

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

由複雜度的觀點探討人工魚礁礁群之佈置

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC94-2416-H-343-002-

執行期間：94年08月01日至95年07月31日

執行單位：南華大學企業管理學系

計畫主持人：藍俊雄

計畫參與人員：藍國桐、藍毓華

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫涉及專利或其他智慧財產權，2年後可公開查詢

中 華 民 國 95 年 10 月 16 日

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫 成果報告
 期中進度報告

由複雜度的觀點探討人工魚礁礁群之佈置

計畫類別： 個別型計畫 整合型計畫

計畫編號：NSC 94-2416-H-343-002

執行期間：94 年 8 月 1 日至 95 年 7 月 31 日

計畫主持人：藍俊雄

共同主持人：藍國桐、藍毓華

計畫參與人員：許澤宇、康仲仁

成果報告類型(依經費核定清單規定繳交)： 精簡報告 完整報告

本成果報告包括以下應繳交之附件：

- 赴國外出差或研習心得報告一份
- 赴大陸地區出差或研習心得報告一份
- 出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份
- 國際合作研究計畫國外研究報告書一份

處理方式：除產學合作研究計畫、提升產業技術及人才培育研究計畫、
列管計畫及下列情形者外，得立即公開查詢

涉及專利或其他智慧財產權， 一年 二年後可公開查詢

執行單位：南華大學企業管理系

中 華 民 國 95 年 10 月 15 日

壹、摘要

傳統以來人工魚礁之佈置設計並無一定之施工規範可以依循，現有的 AR 佈置準則僅有如 Ogawa et al (1977) 對建構魚礁區之體積大小之建議或如 Bohnsack and Sutherland (1985) 對魚礁堆彼此間距大小之建議；因此對於設計人工魚礁生態系統之生態工程師而言，當投放魚礁之位址及所欲投放之礁體選定之後，接下來所必須面臨之問題是如何將這些人工魚礁佈置在所選定之投放場址中。根據過去的經驗，生態工程師之佈置設計所憑藉的大都為工程師的判斷，然怎樣的佈置形式是成本最低而能夠產生最佳之聚魚效果卻很少被討論；直至 2004 年於 Ecological Engineering 國際期刊上始有 Lan et al. 以有系統且科學量化地方式討論人工魚礁之礁群佈置。然在成本預算之考量下，如何兼顧生態保育政策及經濟考量皆是人工魚礁群佈置後續所應探討解決的。

因此，本研究之首要目的為改良 Lan et al. (2004) 所提出的人工魚礁佈置模式(DARCs model)與啟發式解法，在成本預算與不同物種保育的政策考量下，以具體化與科學化的方式佈置人工魚礁礁群，進而結合物種動態擴散遷徙模式(Buechner,1987; Stamps et al., 1987) 以提供工程設計人員於實務設計上對不同保育物種的人工魚礁生態區佈置之參考。而該模式之建構精神乃利用生物學家之觀察，即較複雜的棲地系統會有較高之生物量聚集及較高之生物多樣性(biodiversity)，至於棲地複雜度之衡量方式則利用碎形維度來評估。

關鍵詞: 人工魚礁、碎形維度、複雜度、佈置設計、生態保育

Abstract

This paper applies the perspective on landscape ecology to propose a spatially explicit model, called DARCs (Deployment of Artificial Reef Communities) model, dealing with the artificial reefs' configuration problem. In most deploying artificial reefs (ARs) program, the configuration always depends upon engineers' judgments, though such skillful intuition could help them find a quick, intermediary decision, but it might be merely a plausible one. Thus, the DARCs model tries to integrate the ecologists' aspects into engineering to replace subjective deployment. The core of this model is based on biologists' observation that "the species diversity and biomass will increase if higher habitat system complexity achieves". The fractal dimension is applied to assess the habitat system complexity in this study. Besides, a solving algorithm for achieving the maximal fractal dimension under the fixed budget is presented. Moreover, this paper applies the proposed model to a case by considering the dispersal dynamics (Buechner,1987; Stamps et al., 1987) for a specific conservation policy. The results not only provide the referenced guideline for ecological engineers in deploying ARs program, but also allow ecologists to explore some of the consequences of the geometrical configuration of environmental variability for species richness in further studies.

Keywords: artificial reef communities; fractal dimension; complexity; deployment.

