設船體本身的重量分佈不影響船舶平衡的計算。
4. 船舶重心限制式的相關參數設計如下：由於位於船舶甲板上下方的艙區大小及數目相同，因此重心的限制可視為：甲板上下方貨櫃總重量的差值需小於或等於某一容許值。由力學原理可知下方貨櫃重量越大，則船舶穩定性越佳，故假設其容許的條件為：甲板上貨櫃總重量小於或等於甲板下貨櫃總重量。
5. 船舶側傾限制式的相關參數設計如下：類似上述第 4 點，由於艙區大小及數目相同，因此本研究以中心線兩邊的貨櫃總重量的差值做為限制條件，其容許條件假定為：中心線兩邊的貨櫃總重量較大者需小於或等於較小者的 1.3 倍。
6. 船舶俯仰差限制式的相關參數設計如下：由於本研究假設船舶為一長方體，因此俯仰差的限制可視為船舶中心線前後方的貨櫃所造成的順時針與逆時針力距 (moment) 差值限制。力距的計算方式為艙區所裝載的貨櫃重量乘上該艙區距離船舶中心的長度，如圖 8 所示。圖 8 為船舶之側視示意圖，其中 L 為一艙區距離船舶中心的長度。至於力距的限制假定為：兩方向力距的較大者其值小於或等於較小者的 1.3 倍。

值得一提的是，上述第 4、5、6 項有關船舶平衡條件之設定，本研究係參考 Kang 和 Kim^[11] 並根據本測試範例的假設船艙型態，再諮詢國內一海運業者的實務意見後，做適當簡化的假設。業者若在未來使用本研究模式時，仍應依第 3.2 節中模式構建的說明，依其實際的船艙型態設計此等限制條件。

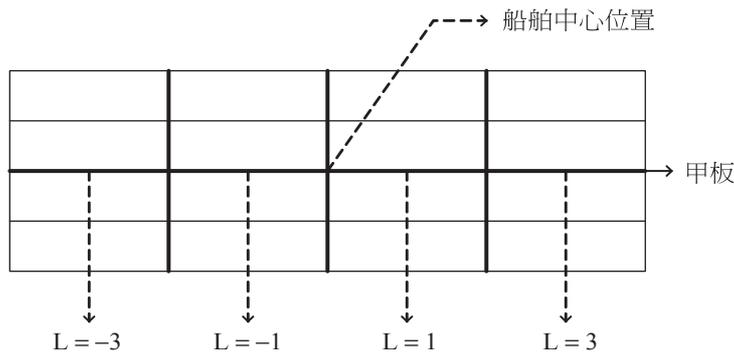


圖 8 船舶俯仰差限制式計算示意圖

4.1.2 貨櫃資料設定

本研究假設航線上所有的起迄對皆有貨櫃需求量，為簡化計算，本研究在進行第一次求解時產生所有起迄對的貨櫃量，之後每一次求解前均變動並更新一個港口的貨櫃數量。亦即在完成第 k 個港口計算時，改變並更新起點為 $k + 1$ 個港口的貨櫃數量。在貨櫃數量的變動計算上，本研究是先設定一變動比率的範圍，再配合 C 電腦語言中的亂數功能求出實際貨櫃數量。例如：假設貨櫃變動率為 10%，當求解船舶在港口 2 之積載圖時，假設我們預測起點港口 3 至迄點港口 5 的貨櫃量為 100，因此在離開港口 2 後抵達港口 3 前（亦即求解船舶在港口 3 的積載圖之前），我們先產生一介於 -0.1 至 0.1 之間的亂數值 μ ，再變動起點港口 3 至迄點港口 5 的貨櫃量為 $100 \times (1 + \mu)$ ，如此產生起點港口 3 至迄點港口 5 的實際起迄貨櫃量。注意，由於此變動中多櫃與缺櫃的機率相等，因此總貨櫃數量的變動不大。

