

客船撤離分析指南應用之研究 ——以育英二號訓練船為例

A Study of Application of “Guidelines for Evacuation Analysis for New and Existing Passenger Ships”
——An Example of “M/V Yu-Ying No.2”

劉 謙 (Chian Liou)^①、朱經武 (Ching-Wu Chu)^②、林昭輝 (Chao-Hui Lin)^③

摘要

國際海事組織海事安全委員會在 2007 年發佈新造與現成客船撤離分析之指導文件，編號 MSC.1/Circ.1238。本研究對指導文件的理論基礎——緊急疏散液體模型做介紹，提供研究學者進一步瞭解。本研究亦嘗試將該指導文件之分析方法做一試算，詳細列出計算過程，整理出適合國人應用分析之參考範例。在應用方法上，本研究對照育英二號訓練船的船圖繪製出疏散路網圖，然後以緊急疏散液體模型量化撤離時間。結果預估出夜間撤離方案的擁擠點並提出該撤離方案之改善與建議。

關鍵字：撤離分析、液體模型、疏散路網

Abstract

Maritime Safety Committee (MSC) of International Maritime Organization (IMO) published “Guidelines for Evacuation Analysis for New and Existing Passenger Ships” (MSC.1/Circ. 1238) in 2007. According to the guidelines, this research introduces the hydraulic model of emergency egress, gives an example on the basis of the guidelines, and lists in detail the calculating process for application.

① 國立基隆高級海事職業學校航海科 教師 nav@mail.klvs.kl.edu.tw。

② 國立臺灣海洋大學航運管理學系 教授 cwchu@mail.ntou.edu.tw。

③ 國立臺灣海洋大學航運管理學系 助理教授 linch@mail.ntou.edu.tw。

The researchers read the finished plan of the Training Ship “Yu-Ying No.2”, draw an escape network, and quantify evacuation time with the hydraulic model of emergency egress. The estimated congested points of the night time evacuation plan and suggestions for improvement are offered as well.

Keywords: Evacuation analysis, Hydraulic model, Escape network

壹、前言

1.1 客船撤離指南的制定沿革

在緊急情況下將人員安全迅速的撤離母船進入救生艇筏等待救援，是造船工程師與船舶管理相關人員所關切的議題。雖然國際海事組織頒訂的海上人命安全公約 (SOLAS) 制定了船舶有關船員與旅客安全的最低標準，但卻沒有建立應用於緊急撤離的分析方法。因此國際海事組織海事安全委員會 (Maritime Safety Committee, MSC) 在 1999 年頒佈「駛上駛下船簡化的撤離分析暫行指南」(MSC/Circ. 909)，在 2001 年頒佈「高速客船簡化的撤離分析指南」(MSC/Circ. 1001)，在 2002 年頒佈「新建造與現成客輪撤離分析暫行指南」(MSC/Circ. 1033)，又於 2007 年核定頒佈「新建造與現成客輪撤離分析指南」(MSC.1/Circ. 1238)。海事安全委員會在過去十年內利用四次會期討論後發佈了船舶撤離分析指導方針的目的主要為了保障旅客在海上的生命安全，尤其強調這些撤離分析是基於火災風險分析。同時鼓勵會員

國成員應用於所屬船舶，蒐集來自於研究發展活動的任何資訊與資料、全尺度試驗及有關人類行為的研究發現。實施指導方針的經驗收穫及評估撤離分析工具的結果提交給海事安全委員會下之火災防護小組作為將來更新現行指導方針的參考。

1.2 現成客船的檢查現況

臺灣對客船之檢查規定於「客船管理規則」中，該規則第二章第 24 條明定航行國際航線之客船，應依國際海上人命安全公約之規定施行檢驗。因此，所有航行於國際航線之客船，均應經過撤離分析後建立撤離計畫 (evacuation plan) 以作為演習時的依據與港口國管制檢查員的審視文件。我國教育部訓練船「育英二號」在船舶種類歸類上，以搭載乘員為「商船實習生」或「漁船實習生」而規避了一般「乘客」的性質，在文字上似乎可不受客船管理規則之約束，故下水迄今均無制定緊急撤離計畫 (Emergency Evacuation Plan, EEP)。但連同全體船員使乘載人數達百餘人的學生訓練船在沒有緊急撤離計畫下進行棄船召急演習，似乎有違海上人命安

全公約制定之精神與教育訓練船的設置目標。為防患未然起見，本研究嘗試以國際海事組織發佈之「新造與現成客船撤離分析指南」(MSC.1/Circ. 1238) 為綱領，以實習船構造相似於客船及乘員人數眾多的特性，建立實習船緊急撤離計畫。一方面可熟悉撤離分析的計算方法，另一方面可作為教學上之範例，使將來有機會進入客船職場就業的學生，迅速地進入狀況達到國際公約的規範與船公司要求的技術能力。

貳、文獻回顧

本研究聚焦於海上緊急撤離分析，對於國際公約之規定與國內外學者曾經探討過的議題先做整理回顧。

2.1 國際公約要求

1. 國際海事組織「海上人命安全公約」(SOLAS) 對客船撤離時間的規定如下：
 - (1) 在棄船信號發出後全部救生艇筏備便下水的時間最多為 30 分鐘 (第三章規則11)。
 - (2) 棄船召集人員的時間最多為 30 分鐘(第三章規則21.1.4)。
2. 國際海事組織「火災安全系統章程」(FSS) 第十三章逃生方法的配置要求逃生計畫應提供下列資訊：
 - (1) 正常佔有空間下船員與旅客人數。
 - (2) 藉由樓梯、門、走道與踏板等設施逃

生的船員及旅客期望人數。

- (3) 召集站與救生艇筏登艇位置。
 - (4) 主要與次要的逃生方法。
 - (5) 樓梯、門、走道與踏板等設施的寬度。
3. 國際海事組織「客船撤離分析指南」(MSC.1/Circ. 1238) 要求的績效標準為：計算的總撤離時間：

$$1.25(A + T) + 2/3(E + L) \leq n \quad (1)$$

$$E + L \leq 30 \text{ min.} \quad (2)$$

(1) 式中，

A = 知曉時間 (Awareness Time)，夜間 10 分鐘，白天 5 分鐘。

T = 旅行時間 (Travel Time)

E = 登艇時間 (Embarkation Time)

L = 下水時間 (Launching Time)

$n = 60$ 非 R_o/R_o 船之客輪，主垂直區 (MVZ) 三個或以下時， $n = 80$ 非 R_o/R_o 船之客輪，主垂直區 (MVZ) 三個以上時。