貳、前言

於 2001 年，英國學者 Baine 分析 249 篇有關人工魚礁之相關研究之國際期刊文章後，他認為目前人工魚礁之研究重點之一為人工魚礁之設計，而人工魚礁之設計則應著眼於選址(即決定人工魚礁設置之位置，相關之研究如 Heaps et al., 1996; Kennish et al., 2002 及 Mathews, 1985 等)，人工魚礁之組成(包含不同之材質選用等，相關之研究如 Lok et al., 1998; Seaman and Sprague, 1991; O'Leary et al., 2001)及人工魚礁之佈置(相關之研究如 Ogawa (1977)對於礁堆體積之建議、Bohnsack and Sutherland (1985)對礁群間距之建議等)等三議題上。O'Leary et al. (2001) 亦持相同之看法，其認為上述三要素為影響人工魚礁設計成敗之重要因子，若其一之因素有所忽略，則將提高整個人工魚礁設置計畫失敗的機率。事實上，人工魚礁之選址問題所應考量的為物質環境、生物環境、社會經濟面與使用者間之衝突，

如何取捨以使得社會福利最大。至於在材質及人工魚礁之組成上，目前實已有諸多研究，不同材質之選用，確有其優缺點；至於人工魚礁之組成構造，目前亦有多種款式設計，或強調其功能性(如抗沉陷)或強調其聚魚性等，國內目前亦有多項人工魚礁之專利，唯怎樣的設計才屬於最佳之設計，事實上目前仍未有所定論。至於在人工魚礁之佈置上，目前之研究僅就設置人工魚礁之建議礁堆體積、礁堆之高度、礁群之間距等僅有原則性之建議，然具體之佈礁程序卻無進一步之研究。唯在實際設計人工魚礁之佈礁工程上，對生態工程師(Ecological engineers)而言其最大之挑戰即為如何在有限之資源下(如資金或可佈置之面積或形狀)設計出最佳之人工魚礁佈置。不可諱言，目前國內外針對這方面之研究可說付之闕如(Baien, 2001)；然根據生態學家研究天然礁與魚類族群的關係後指出，複雜度對魚礁之設計是一重要的考量，因為基本上，對天然礁而言，其複雜度(Complexity)越高，魚類種數與族群數量越高(Bohnsack and Sutherland, 1985; Abelson and Shlesinger, 2002)；另外棲地中的複雜度、食物、掠食者數目亦與幼魚的存活率有關(Carr and Hixon, 1995)；Ogawa(1982)亦曾指出，棲地構造之複雜度越高，則魚群的密度越高。這些研究在在顯示當棲息地之複雜度越高，生物種類之差異性及生物量越高，因此，魚礁生態系統之佈置規劃應朝棲地複雜度著手。於2004年，Lan *et al.* 首先嘗試利用數學模式的建構與啟發式解法的提出來施行佈置。

至於上述棲息地複雜度根據 Baien (2001)的說法為：係指人工魚礁模組(module)本身或人工魚礁群(Artificial reef communities)間之交互作用(Interactions)所致，此外諸多學者(Shulman, 1984; Helvey and Smith, 1985; Gorham and Alevizon, 1989; Hixon and Beets, 1989; Bohnsack, 1990; Charbonnel *et al.*, 2002; Sherman *et al.*, 2002)皆指出複雜度為一重要影響生物聚集之因素，唯近年來有關複雜度之研究主要皆著眼於魚礁單體模組(module)的設計研究上，對於魚礁群之佈置卻未有所討論，因此，人工魚礁生態系統之佈置工作對於實務之應用可謂任重而道遠。

參、研究目的

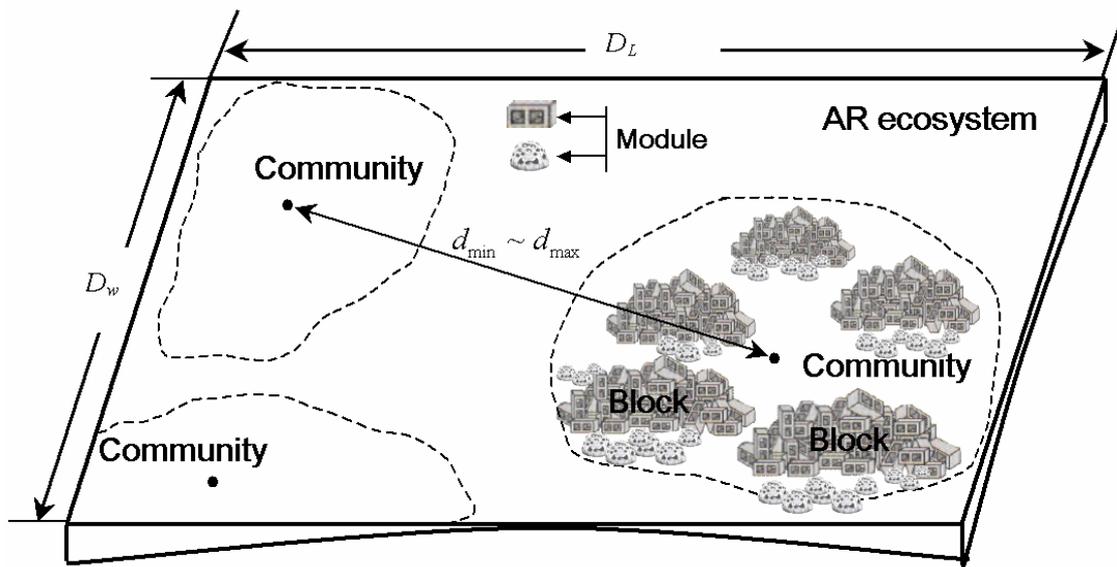
本計畫之目的首要為改良 Lan *et al.* (2004) 所提出的人工魚礁佈置模式(DARCs model)與啟發式解法，包含整合生態學家所述之棲息地複雜度(亦即空間之複雜度)及前述 Bohnsack and Sutherland (1985)等所提之佈礁建議，在成本預算與不同物種保育的政策考量下，以具體化與科學化的方式佈置人工魚礁礁群，進而結合物種動態擴散遷徙模式(Buechner, 1987; Stamps *et al.*, 1987)以提供工程設計人員於實務設計上對不同保育物種的人工魚礁生態區佈置之參考。