貨櫃資料中的裝載率，代表船舶於各個港口完成裝櫃後，船上裝載的貨櫃總數與船舶的總容量的比值，亦稱為艙位利用率。由於本研究模式係假設任一港口的出口貨櫃量不會超過船舶當時所能提供的空艙位，即貨櫃船可運送航線上所有的貨櫃，因此各港口的裝載率皆小於或等於 1。本研究依上述產生測試的貨櫃資料，如表 3 所示。其中各起迄對之貨櫃量最大變動比率為 20%，缺櫃與多櫃的機率相同，貨櫃重量皆相同，總貨櫃數為 1780。

4.1.3 CPLEX 參數設定

由於此測試問題的規模頗大，因此為節省求解時間，本研究經多次測試，先設定 CPLEX 的三個收斂參數。在未來實際使用本研究模式時，使用者可進一步測試並設定此等參數。

- 1 ABSMIPGAP：為整數最佳解與線性最佳解的差值之絕對值，並以此做為收斂標準。第一階段的非初始港口設定為：該港口出口貨櫃總量的 5%，第二階段設定為艙區容量的 10%。例如：港口 3 的出口貨櫃總量為 100，則第一階段的 ABSMIPGAP = 5，若艙區容量為 25，則第二階段的 ABSMIPGAP = 2.5。

表 3 範例之起迄港口貨櫃需求量及船舶裝載率

起點港口編號	迄點港口編號									裝載率
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	120	120	30	31	30	32	32	32	30	0.46
2	-	97	34	26	34	35	30	27	27	0.65
3	-	-	28	33	29	29	24	31	36	0.64
4	-	-	-	24	36	28	25	27	34	0.72
5	-	-	-	-	24	27	24	35	31	0.75
6	-	-	-	-	-	24	32	36	24	0.71
7	-	-	-	-	-	-	31	29	37	0.63
8	-	-	-	-	-	-	-	72	81	0.59
9	-	-	-	-	-	-	-	-	122	0.42

2. MIPGAP：為 ABSMIPGAP 與線性最佳解相除所得。CPLEX 預設值為 0.0001，在第一階段的初始港口採用 0.05。對第一階段模式而言，ABSMIPGAP 的設定值可視為該港口的出口貨櫃量乘以 MIPGAP 值。

3. TIMELIMIT：最大求解時間。第一階段所使用的求解時間最大值為 3600 秒，第二階段中針對每一艙區的最大求解時間為 1800 秒。此最大求解時間之設定目的，係在針對求解時，避免若遇到無法收斂而導致浪費求解時間之情況。雖然本研究之所有測試例中（詳見後文），第一階段及第二階段之模式求解時間皆遠在此設定值下（亦即實際上在本研究的測試中未執行到最大求解時間），然本模式在未來其他的應用中，若遇到無法收斂的情況時，則業者在設定此最大求解時間時，需考量其可能導致的誤差。對此，業者可事前測試模式運算時間與收斂間距之關係，再設定一容許之最大求解時間。值得一提的是，若為確保收斂至一定誤差範圍內，而需設定太長的最大求解時間下，導致模式不實用時，則可能需進一步發展其他啟發解法（可配合 CPLEX）求解模式。

本研究在第一階段的初始港口進行求解時，由於初估成本高估而使得目標值較大，且考量的未來貨櫃資料最多，所求得之結果的變動性較大，因此採用 MIPGAP 做為收斂標準。對於非起始港口，由於所求得之目標值為整數值（因初估成本皆為整數），而線性最佳解通常小於 100，使得 MIPGAP 的計算結果常大於 100%，因此本研究不採用 MIPGAP，而以 ABSMIPGAP 作為收斂標準，使其較容易收斂。另外，由於在第二階段求解過程中所求得之最佳解目標值大多小於 10，因此本研究亦以 ABSMIPGAP 做為收斂標準。不過，由於 ABSMIPGAP 難以事先給定一合理值，因此本研究另外加上 TIMELIMIT（最大求解時間）做為輔助的收斂條件。

