

以對局理論與模擬模式研析護航作戰燃燒基準點之最佳戰術策略

■ 王貴民、梁克新、韓慧林、陳珈君、郭芷君、林廷容、蘇靜怡 ■

提 要：

- 一、我國屬海島型國家，島上資源貧瘠，重要能源的對外依存度皆趨近100%，海上航運的安全成為眾多海島型國家與大國的重要國安與戰略議題，海上護航能力幾乎成為國防發展之首要考量。
- 二、反潛護航作戰為維護航運最重要的軍事手段，主要因素包括敵潛艦能力、護航屏衛設計、主體速率與雙方接戰策略等。
- 三、本研究針對我國現況威脅與兵力，針對雙方接戰策略中之燃燒基準點(Flaming Datum)議題，運用「軍事作業研究」之對局理論與模擬模式尋求雙方最佳策略。
- 四、結果顯示，在燃燒基準點產生後，藍方反潛兵力面對紅方潛艦之三種迴避策略，其反潛作戰效益有限。雙方最佳策略分別為：藍軍為機艦協同反潛護航作戰兵力組合；紅軍潛艦為設法潛於慢速船團下方，在噪音掩蔽下伺機脫離。

關鍵詞：反潛作戰(ASW)、迴避、搜索、模擬、對局、策略

壹、前言

「決策(Decision Making)」課題之難易不外乎決策資訊之特性，如決策者掌握確定性(Certainty)資訊，完全知道所面臨的問題或替代方案，而對每個可能解決方案及其結果也能清楚預判；或是決策者可以界定問題，但必須冒可承受失敗之風險(Risk)或

機率，指出某些事件發生之機率，並能辨認可行的替代方案，以及每個替代方案對於達成決策目標的機率；亦或在不確定性(Uncertainty)之決策情境下，缺乏足夠的資訊來推估替代方案結果的機率¹。顯而易見的，決策品質除因掌握資料之特性外，決策者之判斷亦影響甚鉅；因此，「對與錯」之間的決策並不難，一般人都可以輕易做判斷，

註1：林建煌，《管理學》，(桃園，新陸書局股份有限公司，民國99年12月)，頁138-140。

其結果也較不易引起別人的反對，如酒駕上路對否？吸毒賭博對否？…等；但是要在「對與對」之間找出真正的道路，若非卓越的領導者就難以做到，如在戰力確保與提升之前題下，建軍之優先順序、應建立何種軍事能力、應籌獲何種武器系統、應採用何種組合之護航兵力、反潛時敵可能採取迴避方案之戰術判斷與因應措施、…等。哈佛大學教授貝達羅可將決策者經常遭遇「對與對」之抉擇時刻稱之為「關鍵時刻」(Defining Moments)²。因為，「對與對」最難之處在於世間並沒有絕對的對或錯，也沒有一套系統或方法能完美的求取出一個讓各方都可以接受的方案。從法律規範、道德觀、個人與組織價值、甚至個人成長過程與人情包袱，都很可能站在「對與對」決策者的另一方，左右人們的決策。當然，也沒有一套絕對的方法或答案，可以讓所有決策者在對與對之間找到放諸四海皆準的選擇。所以，在面臨重大決策之際，也就是所謂的「關鍵時刻」，決策之正確與否，是彰顯指揮官能力的重要指標，也維繫者後續作業或工作推展能否順遂成功之關鍵。

作戰決策的判斷與選擇係因人而異，但是決策的科學程序卻往往相同。應用於作戰決策上的科學方法很多，但多以作業研究(Operations Research, OR)為主，OR的主要程序首在綜合研判戰局後，針對我方能力與敵可能行動提出數種可行作戰方案，接續

以量化方法進行各方案之量化作業，最後提出量化結果供作決策之選擇；然完全理性決策假設及其流程包括：問題要明確清晰、目標導向、已知的方案、明確的偏好(權重值)、穩定的偏好、沒有時間與成本的限制、最大的報償等決策評選作業，雖有跡可循，但如西蒙(Herbert Simon)在有限理性表示，決策者無法將決策的所有複雜性完全納入考慮，大部分的個人或組織決策都無法出於完全明確與理性，只能從所面臨的問題去掌握重要的因素、導出作業概念與邏輯並建構出一個具問題代表性的模式，在有限的資訊及評析處理過程後從諸多可行方案中求取最佳選擇，做為後續行動的準據³。

二戰期間，由於德軍潛艦之海上作戰活動積極，U型潛艦成功的襲擊成效曾困擾盟軍甚久；因此，由英國軍方統合近千名作戰軍官、數理化與工學學者/科學家、武器系統及行為專家，腦力激盪為解決軍事決策中之戰略與戰術難題所發展出之作戰量化分析方法，即JOR，研擬「反制敵封鎖」之作戰能力提升、建立與因應方案，破解U型潛艦的海上難題⁴。

本研究之背景是依據國軍主要任務—「反制封鎖，維護海空交通命脈」為決策課題，並以「…戰時統合三軍聯合戰力，反制敵封鎖兵力，開闢海、空安全航道，維持聯外交通，以確保我持續運作…⁵」為戰術指導作為，理出以護航作戰達成任務之重要手段

註2：石茲宜著，《在對與對之間掙扎》，(臺北，天下雜誌，民國87年10月)，頁42-45。

註3：同註1，頁141-149。行政模式的主要論點：(1)管理者所擁有的資訊是不完整且不完美的。(2)決策是在有限理性下達成的。(3)決策是追求滿意解，而不是追求最佳解。

註4：R. Panneerselvam, Operations Research(PHI Learning Pvt. Ltd., 2006)

註5：《中華民國98年國防報告書》，(臺北，中華民國國防部，民國98年)，頁79-80。

。研究目標為研析護航作戰燃燒基準點敵對雙方之最佳戰術策略。設定燃燒基準點想定及戰術策略，應用OR中之對局理論(Game Theory)與系統模擬模式(Modeling and Simulation)進行量化分析並依據所導出之結果提出討論與分析，以做為指揮官戰場判斷與決策之參考。

