



國立中山大學海下科技暨應用海洋物理研究所

碩士論文

Institute of Applied Marine Physics and Undersea Technology

National Sun Yat-sen University

Master Thesis

連續內波在斜坡前緣的紊流特性

Turbulent flows induced by the interaction of continuous
internal waves and a sloping bottom

研究生：郭哲成 撰

Je-Cheng Kuo

指導教授：曾若玄 博士

Dr. Ruo-Shan Tseng

中華民國 101 年 10 月

Oct 2012

國立中山大學研究生學位論文審定書

本校海下科技暨應用海洋物理研究所碩士班
研究生郭哲成 (學號：M985080004) 所提論文

連續內波在斜坡前緣的紊流特性

Turbulent flows induced by the interaction of continuous internal waves
and a sloping bottom

於中華民國 101 年 10 月 01 日經本委員會審查
並舉行口試，符合碩士學位論文標準。

學位考試委員簽章：

召集人陳冠宇	<u>陳冠宇</u>	委員曾若玄	<u>曾若玄</u>
委員謝志敏	<u>謝志敏</u>	委員李逸環	<u>李逸環</u>

指導教授 曾若玄 曾若玄

謝誌

本論文能順利完成，首先我要感謝我的指導教授曾若玄老師，謝謝老師這段時間在學業上的教導和生活上的照顧，我在中山三年多來的從老師身上學習到不只是淵博的學問，還有那勤奮認真的處事態度，在此獻上我最誠摯的感謝，也謝謝師母一直把我們當作她的孩子照顧，讓來這裡求學的我們備感溫暖。

感謝中山大學陳冠宇教授、李逸環博士與高雄海洋科技大學謝志敏教授在口試時給予指正和寶貴的意見。也感謝張育嘉學長、沈勇廷學長、邵煥傑學長、廖允強學長、鄭明宏學長、劉冠成、汪建君、邱文佐在這期間的照顧和指導實驗以及解決程式上問題，感謝你們。

最後要感謝我的家人，你們的支持讓我面臨挫折時，能夠克服和走出低潮。謝謝大家。

中文摘要

內波是發生在密度分層流體中一種波動現象，本研究為了更了解連續內波傳遞的特性，在水槽中做了一系列的實驗，總水深為 45 公分。上層為厚 10 公分的淡水，下層為厚 35 公分的鹽水，內波週期分別為 2.5、5.5、6.6s，並利用 Micro ADV 量測剖面流速分佈。且利用超音波波高計、表面波波高計分別偵測內波、表面波的波形。研究結果顯示，在密度分層界面的上方和下方粒子流速方向相反，在界面附近的 u 和 w 流速分量最大，離開界面越遠則流速越小。當兩層水體密度差變小時，流速會較小，導致內波能量變小。利用 HHT 時頻分析來得知週期，並與 EMD 來互相比較。得知波形和流速週期一致，進而利用 EMD 來探討理論-實驗的差異性

當連續內波傳遞到斜坡時，可發現淺化開始發生，內波波形逐漸抬升，波峰變得尖銳，在更接近斜坡邊界時後半段波形變得比較陡直，造成流體剪應力不穩及紊流，使水體內部翻轉，最後在斜坡上產生反射、破碎混合等現象。本研究探討不同尖銳度的內波傳遞至不同坡度之斜坡時反射率的變化，當坡度非常平緩時，反射係數小，當坡度漸增，反射係數漸增並接近定值。在無斜坡情況下，內波傳遞過程產生的紊流很小，只有在上層內波交界面附近才會有比較明顯的擾動。但加入斜坡後，內波所產生的紊流很明顯的增加，動能消散率 ε 變大。利用慣性消散法、TKE 法和自相關方法分別估算 ε 和 τ ，自相關法算出的 ε 會較大，但趨勢都是一致，較接近斜坡處的 ε 會比較遠處的大，斜坡角度越緩所產生的紊流會更加明顯。

關鍵字:連續內波、EMD、碎波、擾動、動能消散率

Abstract

Internal waves occur in the interface between two layers of fluids with density stratification. In order to better understand the characteristics of continuous internal waves, a series of experiments were conducted in a laboratory tank. The upper and lower layers are fresh water of 15 cm thick and salt water of 30 cm thick, respectively. The periods of internal waves are 2.5, 5.5 and 6.6 sec. A micro-ADV is used to measure velocity profiles. Wave profiles at the density interface and the free surface are monitored respectively by an ultrasonic and capacitance wave gauges. Our results indicate that particle velocities (u and w) above and below the density interface have opposite directions. The speed is peaked near the density interface and it becomes weaker further away from the interface. Empirical Mode Decomposition is used to remove noise from the observed particle velocities, and the period is consistent with those derived from the interface elevations. The observed particle velocities also compare favorably with the theoretical results.

