

國立臺灣海洋大學
環境生物與漁業科學學系
博士學位論文

指導教授：歐慶賢 博士
劉宗龍 博士

人工底魚礁流場之數值模擬分析
Numerical Simulation Investigation into
Submerged Artificial Reef Flows

研究生：蘇東濤 撰

中華民國 98 年 6 月



人工底魚礁流場之數值模擬分析

Numerical Simulation Investigation into
Submerged Artificial Reef Flows

研究生：蘇東濤

Student : Su, Dong-Taur

指導教授：歐慶賢
劉宗龍

Advisor : Ou, Ching-Hsiewn
Liu, Tsung-Lung

國立臺灣海洋大學
環境生物與漁業科學學系
博士論文

A Thesis

Submitted to Department of Environmental Biology and Fishery Science

College of Ocean Science and Resource

National Taiwan Ocean University

In Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Doctor of Philosophy

in

Department of Environmental Biology and Fisheries Science

June 2009

Keelung, Taiwan, Republic of China

中華民國 98 年 6 月

謝辭

九十二年九月抱持著「臨淵羨魚，不如退而結網」的心態再度就學。再次置身海大，但覺好鳥弄巧聲，翠色拂新晴。久別學生生活難免產生的忐忑、惶恐，在令人賞心悅目的景緻下一掃殆盡。此情此景，猶在眼前。然而，六年的研究生生涯就在課堂受教與案前挑燈的交替中，倏忽將逝。論文圓滿完成之際亦是暫別海大之時，於此離別前夕心中所欲銘謝者實是不勝枚舉。

感謝指導教授國立台灣海洋大學主任秘書歐慶賢博士、國防大學動力及系統工程學系造船組組長劉宗龍博士，由於二師分別在論文撰寫過程中的悉心指導與研究資源上的充份供給，使得本文不僅得以順利完成且更臻美善。二師為人處事的謙和圓融、治學態度的嚴謹精當也為我樹立了典範。此外，論文口試期間，承蒙享有國際學術地位諸委員，國立台灣海洋大學環境生物與漁業科學系教授兼校長李國添博士、前國立中山大學教授張崑雄博士、國立中山大學海洋環境及工程學系教授陳陽益博士及中央研究院生物多樣性研究中心執行長邵廣昭博士的不吝指正亦令我銘感於心。

求學期間，感謝漁學館研究室所有研究生與眾師友的提攜、中正理工學院院長劉思遠博士、造船組教授吳聖儒博士的關懷，讓我的研究路程留下難忘且珍貴的回憶。任教數十載，以所學應用於教學雖遊刃有餘，然始終未嘗以此自滿，今後更當努力擴展專業知識領域，為社會貢獻一己之力。

凡此種種，皆有惠於我，謹記於此，以示永誌不忘。最後，願與大家分享此刻的喜悅。

蘇東濤

于航技系研究室

中華民國九十八年六月一日

摘要

人工底魚礁所建構的海洋生態系，現階段雖然不能準確量化其效益，但其本身所具有的聚魚特性與在海洋生態所扮演之積極復育角色，已是無庸置疑。有關魚礁聚魚之機制，礁體內外部流場之速度分佈應是其關鍵之所在，但影響礁體內外流場之速度分佈，除礁體幾何構型被視為主因外，其所投置之海床地形、魚礁佈設的排列組合與間距變化，亦是造成擾動效應不可忽略的重要因素。

本論文中，為驗證數值模擬方法在魚礁流場研究的準確性，應用 PIV 的實驗量測技術擷取魚礁在不同海流運動環境下的內外流場流動特徵，並與數值流場模擬運算作比對分析，研究結果發現流場數值模擬技術將可作為人工魚礁最適化設計及其後續投置規劃作業的最佳輔助工具。

根據以上獲致之成果，本論文續以數值模擬法呈現魚礁在不同流速與海床地形影響下，其內外部可能形成複雜流體運動的可視化流場模擬結果，進一步探討礁群間的排列組合模式、間距變化與流場速度分佈的對應關係。研究發現魚礁置於隆起海床地形頂部較能獲得較佳之聚魚功能；魚礁橫向間距以不超過兩倍魚礁邊長為佳；縱向擺置間距之影響範圍可達 10 個魚礁長度；縱向排列比橫向排列有較大之影響範圍與遮蔽效果；垂直堆疊則以 2 至 3 層最有效。

藉由流場數值模擬之計算分析，研究者將可預先透過特殊的設計與安排來增強礁體「渦動效應」和「遮蔽效應」之功能，以發揮聚合礁體的最大成效，節省成本，營造出符合經濟效益的聚魚流場，並創造更佳的索餌場、產卵場、養育場等魚類生活之環境空間。

Abstract

The beneficial effects of submerged artificial reefs in attracting large populations of fish and establishing a thriving marine ecosystem have long been recognized by marine ecologists and engineers. It is thought that the fish-attracting properties of an artificial reef are related to the flow field structures in and around the reef blocks. Although the velocity distribution is determined primarily by the geometrical design of the reef blocks and the seabed topography, the relative positioning of the individual blocks within the reef is also known to have a contributory effect, and must therefore be taken into account when planning the deployment of a new reef.

Accordingly, this study commences by performing a series of numerical simulations to visualize the effects of the seabed topography and sea flow velocity on the flow structures induced in and around an artificial reef block. Simulations are then performed to investigate the velocity distributions induced by artificial reefs comprising multiple reef blocks arranged in various configurations. The validity of the simulation results is confirmed by conducting scale-model particle image velocimetry (PIV) experiments in a horizontal circulating water channel.

The numerical and experimental results support five major conclusions. First, the fish-attracting properties of an artificial reef can be improved by placing the individual reef blocks on the top of raised features in the seabed. Second, the distance between neighboring artificial reef blocks should be no greater than twice the length of the individual reef blocks. Third, the flow field effects exerted by the artificial reef blocks extend in the vertical direction by a distance equal to approximately ten times the height of each reef block. Fourth, a vertical arrangement of the artificial reef blocks has a greater effect on the local flow field structures than a horizontal arrangement. Finally, the artificial reef should comprise no more than two or three layers of reef blocks.

In general, a good agreement is observed between the numerical results and the experimental observations. Thus, the validity of the numerical model developed in this study is confirmed. The present results confirm that numerical methods provide a viable means of predicting the flow fields in and around artificial reefs without the need for physical experimentation. In particular, numerical simulations enable the efficacies

of alternative reef block designs and deployment configurations to be systematically evaluated and compared in terms of their ability to create suitable vortex and sheltering effects. Therefore, numerical methods provide a versatile and cost-effective means of optimizing the design of submerged artificial reefs in such a way as to reduce the overall deployment cost whilst simultaneously improving the ability of the reef to promote a thriving marine life.

目 錄

謝辭

中文摘要

英文摘要

第壹章 緒論	1
第一節 研究緣起	1
第二節 研究目的	5
第三節 研究方法	5
第四節 研究架構	6
第貳章 人工魚礁區之魚群分佈觀察	12
第一節 魚礁區之量測設備	12
第二節 魚礁區量測方法	14
第三節 結果分析	16
第參章 計算流力數值法在人工魚礁流場分析之應用	34
第一節 魚礁流場統御方程與計算流力數值法	35
第二節 人工魚礁流場網格佈建	37
第三節 魚礁流場數值模擬計算域邊界條件之設定	38
第肆章 PIV 實驗量測與數值模擬分析	41
第一節 實驗設備	41
第二節 實驗流場速度校正與不準確度分析	44
第三節 實驗量測方法	46
第四節 PIV 量測與數值模擬分析結果比對	47

第五章 海床地形變化對人工魚礁流場影響之分析	61
第一節 魚礁幾何構型與海床地形之建構	61
第二節 魚礁與海床地形數值模擬流場建置	62
第三節 魚礁在不同海床地形之流場分析	63
第六章 礁體幾何排列變化對人工魚礁流場影響之分析	81
第一節 礁體幾何排列之建構	82
第二節 橫向排列間距變化之魚礁流場分析	84
第三節 縱向排列間距變化之魚礁流場分析	86
第四節 垂直堆疊之魚礁流場分析	87
第七章 結論	96
參考文獻	99

表 目 錄

表 1-1	魚礁擺設在 18 種凹凸海床地形之流場模擬	8
表 1-2	礁體幾何排列變化之流場模擬	8
表 2-1	宜蘭縣石城魚礁區潛水觀察紀錄	24
表 2-2	魚礁區魚類群聚之比較分析	25
表 4-1	流速校準比較表	52
表 5-1	魚礁流場模擬算例與圖 5-2 相對應關係位置	69
表 6-1	雙體魚礁橫向排列間距變化(\bar{L})與礁體後方等速線(\bar{V})涵蓋之 面積值(\bar{A})對應表.....	89
表 6-2	雙體魚礁縱向排列間距變化(\bar{L})與礁體後方等速線(\bar{V})涵蓋之 面積值(\bar{A})對應表	89

圖 目 錄

圖 1-1	臺灣沿近海 20m 水深流速向量圖	9
圖 1-2	台閩地區沿岸人工魚礁設置分佈圖	10
圖 1-3	論文架構	11
圖 2-1	側掃聲納系統示意圖	27
圖 2-2	側掃聲納探測石城人工魚礁散佈位置之影像	27
圖 2-3	石城魚礁區 Z 字型測線規劃示意圖	28
圖 2-4	石城魚礁區中心位置及海底地形二維示意圖	28
圖 2-5	石城魚礁區中心位置及海底地形三維示意圖	29
圖 2-6	石城魚礁區魚探機影像圖	29
圖 2-7	石城魚礁區音壓生物量分析	30
圖 2-8	石城魚礁區之聚魚情形	30
圖 2-9	石城魚礁區之砂埋情形	31
圖 2-10	石城魚礁區潛水攝影及目視觀察	31
圖 2-11	石城魚礁區之覆網與損毀狀況	32
圖 2-12	石城魚礁區之定棲性魚類	32
圖 2-13	石城魚礁區之偶棲性魚類	33
圖 2-14	石城魚礁區之洄游性魚類	33
圖 3-1	人工魚礁流場數值模擬流程	39
圖 3-2	人工魚礁流場計算域邊界條件之設定	40
圖 4-1	實驗之水平式環流水槽	53
圖 4-2	水平式環流水槽示意圖	53

圖 4-3	質點影像測速儀(PIV)配置示意圖	54
圖 4-4	魚礁內流場量測平台架設圖	54
圖 4-5	流場速度分佈圖	55
圖 4-6	流場速度向量圖	55
圖 4-7	雙層式水泥魚礁模型之三維幾何構型與尺寸	56
圖 4-8	螺槳式流速計與流速記錄器	56
圖 4-9	脈衝數值與皮託管之平均速度關係圖	57
圖 4-10	高解析度質點影像圖	57
圖 4-11	瞬時速度分佈圖	57
圖 4-12	礁體流場實驗支架與模型魚礁量測位置	58
圖 4-13	魚礁內部流場觀測區域(a)與擷取有效量測範圍(b)	58
圖 4-14	0.25H 位置之魚礁內部水平方向剖面流場速度向量圖 (a)(b)實驗量測；(c)(d)數值模擬	59
圖 4-15	0.5H 位置之魚礁內部水平方向剖面流場速度向量圖 (a)(b)實驗量測；(c)(d)數值模擬	59
圖 4-16	0.75H 位置之魚礁內部水平方向剖面流場速度向量圖 (a)(b)實驗量測；(c)(d)數值模擬	60
圖 4-17	距魚礁上緣 15 公分位置之速度向量圖	60
圖 5-1	人工魚礁構型主要尺寸與海床地貌起伏變化之示意圖	70
圖 5-2	礁體擺設於隆起與凹陷之海床地形示意圖	71
圖 5-3	礁體內部 C-XY 面在隆起海床地形迎流面之速度分佈	72
圖 5-4	礁體內部 C-XY 面在隆起海床地形頂部之速度分佈	72
圖 5-5	礁體內部 C-XY 面在隆起海床地形背流面之速度分佈	73

圖 5-6	礁體內部 C-XY 面在凹陷海床地形迎流面之速度分佈	73
圖 5-7	礁體內部 C-XY 面在凹陷海床地形底部之速度分佈	74
圖 5-8	礁體內部 C-XY 面在凹陷海床地形背流面之速度分佈	74
圖 5-9	礁體內部 C-XZ 面在隆起海床地形迎流面之速度分佈	75
圖 5-10	礁體內部 C-XZ 面在隆起海床地形頂部之速度分佈	75
圖 5-11	礁體內部 C-XZ 面在隆起海床地形背流面之速度分佈	76
圖 5-12	礁體內部 C-XZ 面在凹陷海床地形迎流面之速度分佈	76
圖 5-13	礁體內部 C-XY 面在凹陷海床地形底部之速度分佈	77
圖 5-14	礁體內部 C-XY 面在凹陷海床地形背流面之速度分佈	77
圖 5-15	礁體外部 C-XY 面在隆起海床地形頂部之速度分佈	78
圖 5-16	礁體外部 C-XY 面在凹陷海床地形底部之速度分佈	78
圖 5-17	礁體外部 C-XZ 面在隆起海床地形頂部之速度分佈	79
圖 5-18	礁體外部 C-XZ 面在凹陷海床地形底部之速度分佈.....	79
圖 5-19	魚礁置放海底隆起地形之縱剖面流場速度分佈	80
圖 5-20	魚礁置放海底隆起地形之橫剖面流場速度分佈	80
圖 6-1	單體魚礁無因次化速度場	90
圖 6-2 (a)-(e)	雙體魚礁橫向排列間距變化之無因次化速度場	90
圖 6-3	雙體魚礁橫向排列間距變化對礁體後方等速線涵蓋面積值之 影響	92
圖 6-4(a)-(e)	雙體魚礁縱向排列間距變化之無因次化速度場	92
圖 6-5	雙體魚礁縱向排列間距變化對礁體後方等速線涵蓋面積值之 影響	94
圖 6-6(a)-(c)	垂直堆疊魚礁之無因次化速度場	95

符號表

英文字母

\bar{A}	等流速線值面積；[m ²]
D	反光質點粒徑；[μ m]
g	重力加速度；[m/sec ²]
G	產生項(Production Term)；[m ² /sec ³]
h	楔形架高度；[m]
H	魚礁高度；[m]
k	紊流之流體動能(Turbulent Kinetic Energy)；[m ² /sec ²]
l	三維梯型體縱向切面(XZ 平面)之兩個斜邊與頂邊 (或底邊)之長度；[m]
L	魚礁邊長尺度；[m]
\bar{L}	橫向間距值；[m]
n	實驗量測取樣數
N	螺槳式流速計脈衝數平均數
p	壓力；[N/m ²]
Re	雷諾數(Reynolds Number)， $Re = U_0 L / \nu$
R_k	流體動能方程有效雷諾數； $1/R_k = 1/R_e + \nu_t / \sigma_k$
R_ε	流體耗散方程有效雷諾數； $1/R_\varepsilon = 1/R_e + \nu_t / \sigma_\varepsilon$
S	沿斜面長度變化之貼體座標(Curve-Fitting Coordinate)；[m]
S_ϕ	流場統御方程通用變數 ϕ 之源函數(Source Function)
t	文獻[Holman, 2001]之 t 分佈
U_i	平均速度；[m/sec]
U_0	流體計算域入口端速度；[m/sec]

$\overline{u_i u_j}$	雷諾應力(Reynolds Stress) ; [m ² /sec ²]
V	測試區段流場運動速度 ; [m/sec]
\bar{V}	流場無因次化流速 ; [V/U ₀]
x_i	表示各取樣值
x_m	表示取樣平均值
x^i, x^j	直角座標系統之張量形式

希臘符號

β	梯型斜邊之傾角 ; [度]
ε	紊流耗散率(Turbulent Dissipation Ratio) ; [m ² /sec ³]
μ	流體動力黏滯係數 ; [N - sec / m ²]
ν	流體運動黏滯係數 ; [m ² /sec]
ν_t	渦動黏滯係數(Eddy Viscosity) ; [m ² /sec ²]
ρ	流體密度 ; [kg/m ³]
σ	標準偏差量， $\sigma = \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - x_m)^2 \right]^{1/2}$
σ_k	流體動能方程有效黏滯係數 ; [m ² /sec ²]
σ_ε	流體耗散方程有效黏滯係數 ; [m ² /sec ²]
ϕ	流場統御方程通用變數，代表動量方程變數 U_i 或 k 、 ε
Γ	變數 ϕ 相關之擴散係數
∇^2	拉普拉斯運算子 ; [1/m ²]
Δ	不準確度區間， $\Delta = \frac{t \cdot \sigma}{\sqrt{n}}$
ΔS	楔形架斜面差量 ; [m]

第壹章 緒 論

第一節 研究緣起

台灣地理位置得天獨厚，海岸長一千多公里佔全世界海岸線的四百分之一，四周海岸型態、海底地形各異，地貌複雜獨具特色。西部沿岸潮汐流速約 0.2~0.4m/sec，近岸岬灣內潮汐海流平緩穩定，東北季風與西南季風盛行，形成複雜湧浪，而中國沿岸流與黑潮支流亦在此交匯，適合各式各樣海洋生物棲息；黑潮流經台灣東岸，流量達 20~30x10⁶ m³/sec，水深 20 公尺處之最大流速可達 1.0 m/sec(圖 1-1)，在蘇澳外海撞上宜蘭海脊形成湧升流現象，營養鹽充足，基礎生產力高，浮游生物密度高，形成重要漁場。優越的天然環境配合漁撈技術之精進，曾為本島創造風光一時的漁業奇蹟，更為國家賺進大量外匯，然近年來台灣海域不當的海洋資源利用，已使漁業資源日漸枯竭，漁業榮景不再。

許多漁業國家之沿近海漁場亦因長期過度不當捕撈，使得沿近海漁業資源日漸萎縮。世界各先進漁業國家遂興起人工魚礁理論之研究與實務之推展應用。亞洲地區，日本政府在 1932 年就制訂了「沿岸漁業振興對策」，把人工魚礁納入資源增殖設施的範疇；1958 年開始建造和投放大型魚礁；1974 年推動沿岸漁場改造與開發計畫案，以達到沿近海漁業的穩定發展，並藉設置人工魚礁來增加魚貨的供應(Terashima, 2006)，日本人工魚礁已走向標準化、規模化的發展，所建造的沿海人工魚礁是當今世界規模最大的人工魚礁群，使日本沿近海漁業的產量保持穩定的發展態勢。韓國政府為了增加沿岸漁業的生產力，從 1971 年開始設置人工魚礁(Chang, 2006)。中國大陸於 1979 年在廣西防城北部灣水域投放 15 個單體人工魚礁和 9 個單體人工魚礁樹，廣東

省亦計畫在 2002-2011 年間投資八億人民幣興建一百座大型人工魚礁，包括生態型人工魚礁五十座、開放型人工魚礁五十座(黃，2005)。人工魚礁建立於歐洲海域，亦有 30 餘年的歷史，主要是扮演保護海草、海床珍貴的資源，避免受拖網與沙洲的損害，以提供漁場保育功能(Jense, 2002)。1995 年人工魚礁在歐洲的研究活動，進入了以保育研究和經驗相互交流為優先的作業階段，這也就是歐洲成立人工魚礁研究網路(European Artificial Reef Research Network；EARRN)的目標和理由(Jense, 1998)。魚礁的投放在美國亦有四十年以上的歷史，但不同於東亞地區的計畫，其最初目的主要是為便利休閒垂釣與潛水(Sheehy, 2006)。

為維護沿近海漁業之持續發展，加強對漁業資源進行管理規劃及保護措施，我國自 1973 年開始大力推動「設置魚礁，培育資源」之計畫，對魚礁投放在海中之分佈、堆疊、掩埋情形與聚魚效益之評估曾有一系列報導(張，1976、1977、1979；邵，1989a、1989b)。台灣魚礁的投放迄今已逾 30 餘年，在周邊海域共計設立了 88 處人工魚礁禁漁區(圖 1-2)，各型礁體投放總數達 18 萬座以上，面積 220 萬餘立方公尺(漁業署，2007)。不論為因應近海魚源逐漸枯竭之問題，或因保護海洋資源、或為海洋休閒活動，人工魚礁在過去三十年來在世界各地已廣泛的發展，各沿海漁業國家莫不以設置人工魚礁為積極改善漁場環境與培育漁業資源的有效手段，並投注人力及龐大經費，其效果在國際上亦已普遍獲得認同(邵，2006)。人工魚礁有效投放，可提供海洋生物適當之棲所與達成資源復育之目的，此係保護本島珍貴海洋資源之重要作為。

依人工魚礁之用途分類，一般可分為增殖型魚礁、漁獲型魚礁、游釣型魚礁、生態保護型魚礁；如按其礁體所處海水中的位置，可分為底魚礁、浮魚礁等，本研究所探討的人工魚礁係針對人工底魚礁而言。而人工底魚礁的投放深度以 20~30 公尺之間為最適宜(Turner et

al., 1970; Fast et al., 1974)，投礁地點的海流流速以每小時不超過 1.5 哩為原則(大島，1964)。

海洋漁場本身是一個由許多生物種類組成的海洋生態系，從單細胞藻類到高營養層的魚類，構成了相互影響、相互依存的食物鏈。在水中投放人工魚礁，由圍繞礁體逐步形成的局部人工生態系，到修復和改善近海生態環境的作用。在現有的研究報告中，對投礁前、後之比較，大多數顯示魚礁對提供海洋有機生物安定之附著環境與吸引大量魚群聚集，有很好的聚魚效果(小川，1965；大島，1976；柿元，1983；佐藤，1984；岡本，1984；田中，1988)，且生物的豐度與多樣性有明顯增加，魚礁之投放與構建已被視為豐富海底生態之最佳模式。在許多研究中人工魚礁被宣稱是成功的，但目前尚未有一處礁區有過長期深入之監測計畫，所以少有研究顯示人工魚礁所佈設的高額費用是否可以回收？與如何降低投礁成本？或甚至認為投礁反而會造成過漁的惡化。學理上而言，魚礁聚魚功能與其自身之材質、大小、造型設計及其所處之水文環境有著密切之關連(Mottet, 1985; Rountree, 1989; Bohnsack, 1991; Grove et al., 1991; Bohnsack et al., 1994; Friedlander et al., 1994; Foster et al., 1995; Lindberg, 1997; Seaman et al., 2000; Spanier et al., 2000; Osenberg et al., 2002; Sherman et al., 2002; Jan et al., 2003; Lan et al., 2004; 詹，2004a; 邵，2004)，日本學者研究亦指出，魚類在潮流中有逆游的走流性(Taxis)，受潮流的影響很大(宮本，1956；竹內，1968；井上，1981；Montgomery et al., 1997；Haro et al., 2004)；海、潮流對魚礁生態之重要性，特別是附著生物之類聚，決定於其暴露在海、潮流之強弱及沈積物之多寡(Bayner and Szmant, 1989)。

人工魚礁在流體力學方面之研究，以黑木等(1964)為先驅，隨後有大阪等(1978)、影山等(1980、1982、1983)、佐久田等(1981)、加

納等(1988a、1988b)亦相繼研究，認為礁體周圍流場是聚集魚類範圍的重要指標。近年來解析魚礁渦動流場之運動物理現象方面，國外學者的研究認為，人工魚礁的佈置和其周圍的流場有相關性(Suenaga et al., 2001; Sayer, 2002; Wilding, 2002; Suenaga et al., 2006)，國內學者亦陸續有相關論著發表(林等，1998；李，2000；賴，2000；劉等，2005；蔡，2006；Liu et al., 2006；Su et al., 2008)。有關魚礁周遭流場型態與如何設計一個低成本且又有聚魚功能的礁體，將是海洋生態與工程專家研究之重點。

人工魚礁的佈置，使該處原有的平穩流場受到了擾動，礁體周圍流場的壓力隨之發生變化，流場的重新分佈形成新的礁區流場，更因礁體造型和大小不同及水文環境等多重因素之影響，使圍繞在人工魚礁周遭之流場亦相當複雜。魚類大多具有逆游習性(rheotaxis)，喜歡聚集在某一流速範圍內逆流前進，依水流的方向和速度隨時調整自身的游向和游速，故魚礁投置在各種不同的海床地形，自會影響礁體內外流場之速度分佈並造成不可忽略之紊流效應(turbulent effect)，如此藉由流速之改變與渦動效應(vortex effect)可提供魚類覓食機會。儘管在人造礁體使用的材料、設計、投放位置選擇與投礁技術等已有些研究，例如：Baine 和 Caselee 等指出人工魚礁聚魚的功能，視人造魚礁發展前設計的縝密性與適當性而定(Baine, 2001; Caselle et al., 2002)，而為使近海漁業資源更為豐富，人工魚礁空間結構的複雜性，更可以有效吸引多樣性魚類的聚集(Sherman, 2002)，彼等之研究結果皆顯示魚礁構型與流場之關係複雜。但迄今對魚礁流場有特定影響之專門性深入研究尚屬闕如，而此項研究將是未來學者研究魚礁流場與聚魚效果相互關係之重點，亦是魚礁整體佈建規劃發展之重點技術。

第二節 研究目的

影響人工魚礁聚魚成因太複雜，目前未有確切之定論，而影響礁體內流場之速度分佈，除礁體幾何構型被視為主因外，其所投置之海床地形及礁體幾何排列，亦可能是造成魚礁內外流場擾動效應不可忽略的因素。魚礁投入海底後會改變該處之海底地形，並因海流、潮汐、波浪等作用，造成礁區流場形成湧升流、加速流和緩流區，且因水體上下層混合與形成渦流，攪拌海底營養鹽類上翻，增進浮游生物之繁殖孳生能力，形成具有理想的營養鹽轉運環境與極佳的餌料場，進而吸引魚類來此棲息、覓食、聚集、滯留及繁殖。

為探討礁體流場特性與聚魚成因之相關性，本研究利用數值模擬法，剖析在不同海床地形與礁體在不同幾何排列堆疊之海流運動的環境下，魚礁所營造之「遮蔽效應」與「渦動效應」特性，做為判斷礁體聚魚成效之物理現象探討。只要能確切掌握影響魚礁聚魚成效之流場變化物理量，並藉由可視化數值流場之計算分析，則流場數值模擬技術將可成為人工魚礁最適化設計及其後續投礁規畫作業之最佳輔助工具。

第三節 研究方法

本研究以實地觀測、數值模擬與模型實驗等方式，來分析人工魚礁內外之流場。實地觀測選定以宜蘭石城人工魚礁區來進行，利用 GPS 導航於礁區定位，以科學魚探機、側掃聲納，搭配潛水觀測、現場錄影與樣本船作業，以瞭解人工魚礁區之魚群種類與分佈情形。

其次採用數值模擬法解析魚礁流場之特性，為驗證數值模擬方法在魚礁流場研究之準確性與解析礁體內、外複雜的流場問題，本研究以目前國內投放最多的雙層式方形水泥魚礁為對象，並配合環流水槽實驗設備利用質點影像測速儀(Particle

Image Velocimetry; PIV), 量測縮小十分之一比例的壓克力製成之魚礁模型, 探討在不同流速變化環境下, 魚礁內流場特性參數與實驗資料分析, 而有關於魚礁實驗流場之研究成果, 將成為驗證數值模擬流場準確性之重要參考資料。待完成數值模擬流場之驗證工作後, 數值模擬方法將被進一步應用於複雜的魚礁流場之研究, 以彰顯其在魚礁流場分析之研究價值。本研究中, 數值模擬方法將被應用於解析魚礁在不同海床地形影響下, 其內外部可能形成之複雜渦動流場與礁體在不同幾何排列變化下的流場分析。此一可視化流場之研究成果, 將可進一步應用於魚礁聚魚成效之探討。

第四節 研究架構

論文架構如圖 1-3 所示, 共分為七章, 茲分述如下:

第一章 緒論: 闡述本研究之動機、目的、研究方法與架構。

第二章 人工魚礁區之魚群分佈觀察: 本章為人工魚礁區之現場觀測與調查, 以衛星定位儀(GPS)作為船舶導航與礁區之定位、以科學魚探機分析魚群分佈之特徵、搭配潛水觀測與現場錄影以瞭解魚群種類與分佈、利用問卷與長期在魚礁區手釣作業之漁船為標本船, 以探討魚礁區流場與魚群分佈之關係。以上係探討人工魚礁在流場中之魚類群集因素的物理現象。

第三章 計算流力數值方法在人工魚礁流場之應用: 本章論述水下潛體流場分析之相關理論與在人工魚礁流場之應用, 說明幾何外型建立之方式與相關配合之應用軟體。人工魚礁流場數值模擬設計, 按人工魚礁實體比例以縮小十分之一的模型進行數值模擬, 其主要目的為配合水槽實驗所量測之魚礁模型流場相關數據進行比對分析。

第四章 PIV 實驗量測與數值模擬分析: 本章以環流水槽進行 PIV 實驗量測。利用 PIV 量測壓克力製成之雙層式方形水泥魚礁

模型之內外流場，並與數值流場模擬運算比對分析結果，此係為測試計算軟體之適用性與其精確度之評估，以作為利用數值模擬軟體建立魚礁開發參數之依據。

第五章 人工魚礁在不同海床地形之流場模擬：本章針對人工魚礁在海流作用下，其附近海床地形變化對礁體內外流場之影響。有關海床地形變化之構建，在論文中將以缺口朝上與缺口朝下之三維簡單梯型幾何構型來分別模擬隆起與凹陷之海床地形，配合三個 β 角之變化($\beta=5^{\circ}, 15^{\circ}, 30^{\circ}$)與魚礁在二種凹凸地形及在海床地形上三種不同擺設位置之組合，總共將計算 18 種魚礁流場模擬算例(表 1-1)。模擬計算結果之探討，將分析礁體中央縱切面及礁體中央橫切面等兩個平面之相關計算結果，與分析海床地形之幾何變化對礁體流場之影響。

第六章 礁體幾何排列變化對人工魚礁流場影響之分析：本章探討在海流作用下之礁體幾何排列變化，其附近外圍流場之分析。含括三項研究算例(表 1-2)：橫向排列間距變化、縱向排列間距變化與垂直堆疊之魚礁外流場分析。在經濟成本的考量下，如何發揮聚合礁體的最大成效，以達最佳的經濟效益。

第七章 結論：將本研究之成果做一總結，期能提供相關單位未來投礁設計與規劃之參考。

表 1-1 魚礁擺設在 18 種凹凸海床地形之流場模擬

坡度角	隆起海床地形			凹陷海床地形		
	迎流面	頂部	背流面	迎流面	底部	背流面
5°						
15°						
30°						

表 1-2 礁體幾何排列變化之流場模擬

排列方式	礁體間距 \bar{L} (單位：m)					
	雙魚礁橫向排列	0	0.5	1.0	2.0	3.0
雙魚礁縱向排列	0	N/A	1.0	2.0	3.0	4.0
排列方式	堆疊模式					
魚礁垂直堆疊	2 礁體	4 礁體(2x2) /縱向堆疊		4 礁體(2x2) /橫向堆疊		

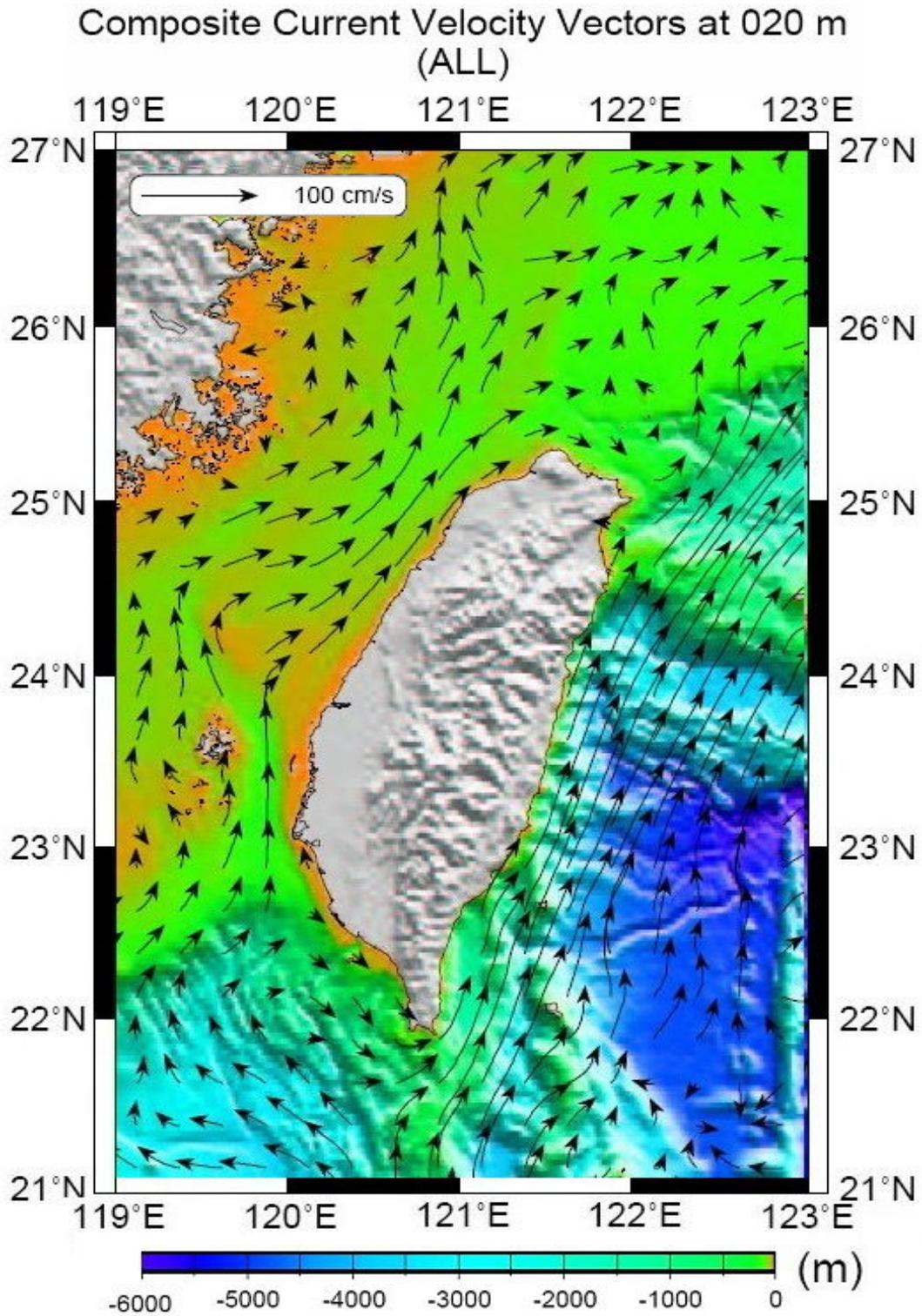


圖 1-1 臺灣沿近海 20m 水深流速向量圖
(資料來源：國家海洋資料中心；NCOR)

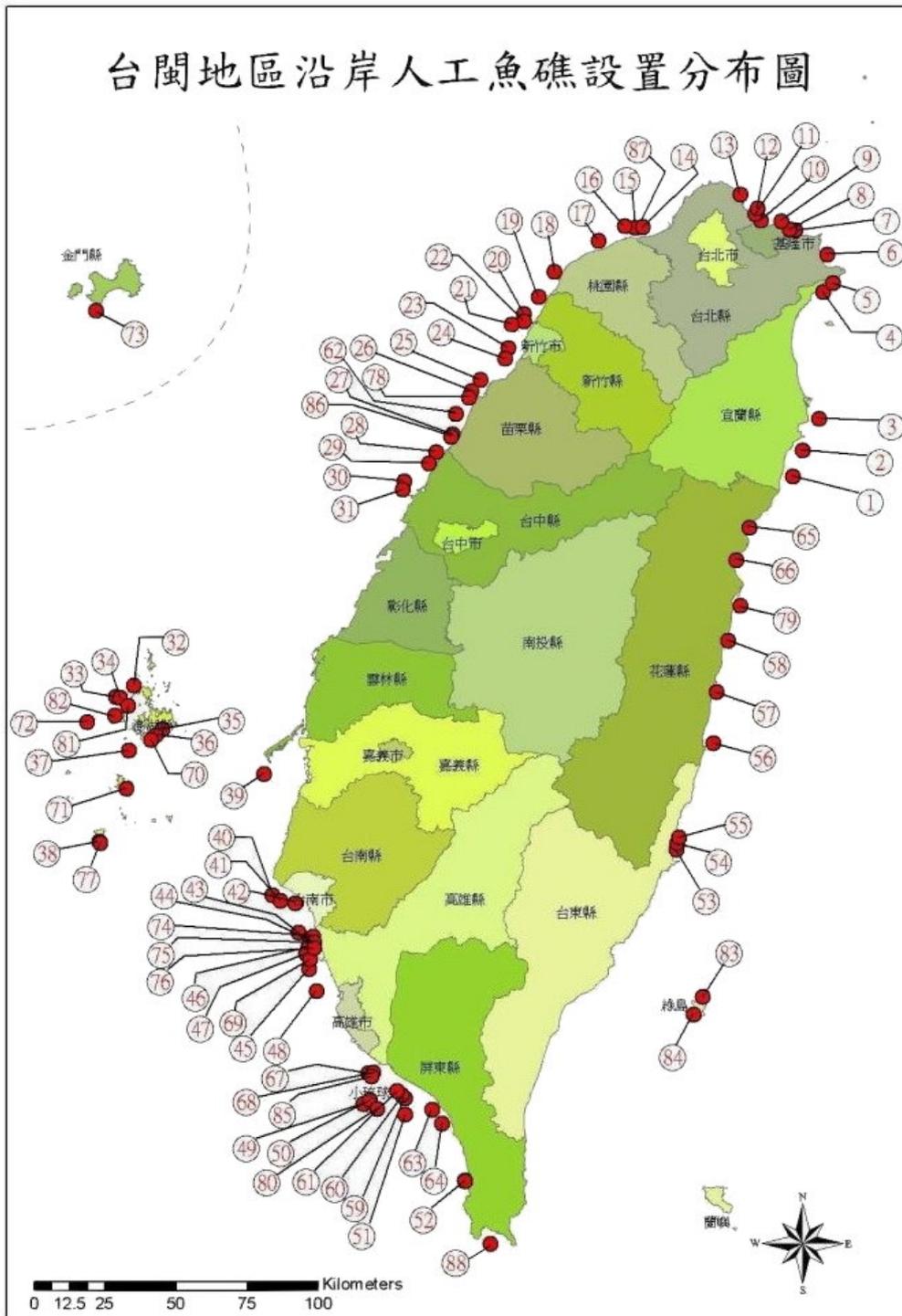


圖 1-2 台閩地區沿岸人工魚礁設置分佈圖(96 年漁業署公告)