4.2 測試結果

首先在各裝卸港口所求解的各起迄貨櫃組之細部艙區指派結果，經審視後，均合乎模式條件及限制。部分的排艙結果如表 4 所示。表 4 顯示港口 1 之第一個 bay (bay 1) 及第二個 bay (bay 2) 的艙區指派結果，bay 1 及 bay 2 又各含四個艙區，分別為艙區 1-a、1-b、1-c、1-d 及艙區 2-a、2-b、2-c、2-d。其中，艙區 1-a、1-b 及艙區 2-a、2-b 位於甲板上層，艙區 1-c、1-d 及艙區 2-c、2-d 位於甲板下層。至於各艙區各艙位的指派符號，例如若為“4”，則代表此艙位裝載迄點為 4 的貨櫃（起點為 1）；若為“-”，則代表為空艙位。以 bay 1 為例，艙區 1-a 及艙區 1-b 在港口 1 並無裝櫃的動作，位在艙區 1-a 正下方的艙區 1-c 的所有艙位均裝載迄點為 4 的貨櫃，位於艙區 1-b 正下方艙區 1-d 則裝載迄點為 6 或 9 的貨櫃。至於 bay 2 的排艙結果之敘述與此類似，不再贅述。由於此等細部的指派結果甚為繁多，因此為節省篇幅，本文僅呈現表 5 之結果摘要。讀者若有興趣可參考張耿宗^[28]論文或聯絡作者以查詢此等細部結果。

表 4 港口 1 之部分艙區指派示意圖

bay 1					bay 2														
艙區 1-a					艙區 1-b					艙區 2-a					艙區 2-b				
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2	2	2	2	2	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2	2	2	2	2	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2	2	2	2	2	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2	2	2	2	2	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2	2	2	2	2	-	-	-	-	-
艙區 1-c					艙區 1-d					艙區 2-c					艙區 2-d				
4	4	4	4	4	-	-	-	-	-	7	7	7	7	7	6	6	6	6	6
4	4	4	4	4	-	6	9	-	6	7	7	7	7	7	6	6	6	6	6
4	4	4	4	4	-	6	9	-	9	7	7	7	7	7	6	6	6	6	6
4	4	4	4	4	-	6	9	-	9	7	7	7	7	7	6	6	6	6	6
4	4	4	4	4	-	6	9	-	9	7	7	7	7	7	6	6	6	6	6

表 5 為測試的結果摘要，其中艙區間翻櫃成本由第一階段求解結果所算出，艙區內翻櫃成本為所有艙區的第二階段目標值，總成本為艙區間及艙區內翻櫃成本的加總。由表 5 可知艙區內的翻櫃成本小於艙區間之翻櫃成本，即第一階段模式對整體求解結果的影響較大。此結果與現況實務的經驗相符，原因乃同一艙區內通常指派相同的起迄貨櫃組，因此翻櫃的情形較少。然而，不同起迄的貨櫃組通常指派於不同的艙區，因此在航線中因不同

港口在裝卸不同起迄的貨櫃上，排列錯綜複雜，相對的較容易產生翻櫃的情形。尤其，若是在原航線規劃上錯估了後續港口之部分起迄需求時，則此等艙區間翻櫃的情形將更多。本研究即考量此營運問題，綜合 WS 及 RA 建立一有效的系統排艙架構，並配合此架構核心之二階段模式之最佳化排艙，以減少艙區間與艙區內的翻櫃次數。

表 5 範例測試結果

艙區間翻櫃成本	61
艙區內翻櫃成本	6
總翻櫃成本	67
求解時間 (秒)	7307
第一階段變數個數最小值	6160
第一階段變數個數最大值	44720
第一階段限制式數目最小值	1594
第一階段限制式數目最大值	378687
第二階段變數個數	4350
第二階段限制式數目最小值	630
第二階段限制式數目最大值	889

另外，由表 6 可得知在港口 5 之後的第一階段目標值均為 0，代表前幾個港口的求解對總成本的影響較大。此結果亦符合實務經驗，原因乃比較航線後段的港口上，在前幾個港口的決策模式中，已被固定指派值之變數量較少，相對的未被指派的起迄貨櫃量較多，因此模式中未決策的變數量及問題規模較大，其排艙的排列組合相對的較為複雜，因此面臨裝卸港口的起迄需求變動時，其所對系統的擾動將相對較後面港口為大，而此亦導致較多的翻櫃次數。請注意，表 6 為求解過程中第一階段之目標值，其中，本研究在各港口求解上，曾測試不同的貨櫃分組方式，並選擇目標值最好的解為最終解。