貳、研究背景與文獻探討

我國屬於外銷導向之海島型國家，無天然資源，進口能源依存度占總能源使用的99.25%⁶顯示台灣能自行供應所需之民生及工業用能源僅0.75%，若能源供應出現困難，對我國民生經濟與政治穩定之影響將難以估計。若排除能源、大宗物資供應國的貨源供應問題，產生進口困難的原因最可能的就是海上運輸出現問題，例如船運問題、承平時期的海盜襲擾劫持與戰時海上交通線(Sea Line Of Communication, SLOC)之遭封鎖或我商油船遭攻擊等。成功的反封鎖可以讓國內需求民生物資之進口得以安全送達，維持國家之正常運作，而護航作戰則扮演達成運輸船隊海上安全之重要戰術作為。

護航作戰(Convoy)歷史可追溯到12世紀初期，以反制海盜為主。17世紀到19世紀大

都屬海權爭霸為主之海戰，期間因對手常以水面艦攻擊或掠奪船團主體，故產生了以護航作戰為主軸的著名海戰多起，包括「荷英波特蘭海戰」、「英法韋桑海戰」、「荷英多格灘海戰」、「法英六月一日光榮戰役」與「英法柔佛海戰」。因商船獨航之戰損率過高，在拿破崙戰役後期，英國發佈所有商船必須納入護航編隊內，否則不得航行之規定⁷。一戰後之護航作戰主要威脅為潛艦，戰爭初期德國U型潛艦獵殺獨航之英國商船迭有所獲，然在英國採行護航作戰措施後，潛艦之攻擊頓時為之遏阻。德國為突破護航措施，隨即發展「狼群戰術」，在航道上以聚集優勢潛艦兵力與協同作戰方式趁夜佔位並同時對護航船團發起攻擊，重新取得攻擊船團之優勢⁸。互二戰期間(1939-1945年)，遭U型潛艦擊沉之盟軍商船為2,771艘(其中的1709艘為669個護航航次之總損失，平均每航次的商船損失為2.55艘)；而遭盟軍擊沉之U型潛艦為821艘⁹，其中U型潛艦總損失中之47%、31%、6%分別為盟軍之空中兵力、水面艦與海空協同機艦所造成，交換率(商船/U潛艦)為3.38，雖然盟軍之損失慘重，但德軍潛艦之戰損卻因護航作戰有效戰術運用亦居高不下。根據統計，就戰損而言，

註6：中華民國經濟部能源局編，《中華民國98年能源統計手冊》，(臺北，集思創意設計顧問股份有限公司印，民國99年6月)，頁11。

註7：《反潛作戰》，維基百科，網址<http://en.wikipedia.org/wiki/Convoy#Analysis>。其依其類型可分為下面7種。(1)屏衛護航作戰：亦即直接對船隊提供護航支援，防止敵潛艇突襲。(2)反潛支援作戰：即在航道上潛艇威脅區域所實施的支援作戰。(3)港灣防禦作戰：防止敵潛艇偷襲港灣的作戰。(4)反潛佈雷作戰：在敵港灣、基地及海上主要航道佈放水雷，阻止敵潛艇離開其基地。(5)反潛巡邏作戰：對敵潛艇可能出沒之特定區域，或在海上一特定防線，實施有系統且連續不斷的搜索，迫使敵潛艇無法自由活動或穿越防線。(6)反潛獵殺作戰：在敵潛艇可能出沒之海域實施主動搜索，並於發現後殲滅之。(7)反潛打擊作戰：直接對敵潛艇基地進行攻勢作戰。

註8：Daryl2007 website, "World War II: The U-Boat Tactics", Hubpages Inc. 2010.

註9：Daniel Moran, "Sealion to Overlord - Grand Strategy", lecture, Naval Postgraduate School, USA, 2009.

無護航之獨航船隻與護航船團之船隻比率分別為80%與20%¹⁰。歷史教訓可知，對一海島型國家之戰時民生經濟而言，海軍護航作戰之重要性真是不言可喻。

U型潛艦面對護航船團作戰時的戰損多半來自盟軍燃燒基準點(Flaming Datum, FD)戰術之運用。何謂燃燒基準點？盟軍將之定義為潛艦在發起攻擊第一枚魚雷擊中目標之後，因目標燃燒而暴露其概略位置之基準點¹¹。「FD問題」屬於傳統反潛作戰(Anti Submarine Warfare, ASW)議題，主要指船團某船隻遭潛艦魚雷命中時，以燃燒船隻之某範圍內設為潛艦最後位置為基準點(Datum)，反潛兵力迅而進行反潛搜索與獵殺；然潛艦在攻擊後即採迴避措施離開所謂的燃燒基準點以保安全。簡言之，就是潛艦與水面敵對反潛兵力間之警匪間追緝與潛逃之對局¹²。因現代潛艦性能遠遠優於第二次世界大戰期間之U型潛艦，美軍已將具潛射飛彈之潛艦列為FD問題之對象並將FD視為目標短暫暴露其蹤跡後逃逸時重新定位、搜索與獵殺之問題。

美海軍研究院(Naval Postgraduate School, NPS)作業研究所(Department of OR)曾針對現代柴潛艦所形成之FD問題做為研究生論文進行分析研究，方法與結果值得參考。著名的Alan Washburn教授所指導的

兩篇論文，將之簡述如后：(一)智利海軍上尉 Alberto A. Soto運用其所建立之數學模型以系統模擬方式分析潛艦在不同逃逸速率前提下(考量剩餘電瓶電量)，自FD發生後起算反潛直升機在特定遲到時間之成功偵測機率。模擬結果顯示，最佳偵測率發生於遲到時間為10分鐘時；期間第一次吊放聲納之偵測率為0.0722、累積偵測率為0.134；若遲到時間為(30, 60)分鐘時，其第一次吊放聲納時之偵測率為(0.0505, 0.02)、累積偵測率為(0.0196, 0.007)。作者認為潛艦發起對船團之攻擊首要考量之因素為其電瓶，係因電瓶直接影響其逃逸速率更進而決定潛艦存活率¹³。(二)新加坡海軍上校Edmund Cheong Kong Chuan運用二人零和對局(Two-Person Zero-Sum Game, TPZS Game)方法建立逃逸潛艦與反潛直升機之對局，其中反潛直升機採用隨機搜索方式。雙方所考量之策略目標分別為，潛艦：目標一，不理會直升機偵測，全力遠離FD，所產生快速膨脹之FOC將導致直升機搜索範圍擴大從而降低其偵測率；目標二，針對直升機之弱點一留空限制所導致之連續的聲納吊放作業方式，使用直接遠離最近直升機吊放點位置之迴避措施。反潛直升機：目標一，在FOC範圍內執行反潛搜索；目標二，在FOC圈上執行搜索作業。結果顯示：潛艦最佳逃逸策略係保持在「潛艦

註10：Bud Shortridge, "History of Convoys" Usnavy-L Archives, 2007. P.3.