註：基隆市(3 處)、宜蘭縣(5 處)、台北縣(8 處)、桃園縣(3 處)、新竹縣(2 處)、新竹市(3 處)、苗栗縣(7 處)、台中縣(4 處)、嘉義縣(1 處)、台南市(4 處)、高雄縣(12 處)、屏東縣(11 處)、花蓮縣(6 處)、台東縣(5 處)、澎湖縣(13 處)、金門縣(1 處)。

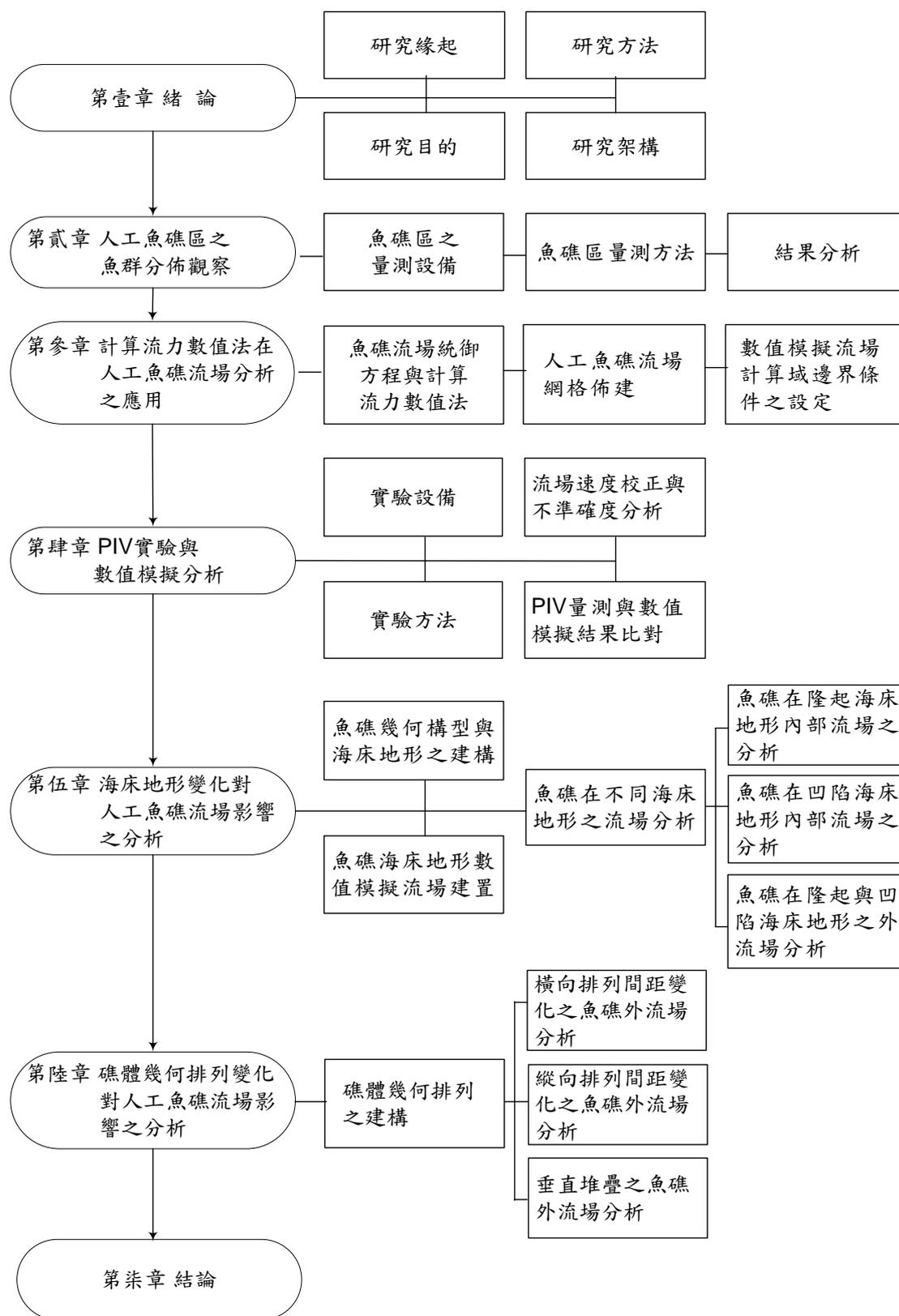


圖 1-3 論文架構

第貳章 人工魚礁區之魚群分佈觀察

國內學者過去研究魚礁效益之調查報告 53 篇，按調查項目、調查方法與評估結果加以整理分析，將資料區分為水文環境調查、生產力調查、礁體特徵調查、生物相調查、魚類群聚調查、漁獲效益調查，及遊憩效益調查等七大項(詹等，2003；王等，2004；詹等，2004b)，其中魚類群聚資料因需仰賴具魚類專長的專業潛水人員目視調查，故此項資料只有在 25% 的報告中出現。因此，為增進人工魚礁投放後效益評估的精確性與人工漁場形成機制的掌握，必須從以往經驗的累積及實際評估方法的比較中，針對不同的投礁目的，研擬一套合理的評估標準程序，才可以化解區域性人工魚礁評估結果的爭議，也可藉此達到較客觀的比較結果。

魚礁聚魚形成之機制，除了礁體材質、礁型受影響之外，當然還有其它生物(餌料生物)、物理(海流流速流向)及化學(重金屬污染與環保問題)等因素也必須考慮。本研究就近選定宜蘭縣石城水泥魚礁區作為現場之研究對象，作為後續探討魚礁在各種海床所產生的不同流場對魚類群集作用的物理現象之研究。茲將研究設備、方法與成果詳述如下。

第一節 魚礁區之量測設備

以全球衛星定位系統(Global Positioning System, GPS)、側掃聲納系統(Side Scan Sonar System)、科學魚探資訊系統(Fisheries Research Echo Sounder System)及繪圖處理軟體，進行人工魚礁區之定位與調查，並配合潛水目視調查與攝影，瞭解礁體、魚群分佈位置、砂埋情形、覆網及破損等狀況，以建立投礁區之資料。

一、衛星定位系統接收機

全球定位系統已普遍地被應用於導航及定位，本研究使用古野公司 Furuno 生產之 GP1850 定位系統，可外接天線作為 DGPS(Differential Global Positioning System) 接收機。其即時動態 (RTK) 精度為 0.2 m，後處理 (Post - processing) 精度為 0.005m+1 ppm。

二、側掃聲納系統

以美國製 *J. W. Fish SSS 100/600K* 及 *Klein System 3000* 兩套側掃聲納系統 (圖 2-1)，調查人工魚礁投放位置之分佈及現況。主要系統設備如下：

(一) 圖形記錄器(Graphic recorder)

解析度：203 dpi (dot per inch)

灰階：16 階數位控制階

輸入電壓值：120 或 204 交流電，100 瓦

記錄紙型式：17 吋寬放電式記錄紙或底片

(二) 拖曳式音波收發波器(Tow fish)

拖曳式音波收發波器：直徑 4 吋 x 長 62 吋

頻率：100 或 600 KHz (SSS-100K/600K)

水平/垂直波束寬：1 度(水平)/40 度(垂直)，10 度向下傾斜

脈波長度：0.1 ms.

輸出電壓值：1000 瓦/頻道

最大探測水深：500 呎(150 公尺)

拖曳速度：1~12 m/h(公尺/小時)

電纜線長度：0.75 吋(直徑) x 150~500 尺長

三、科學魚探系統

利用音波傳動與反射原理，來尋找魚群並探測其棲息水深。本研究使用：

(一)日本 Kroyal 公司生產之 72GP4 (50/200KHz)魚探機，發射頻率為 50/200KHz，海圖顯示範圍 0.005nm~200nm，測深顯示範圍 0~500 公尺，水溫顯示 0~35°C。可同時迅速掌握魚群之水平分佈、垂直分佈、上下運動與成群動態，為尋找漁場、量測水深與測繪海底地形之用。

(二)Simrad 公司生產製造的分割波束科學魚探系統，EY500 (Scientific Echo Sounder System)，為收錄聲學資料、研析魚群分佈特徵與總生物量之用。

四、後處理圖資整合系統

後處理圖資整合系統，使用美國 Golden Software 公司生產的 Surfer V8.02 三維科學繪圖軟體，能精確、快速、省時，正確掌握海床地形與地物。Surfer 是以網格為計算基礎，使用內差法將資料規則化，以顯示等深線圖及立體圖之地形分析軟體，可將海床地形、地物、測深等之圖資資料整合及輸出的工具。

第二節 魚礁區量測方法

一、以 GPS 作導航與投礁地點校正

人工魚礁投放後，受颱風、海流、波浪及漂砂等之影響，致礁體常發生位移、埋沒或破損流失，本研究以 GP1850 衛星定位接收機作為量測船定位、導航及確定礁區位置與礁體相對分佈狀況。

二、應用側掃聲納調查魚礁之分佈狀況

將側掃聲納以礁區為中心點，在其周圍四個面向，東、西、南、北各 0.5 哩範圍內，進行海床地形與礁體掃瞄。量測船在找尋海底目標物之船速可維持在 3 節左右，收發波器可以各種角度在目標物周圍來回航測數次，以清楚的記錄側掃影像，每條測線在航測時應保持直線方式進行，以免影響資料判讀的準確度，最後由圖形輸出器(Graph Recorder)逐一顯示出水泥礁位置及周邊地貌之影像，並繪製出礁體散佈圖(圖 2-2)。

三、應用魚探機擷取魚礁區之海床地形、地貌資料

運用音響探測法測繪海底地形是海洋工程及決定漁業作業地點必要的調查項目之一。在海洋工程方面，可正確的掌握海底地形，將有助於工程的施工，如人工魚礁的投放地點選擇、深度的選擇是否適宜等；在漁業方面，藉由海底地形的描繪，可以研判魚道可能的位置、探究漁場形成的原因與決定漁具設置的位置等。

本研究應用科學魚探機，在宜蘭石城水泥魚礁區以 Z 字型航測方式(Zig-Zay Way)由東西向及南北向，來回紀錄擷取水深資料，Z 字型測線規劃(圖 2-3)，每條測線距離端視測量海域範圍大小及欲檢視的海底地形之精密度而定。將收集的水深資料進行後處理工作，包括定位資料之校正與整理，水深、潮差之修正。最後，將校正後的資料，轉換成 ASCII 碼，再由繪圖軟體繪製成二維或三維的海床地形與地物(圖 2-4、圖 2-5)。

利用聲學原理探測魚群量及生物量，以 EY500 科學魚探擷取魚礁區現場的聲學資料。以石城水泥魚礁區為中心點，運用 Z 字型航法，由東、西、南、北，四個方位向外延伸 0.5 哩作為量測範圍，每條測線間距 0.1 哩，將魚礁區現場擷取的聲學資料，以 Simrad EP500 後處理軟體重新處理，以計測礁區測線之水中生物音壓分佈。在積分

時，以聲波水平方向每 5 分鐘 50 脈波(ping)作為一個單位的採樣距離(Elementary Sampling Distance Unit, ESDU)，而垂直積分單位(Elementary Integration Unit, EIU)則是以水平距離 50 脈波內，每垂直距離 5 公尺為一個垂直積分單位。為避免受表層作業時產生之擾流及海底反響層等所造成之雜訊影響，故去除表層 5 公尺以淺和離海底 1 公尺之反射波強度，以確保資料之準確性，便於求出平均生物音壓，及估算礁區內魚群洄游模式與總生物量之變化(圖 2-6、圖 2-7)。

四、潛水觀測調查

為瞭解魚礁區之魚群數量、種類與分佈狀況及礁體砂埋、覆網、破損等狀況，本項調查配合潛水攝影、記錄與目視觀察各礁區之現況，包括生態成長情形、礁體沉陷狀況、掛網情形、海洋生物附著情况等，以作為評估魚礁現況與效益之依據及未來後續投放人工魚礁政策與經營管理之參考。

第三節 結果分析

一、魚礁分佈現況

(一)海床地形及地物之側掃分析

宜蘭縣石城水泥礁區自 71 年至 87 年間已投放 2015 座，由側掃聲納影像顯示各礁體在海底位置相當接近，但礁群分佈面積很廣。整體海底地形呈現由沿岸向外海緩緩下降的趨勢，已有魚群聚集洄游魚礁體附近情形，顯示礁區的聚魚效果相當良好(圖 2-8)。

表層底質屬於細沙到淤沙之間，約佔整個底質的 80% 以上，礁體砂埋 0.15 ~ 0.50 公尺(圖 2-9)，若在此只設置單體(unit)的魚礁的話，則容易造成魚礁沉陷的現象。因此，若在此設置人工魚礁，則應傾向投置礁堆(set)、礁群(group)，或投放大型人工魚礁單體(如軍艦礁或鋼鐵礁)較適合。

(二)礁區散佈範圍

宜蘭縣石城人工魚礁區主要的礁群分佈有 3 處，分別是較北邊的 8 座 A 型鋼鐵礁與萬安軍艦礁所組合而成的魚礁群，水深約為 30～32 公尺。其次為水泥礁群，其中心點經緯度為 24°57.5' N, 121°56.5' E(WGS84 系統)，平均水深約為 24.4～29.3 公尺左右，分佈半徑範圍約 0.5 哩。另一組為在南邊的當陽軍艦礁區。北邊礁群主要分佈在水深 32～33 公尺間較淺的海域，南邊礁群主要分佈在水深 48 公尺的海域。

(三)潛水觀測分析

宜蘭石城水泥魚礁區，潛水人員以水下攝影及目視觀察，並即時進行資料記錄(表 2-1)。由潛水實地觀察魚礁聚魚現況、生態成長情況、海洋生物附著情形與礁石沉陷、損毀、覆網等狀況(圖 2-10、圖 2-11)。

透過潛水人員觀察紀錄與海底攝影所得到的結果如下：

- 1.石城海域底質多屬砂質底質，以介於細砂、到極細砂沙泥間的底質為主。
- 2.海底分佈相當平坦，與測繪結果相符，此一片砂地地形，並無提供魚類棲息之硬質結構。
- 3.水泥礁有部份礁體損壞，應是在投放時撞擊所致，西南側及南側有部分沙埋的現象。水泥礁大部份緊密相鄰，但僅有少部分堆疊，最高約達 4 公尺。
- 4.由於投礁區底質為砂質海底，因此將來必須針對礁體被埋沒之觀察與管理持續進行追蹤，必要時需再增設魚礁，以維護礁群壽命與保持投礁後所聚集的魚類資源。

二、魚礁區魚群之分佈

由科學魚探分析所得到的總生物量的分佈情形，在礁體附近有相對較佳之生物音壓(圖 2-7)。圖中顯示，魚群大多分佈在水深較深(約在 40 公尺以深)的海域，40 公尺以淺的海域只有部份的魚群分佈在北邊由兩種不同材質所構成的礁群，而在南邊的當陽軍艦礁區，無論在礁體中心點或其周邊都有較多魚群分佈。由圖中顯示南邊礁區的聚魚效果比北邊的礁群要好，然這只是某一時段的觀測結果，若將來能累積各季、年的總生物量分佈情形作相互比較，才能確認兩邊的差異。

三種不同魚礁區所附著之生物相似，棲息之魚類也相似。在礁體內部及靠近礁體周圍之天竺鯛(*Apogon fleurieu*)及雀鯛(*Chromis fumea*)佔多數。三線雞魚(*Parapristipoma trilineatum*)及紅魷魨(*Seriola dumerili*)、牛港魨(*Caranx ignobilis*)、烏尾魨(*Caesio teres*)等在外圍，龍蝦(*Panulirus stimpsoni*)、石斑(*Epinephelus coioides*)及石狗公(*Sebastiscus marmoratus*)棲息於底部空隙。水泥礁之天竺鯛相對較少，而鋼鐵礁及軍艦礁皆附著大量繁茂之軟珊瑚(*Alcyonacea*)。

本研究針對人工底魚礁區的聚魚成效實際觀測的結果，雖然地點不同，附著生物量及聚集的魚群量有差異，但礁體附著的生物成長情形良好，而且吸引小、中、大型魚類的棲息成長，逐漸形成完整的食物網，顯示礁區的聚魚效果相當良好。軍艦礁及大型鋼鐵礁所聚集大量的魚群，更是船釣及傳統漁民的最佳作業地點。政府必要時需再投放各型人工魚礁與船礁，以維護漁場的更新改造、防止漁場老化及營造台灣沿近海域優質的漁場環境，以提昇設置人工魚礁之整體效益。

(一)礁區聚魚因素與海流之關係

黑木(1958)認為因水中音而造成的誘致性，在魚礁上游側有因潮流造成的振動音，在下游側有因渦流造成的水分子變動；桑谷(1962)

認為魚礁最好設在潮流的邊緣地帶，在海流交界面或水團交界處往往有豐富的營養鹽，生物相亦較繁雜；小川(1966；1967；1968a) 研究魚群對人工魚礁的行為，做了詳細的水槽實驗；小川(1965；1968b) 研究魚礁區魚的聚集行為發現，外在誘發刺激因素包括聲音刺激、水流振動刺激、視覺刺激等等；柿元(1967)認為魚礁聚魚的理由包括餌料效果、陰影效果、渦流效果等；森(1971)研究指出在開始漲潮至最大潮之間魚群聚集量最多，潮差愈大魚群聚集量也愈多，隨著流速愈快，魚群愈接近礁體中心，渦流效果和魚群密度有很高之關聯性；Nikonorov(1975)在沙丁魚的研究中指出當潮流的流速小於 0.35m/s 或燈船的移動速度小於 0.3m/s 時，魚就易聚集在光域；佐藤(1976)、井上(1985)因遇危險為保護本身，將礁區視為逃避目標之說、或將魚礁所產生的渦流作為要因的渦流說與為了身體能接觸固體的走觸性(haptotaxis)說；肥後等(1974；1978；1979) 對人工魚礁的實態進行潛水觀察；井上(1978)魚類具有很多共同行動，如走流性；Nakamura (1982) 建議魚礁應投置在潮流之邊緣地帶，這些潮流包括湧昇流(upwelling)、湧降流(downwelling)、上升流(ascending current)及渦流(vortex current)；岡本(1983) 使用魚探來調查人工魚礁的魚群分佈情形；Chang(1985)之研究結果顯示當水流過大型的人工魚礁時，外圍會形成高流量區，而下游地帶即形成低流量區，魚類會躲在海流較小處。

綜合上述，顯示魚礁流場之複雜關係，對魚類群聚的數量、分佈與洄游有很大的影響。海流所形成之壓力波對魚類之行為亦很重要，當水流流速增加時，魚類有躲在礁體後方之流場及陰影範圍內之傾向，魚類會躲在海流較小處。而在海流之交界面易造成水體上下混合與形成窩流攪拌海底營養鹽，可增進浮游生物之基礎生產力，生物相亦較複雜。

(二)魚類群聚分析

魚類群聚調查可以直接反映在礁區棲息的魚種及數量，與用來評估礁區生物群聚的效益，在魚礁效益評估中占有重要地位。根據國內學者(嚴，2006；王等，2004；詹等，2006；謝等，2007)，最近對人工魚礁區與天然礁區魚類群聚之比較研究(如表 2-2)，可獲得以下幾點結論：

- 1.天然礁為整片較平坦礁岩，聚集魚種數多而魚尾數較少，形成時間較長。
- 2.人工魚礁聚集魚種數少而魚尾數較多、礁體具有空間，短時間內可聚魚，類似獨立礁體。
- 3.獨立礁具天然礁與人工魚礁兩者之優點，魚種數與尾數均較多，與流場複雜性有關。
- 4.魚礁具「渦動效應」(vortex effects)與「遮蔽效應」(shading effects)；在礁體迎流面(流頭)，有渦流產生，形成浮游生物的聚集可供魚群覓食，在礁體背流面(流尾)流速小，可供魚群休息節省體力。
- 5.魚種數的差異可能與棲所空間複雜度及底棲生物資源有關，當棲所的空間複雜度越高時，將會造成許多不同的隱蔽性棲地，進而吸引更多使用不同棲所的物種及魚類聚集。

(三)魚礁區魚群分佈之觀察結果

關於魚礁聚魚的垂直結構分佈模式，小川(1968b)將魚礁附近的集魚狀態分為強烈的接觸刺激型、胸鰭或腹部等接觸型、幾乎不與礁體接觸型、非必要與礁體接觸型與完全不必要與礁體接觸型等五型。堺(1973)潛水觀察，將礁體附近的聚魚狀態亦分為五型，含括：表、中層型、很接近魚礁型、魚礁內部型、魚礁面接觸型與貼近海底型。

Nakamura (1985)則將魚礁區之魚類分佈位置分為底棲類、靠近礁體四周活動型與在中水層或表水層活動之魚類等三型。

從魚類的活動空間來看，有的魚類喜歡接觸固態形體、有的喜歡以固態形體作為行為的定位、有的喜歡在魚礁的陰影部分滯留、有的喜歡流體的刺激、有的喜歡在魚礁的上部逗留、有的喜歡在魚礁的周圍洄游等，魚類在各種習性的作用下，本能的游向餌料充足、水流多變和有陰影的場所，魚礁提供了魚類索餌、休養和繁衍的一種優越生態環境。本研究觀察石城魚礁區周圍魚群之分佈情形可概分如下：

1. 定棲性魚類(residents)

棲息魚礁內部或魚礁空隙之中的魚類，如小魚苗、仔稚魚、夜行性天竺鯛，大多住魚礁裡面，交配時在魚礁周圍；雀鯛在魚礁周圍活動，很接近魚礁表面；定棲性的肉食性魚類，多屬底層魚類：例如石斑魚、石狗公、獅子魚(*Pterois anennata*)等(圖 2-12)。

2. 偶棲性魚類(Visitors or Transients)

在魚礁附近游動棲息的魚類，憑聽覺、視覺感知魚礁的存在，如三線雞魚、立旗鯛(*Heniochus acuminatus*)、角蝶魚(*Zanclus cornutus*)、刺尾鯛(*Acanthurus*)、烏尾冬(*Pterocaesio digramma*)，因魚礁引起的流場變化而吸引魚類滯留在魚礁周圍或中水層，距魚礁 3 公尺~5 公尺(圖 2-13)，

偶而會進魚礁裡面。

3. 洄游性魚類(Pelagic fishes)

在魚礁上方的魚類，如紅魷鯨(*Seriola dumerili*)、梭魚(*Mugil soiuy*)、中華鱒(疏齒，四齒) (*Scomberomorussinensis*)，距魚礁約 10 公尺~20 公尺，潛水較少觀察到，由海釣船或漁民的漁獲紀錄資料可得知(圖 2-14)。

以上棲息在魚礁區的魚類中，大部分定棲性魚類體型較小、移動力較弱，例如雀鯛及天竺鯛。而大型的定棲性食魚性魚種，例如石狗公、石斑魚的數量比較少；偶棲性魚類是在白天成群攝食浮游生物的魚種，例如馬尾冬(*Decapterus kurroides*)，以及夜間底棲性攝食者，例如石鱸(*Pomadasys maculatus*)、雞魚；洄游性的魚類，以魚礁為目標屬表層、中層型之食魚性魚種，易被礁區獵物所吸引，例如中華鰱。魚礁可提供稚魚庇護，以及魚類棲息、索餌和產卵等場所(小川，1973；佐藤，1984；邵，1989c)；又魚類善於利用水流以達成產卵、攝食及育成場的定位等目的(Meek, 1961)，由上述魚群分佈觀察，本研究將人工魚礁吸引魚群聚集的因素歸納如下：

1. 遮蔽效應(shading effects)：

魚類都具有避敵的本能，人工魚礁的設置為魚類建造了良好的「棲所」，許多魚類選擇了礁體內部及其附近作為暫時停留或長久棲息的地點，在人工魚礁礁體內部發現很多體型較小的魚類躲藏在礁體的空隙中，不乏有多種大型魚類的稚仔魚穿插其中，都是藉著礁體的隱蔽空間，或因礁體內部流速減緩，或因棲息在礁體陰影處，而得以保護成長，亦有學者稱為「陰影效應」，這是人工魚礁聚魚的重要因素之一。而本研究所謂「遮蔽效應」是針對礁體內部流場與礁體後端下游之流速減緩區而言。

2. 渦動效應(vortex effects)：

根據研究發現，人工魚礁阻擋流水所形成的渦動現象，會造成附近海域及其內部水壓的變化而形成緩流區域，一般魚類較喜歡棲息在這些緩流區域，尤其當水流因潮汐轉強時，位於魚礁礁體後側的緩流區，更是有明顯的聚魚功用。

3. 產卵功用(spawning effects)：

底棲魚類有將魚卵產在固定礁石的習慣，可保護魚卵不會被其他魚類攝食或被海流流走，因此在魚類繁殖季節，人工魚礁區就提

供了一個絕佳的繁殖場，有非常多的魚類會在此交配產卵，繁殖下一代。

4. 餌料功用(feeding effects)：

礁體投放後裸露的表面上很快就會被海藻吸附，與生長大量附著物，會形成浮游生物的聚集，因此提供許多底棲生物的生長環境，同時也吸引小型魚類的棲息成長，更吸引中、大型魚類在此捕食小型魚類，容易形成完整的食物鏈。

魚對流的反應，當流速較小時對魚不起反應，每種魚都有一個對流開始起反應的臨界速度，在弱流中或在靜水中，魚類的活動不定向，成不規則漫遊形式。當流速達到一定程度時，魚類的活動增強，便積極逆流游泳，以利定向和攝食，魚類的這一習性，可由下列幾點得到證明。刺網作業時總是橫流放網，魚類幾乎都是以單面罹刺在網面上，兩面掛網的情況是少有的，又拖網作業的拖向往往採取順流拖與魚的游泳方向相反時漁獲條件最佳，可獲得較高的產量。竹內(1968)調查研究潮流方向與魚群行動之間的關係發現，當青鮎鰻(*Seiola quinqueradiata*) 群洄遊方向與潮流方向相反，即青鮎向北洄遊而潮流向南流時，魚群的入網數較多。當流速過大，魚群亦保持逆流狀態，但易被流沖走，所以近岸的張網漁業利用這一特點，在大潮時捕撈大量的魚蝦。

本研究主要藉由魚礁的特殊設計，促進海域中海流的擾動，充分發揮魚礁的「渦動效應」與「遮蔽效應」功能，形成魚礁集魚的機制，營造魚類喜好的索餌場、產卵場、養育場等生活環境與空間，才能復育珍貴的海洋資源，成為名副其實的「海洋牧場」。

表 2-1 宜蘭縣石城魚礁區潛水觀察紀錄

時間 地點	時間 : 96 年 7 月 5 日 15 時 25 分至 16 時 10 分
	位置 : 北緯 24 度 57.9 分 東經 121 度 56.5 分
海 象	天候 : 晴時多雲
	潮汐 : 高潮 09 時 13 分, 低潮 16 時 05 分。
	風力 : 平均 4~5 級, 陣風 7 級, 西南偏南風。
	風浪 : 小浪至中浪
環 境 條 件	水深 : 最淺-24.5 公尺、最深-29.3 公尺。
	能見度 : 5~8 公尺
	水溫 : 26.4~27.6°C
	流向 : 西南往東北
	流速 : 0.5~1.5 哩/小時
	底質 : 沙質
礁 體 狀 況	壞損 : 部分礁體有毀損的情形
	沙埋 : 部分礁體有沙埋, 西南側及南側較為明顯。
	漁網 : 有部分殘破的廢棄漁網
	位移 : 無
	礁區 : 寬約 50 公尺、長約 100 公尺。
	堆疊 : 最高堆疊約 4 公尺
生 物 狀 況	附著物 : 水螅、海鞘、海綿。
	藻類 : 有
	珊瑚 : 雞冠軟珊瑚 (<i>Dendronephthya</i> sp)、管星珊瑚 (<i>Tubastraea aurea</i>)、柳珊瑚 (<i>Gorgonacea</i>)。
	魚種 : 雀鯛 (<i>Chromis fumea</i>)、天竺鯛 (<i>Apogon fleurieu</i>)、柴魚 (<i>Microcanthus strigatus</i>)、紅魷 (<i>Seriola dumerili</i>)、三線雞魚 (<i>Parapristipoma trilineatum</i>)、烏尾冬 (<i>Pterocaesio digramma</i>)、石鯛 (<i>Oplegnathus fasciatus</i>)、石斑魚 (<i>Epinephelus coioides</i>)、蝴蝶魚 (<i>Chaetodontidae</i>)、鱸魚 (<i>Lateolabrax japonicus</i>)、河魨 (<i>Ostracion meleagris</i>)、平魮 (<i>Carangoides equula</i>)、蝦魚 (<i>Aeoliscus strigatus</i>)、粗皮鯛 (<i>Acanthurus dussumieri</i>)。

表 2-2 魚礁區魚類群聚之比較分析

文獻名稱	人工魚礁漁場形成機制及投放效益之評估研究 (謝等, 2007)	台灣人工魚礁魚類的現生量 (詹等, 2006)	台灣人工魚礁的效益評估 (王等, 2004)	以潛水調查與遙控攝影觀察萬安艦魚礁區魚類相之調查研究(嚴, 2006)
調查時間	● 96 年 7 月~10 月	● 91~93 年間, 一共執行 81 次船潛。	● 92 年至 93 年文獻分析。	● 94 年 7 月至 95 年 5 月共執行 5 監測錄影及 10 次的潛水調查。
調查地點 (人工魚礁區與天然礁區)	● 宜蘭縣石城人工魚礁禁漁區包括水泥礁區、鋼鐵礁區、軍艦礁區。	● 17 處人工魚礁區: 包含 8 處水泥礁區、6 處電桿礁區、5 處鋼鐵礁區及 9 處軍艦礁區。	● 七處人工魚礁礁區: 龜吼魚礁區、大武崙魚礁區、望海巷魚礁區、澳底慶陽艦、奇萊鼻岳陽艦、海口中榮艦。	● 宜蘭縣石城魚礁區萬安軍艦礁。
	● 北部的天然礁調查以石城海域; 南部調查以枋寮海域。	● 調查天然礁區(包括礁盤和獨立礁)。	● 北部的天然礁調查以澳底海域; 南部則以小琉球軍艦礁鄰近海域。	● 無調查
調查方法	● 潛水目視調查, 深度 25~38 公尺之間。	● 潛水目視調查, 深度 25~40 公尺之間, 以一瓶壓縮空氣所能支持的水下時間(25 分鐘左右)內收集到的資料為主。	● 潛水中目視觀察, 以水中能見度 5 公尺以內記錄所得資料。	● 潛水目視調查採樣時間每次約 20 分鐘, 深度平均 35 公尺。 ● 全天日、夜分時段遙控攝影與監測錄影。
魚種數	● 宜蘭縣石城潛水觀測魚種數共計 23 種。 ● 屏東枋寮人工魚礁區: 在各礁區附近洄游的漁獲物種類多達 57 種, 潛水觀測 24 種	● 共記錄到 232 種魚類。最少的礁區為北部人工魚礁區, 最多的為南部海域的一個天然珊瑚礁區。 ● 水泥礁、電桿礁、鋼鐵礁、軍	● 人工魚礁區: 記錄到 19 筆資料 38 科 143 種 ● 天然礁區: 共記錄 20 筆資料總計 44 科 289 種。 ● 由多到寡分別為礁盤(南、	● 魚礁區日夜晨昏共記錄 28 科 56 種魚(潛水調查結果顯示有 22 科 48 種、白天遙控攝影觀察結果 19 科 34 種、夜間遙控攝影

表 2-2 (續上表)

	(5 公尺內)。	<p>艦礁，在漁種數目上並沒有明顯差異(25-28 種)，但比天然礁或獨立礁顯然較少(50 種以上)。</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 人工魚礁區的魚種數(全區:7-48 種)明顯較天然礁(北部 28-76 種；南部 69-73 種)為低。 	北部)、獨立礁、人工魚礁(軍艦礁、水泥礁)。	觀察結果 21 科 27 種)。
<p>漁獲量 (總尾數或漁獲金額)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● 宜蘭石城人工魚礁區: 平均每船每天漁獲金額由大到小依序為：天然礁 5938 元、水泥礁、軍艦礁、鋼鐵礁、廢船礁最少 3383 元。 ● 屏東枋寮人工魚礁區: 平均每船每天漁獲金額由大到小依序為：鋼鐵礁與水泥礁混合區 4376 元、廢船礁區、水泥礁區、天然礁區最少 1362 元。 ● 人工魚礁區的漁獲效益約為天然礁區的 3.2 倍。 	<ul style="list-style-type: none"> ● 澎湖魚礁區的漁獲尾數明顯高過其他地區魚礁區及天然礁區。 ● 以鋼鐵礁區 10143 尾為最多，水泥礁及天然礁少於 2000 尾，為最少。 	<ul style="list-style-type: none"> ● 人工魚礁區：29447 尾，天然礁區：35707 尾。 ● 以獨立礁為最多，魚種數最多的南部珊瑚礁在尾數上相對的反而不多。 	<ul style="list-style-type: none"> ● 每次日、夜調查均有出現，天竺鯛有多達 10,000 尾以上族群活動紀錄，三線雞魚也有 200 隻的群聚。