2.2 撤離分析文獻

Jarvis and Ratliff (1982) 以動態路網流同時達成淨空時間最小化、最初時期撤離量最大化與平均撤離時間最小化等三個目標。Chalmet et al. (1982) 以路網模型解算人員撤離最小時間與找出可能發生的瓶頸。Smith (1991) 由 K-S 路網理論發展出 M/G/C/C 狀態相依等候理論，應用於撤離分析問題。Løvås (1995, 1998)

以數學方法分析路徑發現模式，並使用 EVACSIM 模擬程式探討撤離系統績效。Weinroth (1989) 發展出 MOBLIZE 模擬辨識危險瓶頸與測試人員離開行為的敏感性分析。Thompson and Marchant (1994) 以 SIMULEX 程式做複雜的空間分析與電腦產生的路徑尋找技術，嘗試突破傳統路網模式無法處理的幾何複雜度與群眾移動的不規則複合性。Shestopal and Grubits (1994) 以 WAYOUT 程式建立來自多房間、多樓層緊急狀態下的交通流，計算最大撤離時間與每個房間完成撤離時間。文中批評 EVACNET、EXIT89 與 EXITT 等程式的限制。Galea et al. (1998) 以 EXODUS 模式模擬船舶人員撤離，強調船舶佈置、環境因素、撤離程序與人員行為。Poon (1994) 探討以離散事件模擬概念發展的 EvacSim 程式，說明高樓火災人員撤離的行為特質。Fahy (1991) 以 EXIT98 追蹤人員位置，計算燃燒物質產生毒物在人體的累積量，強調可彌補路網流模型無法追蹤個體的缺點。Kisko et al. (1998) 發展 EVACENT4，以節點與弧繪圖方式呈現人員數量與建築物空間容量通過時間等資訊，計算出最短撤離時間及瓶頸。

有關船舶撤離的文獻近年來獲得學者重視。部分學者將陸地建築物的撤離方法應用到船舶撤離，同時考量特殊的環境如船體運動與人類的行為因素 (human

behaviors)。歐盟的研究計畫於 1997 年執行，發展出模擬程式 EVAC 以微觀的角度模擬客輪召集演習。每位乘客的運動與互相影響包含在程式內。但未包含船體的動態效應與傾斜。Galea (2000) 發展出 EXODUS 的雛型，Gwynne et al. (2003) 使用 maritime EXODUS 分析高速客船的撤離程序。Lee et al. (2004) 於韓國首爾大學發展出 MonteDEM 系統於評估船舶安全。每位人員的實體特徵與船舶運動引起的作用力可以在程式中指定。Park et al. (2004) 對人員自船舶撤離的現況與未來做出回顧，提出逃生模擬的智慧模型 IMEX，該模型結合動態模型與人類行為模型克服了現有撤離模型的限制。Chu and Pan (2005) 運用數學規劃的方法尋求最佳人員撤離路徑。

綜合以上的觀察發現，撤離計畫對海上人命安全是相當重要的。必須有適當的工具用於分析撤離計畫。但對一般船員而言，精細複雜的計算模型或方法，有實務上運用的困難。因此本研究依據國際海事組織提出的方案，針對國內教育訓練船加以分析試算，提出一詳細的參考範例及過程說明，讓負責規劃及執行旅客撤離任務的船員可以按部就班深入瞭解，最終目標是使國人熟悉此方法並進一步可運用到其他客輪撤離計畫的分析。

參、理論與應用方法

緊急情況下人員移動流的研究主要基於移動速度和撤離人員流的密度之間的關係。一般假設：

1. 所有人員在相同時間開始撤離。
2. 人員流不包含任何因個人決策所引起的阻撓(中斷)。
3. 全體人員行動力均為正常行動力，具備跟得上群體移動能力。

此方法為所謂的緊急疏離液體模型(Hydraulic Model) (Nelson and MacLennan, 1995)。液體模型計算結果稱為模型撤離時間(Model Evacuation Time, MET)。實際疏散時間(Actual Egress Time, AET)是指人員實際離開建築所需時間。一般 $AET > MET$ ，因 MET 是基於撤離演習和火災經驗的近似資料。AET 與 MET 之差異可以「視撤離效率」(Apparent Evacuation Efficiency, E) 表示如下：

$$AET = MET \times E + DT \quad (3)$$

其中，

AET = 實際撤離時間

MET = 模型撤離時間

E = 視撤離效率

DT = 初始撤離延遲

視撤離效率 (E) 是影響液體撤離流假設的元素的函數。假設的元素包含：

1. 控制撤離活動所造成的延遲。

2. 在會合點流動停止和重新啟動的時間延遲。
3. 個體自我習慣所造成的延遲。
4. 使用逃生設施的效率不均衡，某些過度使用某些甚少使用。

造成初始撤離延遲 (DT) 的可能原因：

1. 決策的時間。
2. 調查的時間 (決定火源的行動、真實性、警告)。
3. 非完全貢獻於有效地撤離的其他活動時間。
4. 決定適當路徑的時間。

評估緊急撤離移動的第一步驟是計算模型的疏散時間，使用模型計算提供複製的參考基礎於評估對整個系統的衝擊、個別組成或系統改變。若模型撤離時間被拿來與真實的期望撤離時間比較時，使用者應瞭解模型撤離時間與真實情況是有若干差異的。精確地估計期望的撤離時間需要計算模型撤離時間及評估撤離效率。流體模型的計算方法詳述如下：

3.1 計算旅行時間的方法

3.1.1 參數定義

1. 淨寬 (Wc)

走道與樓梯的淨寬量自扶手 (handrail) 外側，美國防火協會 NFPA 1995 出版之防火工程手冊，有效寬度 (We) 量自扶手中央。Paul (1987) 則建議考量行人橫向搖擺

之幅度自走道兩側壁面扣除 30 cm 為有效寬度。門則測量在全開位置時實際通過寬度。

2. 人員初始密度 (D)

在逃生路徑 (escape route) 中人員初始密度為人數 (p) 除以可利用逃生路徑面積，該面積是人員最初所在位置之空間，單位表示為 (p/m^2)。

3. 人員速度 (S)

人員沿著逃生路徑的速度 (m/s) 依人員比流 (定義於下文) 與逃生設施的種類決定。表 1 給定人員速度初始值，表 3 給定經過轉移點後速度為比流的函數值。Nelson and MacLenna (1995) 認為在無障礙下最大撤離速度為 1.19 m/s ，可能為表 1 中數值 1.2 m/s 的來源。走道之初始速度為密度的函數 ($S = 1.4 - 0.3724 \times D$)，但在密度不大於 0.5 p/m^2 時，以 1.19 m/s 為初速。而 IMO 所列出之表值小數點以下位數出現與其不一致情況，推判可能用近似數值。

4. 人員比流 (F_s)

比流 ($p/(ms)$) 是通過逃生路徑中一點，每單位時間，每單位淨寬的逃人人數。表 1 給定比流的值 (初始比流為初始密度的函數)，表 2 給定比流最大值。

5. 計算流率 (F_c)