肆、研究方法

目前在礁體(module)複雜度方面之研究共有四項指標常被提及，分別為"vector dispersion" (Carleton and Sammarco 1987), "chain and tape" (Connell and Jones 1991), "consecutive substratum height difference" (McCormick 1994), 以及 "fractal dimension" (Morse *et al.* 1985, Sugihara and May 1990)。Beck (1998) 曾比較過上述四項指標，其認為 fractal dimension(碎形維度)在應用上具有較佳之效果。因此，本研究擬以碎形維度之觀點，建構量化模型之目標函數，其係利用生物學家之觀察：當空間之複雜度越高(亦即碎形維度越大)時，生物之聚集效果越顯著。

而在談到人工魚礁生態系統之組成之前，首先須就人工魚礁生態系統下一定義，Bohnsack and Sutherland (1985) 認為，該生態系統之組成，應包含數個人工魚礁群(Artificial reef communities, 簡稱 ARCs)，而 ARCs 內則包含數堆(Blocks)人工魚礁，至於每堆人工魚礁內包含多座人工魚礁之礁體(modules) (詳圖一)；此乃因魚礁的佈設方式關係到魚礁的效益，魚礁的排列若太過零星分散，會使魚類缺乏隱密的場所，導致魚礁效果不彰。一般而言，魚礁的佈設可概分為水平均勻排列或成堆投放兩種方式。而根據國內外學者的研究，

影響聚魚之效果有魚礁堆放之高度、魚礁堆放之面積、魚礁堆之體積、每堆 (Block) 魚礁堆之礁體個數及每堆礁堆間之距離或每群 (Communities) 礁群間之距離等。茲將目前文獻上人工魚礁佈礁原則詳列如後所示。



圖一 人工魚礁生態系統之組成

- (1) 魚礁堆放之高度：有些學者認為魚類會被礁體之垂直高度所吸引；亦即高礁堆之下層可聚集底棲性魚類，而上層則可誘引表層迴游性魚類 (張, 1976)。日本有將魚礁堆放到 10 公尺高的記錄，但效果並不好 (Ogawa, 1982)，而根據 Yoshimuda (1982) 及 Ogawa (1982) 之研究指出，魚礁之高度以 3~4 公尺為較適合，Downing *et al.*, (1985) 亦認為堆放之高度約 3~4 m 最好；另根據 Grove *et. al.* (1991) 之研究報告中認為，對迴游性魚類而言，建議礁體之高度至少須為水深之 10%，台灣則尚未對礁體高度對魚礁效益之影響有相關之研究。
- (2) 魚礁堆放之面積：礁體在海底堆放之範圍會影響魚礁效果的好壞，Rounsefell (1972) 曾指出，若要維持一平衡之生態系，則魚礁須至少有 25,000 ft^2 ~ 50,000 ft^2 ；而 Yoshimuda (1982) 則認為面積越大，聚魚效果越佳，因此魚礁佈設面積應越廣越好。然用魚礁佈滿一整個區域，不但須耗費大量魚礁，在有限的礁體資源下，其佈設面積亦無法大量的增加，因此理想之方式為成堆投放，並且堆堆相隔，以形成範圍廣大之魚礁區 (詹, 1999)。
- (3) 魚礁堆之體積：目前多採用將所有魚礁分成數堆投放之方式進行，然如何決定每堆的大小卻無一定的準則可依循。Ogarwa *et. al.* (1977) 認為礁堆的大小從 400 m^3 到最大的 4000 m^3 皆能增加其生產量；Rounsefell (1972) 則指出，人工魚礁設置之體積至少要有 5700 m^3 才能維持生態系統之平衡；Yoshimuda (1982) 發現礁堆不分大小皆能提高單位面積生產量，然而礁堆越大，越能吸引魚類。不過，若依這項原則將所有礁堆投放於同一點，卻會造成魚礁分佈面積窄小，以及因為魚礁下層太封閉導致魚礁效益無法充分發揮，而造成資源的浪費 (邵, 1989)。
- (4) 每堆 (Block) 間及每群 (Community) 礁堆間之距離：依 Yoshinori (1982) 及 Bohnsack、Sutherland (1985) 之建議，若由數個魚礁形成一堆，則每堆間之距離應為 50~100 公尺。10~20 堆所形成之群與群 (Communities) 間則離 300~500 公尺。