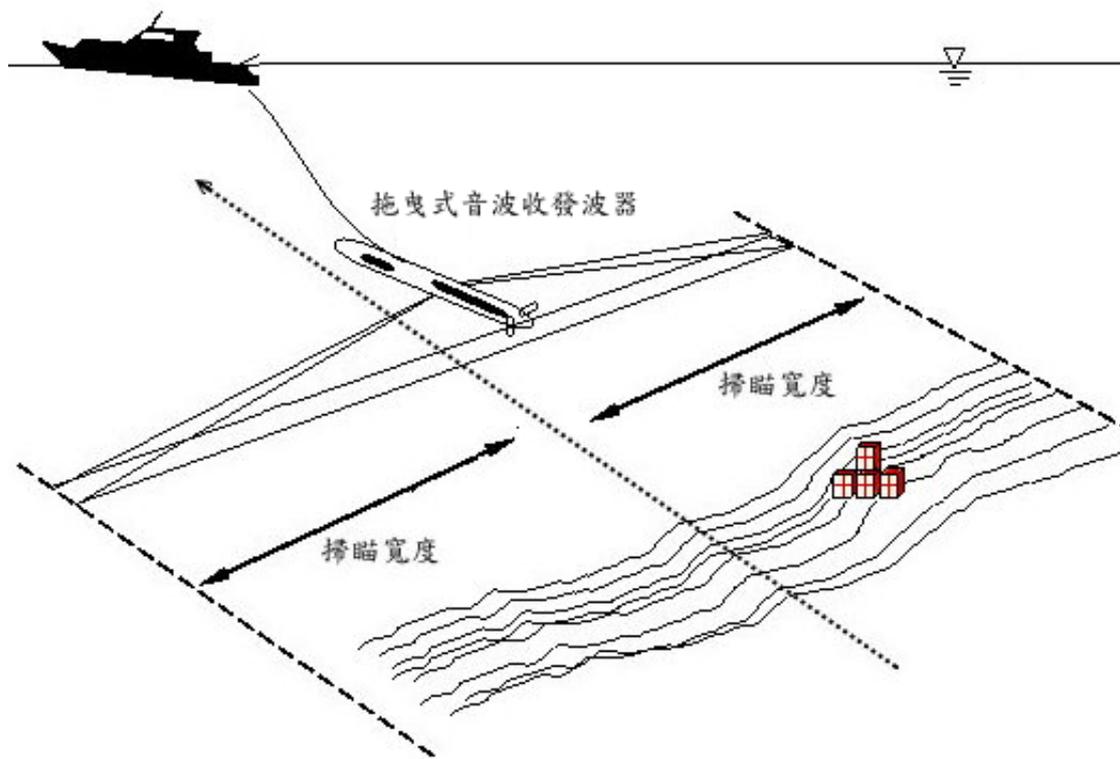


圖 2-1 側掃聲納系統示意圖

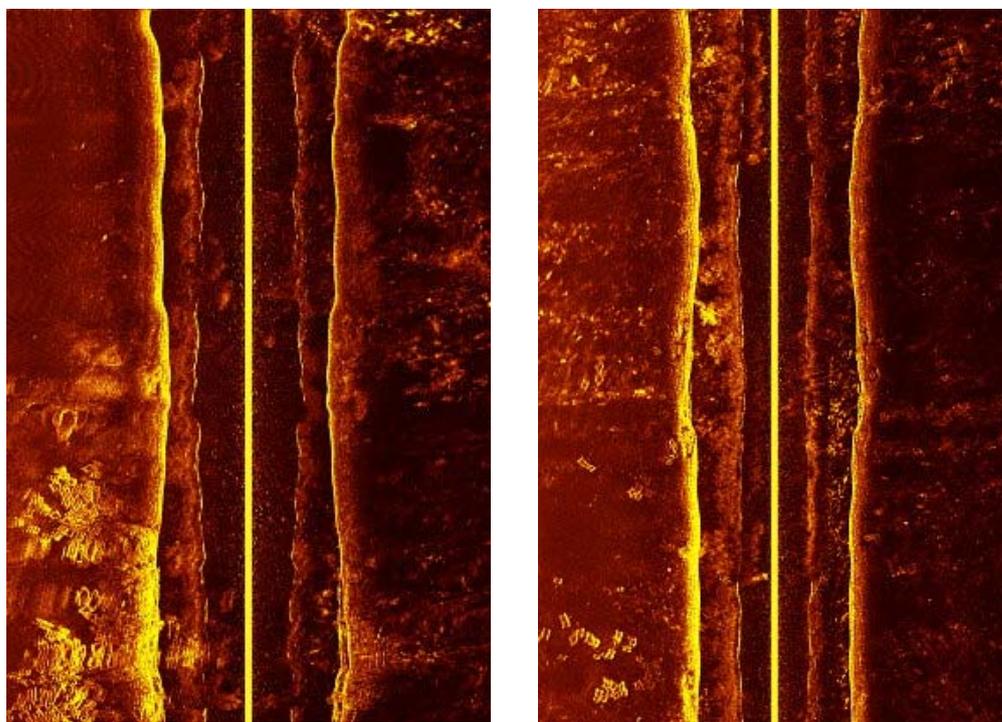


圖 2-2 側掃聲納探測石城人工魚礁散佈位置之影像

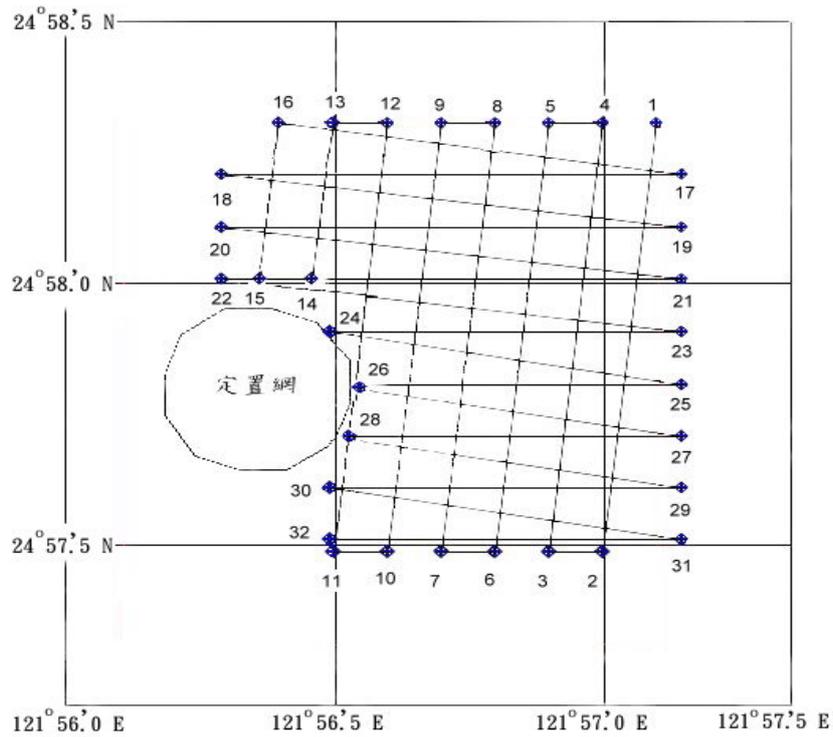


圖 2-3 石城魚礁區 Z 字型測線規劃示意圖

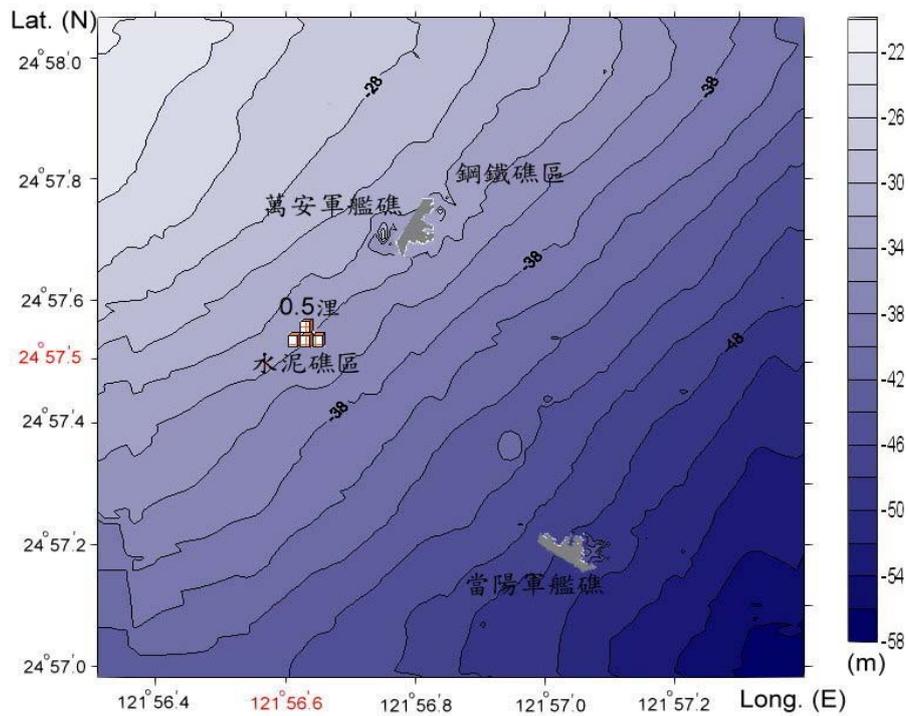


圖 2-4 石城魚礁區中心位置及海底地形二維示意圖

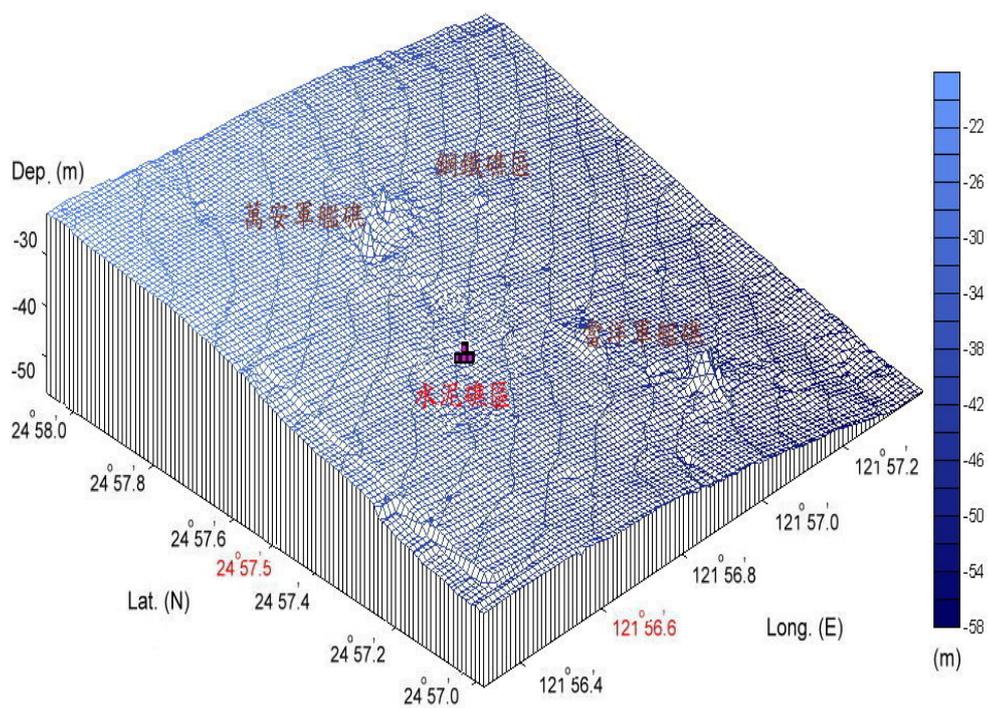


圖 2-5 石城魚礁區中心位置及海底地形三維示意圖



圖 2-6 石城魚礁區魚探機影像圖

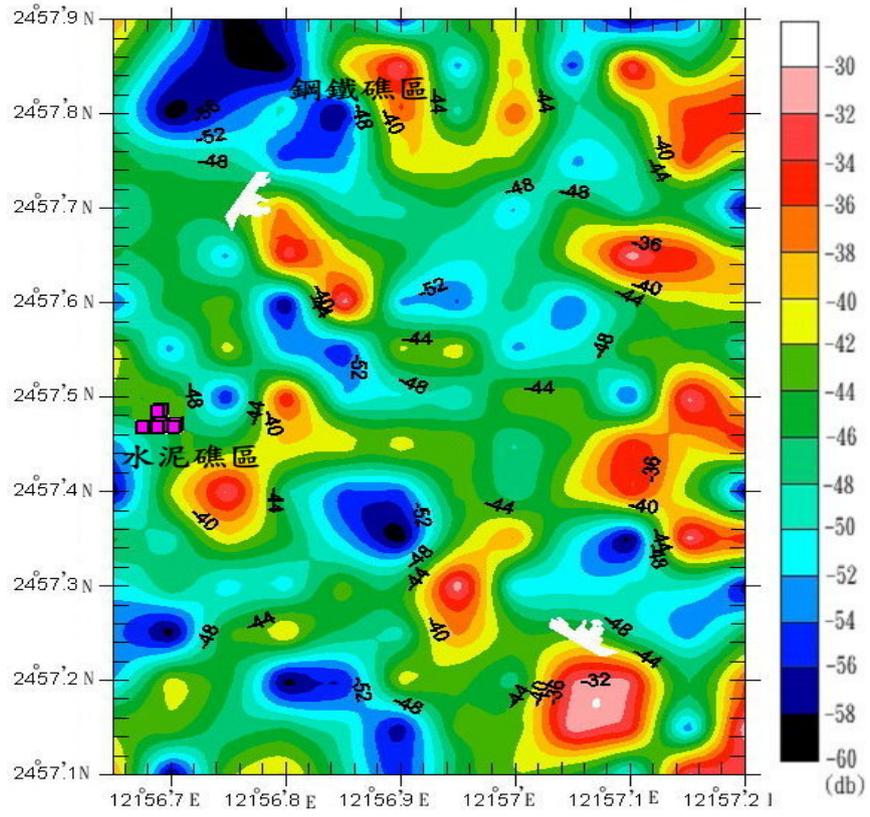


圖 2-7 石城魚礁區音壓生物量分析



圖 2-8 石城魚礁區之聚魚情形



圖 2-9 石城魚礁區之砂埋情形



圖 2-10 石城魚礁區潛水攝影及目視觀察



圖 2-11 石城魚礁區之覆網與損毀狀況



圖 2-12 石城魚礁區之定棲性魚類



圖 2-13 石城魚礁區之偶棲性魚類



圖 2-14 石城魚礁區之洄游性魚類

第參章 計算流力數值法在人工魚礁流場分析之應用

人工魚礁流場分析技術之應用係結合海洋工程與生物科學之跨領域整合知識，未來並可為礁體構型設計與其佈建投放作業提供相關的理論依據，如前所述，人工魚礁在配合海洋牧場規畫，完成礁體之構建投置作業後，流經礁體的海流將在礁體周遭形成相當複雜且多變的流場，而由於此一複雜的礁體流場與礁體聚魚成效有著密切的關係，因此如何融合生物與工程科技以進一步找出評估人工魚礁佈建整體效能之方法，業已引起不少學者的研究興趣。事實上，人工魚礁多樣化的流場與來自礁體內、外非穩態渦流之交互作用息息相關，而渦動流場所引發聚魚成效之機制則為此一課題的研究焦點。

為解析魚礁渦動流場之運動物理行為，近幾年來已陸續有不少相關論著發表，惟截至目前，大多數論著之研究焦點僅集中以「實驗量測」之方式解析礁體周遭之流場，但實驗設備的校正、準確度、量測技術的困難度與材料設備，都會造成某種程度的干擾必須加以克服，而研究材料的花費、維護費用，亦需龐大之經費支援，此為其主要缺點。另一方面，由於人工魚礁其本身具有特殊之內部鏤空造形，解析礁體內側流場之相關物理量時，並不易以實驗設備量得，故與魚類棲息環境密切關連之礁體內部流場之運動模式，迄今仍甚少有相關之研究成果被提出。

爰此，為完整解析有關波流作用與海床地形影響下之人工魚礁內外流場之複雜結構與礁體幾何排列變化對人工底魚礁流場之影響，本研究以流場數值模擬之方式求解作用於人工魚礁之流體運動方程式，以利爾後海洋生態學者能進一步歸納分析出礁體內外渦動流場對魚群棲息行為之影響，並為「最佳化人工魚礁礁體設計」開啟研究之先鋒，相關之研究方法詳述如后。

第一節 魚礁流場統御方程與計算流力數值法

為模擬人工魚礁內部及其周遭複雜之渦動流場與執行礁體結構之水動力負荷計算，其所採用之流體運動統御方程須能真實描述黏性流體之運動特性及結合邊界條件解析任意海床地形變化對魚礁流場之影響。本研究將以計算解析黏性流場之雷諾平均奈維耳-史脫克方程(Reynolds Averaged Navier-Stokes Equations, RANS 方程)結合 $k-\varepsilon$ 紊流模型($k-\varepsilon$ Model)為統御黏性流體運動之核心方程，並輔以適當離散該方程之有限體積數值法(Finite Volume Method, FVM) (Tannehill et al., 1997)，以求解礁體內外渦動流場之運動機制，上述 RANS 方程及替代 RANS 方程內 $\overline{u_i u_j}$ 雷諾應力(Reynold Stress)所使用 $k-\varepsilon$ 紊流模型之相關流體運動方程，若以正交曲線座標系統 $(x^i, t) = (x^1, x^2, x^3, t)$ 之張量形式表之，則可分別寫成(Chen et al., 1990):

$$\sum_{i=1}^3 \frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + \sum_{j=1}^3 \left(U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_i u_j}}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial p}{\partial x_i} - \frac{1}{\text{Re}} \nabla^2 U_i = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \sum_{j=1}^3 \left(U_j - \frac{1}{\sigma_k} \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} - \frac{1}{R_k} \nabla^2 k - G + \varepsilon = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \sum_{j=1}^3 \left(U_j - \frac{1}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} - \frac{1}{R_\varepsilon} \nabla^2 \varepsilon - C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} G + C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} = 0 \quad (4)$$

其中式(1) 與式(2)分別代表無因次化 RANS 方程所含之連續方程(Continuity Equation)與三個運動方向的動量方程(Momentum Equation)，而式(3) 與式(4)則分別代表 $k-\varepsilon$ 紊流模型所含之紊流動能方程(k -Equation)與紊流耗散方程(ε -Equation)，另在式(3) 與式(4)中之 G 則代表產生項(Generation Term)，其相關之數學式則可表為：

$$G = \nu_t \sum_{j=1}^3 \sum_{i=1}^3 \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right)^2 \quad (5)$$

另在上列諸式中， $\nu_t = C_\mu k^2/\varepsilon$ 代表渦動黏滯係數(Eddy Viscosity)， U_i 代表平均速度， p 為壓力， $Re = U_0 L/\nu$ 代表雷諾數(Reynolds Number)， k 代表紊流動能(Turbulent Kinetic Energy)，而 ε 則代表紊流耗散率(Turbulent Dissipation Rate)，而有關 $k-\varepsilon$ 紊流模型係數之設定，則採用 FLUENT 軟體之預設值，上述係數值($C_\mu, C_{\varepsilon 1}, C_{\varepsilon 2}, \sigma_k, \sigma_\varepsilon$) 則分別等於(0.09, 1.44, 1.92, 1.0, 1.3)；另在式(3) 與式(4)中之有效黏度(Effective Viscosity) R_k 與 R_ε 則可分別表為 $1/R_k = 1/R_e + \nu_t/\sigma_k$ 與 $1/R_\varepsilon = 1/R_e + \nu_t/\sigma_\varepsilon$ 。

前述 RANS 方程內 $\overline{u_i u_j}$ 雷諾應力(Reynold Stress)的存在，將使含於式(1) 與式(2)待解未知變數的個數多於求解方程的數目，而造成所謂的未封閉聯立方程求解問題。因此，為解決此一問題，本研究將以在紊流計算中被普遍採用的 $k-\varepsilon$ 紊流模式置換含於式(2)中的雷諾應力 $\overline{u_i u_j}$ ，並導出式(3)與式(4)的紊流動能方程與紊流耗散方程而使聯立的方程式提昇為六個以求解 U_1 、 U_2 、 U_3 、 p 、 k 與 ε 等六個變數。而便利有限體積數值法之應用，式(2)至式(4)並可以下列通式表之：

$$\nabla^2 \phi = R_\phi \left[\sum_{j=1}^3 \left(U_j - \frac{1}{\sigma_\phi} \frac{\partial \nu_t}{\partial x^j} \right) \frac{\partial \phi}{\partial x^j} + \frac{\partial \phi}{\partial t} \right] + S_\phi \quad (6)$$

式(6)中之變數 ϕ 可代表動量方程之求解變數 U_j 或式(3) 與式(4)的求解變數 k 與 ε ，而動量方程、紊流動能方程與紊流耗散方程之源函數(Source Function) S_ϕ 則可分別表為：

$$S_U = R_U \left[\frac{\partial}{\partial x^i} \left(p + \frac{2}{3} k \right) - \sum_{j=1}^3 \frac{\partial \nu_t}{\partial x^j} \frac{\partial U_j}{\partial x^i} \right] \quad (7)$$

$$S_k = -R_k (G - \varepsilon) \quad (8)$$

$$S_\varepsilon = -R_\varepsilon \left(C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} G - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \right) \quad (9)$$

為加速求解上述 $k-\varepsilon$ 紊流模式之 RANS 方程，本研究擬採用有限體積法(FVM)做為離散 RANS 與 $k-\varepsilon$ 方程之計算數值方法，該方法之應用，除可提高水下潛體及複雜幾何結構物周遭流場之計算準確度外，並可提高計算機程式之計算效率，為方便進行統御方程離散與 FVM 數值計算，上述方程式(6)將被進一步表成解算通式，如方程(10)所示：

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho \phi + \nabla \cdot (\rho U \phi - \Gamma \nabla \phi) = S_\phi \quad (10)$$

上式為含括可壓縮與不可壓縮流體在有限體積小區塊內之流體運動統御方程， ρ 表流體密度， u 代表流體速度， Γ 代表與變數 ϕ 相關之擴散係數，而式(10)經執行體積分與應用格林定理將部份體積分轉為面積分後，方程式將可表成(Patankar, 1980):

$$\int_{\partial V} \frac{\partial}{\partial t} \rho \phi dV + \int_{\partial V} \rho \phi \vec{U} \cdot \vec{n} dA - \int_{\partial V} \Gamma \nabla \phi dA = \int_{\partial V} S_\phi dV \quad (11)$$

流體運動統御方程經表成方程式(11)後，將可採用 FVM 數值法以離散上述方程，而有關上述數值法之應用，在本研究中將以 FLUENT (FLUENT 6.2, 2005)流場模擬軟體為解算器以進一步執行人工魚礁流場的計算與模擬。

第二節 人工魚礁流場網格佈建

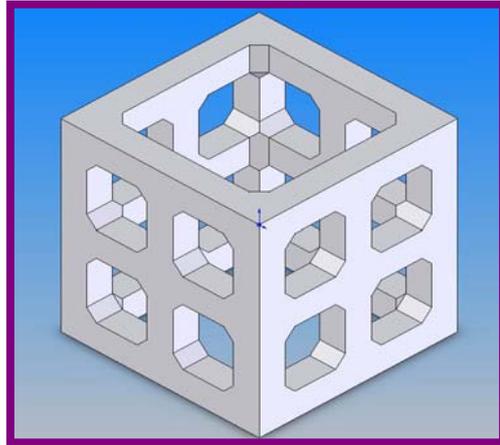
人工魚礁模型的幾何構型，係採用實際投放於海洋漁場之礁體構型為主要之研究對象，此鏤空式人工魚礁之主要尺寸：長、寬、高均為 2 公尺。目前此一構型之魚礁，其內部流場並無相關之可視化流場研究資料可供參考比對，因此為結合模型實驗之驗證工作，本研究對魚礁流場之分析將不採全尺寸之礁體流場計算，而以縮小十分之一比

例的實驗尺寸模型為本研究之探討對象，其三維之幾何構型係以 SOLIDWORKS 電腦輔助繪圖軟體繪製而成，另在完成礁體的幾何構型後，本研究將利用 GRIDGEN 網格產生軟體建立魚礁流場計算域網格，並進一步以 FLUENT 流場解算軟體執行魚礁流場的模擬計算，而上述流場數值模擬之計算流程則如圖 3-1 所示。

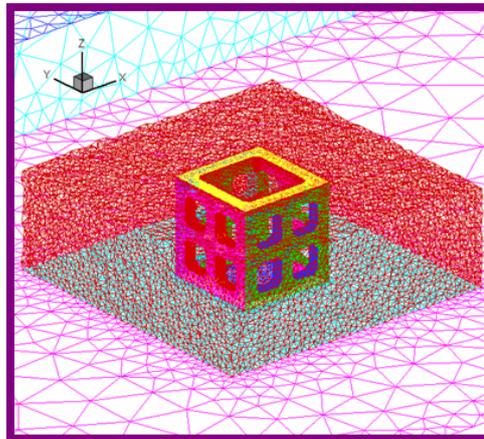
至於人工魚礁模型數值流場的網格建構，因為人工魚礁模型設定在遠離自由液面的流場底部，不考慮自由液面，且人工魚礁之構型複雜不利於產生結構性網格，為考量簡化流場網格之建構，故有關人工魚礁流場之網格構建均使用非結構性網格。另為模擬人工魚礁內部及周遭之渦動流場，因此將礁體內部及礁體之網格加密，以充分解析人工魚礁內、外部之渦動流場狀況。此外，在網格佈建型態之選擇，計算域內之網格佈建採非結構性四面體之佈建模式，整體計算域所使用網格總數接近六十八萬，魚礁周遭最小的網格體積約為 $1.78 \times 10^{-10} m^3$ ，而礁體遠距外圍之最大網格體積則約為 $6.54 \times 10^{-3} m^3$ 。

第三節 魚礁流場數值模擬計算域邊界條件之設定

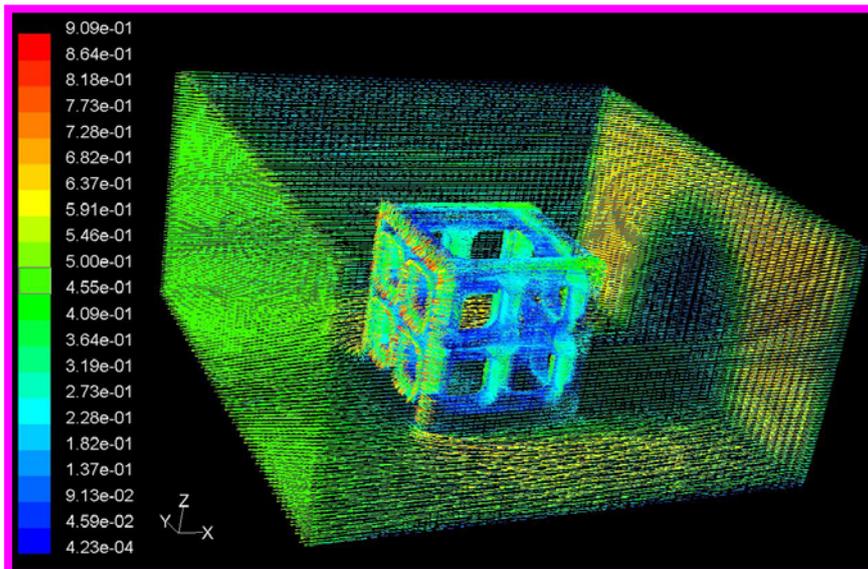
為簡化計算流程，本研究中之所有算例將先不考慮潮汐與風浪作用所引發的自由液面效應對礁體之影響，因此針對此一假設，在自由液面邊界條件之設定上，將以簡化之固定壓力條件(Pressure Inlet Boundary Condition)取代耗時繁複之自由液面高度計算，以大幅節省計算時間。另在礁體表面之邊界條件的設定上，將先不考慮礁體表面粗糙度對邊界層流場之影響，而配合黏性流體之特性在礁體表面將採無滑移之邊界條件(Non-slip Boundary Condition)，另為考量有限水深對礁體之影響，在計算域之底部將使用不透水之固定牆邊界條件。此外，為避免有限長度計算域在下游處產生干擾魚礁流場之反向回流，在該處邊界條件之設定將採流體流出邊界條件(Outflow Boundary Condition)，上述魚礁流場計算域相關邊界條件之設定如圖 3-2 所示。



Solidworks
軟體構建構型



Gridgen
軟體構建構網格



Fluent 軟體
流場數值模擬

圖 3-1 人工魚礁流場數值模擬流程

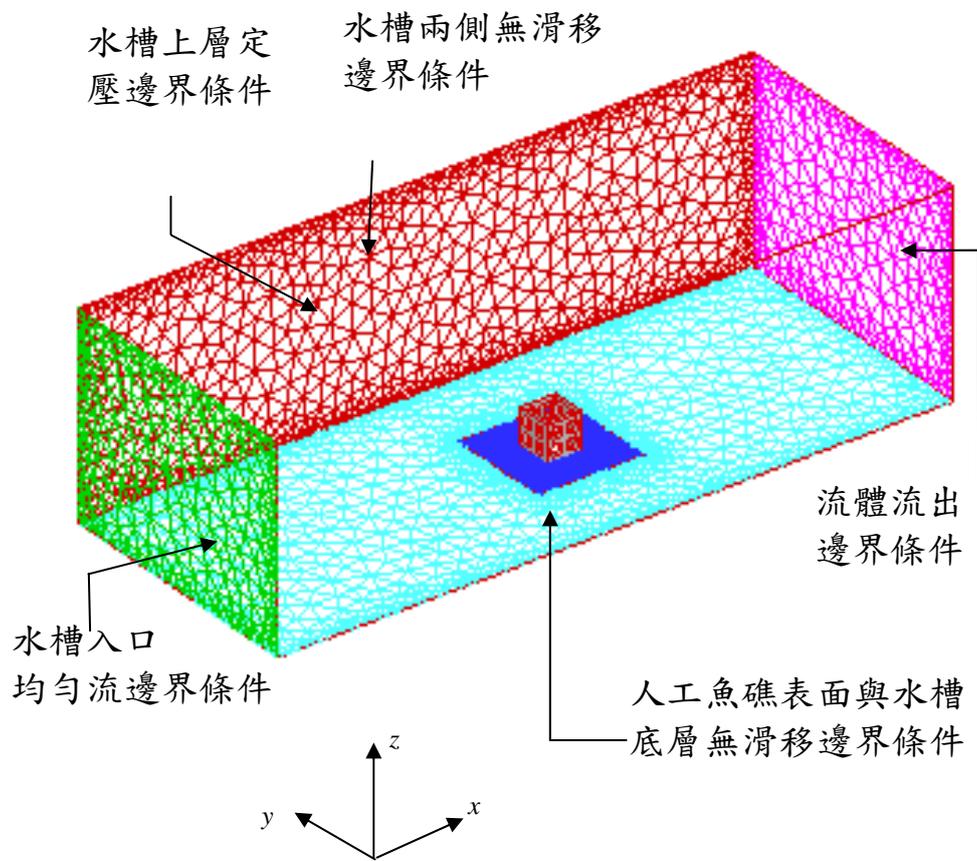


圖 3-2 人工魚礁流場計算域邊界條件之設定

第肆章 PIV 實驗量測與數值模擬分析

應用質點影像測速儀(Particle Image Velocimetry; PIV)之量測技術近十年來已發展的相當成熟，其可量化出瞬時流場運動速度分佈，且因不會干擾流場特性，目前已被廣泛運用到各種流場的量測分析。如 Fontaine 利用 PIV 量測 Stirred Vessel 流場的三維運動實驗(La Fontaine et al., 1996)；Kitagawa 將 PIV 系統導入質點粒徑量測功能，結合影像分析技術，觀察 10 微米尺寸範圍分佈的氣泡群質點的運動路徑及氣泡雲形狀(Kitagawa, 2005)；或利用 PIV 技術量測圓柱尾跡流場變化，量化出特殊 U 型表面結構之圓柱體的運動雷諾數(Reynolds number)與阻力係數(drag coefficients)關係曲線(Lim et al., 2003)。本研究利用 PIV 量測目前國內最常用之魚礁模型，在不同海流運動環境下，其內外流場之特性參數，並結合數值模擬運算比對分析結果(Su et al., 2007)，期能建立人工底魚礁研發之參數依據。

第一節 實驗設備

一、實驗平台

本實驗於國防大學理工學院動力系之大型環流水槽試驗平台中進行，實驗流體皆為過濾淨化之淡水，測試模型為常用之人工魚礁模型。實驗量測系統由水平式循環水槽(Horizontal Circulating Water Channel)與高速質點影像測速儀所組成。實驗量測設備如下：

(一)水平式循環水槽

實驗主要測試平台為水平式環流水槽(圖 4-1)，水槽外緣長 14.0 公尺、寬 5.3 公尺、深 2.2 公尺、水容量為 80.0 立方公尺，供實驗觀察與量測區域長為 5.5 公尺、寬為 1.5 公尺、水深為 1.1 公尺(圖

4-2)。水槽水流速度藉調整主馬達轉速來調變，測試區段設計流速自 0.2 m/s 至 2.0m/s。環流水槽係利用相對運動之觀念，將測試模型固定於水槽測試區段，藉由水流運動速度之改變，以模擬實際流場在礁體周圍內外的各種運動狀況。在水槽測試區段之兩側及底部均由透明強化玻璃所組成，以供實驗觀察及拍攝記錄用。其優點是能長時間觀察及量測穩定狀態下，魚礁模型在水中的各種流場物理量及其相關特性。

(二)質點影像測速儀

質點影像測速儀系統之配置如圖 4-3 所示，系統是由美國 TSI 公司設計，設備包含：

1. 影像擷取裝置型號為 630051，解析度高達兩百萬畫素(1240×1680 pixel)的 PIV 攝影機，曝光速度 1/30~1/1000 秒之電子快門，畫面傳輸速率最高可達每秒 30 張畫面，可轉儲存至高容量硬碟中，以便隨後進行處理與分析。
2. 影像擷取所需之光源係採用美國 NEW WAVE 公司所製造之雙脈波 Neodym-YAG laser，為 532 nm 綠光波長之雷射光源，最高功率可達 120 mJ，產生光束再經光頁產生鏡片組(由凹透鏡與柱面鏡組成)展延成扇型光頁，光頁擴散角度與厚度可由凹透鏡曲率半徑及柱面鏡厚度相互搭配調整(圖 4-4)。雷射光頁穿過流體時強度會衰減，要適時依實驗環境的受光量，調整雷射能量，本實驗採用脈衝雷射光照強度約為 60~80 mJ 進行量測。
3. 雷射激發頻率與影像擷取控制，是經由型號為 610032 Synchronizer 同步處理器控制處理。
4. 影像分析使用軟體為 TSI 公司設計之 Insight 5.0 版，將高速攝影機所擷取影像資料，進行瞬時速度場分析，再經由 Tecplot 360 後處理(Post processing)軟體(Tecplot, Inc. USA)彙整分析結果，即

呈現出可判讀之流場速度分佈(velocity contour)(圖 4-5)與速度向量圖(velocity vector)(圖 4-6)等重要參考資料。

本研究使用的測試平台為水平式環流水槽，內部工作流體為經過淨化過濾之淡水，流體內部並無明顯雜質存在，利用質點影像測速儀進行流場分析時，可添加反光質點來增加雷射光照射流場時，增加測試流場影像質點曝光度，以提升測試流場影像畫面的品質，就現階段利用質點影像測試儀進行流場量化實驗中，隨著工作流體品質狀態的差異，所添加的反光質點以比重近似於工作流體為佳，本實驗所使用之反光質點粒徑為 $D=8\sim 12\ \mu\text{m}$ 之真空玻璃球，可隨波懸浮於工作流體內部，其添加量依據實驗經驗以不超過工作流體體積 5% 為佳，太多會干擾流體運動結構，且攝影機擷取之測試流場影像畫面會有質點過度曝光現象，增加影相分析困難度，反之當反光質點添加量不足時，則會讓所擷取之實驗流場影像畫面曝光質點過少，導致流場分析數據失真，是故現階段工作流體添加反光質點需逐量增加，並無明顯的數據說明反光質點的添加標準量，需經適度流場擾動均勻反光質點散布後，依據現場自由流場影像擷取分析，以判斷反光質點添加量及均勻性。

(三)實驗魚礁模型

實驗模型以目前國內投放數量最多之雙層式水泥礁體為主要研究對象，此鏤空雙層式魚礁之主要尺寸，長、寬、高均為 2 公尺。為配合水槽觀測區內之實驗空間，並避免大尺寸模型在水槽實驗中可能產生之槽避效應(wall effect)，本實驗以縮小 1/10 比例之魚礁模型為研究對象，材質為透明壓克力製作(圖 4-7)，為使雷射光可輕易穿透魚礁模型並減小反射與折射作用，在中間層 0.5H 處(H 為魚礁高度)，嵌入透明玻璃，以利應用 PIV 量測設備執行質點流速之擷取。

第二節 實驗流場速度校正與不準確度分析

一、實驗流場測試段流速量測裝置與校準

環流水槽使用電子流速計測量流速，相較於其他量測方式其優點是對流速反應快，可節省量測時間。本實驗以 SV-101 螺槳式流速計 (Flow Meter) 量測流速，流速計為四葉式，在水流中每轉動一圈，便對發光二極體之光源產生四次脈衝 (Pulses)，所獲得之脈衝信號送至 C-501AP 流速記錄器 (Pulse Counter) 顯示之 (圖 4-8)。

為確保測試區段水流運動速度量測準確性，本實驗採用皮托管進行螺槳式流速計校正量測，在皮托管校正實驗中，同時選取兩個測試點同步測試，可避免因單一測試點造成之不準確性，水槽測試區段流場運動速度以主馬達轉速為參考設定值，自 200rpm 起每隔 50rpm 量測乙次，直至 1000rpm 為止，因皮托管反應速度慢，為求得準確結果每一轉速均經過三十分鐘以上時間，俟流速穩定且皮托管亦已反應至穩定值後方記錄量測結果，所獲得之量測結果以下列公式計算流速：

$$\begin{aligned} V &= \sqrt{2gh} = \sqrt{2 \times g \times \Delta S \times \sin\theta} \\ &= \sqrt{5.406 \times \Delta S} \quad (\text{單位：m/s}) \end{aligned}$$

其中 ΔS 楔形架斜面差量；楔形架夾角為 $\theta = 16^\circ$ 。

在實驗中同時記錄流速計所測得之脈衝數二十次，及皮托管在楔形架斜面上停滯壓管與靜壓管之差量，分別計算流速後即可獲得有關流速計在前述各主馬達轉速下所獲得之皮托管流速與電子流速計記錄所顯示之數值 (表 4-1)。圖 4-9 為流速計測得之流速與皮托管流速之關係圖。

經最小平方法線性迴歸 (Least Square Linear Fitting) 後，可以找出流速計量測值與皮托管 (實際流速) 間之關係式如下 (李，2005)：

$$V = 0.001N + 0.042$$

式中 N：螺槳式流速計脈衝數

V：測試區段流速(m/s)

在後續的實驗中，流速計所記錄的數值，將經由本公式換算出實際的流速，以正確反映實驗的結果。

二、流場速度不準確度分析

在實驗量測中，一般可分為「系統誤差(Systematic Error)」與「隨機誤差(Random Error)」。本實驗因人為的校準或儀器或環境造成的誤差，經由重新校準可以將可能發生的系統誤差移除，使實驗所得數據之平均值儘可能接近實際值。為了讓量測所得的數值有意義，實驗流場速度(velocity field)經二十次重複量測，取散佈於兩倍標準偏差量(2σ)間的數值，即是 95%信賴區間(Confidence Interval)數值做為統計分析依據，來闡述實驗數據的信賴水準(Confidence Level)。

