

行政院原子能委員會
委託研究計畫研究報告

水上發電機組浮動平台與其錨泊系統之技術開發
Technology development of a floating platform and its mooring for
the floating photovoltaic system

計畫編號：1032001INER048

受委託機關(構)：台灣大學

計畫主持人：張明輝

聯絡電話：(02)33661618

E-mail address：minghueichang@ntu.edu.tw

核研所聯絡人員：蔡家揚

報告日期： 2014 年 11 月 28 日

目 錄

目 錄.....	I
中文摘要.....	1
英文摘要.....	2
壹、計畫緣起與目的.....	3
一、傳統發電方式的隱憂。	
二、太陽能發電。	
三、本計畫研究工作。	
貳、研究方法與過程.....	5
一、浮動平台穩定度監測。	
(一) 穩定度監測儀器簡介。	
(二) 儀器設置及回收過程。	
二、使用錨繫設計工具軟體進行穩定度評估。	
(一) 分析工具介紹。	
(二) 數值模式建立。	
參、主要發現與結論.....	24
一、數值模擬結果。	
(一) 靜態穩定分析。	
(二) 動態反映分析。	
二、實際監測結果	
三、結論與建議	
肆、參考文獻.....	33

中文摘要

將太陽能發電裝置設於池塘、湖泊、水庫甚至海洋等水面上具有避免土地使用短缺問題，較佳的發電效率及避免人為破壞的優點。然而要將發電機組置於水面上，需面對浮動平台設計及其錨泊系統等技術性問題。本計畫旨在協助設計合適的浮動平台並且提出適用之錨泊方式來固定浮動平台，執行至今，已協助設計平台，完成的研究工作包括(1)於所區設置之水池太陽能發電平台做平台穩定度監測，(2)使用錨繫設計工具軟體進行數值模擬，評估平台在外在環境影響(風、波浪)下的穩定度，(3)整理業界或學界目前之成功案例。數值模擬顯示，於靜態環境下，目前設計的浮動平台與 PV 系統可穩定浮於水面，在動態環境下，可承受清風(3.3 m/s)、和風(7.9 m/s)及強風(13.8 m/s)環境，及 0.2 m, 1m, 3 m 的波高。其中動靜態環境下的結果與現場監測結果一致，未來將進一步模擬極端環境下的平台穩定度。

Abstract

The advantages of PV system installed on the floating platform in the pond, lake, reservoir, and even ocean are to avoid the issue of land shortage and artificial damage and to improve the efficiency of power generation. Therefore, the issues of the floating platform design and the mooring technology are raised. The goal of this project seeks to assist to design the suitable floating platform and to establish feasible anchorage methods. So far, we have assisted to design the floating platform. We've finished (1) stability monitoring of floating platform/ PV system located at INER, (2) numerical modeling of the platform motion/stability under the specific environmental influence (wind and wave condition) and (3) integration of successful cases in academic field and associated community. The numerical model revealed that the current floating platform and PV was able to float stably in the surface under the static environments. And, under the dynamic environments, the platform can survive in wind conditions: 3.3 m/s, 7.9 m/s and 13.8 m/s and in wave height: 0.2 m, 1 m, and 3 m. The simulation results in static environments coincided with that in field monitoring. We will further simulate the platform stability under the extreme condition.

壹、計畫緣起與目的

一、傳統發電方式的隱憂

能源取得為攸關國家工商發展與民生的議題，然而目前盛行之能源取得方法幾乎無可避免的對我們的生活環境造成衝擊，在帶來經濟發展與生活便利的同時，卻是犧牲掉我們生存的自然環境。例如，國內目前發電方式高達 70% 的電力是藉由燃燒煤、天然氣及輕/重油而來的火力發電，除了這些石化燃料總蘊藏量正日益短缺外，值得憂心的是，燃燒這些燃料所排放的物質(如二氧化碳)正造成溫室效應、氣候變遷及酸雨等環境失衡的災害。核能發電是全世界目前最有效率的發電方式，但在 2011 年日本福島核災後，世界各國皆已重新審視其能源取得策略。

二、太陽能發電

顯然，上述問題的核心解決方法在於如何找到替代能源。在保護環境的大前提下，發展”綠能”是為發展替代能源的主流，所謂綠能是指潔淨的，在其生產過程中，對環境低污染甚或無污染的能源，在強調安全與環保的前提下，包括太陽能、風力能、海洋能(波浪、洋流、溫差等)及地熱能等綠能的發展也逐漸受到重視，其發展也被視為突破目前傷害環境的發電發方式的指標。台灣位處亞熱帶地區，具有光照充足的優勢來發展太陽能，且發電過程不會帶來環境汙染，目前有部分民生及科學運用(如太陽能熱水器)，但主要為傳

統發電方法的輔助角色，且仍未普及化及大量生產，部分原因是太陽能模組成本不低，另外，發電裝置太陽能光電板常需要無遮蔽物的大面積的土地，此關係到發電效率。故將太陽能發電裝置設置於湖泊、河流、水庫甚至海洋等水面上等水表面有助於太陽能發電的進一步推廣，因為(1) 全球有半數以上的人口是居住在距離水岸約數至數十公里距離範圍內，方便供電輸送。(2) 台灣地狹人稠，可用地短缺，此作法可解決大面積用地需求的問題，且需較少的能源基礎建設需求。(3) 水面無遮蔽物且具有設備冷卻效果，有較高的發電功率，法國開發商 Ciel el Terre 公司的經驗顯示，由於水的有效冷卻效果，其發電效率可比裝置於陸地多 10% [1]。(4) 水域提供設備與人的隔離，可避免人為破壞。然而要將發電機組置於水面上，需面對浮動平台及其錨泊系統等技術性問題。

三、本計畫研究工作

本計畫旨在協助設計合適的浮動平台供總計畫參考並且提出適用之錨泊方式來固定浮動平台。本計畫第一年之主要工作在於評估裝置水上太陽能發電機組之浮動平台設計及其錨繫方式，具體完成工作為(1)協助總計畫於所區設置之水池太陽能發電平台做平台穩定度監測，(2)使用錨繫設計工具軟體進行計算，評估平台在外在環境影響(風、波浪)下的穩定度，(3)整理業界或學界目前之成功案例。

貳、研究方法與過程

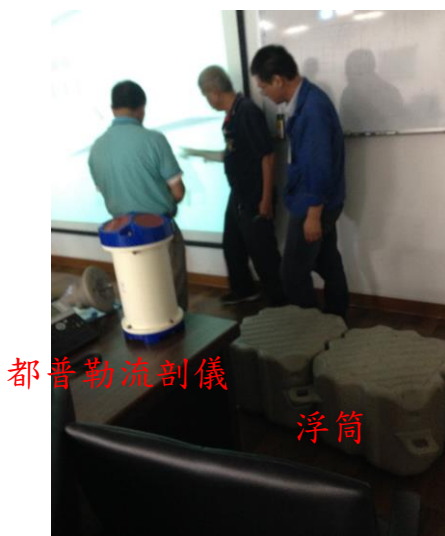
為了評估水上太陽能板平台的設計安全性，本研究採用實際監測與數值模擬並進的方式進行，實測部分，總計畫已經於核研所所區設置水池及測試版本的浮動平台與太陽能板模組，我們亦於平台上加裝平台穩定度監測儀器。在數值模擬部分，我們已經成功模擬出目前的平台+太陽能板幾何/材質設計下，受風力、浪影響的評估。就第一年計畫而言，實測部分是屬測試性質，因為平台尚未實際置放於自然環境(埤、湖泊、水庫或海洋中)，故觀測大致是反映平台在無外力下的穩定程度(也就是平台本身設計性質)，更重要的是，確認儀器是否能達到監測功能。數值模擬部分，我們的模擬包括，靜態穩定度及動態穩定度，靜態穩定度即為前述之未受外在環境影響狀態，動態穩定度部分，則加入了風與波浪的影響，由於計畫的第一年與第二年尚未有將平台置於海洋的規劃，若僅是置放於埤湖的自然環境，流場的影響微乎其微，故本計畫將流場的影響因素留待日後進行。監測及數值模擬的研究方法及過程詳述於下。

一、浮動平台穩定度監測

(一)穩定度監測儀器簡介

都普勒流剖儀(Acoustic Doppler Current Profiler, ADCP)，如圖一所示，主要用於近岸/遠洋海流觀測，可裝置在海洋研究船底部或者