When internal waves propagate without the interference of a sloping bottom, the turbulence induced is rather insignificant. The turbulence is more significant only near the density interface. With the existence of a sloping bottom, the internal waves gradually shoal and deform, the crest becomes sharp and steep, finally the waves become unstable, break and overturn. In this study the effect of bottom slope and the steepness of internal waves on the reflectivity of incoming waves are investigated. The reflectivity is smaller with gentler slope, and it increases and reaches a constant value with steeper slopes. The observed energy dissipation rate ε is higher near the slope. Three methods were used to estimate the energy dissipation rate and shear stress; namely, the inertial dissipation, the TKE and auto-correlation method. The ε estimated from the auto-correlation method is larger than that from the other two methods, but their trend is similar. The energy dissipation rate is found to increase with a gentler sloping bottom.

Keywords: continuous internal waves, Empirical Mode Decomposition, breaking waves, turbulence, energy dissipation rate

目錄

章次	頁次
謝誌	i
中文摘要	ii
英文摘要	iii
目錄	iv
圖目錄	vi
表目錄	x
第一章、緒論	1
1.1 前言	1
1.2 前人研究	3
1.3 研究動機和目的	5
第二章、實驗設計與方法	6
2.1 實驗水槽設備和儀器	6
2.1.1 實驗水槽設備	6
2.1.2 觀測儀器與軟體	7
2.2 實驗設計	16
2.2.1 實驗條件	16
2.2.2 實驗過程	22
第三章、資料分析方法	25
3.1 流速資料分析	25
3.2 表面波、內波資料分析	25
3.3 HHT(Hilbert Huang Transform) and EMD (Empirical Mode Decomposition)	26
3.4 理論公式解	27
3.5 反射率和反射能量計算	29
3.6 剪應力和消散率的估算方法	30
3.6.1 TKE (turbulent kinetic energy) 法	30
3.6.2 慣性消散 (inertial dissipation) 法	31
3.6.3 自相關(auto correlation)法	32
第四章、實驗結果與討論	35
4.1 內波流速剖面及物理特性	35
4.1.1 無斜坡	35
4.1.2 有斜坡	46

4.2 實驗-理論	48
4.3 power spectrum	57
4.4 反射率和反射能量計算	71
4.5 turbulence	74
4.5.1 點平均法(Bin average)	74
4.5.2 移動平均法(Moving average)	74
4.5.3 相位平均法(Phase average)	75
4.6 消散率 (ε)	82
4.6.1 慣性消散法	82
4.6.2 TKE	85
4.6.3 Auto correlation	87
第五章、結論	92
參考文獻	95
附錄一 慣性消散法公式	99

圖目錄

頁次

圖 1-1	內波生成、運動及消散機制示意圖(LeBlond and Mysak, 1978).....	2
圖 2-1	造波水槽(12m×0.5m×0.7m)	10
圖 2-2	造波水槽內部.....	10
圖 2-3	排水進水孔.....	10
圖 2-4	連續內波造波槳(D 型槳)	10
圖 2-5	孤立內波造波槳.....	11
圖 2-6	轉速器	11
圖 2-7	斜坡放置水槽內部.....	11
圖 2-8	斜坡放置水槽內部(正面)	11
圖 2-9	鹽水槽.....	12
圖 2-10	抽水馬達.....	12
圖 2-11	工業用鹽.....	12
圖 2-12	密度計.....	12
圖 2-13	放置儀器載具.....	13
圖 2-14	Micro ADV	13
圖 2-15	量測點離音鼓位置圖	13
圖 2-16	超音內波計	13
圖 2-17	超音內波計主機	14
圖 2-18	電容式波高計	14
圖 2-19	電容式波高計主機	14
圖 2-20	密度剖面計	14
圖 2-21	轉接盒	15
圖 2-22	A-D 卡	15
圖 2-23	示波器	15
圖 2-24	實驗架構圖	17
圖 2-25	放置斜坡實驗架構圖	17
圖 2-26	角度 11 度實驗架構圖	19
圖 2-27	角度 9.4 度實驗架構圖.....	19
圖 2-28	角度 8 度實驗架構圖.....	20
圖 2-29	實驗步驟圖	22
圖 3-1	理論架構圖 (Umeyama 2002)	28
圖 3-2	斜坡角度與反射率(Nagashima1971, Ariyaratnam1998).....	29
圖 3-3	power spectrum 入射波和擾動(Stapleton and Huntley, 1995).....	31
圖 3-4	bin average 、moving average.....	32