水槽測試區段流場運動速度是使用四葉螺槳式流速計量測，該流速計顯示量測時水流速度之對應脈衝數，量測試驗流場速度取樣二十次，並按下列方程式計算標準偏差量(Standard Deviation) σ ：

$$\sigma = \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - x_m)^2 \right]^{1/2}$$

其中 n ：表示取樣數

x_m ：表示取樣平均值

x_i ：表示各取樣值

獲得標準偏差量後，續依下列公式計算在 95%信賴區間， $t=1.96$ 時之流速不準確度，可得流場運動速度之相對不準確度為 $\pm 0.73\%$ 。

$$\Delta = \frac{t\sigma}{\sqrt{n}} \quad \text{其中 } t: \text{表示 Standard 的 } t \text{ 分佈(Holman, 2001)}$$

第三節 實驗量測方法

質點影像測速儀(PIV)的基本原理是應用雷射光不易發散的特性，以雷射光搭配光學元件組產生投射光頁，激射穿入實驗待測流場中，並在不影響流場的前提下，於流場中加入反光特性佳之微小質點，使其在雷射光頁(light sheet)處能清楚顯像，再利用高解析度攝影機擷取影像(圖 4-10)。利用雷射脈衝的時間間隔，將同一質點在兩次曝光間行經的距離，以快速傅立葉轉換(Fast Fourier Transform)後進行相關係數計算，分析出流場質點的運動速度，進而獲得全域的瞬時速度分佈(圖 4-11)。

本研究主要針對魚礁模型內外流場進行流場實驗量測，探討在某一海流運動速度環境下，魚礁內外部流場分佈狀況，以評估及提供魚群較佳庇護環境，試驗中分別量測魚礁底部向上推算之 0.25H、0.5H、0.75H 及 1.5H 的水平剖面位置(圖 4-12)。經由垂直方向的位移設備，精確地移動脈衝雷射光頁切過上述四個測試平面，以獲得不同水平剖面之魚礁流場影像資訊，建構出魚礁流場的實際運動流況，同時也探討單一魚礁對流場干擾的最大影響範圍，用以評估魚礁佈放位置的相互干擾情況，以便適度調整魚礁之佈放距離。

實驗量測及分析步驟如下：

- 一、魚礁模型設計、製作及架設。
- 二、試驗平台與量測相關儀器架設及校正。
- 三、量測魚礁在 0.25H、0.5H、0.75H、1.5H 等四個位置之水平剖面內外流場結構。
- 四、考量流動速度在 1.08 ± 0.0146 m/s 海流條件下之魚礁內流場結構變化。

五、分析魚礁內外部流場渦流結構，以評估魚礁適用性。

六、彙整相關試驗數據與數值模擬計算比對。

由行政院國家科學委員會海科中心「海洋資料庫」之統計數據顯示，台灣周邊海域之水流運動速度在水深二十公尺處之最大流速可達 1 m/sec(約 2 節流速)，故魚礁在環流水槽測試區段進行測試之工作流體運動速度設定為 1m/s。因環流水槽之流速是由水槽內部的推進器(impeller)所帶動，而環流水槽只能控制推進器的轉速以獲得測試區段穩定的流場速度，但因推進器的轉速不易控制非常精準，且在水槽測試區段真實的流場運動速度是由已校正過的流速計(flow meter)在該轉速下所測得的真實流速，所以在臨近 2 節海流的實驗流場是應用推進器轉速約為 500 轉之狀態下，利用流速計重複二十次以上脈衝數平均值換算而得的真實流速(1.08 ± 0.0146 m/s)，本研究實驗流場即在此流速條件下進行試驗，另在本研究中有關計算魚礁內外流場雷諾數之特徵長度定義，皆以魚礁邊長為特徵長度，配合實驗量得之流速 1.08 ± 0.0146 m/s，雷諾數 Re 值等於 2.4×10^5 。

第四節 PIV 量測與數值模擬分析結果比對

魚礁內外部流場結構是影響魚群聚集的重要因素之一，如何設計最合適的人工魚礁構型，以及產生何種型態流場結構，較容易吸引海洋中魚群的聚集，是目前海洋生物學家想要獲知的重要訊息。

關於魚礁內外部流場的量測方面，相關的文獻探討相當有限，本研究利用實驗模型，真實量化出單體魚礁內外部流場結構資訊，以便與 Fluent 數值模擬計算軟體所模擬計算出來的結果相互比對，以驗證數值計算軟體的準確性。整合數值模擬與實驗量測的魚礁內外部流場資訊，可獲得精確的人工魚礁內外部流場結構，以掌握魚礁流場對魚群影響的重要資訊，更可推演出魚礁擺設方向、位置及數量對整體流場的影響。

實驗量測之過程中，雖然採用的魚礁模型為透明壓克力材質製作，但由實際的量測實驗所獲致之經驗，仍可發現魚礁內部結構的表面仍存有強烈的反光產生，因此在整體橫向切面 15 公分見方的魚礁內部流場觀測區域中，將擷取有效量測範圍減縮為 14 公分見方，上述魚礁流場有效量測範圍與其水平橫向切面觀測域大小之對應關係如圖 4-13 所示。圖 4-14、4-15、4-16 分別為人工魚礁內部在不同量測位置之水平方向橫切面流場速度圖，圖形之左邊為流體流入魚礁之方向，而右邊則為流體流出之方向，另在探討各設定條件中，為便於數值與實驗結果之比較，數值計算所須設定之上游入口端邊界條件將採與實驗流況近似之均勻流，而模擬海流之流動速度則為 $1.08 \pm 0.0146 \text{ m/s}$ ($Re = 2.4 \times 10^5$)。

一、0.25H 位置之魚礁內部流場分析

圖 4-14 (a)至(d) 為 0.25H 位置之魚礁內流場橫剖面速度場之實驗與數值計算結果之比較分析。圖 4-14 (a)與(b)分別為利用質點影像測速儀實驗量測所得之流場向量圖與速度分佈圖(Velocity Vector and Velocity Contour)，在圖中可發現魚礁在 0.25H 橫剖面位置之流場中間部位為低速區域，與左右兩邊的高速區相較，有明顯的速度落差存在，其成因係由於魚礁之主體結構(如圖 4-12)在 0.25H 位置切面處，除中心位置有縱向檔版外，其左右兩邊皆為 6 公分見方的流通口，因此其在此一橫切面之速度分佈將有中間低、兩側高之趨勢。由圖 4-14 (a)與(b)所得之結果亦可推測具有檔板之此型魚礁其中間位置後方之流場因流速遽降之原因，將使礁體內部在此一區域形成一個緩流區，而此一現象將可充份展現出人工魚礁之遮蔽效應特性，可提供海洋生物較佳之休憩與避敵之生存環境。另外此一構型魚礁內部流場之數值模擬計算結果如圖 4-14 (c)與(d)所示，由圖 4-14 (a)、(b)與圖 4-14 (c)、(d)之相互比較中可發現，雖然在水平橫切面中央部份之區域，實驗流場與數值流場在速度分佈之變化上有較明顯之差異，

但就整體速度場之變化趨勢而言，應用實驗量測及模擬運算所得的速度場結果有相似之一致性存在。

二、0.5H 位置之魚礁內部流場分析

圖 4-15 (a) 至(d)為 0.5H 位置之魚礁水平方向剖面的內流場分析，其中 4-15(a)、(b)為模型實驗結果，4-15(c)、(d)為數值模擬分析資料。從圖 4-15 (a)可看出魚礁內部流場結構非常混亂，與魚礁外部均勻流場相較之下，有較強烈之渦動現象產生，而在速度分佈之分析上，此一水平橫切面在其中間區塊及後方兩側之流場有較高的流動速度，但最高也僅有 0.33 m/s，約為入口端流速的 1/3，此一成因乃由於魚礁在此一水平橫切面之四周皆為橫向檔板所圍繞，亦即該水平橫切面測試光頁之邊界並無流體流入，因此相對於其它橫切面所得之結果，在圖 4-15 (a) 至 (d)中，將可明顯發現 0.5H 剖面流場速度值之分佈遠小於其它測試截面之速度分佈。

此外，由於此一測試水平橫切面恰好位於魚礁橫向之對稱軸線上，魚礁上方與下方之開孔，將趨使由開孔流入與流出之流體在此一截面匯集，而這也將使 0.5H 測試截面之流體運動呈現迴流(reverse flow)、渦動(vortex)等較為多樣性之複雜流場，此一結果亦將間接說明，若能解開影響聚魚因子之流場特性為何，則藉由魚礁構件之開孔數量、孔徑大小與開孔位置等之設計規劃，將可事先瞭解魚礁內部之流場結構，如此可確實提升人工魚礁之聚魚成效。

圖 4-15(c)與(d)分別為數值模擬計算所得之礁體內部流場的速度向量圖及速度分佈圖，經與對應之實驗結果比對發現，在速度向量圖之比較，圖 4-15 (a)與(c)在 0.5H 水平橫切面之前端位置，其在流體運動方向之變化上兩者間有較大顯著之差異，但除此局部區域外，在此橫切面之其它區塊數值計算預測與實驗所量得之結果大致相同，而類似之結果亦出現在圖 4-15 (b)與(d)速度分佈之比較，圖 4-15 (b)與(d)兩圖之流場結構非常近似，但由於在此橫切面對流效應

(convection effect)並不顯著，因此不管是實驗量測流場，亦或是數值模擬流場，魚礁內部之流速分佈並不完全對稱，而對實驗流場而言，其與數值流場存在較明顯的流場不對稱差異現象，有可能是因為流體在環流水槽離心力之作用下，使魚礁模型入口端之左右流體運動速度分佈並非是完全均勻流所致。

三、0.75H 位置之魚礁內部流場分析

圖 4-16 (a)至(d)為水平橫切面 0.75H 位置的魚礁內部流場分析結果，理論上此一橫切面所量測之結果應與 0.25H 位置所得流場結構類似，但由於 0.25H 位置之水平橫切面量測位置離固定平台接觸面較近，是故其在受魚礁底部固定平台共伴效應影響之狀況下，在 0.25H 水平橫切面位置所能量得之最大速度值將會略低於出現在 0.75H 水平橫切面之最大速度值。基本上，由實驗量測與數值模擬所得之量測結果比對中，可發現實驗之結果相對於數值結果，在 0.75H 實驗量測橫切面的低速區分佈較廣，而且在流場結構之中央區域其渦動效應較數值模擬結果顯著，而此一成因有可能是在執行水槽實驗過程中，推動水流運動之推進設備因受機械振動等因素之影響，而使流體由上游入口端流入時無法保持穩態流動所致，因此在本研究所執行的實驗量測與數值模擬流場之比較過程中，因兩者入口端邊界條件無法完全保持相同之情況下，將造成其在速度場之比對上會有些微之差異，儘管如上所述，由圖 4-16 (b)與圖 4-16 (d)之比較中，可發現其速度分佈之差異，但就整體流場運動軌跡之變化而言，本研究發現數值模擬所得之結果仍與實驗結果相當一致。

四、1.5H 位置之魚礁外部流場分析

圖 4-17 為 1.5H 高度位置魚礁外流場之實驗量測結果，經由實驗影像分析中可發現，該區域量測橫切面之流場幾乎不受魚礁模型影響，因從圖中可清楚得知，該位置之流場速度分佈上、下游已趨於穩

定，此一結果與實驗水槽測試段之流動條件類似，故可視為一均勻流場。依此，本研究發現在水深變化方向，當兩個魚礁之間相距超過一個魚礁尺寸以上的距離時，魚礁對外流場之影響將會逐漸式微，至於兩魚礁在水平方位相距兩個魚礁以上的距離時，則應該視為個別的單一魚礁模式來探討，當然這僅是從魚礁水平方向擺置的實驗模式推估結果，而當魚礁前後置放的影響判別分析上，因上游位置魚礁會干擾下游魚礁的入口流場，使得下游魚礁入流不再是均勻流場，這可能會明顯影響下游魚礁的內部流場結構，此階段的實驗量測目前受限於流場影像擷取面積尺度問題，使得魚礁前後排列的實驗架設較為繁瑣，故現階段並無適當的實驗研究數據可加予探討，但由先前單一魚礁的數值模擬與實驗流場所得之良好的比較結果中可發現，未來有關於雙體魚礁亦或是多體魚礁之流場研究，數值模擬分析將是有效之研究工具，其對魚礁最佳排列組合之研究將可提供實用，且具體之魚礁流場分析。

表 4-1 流速校準比較表

主馬達轉速(rpm)	流速計脈衝數平均值(N)	皮托管量測流速(m/s)
200	469	0.539
250	607	0.637
300	660	0.723
350	753	0.811
400	895	0.878
450	977	1.006
500	1079	1.077
550	1178	1.198
600	1236	1.244
650	1340	1.370
700	1420	1.454
750	1528	1.573
800	1616	1.656
850	1717	1.767
900	1800	1.831
950	1920	1.930
1000	2000	2.035

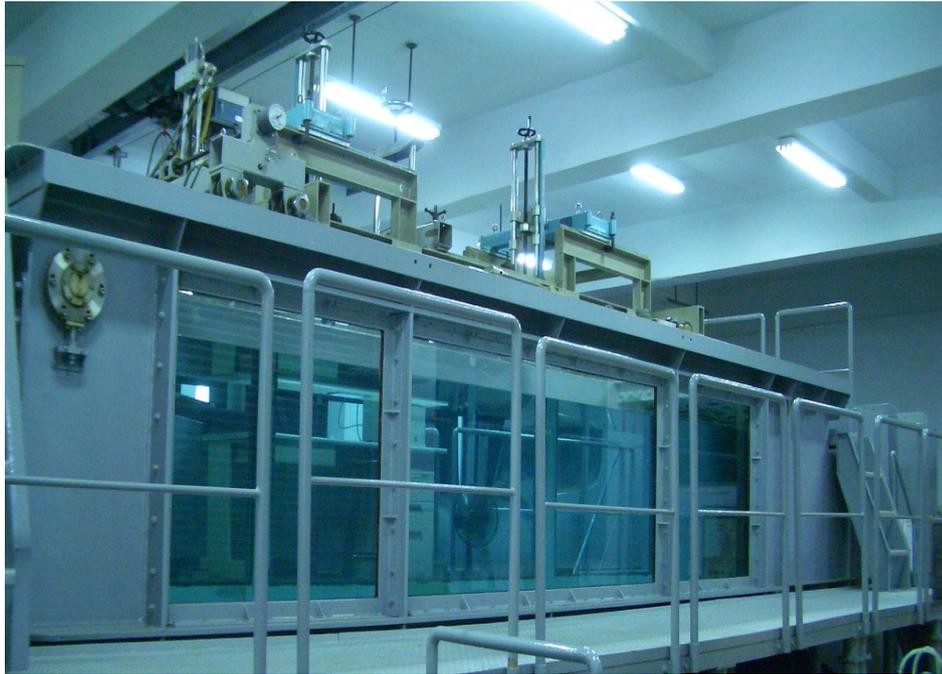


圖 4-1 實驗之水平式環流水槽

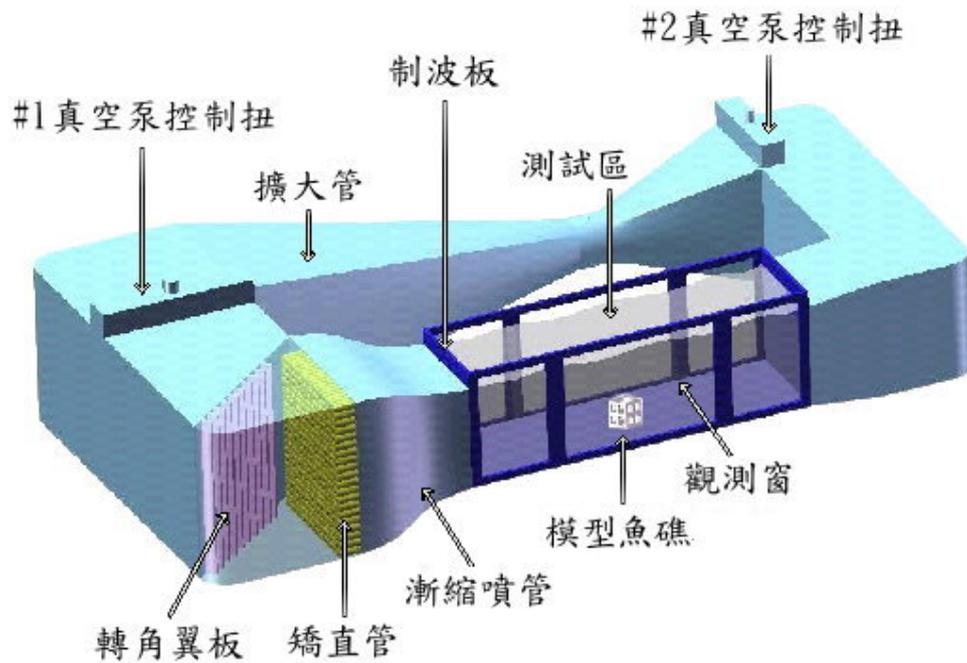


圖 4-2 水平式環流水槽示意圖

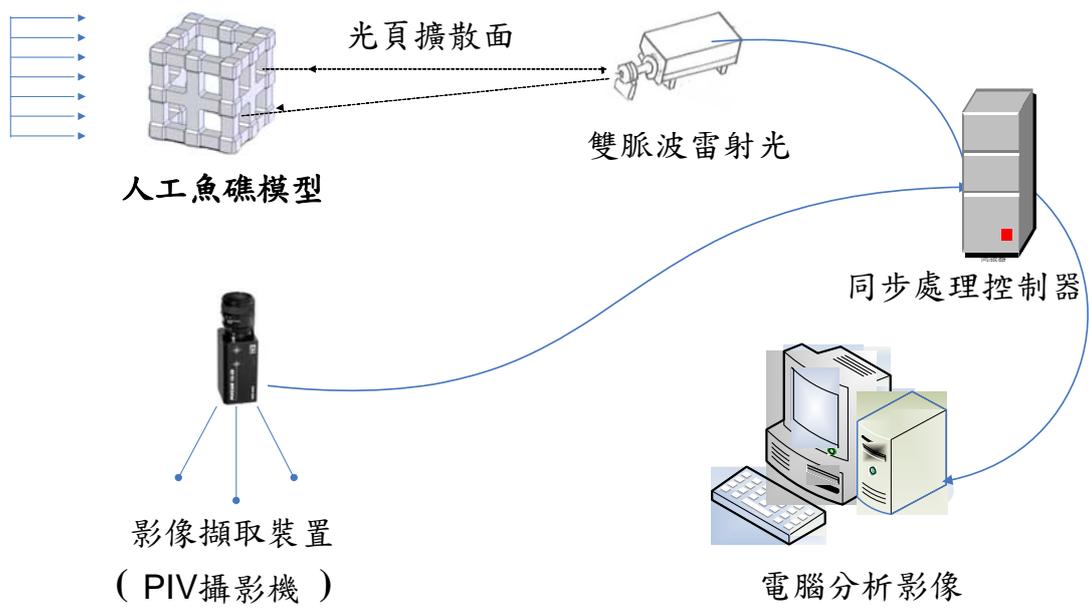


圖 4-3 質點影像測速儀(PIV)配置示意圖

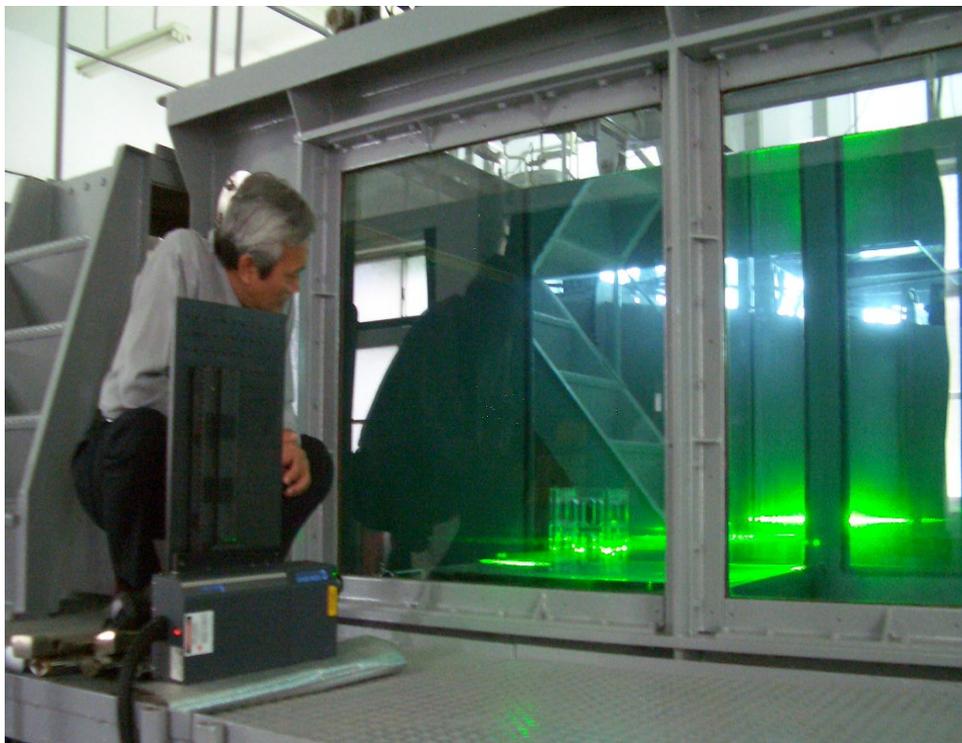


圖 4-4 魚礁內流場量測平台架設圖

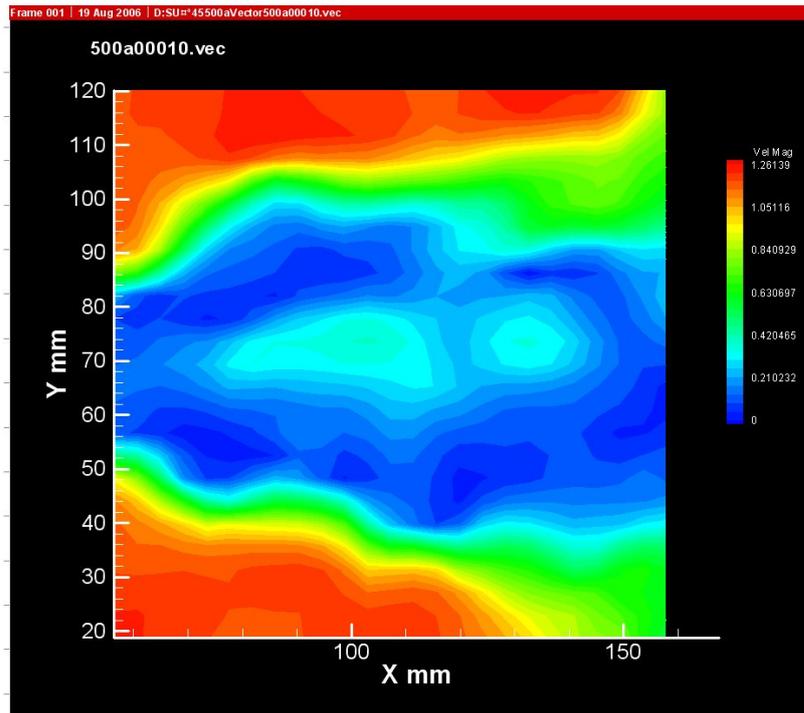


圖 4-5 流場速度分佈圖

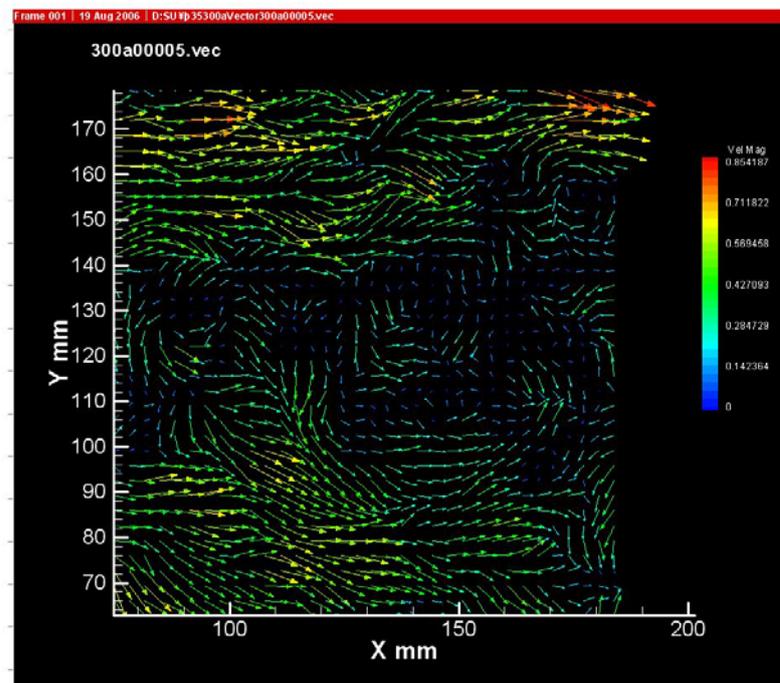


圖 4-6 流場速度向量圖

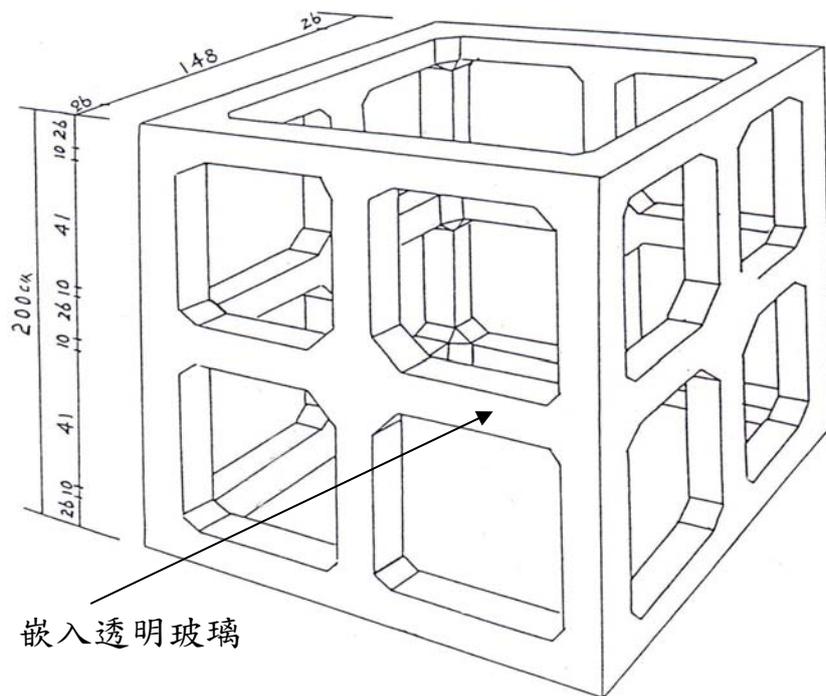


圖 4-7 雙層式水泥魚礁模型之三維幾何構型與尺寸

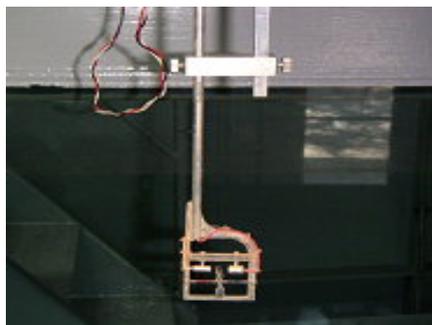


圖 4-8 螺槳式流速計與流速記錄器

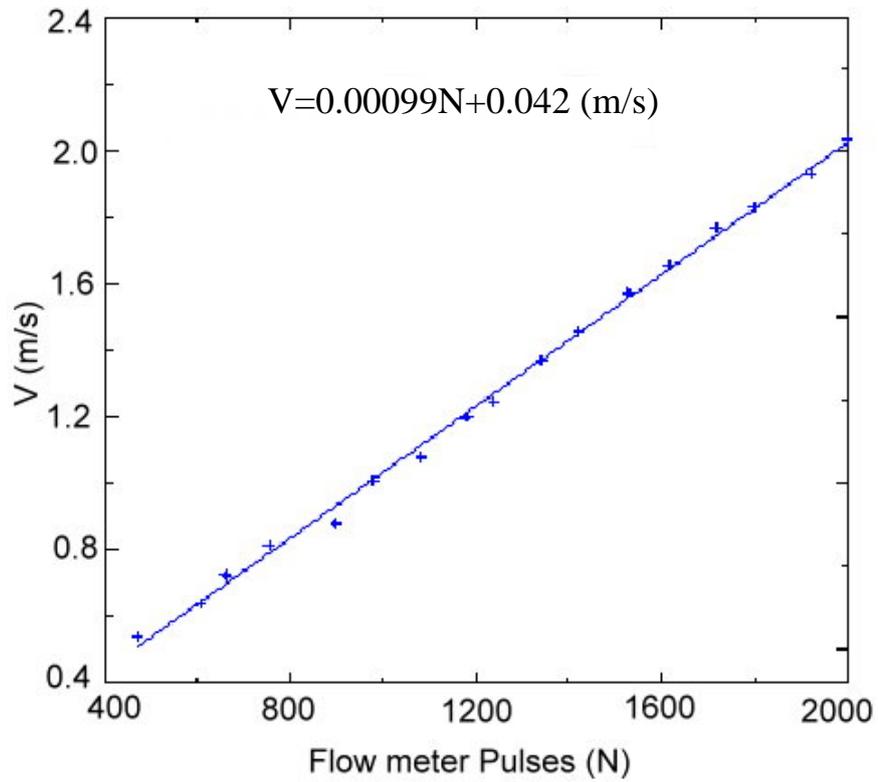


圖 4-9 脈衝數值與皮託管之平均速度關係圖

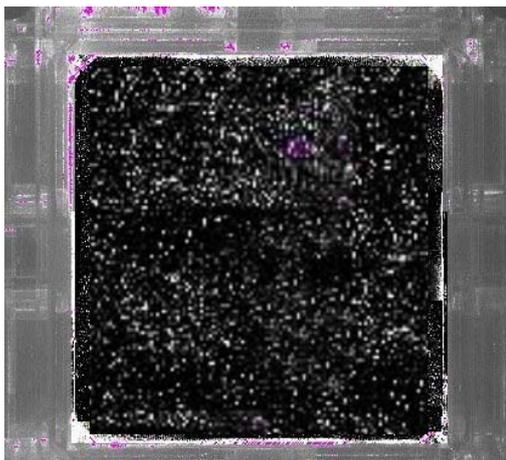


圖 4-10 高解析度質點影像圖

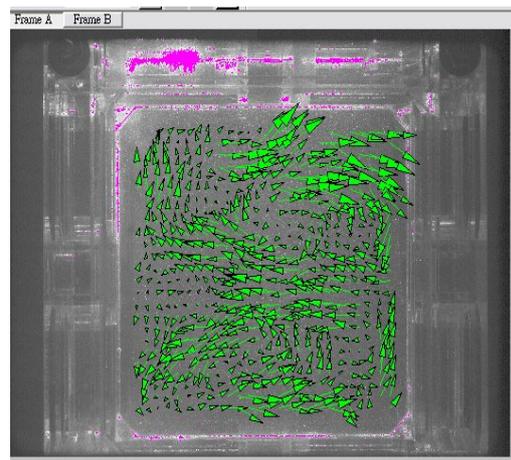


圖 4-11 瞬時速度分佈圖

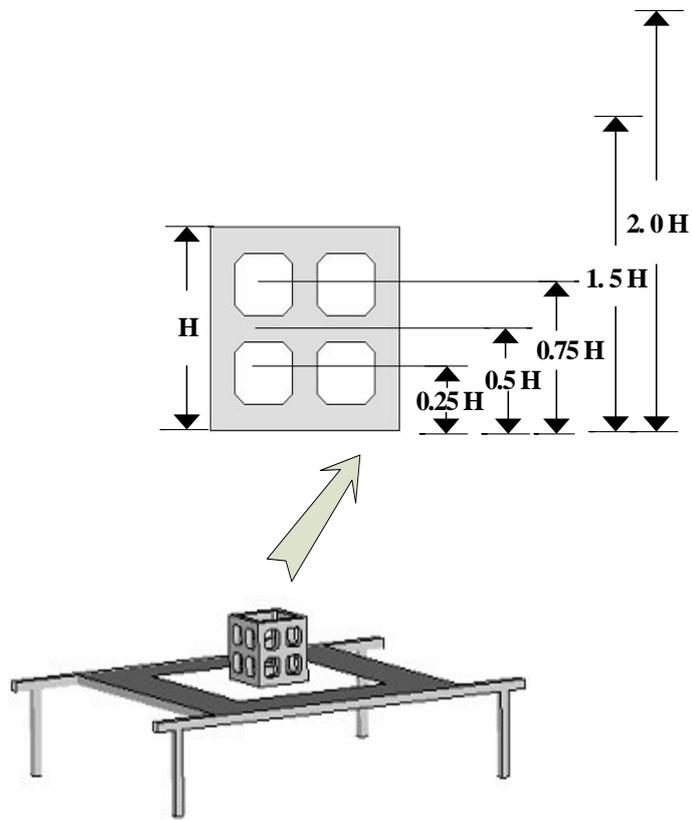


圖 4-12 礁體流場實驗支架與模型魚礁量測位置

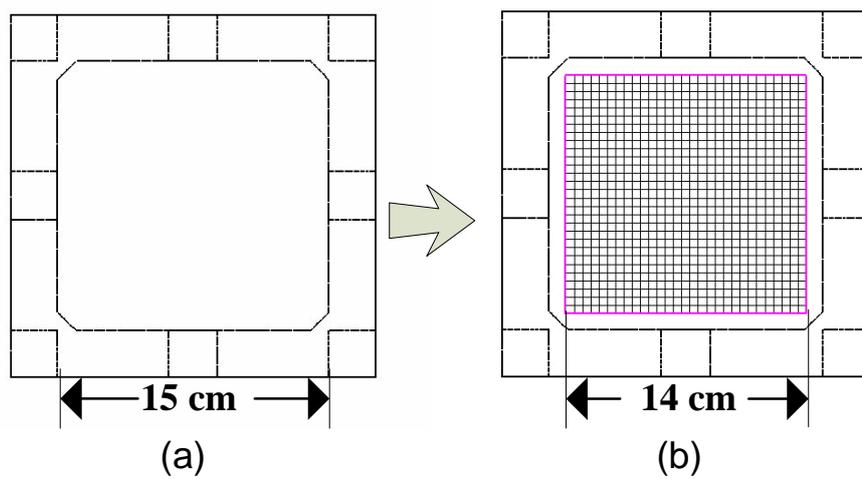


圖 4-13 魚礁內部流場觀測區域(a)與擷取有效量測範圍(b)