錨碇在海底/次表層來觀測範圍長達 600 公尺的海流(端看發射音頻有不同範圍)，是海洋物理領域常用的觀測儀器，不論設置於船底或者錨碇系統，由於海流或波浪影響，儀器本身會有三維運動，會影響到測流資料品質及海流推算，故其上都裝有紀錄載體(船或錨碇浮球)運動的 sensors，這些參數包括載體的縱搖(pitch)、橫搖(roll)、平擺 (yaw)。



圖一、都普勒流剖儀及浮筒如圖所示。

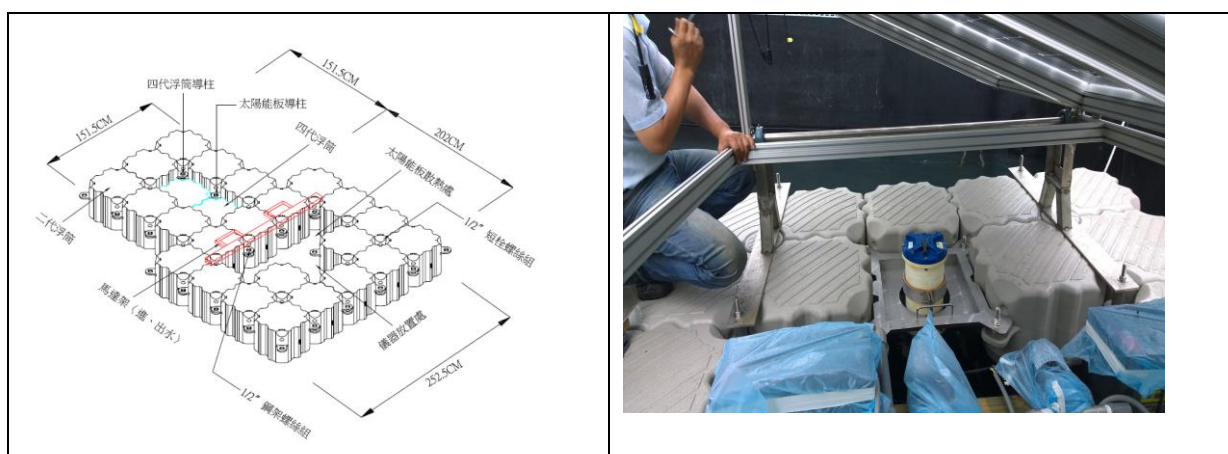
若將都普勒流剖儀裝置於發電平台，這些參數可用以判斷平台之穩定性，此外，未來若平台設置於湖泊或海洋，可用以量測水流強度，作為平台設計進一步參考。平台置於所區，造成平台運動的主因會是天候狀況，除了在 ADCP 內部有溫度計可推測天氣狀況。這些穩定度參數可能提模擬軟體所需，未來亦可與模擬結果相互比對。

(二)儀器設置及回收過程

為支援所區裡的PV浮動系統設置事宜，計畫主持人分別於2014年5月2日及6月11日到核能研究所參與討論並實地探勘(圖一與圖二)。水池設置預定地如圖二所示，約為10公尺x10公尺的區間，發電平台由 $50.5 \times 50.5 \times 50.5 \text{ cm}^3$ 的浮筒所組成(圖一)，討論後定案之平台幾何形狀如圖三左所示。本計畫支援於平台上裝設600kHz都普勒流剖儀(圖一)，在水池及平台完成工後，隨即於10月9日，



圖二、核能研究所水上發電機組浮動平台水池位置探勘



圖三、(左)由浮筒組成之浮動平台設計，(右)測試平台實體及

ADCP 裝置。

我們順利將都普勒流剖儀裝置於平台(圖三右)，位置位於太陽能板下方，於 11 月 19 日，將儀器中資料讀回(圖四)，取得 41 天的平台穩定度監測時間序列，紀錄間隔為 5 分鐘。資料分析將於第參章討論。



圖四、進行儀器回收(左)及資料讀取(右)。

二、使用錨繫設計工具軟體進行穩定度評估

本計畫原欲使用海洋研究社群常用的錨碇設計工具軟體 Mooring Design and Dynamics (MDD) 來進行評估，該軟體以 MATLAB 寫成，但對於平台的幾何形狀設計彈性較低，更改該軟體費時費力。然本計畫已尋獲合適的替代軟體，是為 ANSYS 公司所發展的 AQWA 工具，此軟體發展約已 30 多年，可進行複雜浮動平台幾何圖形的建立並計算平台運動及錨繩受力程度及其三維運動，常應用在船舶、波浪發電機與海事工程結構物之設計，包括單點附帶儲槽，浮式生產儲存卸載系統，半潛式平台，張力腳平台等海上

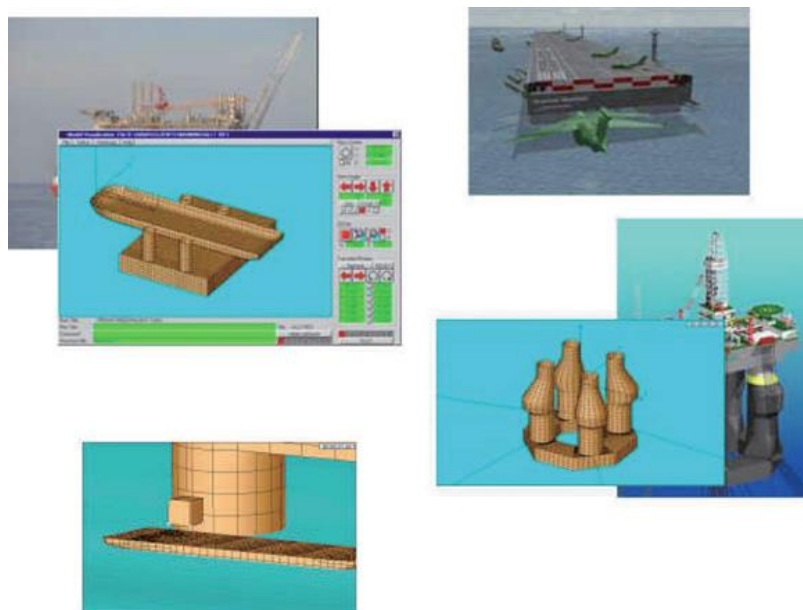
石油天然氣卸油平台，以及船舶，再生能源系統(包括波浪發電機，潮流發電機，海上風力發電機)，防波堤等。可以計算錨繫平台在海中的靜水特性以及受到風、波浪、流作用時平台之動力特性，並可計算多體系統受到入射波作用時繞射及輻射效應的影響。顯然極為適用於本計畫之太陽能水上平台設計評估。應用 AQWA 作為水上能源平台評估過去已有先例，例如美國能源部的國家再生能源實驗室(National Renewable Energy Laboratory)就以 AQWA 模擬海上風力發電系統的浮體平台運動 [3]，並獲得良好結果。AQWA 的介紹及本研究數值模型的建立說明如下：

(一)分析工具介紹

本研究採用的分析軟體 AQWA 為一套發展 30 年用於計算海洋結構物的專業分析軟體，期間經過廣泛的用戶工程驗證，計算精度高，界面簡單，在船舶與海洋工程領域影響廣泛，世界四大船協 DNV（挪威船協），LR（英國勞氏船協），CCS(中國船協)，ABS（美國船協）都採用 AQWA 作為分析和驗證的標準程序。

AQWA 可結合波浪、風與海流環境因子，分析作用於固定(fixed)與浮動(floating)海洋結構體的水動力物理現象。其功能涵蓋一階，二階波浪力計算與輸出，耐波性，穩性，繫泊分析，下水分析，碰撞分析，氣隙分析，纜索動力學分析等分析能力，應用範圍相當廣泛，如圖五之示意，包含船舶、鑽油平台(oil platform)、半潛式平台

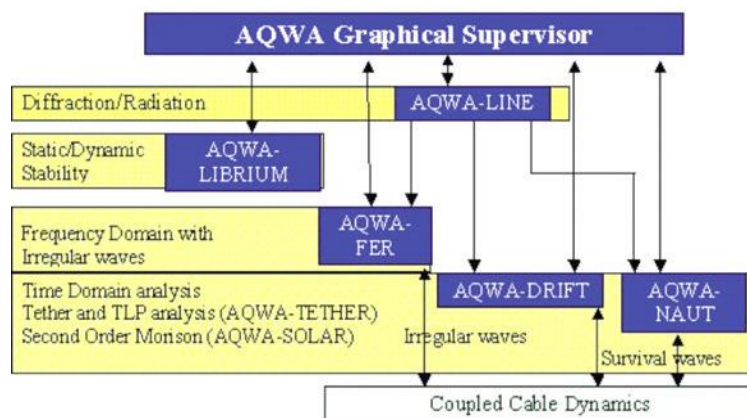
(semi-submersibles)、張力腳平台(tension leg platform)、防波堤(breakwater)、錨碇系統(mooring system)與再生能源(renewable energy)。