圖 3-5	Phase average.....	33
圖 4-1	實驗 A1030(A)自由表面波動(B)流體介面波動.....	37
圖 4-2	實驗 A1030(A)流速 (B)自由表面波動(C)流體介面波動.....	37
圖 4-3	實驗編號 A1030 HHT 時頻圖 內波波動分析圖	38
圖 4-4	實驗編號 B1030 HHT 時頻圖 內波波動分析圖	38
圖 4-5	實驗編號 C1030 HHT 時頻圖 內波波動分析圖	38
圖 4-6	實驗 A1030 自由表面波動 實驗-理論對照圖。圈圈線表示理論值、實線表示實驗值	39
圖 4-7	實驗 A1030 流體介面波動 實驗-理論對照圖。圈圈表示理論值、實線表示實驗值	39
圖 4-8	內波在(a)波谷處(b)波峰處內波上下流速相反(王瑋宏,2008)	40
圖 4-9	實驗編號 A1030(A) 密度交接處上方(離底 37.5cm)(B) 密度交接處下方(離底 32.5cm)(C)波形 內波上下流速相反.....	40
圖 4-10	(A)實驗編號 A1030(B)實驗編號 B1030(C)實驗編號 C1030 U 方向原始資料(離底 37.5cm)	43
圖 4-11	(A)實驗編號 A1030(B)實驗編號 B1030(C)實驗編號 C1030 W 方向原始資料(離底 37.5cm)	43
圖 4-12	實驗編號 A1030、實驗編號 B1030、實驗編號 C1030 U 方向最大流速剖面圖(波峰處)	44
圖 4-13	實驗編號 A1030、實驗編號 B1030、實驗編號 C1030 W 方向最大流速剖面圖(波峰處).....	44
圖 4-14	實驗編號 A1000、實驗編號 A1010 U 方向最大流速剖面圖(波峰處).....	45
圖 4-15	實驗編號 A1000、實驗編號 A1010 W 方向最大流速剖面圖(波峰處)	45
圖 4-16	實驗編號 A1030_11(A) U 方向 $x=-200.9\text{cm}$, $z=39\text{cm}$ (B) W 方向 $x=-200.9\text{cm}$, $z=39\text{cm}$ 。箭頭 1 黑色圈圈處為入射波、箭頭 2 黑色圈圈處為反射波	46
圖 4-17	實驗編號 A1030_8(A) U 方向 $x=-217\text{cm}$ $z=31\text{cm}$ (B) W 方向 $x=-217\text{cm}$ $z=31\text{cm}$ 原始流速資料。箭頭 1 黑色圈圈處為入射波、箭頭 2 黑色圈圈處為反射波	47
圖 4-18	實驗編號 A1030 U 方向資料經 EMD 分解後之 IMF (C5 是本文所要的分量).....	49
圖 4-19	實驗編號 A1030 W 方向資料經 EMD 分解後之 IMF (C5 是本文所要的分量).....	49
圖 4-20	實驗編號 B1030 U 方向資料經 EMD 分解後之 IMF (C7 是本文所要的分量)	50
圖 4-21	實驗編號 B1030 W 方向資料經 EMD 分解後之 IMF (C7 是本文所要的分量).....	50
圖 4-22	實驗編號 C1030 U 方向資料經 EMD 分解後之 IMF (C7 是本文所要的分	