在表 5 中可看出第一階段的問題規模的變動程度較大，變數個數的最大值為最小值的 7 倍以上，限制式數目最大值為最小值的 237 倍。而第二階段的變數個數為一定值，限制式數目最大值與最小值的差距在 1.5 倍以下。各個港口的求解時間如表 7 所示，求解時間以港口 3 及港口 1 較長，港口 3 的總求解時間超過 1 小時，而在港口 3 之後港口的求解時間皆小於 100 秒。另外，所有港口的第二階段求解時間均大於第一階段求解時間。

表 6 範例測試之第一階段目標值及收斂間距

港口編號	目標值	收斂間距實際值	收斂間距預設值
1	106.729	0.047	0.05
2	0	0	15.5
3	1	1	10.5
4	49	3	8.7
5	175	0	7.1
6	0	0	5.8
7	0	0	4.9
8	0	0	7.7
9	0	0	6.1

註：港口 1 的收斂標準取 MIPGAP，其他港口皆取 ABSMIPGAP。

表 7 範例之求解時間 (秒)

港口編號	第一階段	第二階段	總合
1	77	1927	2005
2	4	101	105
3	1448	3500	4948
4	12	56	68
5	35	59	94
6	4	24	28
7	10	17	27
8	2	20	22
9	1	9	10

表 8 及表 9 為二階段問題規模與求解時間的相關結果，由表 8 可知在第一階段模式中，最佳分組基準隨著港口而有所不同，變數數目及限制式亦隨之明顯變化。值得注意的是，本研究在各港口求解上，係重複測試不同的最小貨櫃分組基準值 (H)，再選擇最佳者。由表 8 及表 9 可分析造成港口 3 求解時間最長的原因如下：第一階段中，在港口 3 進行求解時的分組基準為 1，導致第一階段的變數數量為 44720，限制式數量高達 378687，其問題規模為所有港口中最大，因此其求解時間明顯較其他港口長。在第二階段中，共求解 27 次 (即求解 27 艙區)，且每次的平均求解時間較其他港口長。此原因為當第一階段的分組基準值較小時，同一起迄對的貨櫃有較大的機率被指派到多個艙區中，故需進行第二階段求解的艙區較多，且各個艙區中的貨櫃起迄對種類因而變多，造成求解難度增加。

另外，值得一提的是，就整個航線而言，出口貨櫃量集中於航線前半段的港口，因此在進行後半段港口求解時，模式中已包含大量的額外限制式 (8) 或 (15)，即已固定相當多

的變數值，故求解時間較短。例如港口 5 的變數及限制數量皆高於港口 1，但求解時間較短，其原因係在港口 5 的兩階段模式中的額外限制式 (8) 或 (15) 遠較港口 1 為多。

表 8 第一階段問題規模及求解時間

港口編號	分組基準	變數數量	限制式數量	求解時間 (秒)
1	12	6160	5539	77
2	12	6200	8139	4
3	1	44720	378687	1448
4	4	19240	17953	12
5	1	38760	159803	35
6	4	23160	7649	4
7	1	35040	64110	10
8	7	24680	4203	2
9	4	25200	1594	1

表 9 第二階段求解時間

港口編號	總求解時間 (秒)	求解次數	平均求解時間 (秒)
1	1927	22	88
2	101	19	5
3	3500	27	130
4	56	19	3
5	59	24	2
6	24	17	1
7	17	19	1
8	20	24	1
9	9	21	0

4.3 大型例測試暨參數分析

為測試本研究演算法是否能適用於未來超大型船的排艙規劃，本節進一步測試一假設之超大型船排艙規劃，並針對三個重要參數：最小貨櫃分組基準、初估成本及船舶裝載率，進行測試分析，以探討其對求解結果的影響。至於其他參數的測試，可為未來繼續研究的方向。