計算流率 (p/s) 指在逃生路徑中每單位時間通過某特定點的預測人數。可由下式計算獲得：

表 1 初始比流與初始速度為密度的函數

設施種類	初始密度 $D(p/m^2)$	初始比流 $F_s(p/(ms))$	初始速度 $S(m/s)$
走道	0	0	1.2
	0.5	0.65	1.2
	1.9	1.3	0.67
	3.2	0.65	0.20
	≥ 3.5 (擁擠)	0.32	0.10

資料來源：IMO, MSC.1/Circ. 1238, ANNEX 1, p.7

表 2 比流最大值

設施種類	比流最大值 $F_s(p/(ms))$
樓梯 (下行)	1.1
樓梯 (上行)	0.88
走道	1.3
門	1.3

資料來源：IMO, MSC.1/Circ. 1238, ANNEX 1, p.7

表 3 經過轉移點後比流與速度之值

設施種類	初始比流 $F_s(p/(ms))$	初始速度 $S(m/s)$
樓梯 (下行)	0	1.0
	0.54	1.0
	1.1	0.55
樓梯 (上行)	0	0.8
	0.43	0.8
	0.88	0.44
走道	0	1.2
	0.65	1.2
	1.3	0.67

資料來源：IMO, MSC.1/Circ. 1238, ANNEX 1, p.8

$$F_c = F_s W_c \quad (4)$$

6. 流動時間 (t_F)

流動時間指在逃生系統中， N 個人員通過某一點所需的時間，計算公式如下：

$$t_F = N/F_c \quad (5)$$

7. 轉移點

轉移點指在逃生系統中的某些點，其種類 (例如自走道到樓梯) 或路徑的尺寸改變或路徑合併或分歧。在轉移點，輸出計算流率總和等於輸入計算流率總和，如下式：

$$\sum Fc(in)_i = \sum Fc(out)_j \quad (6)$$

其中，

$Fc(in)_i$ = 到達轉移點路徑 (i) 的計算流率

$Fc(out)_j$ = 離開轉移點路徑 (j) 的計算流率

8. 旅行時間 (T)、修正因子與逆向流修正因子

旅行時間以秒表示如下：

$$T = (\gamma + \delta)t_f \quad (7)$$

其中，

$\gamma = 2$ ，主要撤離案例，夜間與白晝修正因子。

$= 1.3$ ，次要撤離案例，在發生最長旅行時間的主垂直區 (MVZ)，做進一步研究的修正因子。

$\delta = 0.3$ ，逆向流修正因子

t_f = 在理想狀態下，以秒表示的最高旅行時間。

3.2 量化流動時間

為了說明計算程序，必須用到下列符號：

t_{stair} = 逃生路徑到達召集站，樓梯的旅行時間

t_{deck} = 某甲板撤離路徑中，最遠一點到樓梯的旅行時間

t_{assembly} = 自樓梯終點到指定的召集站的入口的旅行時間

計算之基本步驟如下：

1. 系統化逃生路徑為流體路網，其中管路代表走道與樓梯，閥代表門與一般限制，而槽櫃代表公共空間。
2. 計算每一個甲板主要逃生路徑的密度 (D)。在整列船艙面對同一走道的情況時，假設船艙中的人員同時進入走道中；因此走道的密度為該列船艙人員總數除以考量淨寬下計算得到的走道面積。對公用空間而言，假設全體人員同時在出口門開始撤離 (用於計算的比流為門的最大比流)；使用每個門的撤離人數可假設正比於門的淨寬。
3. 自表 1 以線性內插法計算初始比流 F_s 為密度的函數。
4. 在對應於指派的逃生樓梯方向，計算走道與門的流率 F_c 。
5. 一旦到達轉移點，利用公式 (6) 獲得輸出計算流率 F_c 。在兩個或以上路徑離開轉移點時，假設每一路徑的流率 F_c 正比於其淨寬。輸出比流 F_s 由輸出流率除以淨寬得到；有兩種可能：
 - (1) F_s 未超過表 2 的最大值；對應的輸出速度 (S) 由表 3 線性內插得到，是比流的函數；或
 - (2) F_s 超出表 2 之最大值；此時等候 (queue) 發生於轉移點， F_s 取表 2 之

最大值且相對應的輸出速度 (S) 取自表 3。

6. 對每一層甲板重複上述動作，結果得到一組計算流率 F_c 與速度 S 之值，每一個進入指派的逃生樓梯。
7. 自 N (進入樓梯或走道的人數) 與相關的 F_c ，計算每一個樓梯與走道的流動時間 t_F 。每一逃生路徑的流動時間 t_F 是那些對應於逃生路徑中每個部位最長的時間。
8. 自每個逃生路徑到樓梯最遠的點計算旅行時間 t_{deck} ，定義為長度與速度的比值。對逃生路徑的不同部位，若部位是串聯的則應加總旅行時間，否則採用其中最長的。每一層甲板都應進行此計算；假設人員在每一層甲板平行移動至指派的樓梯，則取其中最大值作為代表。公用空間不計算旅行時間 t_{deck} 。
9. 對每一樓梯計算其旅行時間為樓梯斜面長度與速度的比值。對每一層甲板，總樓梯旅行時間， t_{stair} ，是所有連接該甲板與召集站之樓梯的旅行時間總和。
10. 自樓梯終端 (在召集站甲板) 到召集站入口計算旅行時間 $t_{assembly}$ 。
11. 沿著一逃生路徑到其指派的召集站的總旅行時間為：

$$t_I = t_F + t_{deck} + t_{stair} + t_{assembly} \quad (8)$$

12. 對白晝與夜間的案例均重複此程序。

將得到每一主逃生路徑到其指派的召集站的兩個數值。

13. 被辨識的擁擠點如下：

- (1) 空間中，初始密度大於或等於 3.5 p/m^2 ；與
- (2) 轉移點，其輸入與輸出計算流率差大於每秒 1.5 人，或進入比流大於該設施的最大比流值 (表 2) 時。

14. 一旦所有逃生路徑執行計算，最大的 t_I 應被選取使用公式 (7) 計算旅行時間 T 。

肆、案例研究

本研究提供應用撤離指南於夜間之案例。對 RO/RO 船的績效標準而言是假設為 60 分鐘。IMO 發展此方法時並未要求別於 RO/RO 船的客輪也需相同標準。本案例以育英二號訓練船作為實例。學生分配艙位如下：

情境：全體學生分散於第二甲板之學生住艙內 (14 間，每間 4~6 人)。

4.1 系統描述

育英二號上甲板 (upper deck) 下方有第二甲板 (2nd deck) 與最下層之第三甲板 (3rd deck)，上甲板上方有救生艇甲板 (lifeboat deck) 與駕駛台甲板 (bridge deck)。正常情況下人員逃生預設以抵達 (arrival) 救生艇甲板召集站 (muster stations)