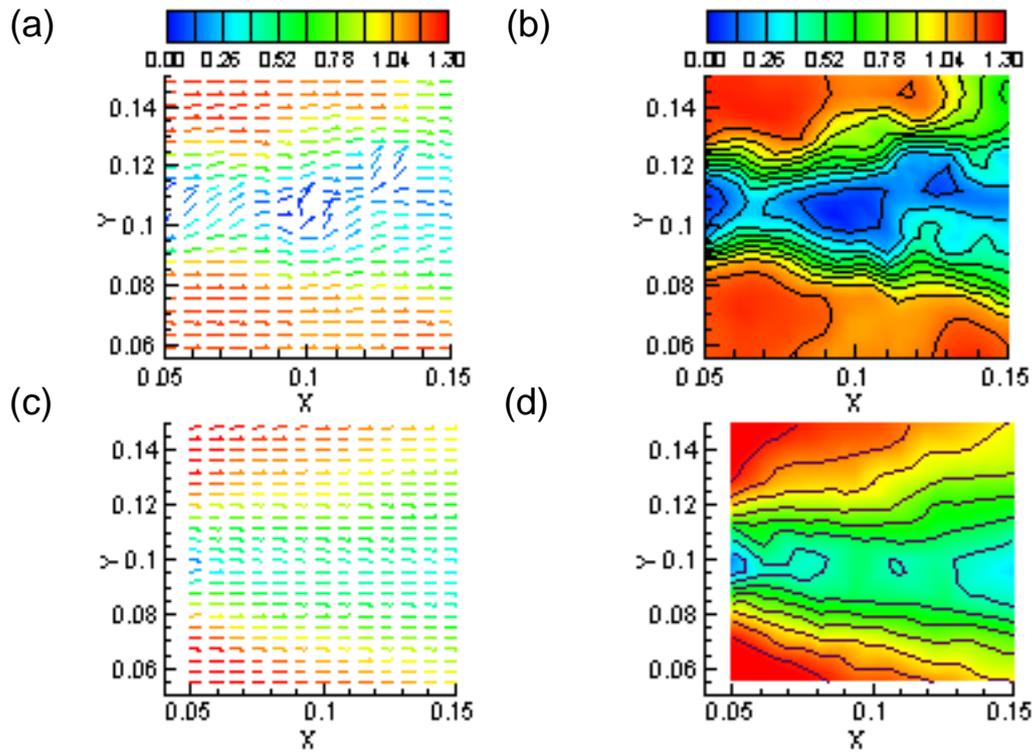


圖 4-14 0.25H 位置之魚礁內部水平方向剖面流場速度向量圖
(a)(b)實驗量測；(c)(d)數值模擬

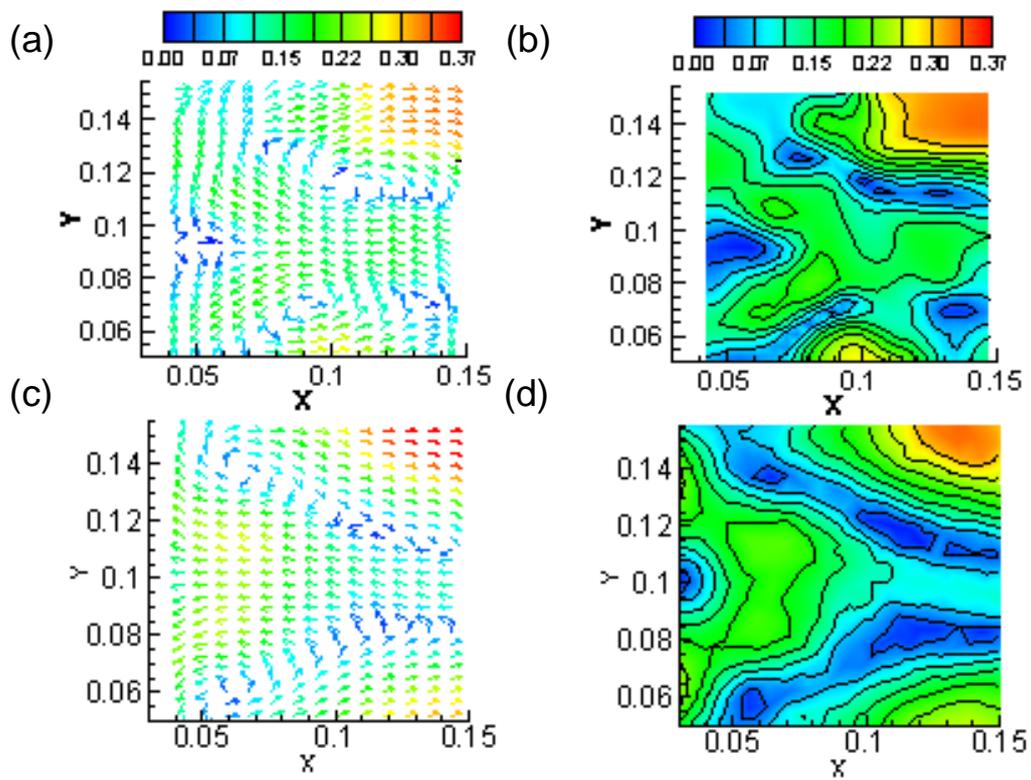


圖 4-15 0.5H 位置之魚礁內部水平方向剖面流場速度向量圖
(a)(b)實驗量測；(c)(d)數值模擬

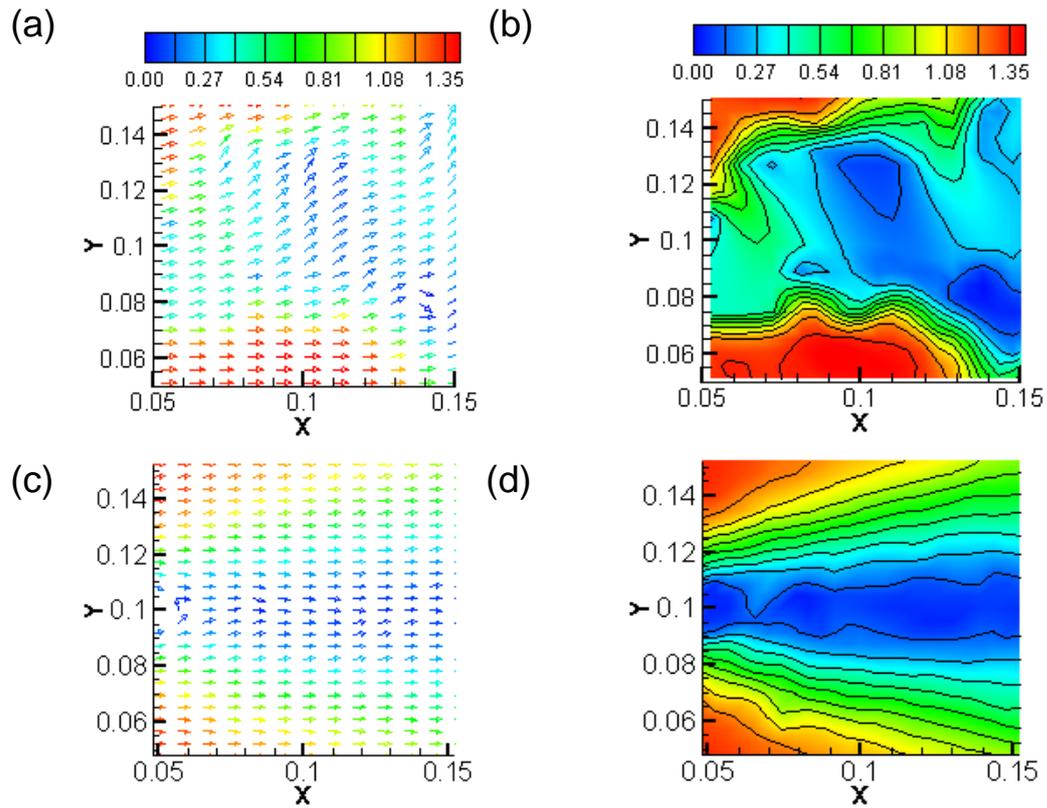


圖 4-16 0.75H 位置之魚礁內部水平方向剖面流場速度向量圖

(a)(b)實驗量測；(c)(d)數值模擬

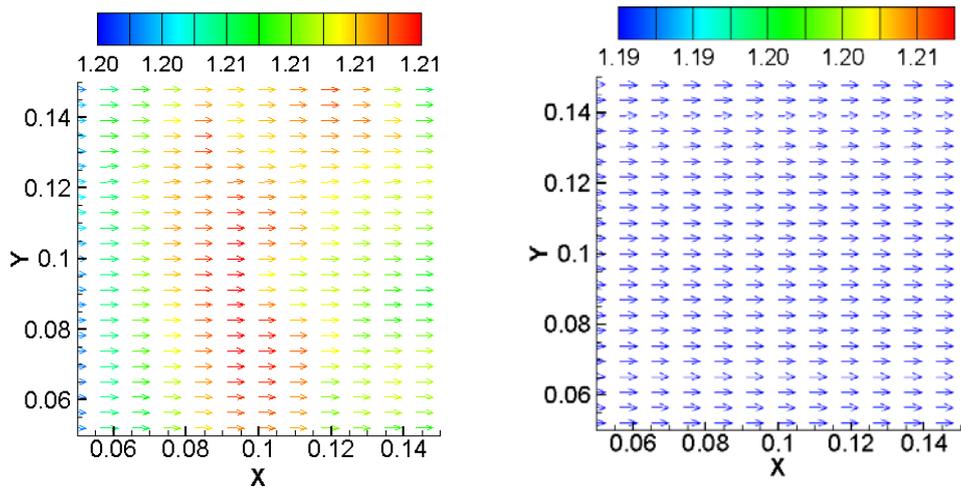


圖 4-17 距魚礁上緣 15 公分位置之速度向量圖

第五章 海床地形變化對人工魚礁流場影響之分析

人工魚礁能供給動植物良好的棲息場所，而達到培育海洋資源，增加漁產之目的，為謀求豐富沿海漁場、維護漁業資源，設置人工魚礁是最直接有效的方法之一。人工魚礁所建構的海洋生態系，現階段雖然不能準確量化其效益，但近年來其本身所具有的聚魚特性與其在海洋生態所扮演的積極復育角色卻是不爭之實。有關魚礁聚魚成因之探討，礁體周遭流場之速度分佈常是學者研究之重點，但影響礁體內外流場之速度分佈礁體幾何構型除被視為主因外，其所投置之海床地形亦可能對礁體內外流場存有不可忽略之擾動效應。魚礁在投入海底後可改變海底地形，並因海流、潮汐、波浪等作用，對礁體內外形成複雜之渦動流場，而成為一極佳的餌料場，進而吸引魚類的棲息、覓食、聚集、滯留及繁殖。本研究將利用有限體積數值法與 $k-\varepsilon$ 紊流模式以解析魚礁礁體在不同海床地形影響下其內部形成之複雜流場。此一可視化流場之研究成果，將可被進一步應用於魚礁聚魚因子之成效探討。

第一節 魚礁幾何構型與海床地形之建構

為配合魚礁流場模型實驗所完成之流場模擬相關驗證工作，本節針對人工魚礁在海流作用下，附近海床地形變化對礁體內外流場之影響進行研究，其流場數值模擬亦以縮小十分之一尺寸的實驗模型(0.2× 0.2× 0.2 公尺)為探討對象。另有關海床地形變化之構建，以缺口朝下與朝上之三維簡單梯型幾何構型來分別模擬隆起與凹陷之海床地形(圖 5-1)。圖 5-1 中， β 角代表梯型斜邊之傾角，並以 β 角之大小變化來表示所模擬的海床地形相對於平坦海床的隆起與凹陷程度，另在模擬海床地形變化之所有算例中，三維梯型體縱向切面(XZ 平面)之兩個斜邊與頂邊(或底邊)之長度皆等於 $1l$ ， l 代表 3 個魚礁邊長長度。魚礁中心點之擺放位置，將配合海床地形之起伏變化，置

於梯型體之前($S=0.5\ell$)、中($S=1.5\ell$)、後($S=2.5\ell$)等不同之位置， S 表沿著斜面長度變化之貼體座標(curve-fitting coordinate)。故配合三個 β 角之變化($\beta=5^\circ, 15^\circ, 30^\circ$)與魚礁在二種凹凸地形及在海床地形三種不同擺設位置之組合，總共將計算模擬 18 種魚礁流場算例(表 5-1，圖 5-2)。

有關礁體內外流場之分析，本研究將不逐一討論魚礁內外各個切面的流場計算模擬結果，而僅探討呈現礁體中央縱切面(簡稱 C-XZ 面)以及與礁體平行之中央橫切面(簡稱 C-XY 面)等兩個平面之相關計算結果。在擷取數值流場之計算資料後，將據此進一步比較分析海床地形之幾何變化對礁體流場之相關影響。

第二節 魚礁與海床地形數值模擬流場建置

在本研究有關魚礁與海床變化之流場模擬算例中，將模擬主要尺寸——長、寬、高均為 0.2 公尺之單一模型魚礁置於隆起與凹陷之海床地形，而模擬海流流速則為 2.0 m/sec 之非穩態流場變化(模擬時間皆為 30 秒，時間步階 $\Delta t=0.05$)，在所有模擬之算例中，計算域內所含之流體物理特性其密度與動力黏滯係數則分別為 $\rho=1000\text{kg}/\text{m}^3$ 與 $\mu=8.0\times 10^{-4}\text{kg}/\text{m}\cdot\text{sec}$ ，而每一算例所使用之平均計算網格總數(number of cells)則約為 680,000 個網格，礁體周遭最小網格體積之平均值則約為 $1.78\times 10^{-10}\text{m}^3$ ，而礁體遠距外圍最大網格之平均值則約為 $6.54\times 10^{-3}\text{m}^3$ 。

在第肆章將模型魚礁置於平坦海床地形之流場實驗，與利用數值模式所得之魚礁流場計算結果，相互比較(圖 4-14~4-16)得知，數值計算所得之流場模擬結果與實驗量測數據非常近似，現階段雖礙於實驗環流水槽無法建構所模擬的海床地形環境，無法取得更進一步比對的實驗資料，但數值方法經由與第肆章 PIV 流場量測實驗所得之良好比對結果驗證得知，數值流場計算模式在魚礁流場之模擬研究上有其

一定的準確性，因此若將此等方法應用於上述實驗水槽所無法構建的魚礁流場研究環境，將可解析海床地形變化對礁體周遭流場可能之影響，而所獲之研究成果將具有一定之可靠度與參考價值。

如前所述，海床結構實體模型建構的實驗量測分析誠屬不易，經由第肆章在平坦地形魚礁流場數值模擬與實驗量測比對驗證分析結果，發現可由本研究所建置的數值模擬方式，來進行魚礁對各種海床結構的流場影響分析。由於礁體造型及水文環境等多重因素之影響，人工魚礁周遭之流場相當複雜，為便於探討海床地形變化對礁體流場之影響與便利算例之比較分析，本章計算所得之礁體流場速度物理量，將以正交化之速度(normalized velocity)表之，而礁體周遭之流場比較，則針對地形變化可能為礁體內外流場帶來不同程度之影響，將個別探討地形變化因子對礁體內外流場之影響。此一結果將有利於海洋生態學者進一步歸納與找出礁體內外流體之運動模式對魚群棲息行為之影響成因。

第三節 魚礁在不同海床地形之流場分析

有關海床地形變化對礁體內部流場影響之分析，圖 5-3(a),(b),(c) 至圖 5-8(a),(b),(c) 為算例 1 至算例 18 之礁體內部 C-XY 面之速度分佈(velocity contour)，而礁體內部 C-XZ 面之速度分佈則如圖 5-9(a),(b),(c) 至圖 5-14(a),(b),(c) 之計算結果。另觀察圖 5-3 至圖 5-14，在改變梯型斜邊傾角 β 之過程中，由圖 5-3 至圖 5-5 與圖 5-9 至圖 5-11 之速度分佈變化可看出隆起海床地形對礁體內部流場之影響，而圖 5-6 至圖 5-8 與圖 5-12 至圖 5-14 則呈現出凹陷海床地形對礁體內部流場影響之計算結果，圖 5-15、圖 5-16 分別為魚礁置於隆起海床地形頂部與凹陷海床地形底部之 C-XY 面流場速度分佈，而圖 5-17、圖 5-18 則為對應之 C-XZ 面速度分佈。

(一) 魚礁在隆起海床地形之內部流場分析

比較圖 5-3(a),(b),(c)與圖 5-5(a),(b),(c)，可發現當人工魚礁放置於隆起海床地形之迎流面(front site)時，其礁體內部 C-XY 面出現之流體最大速度值，隨著 β 角之增加將有變大之趨勢，然而當魚礁置於背流面(rear site)時，此一趨勢並特別不明顯，此一現象亦反應在圖 5-9(a),(b),(c)與圖 5-11(a),(b),(c) C-XZ 面之計算結果。上述之計算結果說明當流動之流體遇上隆起海床地形時，其位於迎流面附近的流體將因驟起突升之地形變化而壓迫流體之流動空間並迫使流體加速而促使礁體內部靠近開孔之部份有較大之流動速度出現，但當流體流經隆起海床地形之背流面時，雖然礁體外部之流體理應配合 β 角之增加而有流速減緩之趨勢，但可能背流面之斜坡長度太短，算例 3、9、15(表 5-1)之魚礁擺設位置雖在傾角 β 之改變下，並無法凸顯此擺設地點在水深方向之變化，因此在背流面，魚礁內部之速度分佈受傾角 β 變化之影響並特別不明顯。此外，有關魚礁投置於隆起海床地形頂部之探討，圖 5-4(a),(b),(c)與圖 5-10(a),(b),(c) 分別為 C-XY 面與 C-XZ 面之礁體內部流速分佈，比較圖 5-4(a)、圖 5-4(b)與圖 5-4(c)可發現，由於受到魚礁內建中間檔板之影響其在 C-XY 面之礁體內部流速分佈並不會受到 β 值之改變而有明顯之變化，但比較圖 5-10(a)、圖 5-10(b)與圖 5-10(c)卻可發現在 C-XZ 面上礁體內部在靠近魚礁開孔位置附近之流速分佈將有隨著 β 值變大而有增大之現象，而此一成因當與流體流經迎流面後造成流體運動加速有著直接且密切之關係。

觀察圖 5-3 至圖 5-5 與圖 5-9 至圖 5-11 可得知，在流體運動流向固定之狀況下，礁體內部之流動模式受魚礁構型之影響極大，事實上，此一型式之魚礁內部流場之流速分佈雖因礁體置於隆起海床地形之相異位置而有速度大小之差異，但大體而言，在斜面傾角 β 不大之條件下($\beta < 15^\circ$)，礁體內部之流動模式卻極為相似，而由上述諸圖之比較得知，此一構型之魚礁當置於較小斜面傾角之隆起地形時，礁體內部靠近開孔附近之位置通常會存有較大之速度分佈，另由圖 5-3 至

圖 5-5 之礁體內部 C-XY 面流速分佈圖得知，雖魚礁主體在其中央部存有檔板結構，但礁體之中央橫切面則因位於魚礁橫向之對稱軸線上，魚礁四周上下、前後、左右之開孔將趨使由開孔流入與流出之流體在此一截面匯集，而這也將使此一截面之流體運動呈現迴流、渦動等較為多樣性之複雜流場，此一結果亦說明若能得知影響聚魚因子之流場特性，則藉由魚礁構件之開孔數量、孔徑大小與開孔位置等之設計規畫，將可在魚礁內部產生最有聚魚成效之流場。

綜觀圖 5-9 至 5-11 為魚礁置於海底隆起區段其內部縱向剖面 (C-XZ) 流場運動速度分佈之模擬運算分析結果。圖 5-9 為在迎流面依 5~30 度角斜坡上置放魚礁模型之模擬分析，由該圖發現隨著迎流面角度增加，海流進入魚礁有加速現象產生，讓魚礁內部 C-XZ 縱剖面上方流場運動速度有隨之增長趨勢。當魚礁模型置放於海底隆起段上方平台時如圖 5-10 所示，由於海底隆起段減少海流通過空間，讓魚礁置於該區段的內部流場因環境變化造成海流加速效應影響，此現象可由圖 5-9 與圖 5-10 兩者相互比對分析中清楚呈現。圖 5-11 為魚礁座落於隆起海床背流面之內部縱向流場運動速度分佈圖，由於魚礁受前方隆起海床遮蔽與海流通過空間擴大之影響，在隆起海床背流面之海流運動速度趨於平緩，隨著隆起海床變化坡度的增加，海流流經隆起海床背流面流動速度將更受抑制，此綜合效應使得魚礁更能有效地阻擋海流流動。

(二) 魚礁在凹陷海床地形之內部流場分析

圖 5-6 至圖 5-8 與圖 5-12 至圖 5-14 分別為魚礁置於凹陷地形時其礁體內部之 C-XY 面與 C-XZ 面的流速分佈，比較圖 5-6 (a),(b),(c) 發現當人工魚礁放置於凹陷海床地形之迎流面時，其礁體內部 C-XY 面出現之流體最大速度值，並無隨著 β 角之增加而有較大之變化趨勢，但在圖 5-12(a),(b),(c) 之礁體中央縱切面 C-XZ 面之圖型中，可明顯的觀察出礁體內之速度分佈已隨 β 角之增加而有變小之現象，此

狀況尤以礁體之下半部最為明顯。圖 5-12 之流場運動模式類似於圖 5-11 隆起海床的背流面，隨著斜坡角度加大，魚礁模型內部流場運動速度亦呈趨於平緩現象，就魚礁置放方式而言，隆起海床背流面與凹陷海床迎流面是非常近似的流場結構，因此兩者可視為同一類型流場。圖 5-8 與圖 5-14 分別為魚礁置於凹陷地形之背流面時其礁體內部之 C-XY 面與 C-XZ 面的流速分佈，由圖中可發現在礁體之上半部區域其流場速度分佈值有隨 β 角增加而變大之趨勢，此一現象與流體流經隆起海床地形之迎流面類似，而當比較圖 5-3、圖 5-8 以及比較圖 5-9、圖 5-14 時可發現，雖然在速度值之大小上流體流經凹陷海床地形之背流面比流經隆起海床地形之迎流面略低，但基本上兩者之流動型態(flow pattern)非常相近，而此一流動型態之近似狀況，亦出現在流體流經凹陷海床地形迎流面時與其流經隆起海床地形背流面時兩者間所形成之流場。

此外，有關魚礁投置於凹陷海床地形底部之探討，圖 5-7(a),(b),(c) 與圖 5-13 (a),(b),(c) 分別為 C-XY 面與 C-XZ 面之礁體內部流速分佈，觀察上述諸圖可發現，當 β 值愈大時，由於海床底部離斜面頂點之距離愈大，因此在 $\beta \geq 30^\circ$ 時，由於海流運動速度的減緩，使得魚礁內部流場結構更加鬆散，隨著迎流面角度的增加，魚礁內部流場運動速度更為降低，甚至逐漸呈現無流動現象，類似海流通過海溝所產生之流動狀況。凹陷海床地形底部區域之流體已有如一灘死水一般，流動幾乎靜止，是故在此一狀況下，魚礁內部之流體運動已不明顯，而若渦動效應為構成聚魚因子之魚礁流場所需具備之特性，則魚礁置於凹陷海床地形之底部，非佈建魚礁所需考量之地點，而透過數值模擬則可先行預測合適之魚礁佈建地點，以發揮魚礁之聚魚效果。

(三) 魚礁在隆起與凹陷海床地形之外部流場分析

有關海床地形變化對礁體外部流場影響之探討，如圖 5-15、圖

5-16 分別為魚礁置於隆起海床地形頂部與凹陷海床地形底部之 C-XY 面流場速度分佈，圖 5-17、圖 5-18 則為對應之 C-XZ 面速度分佈，如前所述，由於凹陷海床地形底部之流體相對於隆起海床地形頂部之流體其流速甚慢，因此在考量顯示凹陷海床地形底部周遭之細部流場時，在圖 5-16、圖 5-18 中表示凹陷海床地形底部流場之速度色階最大值(maximum level of contour =0.9)將遠小於圖 5-15、圖 5-17 隆起海床地形頂部流場之速度色階最大值(maximum level of contour =1.4)。針對海床地形隆起之算例，觀察圖 5-15(a),(b),(c) 與圖 5-17(a),(b),(c)可發現，當斜面傾角 β 變大時，沿著隆起地形上升之水流其速度將逐漸變大，因此在魚礁外圍周遭之流場由於受到隆起地形因素之影響將有較大之速度場分佈(Large velocity contour)，反之，對於深處凹陷海床地形底部之魚礁而言，由上游端流入的平行水流大部份將由魚礁上方通過，因此受到凹陷地形因素之影響，當斜面傾角 β 變大時，魚礁外圍周遭之流速將愈趨緩慢，並間接地將影響魚礁內部之流體運動，此外，由於受到礁體結構之阻擋，礁體內部之流體運動將如前所述趨於靜止而無任何之渦動效應產生。

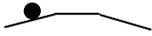
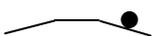
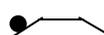
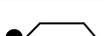
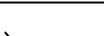
其次，探討礁體外部之渦動效應，由於本研究之礁體構型並非流線型物體(streamlined body)，因此當斜面傾角 β 變大時，位於隆起海床地形頂部之礁體頂角(vertex angle)四周(圖 5-15)將有分離流產生，而其周遭之渦動效應也將愈趨明顯，因此若在海流流速慢之區域想構建流場多元且複雜之海洋牧場，選擇與利用隆起海床地形之有利因素，將可彌補原先流場流速過慢之問題，這亦是隆起的海床地形會導致深層海水產生湧昇流，使魚群聚集因素之一。

圖 5-19、圖 5-20 分別為人工魚礁置放於海底隆起區域之縱向與橫向流場速度分佈之數值模擬，圖中海流流動方向正對魚礁並由圖之左方流入，在此一模擬算例中，由於海流在碰觸魚礁前須先通過隆起

區域的前斜坡，因此在圖中可明顯看出魚礁所在的海底隆起區段上之流體流動有類似噴嘴漸縮效應的加速狀態發生，而使海流在進入魚礁前有局部加速現象。由流場縱向分佈圖中可明顯觀察到在魚礁正上方迎流面 $1/2 H$ 附近，因流場加速效應影響而有較大的速度梯度變化而此等變化，將造成回流並產生渦動流場。另當海流通過魚礁背流面時，由圖中可觀察到由於受到隆起區域之阻擋，在魚礁後方之下游段將產生較大範圍的低速區，而又因魚礁自體遮蔽效應，因此海流流動趨緩之效應將更為明顯，而此等環境將給予習於低流速游動之魚群良好的庇護生存空間。比較圖 5-19 與圖 5-20 之流場結構，由圖 5-20 的海底隆起區段的魚礁流場結構橫剖面圖亦可清楚的觀察到上述現象，而此等現象顯示，透過改變海流的流動模態，魚礁投放地點的海床地形之變化與其聚魚成效有著密切之關聯。

此外，由圖 5-20 橫剖面流速分佈圖中，亦可看出礁體左右兩側有明顯的高速區，而魚礁後方下游段則具有較寬廣的低速區，由上述計算分析得知，應用本研究流場數值模擬之結果，可立即評估出在起伏變化的海床地形佈放魚礁之整體效益，而有助於人工魚礁投放作業範圍之設定與規劃。

表 5-1 魚礁流場模擬算例與圖 5-2 相對應關係位置

算例 編號	坡度角度 (β)	魚礁擺設於凹凸 海床地形之位置	圖 5-2 對應位置
1	5°		(1)
2	5°		(2)
3	5°		(3)
4	5°		(4)
5	5°		(5)
6	5°		(6)
7	15°		(7)
8	15°		(8)
9	15°		(9)
10	15°		(10)
11	15°		(11)
12	15°		(12)
13	30°		(13)
14	30°		(14)
15	30°		(15)
16	30°		(16)
17	30°		(17)
18	30°		(18)

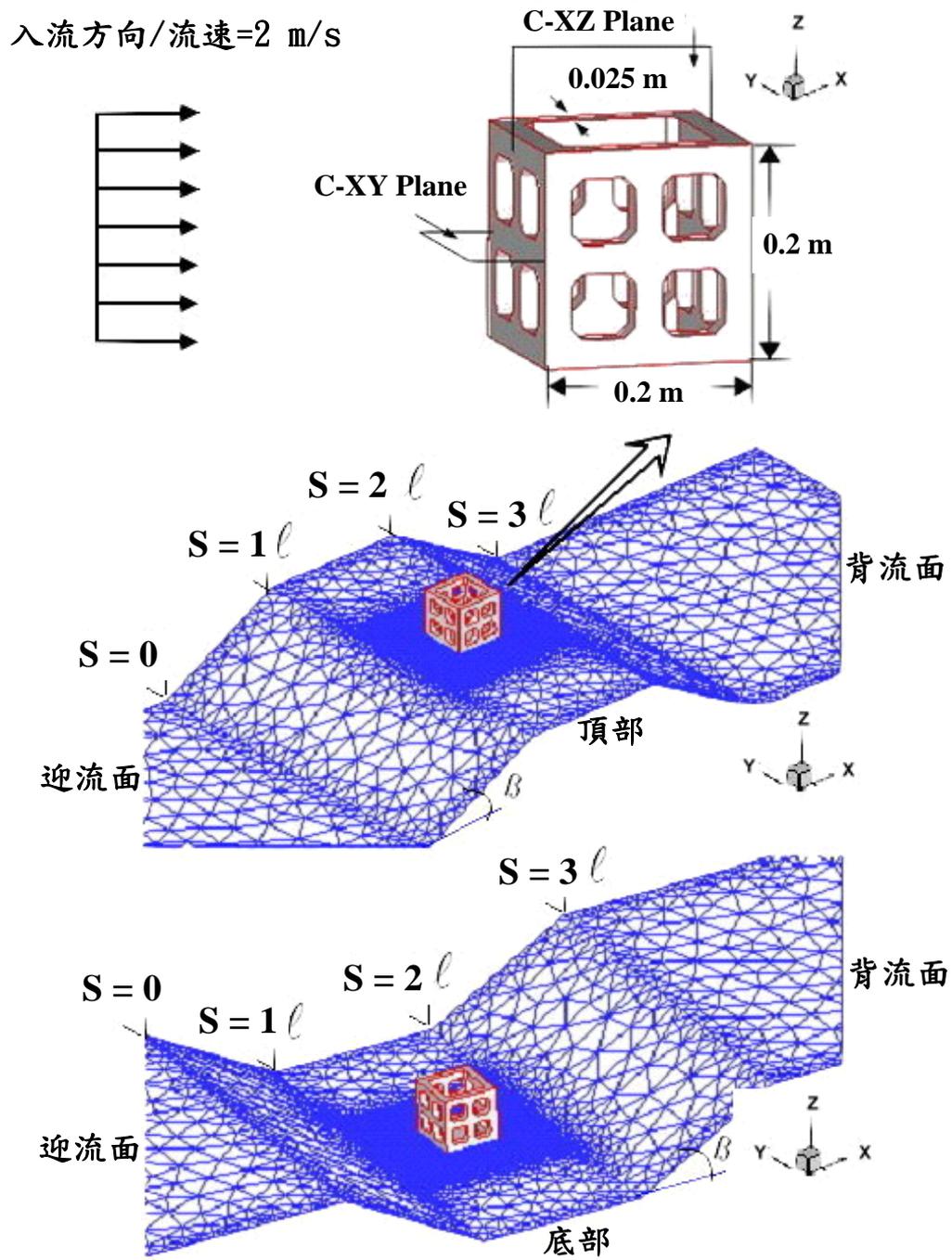


圖 5-1 人工魚礁構型主要尺寸與海床地貌起伏變化之示意圖

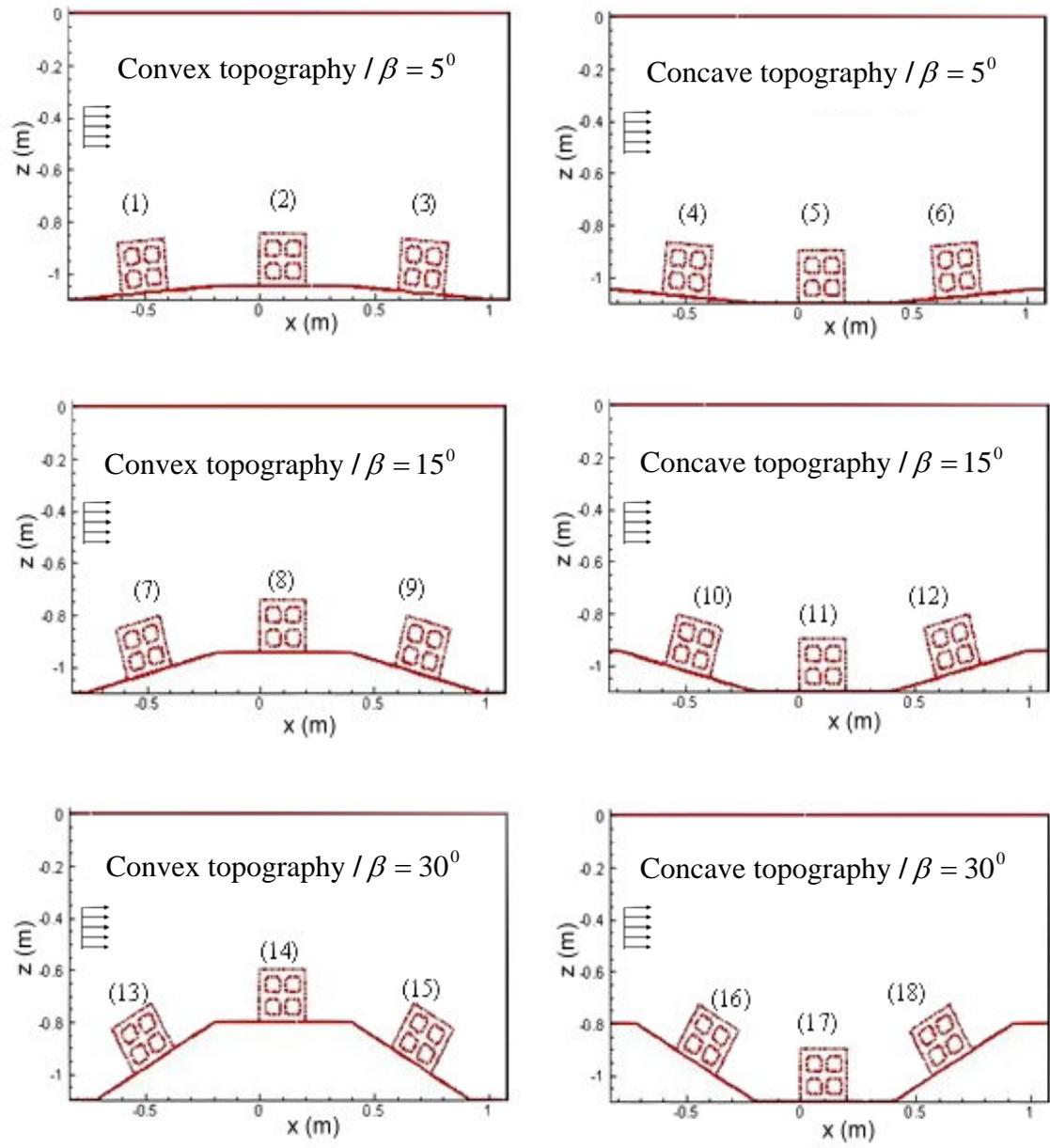
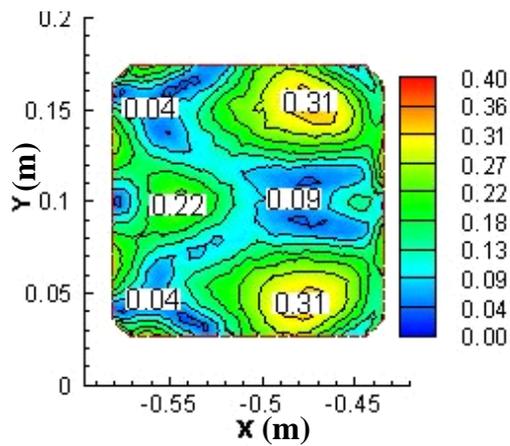
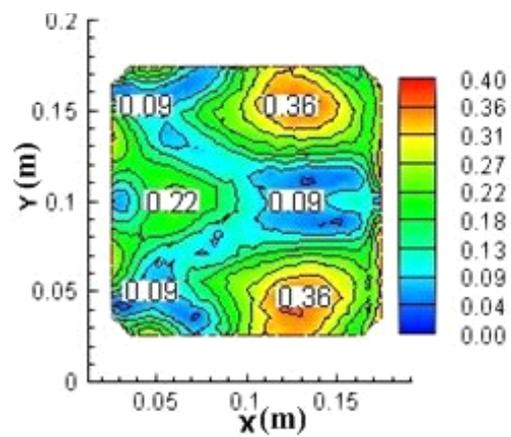


圖 5-2 礁體擺設於隆起與凹陷之海床地形示意圖

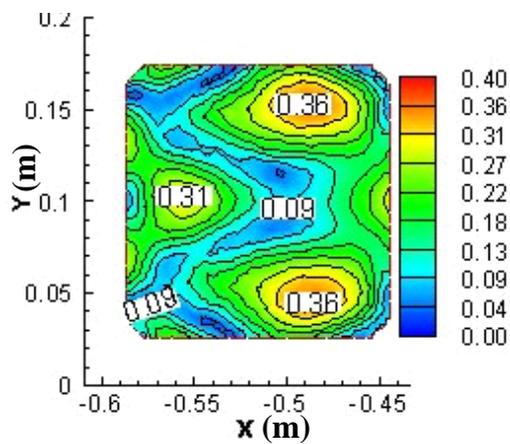
(a) $\beta = 5^\circ$ / Sliced plane parallel seabed



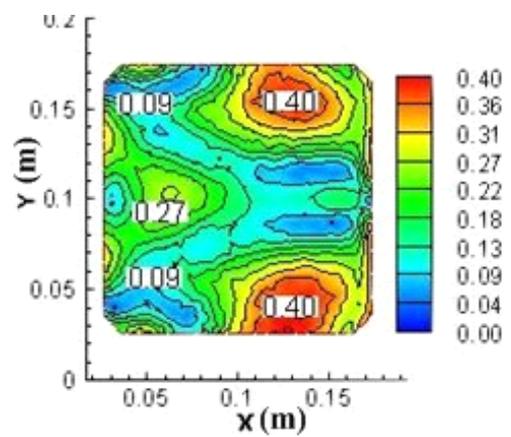
(a) $\beta = 5^\circ$ / Sliced plane parallel seabed



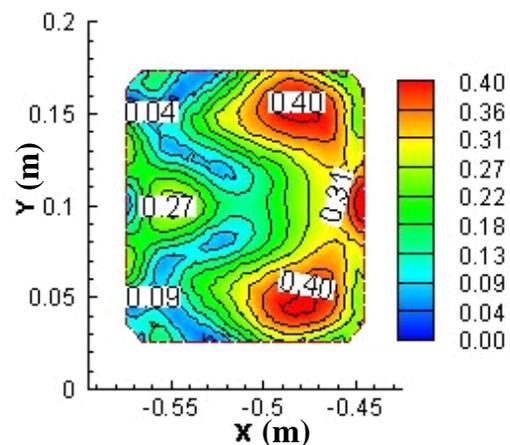
(b) $\beta = 15^\circ$ / Sliced plane parallel seabed