本小節假設類似 4.1 節之航線，即由 10 個港口所組成之單向非循環航線，港口編號依序為 1, 2, ..., 10。假設船舶有 20 個 bay，每個 bay 由四個大小相同之艙區所組成，每個艙區容量為 40 個貨櫃，故船舶總容量為 3200 個貨櫃。至於起迄港口貨櫃需求量及船舶裝載率如表 10 所示，其中各起迄對之貨櫃量的最大變動數量為原有貨櫃量的 1% 至 20%，缺櫃與多櫃的機率相同，貨櫃重量皆相同，總貨櫃數為 6161 個。至於其餘參數則與 4.1 節之測試例相同。

值得注意的是，如 4.2 節測試結果，以下各小節中各裝卸港口求解的結果均符合實務經驗。至於各起迄貨櫃組的細部艙區指派結果，經審視後，亦均合乎模式條件及限制。由於此等細部的指派結果甚為繁多，因此為節省本文篇幅，本文僅呈現結果摘要（如下述之表 11~表 13）。讀者若有興趣可參考張耿宗^[28]論文或聯絡作者以查詢此等細部結果。

表 10 大型測試例起迄港口貨櫃需求量及船舶裝載率

起點港口編號	迄點港口編號									裝載率
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	408	408	104	102	104	103	104	104	104	0.48
2	-	342	82	111	118	103	86	84	81	0.67
3	-	-	118	82	114	118	107	99	111	0.67
4	-	-	-	84	120	121	105	95	117	0.77
5	-	-	-	-	94	84	104	82	88	0.80
6	-	-	-	-	-	113	97	99	106	0.75
7	-	-	-	-	-	-	100	85	95	0.64
8	-	-	-	-	-	-	-	330	293	0.62
9	-	-	-	-	-	-	-	-	452	0.45

4.3.1 最小貨櫃分組基準測試

本研究分別以艙區容量的 50%、25%、12.5% (即 20、10、5 個貨櫃數) 做為最小貨櫃分組基準進行求解，結果如表 11 所示。由表 11 可知當最小貨櫃分組基準為 20 時，可於 1 小時內完成求解，原因在其問題規模明顯較其他分組為小，故求解較有效率。至於其他二分組亦皆可在 1 小時半內完成求解，顯示本演算法對於大型問題仍具相當良好之求解效率。另外，此結果亦顯示較大分組數 (20) 的效果優於較小者 (10 或 5)，其主要的原因在第一階段的指派上，較大的分組數 (20) 導致較少的艙區間翻櫃次數。至於第二階段的艙區內貨櫃指派上，較大的分組數 (20) 亦導致較少的艙區內翻櫃次數，然其值相對於第一階段的艙區間翻櫃次數明顯較少。

表 11 不同之最小貨櫃分組基準下大型測試例求解結果

	最小分組基準		
	20	10	5
艙區間翻櫃次數	58	74	77
艙區內翻櫃次數	1	2	4
總翻櫃次數	59	76	81
求解時間 (秒)	3430	4224	5707
第一階段最大變數個數	24320	39280	68160
第一階段最大限制式數目	53185	68160	402234

4.3.2 初估成本測試

本研究在第一階段模式的初估成本計算方式，同時考量艙區間及艙區內的翻櫃成本，其值有可能高於實際的翻櫃成本，尤其艙區內概估的翻櫃成本可能高估實際的翻櫃成本。若初估成本與實際的翻櫃成本間的差距過大，則可能無法求得較佳的解，因此在本小節中我們測試不同的初估成本。本研究在先前的初估成本計算上，設折扣值 f 為 1，在本小節中則針對 $f=0.25$ 、 0.50 、 0.75 進行求解測試。另外，由於在前一節的求解結果中，當最小貨櫃分組基準為 20 時，求解結果最佳且求解時間最短，故此測試亦以最小貨櫃分組基準 20 為例，求解結果如表 12 所示。由表 12 可知當 $f=0.25$ 時，所得到的解較佳，共有 46 次翻櫃，另外兩種折減係數的求解結果類似，皆為 61 次翻櫃。可能的原因是概估的艙區內翻櫃成本與分組基準成正相關，當分組基準越大，則高估成本的情形越嚴重，因此若以艙區容量的 50% 做為最小分組基準，則使用 0.25 的 f 值求解結果可能較佳。至於求解時間，三者的結果類似，與 f 值關係不大。在實際求解問題時，業者亦可自行測試不同分組基準與 f 值，以求較佳解。