註11：Stan Zimmerman, "Submarine Technology for The 21 Century", Trafford Publishing, 2000.

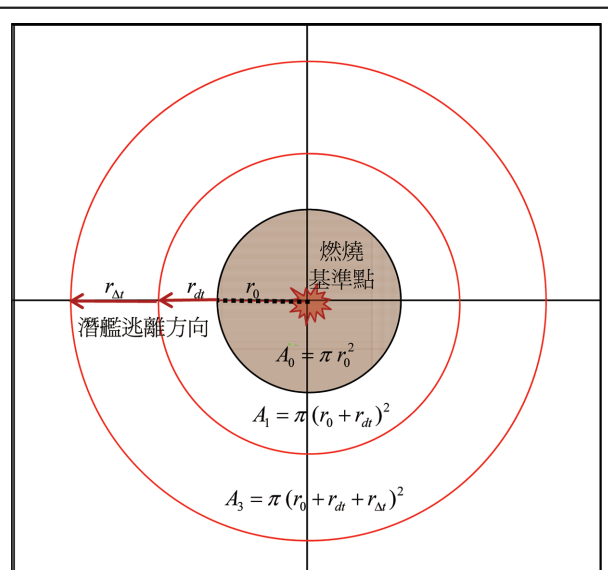
註12：Brian Mccue, "An Agent-Based, Two-Sided, Simulated-Annealing Simulation of a Real-World Search" Or "A Real-World (Pretty Much) Search Game", The 5th International New Horizons In Search Theory Workshop: Investigating New Metrics, USA, 2005.

註13：Alberto A. Soto, "The Flaming Datum Problem with Varying Speed", Thesis, Naval Postgraduate School, CA., USA, 2000, PP.31-41.

最遠距離圈」(Farthest On Circle, FOC)¹⁴圈上而非在FOC圈內；直升機則是在FOC圈內之擇定之海域而非在FOC圈上進行聲納之吊放偵測，由於跟隨並在FOC圈上所能執行的聲納吊放次數因留空時間限制與FOC圈變化量而過少。其中重要考量因素包括：潛艦之電瓶量與維持之最大速率以及直升機留空時間與聲納吊放次數¹⁵。上述兩論文之量化指標均為反潛偵測率，若要進一步檢視FD發生與可能之接戰情況下潛艦是否能安全逃逸，就必須在魚雷攻擊和潛艦之軟殺措施(Counter Measure)議題上進行下一層之分析，筆者運用演化計算(Evolutionary Algorithm)與系統模擬兩種方法對潛艦迴避魚雷所做之效能分析，研究指出若以潛艦為圓心建立起的四個象限做為魚雷的四個來向，所考量因素之組合將不只一種，這些因素包含：潛艦航向、速率、干擾彈(Jammer)與誘標(Decoy)之施放時序。運用演化計算法，每代群組的個體數設為30，經過200代的演化計算後，可獲得最佳化結果，即極大化之潛艦存活率¹⁶。

參、燃燒基準點問題概念與參數說明

若以數學觀點視之，產生燃燒基準點意味著搜索者將要面對不斷膨脹中的不確定區域面積(Area Of Uncertainty, AOU)，並須



圖一 燃燒基準點產生AOU之數學概念圖

資料來源：研究小組發展

設法在這一區域內搜索快速離開中的目標。設AOU的圓心為燃燒基準點，半徑 r_0 則為潛艦魚雷之射程，所形成之圓稱為初始圓，其面積為 $A_0 = \pi r_0^2$ (如圖一)。

一、搜索概念

理論上，產生燃燒基準點(為初始時間， $t=0$)後，追逃雙方演變的邏輯為：(一)逃方之潛艦以背離圓心之最大速率企圖快速迴避以遠離基準點，使初始圓如水面之漣漪一般成為不斷擴大的同心圓，設水面反潛兵力遲到時間(delay time, dt)為 dt ，則潛艦在FOC上之面積為 $A_1 = \pi (r_0 + r_{dt})^2$ 。(二)追方之水面兵力則在 $t=0$ 時起派出反潛兵力再估算之初始圓之圓周範圍某區域以隨機方式進行

註14：FOC 為 Farthest On Circle 之縮寫，為潛艦以大速率逃逸時之最遠距離圈。

註15：Ecinund Cheong Kong Chuan, "A Helicopter Submarine Search Game", Thesis, Naval Postgraduate School, CA., USA, 1988, PP.32-34.

註16：Ko-Hsin Liang, Kuei-Ming Wang, "Using Simulation and Evolutionary Algorithms to Evaluate the Design of Mix Strategies of Decoy and Jammers in Anti-Torpedo TACTICS", Proceedings of the 2006 Winter Simulation Conference, USA, 2006.

反潛搜索、獵殺，此時追方所面對的不是固定範圍的面積，而是持續動態擴大中的同心圓。

假設必須搜索的總時間為 Δt (可藉判斷潛艦的電瓶在最大潛航速率下之續航時間而定)，則計算偵測率所必須搜索之總面積為 $\pi [(r_0 + r_{dt} + r_{\Delta})^2 - r_0^2]$ 。偵測率搜索的覆蓋範圍因子(Coverage Factor, CF)¹⁷是決定對潛艦偵測率的重要因素，設ASW兵力之戰術聲納偵距(Tactical Sonar Range, TSR)為該艦單側寬度($\frac{1}{2}W$)，則反潛艦之搜索寬度為 W 、在 Δt 內所執行之總距離為長(L)，則 $W \cdot L$ 等於有效偵測之面積，可導出短時間內的累積偵測率CF相仿，實際之偵測率呈現指數分配(但在機率極小時因兩者誤差有限可視兩者相仿)，CF則為

$$CF = \frac{WL}{\pi [(r_0 + r_{dt} + r_{\Delta})^2 - r_0^2]} \dots (1)$$

潛艦之攻擊位置傳統上坐落於船團之左右兩側，於燃燒基準點發生後，潛艦逃離區域設為半圓，故(1)之公式中將搜索總面積減半，CF如下

$$CF = \frac{WL}{\frac{1}{2}\pi [(r_0 + r_{dt} + r_{\Delta})^2 - r_0^2]} \dots (2)$$