事實上，模式除了考量上述既有之佈礁建議外，亦應考慮成本、佈礁面積大小及佈礁區域之形狀因子於模型中以符合實際之狀況。所以本研究將針對文獻上有關人工魚礁佈置原則以及 Lan 等 (2004) 之佈礁模式並探討如預算與物種等等的因素，建立一改良之佈礁模型，並依據該模式提出一逐步數學演算法以求解得最佳之佈礁生態系統。

假設. —

1. 由於本研究之目標為如何在人工魚礁生態區佈置魚礁群(ARCs)，因此計畫區之場址及大小皆為給定之條件，且每一個人工魚礁群均使用相同之材質。
2. 據 Grove and Sonu (1985)之研究，魚礁之投放通常皆以魚礁群之方式投放，因此我們假設每一個人工魚礁群內所包含之人工魚礁堆個數及其所含之人工魚礁單體之個數皆相同；換言之，任一 ARC 內皆含有相同之 AR 個數。此外本研究主要針對人工魚礁生態系統做平面之佈置。
3. 為了更有效的施行 ARCs 之佈置，在本研究中兩兩魚礁群之間距(不論縱向或橫向)，在模擬過程中我們都假設為相同，此外我們引用學者 Bohnsack 及 Sutherland (1985)的研究，將兩兩 ARCs 之間距設為介於 300~500 公尺，並以每次增加 10 公尺之間距來模擬出最佳解。
4. 運輸成本假設為航行距離的線性函數，此外我們不考量從港口至施工地點航行所花費之成本，該部分之沉沒成本(sunk cost)已事先從佈礁計畫預算中扣除。

符號說明及模型建構. —

在建構 DARCs 模型前，首先需介紹將使用到之相關符號如下。參數的部分計有： c_T ：每單位距離之運輸成本； c_L ：ARC 之投放成本； c_R ：ARC 之購買成本； B ：計畫預算； r ：一 ARC 之半徑； d_{min} (or d_{max})：所允許之最小 (或最大) 兩兩 ARCs 間之相鄰間距； D_l ：計畫區之長度； D_w ：計畫區之寬度。至於決策變數計有 N ：所需佈置之 ARC 個數(該值須為整數)； d ：兩兩 ARC 之間距(該值為實數) 以及決定出所需佈置 ARC 之位置座標。

所建構之 DARCs 模式 如下方程式(1)~(4)所示。事實上該模式之本質係屬一非線性混合整數規劃 (nonlinear mixed integer programming, NMIP) 的問題。其中式 (1) 為 DARCs 模式之目標函數，表示該模式之目標為在利用盒計法(Box-Counting Method)計算系統之碎形維度下，須決定出所需佈置之 ARC 個數(N)、兩兩 ARC 之間距(d)及所需佈置 ARC 之位置，以使得該空間系統有最大之碎形維度值(也就是空間複雜度)。至於盒計法之計算方式為：將所考慮之佈礁空間進行橫向及縱向之等份切割¹，使得系統呈現格網狀(lattice)，並進一步計算 ARC 將佔據幾份前述之網格，以 $C(b)$ 表示；接著將 b 與 $C(b)$ 值繪在雙對數圖紙上，再利用最小平方方法(least square)求得迴歸直線之斜率即為所欲求得之系統碎形維度值。式(2)則表示計畫之總成本(TC)應小於等於計畫之預算(B)。此外，式 (3) 表示在該系統潛在可以佈礁之網格位置數目至少應大於等於所欲佈魚礁群之數量(N)；式(4)則限制了兩兩魚礁群不應重疊，且其兩兩之間距應介於所允許上下限之中。

$$\text{DARCs model} \left\{ \begin{array}{l} \max_{N,d} FD = \frac{\log C(b)}{\log(b)} \quad (1) \\ \text{s.t.} \\ TC = c_T d + N(c_L + c_R) \leq B \quad (2) \\ \left[\frac{D_l}{d} \right] \times \left[\frac{D_w}{d} \right] \geq N \quad (3) \\ 2r \leq d_{\min} \leq d \leq d_{\max} \quad \text{where } N \text{ is an integer} \quad (4) \end{array} \right.$$

演算法求解. —

當導入上述之 DARCs 模式及相關實務上考量之限制式後，接著就需發展求解之演算法。本研究所提出之演算法乃改良自 2004 Lan 等在 LARCs 模式中所提出之求解程序；

¹式(1)中之 b 即為切割之等份集合，可表示如下： $b = \{1, 2, 3, \dots, \min[D_l/\text{ARC size}, D_w/\text{ARC size}]\}$