為第一階段，其次為登艇 (boarding) 與小艇下水 (launch) 作業。本研究僅探討第一階段有關撤離動作。逃生路徑如下 (詳圖 1)：

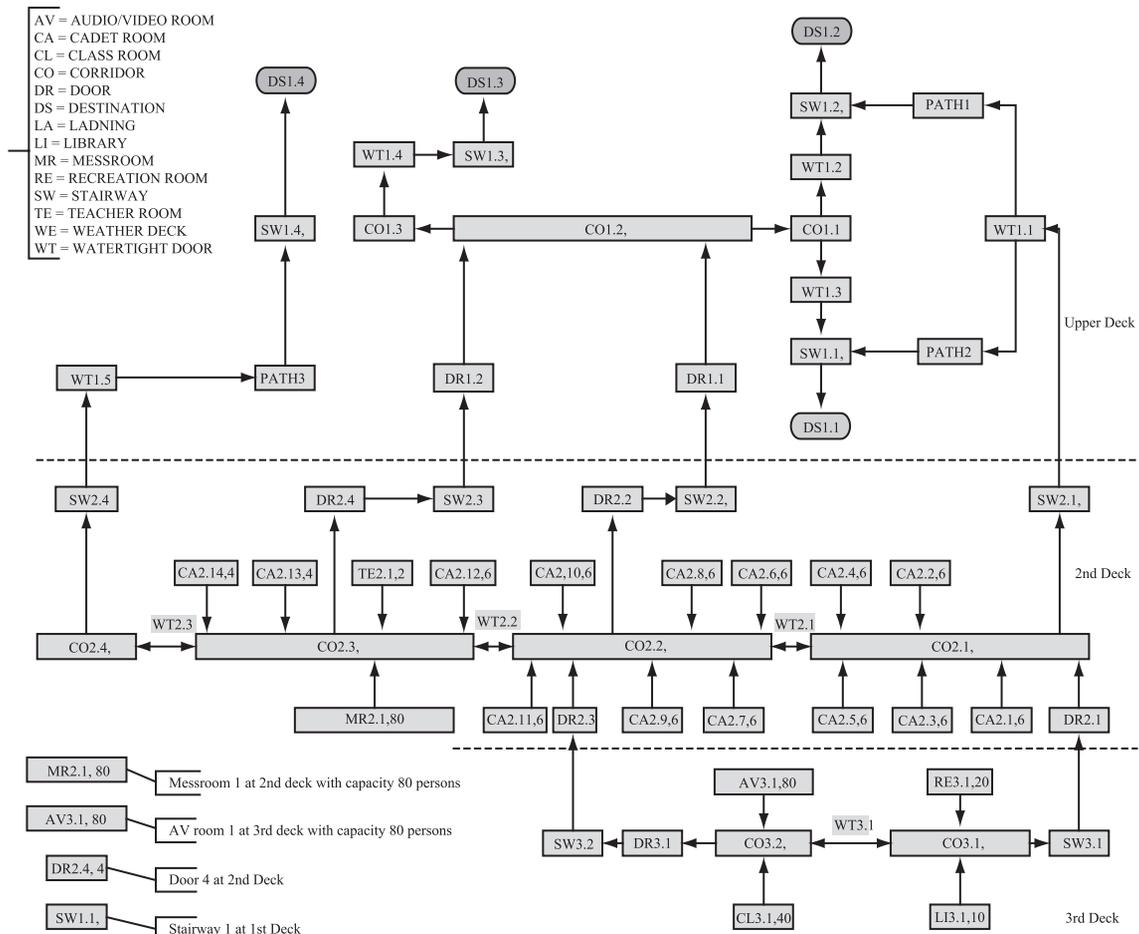


圖 1 撤離系統圖

1. 第三甲板 (3rd deck) (表 4) 經由兩座樓梯連接第二甲板，前方樓梯編號 SW3.1，後方樓梯編號 SW3.2。前中央走道編號 CO3.1 向前直接連接樓梯 SW3.1 向上至第二甲板，向後有水密門 WT3.1 接後中央走道編號 CO3.2，後中央走道尾端經由樓梯門編號 DR3.1 連接樓梯 SW3.2 向上至第二甲板。
 2. 第二甲板 (表 5) 經由四座樓梯 (由船艏向後編號依序為 SW2.1, SW2.2, SW2.3, SW2.4) 向上連接至上甲板。
- 艙中央走道 (CO2.1) 連接學生住艙 (編號 CA2.1, CA2.2, CA2.3, CA2.4, CA2.5) 五間與來自第三甲板樓梯 SW3.1 向上抵達第

表 4 第三甲板設施淨寬與長度

項目	Wc (淨寬) [m]	長度 [m]	面積 [m]	連接
3 rd deck CO3.1	1.050	8.350	8.768	To SW3.1
3 rd deck CO3.2	1.050	4.800	5.040	To DR3.1
3 rd deck DR3.1	0.900	–	–	To SW3.2
3 rd deck SW3.1	0.900	4.200	3.780	Up to 2 nd deck
3 rd deck SW3.2	0.900	5.400	4.860	Up to 2 nd deck
3 rd deck WT3.1	0.900	–	–	CO3.1 & CO3.2

表 5 第二甲板設施淨寬與長度

項目	Wc (淨寬) [m]	長度 [m]	面積 [m]	連接
2 nd deck CO2.1	0.900	12.000	10.800	To SW2.1
2 nd deck CO2.2	0.900	10.800	9.720	To DR2.2
2 nd deck CO2.3	0.900 0.700	8.700 14.400	7.830 10.080	To DR2.4 (寬度有改變)
2 nd deck CO2.4	0.700	10.150	7.110	To DR2.5
2 nd deck DR2.1	0.900	–	–	To CO2.1
2 nd deck DR2.2	0.700	–	–	To SW2.2
2 nd deck DR2.3	0.900	–	–	To CO2.2
2 nd deck DR2.4	0.700	–	–	To SW2.3
2 nd deck SW2.1	0.600	5.400	3.240	Up to upper deck
2 nd deck SW2.2	0.600	5.400	3.240	Up to upper deck
2 nd deck SW2.3	0.600	5.400	3.240	Up to upper deck
2 nd deck SW2.4	0.700	5.400	3.780	Up to upper deck
2 nd deck WT2.1	1.000	–	–	CO2.1 & CO2.2
2 nd deck WT2.2	1.000	–	–	CO2.2 & CO2.3
2 nd deck WT2.3	1.000	–	–	CO2.3 & CO2.4