偵測率 $P(d)$ 之數學模式以CF為主的指數分配，

$$P(d) = 1 - \text{Exp}^{-CF} \dots (3)$$

從上述追逃雙方之目的，雙方之成功與

否，關鍵性因素為速度：就潛艦而言，所使用之逃離速度愈高，其所造成的AOU愈大；反潛兵力而言，到達指定區域之遲到時間愈短， r_{dt} 則愈短，AOU將為之縮小。然而，柴油潛艦之潛航最大速率，新型kilo級潛艦約為20節，在燃燒基準點產生後能否長時維持20節之速率，完全受其電瓶所限制。本研究中假設潛艦之電瓶係處於兩種狀況：最佳狀況，可維持潛航最大速率之持續時間為2小時¹⁸與電瓶不足之狀況。

二、對局分析方法

「對局理論」基本上以兩方對局為主，在研究中為潛艦與護航兵力。對局結果有三種：零和對局、非零和對局與競合理論¹⁹，本研究採零和對局分析，並假設如 $v_{11}=(a_1, b_1)$ 下：紅方設為B方有 $m(j=1, 2, 3, \dots, m)$ 項策略、藍方設為A方有 $n(i=1, 2, 3 \dots n)$ 項策略，對局形成矩陣中之報償值，如 $v_{11}=(a_1, b_1)$ 表示藍方採取 a_1 之燃燒基準點之反潛兵力執行燃燒點產生後之反潛作戰方案與紅方攻擊我船團後所採取迴避之方案 b_1 遭遇後之結果。 $(a_1, b_1) \dots (a_n, b_m)$ 共有 $m \times n$ 個組合， $v_{ij}=(a_i, b_j)$ 為紅藍雙方各採其方案後之模擬結果，即為獵殺潛艦之機率，換以矩陣表示如后：

$$\begin{matrix} a_1 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_n \end{matrix} \begin{bmatrix} v_{11} & v_{12} & \dots & v_{1m} \\ v_{21} & v_{22} & \dots & v_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{n1} & v_{n2} & \dots & v_{nm} \end{bmatrix}$$

註17：United States Naval Academy. Operations Analysis Study Group, "Naval operations analysis", Naval Institute Press, 1977.

註18：Kilo級潛艦維持20節潛航速率可達1.67小時。Philip W. Criswell, Jr., "An Evaluation of the ASSET Campaign Model in a Regional Antisubmarine Warfare Context", thesis, Naval Post Graduate School, 1992, p28.

註19：劉賓陽，《作業研究》，(臺北，麥格羅希爾出版社，民國95年)。

分析邏輯可分為四部分：建立報償矩陣、建立模擬模式與模擬運算、矩陣簡化與運用保守準則求解。

報償矩陣以四步驟依序發展如后：

(一)步驟1—定義對局者：對局雙方為敵對之作戰兵力，設藍方為反潛兵力(A)，紅方為潛艦(B)。

(二)步驟2—策略/方案釐訂：想定作業係經由敵軍部隊、戰力、作戰目標與準則等考量，經合理判斷敵可能行動，結合藍軍作戰目標與兵力大小、外部影響等因素之綜合考量發展各種想定的可行方案。另，包含假設條件：明確背(場)景的律定及關鍵性假設，係由各方專業資訊(料)的匯入與整合，以制訂合理的想定，這些條件例如，作戰時間點、作戰地理環境等。

(三)步驟3—報償值：報償值是對局雙方推出其組合對策之得失結果，可以是貨幣金額，在本研究中為衡量紅藍雙方策略之量化指標，以 v_{ij} 表示，此項指標可由演訓蒐集之累積值或模擬模式計算獲得，本研究將此一指標定義為對潛艦之殺傷率。機率上之殺傷率 $P(k)$ 為偵測率 $P(d)$ 與魚雷命中率 $P(hit)$ 之乘積：

$$P(k) = P(d) * P(hit)$$

(四)步驟4—建立報償矩陣，如(4)，其中「列」代表A(藍軍)所採取之可行方案，「欄」代表B(紅軍)所採取之可行方案， v_{11} 至 v_{33} 則代表A與B之互動結果，此結果由本研究所運用之模擬模式計算產生。

$$\begin{matrix} & \begin{matrix} b_1 & b_2 & b_3 \end{matrix} \\ \begin{matrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{matrix} & \begin{bmatrix} v_{11} & v_{12} & v_{13} \\ v_{21} & v_{22} & v_{23} \\ v_{31} & v_{32} & v_{33} \end{bmatrix} \end{matrix} \dots\dots\dots (4)$$

肆、雙方想定設計與模擬分析

一、想定設計

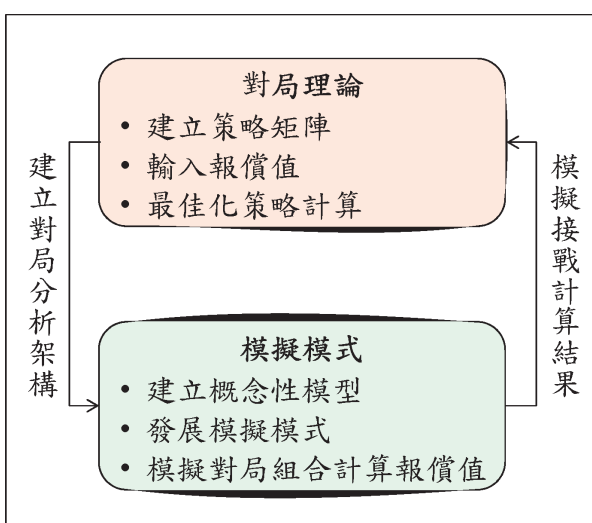
假設追逃雙方互動之場景以紅軍潛艦伏擊藍軍海上護航船團為主要背景。護航支隊以多艘水面艦與空中定翼反潛機對相當數量之主體船團進行直接護航，因航線之隨機選擇可能航經敵潛艦伏擊區，若進入此一區域潛艦即發起對船團之攻擊。產生燃燒基準點後，潛艦立即採取最大可能存活率之迴避策略；水面護航支隊立即採取行動，除儘快護衛船團離開現場減低可能之進一步損失外，亦派出兵力進行反潛作戰。藍方可執行之燃燒基準點戰術兵力有水面反潛艦與定翼反潛機兩類型反潛兵力，而到達指定區域開始執行反潛搜索時之偵潛裝備分別為：反潛艦以主動聲納為主，定翼機則以聲標佈放為主。紅軍潛艦則設定為Kilo級柴潛艦。