LARCs 之演算法 主要是利用疊圖的技術(mapping technique)以快速的找到啟發解(heuristic deployment), 至於 DARCs 則摒棄前述之做法而是考慮全域搜尋(wide-ranging searching)以獲得在有限空間及有限預算下, 採用 Moore 規則²(Batty, 1997)下之最佳解。而該演算法之主要精神包含一重要概念, 即需導入邊際碎形維度(Marginal fractal dimension, MFD), 其表示每增加一單位成本的投入所能增加之系統碎形維度值。

在保育策略下之應用一

在大部分之實際建構人工魚礁生態系之案例中, 總是包含許多管理上之目標, 其中最為常見的情況, 即是將建構之人工魚礁生態區以為海洋保護(marine reserve)區 (Wilson *et al.*, 2002). 根據諸多學者如 Game (1980)、Buechner (1987)、Stamps 等人 (1987)之研究, 保護區之面積大小及保護區之幾何形狀對所保育之物種族群平衡扮演一極其重要的角色。Acosta (2002)更進一步指出, 若在族群自然死亡率(非漁獲所導致)低之情況下, 族群之遷徙移動是導致保護區生物族群損失之一重要因素。Buechner (1987) 及 Stamps 等人(1987)曾提出一經驗公式以評估族群因遷徙所造成損失, 該公式如下:

$$\lambda = (D+1)^\rho \quad (5)$$

其中 λ 表示某物種族群之損失率, 又該損失係與受限滲透率³(conditional permeability, ρ) 及族群擴散係數 (D) 有關; 此外族群擴散係數 D 乃與物種之移動速率成正比(Turchin, 1998), 亦即不同物種由於其游泳能力(速度)的不同, 因此 D 值會有所差別⁴。

$$\lambda = (D+1)^\rho, D > 0 \text{ 且 } \rho > 0 \quad (6)$$

至於在受限滲透率(或稱保護區之邊界條件) ρ 方面, 根據 Stamps 等人 (1987)及 Okubo(1980)之見解, 對具遷徙性之物種(Nomadic species⁵)來說, ρ 值可以保護區之週長(P)與面積(A)之比值來表示, 亦即 ρ 為 P 及 A 之函數, 表示如下:

$$\rho(P, A) = \frac{P}{A} \quad (7)$$

由方程式(6)可換算得知, 針對特定保育物種(以符號下標 s 表示), 保護區之邊界條件可以下式表示。即

$$\rho_s = \frac{\ln(\lambda_s)}{\ln(D_s + 1)} \quad (8)$$

假設保護區之幾何形狀為矩形, 且保護區之面積大小(A)已事前給定⁶, 在保育策略為允許保育物種之族群損失率為 λ_s 之情況下, 則配合方程式(7)可以計算出保護區之建議最佳長(D_l)、寬(D_w); 亦即輸入參數 A , λ_s 及 D_s 後可以決定出在特定保育策略下之保護區之最適長寬設計, 再配合 DARCs 模式將可建構出考量保育策略之最佳人工生態系統之佈置, 相關流程可參見圖二。

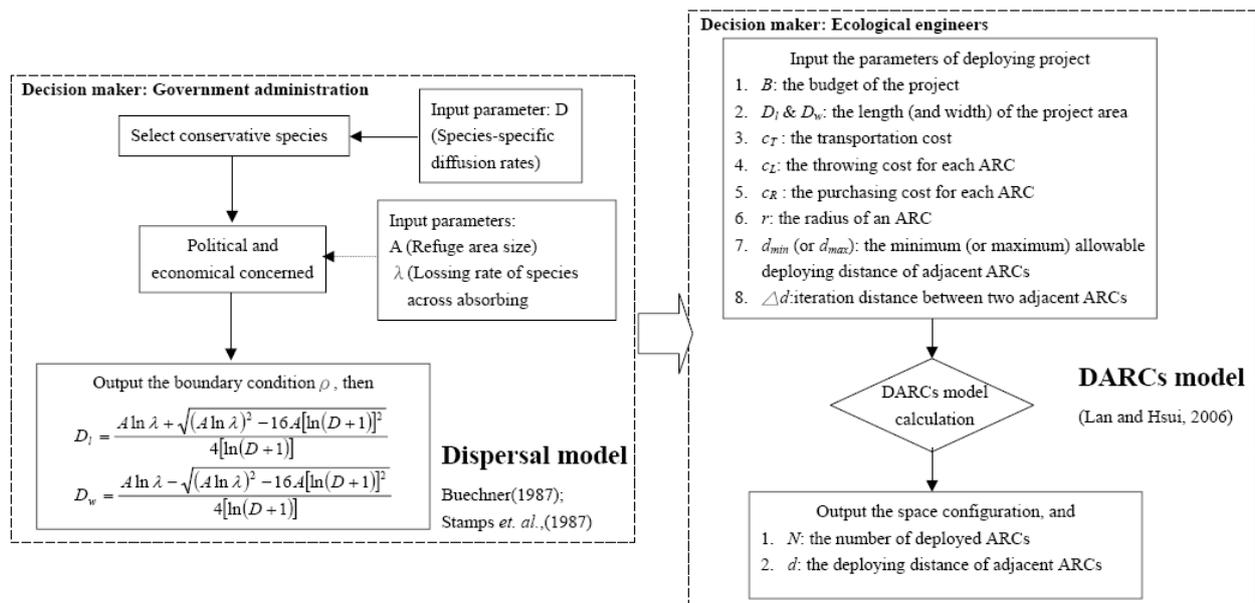
² 所謂 Moore 鄰近規則又稱八鄰規則(eight-neighborhood rule), 有機體之移動可從所在之中心細胞(i.e., patch)往與其相連接之上下左右及對角線之 8 個相鄰細胞方向滲透(或運動)。