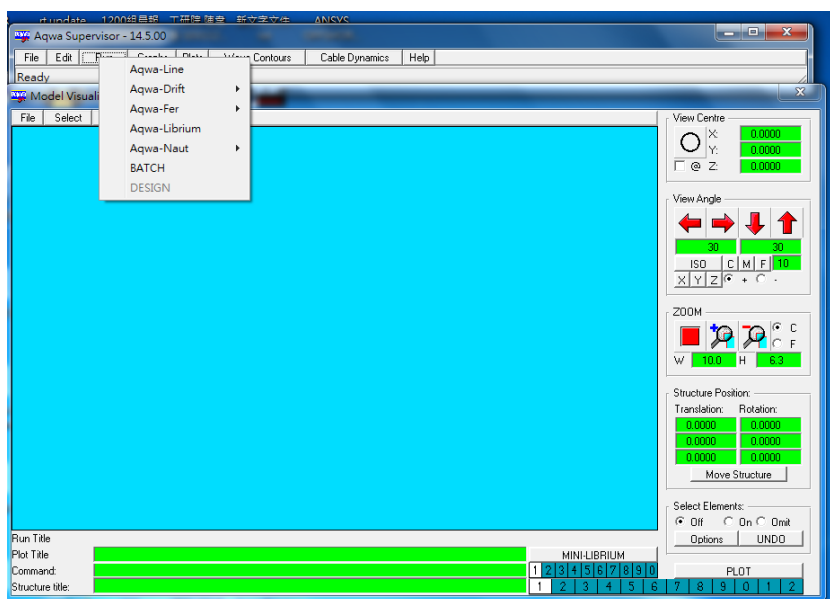
圖五、AQWA 應用領域

構成 ANSYS AQWA 的架構如圖六所示。AQWA LINE 其理論為一基於在假設無黏性(non- viscosity)、不可壓縮(incompressible)、非旋流(irrotational)之理想流體，於微小振幅波理論下，分析浮體或浮體之間的耦合(couple)在三維度波浪場中的線性繞射(diffraction)與輻射(radiation)的效應，進而計算在頻率域(frequency domain)下規則波浪作用於浮體的波浪外力與浮體的反應振幅運算子(response amplitude operator, RAO)。AQWA LIBRUM 功能為計算浮體系統的平衡位置與穩定性，浮體可為自由狀態或繫纜(mooring)狀態，環境

因子可包含波浪、海流與風。AQWA FER 為以 AQWA LINE 分析結果為基礎，進一步計算單一浮體或數個浮體，在不規則波浪(irregular)條件下於頻率域中浮體的動態反應。AQWA NAUT 可用來分析時間域中浮體在規則波與不規則波條件下的動態行為，非線性的 Froude-Krylov 與 hydrostatic forces 可於每一時距(time step)下依據入射波浪水面的變化進行重新計算，風與海流的效應亦可納入於分析當中，若波浪場中存在兩個以上的浮體，則浮體間的耦合效應將涵蓋在計算結果當中。AQWA DRIFT 其功能為分析時間域中浮體或浮體錨碇時波浪頻率引起的運動(wave frequency motion)與慢漂流運動(slow drift motion)，風與海流的效應亦可納入於分析當中。上述模組整合於 AQWA Graphical Supervisor(AGS)中(圖七)，為一操作簡便之圖形介面軟體，除了可以執行上述模組外，亦可將分析之結果進行展示與後處理，並可設定資料輸出格式，供後續資料處理使用。



圖六、AQWA 架構圖(取自 AQWA 使用手冊)

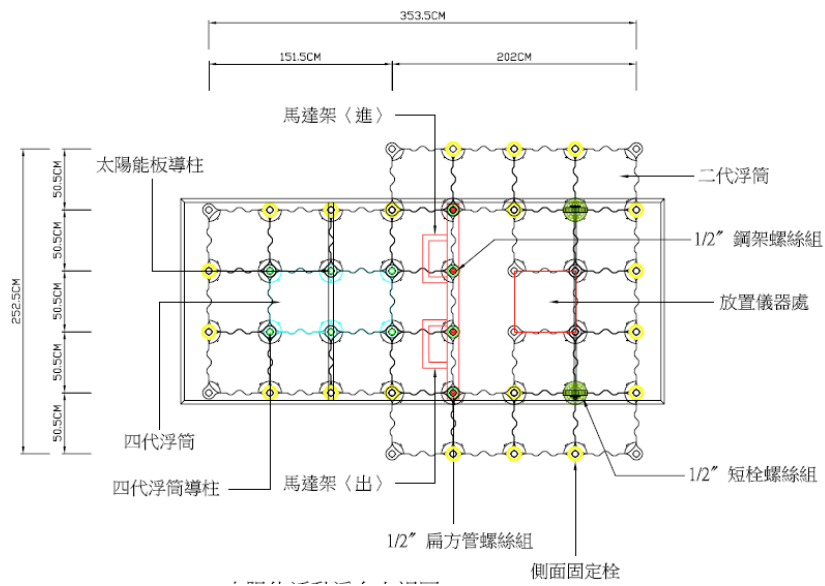


圖七、AQWA AGS

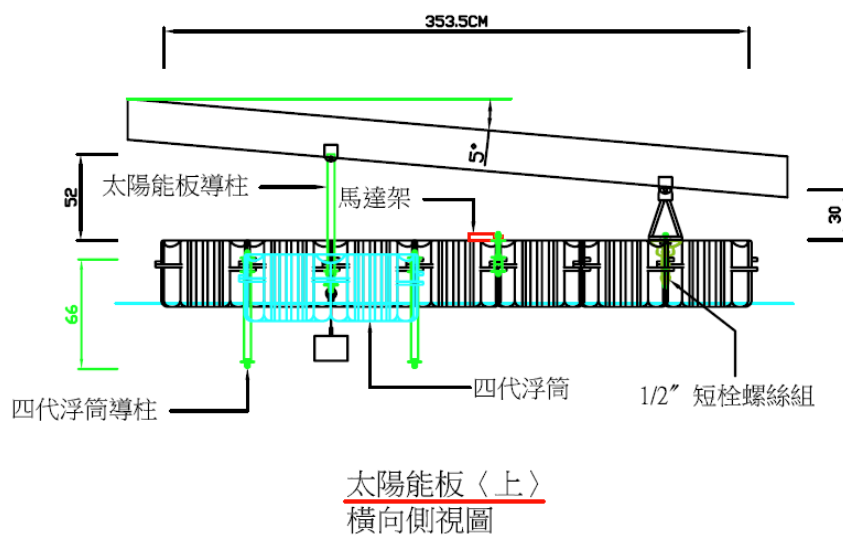
(二)數值模式建立

1. 模型建立

進行數值分析前，首先須針對太陽能平台進行 3D 模型建立作業，明確定義太陽能平台於空間中的位置、高度、角度與元件之間的相對關係。本研究採用 ANSYS Geometry 做為建模工具，並可依據模型大小，於建模環境選定合適的長度單位如公尺、公釐、英呎、英吋等，於設定好長度單位之前置作業後，採用 Geometry 模組中提供的繪圖工具如 Extrude、Revolve、Sweep 等，依序由點、線、