紅藍雙方可釐定自認可行之作戰策略，形成紅方潛艦有 m 項策略、藍方兵力有 n 項策略。潛艦在電瓶限制前提下(提供有限之最大潛航速率續航力)，假設有三種可行方案($n=3$)， $B=(b_1, b_2, b_3)$ ： b_1 以最大潛航速率快速遠離燃燒基準點(電瓶最佳狀況)； b_2 設法潛航跟隨於慢速船團下方，尋求噪音掩蔽，伺機脫離(電瓶受限)； b_3 深潛慢速迴避(電瓶最壞狀況)。護航支隊依戰況派遣反潛兵

附表 藍紅軍想定設計之可行策略分析

藍軍策略 \ 紅軍策略	b_1 以最大潛航速率快速遠離燃燒基準點	b_2 設法潛航跟隨於慢速船團下方，在噪音掩蔽伺機脫離	b_3 深潛慢速迴避
a_1 ：水面艦X1	(a_1, b_1)	(a_1, b_2)	(a_1, b_3)
a_2 ：定翼反潛機X1	(a_2, b_1)	(a_2, b_2)	(a_2, b_3)
a_3 ： $a_1 + a_2$	(a_3, b_1)	(a_3, b_2)	(a_3, b_3)

* (a_i, b_j) , $i, j=1, 2, 3$ 表示藍紅軍在不同方案策略下之對局報酬值，以殺傷率計。
資料來源：研究小組發展



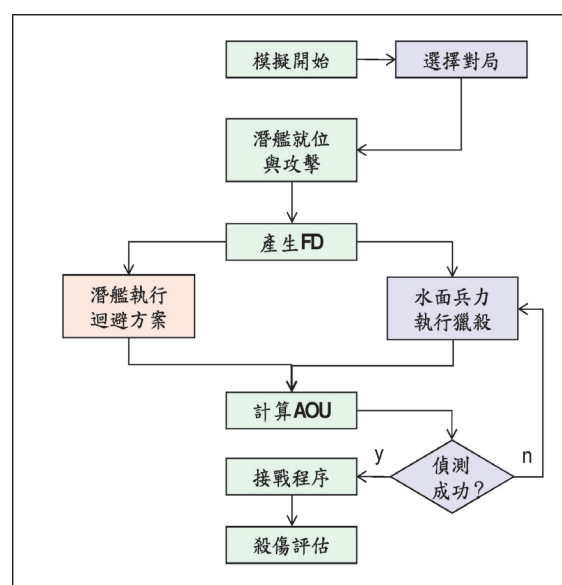
圖二 分析方法間之關係概念

資料來源：研究小組發展

力在FOC海域內執行海上反潛搜索與獵殺，假設兵力之派遣有三種可行策略($m=3$)， $A=(a_1, a_2, a_3)$ ： a_1 水面艦x1； a_2 定翼反潛機x1； a_3 海空兵力協同(即 a_1+a_2)執行反潛獵殺(如附表)。

二、建立模擬模式與模擬運算

本研究以對局理論佈置對局者之策略，並計算出對局者推出其組合對策之得失結果。對局者雙方之互動結果為量化指標，則以本研究小組建立之模擬模式進行500次運算



圖三 燃燒基準點反潛作戰概念性模型

資料來源：研究小組發展

後將量化指標送至對局矩陣求解。對局理論與模擬模式兩方法間之關係(如圖二)。

「模擬模式」採用蒙特卡羅方法，屬於依賴計算機進行重複隨機抽樣的計算演算法，崛起於1940年代，由物理學家應用於美國國家實驗室Los Alamos之核子武器專案之研發上。就其名稱與內涵，其實與摩納哥的蒙地卡羅賭城中之輪盤、丟骰子與吃角子老虎等賭局輸贏之機率相關。此方法之所以大量用於作戰模擬係因戰場之高度不確定性，如

所謂「戰爭迷霧」(The Fog of War)中常見之偵測率、命中率、殺傷率、妥善率、可靠度、任務成功率等。接戰邏輯皆因這些機率之變化而有邏輯上前後接續上之不同，如潛艦因殺傷率之判定被擊沉後，模擬終止，否則反潛兵力將回復到再發射魚雷或重新建立目標標定之事件(Event)接續其邏輯。本案中之模擬，其目的在於運用蒙地卡羅模擬方法對追逃雙方作戰概念所建立之概念性模型進行戰術策略接戰之模擬與分析，並將結果(報償值)回饋到對局矩陣中。

燃燒基準點反潛作戰概念性模型之建立，以紅方潛艦一艘在指定伏擊區內低速潛航、藍軍護航船團，以商船中最低船隻速率為船團速率，艦隊以直接護航方式執行任務，並設計航經潛艦伏擊區方式為基準。針對燃燒基準點之追逃(水面反潛與潛艦迴避)作戰邏輯所發展之概念性模型(如圖三)。空中反潛定翼機之兵力作戰概念同水面反潛艦。

(一)「模擬開始」前，須輸入模擬系統之紅藍雙方初始值，如潛艦與水面/空中反潛兵力載台設計與配備系統之性能等相關參數；雙方初始兵力部署、位置、戰術運動與水文狀態等值。其中之反潛搜索方式設定為水面艦以主動聲納、空中兵力以聲標佈放為主。