³ 亦可稱之為所討論區域之邊界條件(Boundary condition)(Acosta, 2002)。

⁴ 本文為簡化問題, 因此僅考慮單一保育物種, 因此 D 值為一常數。

⁵ Acosta (2002)指出, 於保護區中所討論之魚種為長期棲息於該區域之物種(Long-lived species)而非迴游性之魚種, 因此, 若保護區內禁止撈捕, 則保護區內魚量之損失主要來自魚群游出保護區所導致之撈捕損失, 而非於保護區內自然成長所導致之死亡。

⁶ 保護區之面積大小常受政治(主要是利害相關者)及經濟因素所影響(Acosta, 2002)。



圖二 針對特定保育物種下，整合物種動態擴散遷徙模式於DARC模式之人工魚礁生態系統之佈置

伍、結果與討論

以下將利用前述之模型與演算法，配合特定之保育政策，設計一最佳之人工魚礁系統之佈置。

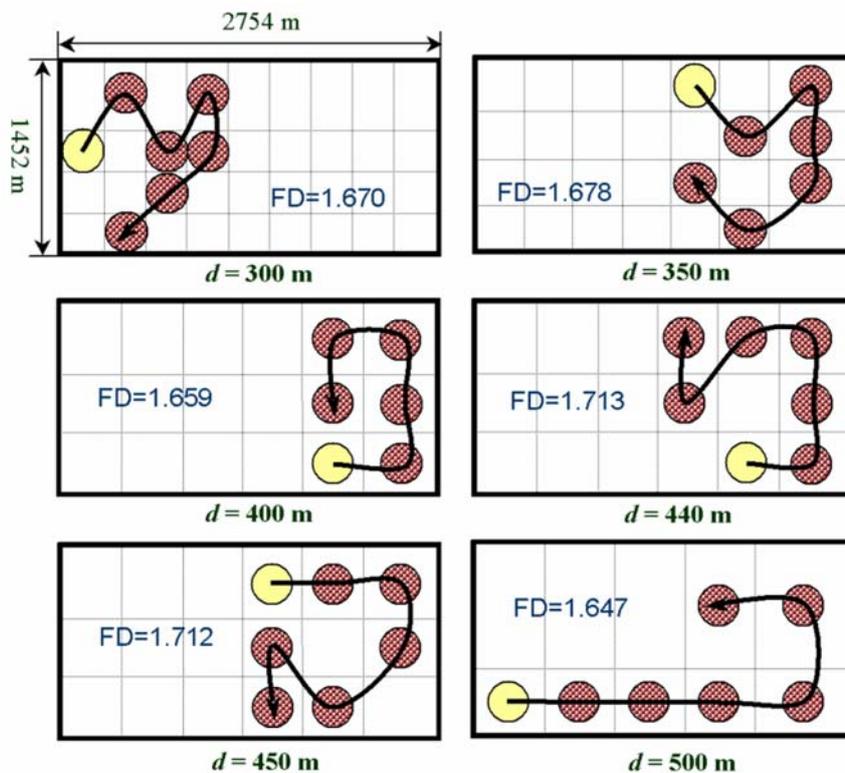
假設在台灣興達港外海有一政府委託設計之佈置人工魚礁計畫，該計畫之目標係為保育龍蝦(spiny lobster)，其擴散係數 $D_s = 3.62$ (Acosta, 2002)。也由於該人工魚礁計畫區之目標為龍蝦保護區，因此在保護區內是禁止任何撈捕活動的，然由於人工魚礁區並無實體之邊界，因此生物可以自由進出，根據 Acosta (2002)的說法，保護區內魚量之損失主要來自魚群游出保護區所導致之撈捕損失，而非於保護區內自然成長所導致之死亡，在此我們設定政府之保育政策為：族群損失率(λ) 等於 25%。至於計畫區之場址大小(A)則為 400 公頃。本計畫之預算(B)為台幣 8000 萬，至於兩兩魚礁群之允許間距大小(d)為介於 300 至 500 公尺(Bohnsack and Sutherland, 1985)，至於模擬之單位增量則為 10 公尺。單一魚礁群之半徑(r) 為 150 公尺；在成本方面，單一魚礁群之採購魚礁單體之成本加上投放成本(i.e., $c_R + c_L$) 為台幣 1000 萬，至於每公尺之運輸成本(c_T) 則需花費 25/4 元⁷。