二甲板之樓梯門 DR2.1，在前端直接連接樓梯 SW2.1 向上至上甲板，後端有水密門 WT2.1 連接舳前中央走道 CO2.2。

舳前中央走道 CO2.2 連接學生住艙 (編號 CA2.6, CA2.7, CA2.8, CA2.9, CA2.10, CA2.11) 六間與來自第三甲板樓梯 SW3.2 向上抵達第二甲板之樓梯門 DR2.3，在中段連接樓梯門 DR2.2 經由樓梯 SW2.2 向上至上甲板，後端有水密門 WT2.2 連接舳後

中央走道 CO2.3。

舳後中央走道 CO2.3 連接學生住艙 (編號 CA2.12, CA2.13, CA2.14) 三間與學生餐廳 (編號 MR2.1)，在中段連接樓梯門 DR2.4 經由樓梯 SW2.3 向上至上甲板，後端有水密門 WT2.3 連接艙中央走道 CO2.4。

艙中央走道 CO2.4 在艙端連接樓梯 SW2.4 向上至上甲板。

3. 上甲板 (表 6) 經由四座樓梯 (編號 SW1.1, SW1.2, SW1.3, SW1.4) 連接救生艇甲板即召集站。
來自第二甲板樓梯 SW2.1 之人員經由水密門 WT1.1 連接前露天甲板 WE1.1，然後選擇經由路徑 PATH1 與樓梯 SW1.2 或路徑 PATH2 與樓梯 SW1.1 向上抵達救生艇甲板。

表 6 上甲板設施淨寬與長度

項目	Wc (淨寬) [m]	長度 [m]	面積 [m]	連接
Upper deck PATH1	1.000	18.000	18.000	To SW1.2
Upper deck PATH2	1.000	20.000	20.000	To SW1.1
Upper deck PATH3	1.700	18.000	30.600	To SW1.4
Upper deck CO1.1	0.700	6.800	4.760	To WT1.2 & WT1.3
Upper deck CO1.2	0.700	16.800	11.760	To CO1.1 & CO1.3
Upper deck CO1.3	0.900	3.240	2.916	To WT1.4
Upper deck WT1.1	0.700	—	—	To PATH1 & 2
Upper deck WT1.2	0.700	—	—	To SW1.2
Upper deck WT1.3	0.700	—	—	To SW1.1
Upper deck WT1.4	0.700	—	—	To SW1.3
Upper deck WT1.5	0.700	—	—	To PATH3
Upper deck SW1.1	0.600	3.000	1.800	Up to lifeboat deck
Upper deck SW1.2	0.600	3.000	1.800	Up to lifeboat deck
Upper deck SW1.3	0.600	3.000	1.800	Up to lifeboat deck
Upper deck SW1.4	0.600	3.000	1.800	Up to lifeboat deck
Upper deck DR1.1	0.700	—	—	To CO1.2
Upper deck DR1.2	0.700	—	—	To CO1.2

來自第二甲板樓梯 SW2.2 之人員經由樓梯門 DR1.1 連接中央走道 CO1.2，然後選擇經由走道 CO1.1、水密門 WT1.3 與樓梯 SW1.1 或走道 CO1.1、水密門 WT1.2 與樓梯 SW1.2 向上抵達救生艇甲板。

來自第二甲板樓梯 SW2.3 之人員經由樓梯門 DR1.2 連接中央走道 CO1.2，然後選擇經由走道 CO1.3、水密門 WT1.4 與樓梯 SW1.3 向上抵達救生艇甲板。

來自第二甲板樓梯 SW2.4 之人員經由

水密門 WT1.5 連接後露天甲板 WE1.2，然後經由路徑 PATH3 與樓梯 SW1.4 向上抵達救生艇甲板。

4.2 夜間緊急撤離案例

依火災安全系統章程 (FSS Code) 第十三章內容，夜間狀況學生初始分佈如下：學生 80 人於第二甲板 12 間學生住艙內。第三甲板與上甲板無學生住艙。依撤離指南附錄一第 2.2 節內容，全體在住艙

內的學生被假設成同時移入走道中。相對應的初始情況如表 7 所示：

表 7 夜間撤離初始狀態

走道	學生數	初始密度 $D(p/m^2)$	初始比流 $Fs(p/(ms))$	計算流率 $Fc(p/s)$	人員初速度 (m/s)
3 rd deck CO3.1	0	0	–	–	–
3 rd deck CO3.2	0	0	–	–	–
2 nd deck CO2.1	30	2.778	0.861	0.775	0.353
2 nd deck CO2.2	36	3.704	0.320	0.288	0.100
2 nd deck CO2.3	14	0.782	0.781	0.703	1.093
2 nd deck CO2.4	0	0	–	–	–
Upper Dk CO1.1	0	0	–	–	–
Upper Dk CO1.2	0	0	–	–	–
Upper Dk CO1.3	0	0	–	–	–

4.2.1 計算 Fs 、 Fc 與 S (表 8)

說明：

1. 進入比流“ Fs in”指進入逃生路徑元素的比流，使用公式 (4) 計算；最大比流指表 2 所提供之最大允許比流；比流指用於計算之比流，即進入比流與最大比流兩者中較小的數值；當進入比流大於最大許可比流時，形成等候狀態。
2. 某些樓梯被來自下層 (或上層) 甲板人員與目前甲板人員同時使用；在計算樓梯連接甲板 N 與甲板 $N+1$ (或 $N-1$) 時，考慮的人員為在甲板 N 進入樓梯人員加上全部來自下層 (或上層) 甲板的人員。
3. 來自上甲板水密門 WT1.1 的 30 位學生被假設平分成兩組人員進入路徑 PATH1

與路徑 PATH2。

4. 來自樓梯 SW2.2 與樓梯 SW2.3 的學生進入走道 CO1.2，故人數為 50(= 36 + 14)；隨後分流成 36 人進入走道 CO1.1，14 人進入走道 CO1.3。
5. 進入走道 CO1.1 的 36 位學生被假設平分成兩組人員通過水密門 WT1.2 與水密門 WT1.3。
6. 進入路徑 PATH1 與通過水密門 WT1.2 的人員在樓梯 SW1.2 匯集，故人數為 33(= 15 + 18)；同理，進入路徑 PATH2 與通過水密門 WT1.3 的人員在樓梯 SW1.1 匯集，故人數為 33(= 15 + 18)。

4.2.2 計算 t_F 、 t_{deck} 與 t_{stair} (表 9)