	量).....	51
圖 4-23	實驗編號 C1030 W 方向資料經 EMD 分解後之 IMF(C7 是本文所要的分量).....	51
圖 4-24	實驗編號 A1030 U 方向(量測點離底 37.5cm) 一階理論-實驗對照圖。實線為實驗值、圈圈加實線為理論值.....	54
圖 4-25	實驗編號 A1030 W 方向(量測點離底 37.5cm) 一階理論-實驗對照圖。實線為實驗值、圈圈加實線為理論值.....	54
圖 4-26	實驗編號 A1030 U 方向(量測點離底 37.5cm) 二階理論-實驗對照圖。實線為實驗值、圈圈加實線為理論值.....	55
圖 4-27	實驗編號 A1030 W 方向(量測點離底 37.5cm) 二階理論-實驗對照圖。實線為實驗值、圈圈加實線為理論值.....	55
圖 4-28	實驗編號 A1030 U 方向(量測點離底 37.5cm) 三階理論-實驗對照圖。實線為實驗值、圈圈加實線為理論值.....	56
圖 4-29	實驗編號 A1030 W 方向(量測點離底 37.5cm) 三階理論-實驗對照圖。實線為實驗值、圈圈加實線為理論值.....	56
圖 4-30	利用攝影機拍攝內波傳遞至地形變化圖(A1030_11)	59
圖 4-31	利用攝影機拍攝內波傳遞至地形變化圖(A1030_11)	59
圖 4-32	利用攝影機拍攝內波傳遞至地形變化圖(A1030_11)	60
圖 4-33	利用攝影機拍攝內波傳遞至地形變化圖(A1030_11)	60
圖 4-34	利用攝影機拍攝內波傳遞至地形變化圖(A1030_9.4)	61
圖 4-35	利用攝影機拍攝內波傳遞至地形變化圖(A1030_9.4)	61
圖 4-36	利用攝影機拍攝內波傳遞至地形變化圖(A1030_9.4)	62
圖 4-37	利用攝影機拍攝內波傳遞至地形變化圖(A1030_9.4)	62
圖 4-38	實驗編號 A1030 (W 方向) (A)z=40cm (B) z=37.5cm (C) z=32.5cm power spectrum 頻譜分析圖。黑色圈圈為入射波所造成.....	63
圖 4-39	實驗編號 A1030 (W 方向) (A) z=30cm (B) z=27.5cm (C) z=25cm power spectrum 頻譜分析圖。黑色圈圈為入射波所造成.....	64
圖 4-40	實驗編號 A1030_11 (W 方向) (A) x=-200.9 z=39cm (B) x=-155.9 z=39cm (C) x=-155.9cm z=31cm power spectrum 頻譜分析圖。箭頭 1 為斜坡所造成，箭頭 2 為入射波所造成.....	66
圖 4-41	實驗編號 A1030_11 (W 方向) (A) x=-110.9cm z=39cm (B)x=-110.9cm z=31cm (C) x=-110.9cm z=27cm power spectrum 頻譜分析圖。箭頭 1 為斜坡所造成，箭頭 2 為入射波所造成.....	67
圖 4-42	解釋斜坡 power spectrum 分析.....	68
圖 4-43	實驗編號 A1030_9.4 (W) x=-230cm z=39cm power spectrum 頻譜分析圖(虛線部分將波動和擾動區隔)	68
圖 4-44	實驗編號 A1030_8 (W) (A) x=-217cm z=39cm(B) x=-217cm z=31cm power spectrum 頻譜分析圖。(虛線部分將波動和擾動區隔)。	