接著我們應用 Buechner (1987) 及 Stamps 等人(1987)所提之族群動態遷徙模式，並配合前述已知之參數，由式(8)可推算得保護區之邊界條件 ρ_s 為 2.1，再利用第(7)式，可推算得在該保育政策下，該計畫區之建議長度(D_l)為 2754 公尺，寬度(D_w)為 1452 公尺。將這些已知參數代入 DARC 模式並加以求解，可獲得該保護區之魚礁群建議佈置，其部分結果示如圖 3。所建議之兩兩 ARC 之間距為 440 公尺，其總成本支出約為台幣 7001 萬元，可獲得最大之系統碎形維度值為 1.713。

此外，Yoshimuda (1982) 發現礁堆不分大小皆能提高單位面積生產量，且礁堆越大，越能吸引魚類。不過，若依這項原則將所有礁堆投放於同一點，卻會造成魚礁分佈面積窄小，以及因為魚礁下層太封閉導致魚礁效益無法充分發揮，而造成資源的浪費，此外在有限的礁體資源下，其佈設面積亦無法大量的增加。換言之，以管理的角度而言，魚礁的投入亦即代表資源的投入，因此在資源有限的情況下，學者 Grove 及 Sonu (1985)則建議，理想的投礁方式應為成堆投放，並且堆堆相隔，以形成範圍廣大之魚礁區，這也就是本研究

⁷ 我們以工作船租用一天需花費 100 萬元來計算，若假設其一天可以工作 8 小時，且其航行速度為時速 20 公里，則可依此評估出每航行單位距離所須之花費。

何以設計人工魚礁生態區之尺度(Scale)擺放在魚礁群之設計上。此外，學者 Bohnsack 及 Sutherland (1985) 亦近一步指出，若由數個魚礁形成一堆，則每堆間之距離應為 50~100 公尺；10~20 堆所形成之魚礁群與魚礁群，其間之距離則建議為介於 300~500 公尺。事實上，由圖三可知，不同之相鄰 ARC 間距所模擬出之最佳佈置皆有不同之型態(Pattern)及系統複雜度(碎形維度值)，由我們的模擬結果中可以看出，在有限資源下，我們建議叢聚式 (cluster type)之佈礁可達到較高之系統複雜度。



圖三 於不同模擬間距(d)下，所建議之最佳建議佈礁位置

註:本圖僅列出部分過程，由圖中可知，在該保育策略下，該保護區之建議長寬分別為 2754 公尺及 1452 公尺，其中以兩兩 ARC 之間距為 440 公尺時可以佈置獲得較大之系統複雜度

一言以蔽之，本研究所提出 DARC 模式及其演算法不但可以提供人工魚礁生態系統規劃等相關人員於考量特定保育策略下之佈礁建議，而其結果更可以使得生態學家發掘更多有關生物多樣性與魚礁於空間幾何佈置間之關係，儘管本研究所提出之模型尚有諸多實務上之限制，但我們相信，透過前述之模擬結果可以提供未來景觀生態學家了解空間複雜度對不同之物種之影響等更多之思考方向。誠如 Bohnsack (1990, p.424)所言: "Regardless, understanding the role of habitat complexity will undoubtedly have important practical applications in fisheries management". 而碎形維度在本文之真正價值，應可以總結說明如下：碎形維度事實上是提供一溝通平台，使得不同領域之生態學家得以在此以相同的語言分享其不同的概念，並彌補彼此間之代溝。

陸、計畫成果自評

- 一、本研究之研究成果可以提供生物及海洋領域之學者以為現場試驗之基礎 - 複雜度雖為廣為人知之影響生態學之因子，唯如何量化及具體的建構適合生物棲息的環境，目前該類的研究仍極為缺乏；此外，對不同的海洋生物，其體型大小及游泳速度各有不同，如何針對特定物種建構適宜之人工棲地場所，以因應保育之風潮都是刻不容緩之

問題，此外，複雜度對不同之物種之影響層面為何，在進行生物學之現場試驗之前，唯有能具體掌握及設計棲地之複雜度始能進一步設計之。

- 二、提供實務之參考 - 由文獻回顧及目前國內外之專利資料可知，目前並未有任何一套技術或規範可明確的指導人工魚礁生態系統的設計人員進行設計，因此，極易造成拋放入海的人工魚礁造成資源的浪費，雖說魚礁拋放入海底必有聚魚之成效，唯在資金受限之情況下，如何創造出最有效益的聚魚環境，以避免資源之浪費；此外，人工魚礁的投放對近海漁業資源日漸匱乏的台灣而言，是一有效復育漁業資源之方式，更是漁業署之重要政策之一。因此，有效的佈置魚礁系統以取代隨意拋放魚礁至海底應為刻不容緩之問題。本研究之研究成果後續若能提供其他工程領域之學者參考，適時地修正模式，甚至將該模式之佈置方法列為施工規範，則將更提高本研究所影響層面之廣度。