圖八、太陽能平台上視圖



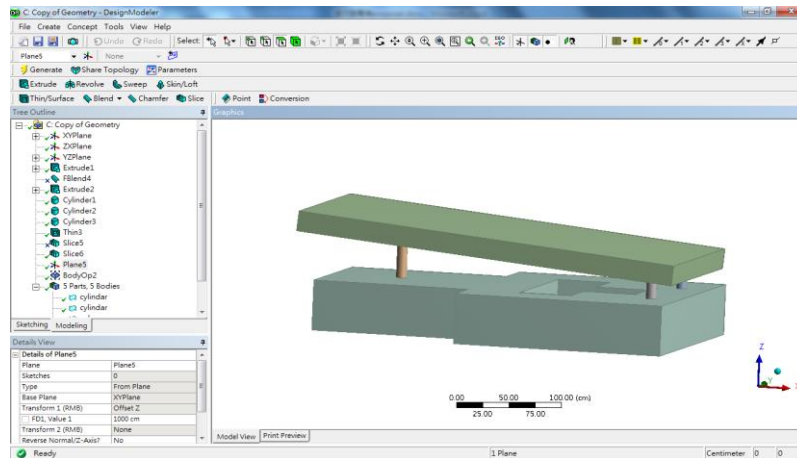
太陽能板〈上〉
橫向側視圖

圖九、太陽能平台側視圖

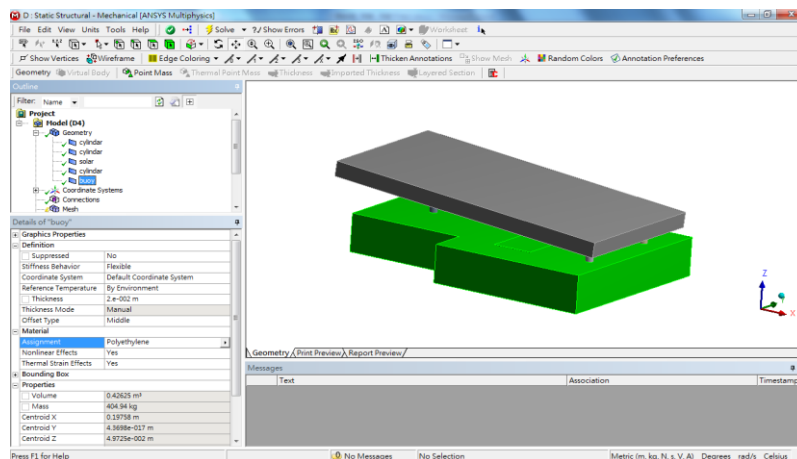
面，從 2D 至 3D 逐步繪製各元件(part)，並且將元件的長度進行參數化(parameter)與建立各元件之間之距離(distance)、長度(length)、拘束(constrain)等之相關性(dependence)，以便針對後續修改模型大小與外形時，免除模型重新建立所需耗費的時間。模型繪製則將依

據目前既定的太陽能板平台設計圖面(圖八與圖九)，平台主體由數個中空的浮筒單元所集合而成，浮筒彼此間由導柱、鋼架螺絲組、短螺栓組與側面固定栓來鎖固成一平台，平台總長度 353.5cm，寬度 252.5cm、高度 50cm。太陽能板則配置於平台上方，由太陽能板導柱連接於平台上。

平台 3D 模型如圖十所示，主要模型元件包含平台、太陽能板導柱與太陽能板，在模型繪製作業中，本研究進行了初步的簡化作業，將平台視為一個單一個體，忽略浮筒外觀鋸齒條紋的特徵，並且考量螺絲與部分導柱等元件相對於平台屬於微小型特徵元件，於計算平台水動力係數上暫時可以忽略不計，故本階段將其排除於模型上。在完成模型建立作業後，為能提供給 AQWA 在進行運算時所需要的重量、重心與慣性矩資料，將 3D 模型資訊匯入 ANSYS STATIC STRUCTURE 中，並設定模型的厚度與材料密度如圖十一所示。平台材質採用 HDPE，密度約為 $0.95\text{kg}/\text{cm}^3$ ，厚度設定為 2 cm；導柱設定為鋼材，密度約為 $7.85\text{kg}/\text{cm}^3$ ，太陽能板則由核研所提供的資料，重量為 88 kg。經計算後，太陽能平台總重約 503.34kg，重心位置為 $(x, y, z)=(0.155\text{m}, 0\text{m}, 0.179\text{m})$ ，慣性矩 $(I_{xx}, I_{yy}, I_{zz}) = (320.37\text{kgm}^2, 651.69\text{kgm}^2, 862.31\text{kgm}^2)$ 。將平台放置於密度為 $1.025\text{kg}/\text{cm}^3$ 的海水中時，由平台的切水面積 6.3756m^2 可換算平台的沒水深度為 0.077m。



圖十、太陽能平台 3D 模型

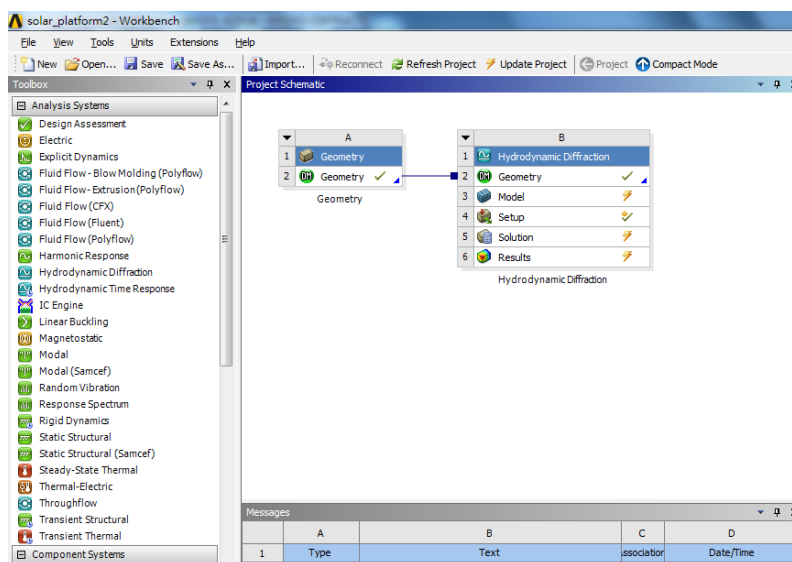


圖十一、太陽能平台材料設定

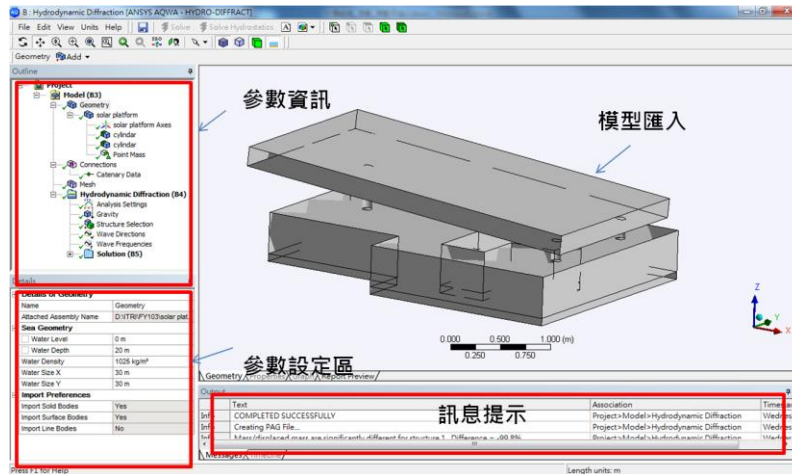
2. 頻率域環境設定

本工作項目為設定浮體在波浪場中的參數，以作為求解頻率域下的水動力反應 (hydrodynamic response)，首先於 ANSYS WorkBench 主畫面中，在視窗的左方 TOOLBOX 中將 Hydrodynamic

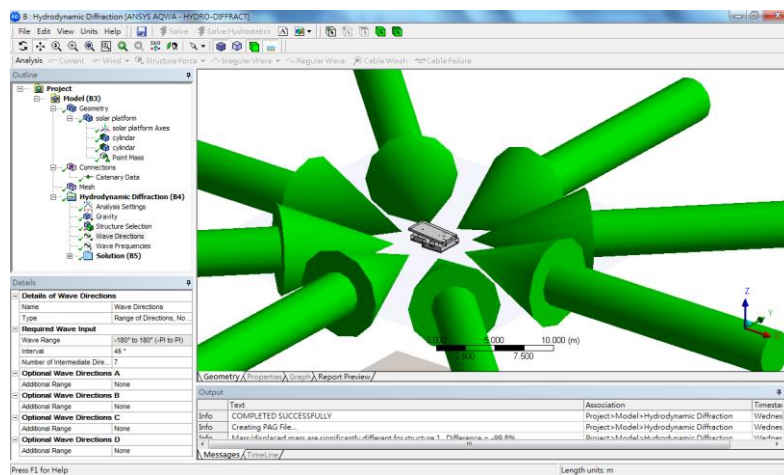
Diffraction 拖曳到 Project Schematic 中，將模型資料匯入 Hydrodynamic Diffraction 模組如圖十二所示，開啟 Hydrodynamic Diffraction 進入設定畫面(圖十三)，輸入設定參數為水深 20m，海水密度 1.025 kg/cm^3 ，平台重量 503.34kg、重心位置(0.155m, 0m, 0.179m)與慣性矩(320.37 kgm^2 , 651.69 kgm^2 , 862.31 kgm^2)，波浪方向 $-180^\circ \sim 180^\circ$ 間距 45° (圖十四)，波浪頻率採用等週期間距方式設定，周期範圍 3~10s，間距為 0.5s。