	f=2Hz	69
圖 4-45	實驗編號 A1030_11 流速-表面波型比對(一大一小為加入地形後所產生的反射現象).....	72
圖 4-46	斜坡角度與反射率(圈圈處跟本實驗角度相近)	72
圖 4-47	實驗編號 A1030_11 反射率 (藍色點是最斜坡頂點故反射率最大,紫色較靠近底端).....	73
圖 4-48	實驗編號 A1030_11 反射能量率(藍色點是最斜坡頂點故反射率最大,紫色較靠近底端).....	73
圖 4-49	實驗編號 A1030(第二點) bin average。紅色為原始流速、黑色為平均、藍色為擾動.....	76
圖 4-50	實驗編號 A1000(離底 22.5cm) bin average。紅色為原始流速、黑色為平均、藍色為擾動.....	76
圖 4-51	實驗編號 A1030_11 第一點 bin average。綠色為原始流速、黑色為平均、藍色為擾動	77
圖 4-52	實驗編號 A1030_11 第三點 bin average。綠色為原始流速、黑色為平均、藍色為擾動.....	77
圖 4-53	實驗編號 A1030(第二點) moving average。綠色為原始流速、黑色為平均、藍色為擾動	78
圖 4-54	實驗編號 A1030(離底 22.5cm) moving average。綠色為原始流速、黑色為平均、紅色為擾動.....	78
圖 4-55	實驗編號 A1030_11 第一點 moving average。綠色為原始流速、黑色為平均、紅色為擾動	79
圖 4-56	實驗編號 A1030_11 第三點 moving average。綠色為原始流速、黑色為平均、紅色為擾動.....	79
圖 4-57	實驗編號 A1030(第二點) phase average。紅色為原始流速、黑色為平均、藍色為擾動.....	80
圖 4-58	實驗編號 A1000(離底 22.5cm) phase average。綠色為原始流速、黑色為平均、藍色為擾動	80
圖 4-59	實驗編號 A1030_11 第一點 moving average。綠色為原始流速、黑色為平均、藍色為擾動	81
圖 4-60	實驗編號 A1030_11 第三點 moving average。綠色為原始流速、黑色為平均、藍色為擾動	81
圖 4-61	後灣觀測頻譜分析圖(高, 2011) 虛線部分為 sub-range 流速為 25.99cm/s.....	83
圖 4-62	水槽實驗頻譜分析圖(高, 2011) 虛線部分為 sub-range, 藍色為波高 6cm, 黑色為波高 10cm	83
圖 4-63	實驗編號 A1030_8 頻譜分析圖(虛線部分為 turbulence)	84
圖 4-64	可將波動部分利用 TKE 去除掉(Stapleton and Huntley, 1995)	85

圖 4-65	實驗編號 A1030_8 (A)第一點(B)第二點(C)第三點(D)第四點 tau-Re。黑色為積分範圍	88
圖 4-66	(A)隨時間變化的 ε (B)correlation (實驗編號 A1030_8 x=-309cm z=39cm)。黑色圈圈可明顯看出趨勢相同	90
圖 4-67	(A)隨時間變化的 ε (B)correlation (實驗編號 A1030_8 x=-309cm z=31cm)。黑色圈圈可明顯看出趨勢相同	90
圖 4-68	(A)實驗編號 A1030_11(B)實驗編號 A1030_9.4(C)實驗編號 A1030_8 TKE 剪應力比較	91
圖 4-69	(A)實驗編號 A1030_11(B)實驗編號 A1030_9.4(C)實驗編號 A1030_8 auto correlation 消散率比較	91

表目錄

	頁次	
表 2-1	實驗條件總整理	21
表 4-1	各實驗週期	41
表 4-2	實驗統整	70
表 4-3	τ (N/ m ²)計算結果(X:無-5/3 \ \ :無此量測點)	86
表 4-4	Auto correlation ε (消散率)	89

第一章、緒論

1.1 前言

內波是在兩個不同密度界面(interface)的波動。在自然界的氣體與液體之間，其密度交接面受到壓力、溫度、濕度及其它相關因素的影響而改變，常見的現象可能發生於液體與氣體交接面，例如：表面波。而在大氣中不同雲層氣體與氣體、海域中液體與液體、電波與磁波中於不同密度界面處的波動現象，均為內波(internal wave)。雖限於物理觀測之技術問題，吾人平時不易想像，廣義的波，即界面波(interfacial wave)隨處可見。本研究所討論的內波侷限於水體的交接面。

自然界水體的內波運動通常發生在密度交界處，像是湖泊與海洋的密躍層。當水體密度處於穩定層化狀態(意指水體密度上輕下重分佈)之充分條件下，由外界環境因風場引發的水體質量傳輸或是能量轉換及海流經海底地形陡變等，使水體動能轉換成位能，造成震盪的驅動，導致能量集中於密躍層溫躍層，產生波動行為，為海洋學者觀測到的密度分層脈動的內波現象，在全世界部分的海洋中，內波是一個非常普遍的現象；內波也被證實對於水域範圍較小即入海口等處的能量、物質傳輸及混合等水體運動有重大影響。