(二)「選擇對局」之對局共有9個組合，系統每次完成其中一個完整之對局模擬並求出 v_{ij} ，如執行 a_2 對上 b_1 之模擬，求出 v_{21} 。模擬系統將所有對局有組合完成後，則(4)中之報償矩陣得以完成。

(三)「潛艦就位與攻擊」事件中，系統

之潛艦接戰邏輯設為發現目標→目標選擇→就攻擊位置→目標進入射程→魚雷攻擊。

(四)「產生FD」即魚雷命中商船時，燃燒基準點立即形成，FD之形成，是藍紅追逃對局之啟始，設為FD作戰起始時間 t_0 。

(五)藍軍之戰術考量首以船團整體安全為主，有時傾向以戰術運動或速度離開作戰現場而放棄FD之反潛作戰，本研究基於戰役層級考量：避戰將持續潛艦存在並利其戰力保持之事實，對後續之護航梯次形成安全上之顧慮，更可能令紅方更無所顧忌地實施伏擊作戰，故而必須從護航兵力中派遣反潛載台從事FD之獵殺潛艦行動。「水面兵力執行獵殺」之事件中，變數包括兵力大小、兵力組合與船團離本島之距離(若接近本島，則陸基之空中反潛反應兵力可在短時間內飛抵FD附近之FOC執行反潛獵殺任務；否則，必須由護航支隊中抽取適當兵力執行此任務)。

(六)「潛艦執行迴避方案策略」於系統中設定在「產生FD」事件後隨即開始。在實況中，潛艦選擇何種迴避方案策略完全視現場敵我之動態狀況而定(包括指揮官之決策因素)，本研究以潛艦電瓶狀況做為潛艦迴避方案策略選擇之考量因素。

(七)「計算AOU」事件，為系統根據潛艦之速率計算出所形成之AOU。若反潛兵力以FOC為獵殺之起始點則FOC與反潛兵力之遲到時間息息相關，潛艦之速率愈高，FOC則擴展的愈快，則遲到時間與搜索之範圍將形成正比關係。若反潛兵力能成功偵獲潛艦，則進入攻潛之「接戰程序」；若否，則回到「水面兵力執行獵殺」。「接戰程序」採用

較簡化之「發現-定位-摧毀」(Find-Fix-Finish, FFF)²⁰。

(八)「殺傷評估」中以考量反潛兵力發射之魚雷與潛艦配備之魚雷反制軟殺措施互動下之魚雷成功命中率而定，並非以定值之魚雷命中率計算。實際之模擬模式係依據此一概念性模型發展而成。

經模擬運算所得報償值數據如(5)，

$$\begin{matrix} & b_1 & b_2 & b_3 \\ a_1 & \begin{bmatrix} 0.067 & 0.01 & 0.14 \end{bmatrix} \\ a_2 & \begin{bmatrix} 0.120 & 0.05 & 0.03 \end{bmatrix} \\ a_3 & \begin{bmatrix} 0.179 & 0.12 & 0.21 \end{bmatrix} \end{matrix} \dots\dots\dots (5)$$

矩陣(5)所列報償值為追擊反潛兵力與迴避潛艦間不同戰術決策下之作戰結果，如組合(a₁, b₁)為水面艦追擊以最大潛航速率快速遠離燃燒基準點之潛艦，其成功擊沉潛艦之機率為0.067。

三、矩陣簡化

減少矩陣總策略略有利於矩陣後續作業之便利性，其間必須注意去除的策略略會影響到屬性的排列，故而採用一種經由兩兩策略間之凌越關係(Domination)實施簡化作業，本研究應用其矩陣之列留大去小、欄則留小去大，逐步刪去不利策略，以達到矩陣簡化之目的，這種簡化矩陣之方式稱為凌越準則。矩陣(5)列中之a₃大於a₂與a₁，可刪去a₂與a₃；b₂欄位中所有報償值皆比b₁為小以凌越準則將b₁去除，可得矩陣(6)。依此極簡化之矩陣就能快速解題。

$$\begin{matrix} & b_2 & b_3 \\ a_3 & \begin{bmatrix} 0.12 & 0.21 \end{bmatrix} \end{matrix} \dots\dots\dots (6)$$

為能一窺對局中最佳化作業全貌，本研究將放棄凌越準則，直接以(5)之矩陣進行計算。

四、運用保守準則求解

保守準則係針對對局理論所假設的對局者，皆會採取保守立場。在本研究中，依據此準則之精神對矩陣中之報償值設定A(列)為「得」，B(欄)為「失」。並選擇最佳策略所用準則：A採小中取大準則(Maximin Criterion)，先找出各策略的最小值(此為其最小獲得，可視為最大損失)，然後選取這些最小值中的最大值；B採大中取小準則(Minimax Criterion)，先找出各策略的最大值(此為其最大損失)，然後選取這些最大值中的最小值進行最佳化作業。以矩陣(5)而言，可將之轉換成易讀之矩陣(7)，再依保守準則持續作業；

$$\begin{matrix} & & & B(潛艦) \\ & & b_1 & b_2 & b_3 & Min \\ A(反潛兵力) & a_1 & \begin{bmatrix} 0.067 & 0.01 & 0.14 \end{bmatrix} & \mathbf{0.01} \\ & a_2 & \begin{bmatrix} 0.120 & 0.05 & 0.03 \end{bmatrix} & \mathbf{0.03} \\ & a_3 & \begin{bmatrix} 0.179 & 0.12 & 0.21 \end{bmatrix} & \mathbf{0.12} \\ Max & \mathbf{0.179} & \mathbf{0.12} & \mathbf{0.21} \end{matrix} \dots\dots\dots (7)$$

矩陣(7)在A與B之最後增列一個欄位做為準則的第一個判斷：A取各列之最小值置於最右欄(Min)中；B取各欄中最大值置於最下列(Max)中。

準則的第二個判斷則在矩陣(7)之最後的欄位中進行作業，如矩陣(8)之最右增加欄位(Max)中取最大值為0.12；最下增列中(Min)則取最小值0.12(皆以粗框標示部分)。

註20：Roy E. Rice, Quantifying "Persistence" in the Context of Find-Fix-Finish (FFF) (Phalanx, 2007).