表 8 計算 F_s 、 F_c 與 S

樓梯、門與走道	學生數 (N)		進入比流 F_s in (p/(ms))	最大比流 (p/(ms))	比流 (p/(ms))	計算流率 F_c (p/s)	學生速度 S (m/s)	等候	來自或去向	說明
	自目前路徑	包含其他路徑								
SW2.1	30	30	1.292	0.88	0.88	0.528	0.44	yes	From CO2.1	1
DR2.2	36	36	0.411	1.3	0.411	0.288	—	—	From CO2.2	1
SW2.2	36	36	0.480	0.88	0.480	0.288	0.76	—	From DR2.2	1
DR2.4	14	14	1.004	1.3	1.004	0.703	—	—	From CO2.3	1
SW2.3	14	14	1.171	0.88	0.88	0.528	0.44	yes	From DR2.4	1
WT1.1	30	30	0.754	1.3	0.754	0.528	—	—	From SW2.1	1
PATH1	15	15	0.264	1.3	0.264	0.264	1.2	—	To SW1.2	1,3
PATH2	15	15	0.264	1.3	0.264	0.264	1.2	—	To SW1.1	1,3
DR1.1	36	36	0.410	1.3	0.410	0.287	—	—	From SW2.2	1
DR1.2	14	14	0.754	1.3	0.754	0.528	—	—	From SW2.3	1
CO1.2	36(前) 14(後)	50	0.410 0.754	1.3 1.3	0.410 0.754	0.287 0.528	1.2 1.1	—	From DR1.1 & DR1.2	1,4
CO1.1	18(左) 18(右)	36	0.205 0.205	1.3 1.3	0.205 0.205	0.144 0.144	1.2 1.2	—	From CO1.2	1,4
WT1.2	18	18	0.144	1.3	0.144	0.101	—	—	To SW1.2	1,5
WT1.3	18	18	0.144	1.3	0.144	0.101	—	—	To SW1.1	1,5
SW1.1	33	33	0.608	0.88	0.608	0.365	0.66	—	To Muster Stn	1,6
SW1.2	33	33	0.608	0.88	0.608	0.365	0.66	—	To Muster	1,6
CO1.3	14	14	0.587	1.3	0.587	0.528	1.2	—	To WT1.4	1,4
WT1.4	14	14	0.753	1.3	0.753	0.527	—	—	To SW1.3	1
SW1.3	14	14	0.880	0.88	0.880	0.528	0.44	—	To Muster Stn	1

表 9 計算 t_F 、 t_{deck} 與 t_{stair}

項目	人數 N	長度 L (m)	計算流率 F_c (p/s)	速度 S (m/s)	流動時間 t_F (s) $t_F = N/F_c$	甲板或樓梯時間， t_{deck} , t_{stair} $T = L/S$	進入
CO2.1	30	12	0.775	0.353	38.7	34.0	SW2.1
CO2.2	36	10.8	0.288	0.100	125	108	DR2.2
CO2.3	14	23.1	0.703	1.093	19.9	21.1	DR2.4
DR2.2	36	—	0.288	—	125	—	SW2.2
DR2.4	14	—	0.703	—	19.9	—	SW2.3
SW2.1	30	5.4	0.528	0.44	56.8	12.3	WT1.1
SW2.2	36	5.4	0.288	0.76	125	7.1	DR1.1
SW2.3	14	5.4	0.528	0.44	26.5	12.3	DR1.2
DR1.1	36	—	0.287	—	125	—	CO1.2
DR1.2	14	—	0.528	—	26.5	—	CO1.2

表 9 計算 t_F 、 t_{deck} 與 t_{stair} (續)

項目	人數 N	長度 $L(m)$	計算流率 $Fc(p/s)$	速度 $S(m/s)$	流動時間 $t_F(s)$ $t_F = N/Fc$	甲板或樓梯時間， t_{deck}, t_{stair} $T = L/S$	進入
CO1.1	18 18	3.4 3.4	0.144 0.144	1.2 1.2	125 125	2.8 2.8	WT1.2 & WT1.3
CO1.2	36 14	4.2 3.2	0.287 0.528	1.2 1.1	125 26.5	3.5 2.9	CO1.1 & CO1.3
CO1.3	14	3.2	0.528	1.2	26.5	2.7	WT1.4
WT1.1	30	-	0.528	-	56.8	-	PATH 1& 2
WT1.2	18	-	0.101	-	178	-	SW1.2
WT1.3	18	-	0.101	-	178	-	SW1.1
WT1.4	14	-	0.527	-	26.6	-	SW1.3
PATH1	15	18	0.264	1.2	56.8	15	SW1.2
PATH2	15	20	0.264	1.2	56.8	16.7	SW1.1
SW1.1	33	3	0.365	0.66	50	4.5	DS1.1
SW1.2	33	3	0.365	0.66	50	4.5	DS1.2
SW1.3	14	3	0.528	0.44	26.5	6.8	DS1.3

4.2.3 計算 $t_{assembly}$

全部學生 80 人進入救生艇甲板即完成撤離程序。本例中，育英二號沒有另外設置召集站艙間集合旅客後再引導至登艇位置，故本例不計算救生艇甲板移動時間，僅列出表格供參照使用，故 $t_F = 0$ 、 $t_{assembly} = 0$ (如表 10 所示)。

4.2.4 計算 T

旅行時間 T ，依據撤離指南附錄一，是最大 $t_i (= t_F + t_{deck} + t_{stair} + t_{assembly})$ 乘以 2.3 (= 2 + 0.3，夜間修正因素與逆向流修正因素之和)。每一個逃生路徑 t_i 的最大值如表 11 所示。

表 10 計算 $t_{assembly}$

項目	人數 N	長度 $L(m)$	計算流率 $Fc(p/s)$	速度 $S(m/s)$	流動時間 $t_F(s)$ $t_F = N/Fc$	召集甲板時間， t_{deck}, t_{stair} $T = L/S$	進入
DS1.1	33	-	-	-	-	0	召集站
DS1.2	33	-	-	-	-	0	召集站
DS1.3	14	-	-	-	-	0	召集站

表 11 計算 T

逃生路徑甲板	t_{deck}	t_f	t_{stair}	$t_{assembly}$	t_I	T	說明
2 nd Deck fore	50.7	56.8	16.8	0	124.3	285.9	1,2,3
2 nd Deck middle-fore	114.3	125	11.6	0	250.9	577.1	1,2,3
2 nd Deck middle-after	26.7	26.6	19.1	0	72.4	166.5	1,2,3

說明：

1. 甲板旅行時間 (t_{deck})，是自人員最初開始撤離的甲板至召集站所在的甲板必須旅行通過的各層甲板平面走道或路徑的時間加總。第二甲板艙中央走道 34 秒，上甲板路徑一或二 16.7 秒，總共 50.7 秒。
2. 流動時間 (t_f)，是記錄自人員開始撤離的甲板至召集站在整個逃生路徑上記錄的最大流動時間。
3. 樓梯的旅行時間 (t_{stair})，是自人員最初開始撤離的甲板至召集站所在的甲板必須旅行通過的全部樓梯的總時間；本例中學生自第二甲板艙中央走道 CO2.1 經由樓梯 SW2.1 到上甲板需 12.3 秒，自上甲板經樓梯 SW1.1 或 SW1.2 到救生艇甲板需 4.5 秒，總共 16.8 秒。學生自第二甲板艙前中央走道 CO2.2 經由樓梯 SW2.2 到上甲板需 7.1 秒，自上甲板經樓梯 SW1.1 或 SW1.2 到救生艇甲板需 4.5 秒，總共 11.6 秒。學生自第二甲板艙後中央走道 CO2.3 經由樓梯 SW2.3 到上甲板需 12.3 秒，自上甲板經樓梯 SW1.3 到救生艇甲板需 6.8 秒，總共 19.1 秒。