表 12 不同 f 值下大型測試例求解結果

	f		
	0.25	0.50	0.75
艙區間翻櫃次數	40	60	60
艙區內翻櫃次數	6	1	1
總翻櫃次數	46	61	61
總求解時間 (秒)	3478	3415	3462

4.3.3 船舶裝載率測試

理論上，船舶裝載率會影響貨櫃船排艙的效率，即船舶裝載率愈大（在固定船舶容量下，亦表示貨櫃需求量愈多），貨櫃的排艙愈為擁擠，貨櫃分組數愈多（相對的模式規模愈大），排艙的排列組合愈複雜，因此預期的翻櫃次數與求解時間應愈多。反之，則預期的翻櫃次數與求解時間應愈少。為測試船舶裝載率之實際影響是否符合理論的預期，本研究以上述測試例（各港口的裝載率介於 0.45~0.8，平均裝載率為 0.65，屬中裝載率）為基礎，變動各港口的起迄需求，另產生二個測試例，一為低裝載率的測試例（各港口的裝載率介於 0.25~0.46，平均裝載率為 0.37），另一為高裝載率的測試例（各港口的裝載率介於 0.55~0.92，平均裝載率為 0.77）。為方便測試，本研究以最小貨櫃分組基準為 20 及 f 值為 1 為例，測試結果如表 13 所示。

由表 13 可知，隨裝載率的增加，模式的規模跟著變大（因第一階段模式規模甚大於第二階段模式規模，故只顯示第一階段模式規模），總翻櫃數及總運算時間亦隨之增加。其中，在低裝載率下僅發生 1 次艙區內翻櫃，且求解時間為 1251 秒，的確較中裝載率的 59 次翻櫃及 3430 秒之求解時間為少。而在高裝載率下共發生了 143 次翻櫃（含 141 次艙區間翻櫃及 2 次艙區內翻櫃），且求解時間為 4941 秒。二者均較中裝載率的 59 次翻櫃及 3430 秒之求解時間為多。此等結果顯示在低裝載率下，船舶的剩餘艙位相對較多，船艙的使用較具彈性，不需太多的翻櫃動作，可有效的裝運航線上所有的貨櫃；而在高裝載率下，船舶剩餘艙位相對較少，船艙的使用較為困難，因此需透過多次翻櫃始能裝運航線上所有的貨櫃。此等結果均如預期，亦顯示裝載率確實影響排艙的效率。值得一提的是，此高裝載率例之測試，亦僅需 1.37 小時即可求解完，未來若能輔以更有效率的電腦及演算環境，則本研究的模式架構及演算法，將更可為實務業者之參考。

表 13 不同船舶裝載率下大型測試例求解結果

	船舶裝載率		
	低平均裝載率 (各港口裝載率範圍) 0.37 (0.25 ~ 0.46)	中平均裝載率 (各港口裝載率範圍) 0.65 (0.45 ~ 0.8)	高平均裝載率 (各港口裝載率範圍) 0.77 (0.55 ~ 0.92)
艙區間翻櫃次數	0	58	141
艙區內翻櫃次數	1	1	2
總翻櫃次數	1	59	143
求解時間 (秒)	1251	3430	4941
第一階段最大變數個數	13600	24320	27760
第一階段最大限制式數目	17157	53185	60481