		B(潛艦)			
A (反 潛 兵 力)		b_1	b_2	b_3	
	a_1	0.067	0.01	0.14	Min
	a_2	0.120	0.05	0.03	0.01
	a_3	0.179	0.12	0.21	0.03
					Max
		Max	0.179	0.12	0.21
		Min			

..... (8)

依據對局理論之特性，若A的Maxmin=B的Minmax時屬於單純策略(Pure strategy)，會產生均衡結局亦稱穩定解，此報酬值亦稱鞍點(Saddle Point)。依據(8)之計算，0.12同屬A的maxmin與B的minmax，是故，這個矩陣具有鞍點，其值為0.12，因而屬於單純策略，A、B的最佳解分別為A策略中之 a_3 與B策略中之 b_2 ，亦即雙方遭遇時的策略分別為：藍軍派遣水面艦與空中反潛機各一以進行協同反潛(為策略 a_3)；而紅潛艦之策略選擇以設法潛航跟隨於慢速船團下方，在噪音掩蔽下伺機脫離(為策略 b_2)。若以(6)之簡化矩陣進行對局之最佳化作業，可更精確並減少人為之錯誤。

五、分析與討論

(一) 效益分析

經最佳化分析，護航支隊宜採策略三，顯示海空協同作戰在預判快速膨脹的FOC所形成之AOU時面對紅方潛艦之三種策略皆擁有最佳之效益；而紅方之最佳策略並非以傳統式之最大速率遠離FD，而是反其道潛入船團下方之策略有最高的存活率，其中 b_2 面對A中各策略之存活率為 $(1-0.01, 1-0.05, 1-0.12)=(0.99, 0.95, 0.88)$ 。

本研究運用軍事作業研究中的對局理論為主要方法建立策略矩陣並運用最佳化作業準則，並以模擬模式計算矩陣中之報償值，對護航作戰紅藍雙方進行戰術決策分析。其中顯示，傳統燃燒基準點之反潛議題核心建立在反潛兵力的遲到時間，只要遲到時間愈短則所造成的AOU愈小，相對能提高對潛艦之偵測率。無論是相關文獻的探討與本研究的模擬皆可以觀察到一個不利於反潛作戰的現象一對潛艦的低偵測率，如單機/艦在AOU中的最高成功獵殺之命中率僅為0.14，這表示在燃燒基準點發生後僅派出單一機/艦所達成的效果並不高。而在潛艦電瓶充足前提下，海空協同反潛搜索可達到0.21的作戰成效，較單機/艦雖提升50%，然效益仍然偏低。

就假設條件，具有反潛效果的原因除傳統思維的AOU大小外，也不能忽視AOU內產生高效益的反潛作戰方式，相關因素還應該包括主體護航兵力的數量與運用(如直接護航兵力與燃燒點產生後的反應兵力)、主體速率、多重屏衛設計與監視範圍以及預判潛艦在電瓶因素下的可能策略等。

(二) 想定分析

敵我兩軍之戰術作為，瞬息萬變，想定之內容往往因作戰軍官之需求研判，或期望驗證某項作戰指揮準則時，要不要更明確與簡化之程度，亦或增加不同之其他可能策略，如海域深度、海床狀況與潛艦潛深允許狀況下可以假設潛艦會在 $A_0 = \pi r_0^2$ 內找有利之區域靜音坐底。為了評估或驗證多種「What-If」的想定作為，亦稱敏感性分析

(Sensitivity Analysis)法，它可以有系統地改變一個模式的參數以確定觀察變數變化帶來的影響，增加提供參與研究之團隊一套腦力激盪之作業模式。

(三) 決策理論分析

當可行策略的執行結果屬於不確定狀況時，可應用決策理論(Decision Theory)制訂決策。使用決策理論的程序有下列步驟：

1. 列出可能的可行策略。基本的假設可行策略的數量是有限的。
2. 列出事件(機會或狀態)，其為管理者無法影響與控制的可行策略結果。
3. 計算各可行策略在不同事件下的報償值，通常是總利潤或者總成本。報償表(Payoff Table)可顯示各可行策略在可能事件下的報償值大小。
4. 評估各事件發生的可能性，運用歷史資料、決策者意見或其他預測方法，以機率形式表示，機率和為1.0。
5. 選擇評估可行策略的準則，例如：用最小期望費用。而本研究屬不確定條件下之決策，也就是，缺乏先前的經驗可能增加情勢進一步估算的困難度，決策者可以使用下列四種決策方法中的一項²¹：(1)小中取大準則，在最差的結果中選擇最好的。(2)大中取大準則，在最好的結果中選擇最好的。(3)Laplace準則，各種事件平均發生的狀況下選擇最好的。(4)大中取小悔恨準則，在「最大的悔恨」中選擇最好策略。

伍、結語

本研究目的乃在應用OR之最佳化分析方

法，解析護航作戰FD敵對雙方之戰術策略。紅方潛艦在求取成功攻擊產生FD後之最佳迴避策略；藍方護航船團則求取效益最高的FD反潛戰術策略。經對局理論與模擬模式之分析計算，紅方潛艦之最佳策略為潛航跟隨於慢速船團下方，在噪音掩蔽下伺機脫離；藍方則以海空協同反潛作戰之兵力組合為最佳策略。

欲提升FD之反潛作戰效益，宜思考敵潛艦可能之作戰思維如達成高效益、低風險目標下之接戰邏輯與潛艦迴避策略。Edmund Cheong所提出以直升機在FOC內進行燃燒基準點之反潛作戰獲有最佳效果，但本研究卻顯示不同之結果，其原因在於本研究考量柴潛艦電瓶之限制下基於最大存活率所提出之潛艦因應策略之不同，Edmund Cheong所考量的潛艦迴避策略有兩種：在高速離開燃燒基準點的前提下「不理會」與「避開」直升機的吊放式聲納之偵測；本研究則以潛艦電瓶充足以最大速率遠離FD、電瓶受限以沒入船團下方伺機離開與電瓶不足以慢速深潛迴避為潛艦三策略。足見，以對局理論與數學與模擬模式可以協助解析戰術決策上諸多想法與不同策略並求算出最佳解。