圖十二、Project Schematic 畫面



圖十三、Hydrodynamic Diffraction 設定畫面

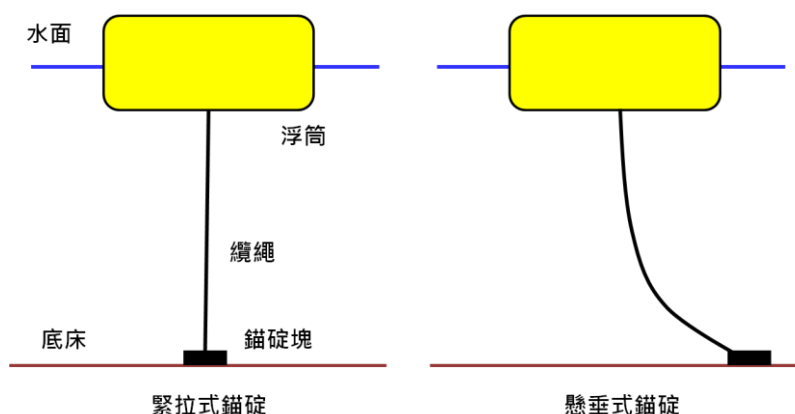


圖十四、設定波浪作用方向

3. 錨碇系統設定

本工作項目為進行太陽能平台錨碇系統設計，錨碇系統(mooring system)廣義可解釋為將某一特定物體固定或限制其活動於允許安全範圍之中。水上工程的錨碇作業比起陸地上在施工難度、成本費用相對較高之外、其安置處的潛在環境風險度也遠高於陸地，如颱風影響、水深限制、水腐蝕(尤其置於海中)、微生物附著等，皆為在設計錨碇系統時之重要考慮因素。錨碇系統類型眾多，依據纜繩之預

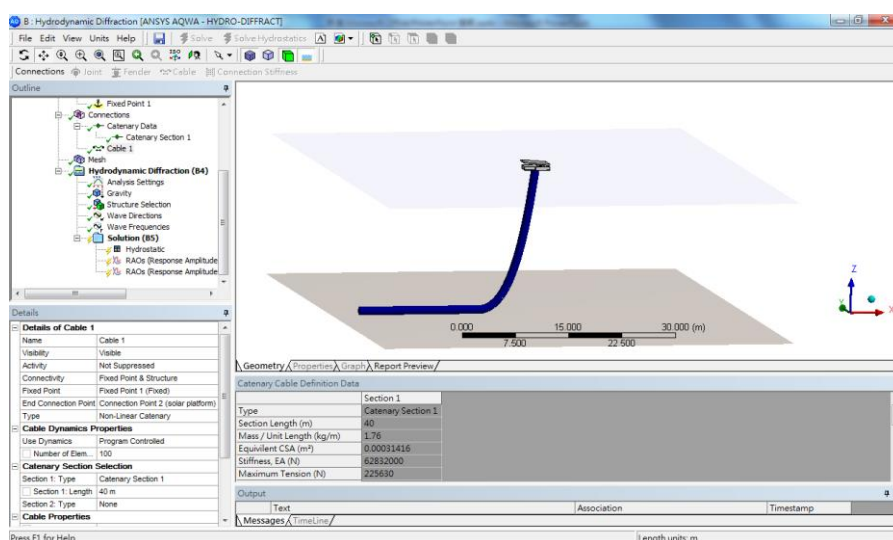
拉力大小可分為緊拉式(taut)與懸垂式(catenary)兩種，如十五所示，緊拉式錨碇系統其纜繩長度低於水深高度，其功能可限制浮筒的運動範圍；而懸垂式纜繩長度則會大於水深數倍以上，可提供浮體更多的運動自由度，能讓浮體隨波浪上下起伏。



圖十五、緊拉式/懸垂式錨碇系統示意圖

本研究初步規劃採用單點懸垂式繫纜型態(single point catenary mooring)，主要考量原因包含，第一，水位變化(一般湖泊的枯/豐水期變化及海水漲退潮)的影響將導致水深差異可達1~2m，若採用緊拉式設計，則可能導致水位蓋過平台，第二，纜繩過短，受到波浪水位起伏的影響，容易導致波浪直接拍擊平台上的太陽能板與相關設備裝置，導致儀器功能的損壞與失效，且在有水流的作用下，其在纜繩緊拉狀態時之下拉力會將平台拖入水中。第三，以纜繩張力的觀點來看，採用懸垂式繫纜設計時，平台可以隨波浪起伏與縱移之運動，纜繩不易因發生瞬間緊拉現象導致繩索產生極大的張力而斷

裂(breaking)。AQWA 可提供使用者設定懸垂式錨碇系統，本研究初步以鋼索作為纜繩類型，鍍鋅鋼索直徑採用20 mm，空氣中單位長度重量為1.76kg/m，破斷強度為約23公噸。纜繩設定長度取2倍水深計40 m，完成設定後之畫面如圖十六所示。



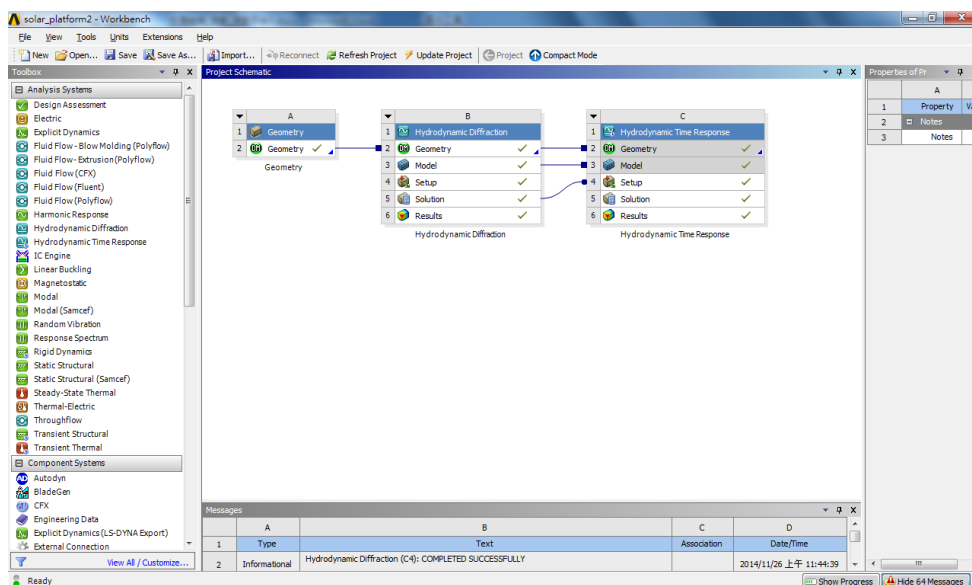
圖十六、太陽能板平台單點懸垂式錨碇系統

4. 時間域條件設定

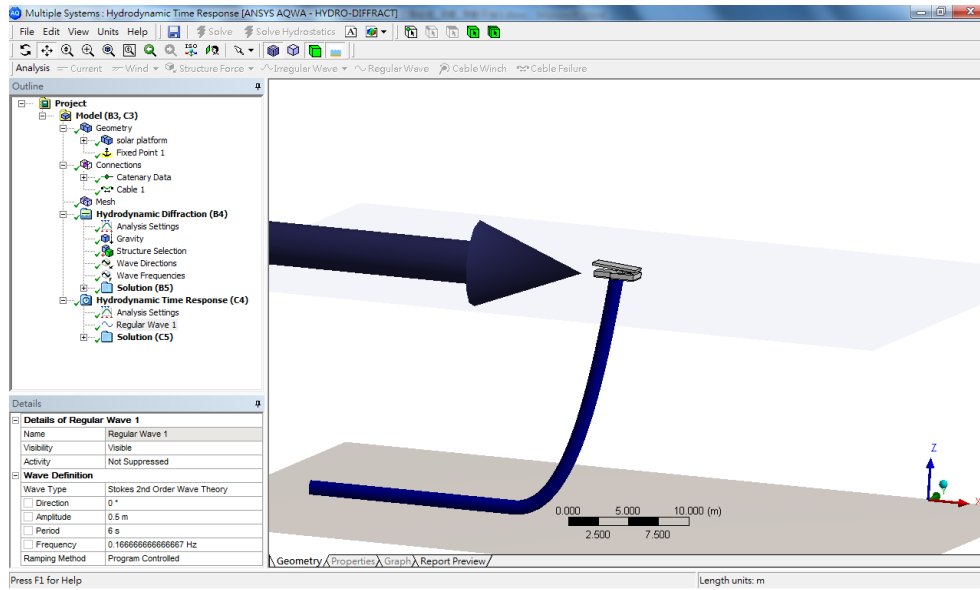
本工作項目為介紹太陽能平台在時間域進行動態分析時所需在AQWA所需進行設定的相關參數，首先於ANSYS WorkBench畫面中，將左邊TOOL BOX選單中的hydrodynamic time response模組拖曳到Project schematic畫面中hydrodynamic diffraction模組的右方並連結之(圖十七)，使資料可以進行傳遞，開啟AQWA畫面，則由視窗可以看到hydrodynamic time response模組在hydrodynamic diffraction下方，即代表兩者間的資料傳遞設定正確如圖十八所示。