(b) $\beta = 15^\circ$ / Sliced plane parallel seabed



(c) $\beta = 30^\circ$ / Sliced plane parallel seabed



(c) $\beta = 30^\circ$ / Sliced plane parallel seabed

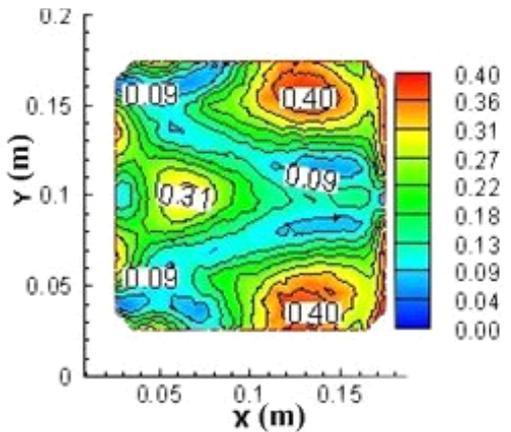
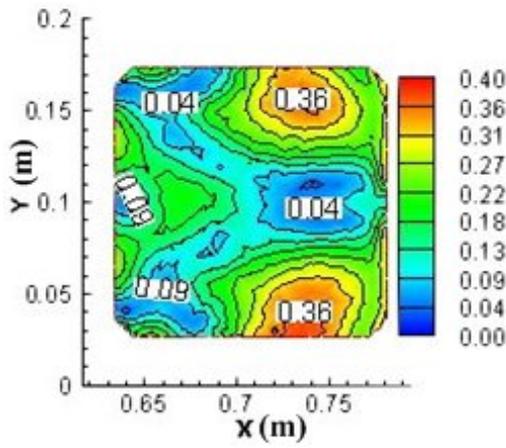


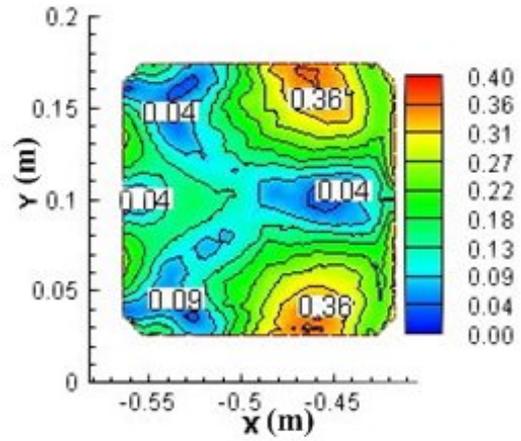
圖 5-3 礁體內部 C-XY 面在隆起海床地形迎流面之速度分佈

圖 5-4 礁體內部 C-XY 面在隆起海床地形頂部之速度分佈

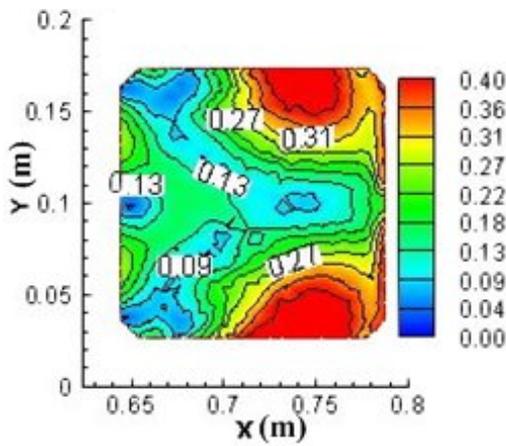
(a) $\beta = 5^\circ$ / Sliced plane parallel seabed



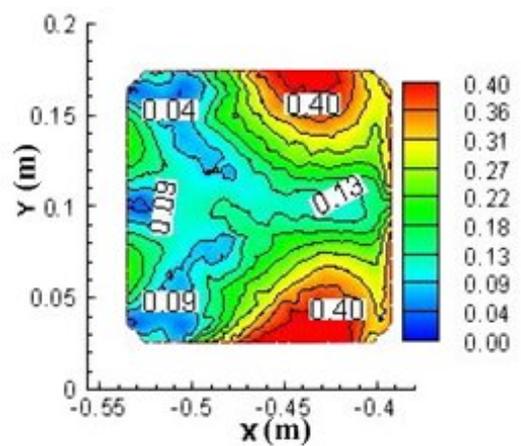
(a) $\beta = 5^\circ$ / Sliced plane parallel seabed



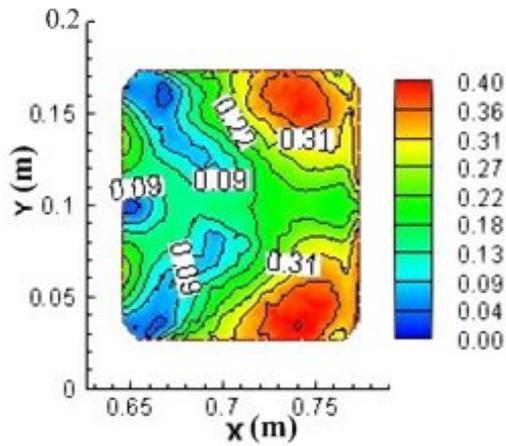
(b) $\beta = 15^\circ$ / Sliced plane parallel seabed



(b) $\beta = 15^\circ$ / Sliced plane parallel seabed



(c) $\beta = 30^\circ$ / Sliced plane parallel seabed



(c) $\beta = 30^\circ$ / Sliced plane parallel seabed

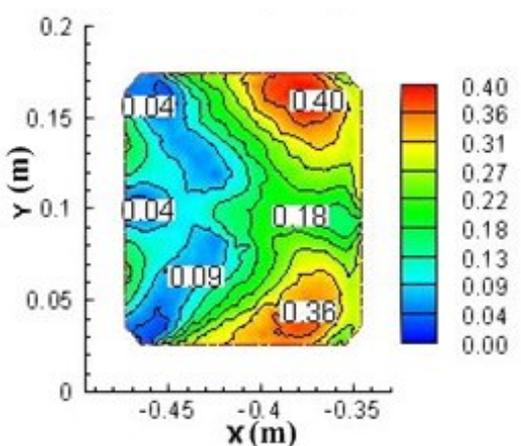
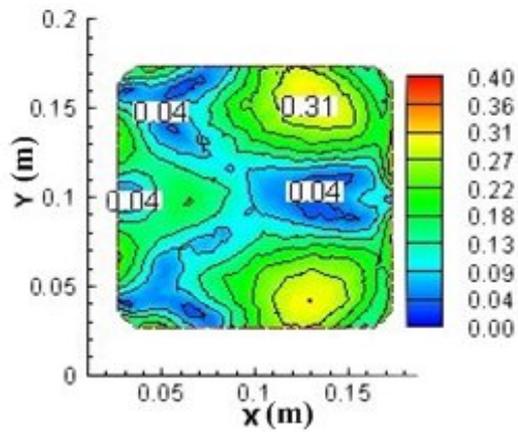


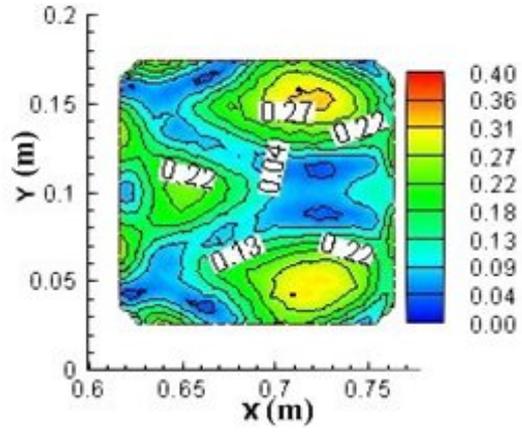
圖 5-5 礁體內部 C-XY 面在隆起海床地形背流面之速度分佈

圖 5-6 礁體內部 C-XY 面在凹陷海床地形迎流面之速度分佈

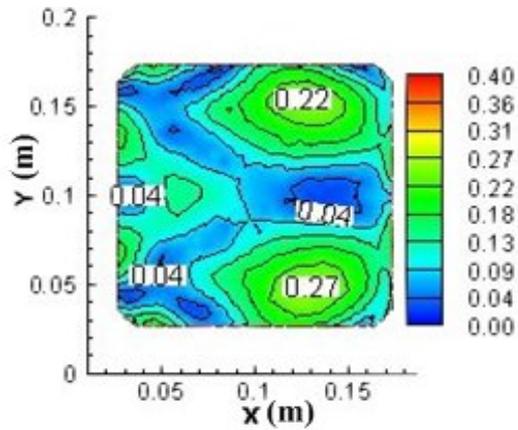
(a) $\beta = 5^\circ$ / Sliced plane parallel seabed



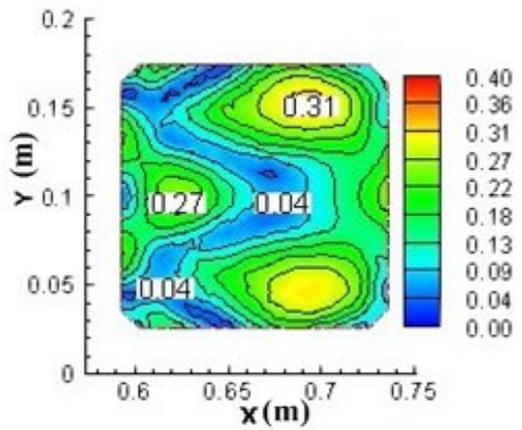
(a) $\beta = 5^\circ$ / Sliced plane parallel seabed



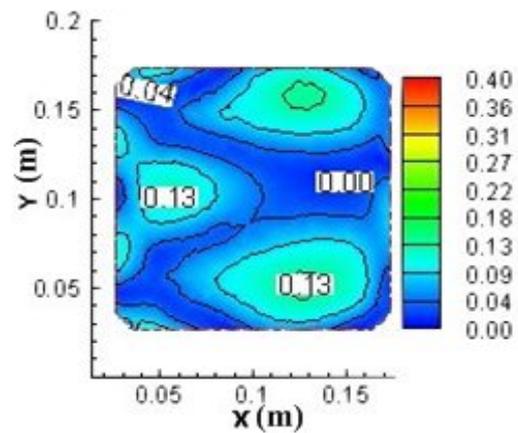
(b) $\beta = 15^\circ$ / Sliced plane parallel seabed



(b) $\beta = 15^\circ$ / Sliced plane parallel seabed



(c) $\beta = 30^\circ$ / Sliced plane parallel seabed



(c) $\beta = 30^\circ$ / Sliced plane parallel seabed

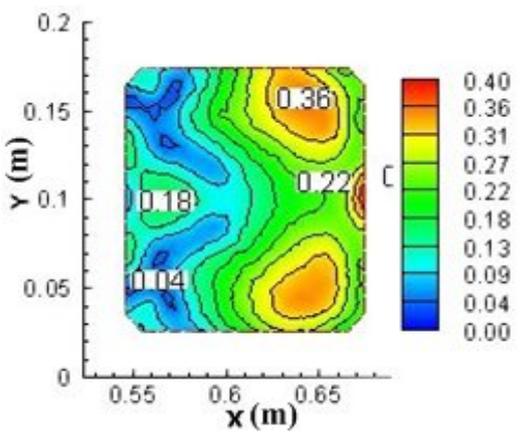
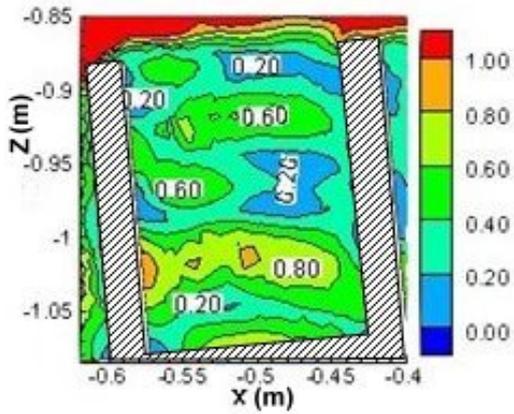


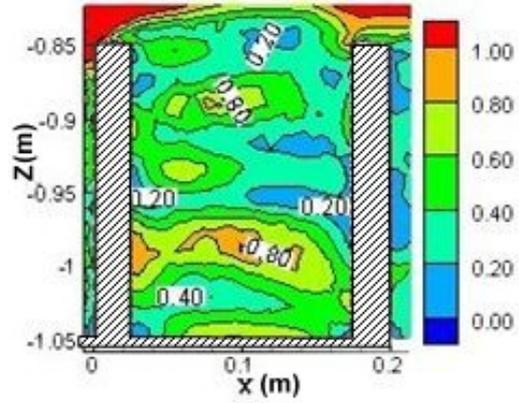
圖 5-7 礁體內部 C-XY 面在凹陷海床地形底部之速度分佈

圖 5-8 礁體內部 C-XY 面在凹陷海床地形背流面之速度分佈

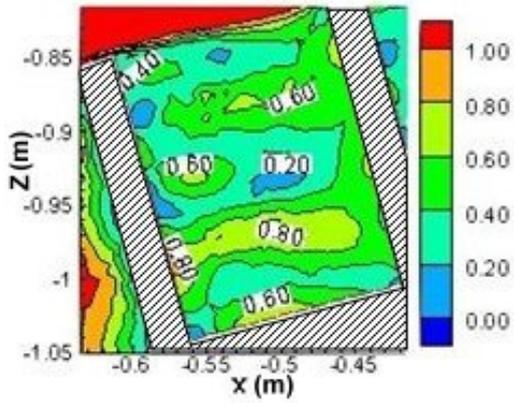
(a) $\beta = 5^\circ$ / Longitudinal-Sliced plane



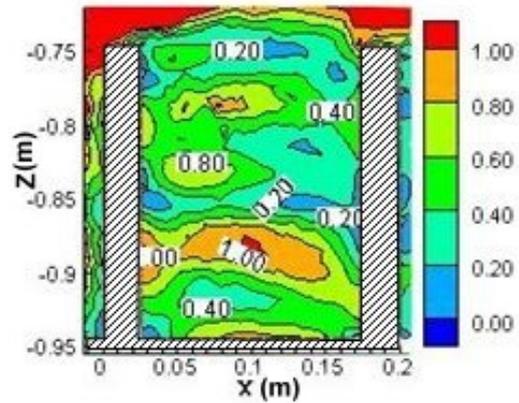
(a) $\beta = 5^\circ$ / Longitudinal-Sliced plane



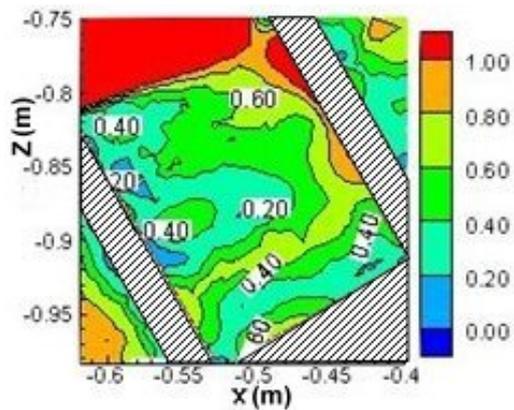
(b) $\beta = 15^\circ$ / Longitudinal-Sliced plane



(b) $\beta = 15^\circ$ / Longitudinal-Sliced plane



(c) $\beta = 30^\circ$ / Longitudinal-Sliced plane



(c) $\beta = 30^\circ$ / Longitudinal-Sliced plane

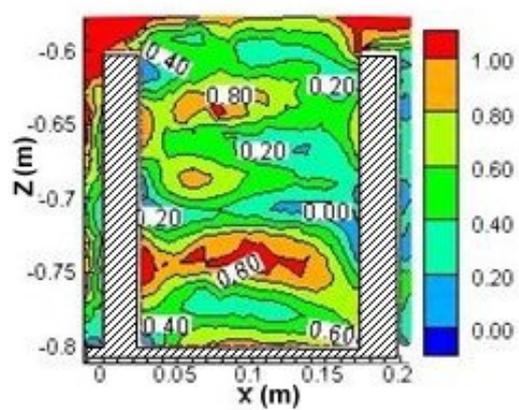
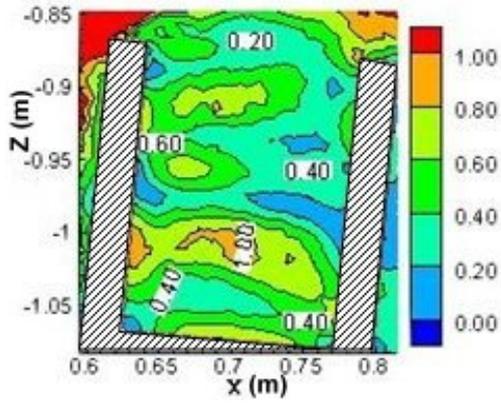


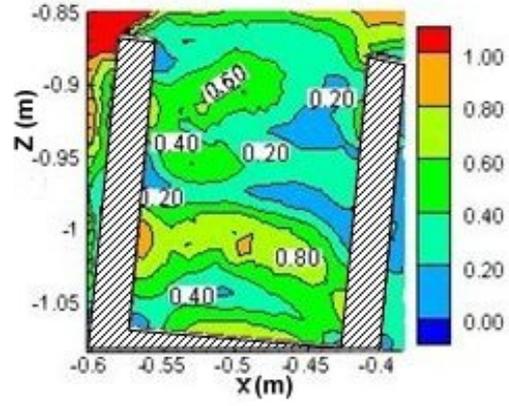
圖 5-9 礁體內部 C-XZ 面在隆起海床地形迎流面之速度分佈

圖 5-10 礁體內部 C-XZ 面在隆起海床地形頂部之速度分佈

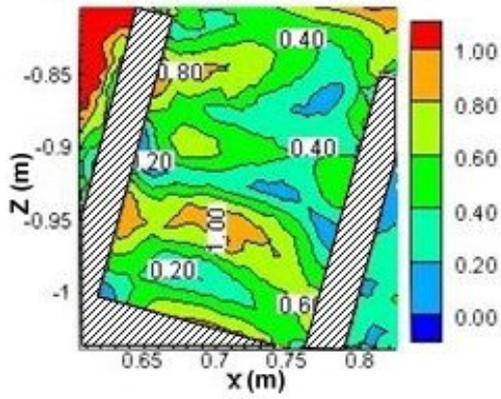
(a) $\beta = 5^\circ$ /Longitudinal-Sliced plane



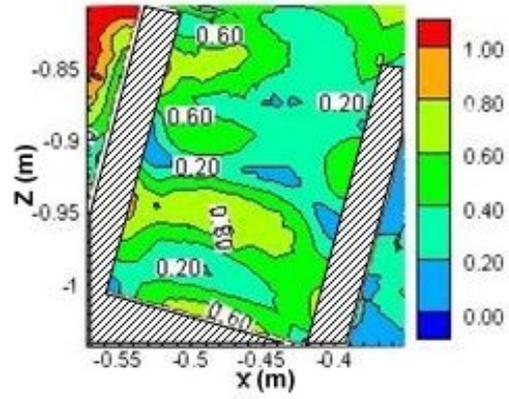
(a) $\beta = 5^\circ$ /Longitudinal-Sliced plane



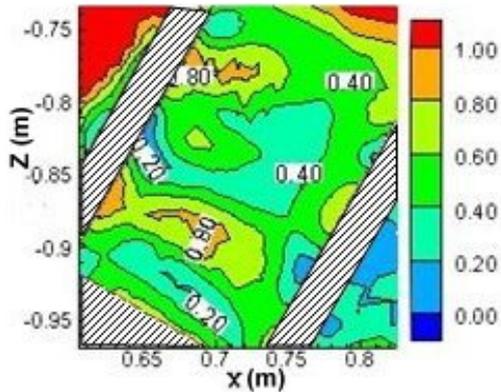
(b) $\beta = 15^\circ$ /Longitudinal-Sliced plane



(b) $\beta = 15^\circ$ /Longitudinal-Sliced plane



(c) $\beta = 30^\circ$ /Longitudinal-Sliced plane



(c) $\beta = 30^\circ$ /Longitudinal-Sliced plane

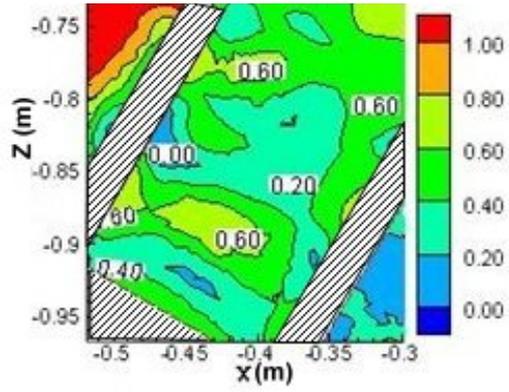
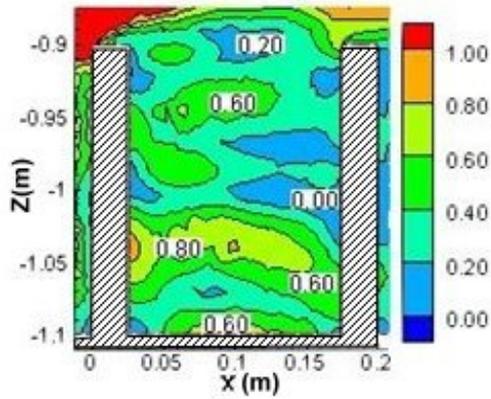


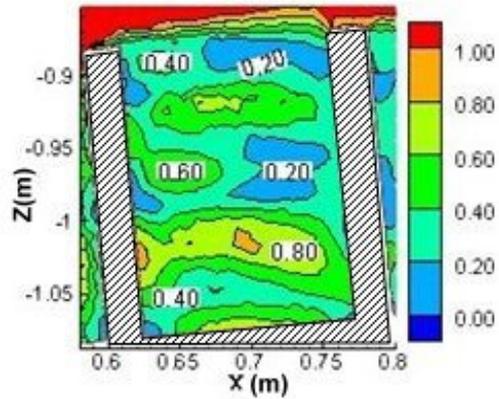
圖 5-11 礁體內部 C-XZ 面在隆起海床地形背流面之速度分佈

圖 5-12 礁體內部 C-XZ 面在凹陷海床地形迎流面之速度分佈

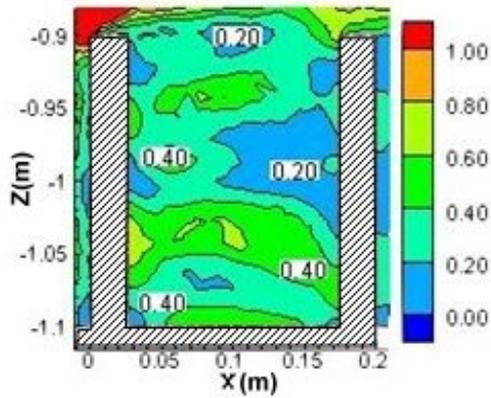
(a) $\beta = 5^\circ$ /Longitudinal-Sliced plane



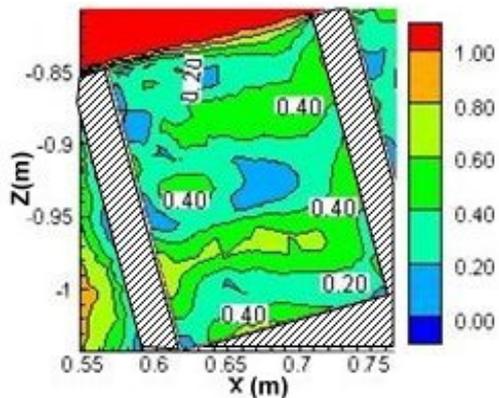
(a) $\beta = 5^\circ$ /Longitudinal-Sliced plane



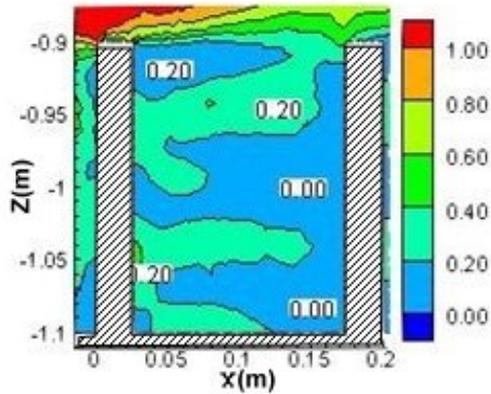
(b) $\beta = 15^\circ$ /Longitudinal-Sliced plane



(b) $\beta = 15^\circ$ /Longitudinal-Sliced plane



(c) $\beta = 30^\circ$ /Longitudinal-Sliced plane



(c) $\beta = 30^\circ$ /Longitudinal-Sliced plane

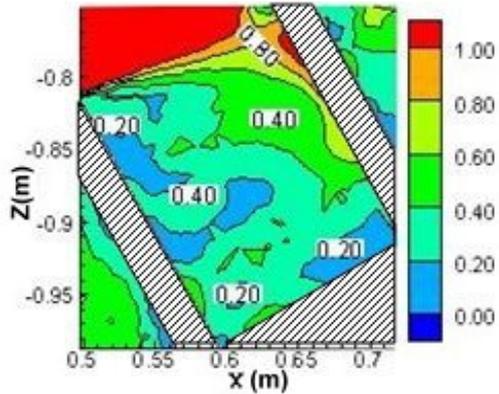
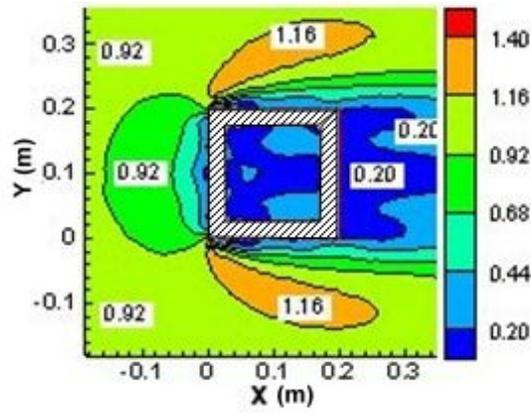


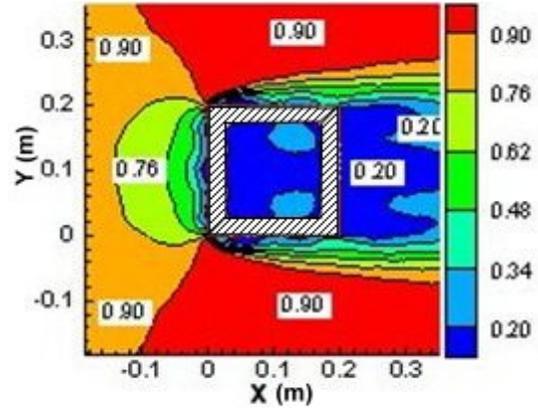
圖 5-13 礁體內部 C-XZ 面在凹陷海床地形底部之速度分佈

圖 5-14 礁體內部 C-XZ 面在凹陷海床地形背流面之速度分佈

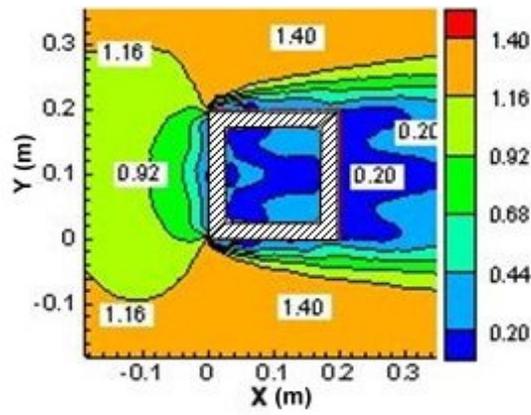
(a) $\beta = 5^\circ$ / Sliced plane parallel seabed



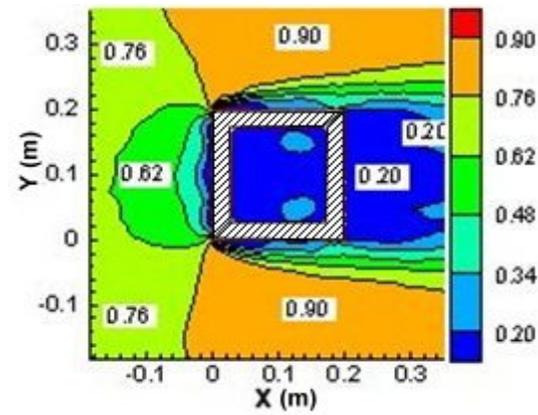
(a) $\beta = 5^\circ$ / Sliced plane parallel seabed



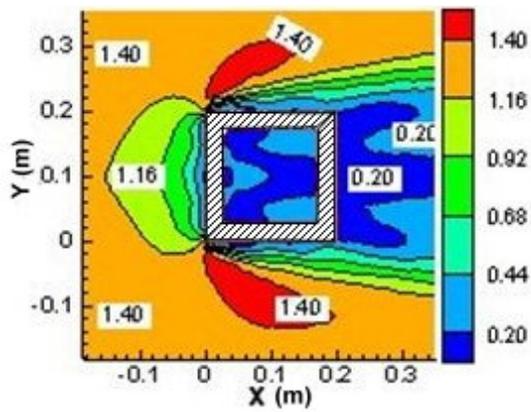
(b) $\beta = 15^\circ$ / Sliced plane parallel seabed



(b) $\beta = 15^\circ$ / Sliced plane parallel seabed



(c) $\beta = 30^\circ$ / Sliced plane parallel seabed



(c) $\beta = 30^\circ$ / Sliced plane parallel seabed

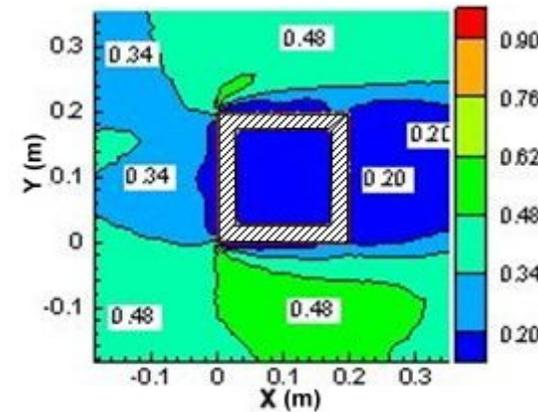
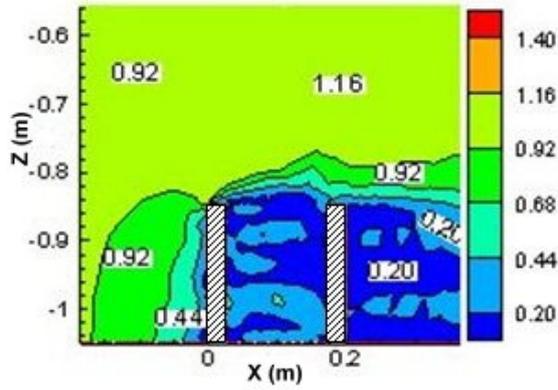


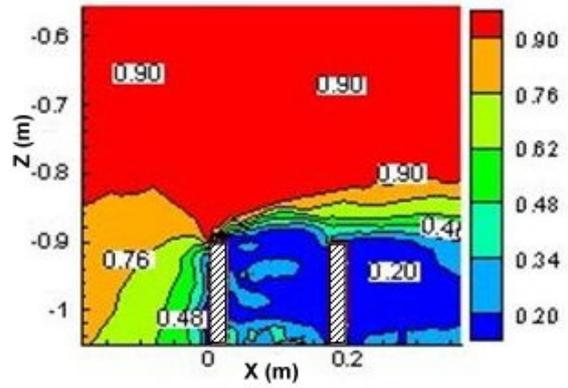
圖 5-15 礁體外部 C-XY 面在隆起海床地形頂部之速度分佈

圖 5-16 礁體外部 C-XY 面在凹陷海床地形底部之速度分佈

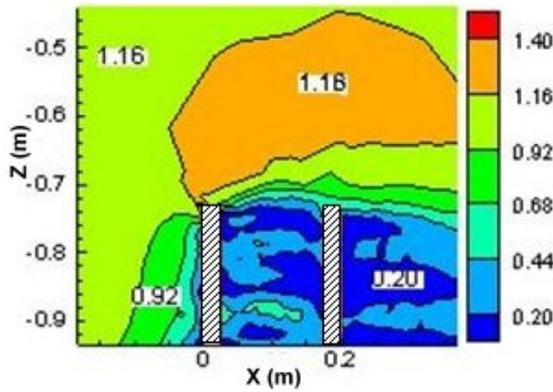
(a) $\beta = 5^\circ$ / Longitudinal-Sliced plane



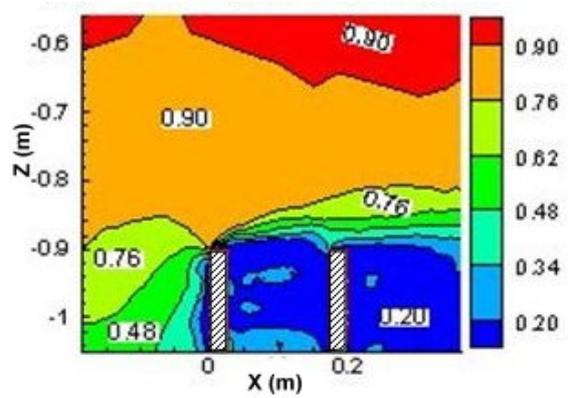
(a) $\beta = 5^\circ$ / Longitudinal-Sliced plane



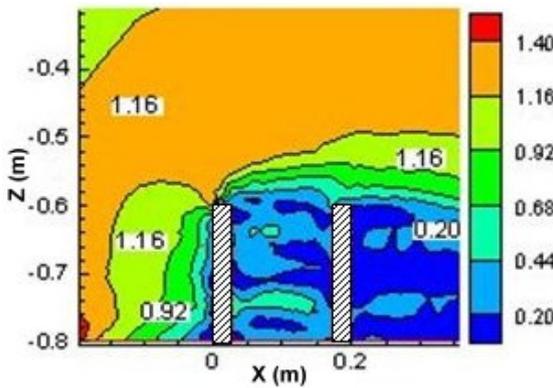
(b) $\beta = 15^\circ$ / Longitudinal-Sliced plane