現代護航作戰因潛艦之靜音、動力系統與作戰性能提升而威脅更甚於往昔。本研究以現代柴潛艦為例仿二戰時期之佔位攻擊方式使用魚雷攻擊船團，事實上今日柴潛艦的武器可運用飛彈遠距攻擊護航船團，此將形成更複雜之FD問題，亦造成高難度之反潛獵

註21：Lee J. Krajewski, Larry P. Ritzman, and Manoj K. Malhorta著，白滌清譯，《生產與作業管理：程序與供應鏈(Operations Management: Processes and Supply Chains)，第9版》，(臺北，學銘圖書有限公司 培生教育出版集團，民國99年1月)，頁27-36。

殺作戰之戰術決策。更遑論應付更高速、潛更深、武器與作戰能力更多樣的核潛艦。若不尋求新戰術戰法與兵力運用方式，海軍執行護航作戰之策略勢必捉襟見肘，也更難想像敵已徙增之新型潛艦所形成海上威脅之景象。相對於本研究，在實際威脅之作戰環境下，面對FD議題，敵對雙方將可提出為數更多之可行作戰策略，未來可運用OR方法對其做進一步之研析。

國軍在審視一定航程護航作戰能力之同時亦須檢視如何以高效益之FD戰術作為，折損敵有生潛艦戰力以利反封鎖戰役之遂行。必須考量的因素包括變化中的威脅—敵各型潛艦的作戰能力(包含核潛艦)、護航作戰時我可用兵力、現代商船之性能、飛彈加魚雷雙重威脅下的護航作戰環境等，而對現有的護航戰術進行符合科學之研析、驗證與精進尤其顯得格外重要。

處於世界勢力消長之變局中，我國地位長時遭國際漠視，寄望於外力協助我國解決可能之對外紛爭實如雲際間之飄渺而存在之諸多變數亦非我可掌握。在如此我消敵長之對局中，應更加重視群體腦力激盪之無窮力量，亟思在棋盤中贏得勝面之可行策略。本研究提供一套結合對局理論與模擬模式之「軍事作業研究」方法，包括想定設計、參數分析、建立模型及最佳化準則之應用，除針對護航之燃燒基準點問題能計算出最佳之解決策略外，在外購武器與戰台可遇不可求的國際氛圍限制下，就現有兵力妥善狀況條件，面對敵我對峙時之多種不確定因子亦可發展出因應可行策略，並加以量化計算出最適

策略。謹記孫子兵法之所云：「夫未戰而廟算勝者，得算多也，未戰而廟算不勝者，得算少也，多算勝，少算不勝，而況於無算乎？」

<參考資料>

一、書籍

1. 林建煌，《管理學》（桃園，新陸書局股份有限公司，民國99年12月），頁138-140。
2. 石茲宜，《在對與對之間掙扎》（臺北，天下雜誌，民國87年10月），頁42-45。
3. 《中華民國98年國防報告書》（臺北，中華民國國防部，民國98年），頁79-80。
4. 劉賓陽，《作業研究》，（臺北，麥格羅希爾出版社，民國95年）。
5. 中華民國經濟部能源局編，《中華民國98年能源統計手冊》（臺北，集思創意設計顧問股份有限公司印，民國99年6月），頁11。
6. Lee J. Krajewski, Larry P. Ritzman, and Manoj K. Malhortra著，白滌清譯，《生產與作業管理：程序與供應鏈（Operations Management: Processes and Supply Chains），第9版》（臺北，學銘圖書有限公司_培生教育出版集團，民國99年1月），頁27-36。
7. R. Panneerselvam, Operations Research (PHI Learning Pvt. Ltd., 2006)
8. Daryl2007 website, "World War II: The U-Boat Tactics", Hubpages Inc. 2010.
9. Daniel Moran, "Sealion to

Overlord - Grand Strategy” , lecture, Naval Postgraduate School, USA, 2009.

10. Bud Shortridge , ” History of Convoys” Usnavy-L Archives , 2007. p. 3

11. Stan Zimmerman, ” Submarine Technology for The 21 Century” , Trafford Publishing, 2000.

12. Brian Mccue, “An Agent-Based, Two-Sided, Simulated-Annealing Simulation of a Real-World Search” Or “A Real-World (Pretty Much) Search Game” , The 5th International New Horizons In Search Theory Workshop: Investigating New Metrics, USA, 2005.

13. Alberto A. Soto, “The Flaming Datum Problem with Varying Speed” , Thesis, Naval Postgraduate School, CA., USA, 2000, P. 31-41.

14. Ecinund Cheong Kong Chuan, “A Helicopter Submarine Search Game” , Thesis, Naval Postgraduate School, CA., USA, 1988, P. 32-34.

15. Ko-Hsin Liang, Kuei-Ming Wang,

“Using Simulation and Evolutionary Algorithms to Evaluate the Design of Mix Strategies of Decoy and Jammers in Anti-Torpedo TACTICS” , Proceedings of the 2006 Winter Simulation Conference, USA, 2006.

16. United States Naval Academy. Operations Analysis Study Group, “Naval operations analysis” , Naval Institute Press, 1977.

17. Philip W. Criswell, Jr., ” An Evaluation of the ASSET Campaign Model in a Regional Antisubmarine Warfare Context” , thesis, Naval Post Graduate School, 1992, P. 28.

18. Roy E. Rice, Quantifying “Persistence” in the Context of Find-Fix-Finish (FFF) (Phalanx, 2007).

二、網路

《反潛作戰》 , 維基百科 , 網址 <http://en.wikipedia.org/wiki/Convoy#Analysis>. 

作者簡介：

王貴民先生，備役海軍上校，海軍官校70年班，美國海軍工程研究院作業研究碩士，淡江大學資訊工程博士，現服務於實踐大學高雄校區資訊管理系助理教授。

梁克新先生，備役海軍中校，海軍官校73年班，美國海軍工程研究院作業研究電腦科學碩士，澳洲新南威爾斯大學電腦科學博士，現服務於實踐大學資訊管理學系助理教授。

韓慧林先生，備役海軍上校，中正理工學院造船系46期，國防管理學院資源管理研究所管理科學組碩士，國立交通大學工業工程與管理學系博士，現服務於實踐大學高雄校區資訊管理學系助理教授。

陳珈君、郭芷君、林廷容、蘇靜怡等均為實踐大學資訊管理系四年級學生。