在外力條件設定上，本研究所探討環境因子來源有兩個，第一個為波浪力，第二個為風力，藉由 AQWA 分析在兩者外力作用下，平台的運動行為與纜繩的拉力大小。

一般來說，當風持續吹動下，會使海面發生擾動而形成波浪，風速愈快浪高愈大，從蒲福風級表(表一)中可以看出波浪和風速的關係，本研究初步選用清風、和風與強風三種風速條件，分別模擬在風速與對應的波高作用下浮體的運動特性。為簡化問題的複雜度，本研究假設波浪屬於規則波(regular wave)，設定波浪方向為 0 度及代表正 X 軸，三種風速條件下所對應的波浪條件整理如表 2 所示。



圖十七、hydrodynamic time response 建立畫面



圖十八、hydrodynamic time response 資料連接確認

表 1、蒲福風級表

風級	名稱		海上約略波高			
	風	浪	公尺/秒	公里/時	海面情形	公尺
0	無風	-	0 - 0.2	< 1	海面如鏡。	—
1	軟風	微波	0.3 - 1.5	1 - 5	海面生鱗狀波紋、波峰無泡沫。	0.1 (0.1)
2	輕風	微波	1.6 - 3.3	6 - 11	微波，波峰光滑而不破裂。	0.2 (0.3)
3	微風	小波	12 - 19	8 - 12	小波，波峰開始破裂泡沫如珠，波峰偶泛白沫。	0.6 (1)
4	和風	小浪	5.5 - 7.9	20 - 28	小波漸高，波峰白沫漸多。	1 (1.5)
5	清風	中浪	8.0 - 10.7	29 - 38	中浪漸高，波峰泛白沫，偶	2

					起浪花。	(2.5)
6	強風	大浪	10.8 - 13.8	39 - 49	大浪形成，泛白沫波峰漸廣，漸起浪花。	3 (4)
7	疾風	大浪	13.9 - 17.1	50 - 61	海面湧突，白浪泡沫沿風成條，浪濤漸起。	4 (5.5)
8	大風	巨浪	17.2 - 20.7	62 - 74	巨浪漸升，波峰破裂，浪花明顯成條沿風吹起。	6 (7.5)
9	烈風	猛浪	20.8 - 24.4	75 - 88	猛浪驚濤，海面漸呈洶湧，浪花白沫增濃，能見度減低。	7 (10)
10	狂風	狂濤	24.5 - 28.4	89 - 102	猛浪翻騰，浪峰高聳，浪花白沫堆積，海面一片白浪，能見度更低。	9 (12.5)
11	暴風	狂濤	28.5 - 32.6	103 - 117	狂濤高可掩蓋中小海輪，海面全成白沫，驚濤翻騰白浪，能見度大減。	11.5 (16)
12	颶風	狂濤	32.7 - 36.9	118 - 133	空中充滿浪花飛沫，海面全呈白色浪濤，能見度惡劣。	14 (>16)

(註：約略波高為排名較大前 3 分之 1 的平均，括弧內為其中的最大值)

表 2、風速、波高與周期對應表

條件	最大風速(m/s)	示性波高(m)	對應週期(s)
清風	3.3	0.2	4
和風	7.9	1	6
強風	13.8	3	8

參、主要發現與結論

本計畫 review 過去業界或學界之成功案例，一般而言，錨泊方式須視當地環境來決定，綜合目前所知成功案例，平台之錨泊方式歸類為(1)將平台繫於岸邊固定物，(2)將平台繫於水底重物，(3)將平台繫於周邊浮標，再將浮標以重物繫於水底，然實際上何種方式為合適?需視當地環境而定，且應該事前考察並實地測試。將浮動平台繫於岸邊固定物，最大好處是作業單純，較易達成，但適合於較小的水域，例如較大的水庫，纜線延伸過長會有較大的斷纜風險，如果周邊纜線長度控制不佳，在強風之下有翻覆之虞。另外，若是水上活動頻繁(漁撈、娛樂)之水域，也不適合此種錨泊方式，且繫於岸邊的纜線有遭人為破壞之風險。若使用以重物底碇的方式似乎是較佳的方法，例如，可於平台周邊等距設置 4 或 8 個繫纜點，考量當地水深及水位長期變化去決定水下繫纜的長度，由於拉力是向下，如此平台的抗風穩定性較第一種方法佳，且可以減少對民眾水上活動的干擾，並降低可能的人為破壞。第三種方式，在平台四周布放底碇浮標，將平台牽覽到這些底碇浮標，這方法可增加平台的水平移動彈性，並增加了浮標當緩衝，但缺點是增加了占用水面範圍，並且實際現場作業較為不易，其他更複雜的設計如 tracking-type floating PV [2]，可支援平台旋轉。於多方考量下，為了降低錨碇設計的複雜度所帶來的潛在風險，且方便接續分析，於第一年計畫，是以底碇且單一繫纜方式來測試，未來將視測試情況及總計畫進展狀態逐步檢視多種不同錨碇設計。以目前的平台幾何/錨碇方式/環境設定而言，平台的穩定度是於安全範圍，詳細之模式分析及實際監測結果如下：

一、數值模擬結果

(一)、靜態穩定性分析

在微小角度搖晃下，預判斷浮體在靜止水域中之穩定性(stability)可由計算浮體定傾高度(metacenter height) 決定之，以下簡稱 GM，定義為重心(gravity)與傾心(metacenter)兩點之間的相對距離。當浮體 GM 值為正值時，浮體屬於穩定系統，即於靜水狀態下給其一外力使其傾斜後，浮體將產生一反方向的回復力矩(Restoring Moments)，在移除外力作用後，浮體可以自由擺盪回到初始位置而不發生翻覆現象，反之若 GM 值為負值，則浮體屬於一不穩定狀態，於外力作用下會因為無足夠回復力矩扶正下容易發生翻覆。由 AQWA 計算結果，浮體繞 x 軸方向旋轉的 GMX 為 5.88m，單位角度水體的回復力矩為 8.85 N.m/°；繞 Y 軸方向旋轉的 GMY 為 13.71m，單位角度水體的回復力矩為 20.62 N.m/°，由 GMX 與 GMY 皆為正值可初步判斷現階段所設計的浮體是屬於穩定系統狀態。

(二)、動態反應分析

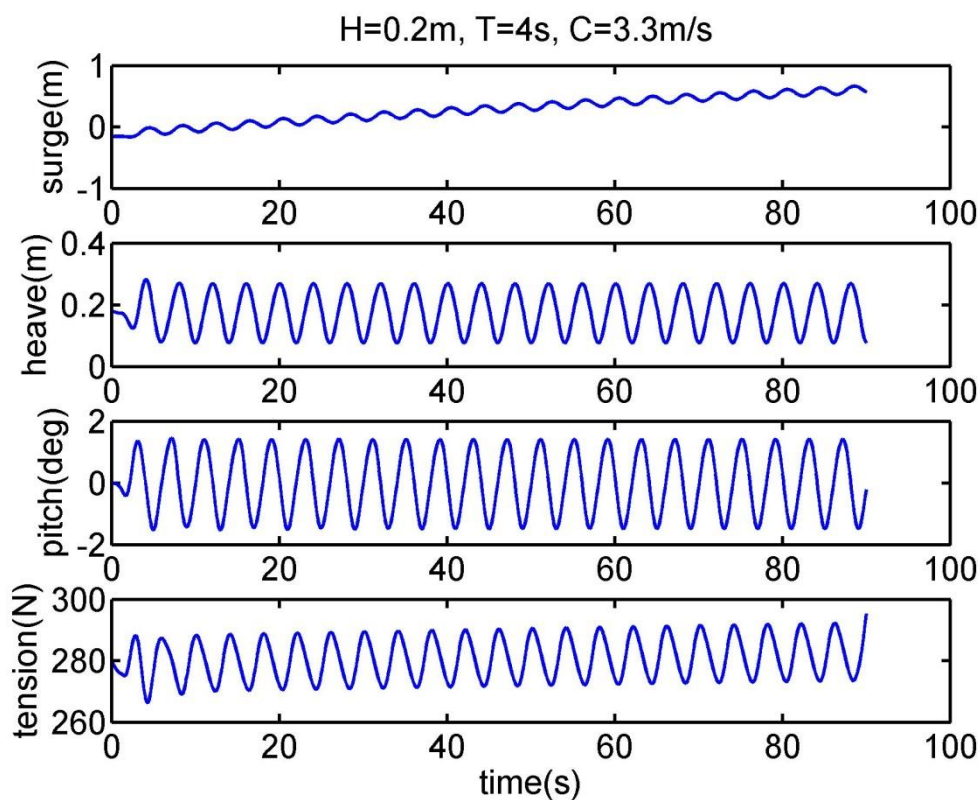
太陽能板及浮動平台之運動狀態包括移動與轉動，共有六個維度，分別用六個參數表示之，包括 Surge (縱移，沿著 x 軸移動)、Sway (橫移，沿著 y 軸移動)、Heave (起伏、沿著 z 軸移動)、roll (橫搖，