(b) $\beta = 15^\circ$ / Longitudinal-Sliced plane



(c) $\beta = 30^\circ$ / Longitudinal-Sliced plane



(c) $\beta = 30^\circ$ / Longitudinal-Sliced plane

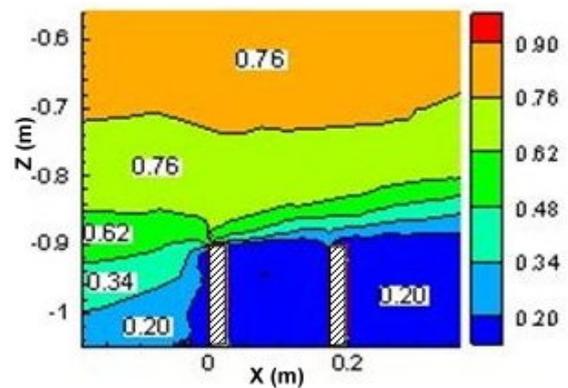


圖 5-17 礁體外部 C-XZ 面在隆起海床地形頂部之速度分佈

圖 5-18 礁體外部 C-XZ 面在凹陷海床地形底部之速度分佈

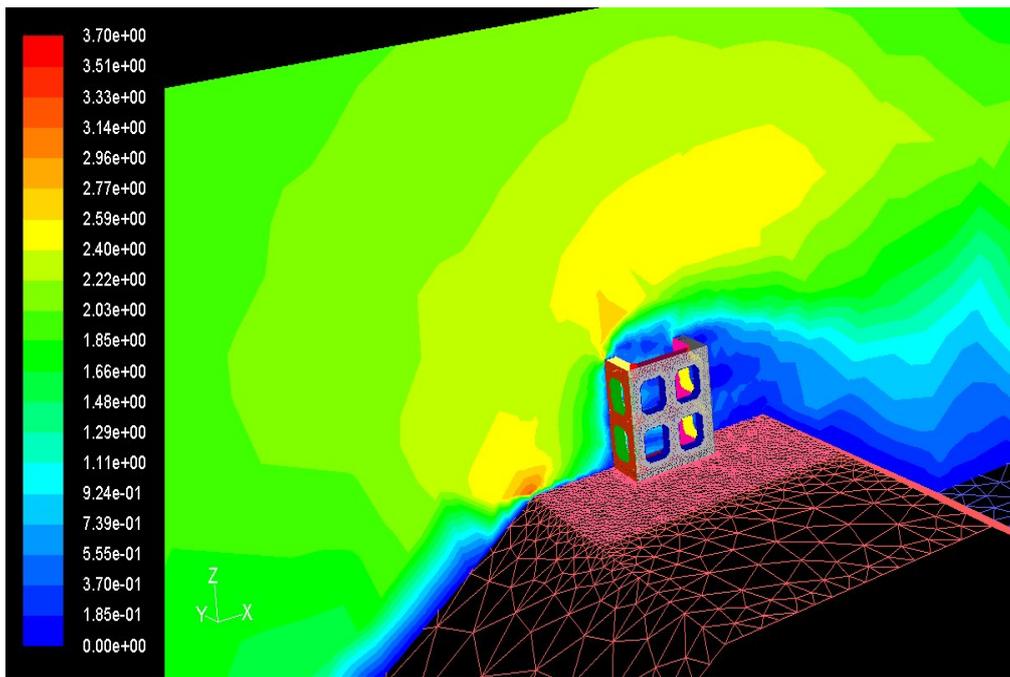


圖 5-19 魚礁置於海底隆起地形之縱剖面流場速度分佈

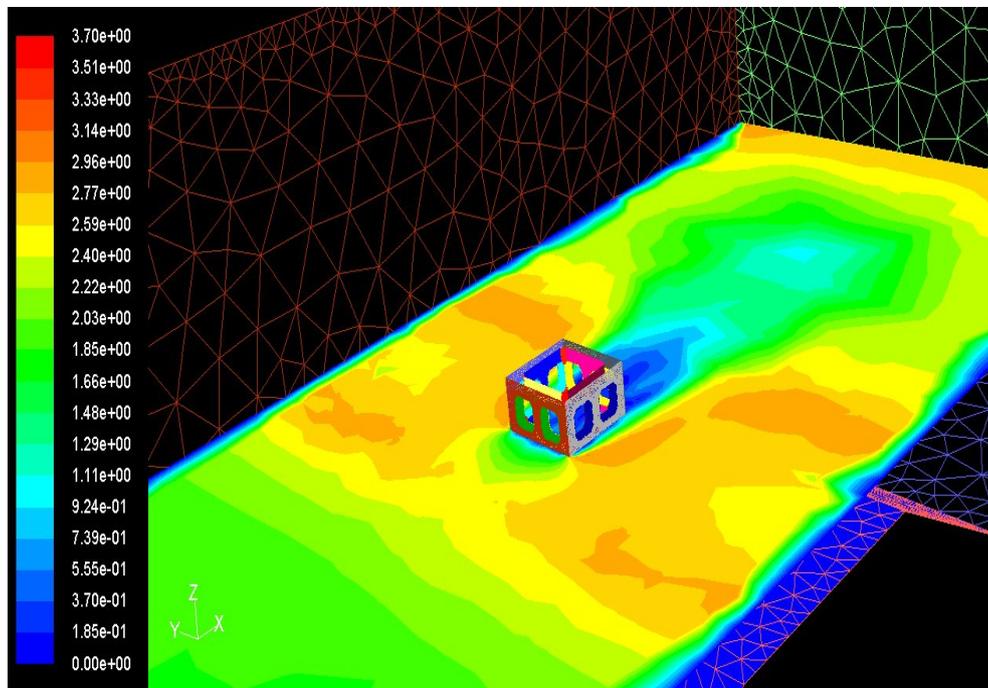


圖 5-20 魚礁置於海底隆起地形之橫剖面流場速度分佈

第陸章 礁體幾何排列變化對人工魚礁流場影響之分析

本研究經由實驗量測與數值模擬計算分析，已完成一系列的單體魚礁模型內部流場之探討，並進一步藉由魚礁內部流場之流動模態與遮蔽效應的關係來評估單體魚礁之聚魚成效，然而在寬廣的海床佈放魚礁，為增進魚群的匯聚效果，魚礁的佈放策略通常不會採分散式的單體魚礁配置，而係將多個單體魚礁並排或疊置成礁群，即所謂的聚合礁體。因此，聚魚成效將與礁體之幾何排列變化及其數量之多寡密切相關。

後藤(1953)研究指出魚礁佈設之位置如係成行排列時，則應與潮流成垂直方向，如此可以構成曲流，形成魚介類棲息之屏障，若順潮流方向投放則效果較差；桑谷(1962)利用魚探機以鱸魚為對象所做的研究中發現，魚礁面積愈大、凸部數愈多，聚魚的效果愈佳；大島(1964)曾發表一些簡單的計算式，估算多大的表面積，需要幾個魚礁來構成，以及如何疊放使其表面積最大；據小川(1966, 1967, 1968 a)在水槽中所做的實驗，認為魚礁以水平方向的相鄰堆放之齊聚效果要比垂直方向的疊高為優，而疊高的效應又以堆疊兩層時為最佳，層數加多時增加之效果即不顯著；大島(1969)利用潛水調查魚礁增產量及其配置構造關係的研究指出，魚礁放置間隔得當時，其有效面積增加的更大，且兩個方形水泥魚礁之間距以不超過邊寬的二分一的聚魚效果為最佳。因此如何在成本考量下，發揮聚合礁體的最大成效，已成為人工魚礁投放研究的熱門課題，而其研究成果將能使魚礁之設計與其相關投放作業適材適所，發揮其最佳作用與經濟效益並為國家節省執行資源復育計畫所需投入的巨額經費。

第一節 礁體幾何排列之建構

有關聚合魚礁流場與聚魚成效之探討，由於海流通過礁群時，礁群間將產生相互干涉的流場。因此，若礁體周遭的流場流動模態與聚魚成效相關，則透過礁體間的排列組合與間距變化，將能在節省礁體使用量的前提下，營造出符合經濟效益的聚魚流場。如前所述，本研究有關聚合礁體配置之流場研究仍將以數值計算模式來模擬，然而由於在魚礁數值流場的研究上，為提高魚礁流場模擬的準確度，經常需要在礁體周遭配置數量眾多的細密網格，而網格使用量的增加，也將加重了計算機的負荷，很明顯地，當流場計算域內所模擬計算的礁體數量過多時，其所需的模擬時間與計算資源將相當龐大，因此在計算資源有限的情況下，本研究有關此一課題之研究將先以雙體魚礁為主，雖然雙體魚礁流場並不能完全擬合出聚合礁群流場之流動模態，然事實上，由本研究之初步研究發現，由於礁體流場間存有部份線性組合的特性，是故此等模擬結果仍將具有相當程度的參考價值。

有關上述課題之研究，除了數值計算模擬外，尚可透過實驗量測來找出礁群間排列組合與流場分佈的對應關係，但為避開模型效應與槽壁效應等實驗過程中所可能產生的干擾問題，執行聚合礁群之排列組合流場實驗常需較大的實驗空間，然目前受限於實驗設備並無法完全配合上述礁群流場之研究，是故針對此一研究課題，數值模擬仍是現階段較為可行的研究方法。事實上，由於在本研究中亦已透過數值與實驗流場之比對完成單體魚礁流場之數值模擬驗證，因此應用數值模擬執行上述雙體魚礁的研究課題將可在兼顧研究時效與計算準確度的前提下，進行魚礁組合排列對礁體流場之影響研究，而本研究為有系統地針對上述問題進行兩魚礁間外流場的模擬計算，並藉以完成魚礁間距變化對礁體流場影響範圍之定量分析研究，其所執行的礁體流場模擬算例則將含括三項研究算例：

一、橫向排列間距變化之魚礁流場分析

二、縱向排列間距變化之魚礁流場分析

三、垂直堆疊之魚礁流場分析

另有關聚合礁體其影響範圍之外流場定量分析探討，如同前述，由於與礁體平行之中央橫切面(C-XY 面) 其流場變化較多樣化且較複雜，因此有關魚礁流場之分析探討將以此平面為主，以便利於比較改變礁體間距與組合排列模式之魚礁流場變化。

在礁體流場影響範圍之定量分析比較上，本研究將以無因次化等流速線所涵蓋的面積大小來做為量化因子。基本上，當均勻流場內無擺置魚礁時，除了計算邊界外，計算域內其它區域之無因次化的速度值將接近於 1，而當流場內置入物體時，物體周遭流場將會有大於或小於 1 的無因次化速度值出現，且遠離物體流場的無因次化速度值將會再度趨近於 1，而有關流場速度分佈與聚魚的關係，在本研究中，強調魚礁聚魚的遮蔽效應乃來自於其具有減緩流體運動之能力。因此，若能綜整出小於 1 的無因次化速度分佈面積值，將可藉此判定礁體遮蔽效應的影響範圍，而有關上述無因次化速度分佈面積值之計算方式則概述如後。

圖 6-1 為與礁體平行之單體魚礁中央橫切面的無因次化速度場，藉由流場後處理軟體的幫助，在圖 6-1 中可清楚的標記出不同速度值的無因次化等速度線的所在位置，在該圖中等速度線的變化範圍為 0.0 至 1.0，間隔 0.1，在此有關礁體外流場不同大小的速度分佈範圍的面積計算，將以接近上游端礁體的後端邊界為基準（該邊界的縱向座標值 $X=0.2$ ），緊接著沿邊界做出與入流速方向垂直的直線(如圖 6-1 之 \overline{ab})，由於此直線將與多條等速度線相交，是故，連結交點與不同速度值的等速度線，將可分別畫出位於魚礁後方，代表不同速度值分佈範圍的封閉平面，如此便可運用上述量化後之封閉平面面積

值大小來進一步評估礁體流場的影響範圍。

雖然有關聚合礁體之研究，海床地型效應亦是有趣的研究課題，然為單純化本章節之研究內容，在前述的三項研究算例中，並不考慮加入海床地型變化之影響效應，數值模擬計算域內之海床地型幾何將以無隆凹起伏的平坦平面簡化之，另有關計算域大小之設定，為節縮計算格點之使用與避開壁面效應之影響，計算域大小之設定與格點疏密配置原則將以單體魚礁之算例為基準，如此計算域上、下游兩側之邊界尺度將隨著魚礁間距之變化而做適當調整，以求能在符合計算效益的前提下，達到與單體魚礁的模擬品質。此外，在本項課題之模擬研究中，上游端邊界條件設定與礁體幾何構型之使用將與前述章節相同，算例中，上游端入流速(U_0)為 2.0 m/s，而魚礁邊長尺度 L 之大小仍為 0.2 公尺，另在礁體間距之變化分析中，並將以魚礁邊長尺度 L 為參考值，以進一步進行礁體間距 \bar{L} 分別等於 0.0L、0.5L、1.0L、2.0L、3.0L 與 4.0L 時之流場模擬分析，而各算例之相關分析結果則分述如後。

第二節 橫向排列間距變化之魚礁流場分析

有關魚礁橫向排列變化之流場範圍，圖 6-2(a)-(e)分別為魚礁排列間距 \bar{L} 由 0.0L 變化至 3.0L 之數值模擬結果，由圖 6-2(a)與圖 6-1 之比較可發現，當魚礁數量增多時，其等流速線涵蓋面積也將隨之增大，對單體魚礁而言，魚礁對下游端流場之影響範圍約有 10 個魚礁長度，而其在礁體左右兩側之影響範圍則大約有 0.5 個魚礁長度，另由圖 6-1 中亦可清楚地觀察到當流體通過魚礁前方時，其將受到魚礁的擠壓干擾，而造成礁體兩側流速快，礁體後方流速慢的流動現象，而由於礁體表面之流速為零，且礁體兩側之影響範圍並不大，因此將使等流速線在礁體兩側分佈相對密集，然而在下游端方向，則會因礁體的影響範圍變大，而使等流速線的分佈變的較疏。

如同前述，雖然魚礁在此方向的影響範圍較大，然而若將礁體外部小於 0.5 倍入流速值的等速線涵蓋區塊定義為魚礁所能發揮遮蔽效應的極限區域，則由圖 6-1 的等速線分佈情形觀之，礁體後方所能發揮遮蔽功能的影響範圍大概接近 3.0 個魚礁的縱深長度；而由圖 6-2(a)-(e) 的等速線分佈圖則可發現雙體組合礁的遮蔽範圍值將分別接近 5.0、2.8、2.5、2.5 與 2.5 個魚礁的縱深長度，魚礁的遮蔽範圍值將隨礁體間距變大而逐漸變小；如果將礁體外部小於 0.8 倍入流速值的等速線涵蓋區塊定義為魚礁所能發揮遮蔽效應的極限區域，亦有相似情況產生，在圖 6-1 礁體後方所能發揮遮蔽功能的影響範圍大概接近 6.0 個魚礁的縱深長度；由圖 6-2(a)-(e) 的等速線分佈圖遮蔽範圍值，將分別接近 9.0、8.8、7.1、6.0 與 6.0 個魚礁的縱深長度，魚礁的遮蔽範圍值亦將隨礁體間距變大而逐漸變小。

當雙體組合礁的遮蔽縱深長度值等於單體魚礁的遮蔽縱深長度值時（2.5 個魚礁長度）則可視為橫向間距的變化效應消失（如圖 6-2(c)-(e) 之算例），事實上，由圖 6-2(a)-(e) 等速線分佈範圍的比較得知，對橫向排列的礁體而言，以魚礁長度為量測指標並不客觀，舉例而言，雖然在圖 6-2(c) 之 0.5 倍入流速等速線的最大橫向座標值與圖 6-1 之單體魚礁算例相近，但在圖 6-2(c) 則可明顯地觀察到計算域中的兩個魚礁仍有相互干擾之效應存在。因此為客觀地陳述與探討此一問題，在本研究中，將進一步計算魚礁後方的等速線涵蓋面積，以為估測礁體影響範圍之依據，而其相關之計算結果則如表 6-1 與圖 6-3 所示。

表 6-1 所呈現的為雙魚礁在不同的橫向間距 \bar{L} 值，流場無因次化流速 \bar{V} 小於某一等流速線值的面積，此一面積值以 \bar{A} 表之，譬如在表 6-1 中， $\bar{V}_{<0.8}$ 在 \bar{L} 等於 0.5 所對應的 \bar{A} 值欄位 21.34 即代表礁體後方，所有小於 0.8 的無因次化流速 \bar{V} 所涵蓋的面積，然在此須特別強調的是， \bar{A} 為無因次化的物理量，該值等於計算所得的等流速線涵蓋面積

除以礁體長度的平方，此外，表 6-1 之 \bar{L} 與 \bar{A} 的對應關係並將以圖 6-3 呈現，以瞭解橫向排列之礁體，在其改變礁體間距 \bar{L} 後，其等流速線涵蓋面積 \bar{A} 之變化趨勢，有關上述問題之探討，由圖 6-3 中可發現，在 $\bar{L}=0.5L$ 時， $\bar{V}_{<0.8}$ 面積曲線的斜率值仍為正值，亦即當 \bar{L} 值由零變化至 $0.5L$ 時，流場中小於 0.8 倍入流速的 \bar{V} 所涵蓋的面積將逐漸擴大，但過了 $\bar{L}=0.5$ 後，該線之斜率即轉為負值，亦即當 \bar{L} 值由 $0.5L$ 調整至 $1.0L$ 的過程中， $\bar{V}_{<0.8}$ 的面積範圍將逐漸變小，如前所述，雖然 $\bar{V}_{<0.8}$ 之面積值有變小的趨勢，但整體而言，在 $0.5L < \bar{L} < 1.0L$ 的間距變化區間內，其所獲之 $\bar{V}_{<0.8}$ 值仍將比魚礁在緊靠並排 ($\bar{L}=0$) 情況下所獲之 $\bar{V}_{<0.8}$ 的面積值大，此外，若比較圖 6-3 其它曲線的變化趨勢，則可發現等流速線值小於 0.5 之曲線其在魚礁礁體分離後，面積值大小將隨礁體的交互作用減弱而呈現變小走勢，而此等曲線在間距 $\bar{L} > 0.5L$ 後其變化則漸趨平緩，整體而言，在間距 $\bar{L} > 2.0L$ 時，兩魚礁模型間交互干擾效應已不明顯，此時比對圖 6-1 單體魚礁與圖 6-2(d) 之雙體魚礁算例 ($\bar{L}=2L$) 之外流場速度分佈圖，當可發現兩者之模擬結果相似，而在圖 6-2(e) ($\bar{L}=3L$) 之模擬結果中更可發現魚礁間的流場干擾現象幾乎完全不存在，因此可推估海床上之魚礁水平橫向擺置間距應以不超過兩倍魚礁邊長尺度為佳。分析表 6-1 之所有等流速線的面積值，發現在 \bar{L} 等於 $0.5L$ 至 $1.0L$ 時之所有等流速線所涵蓋的面積 \bar{A} 有較大的影響範圍與遮蔽效應。

第三節 縱向排列間距變化之魚礁流場分析

有關魚礁縱向排列變化之流場範圍，圖 6-4(a)-(e) 分別為魚礁排列間距由 $0.0L$ 變化至 $4.0L$ 之數值流場模擬結果，而表 6-2 與圖 6-5 則為接近上游端之礁體後端的等流速線涵蓋面積的計算資料，由圖 6-5 中可知，不同於圖 6-3 所得魚礁橫向排列的模擬結果，在 $0 < \bar{L} < 4.0L$ 的變化區間內，代表不同礁體遮蔽效應程度的 \bar{A} 曲線，除了 $\bar{V}_{<0.9}$ 曲線外，其餘曲線之斜率皆為正值，亦即在此間距變化範圍

內，各等流速線值所涵蓋的面積將隨魚礁間距之增大而變大的趨勢；如同前述，對單體魚礁而言，魚礁對下游端流場之影響範圍約有 10 個魚礁長度，但由圖 6-4(e)之模擬結果得知，由於礁體的排列方向與流體流動方向平行，因此當流體通過接近上游端的魚礁後，其流速將受上述魚礁之影響而減緩，並在兩魚礁間形成廣大的低速緩流區，是故，縱使兩魚礁之間距已達 $4L$ ，但 $\bar{V}_{<0.1}$ 的面積值仍會持續增加，而其整體之影響範圍則達 18.5 個魚礁長度。

此外，觀察圖 6-4(a)至圖 6-4(e)等流速線值 $\bar{V}_{=0.9}$ 曲線在下游端方向所能延展的最大縱向座標值變化，則可發現，當兩魚礁縱向間距由 $\bar{L}=0$ 逐漸增加到 $\bar{L}=4L$ 時，靠近下游端魚礁後方 $\bar{V}_{<0.9}$ 等流速線的涵蓋範圍皆約在 12 倍魚礁長度範圍內，並無隨著間距變大而有增長的趨勢，但兩魚礁間之低速緩流區，則會隨魚礁間距之增加而逐漸擴大其影響範圍，然由於魚礁間之緩流區並不會毫無限制的增長，當兩礁體間距達到一定的距離時，雙魚礁流場在縱向流動方向的交互作用將逐漸式微。若以單魚礁算例來推估，此一魚礁間距值則大概會有 10 個魚礁長度，因此若加上靠近下游端魚礁之影響，當魚礁間距 $\bar{L}=10L$ 時，此等縱向排列雙魚礁流場之影響範圍將可達 20 個魚礁長度。由表 6-2 與圖 6-5 可推估海床上之魚礁縱向擺置間距以不超過十倍魚礁邊長尺度為宜，此時雙魚礁間的外流場干擾現象幾乎不存在。

第四節 垂直堆疊之魚礁流場分析

本研究亦考量魚礁堆疊對流場之影響，在模擬算例中將含括兩座魚礁堆疊、四座魚礁縱向堆疊與四座魚礁橫向堆疊等三個算例，圖 6-6(a)-(c)為上述算例之流場模擬結果，由圖 6-6(a)之兩個魚礁堆疊流場的速度分佈圖中可明顯發現，當魚礁高度增加為 $2L$ 時，增加魚礁高度將可提升礁體後方緩流區之面積，但事實上，圖 6-6(a)若與圖 6-2(a)相比，圖 6-6(a)低速緩流區之流場範圍卻與圖 6-2(a)平行排列

雙魚礁後方之緩流區範圍相近，由此一比較結果得知，利用魚礁堆疊模式來增加緩流區之影響範圍並無特別顯著的效果。此外，由圖 6-6(b) 所顯示的流場計算結果可發現，當四座魚礁縱向排列堆疊置放時，雖然其在下游方向之影響距離可能比 6-6(a) 的算例遠，但若比較鄰近礁體後方的流場結構，上述兩者並無太大之差異，而對礁體在垂向影響範圍之拓展更無明顯的助益，另由圖 6-6(c) 所得的模擬結果得知，當四座魚礁橫向排列堆疊置放時，觀察其側向魚礁後方的流場結構將可發現，圖 6-6(c) 亦與圖 6-6(a) 近似，但其緩流區在垂直方向的影響範圍將會增加，由圖 6-6(c) 可觀察到魚礁橫向排列時，由於此一排列方式將會造成礁體的迎流面積增加，因此流體在受阻擋後，將會往與流向垂直的方向竄升並提昇了緩流區的影響高度。

綜整圖 6-6(a)-(c) 的流場計算模擬結果發現，使用垂直堆疊之排列模式雖仍可增加下游流場緩流區的影響範圍，但其在擴展緩流區的整體效益上並無特別突出之處，尤其在進行垂直堆疊的過程中，工程師往往尚需額外考量諸如：(1) 上層魚礁的固定，(2) 海流的強度是否會造成魚礁傾覆，(3) 下層魚礁之結構體強化，以及(4) 礁體過重深陷海床等問題，因此應用垂直堆疊的佈礁模式將可能會在無形中增加了佈礁成本並增加佈放的困難度。

綜合圖 6-2 到圖 6-6 之模擬結果，由魚礁佈放排列模式對流場影響的分析可獲致以下結論：魚礁緊密排列方式可增加迎流面阻擋區域，擴增下游緩流區之影響範圍，對緩流區之拓展亦是本研究所期待的最佳策略；礁體應適度地調整其間距，並配合海流流向儘可能採縱向排列方式，將可降低佈礁成本，並可獲得最高的佈礁效益以凸顯聚魚成效。如果魚礁單獨零星放置，因流場影響範圍有限，魚類的聚集和無脊椎動物的附著效果較差，應在魚礁間留存若干距離，不要緊密相鄰排列，佈放的面積愈廣其聚魚效果亦愈好；垂直方向的疊放以二至三層為佳，再增高時其效果即不如將魚礁往水平方向的擴展為宜。

表 6-1 雙體魚礁橫向排列間距變化(\bar{L})與礁體後方等速線(\bar{V})涵蓋之面積值(\bar{A})對應表

魚礁數		\bar{A}	$\bar{V}_{<0.9}$	$\bar{V}_{<0.8}$	$\bar{V}_{<0.7}$	$\bar{V}_{<0.6}$	$\bar{V}_{<0.5}$	$\bar{V}_{<0.4}$	$\bar{V}_{<0.3}$	$\bar{V}_{<0.2}$	$\bar{V}_{<0.1}$
		\bar{L}									
單魚礁		N/A	15.8725	8.3175	5.0000	3.2500	2.5425	1.5475	1.2975	0.6875	0.3400
雙魚礁	0	31.6775	19.5350	12.9800	9.3600	7.0025	5.6300	4.4575	2.8325	0.5425	
	0.5	33.7000	21.3425	13.2475	8.8650	4.4225	3.0850	2.0950	1.0850	0.1100	
	1.0	36.0975	20.2100	9.3950	5.5375	4.1800	2.9175	1.9425	0.8975	0.1500	
	2.0	30.9800	14.2875	7.8300	5.5600	3.9925	3.0875	2.2525	1.1175	0.3100	
	3.0	29.0775	14.9825	9.1150	6.1600	4.3525	3.1075	2.3175	1.0725	0.3600	

註： $L = 0.2m$ ， $\bar{L} = (0 \sim 3.0)L$ ； $\bar{V} = V/U_0$ ； $\bar{A} = A/L^2$

表 6-2 雙體魚礁縱向排列間距變化(\bar{L})與礁體後方等速線(\bar{V})涵蓋之面積值(\bar{A})對應表

魚礁數		\bar{A}	$\bar{V}_{<0.9}$	$\bar{V}_{<0.8}$	$\bar{V}_{<0.7}$	$\bar{V}_{<0.6}$	$\bar{V}_{<0.5}$	$\bar{V}_{<0.4}$	$\bar{V}_{<0.3}$	$\bar{V}_{<0.2}$	$\bar{V}_{<0.1}$
		\bar{L}									
單魚礁		N/A	15.8725	8.3175	5.0000	3.2500	2.5425	1.5475	1.2975	0.6875	0.3400
雙魚礁	0	27.1100	10.6975	5.5475	3.8125	2.2300	1.9825	1.4225	0.8825	0.2750	
	1.0	29.9775	13.0775	8.4525	5.9275	4.4425	3.4750	2.7550	1.9900	1.0900	
	2.0	32.8200	15.5050	9.3875	6.8875	5.4400	4.1975	3.5275	2.8375	1.0250	
	3.0	30.4500	15.4550	10.4950	8.2250	6.5725	5.6300	4.4300	3.1325	1.0475	
	4.0	34.3850	18.8150	12.8550	9.6025	7.6425	6.2400	5.0625	3.0500	0.8075	

註： $L = 0.2m$ ， $\bar{L} = (0 \sim 4.0)L$ ； $\bar{V} = V/U_0$ ； $\bar{A} = A/L^2$

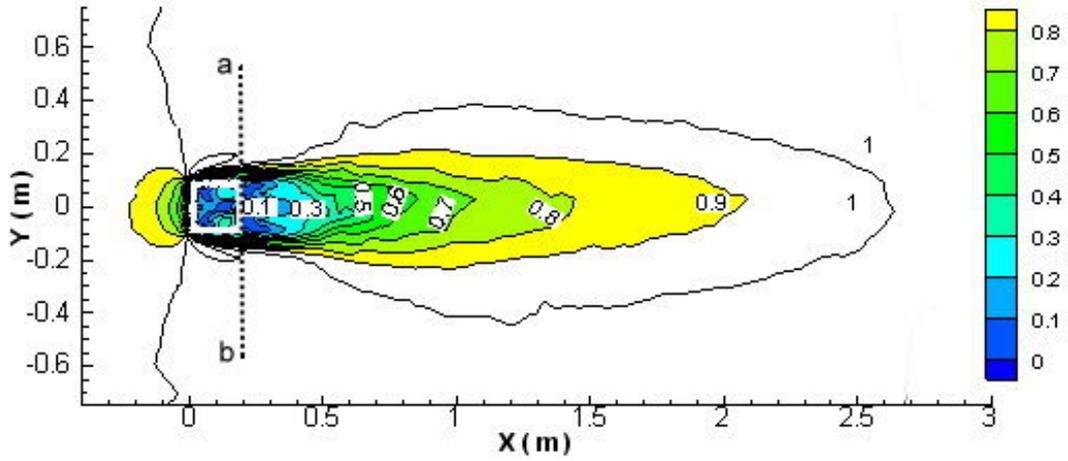
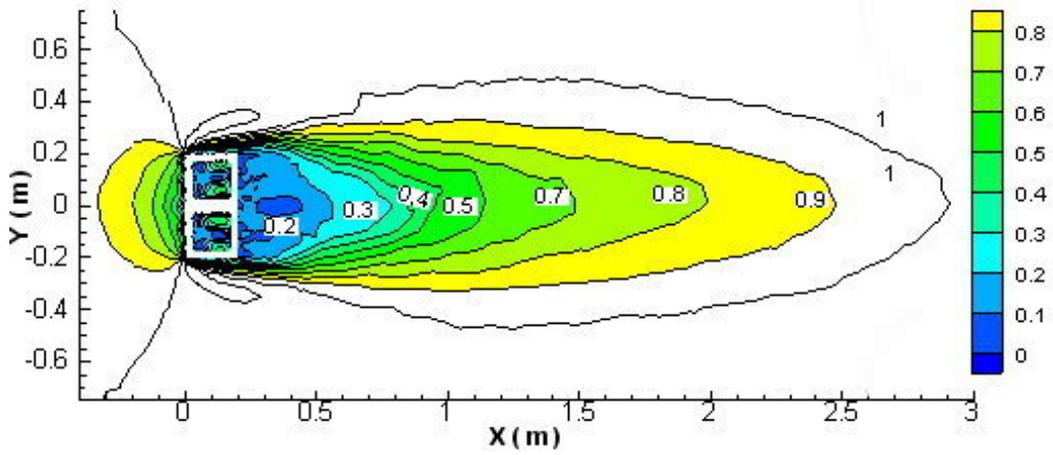


圖 6-1 單體魚礁無因次化速度場

(a) $\bar{L}=0.0L$



(b) $\bar{L}=0.5L$

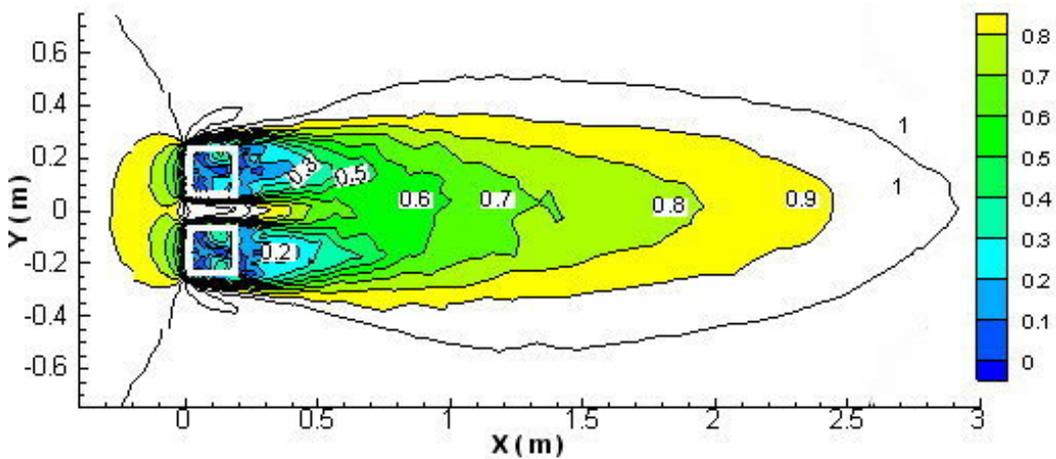
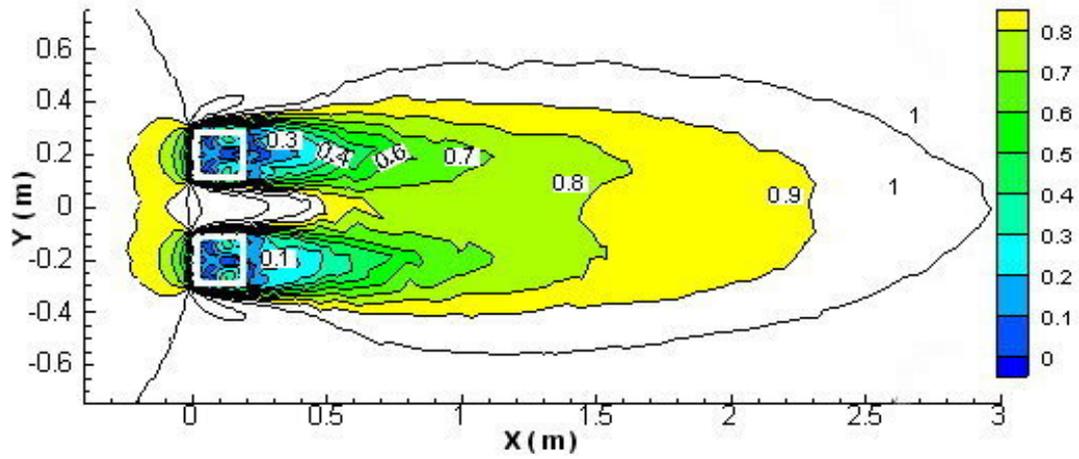
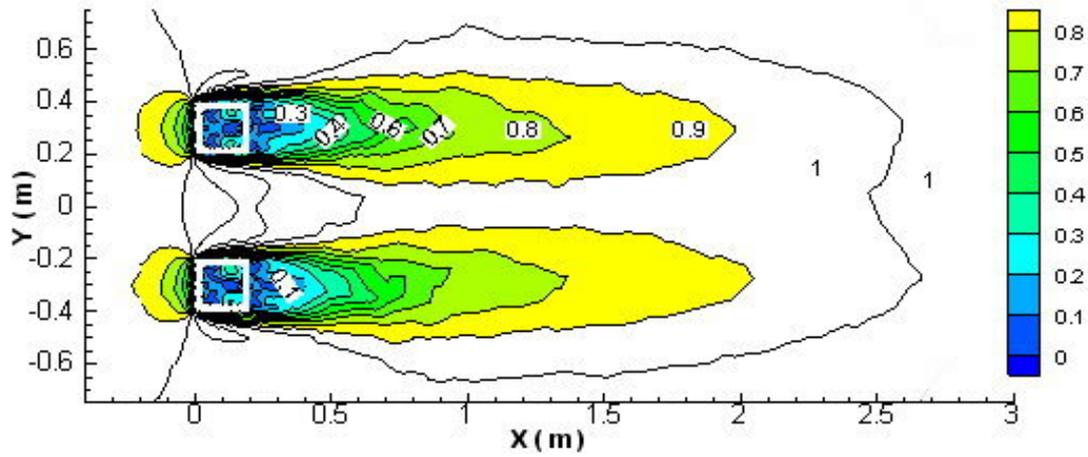


圖 6-2(a)-(e) 雙體魚礁橫向排列間距變化之無因次化速度場

(c) $\bar{L}=1.0L$



(d) $\bar{L}=2.0L$



(e) $\bar{L}=3.0L$

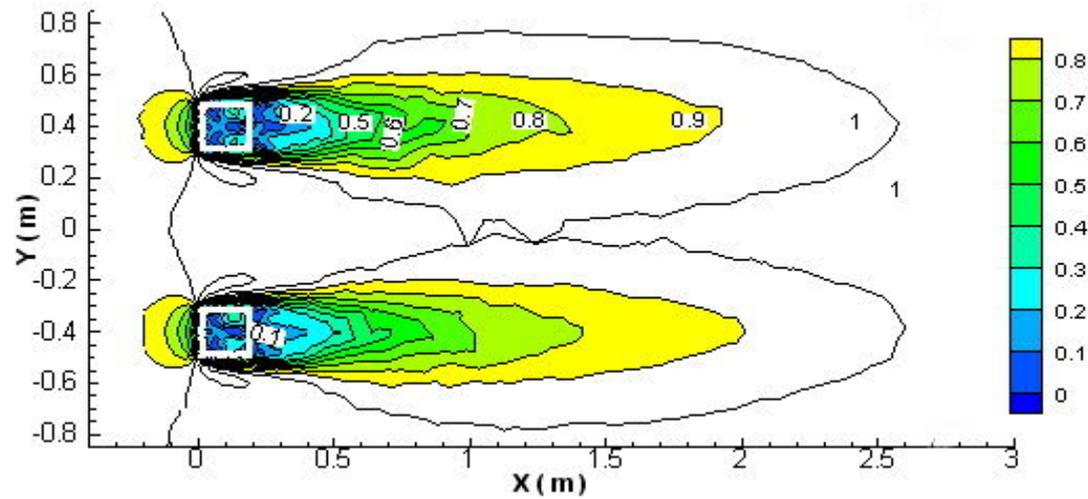


圖 6-2(a)-(e) 雙體魚礁橫向排列間距變化之無因次化速度場(續)