4.2.5 辨識擁塞 (Identification of Congestion)

擁塞發生於第二甲板 (走道 CO2.2、樓梯 SW2.1 與樓梯 SW2.3)。但是，總撤離時間應與撤離指南 (MSC.1/Circ. 1238) 要求之績效標準做比較：

$$1.25(10 + 9.62) + 2/3(30) = 44.53 \leq 60$$

其中， $E + L$ 假設等於 30 分鐘， A 等於 10 分鐘 (夜間)， T 等於 9.62 分鐘 (577.1 秒)。滿足海上人命安全公約的要求時間與客船撤離指南的績效標準。

伍、實習船演習

99 年 12 月 23 日在育英二號訓練船，國立基隆海事職校航海科高三與高二學生 74 人，教師 4 人與駕駛部實習生 4 人，技術大副與技術大管總共 83 人參與演習。當日演習分成兩種程序，第一種方式為學生直接自住艙穿著救生衣後，依所屬主垂直區樓梯逕行撤離至救生艇甲板，此情境可模擬水密門封閉後，各艙間學生撤離狀況。第二種方式為學生自住艙先前往學生餐廳集合，然後分兩條路線前往救生艇甲

板集結。演習說明在第二甲板學生餐廳舉行，並分配學生住艙與撤離路徑。帶離餐廳後，學生自住艙衣櫃取出救生衣與安全帽穿著整齊。由駕駛部實習生帶領下，熟悉撤離路線。

11:15 分發出棄船信號，七短聲接一長聲鈴聲響完畢後開始撤離，因第一主垂直區與第二主垂直區學生均集中於左舷上甲板樓梯 SW12，排隊等候直到全員抵達小艇甲板集合完畢，耗時 255 秒 (4'15")。11:40 分再次發出棄船信號，人員依指定路線撤離，第一主垂直區抵上甲板後，走右舷樓梯 SW11，第二主垂直區人員抵上甲板後，走左舷樓梯 SW12，第三主垂直區人員抵上甲板後，走左舷樓梯 SW13，耗時 86 秒 (1'26")。

13:30 分發出棄船信號，路線依指派

方式，但本次包含穿著救生衣時間，共耗時 174 秒 (2'54")。13:45 分發出棄船信號，不包含穿著救生衣時間，耗時 104 秒 (1'44")。接著進行餐廳集合完畢後的撤離演習。人員著裝完畢後集中於學生餐廳，由技術大管指派兩條疏散路徑。餐廳前方 37 位學生走第二甲板樓梯 SW22 至上甲板，然後經右舷樓梯 SW11 抵達小艇甲板第一號救生艇登艇位置；餐廳後方學生 37 人走第二甲板樓梯 SW23 至上甲板，然後經左舷樓梯 SW13 抵達小艇甲板第二號救生艇登艇位置。約 14:10 分發出棄船信號，耗時 114 秒 (1'54")。重複相同動作於 14:15 分再次發出棄船信號，耗時 104 秒 (1'44")。

整理演習記錄如表 12 和表 13 所示。

表 12 人員自主垂直區 (MVZ) 向上撤離時間 (單位：秒)

No. of drill	1 st and Last time	MVZ1(30P)	MVZ2(36P)	MVZ3(8P)
I	1 st arrival	20	19	24
	Last arrival	82	110*	36
II	1 st arrival	26	23	23
	Last arrival	81	104*	36
III	1 st arrival	16	26	13
	Last arrival	77	106*	33
IV	1 st arrival	19	17	15
	Last arrival	81	98*	30

*代表完成全部撤離時間

表 13 人員自學生餐廳集合後分兩路徑向上撤離 (單位：秒)

No. of drill	1 st and Last time	Forward(37P)	Afterward(37P)
I	1 st arrival	24	12
	Last arrival	114*	80
II	1 st arrival	26	15
	Last arrival	104*	71

*代表完成全部撤離時間

有關步行速度測量，則由男生與女生各十位，步行平面走道 CO2.2 長 10.8 公尺、寬 1.2 公尺，上樓樓梯 SW23 長 5.4 公尺、寬 0.6 公尺，得到平均數據如表 14 所示。

表 14 高職學生步行速度參數

女生平面	女生上樓梯	男生平面	男生上樓梯
1.52m/s	0.83m/s	1.68m/s	0.84m/s

表 14 中步行速度參數與國際海事組織「新建造與現成客輪撤離分析指南」(MSC.1/Circ. 1238) 所提供之平面步行速度 1.2 m/s，上樓梯步行速度 0.8 m/s 略有出入，探究其原因，參與此次演習的高職學生平均年齡約 17~18 歲，且有重複演練的「學習效果」與彼此競爭心理，故速度稍快且整體演習時間也有縮短的趨勢。當日演習分成兩種程序，其一為學生直接自住艙穿著救生衣後，依所屬主垂直區樓梯逕行撤離至救生艇甲板，此情境可模擬水密門封閉後，各艙間學生撤離狀況，如未事先規定路線，則擁擠現象發生在上甲板樓梯 SW1.2 處。其二為學生自住艙前往學

生餐廳集合，然後分兩條路線前往救生艇甲板集結，此方式的優點是可在學生餐廳點名確認人數，然後由資深船員引導撤離至救生艇甲板，較不容易發生擁擠，但缺點是喪失在第一時間立刻撤離的先機，故適合天候不佳時與船艙內無火災煙霧等影響時演練。

陸、結論與建議

本研究將國際海事組織頒佈與客船撤離分析相關之要求標準及演算方法詳細試算完成，明確指出撤離計畫的分析過程。在進行分析前精確地比對船舶設計圖，並實地丈量現場驗證逃生路徑設施尺寸之正確性。其次將住艙平面圖 (accommodation plan) 轉化成撤離路網圖 (evacuation network)，經由系統描述描繪出逃生路徑之指派，最後利用緊急疏散流體模型計算出總撤離時間及辨識出擁塞發生位置。