沿 x 軸轉動)、pitch (縱搖，沿著 y 軸轉動)、yaw (平擺，沿著 z 軸轉動)。太陽能板平台在清風、和風與強風的風速與波浪作用下之時序分析結果如圖十九到圖二十一所示，將平台在 surge、heave、pitch 與纜繩張力的動態反應以時序列方式呈現，在本模式設定下，sway、roll 與 yaw 方向無作用力因此即不再繪製呈現，平台運動狀態如圖二十二所示。在清風條件下，平台整體的動態行為大致上具入射波浪具有相同的震盪周期，平台在 surge 方向的運動變化於 90s 時間內移動量約為 0.9m，heave 方向上的運動振幅約 0.095m，pitch 最大搖晃角度為 1.4deg，纜繩最大張力約為 290N，由以上之動態反應來看，平台對清風作用下的動態反應不大。

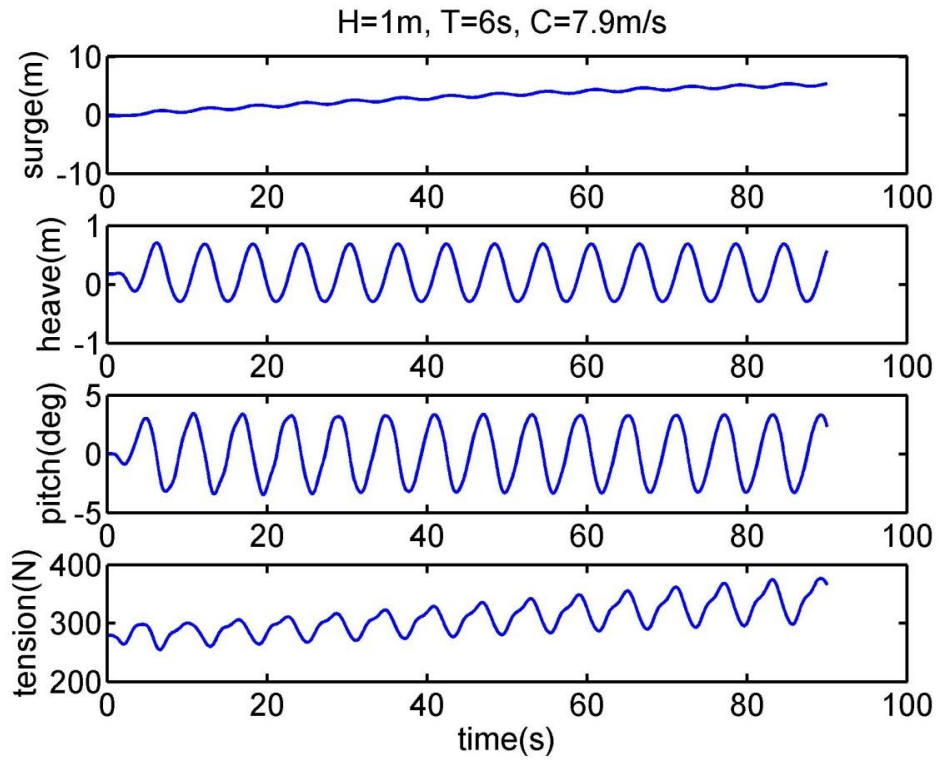
在和風條件下，受到波浪週期與風速增大的影響，平台在 surge 方向的運動變化於 90s 時間內移動距離可達 5.23m，heave 方向上的運動振幅約 0.476m，pitch 最大搖晃角度為 3.33deg，纜繩最大張力隨時間逐漸增加可達 376.6N，由以上之動態反應來看，於風速較大的和風作用下的平台的動態反應明顯的增加。

在強風條件下，此時風速已達 13.8m/s，平台在 surge 方向的運動變化於 90s 時間內移動距離可達 10.54m，heave 方向上的運動振幅約 1.527m，pitch 最大搖晃角度為 7.67deg，纜繩最大張力隨時間逐漸增加可達 1839N，值得注意的在高風速與大浪高的作用下，平台的 pitch 搖晃角度呈現鋸齒狀的波形現象，此原因主要來自波高增

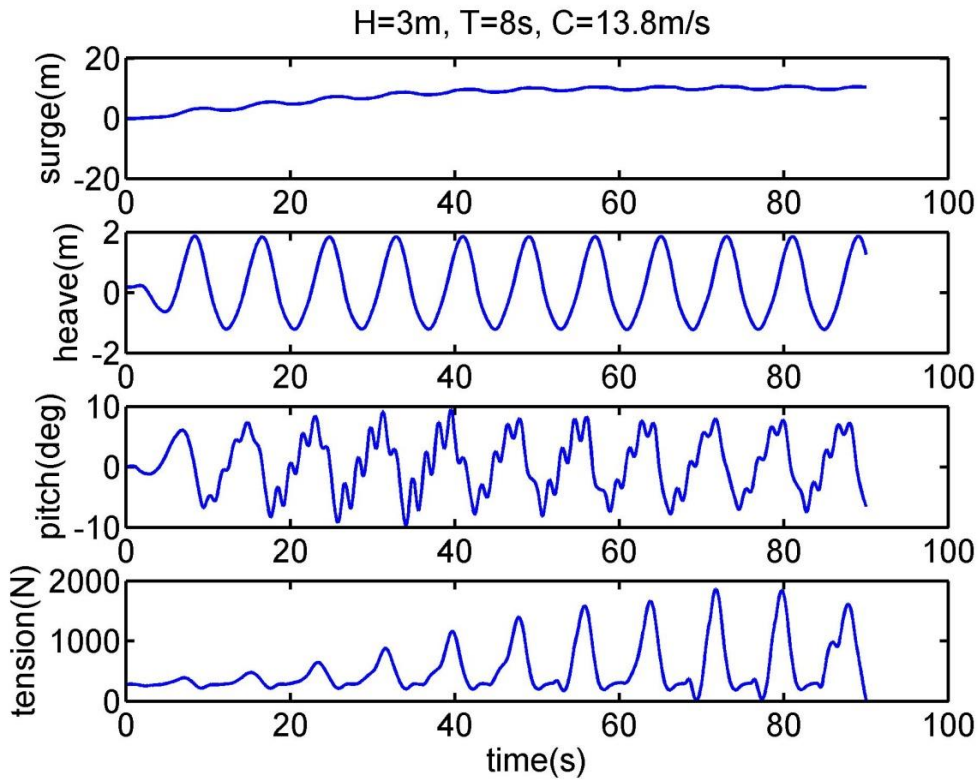
大效應所致。為避免纜繩容易發生瞬間緊拉現象，本模擬研究採用長度 40m 之的鋼索，在強風作用下，所承受最大張力僅 1839N，低於鋼索拉斷強度，顯示本研究設計之錨碇系統配置在強風作用下仍可達到安全標準符合設計需求。實驗結果也建議，在一般狀態下，所使用之鋼索最好可以抵抗 1800N 以上的張力。