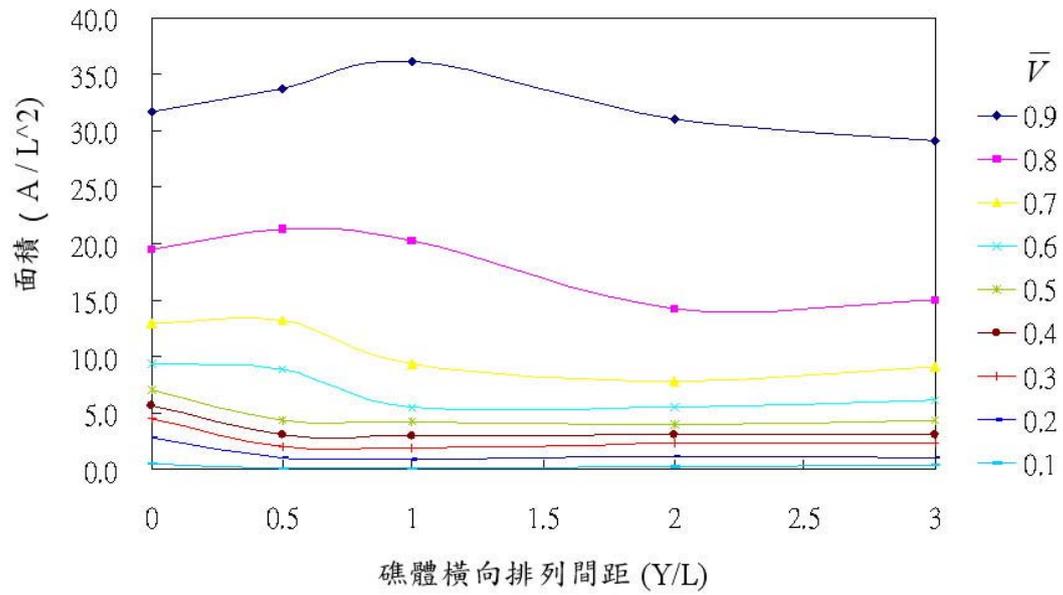


圖 6-3 雙體魚礁橫向排列間距變化對礁體後方等速線涵蓋面積值之影響

(a) $\bar{V}=0.0L$

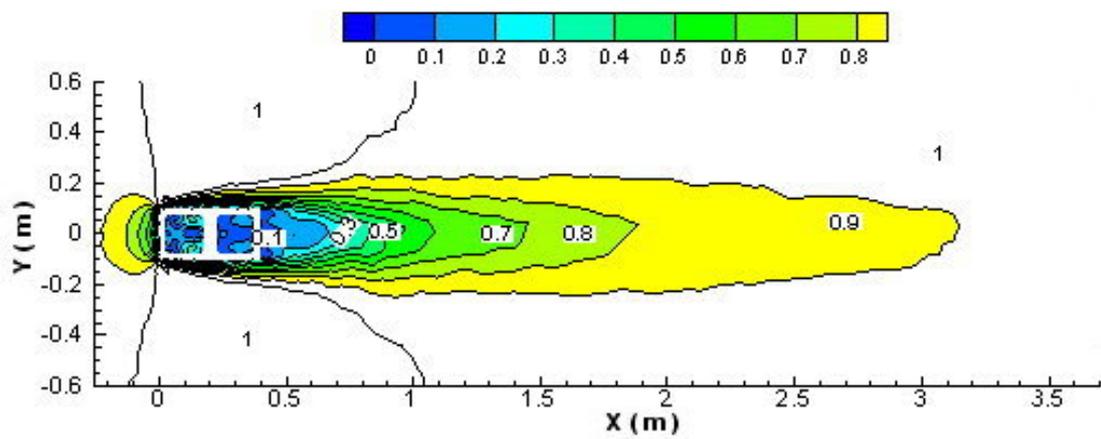
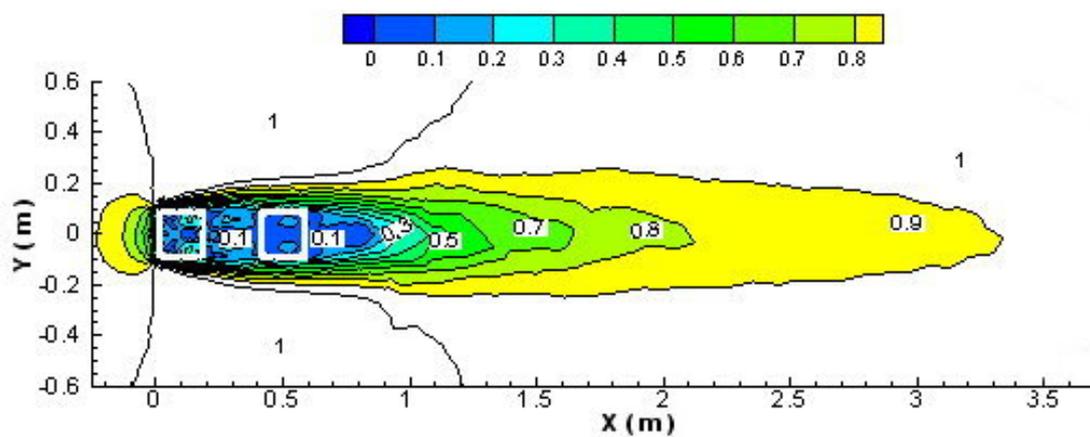
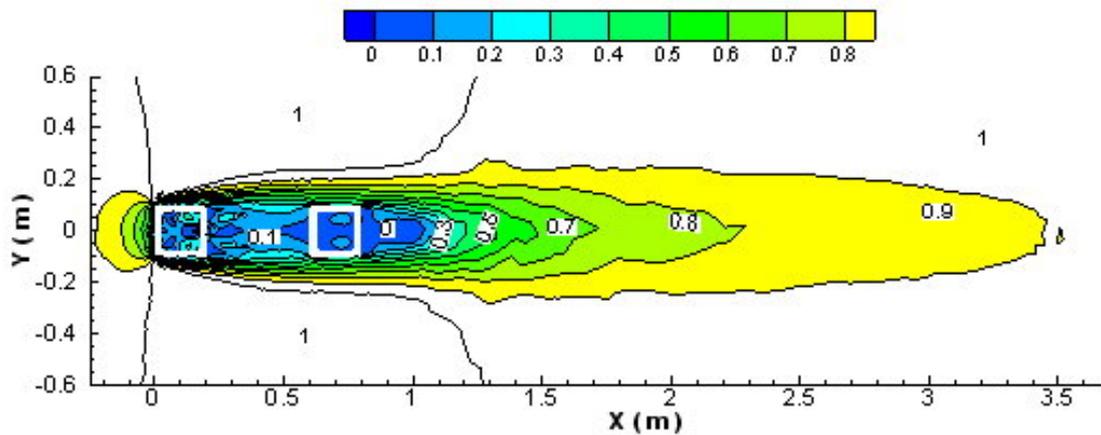


圖 6-4(a)-(e) 雙體魚礁縱向排列間距變化之無因次化速度場

(b) $\bar{L}=1.0L$



(c) $\bar{L}=2.0L$



(d) $\bar{L}=3.0L$

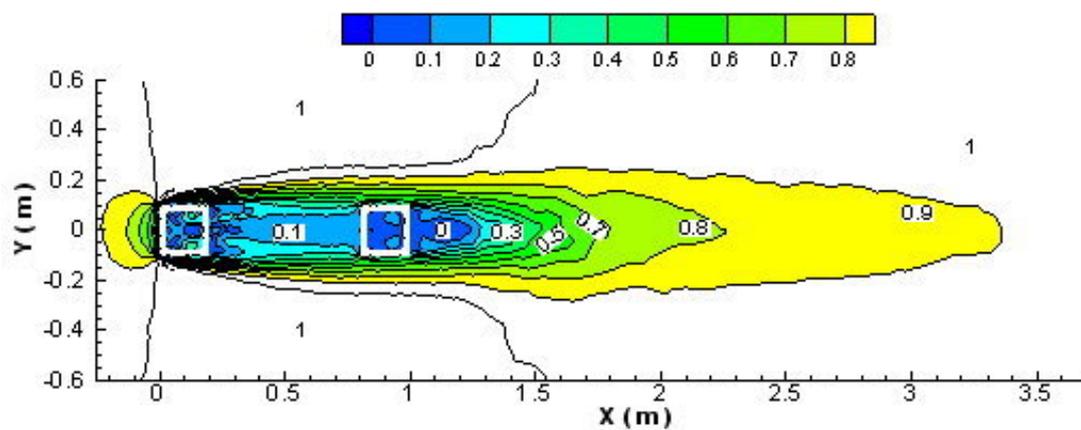


圖 6-4(a)-(e) 雙體魚礁縱向排列間距變化之無因次化速度場(續)

(e) $\bar{L}=4.0L$

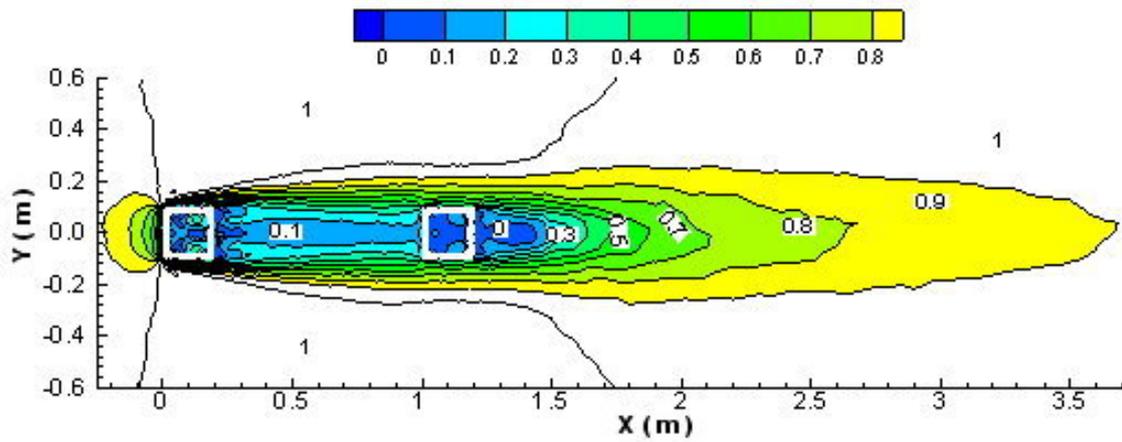


圖 6-4(a)-(e) 雙體魚礁縱向排列間距變化之無因次化速度場(續)

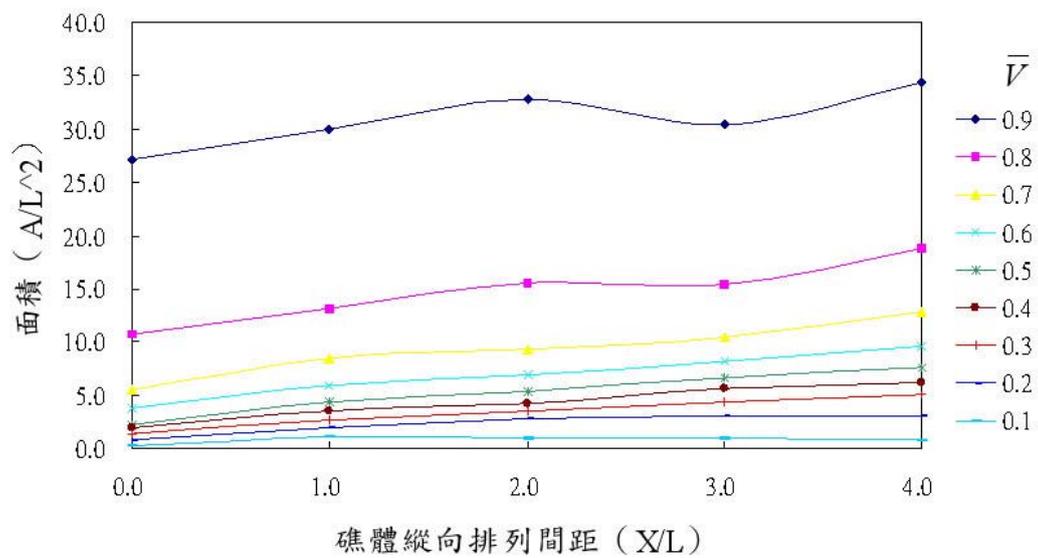
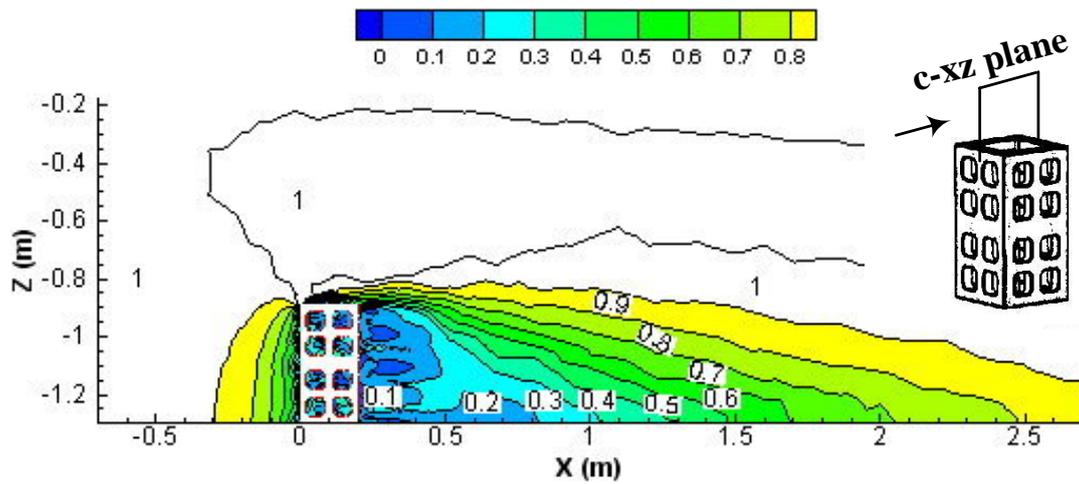
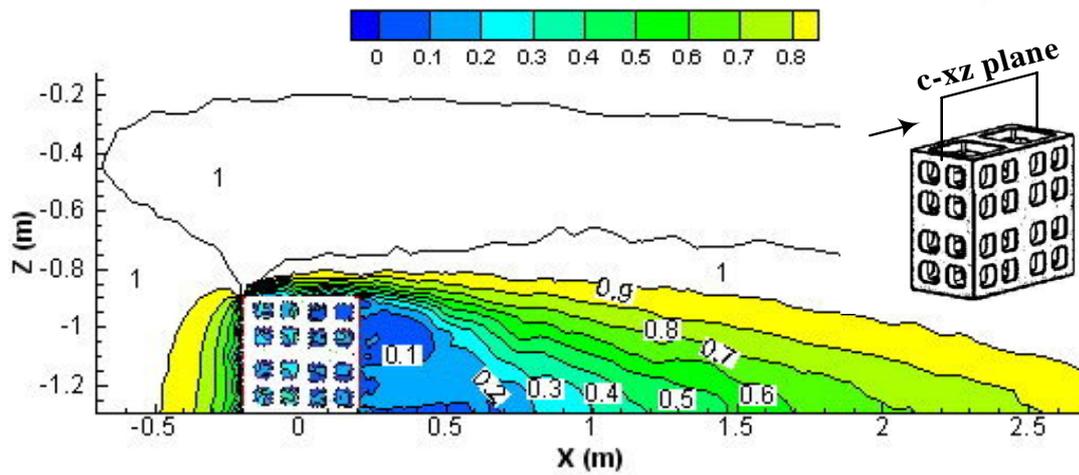


圖 6-5 雙體魚礁縱向排列間距變化對礁體後方等速線涵蓋面積值之影響

(a) 2 個單體魚礁堆疊



(b) 4 個魚礁縱向堆疊



(c) 4 個魚礁橫向堆疊

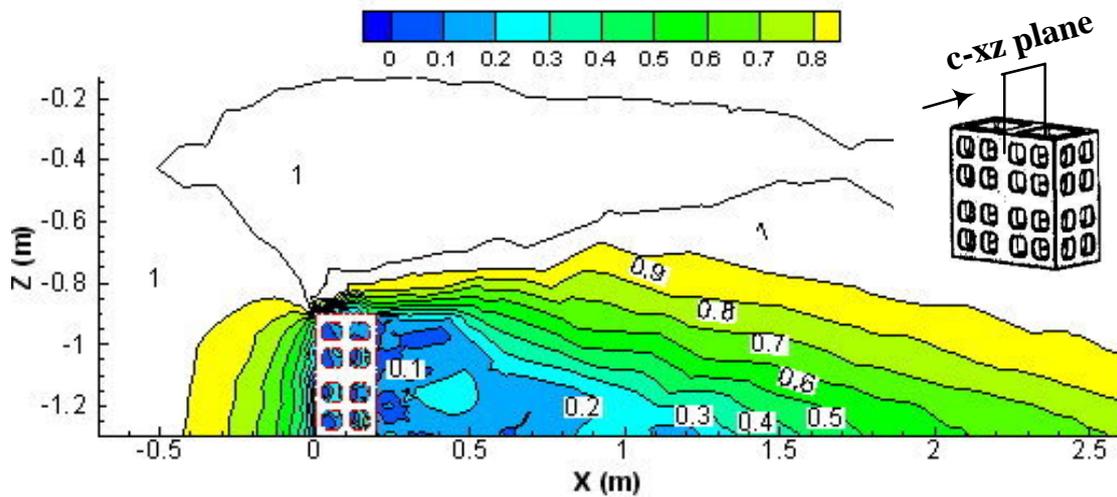


圖 6-6(a)-(c) 垂直堆疊魚礁之無因次化速度場

第七章 結論

本研究以數值模擬法，分別模擬不同海床地形以及礁體幾何排列變化對人工魚礁流場之影響，並運用可視化數值流場之計算分析，充分掌握魚礁內、外可能形成之複雜渦動流場，研究結果亦可進一步應用於魚礁聚魚成效之探討。本研究獲致之結論歸納如下：

- 一、現行雙層式水泥底魚礁主體在其中央部存有檔板結構，礁體之中央橫切面因位於魚礁橫向之對稱軸線上，魚礁四周上下、前後、左右之開孔將趨使由開孔流入與流出之流體在此一截面匯集，促使此一截面之流體運動呈現迴流、渦動等較為多樣性之複雜流場，此一結果證實若能得知影響聚魚因子之流場特性，則藉由魚礁構件之開孔數量、孔徑大小與開孔位置等之特殊設計，則可在魚礁內部產生最佳之聚魚效果，進而提升人工魚礁之效益。
- 二、在流體運動流向固定之狀況下，礁體內部之流動模式受魚礁構型之影響極大。魚礁內部流場之流速分佈雖因礁體置於隆起海床地形之相異位置而有速度大小之差異，但大致上，在地形傾斜角 β 不大之條件下（ $\beta < 15^\circ$ ），礁體內部之流動模式均極為相似。魚礁當置於較大傾斜角（ $\beta > 15^\circ$ ）之隆起地形時，礁體內部靠近開孔附近之位置通常會有較大之速度分佈。
- 三、魚礁投置於隆起海床地形頂部時，由於受到魚礁中間檔板之影響其在橫剖面之礁體內部流速分佈並不會受到傾斜角之改變而有明顯之變化，但在縱剖面上礁體內部在靠近魚礁開孔位置附近之流速分佈將有隨著傾斜角之變大而有增大之趨勢，此一成因與流體流經迎流面後造成流體運動加速直接密切相關。若渦動效應為影響聚魚成因之重要因素，則魚礁置於隆起之海床地形頂部較能獲得較佳之聚魚功能。

- 四、深處凹陷海床地形底部之魚礁，由上游端流入的平行水流大部份將由魚礁上方通過，因此當傾斜角 β 變大時，魚礁外圍周遭之流速將愈趨緩慢，並間接影響魚礁內部之流體運動。在 $\beta \geq 30^\circ$ 時，凹陷海床地形底部區域之流體已有如一灘死水，流動幾乎靜止，魚礁內部之流體運動亦已不明顯，故此類地形可能不適合佈建魚礁。
- 五、由於凹陷海床地形底部之流體相對於隆起海床地形頂部之流體其流速甚慢，故凹陷海床地形底部流場之速度最大值將遠小於隆起海床地形頂部流場之速度最大值。當傾斜角 β 變大時，沿著隆起地形上升之水流其速度將逐漸變大，在魚礁外圍周遭之流場亦隨之有較大之速度場分佈。且因礁體構型並非流線型物體，在頂部之礁體頂角四周將有分離流產生，故其周遭之渦動效應也將愈趨明顯。換言之，隆起地形較能在礁體內外創造出多元且複雜的流場，而凹陷之海床地形則無法在礁體周遭創造出上述之環境。
- 六、魚礁排列得當、間距適宜，可有效增加礁體後方緩流區之面積。魚礁橫向排列間距為 0.5 個至 1 個魚礁邊長時，在礁體後方下游端之流速減緩區所涵蓋的面積範圍為最大。雙魚礁縱向排列時，兩魚礁間之低速緩流區，則會隨魚礁間距之增加而逐漸擴大其影響範圍，而縱向擺設間距以不超過 10 個魚礁邊長為宜。分析魚礁堆疊對流場的模擬結果發現，利用魚礁堆疊模式來增加緩流區之影響範圍並無特別顯著的效果，垂直方向的疊放以二至三層為妥，再增高時其效果即不如將魚礁往水平方向的擴展為佳。配合海流流向儘可能採縱向排列方式，將可降低佈礁成本，並可獲得最佳的佈礁效益，以凸顯聚魚成效。
- 七、由本研究數值模擬之結果得知，只要能掌握影響魚礁聚魚成效之流場變化物理量，藉由可視化數值流場之計算分析，即能模擬魚

礁在不同海床地形與不同幾何排列下之流場。確認流場數值模擬技術將可成為人工魚礁最適化設計及其後續投置規劃作業之最佳輔助工具。

參考文獻

一、英文

- Baine, M. (2001). Artificial reef: a review of their design, application, management and performance. *Ocean & Coastal Manag.*, 44: 241-259.
- Baynes, T. W. and A. M. Szmant (1989). Effect of current on the sessile benthic community structure of an artificial reef. *Bull. Mar. Sci.*, 44(22): 545-566.
- Bohnsack, J. A., D. L. Johnson and R. F. Ambrose (1991). Ecology of artificial reef habitats and fishes. In *Artificial Habitats for Marine and Freshwater Fisheries*, (Jr. W. Seaman and L.M. Sprague, eds.). Academic Press Inc., New York, 61–107.
- Bohnsack, J. A., D. E. Harper., D. B. McClellan and M. Hulsbeck (1994). Effects of reef size on colonization and assemblage structure of fishes at artificial reefs off southeastern Florida. USA. *Bull. Mar. Sci.*, 55: 796-823.
- Chang, G. K. and S. K. Ho (2006). Artificial Reef Designs in Korea. The international forum of the development of Taiwan artificial reef, Biodiversity Research Center, Academia Sinica, Taipei, 61-66.
- Caselle, J. E., M. S. Love., C. Fusaro and D. Schroeder (2002). Trash or habitat Fish assemblages on offshore oilfield seafloor debris in the Santa Barbara Channel, California. *ICES J. Mar. Sci.*, 59: 258-265.
- Chang, K. H. (1985). Review of artificial reefs in Taiwan: Emphasizing site selection and effectiveness. *Bull. Mar. Sci.*, 37: 143-150.

- Chen, H. C., V. C. Patel and S. Ju (1990). Solutions of Reynolds Averaged Navier-Stokes equations for three-dimensional incompressible flows. *Journal of Computational Physics*, 88(2): 305-336.
- Fast, D.E. and F.A. Pagan (1974). Comparative observations of an artificial tire reef and natural patch reefs off southwestern Puerto Rico. *Arti. Reef Conf.*, Edited by L. Colunga and R. Stone, 49-50.
- Fluent 6.2 (2005). User's Guide. Fluent Inc., Canonsburg, PA.
- Foster, K. L., R. K. Kropp., F. W. Steimle., W. C. Muir and B. E. Conlin (1995). Fish community and feeding habitats at a pre-fabricated concrete artificial reef in Delaware Bay, U.S.A., In *Proceedings of ECOSET in Japan*. 266-271.
- Friedlander, A., J. Beets and W. Tobias (1994). Effects of fish aggregating device design and location on fishing success in the U.S. Virgin Islands. *Bull. Mar. Sci.*, 55: 645-650.
- Grove, R. S., C. J. Sonu and M. Nakamura (1991). Design and engineering of manufactured habitats for fisheries enhancement. In *Artificial Habitats for Marine and Freshwater Fisheries*, (W. Seaman Jr, and L. M. Sprague. ed.). Academic Press, San Diego, CA. 285, 109-152.
- Haro, A., T. Castro-Santos., J. Noreika and M. Odeh (2004). Swimming performance of upstream migrant fishes in open-channel flow: a new approach to predicting passage through velocity barriers. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 61(9): 1590-1601.

- Holman, J. P. (2001). *Experimental Methods for Engineers*. McGraw-Hill Book Company, New York, 99-106.
- Jan, R. Q., Y. H. Liu., C. Y. Chen., M. C. Wan., G. S. Song., H. C. Lin and K. T. Shao (2003). Effects of pile size of artificial reefs on the standing stocks of fishes. *Fisheries Research*, 63: 327-337.
- Jensen, A. (1998). European Artificial Reef Research Network (EARRN): final report and recommendation. The University of Southampton, U. K.
- Jensen, A. (2002). Artificial Reefs of Europe: perspective and future. *ICES Journal of Marine Science*, 59: 3-13.
- Kitagawa A., K. Hishida and Y. Kodama (2005). Flow structure of microbubble-laden turbulent channel flow measured by PIV combined with the shadow image technique. *Experiments in Fluids*, 38: 466–475.
- La Fontaine, R. F. and I. C. Shepherd (1996). Particle Image Velocimetry Applied to a Stirred Vessel. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 12(22): 256-264.
- Lan, C. H., C. C. Chen and C.Y. Hsui (2004). An approach to design spatial configuration of artificial reef ecosystem. *Ecological Engineering*, 22: 217-226.
- Liu, T. L., S. Y. Liou., D. T. Su and D. W. Chen (2006). Numerical flow simulation for the deployment analysis of artificial reefs. In *Proceedings of the 16th International Offshore and Polar Engineering Conference*. ISOPE, U. S. A. San Francisco, 533-538.

- Lim, H. C. and S. J. Lee (2003). PIV measurements of near wake behind a U-grooved cylinder. *Journal of Fluids and Structures*, 18: 119-130.
- Lindberg, W. J. (1997). Can science resolve the attraction-production issue? *Fisheries*, 22: 10-13.
- Meek, A. (1961). The migrations of fish. Arnold, London, UK, 472 pp.
- Montgomery, J. C., C. F. Baker and A. G. Carter (1997). The lateral line can mediate rheotaxis in fish. *Nature*, 389: 960-963.
- Mottet, M. G. (1985). Enhancement of the marine environment for fisheries and aquaculture in Japan. In *Artificial Reefs, Marine and Freshwater Applications* (F. M. D'Itri., ed.). Lewis Publishing, Chelsea, MI, USA, 13–112.
- Nakamura, M. (1982). The planning and design of artificial reefs and Tsukiiso. In *Japanese artificial reef technol* (S.F. Vik, ed.). Aquabio, Inc., 2957 Sunset Blvd., Bellair Bluffs, 49-66.
- Nakamura, M. (1985). Evolution of artificial fishing reef concepts in Japan. *Bulletin of Marine Science*, 37:271-278.
- Nikonorov, I. V. (1975). Interaction of fishing gear with aggregation. Israeli program for scientific translation, Jerusalem, 216 pp.
- Osenberg, C. W., C. M. St. Mary., J. A. Wilson and W. J. Lindberg (2002). A quantitative framework to evaluate the attraction production controversy. *ICES J. Mar. Sci*, 59: 214-221.
- Rountree, R. A. (1989). Association of fishes with fish aggregation devices: effect of structure size on fish abundance. *Bull. Marine Science*, 44: 960-972.

- Sayer, M. D. J. and T. A. Wilding (2002). Planning,licensing,and stakeholder consultation in an artificial reef development: the Loch Linnhe reef, a case study. *ICES Journal of Marine Science*, 59:178-185.
- Seaman, W. Jr. (2000). Artificial Reef Evaluation: with application to natural marine habitats. CRC Press, Boca Raton, London, New York, Washington, D. C., 246 pp.
- Sherman, R. L., D. S. Gilliam and R. E. Spieler (2002). Artificial Reef Design: Void Space, Complexity, and Attractants. *ICES Journal of Marine Science*, 59: 196-200.
- Sheehy, D. and H. Mathews (2006). Reef Program Development: Lessons Learned for Improving the Process. The international forum of the development of Taiwan artificial reef, Biodiversity Research Center, Academia Sinica, Taipei, 1-7.
- Spanier, E. (2000). Artificial reefs off the Mediterranean coast of Israel. (A. C Jensen et al., ed.). Artificial reefs in *European seas*, Kluwer Academic Publishers, Britain, 1-19.
- Su, D. T., T. L. Liu and C. H. Ou (2007). A Comparison of the PIV Measurements and Numerical Predictions of the Flow Field Patterns within an Artificial Reef. *In Proceedings of the 17th International Offshore and Polar Engineering Conference. ISOPE*, Portugal, Lisbon, 2239-2245.
- Su, D. T., T. L. Liu and C. H. Ou (2008). Numerical investigation into effects of seabed topography on flows in and around artificial reefs. *Fisheries Science*, 74: 236-254.

- Suenaga Y., T. Hoshine., K. Yasuoka., H. Ohtsuka., R. Muguruma., A. Suenaga and K. Kimigawa (2006). System for the Creation of Fishery Grounds Using Artificial Reefs. The international forum of the development of Taiwan artificial reef, Biodiversity Research Center, Academia Sinica, Taipei, 54-60.
- Suenaga, Y., T. Sasaki and T. Hamagaki (2001). Development of Hybrid Artificial Reef Which Have The Function for Control of Current Velocity and Spawning. *Technical Bulletin of Faculty*, 53: 79-85.
- Tannehill, J. C., D. A. Anderson and R. H. Pletcher (1997). Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer. Taylor & Francis Publishers, 2nd Edition, Levittown, PA USA.
- Terashima, H. (2006). Artificial Reef Projects: Case Studies in Japan and Senegal. The international forum of the Development of Taiwan artificial reef, Biodiversity Research Center, Academia Sinica, Taipei, 85-90.
- Turner, C.H. (1970). Artificial Reefs. Ency. Mar. Resour. Ed. By Frank E. Firth, New York, Van Nostrand Rein Hold Conpany, 140 pp.
- Wilding, T. A. and M. D. J. Sayer (2002). Evaluating Artificial Reef Performance: Approaches to Pre- and Post-Deployment Research. *ICES Journal of Marine Science*, 59: 222-230.

二、中文

- 王敏昌·劉毓興·陳靜怡·詹榮桂(2004). 台灣人工魚礁區的效益評估。台灣周邊海域人工魚礁區整體規劃研討會論文集，中央研究院生物多樣性研究中心，台北，77-94。
- 李厚慶(2000). 波一流作用下結構物附近流場特性之試驗研究。國立臺灣海洋大學河海工程研究所碩士論文，103 頁。
- 李湘君(2005). 船型對塗裝減阻影響及效能評估。國防大學中正理工學院造船工程研究所碩士論文，82 頁。
- 林呈·顏光輝·陳謹偉·黃文彥(1998). 人工魚礁周邊之流場特性與沖刷機制之實驗研究。第二十屆海洋工程研討會論文集，基隆，305-312。
- 邵廣昭(1989a). 北部海域設置人工魚礁之規劃研究。中央研究院動物研究所專刊，第 12 號，121 頁。
- 邵廣昭(1989b). 台灣海域設置人工魚礁之規劃研究。中央研究院動物研究所專刊，第 13 號，117 頁。
- 邵廣昭(1989c). 「人工魚礁」-積極復育近沿海漁業資源。中國水產，483：14-32。
- 邵廣昭(2004). 台灣人工魚礁的理論與功能。台灣周邊海域人工魚礁區整體規劃研討會論文集，中央研究院生物多樣性研究中心，台北，1-31。
- 邵廣昭(2006). 台灣人工魚礁發展的未來挑戰。台灣人工魚礁未來發展國際論壇，中央研究院生物多樣性研究中心，台北，139-144。
- 黃朝禧(2005). 水產養殖工程學。中國農業出版社，北京，345-349。

- 張崑雄(1976). 人工魚礁。中央研究院動物研究所專刊，第 1 號，69 頁。
- 張崑雄(1977). 人工魚礁(續)。中央研究院動物研究所專刊，第 2 號，49 頁。
- 張崑雄(1979). 人工魚礁(第三號)。中央研究院動物研究所專刊，第 7 號，74 頁。
- 詹榮桂·王敏昌·劉毓興·陳靜怡·宋大崑·何政擇·邵奕達(2003). 台灣周邊海域人工魚礁區整體規劃。行政院農業委員會漁業署，台北，186 頁。
- 詹榮桂·王敏昌(2004a). 台灣周邊海域人工魚礁區的規劃構想。台灣周邊海域人工魚礁區整體規劃研討會論文集，中央研究院生物多樣性研究中心，台北，95-114。
- 詹榮貴·王敏昌(2004b). 台灣人工魚礁的效益評估。台灣周邊海域人工魚礁區整體規劃研討會論文集，中央研究院生物多樣性研究中心，台北，77-94。
- 詹榮桂·劉毓興·陳靜怡·邵廣昭(2006). 台灣人工魚礁區魚類的現生量。台灣人工魚礁未來發展國際論壇，中央研究院生物多樣性研究中心，台北，115-112。
- 劉宗龍·劉思遠·蔡宗志·蘇東濤(2005). 人工魚礁可視化數值流場之研究。第 27 屆海洋工程研討會論文集，國立中興大學，台中，169-175。
- 蔡宗志(2006). 固定支架對潛體流場實驗影響之數值模擬研究。國防大學中正理工學院造船研究所碩士論文，69 頁。
- 賴明賢(2000). 臺灣西南海域人工魚礁礁體工程行為分析。國立中山大學海洋環境及工程研究所碩士論文，142 頁。

謝寬永・劉仁銘・陳俊德・蘇東濤(2007). 人工魚礁漁場形成機制及投放效益之評估研究。行政院農業委員會，台北，171 頁。

嚴建國(2006). 以潛水調查與遙控攝影觀察萬安軍艦魚礁區魚類相之調查研究。國立台灣海洋大學環境生物與漁業科學學系碩士論文，88 頁。

三、日文

小川良徳 (1965). 垣網に對する魚の行動感覺。かながわていち，32：11~14。

小川良徳(1966). 人工魚礁に對する魚群行動の實驗的研究(I-VI)。東海水研報，45：107-163。

小川良徳(1967). 人工魚礁に對する魚群行動の實驗的研究(VII)。日本水產學會誌，33(9)：801-811。

小川良徳(1968a). 人工魚礁に對する魚群行動の實驗的研究(VIII)。日本水產學會誌，34(3)：169-176。

小川良徳(1968b). 人工魚礁と魚付き。水產増殖臨時號，7：3-21。

小川良徳(1973). 人工魚礁に關する生物學的諸問題。Ocean Age, 5(3)：21-30.

大阪英雄・山田英已・平野孝典・嵐 義文・大川徳義・山田定彦 (1978). 風洞實驗によるグレートソフ型人工魚礁の周りの流況解析。水產土木，15(1)：19-26。

大島泰雄(1964). 人工魚礁。水產増養殖叢書 8，日本水產資源保護協會，56 頁。

大島泰雄(1969). つくる漁業，資源協會編著，農林統計協會出版，544 頁。

- 大島泰雄(1976). 人工魚礁の理論と實際(1)- 基礎篇。水産増養殖叢書 26, 魚礁総合研究会, 日本水産資源保護協会, 119 頁。
- 井上喜洋(1981). 端口における魚探調査。かながわていち, 55:8-10。
- 井上 實(1978). 魚の行動と漁法。恒星社厚生閣, 東京, 221 頁。
- 井上 實(1985). 漁具と魚の行動。恒星社厚生閣, 東京, 198 頁。
- 加納 敬・雄野倫行・阿部豊太郎(1988a). 人工魚礁の水理學に関する研究(I)。水産土木, 24(2): 11-16。
- 加納 敬・栗原安男・次木康夫(1988b). 人工魚礁の水理學に関する研究(II)。水産土木, 24(2): 17-24。
- 田中敬健(1988). 福田沖人工礁魚礁の漁獲効果。水産土木, 25(1): 13-19。
- 竹内正一 (1968). 兩落網における漁獲と潮流との關係。東水大研報, 54(2): 123-127。
- 佐藤 修 (1976). 魚の集魚理由(假説の提起)。人工魚礁の理論と實際(I) - 基礎篇, 魚礁総合研究会, 日本水産資源保護協会, 37-39。
- 佐藤 修 (1984). 人工魚礁。恒星社厚生閣, 東京, 130 頁。
- 佐久田 博司・佐久田 昌昭・渡邊 浩一郎・大西寛 (1981). 人工沈設魚礁模型の流体力學的特性に関する基礎的研究。水産土木, 18(1): 7-19。
- 岡本峰雄(1983). ポークブル計量式魚探(SIMRAD EY-M)による魚礁航走調査法について。水産海洋研究會報, 43: 98-103。
- 岡本峰雄(1984). 人工魚礁における魚群分布型態の計測手法に関する研究。北海道大學博士學位論文, 208 頁。
- 肥後伸夫(1974). 潜水觀察による人工魚礁の實態について(I)。鹿

- 鹿兒島大學水產學部紀要，23：19-28。
- 肥後伸夫・長島美知男 (1978). 潜水觀察による人工魚礁の實態について(II)。鹿兒島大學水產學部紀要，27(1)：117-130。
- 肥後伸夫・吐師 弘・田佃靜夫・水上樽豐己(1979). 潜水觀察による人工魚礁の實態について(III)。鹿兒島大學水產學部紀要，28：91-105。
- 柿元 皓(1967). 大型魚礁効果認定調査報告書，新潟水試，43～47。
- 柿元 皓・大久保 久直・板野 莫彬・新井 健次(1983). 魚礁における動物プランクトンの分布様式について。水産土木，19(2)：21-28。
- 後藤豪(1953). 日向水産雑話(3)，水産研究誌，30(3): 21-31。
- 宮本秀明(1956). 落網にはいる魚の行動について。ていち，10：106-114。
- 桑谷幸正(1962). スズキを對象とする魚礁之總合の研究。京都府水産試験場業績，8：1-129。
- 堺 告之(1973). 魚礁での魚類の蝟集構造。棲息場所について。水試報告(13)：31-33。
- 黒木敏郎・佐藤 修・尾崎 晃(1964). 魚礁構造の物理學的研究。北海道水産部研究報告(1)：1-19。
- 黒木敏郎(1958). 魚類生態に関する水中音の基礎的研究，2 報。鹿大水紀要，6: 89～94。
- 森勇・桑野雪延(1971). 人工魚礁周辺におけるチダイについて。日水誌，37: 687-690。
- 影山芳郎・大坂英雄・山田英己(1980). 水槽実験による多立方体魚礁モデル周りの可視化。水産土木，17(1)：1-10。

影山芳郎・大坂英雄・山田英己(1982). 平面上に置かれた透過壁
立方体周りの流れの可視化。水産土木，18(2)：1-9。

影山芳郎・大坂英雄・山田英己・松井勝範・世山仁 (1983). 人工
魚礁モデル周りの流況。水産土木，19(2)：1-8。