五、結論與建議

本研究針對變動需求下的貨櫃船排艙規劃問題進行分析，綜合 WS 及 RA 之處理變動需求作法，發展一系統最佳化貨櫃船排艙架構。此架構的核心為一個二階段的求解程序，含二個最佳化模式。本研究考量相關的營運限制，在參考及適當修正 Kang 和 Kim^[11]的第一階段模式及 Avrial 和 Penn^[4]的模式後，發展二個零壹整數規劃模式及一有效的求解演算法，以幫助海運業者有效進行排艙規劃。在第一階段中本研究設計一初估成本及貨櫃區分組概念，以協助構建艙區指派模式。另為符合在每個港口求解的演算法特性，本研究在兩階段模式中分別增加固定變數之額外限制式，除可固定部分求解結果外，亦可讓使用者以人工方式對求解結果進行修正，以利後續港口的求解。本研究演算法的特色為在每個港口進行一次兩階段求解，利用每個港口的求解結果產生下一個港口的積載圖。若發現下個港口的貨櫃需求發生變動，可在船舶靠港前完成求解產生新的積載圖，減低貨櫃需求變動造成的影響。

本研究以 C 語言結合 CPLEX 數學規劃軟體的 callable library 撰寫求解程式，具有效率及彈性，且可容許手動調整指派結果，故可在進行攬貨及空櫃調度前，變動貨櫃需求量進行求解，估計新增貨櫃對總成本的影響，以增加業者之收益。本研究參考國內一海運業者的營運資料為例，進行模式及演算法測試，發現各測試例皆可在約二小時求解完成，且所求得之解與理論最佳解的間距皆在容許的誤差內，顯示本研究模式的理論結果與演算法的演算效率均頗佳。另外，由大型測試例的初步參數分析，發現最小分組基準及初估成本的計算方式對求解時間有影響。此等結果均可提供給實務業者，以為排艙規劃之參考。

相關本研究之後續研究課題建議如下：

1. 實務上海運業者主要以定期循環航線為營運路線，而本研究則針對單向非循環航線為研究對象。未來可針對定期循環航線的特性適當修改本研究模式，並發展較適合定期循環航線的演算法。
2. 本研究在模式的測試中，係假設每個 bay 的形狀及包含的艙區皆相同，然實務上各 bay 的形狀及大小可能不全相同或船體本身的重量可能對船舶平衡有影響，因此若要將本研究的模式套用在實際的船舶上，則可能須適當修正艙區的切割方式。例如對於形狀不規則的 bay，可將艙位以「行」做單位進行適當分割，再套用本研究的模式，至於其具體的作法可在未來進一步研究。
3. 本研究只考慮標準尺寸的重櫃，在後續研究中可加入特殊貨櫃之營運（如遊艇、大型機具等）。由於不同的特殊貨櫃有不同的裝載限制，因此必須在模式中增加其他限制式，而此預期將提高模式的求解難度。
4. 為適當簡化模式的構建，本研究假設所有貨櫃的裝卸成本皆相同，即模式中不考量起重機在不同 bay 間之移動成本，然實際上此成本亦可能影響排艙計畫的績效，因此未來可進一步考量加入此因素以修正模式，使模式更為實用。