形成內波的驅動因素有很多，如強烈的風、潮、流、水面空氣層中的壓力起伏及經過海底丘陵、山脈或海谷的海流皆是。當內波由深水區傳遞到近岸地區接觸到斜坡邊界，會有如表面波一般產生淺化破碎、混合、反射的行為，且對近岸地區沉積物傳輸有重大影響。在真實環境中，如貝因湖、高屏海底峽谷及水庫等狹長且邊界陡峭的水域，發生內波反射的邊界坡度都大於在實驗室使用的緩坡；而由於地形的關係，內波因反射而影響鄰近水體，所以在估算內波時，必須考慮反射的因素。因為損失部分或大部分的能量會導致內波的消(dissipation)但也有可能造成離開斜坡邊界的反射波。

自然界水體的內波運動通常發生在密度層化明顯的水體，當層化水體中的密度處於受到風力、潮流、地形等因素的影響，就能驅動內波產生。LeBlond and Mysak(1978)將內波在自然界的生成、運動消散機制分為五個部分：

(A)內波與海流的互動

(B)內波的消散

(C)波浪之間的交互作用

(D)風應力對內波的影響

(E)地形對內波的影響

如圖 1-1：

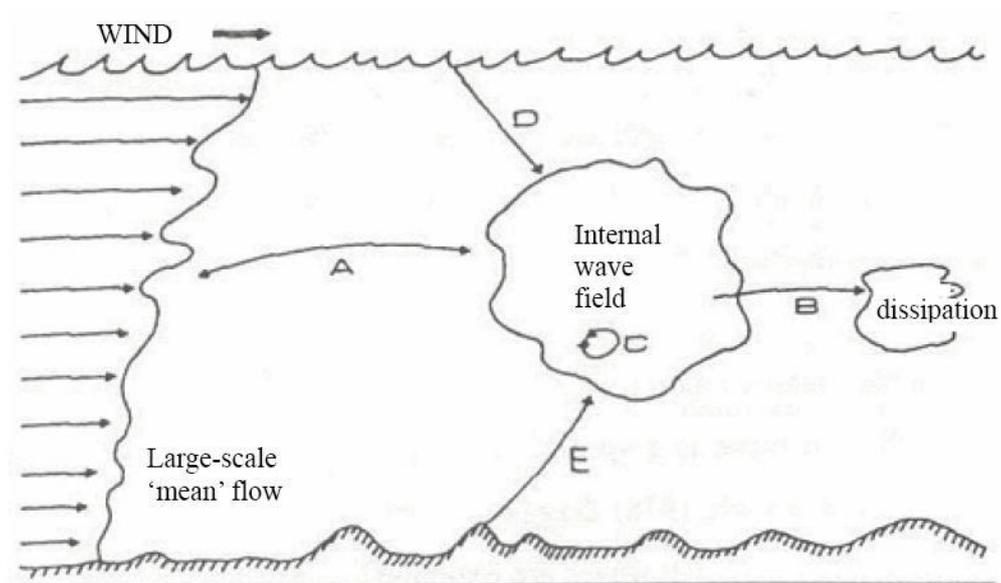


圖 1-1 內波生成、運動及消散機制示意圖(LeBlond and Mysak, 1978)

1.2 前人研究

在分層的海洋裡，內波是發生在不同密度變化之間，內波的產生對許多課題均有影響，例如，在設計海上設施時，鑽油平台等，也必須考慮到內波可能造成的破壞。由於在世界上某些特定的海域中，內波發生之頻率很高，內波影響海域之工程、生產、環境及軍事等活動，更彰顯對內波應用性研究的重要性。故研究內波的物理現象為海洋物理中一個重要的課題：以下依照前人造波方式分為連續內波、孤立內波、孤立波、表面波等研究進行文獻回顧。

Umeyama(2000, 2002)利用兩個大小不同的長水槽，以及使用質點影像測速儀技術和其它實驗儀器來探討高階理論公式解的適用性，並且量測出波型、密度分佈等分析圖。另外 Umeyama(2002)及 Umeyama and Shintani (2004, 2006)探討連續內波通過斜坡之溯上、混合等現象，並且探討波形的變化，計算出理論值與實驗值來相互比對，Umeyama 和 Shinomiya(2009)也利用 PIV 技術，探討高階理論公式解的適用性外，也展示了在不同時間點內波交接處流速上下相反以及整層流速剖面的分佈圖。