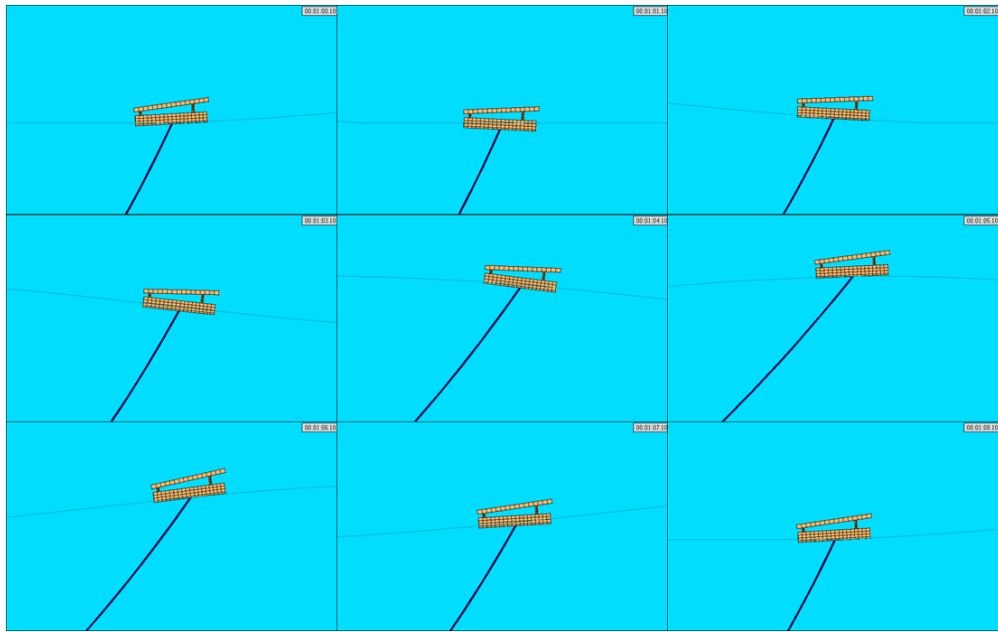
圖十九、清風條件下平台運動軌跡



圖二十、和風條件下平台運動軌跡



圖二十一、強風條件下平台運動軌跡

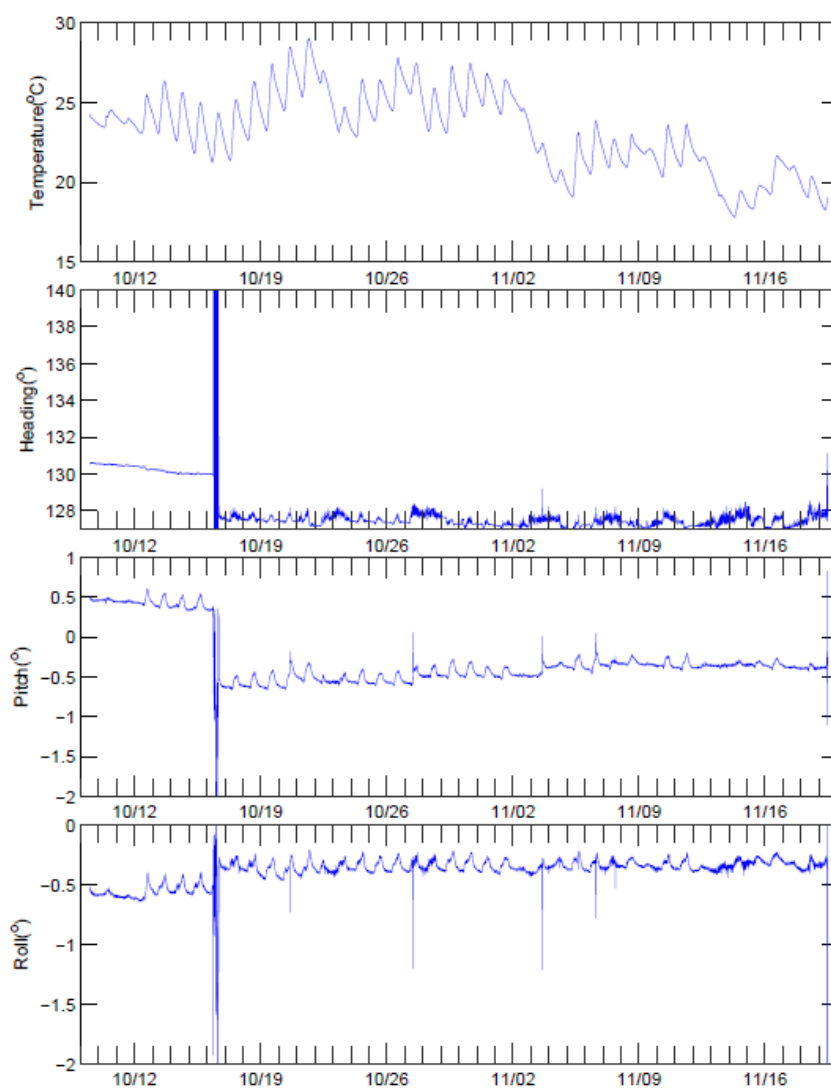


圖二十二、強風條件下平台運動連續圖

二、實際監測結果

都普勒流剖儀所測得之平台運動資訊如圖二十三所示，圖中顯示，於觀測的 41 天期間，yaw、pitch 與 roll 的變化除了於 10/16 日有較顯著變化以外相當小，但 10/16 為人為移動平台與設備變更所造成，除此之外，變化的角度都小於 1 度，這些微小變化週期為 1 天，可能是風力日變化造成。由於所區的實驗水池相對於自然環境而言，範圍小且水深淺，在相同風力下，無法產生顯著的波浪現象，故僅有風應力的影響，故此一結果僅顯示，在一般天氣狀況下，目前地平臺設計足以抵抗風應力，不至於有顯著的擺盪，此狀態近似於數值模擬中的靜態穩定分析，結果至少顯示，浮動平台本身設計是可穩定浮於水面，若加上風的效應，一般情況下，亦是處於穩定

態。此外，圖二十三中的水溫時間序列顯示，於 11 月 2 日，水溫自 25 度降到 20 度，比對氣象局資料，此為寒流抵達造成，寒流時期，常常會有較為強大的陣風，但 yaw、pitch 與 roll 於寒流抵達後，並無明顯的強烈震盪，顯示對目前平台設計而言，風的影響並不明顯。



圖二十三、41 天監測的平台觀測溫度(temperature)、平擺(yaw)、縱搖(pitch)與橫搖(roll)。

三、結論與建議

(一) 本研究採用 ANSYS AQWA 作為模擬軟體，其強大功能與簡單的介面化的操作，可協助開發者有效率的進行太陽能板平台的設計與分析，並且可透過模型的參數化建立，協助使用者進行平台的最佳化設計。此外，穩定度監測儀器，也成功取得穩定度時間序列，兩者結果相近。以第一年計畫而言，至少已經建立可用工具與模型，可支援後續幾年的研究工作。

(二) 後續可一步將馬達、螺絲、連接架與相關儀器等加入於模型中，計算平台整體的重量、重心位置與慣性矩，以更符合實際原型，此外建議可於平台上設計可配重機構，以確保系統組裝後，其重心與浮心在同一重力方向上，以避免平台下水後，發生超出容許範圍外的傾斜角度。

(三) 本研究分別採用輕風、和風與強風三種條件進行浮體的動態特性模擬，初步結果顯示，當風速與浪高增強時，浮體在水體中的搖晃角度越大，且當波高越大時，將會產生一個較入射波頻率高頻的微小震動現象，在長時間作用下，此一現象將可能導致平台螺絲與螺絲連接處之結構處容易發生鬆脫與疲勞現象，值得後續注意。

(四) 本研究採用規則波浪與固定風速為假設條件模擬實際海域上的風與浪的現象，然而實際海域上的波浪與風的型態屬於不規則性質，後續可進一步將風譜與波浪頻譜導入模式當中，以模擬實際海

域風與浪作用下平台的動態行為。

(五) 依據國際船協在海上結構設計準則與指引中指出，當平台長時間工作於海上時，由於可能遭受巨大風浪如颱風或颶風之侵襲，因此通常會以該海域的極端風浪條件作為設計標準，以確保平台與錨碇系統可以抵抗極端風浪條件下而不發生損壞或故障。因此建議後續可依據中央氣象局所記錄的歷年來颱風侵襲台灣的路徑、風速與浪高，作為推測平台未來佈放之海域可能發生的極端條件參考與平台動態分析模擬條件之依據。

肆、参考文献

1. Choi, Y. -K., N. -H. Lee, and K. -J. Kim (2013), Empirical Research on the efficiency of Floating PV systems compared with Overland PV Systems, Proceedings, The 3rd International Conference on Circuits, Control, Communication, Electricity, Electronics, Energy, System, Signal and Simulation., Vol. 25, pp. 284 – 289.
2. Choi, Y. -K., N. -H. Lee, A. -K. Lee and K. -J. Kim (2013), A study on major design elements of tracking-type floating photovoltaic systems, International Journal of Smart Grid and Clean Energy, vol. 3, no 1.
3. Jonkman, J. M. (2008), Influence of Control on the Pitch Damping of a Floating Wind Turbine, ASME Wind Energy Symposium Reno, Nevada.