柒、參考文獻

- Acosta, C.A. 2002. Spatially explicit dispersal dynamics and equilibrium population sizes in marine harvest refuges. *ICES J. Mar. Sci.* 59: 458-468.
- Baine, B. 2001. Artificial reefs: a review of their design, application, management and performance. *Ocean Coast. Manage.* 44: 241-259.
- Batty, M. 1997. Cellular automata and urban form: A primer. *J. Am. Plan. Assoc.* 63: 266-274.
- Beck, W.M. 1998. Comparison of the measurement and effects of habitat structure on gastropods in rocky intertidal and mangrove habitats. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 169: 165-178.
- Bell, S.S., McCoy, E.D., and Mushinsky, H.R. 1990. Habitat structure and the design of artificial reefs. Pages 412-426 in *Habitat Structure: The Physical Arrangement of Objects in Space*, Chapman and Hall, London.
- Bohnsack, J.A. and D.L. Sutherland. 1985. Artificial reef research: a review with recommendations for future priorities. *Bull. Mar. Sci.* 37: 11-39.
- Buechner, M. 1987. Conservation in insular parks: simulation models of factors affecting the movement of animals across park boundaries. *Biol. Conserv.* 41: 57-76.
- Burrough, P.A. 1981. Fractal dimensions of landscapes and other environmental data. *Nature* 294: 240-242.
- Charbonnel, E., C. Serre, S. Ruitton, J.G. Harmelin and A. Jensen. 2002. Effects of increased habitat complexity on fish assemblages associated with large artificial reef units (French Mediterranean coast). *ICES J. Mar. Sci.* 59: S208-S213.
- Game, M. 1980. Best shape for nature reserves. *Nature* 287: 630-632.
- Gorham, J.C. and W.S. Alevizon. 1989. Habitat complexity and the abundance of juvenile fishes residing on small-scale artificial reefs. *Bull. Mar. Sci.* 44: 662-665.
- Grove, R.S. and C.J. Sonu. 1985. Fishing reef planning in Japan. Pages 187-251 in F.M. D'Itri, ed. *Artificial reefs: Marine and freshwater applications*. Lewis Publishers, Chelsea, Michigan.
- Helvey, M. and R.W. Smith. 1985. Influence of habitat structure on the fish assemblages associated with two cooling-water intake structures in southern California. *Bull. Mar. Sci.* 37: 189-199.
- Hixon, M.A. and J.P. Beets. 1989. Shelter characteristics and Caribbean fish assemblages: experiments with artificial reefs. *Bull. Mar. Sci.* 44: 666-680.
- Lan, C.H., C.C. Chen and C.Y. Hsui. 2004. An Approach to Design Spatial Configuration of Artificial Reef Ecosystem. *Ecol. Eng.* 22(4-5): 217-216.
- Milne, B.T. 1988. Measuring the fractal geometry of landscapes. *Appl. Math. Comput.* 27: 67-79.
- Morse, D.R., J.H. Lawton, M.M. Dodson and M.H. Williamson. 1985. Fractal dimension of vegetation and the distribution of arthropod body lengths. *Nature* 314: 731-733.
- Russell, R.W., G.L. Hunt, Jr., K.O. Coyle and R.T. Cooney. 1992. Foraging in a fractal environment: spatial patterns in a marine predator-prey system. *Landsc. Ecol.* 7: 195-209.
- Shulman, M.J. 1984. Resource limitation and recruitment patterns in a coral reef assemblage. *Exp.*

- Mar. Biol. Ecol. 74: 85-109.
- Stamps, J.A., M. Buechner and V.V. Krishnan. 1987. The effects of edge permeability and habitat geometry on emigration from patches of habitat. *Am. Nat.* 129: 533-552.
- Sugihara, G. and R.M. May. 1990. Applications of fractals in ecology. *Trends Ecol. Evol.* 5: 79-86.
- Turchin, P. 1998. Quantitative analysis of movement: measuring and modeling population redistribution in animals and plants. Sinauer Press, New York, 396 p.
- Wilson, K.D.P., A.W.Y. Leung and R. Kennish. 2002. Restoration of Hong Kong fisheries through deployment of artificial reefs in marine protected areas. *ICES J. Mar. Sci.* 59: S157-S163.
- Yoshimuda, N.C. 1982. Discussion of installation planning. Pages 137-165 *in* S.F. Vik, ed. Japanese artificial reef technology. Aquabio, Inc., F. L. Tech. Rep. 604.