由於總撤離時間約為 45 分鐘並未超出國際公約之要求的 60 分鐘，因此在主

要逃生路徑及人員撤離方向之指派，可以依照本研究系統描述之內容制定逃生方法。辨識出擁塞的位置則建議由資深船員在現場維持等候秩序，避免因排隊而發生之衝突。

整體而言，客船在設計建造之初，即應考量事故發生後，人員的緊急撤離計畫。但由於撤離分析方法遲至 2007 年才正式頒佈，故許多現成客船仍未依本研究應用的方法加以試算。真正的客輪乘客之人口統計因素差異大，不論年齡、性別、行動能力等，均不能等同於實習船學生，因此有必要加權計算預期的撤離時間。另外撤離分析很難加以驗證，在真實客輪上，亦不若學生訓練船可以反覆操演訓練完全依照計畫實施。

學者們發展出若干船舶撤離計畫可行解或最佳解，但對船上實際負責執行訓練及操演的船長或船副等官員 (officer)，在應用上有相當困難。可能需要購置專業軟體，還需學習軟體如何使用，有些牽涉複雜的計算 (如等候理論等)。本案之優點為只要具備電子試算表 (如 Excel) 使用能力，即可上手計算，且有學者理論支持，故雖不一定是最佳方案，但為一簡單可行方案，可提供給船上官員實務作業時模仿應用。

本研究案例選擇夜間撤離的原因是睡眠時間人員應在住艙內，在隸屬的主要垂直區 (MVZ) 內就近選擇逃生路徑是合理的方案，較白天活動狀態時容易掌握人員分

配位置。即使不在住艙內，當棄船警報發出時，人員通常是先回到住艙穿著救生衣後，再向召集站集合，故由住艙出發計算撤離時間是最基本的考量。

本研究提供出建議給港務局安全檢查人員，對造訪我國港口之客船要求出示緊急撤離計畫 (EEP) 及撤離分析 (EA) 以保障海上人命安全及彰顯我國對港口國管制 (PSC) 內涵的落實。

參考文獻

- Bakuli, D.L. and Smith, J.M., 1996. Resource allocation in state-dependent emergency evacuation networks. *European Journal of Operational Research*, 89, 543-555.
- Chalmet, L.G., Francis R.L. and Saunders, P.B., 1982. Network models for building evacuation. *Management Science*, 28, 86-105.
- Cheah, J.Y. and Smith, J.M., 1994. Generalized M/G/C/C state dependent queueing models and pedestrian traffic flows. *Queueing Systems*, 15, 365-386.
- Chu, C.W. and Pan, C.Z., 2005. Emergency Evacuation Route For The Passenger Ship. National Science Council of Taiwan, NSC 96-2416-H-019-006,
- Cruz, F.R.B. and Smith, J.M., 2007. Approximate analysis of M/G/c/c state-dependent queueing networks. *Computers & Operations Research*, 34, 2332-2344.

- Cruz, F.R.B., Smith, J.M. and Medeiros, R.O., 2005a. An M/G/C/C state-dependent network simulation model. *Computers & Operations Research*, 32, 919-941.
- Cruz, F.R.B., Smith, J.M. and Quirroz, D.C., 2005b. Service and capacity allocation in m/g/c/c state-dependent queueing networks. *Computers & Operations Research*, 32, 1545-1563.
- Fahy, R.F., 1991. EXIT89: an evacuation model for high-rise buildings. *Fire Safety Science-Proceedings of the Third International Symposium*, pp. 815-823, Edinburgh, UK.
- Galea, E.R., 2000. Safer by design: using computer simulation to predict the evacuation performance of passenger ships. in *Proc. IMarE Conf. 112(2), Safety of Large Passenger Ships*, ISBN 1-902536-31-2, pp. 23-32, London.
- Galea, E.R., Flippidis, L., Lawrence, P.J. and Owen, M., 1998. An evacuation demonstration of a typical high speed craft using the EXODUS Evacuation model. *Report prepared by FSEG for RINA, Ref G/DG/1998/000116*, London.
- Gwynne, S., Galea, E.R., Lyster, C. and Glen, I., 2003. Analysing the evacuation procedures employed on a Thames passenger boat using the maritime EXODUS evacuation model. *Fire Technology*, 39, 225-246.
- Jarvis, J.J. and Ratliff, H.D., 1982. Some equivalent objectives for dynamic network flow problems. *Management Science*, 28, 106-109.
- Karbowicz, C.J. and Smith, J.M., 1984. A K-shortest path routing heuristic for stochastic network evacuation models. *Engineering Optimization*, 7, 253-280.
- Kisko, T.M., Francis, R.L. and Nobel, C.R., 1998. *Evacnet4 User's Guide*, University of Florida.
- Lee, D., Park, J.H. and Kim, H., 2004. A study on experiment of human behavior for evacuation simulation. *Ocean Engineering*, 31, 931-941.
- Løvås, G.G., 1998. Models of way-finding in emergency evacuations. *European Journal of Operational Research*, 105, 371-389.
- Løvås, G.G., 1995. On performance measures for evacuation systems. *European Journal of Operational Research*, 85, 352-367.
- Nelson, H.E. and MacLennan, H.A., 1995. *SFPE Fire Protection Engineering Handbook*, 2nd Edition, National Fire Protection Association, NFPA, Section 3/Chapter 14, pp. 286-295
- Park, J.H., Lee, D., Kim, H. and Yang, Y.S., 2004. Development of evacuation model for human safety in maritime casualty. *Ocean Engineering*, 31, 1537-1547.
- Paul, J., 1987. Calculating evacuation times for tall buildings. *Fire Safety Journal*, 12, 213-236.

- Poon, L.S., 1994. EvacSim: A simulation model of occupants with behavioural attribute in emergency evacuation of high-rise building fires. *Fire Safety Science-Proceedings of the Fourth International Symposium*, pp. 681-692, Ottawa, Canada.
- Shestopal, V.O. and Grubits, S.J., 1994. Evacuation model for merging traffic flows in multi-room and multi-story buildings. *Fire Safety Science-Proceedings of the Fourth International Symposium*, pp. 625-632, Ottawa, Canada.
- Smith, J.M., 1991. State-dependent queueing models in emergency evacuation networks. *Transportation Research Part B*, 25B(6), 373-389.
- Stepanov, A. and Smith, J.M., 2009. Multi-objective evacuation routing in transportation networks. *European Journal of Operational Research*, 198, 435-446.
- Talebi, K. and Smith, J.M., 1985. Stochastic network evacuation models. *Computers & Operations Research*, 12, 559-577.
- Thompson, P.A. and Marchant, E.W., 1994. Simulex: developing new computer modeling techniques for evaluation. *Fire Safety Science-Proceedings of the Fourth International Symposium*, pp. 613-624, Ottawa, Canada.
- Weinroth, J., 1989. An adaptable microcomputer model for evacuation management. *Fire Technology*, 4(4), 291-307.
- Yuhaski, S.J. and Smith, J.M., 1989. Modeling circulation systems in building using state dependent queueing models. *Queueing Systems*, 4, 319-338.