參考文獻

1. Shield, J. J., "Container Stowage: A Computer-Aided Preplanning System", *Marine Technology*, Vol. 21, No. 4, 1984, pp. 370-383.
2. Martin, G. L., Randhawa, S. U., and McDowell, E. D., "Computerized Container Ship Load Planning: A Methodology and Evaluation", *Computers and Industrial Engineering*, Vol. 14, 1988, pp. 429-440.
3. 周建張，「知識庫系統應用於貨櫃船自動化排艙之研究」，*航運季刊*，第二卷，第四期，民國八十二年，頁 11-24。
4. Avriel, M. and Penn, M., "Exact and Approximate Solutions of the Container Ship Stowage Problem", *Computers and Industrial Engineering*, Vol. 25, 1993, pp. 271-274.
5. Avriel, M., Penn, M., Shpirer, N., and Witteboon, S., "Stowage Planning for Container Ships to Reduce the Number of Shifts", *Annals of Operations Research*, Vol. 76, 1998, pp. 55-71.
6. Avriel, M., Penn, M., and Shpirer, N., "Container Ship Stowage Problem: Complexity and Connection to the Coloring of Circle Graphs", *Discrete Applied Mathematics*, Vol. 103, 2000, pp. 271-279.
7. Wilson, I. D. and Roach, P. A., "Principles of Combinatorial Optimization Applied to Container-Ship Stowage Planning", *Journal of Heuristics*, Vol. 5, No. 4, 1999, pp. 403-418.
8. Wilson, I. D. and Roach, P. A., "Container Stowage Planning — A Methodology for Generating Computerized Solutions", *Journal of Operational Research Society*, Vol. 51, Iss. 11, 2000, pp. 1248-1255.
9. Wilson, I. D., Roach, P. A., and Ware, J. A., "Container Stowage Pre-Planning: Using Search to Generate Solutions, a Case Study", *Knowledge Based Systems*, Vol. 14, 2001, pp. 137-145.
10. 李選士、林志成，「以基因演算法為基礎之排艙自動化」，*航運季刊*，第八卷，第二期，民國八十八年，頁 21-45。
11. Kang, J. G. and Kim, Y. D., "Stowage Planning in Maritime Container Transportation", *Journal of Operational Research Society*, Vol. 53, 2002, pp. 415-426.
12. 陳春益、溫哲欽，「貨櫃船舶艙位指派問題之研究」，*中華民國第七屆運輸網路研討會論文集*，民國九十一年。
13. Imai, A., Nishimura, E., Papadimitriou, S., and Sasaki, K., "The Containership Loading Problem", *International Journal of Maritime Economics*, Vol. 4, 2002, pp. 126-148.
14. Dubrovsky, O., Levitin, G., and Penn, M., "A Genetic Algorithm with a Compact Solution Encoding for the Container Ship Stowage Problem", *Journal of Heuristics*, Vol. 8, No. 6, 2002, pp. 585-599.
15. Ambrosino, D. and Sciomachen, "A., A Constraints Satisfaction Approach for Master Bay Plans", *Maritime Engineering and Ports*, Sciotto, G., Brebbia, C. A., Eds., WIT Press, Boston, 1998, pp. 155-164.

16. Ambrosino, D., Sciomachen, A., and Tanfani, E., “Stowing a Conatainership: The Master Bay Plan Problem”, *Transportation Research*, Vol. 38A, No. 2, 2004, pp. 81-99.
17. Birge, J. R. and Louveaux, F. V., *Introduction to Stochastic Programming*, Springer-Verlag, New York, 1997.
18. Madansky, A., “Inequalities for Stochastic Linear Programming Problems”, *Management Science*, Vol. 6, 1960, pp. 197-204.
19. Yan, S. and Young, H. F., “A Decision Support Framework for Multi-Fleet Routing and Multi-Stop Flight Scheduling”, *Transportation Research*, Vol. 30A, No. 5, 1996, pp. 379-398.
20. Yan, S. and Lin, C. G., “Airline Scheduling for the Temporary Closure of Airports”, *Transportation Science*, Vol. 31, No. 1, 1997, pp. 72-82.
21. Yan, S., Shieh, C. W., and Chen, M., “A Simulation Framework for Evaluating Airport Gate Assignments”, *Transportation Research*, Vol. 36A, 2002, pp. 885-898.
22. Laporte, G., Louveaux, F. V., and Hamme, L. V., “Exact Solution to a Location Problem with Stochastic Demands”, *Transportation Science*, Vol. 28, No. 2, 1994, pp. 95-103.
23. Wets, R. J-B, *Stochastic Programming Models: Wait-and-See versus Here-and-Now*, Document 90C15, National Science Foundation, 2000.
24. Yan, S., “Intermodal Pricing and Operations Using Network Flow Techniques”, Ph.D. Dissertation, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, USA, 1991.
25. Yan, S., Bernstein, D., and Sheffi, Y., “Intermodal Pricing Using Network Flow Techniques”, *Transportation Research*, Vol. 29B, 1995, pp. 171-180.
26. Powell, W. B., Sheffi, Y., Nickerson, K., Butterbaugh, K., and Atherton, S., “Maximizing Profits for Truckload Motor Carriers: A New Framework for Pricing and Operations”, *Interface*, Vol. 18, 1988, pp. 21-41.
27. ILOG, Inc., *Using the CPLEX Callable Library*, Version 7.1, 2001.
28. 張耿宗，「變動需求下貨櫃船排艙最佳化之研究」，國立中央大學碩士論文，民國九十二年六月。