王瑋宏(2008)也在本實驗水槽，利用塌陷式造波方式，然後分別調配上下比例厚度不同的淡鹽水，造出上舉型和下沉型的孤立內波，再進而利用電容式波高計、超音內波計和其它相關儀器量測，並利用 PIV 量測系統，探討孤立內波粒子運動軌跡，驗證出內波交接處上下流速相反等現象。陳信旭(2004)在實驗內波水槽加入地形，並改變地形角度利用較大陡峭的斜坡角度 $\theta = 30^\circ$ 、 50° 、 60° 、 90° 、 120° 、 130° ，來探討孤立內波的傳遞及在單斜坡上的反射實驗，並利用高速攝影機拍射出孤立內波傳遞到地形產生碎波、擾動等現象。Michallet and Ivey(1998)提到內波傳遞至斜坡時，部分能量會消散，其餘能量則反射回傳。在各種不同控制條件下，所量測的反射率可以用無因次表示。即入射波物理量與反射波物理量的比值，並計算出內波能量 E ，其結果在斜坡角度越大，其反射能量比越大，當到達某一角度後(約 40°)，其反射能量比趨近一穩定值。

謝等人(2009) 利用高速攝影機之 PIV 量測系統，進行波動邊界層流場量測技術之研發，進而解析孤立波於水平及斜坡底床上邊界層流場之特 Sakakiyama and Liu(2001)利用雷射都普勒測速儀(LDV) 做了一連串的水槽實驗，來探討表面波傳遞後遇到地形產生碎波後，並利用 phase average、moving average 和 power spectrum 頻譜分析將波和紊流區隔出來，其結果會隨著不同垂直高度、水平方向而有所改變。

ADV 是最近發展出來觀測波浪的儀器，因此許多學者利用 ADV 來探討波跟流的相關性。Mazumder and Ojha(2007)利用 Acoustic Doppler Velocimeter(ADV) 和實驗造波水槽來進行實驗，並在垂直方向設置幾個量測點探討流速變化，其結果觀測流速會隨著垂直方向而改變。Stapleton and Huntley (1995)探討渦流相關法(eddy -correlation)簡稱 EC 法，以及頻譜分析並得到以下公式 $\tau = -\rho \overline{u'w'}$ ， τ 為剪應力， ρ 為水體密度。Wickley-olsen *et al.* (2008)探討規則波的傳遞，若波高越高產生碎波的情況則越明顯，並且進而產生擾動，擾動後能量進而產生消散，並可計算出消散率 ε 。

本研究為了更了解連續內波之流速剖面特性，利用 Micro ADV 來量測連續內波之水粒子流速變化，和波型變化，進而探討內波的物理現象。

1.3 研究動機和目的

內波的研究為海洋物理中一個重要課題，Umeyama(2000;2002;2004;2006;2009)主要是利用 PIV 技術探討連續內波高階理論公式解的適用性。若是大量的從直接速度觀測與波形觀測是否也能夠驗證連續內波理論公式解的適用性？在實驗水槽直接速度與波形觀測會與 PIV 技術所得到的結果有甚麼不同？而本文得到的觀測資料是否能在連續內波傳遞過程中，能有更多的新發現？在前人研究中較少人在探討連續內波水粒子運動的變化。本研究為了解答這些問題以及更了解連續內波之流速剖面特性，利用 Micro ADV 來直接量測連續內波之水粒子流速變化，進而探討連續內波的傳遞、溯上與消散過程，並探討直接觀測值與理論解之間的差異。在前人研究裡都將重點放在理論計算波形或是個別探討動能消散率 (ε)，本實驗把重點放在利用實驗水槽、造波器與儀器直接量測內波的水分子速度與波形，來探討上述這一連串物理現象，藉由改變不同週期、斜坡角度來加以討論內波的傳遞、反射與消散過程。

第二章、實驗設計與方法

2.1 實驗水槽設備和儀器

2.1.1 實驗水槽設備

1. 實驗水槽:

實驗所使用的水槽長 12 公尺、寬 0.5 公尺、高 0.7 公尺(如圖 2-1), 此實驗造波水槽兩側為透明之強化玻璃, 可目視整個波的傳遞過程。整個水槽底部共設置 20 個排水孔(如圖 2-3), 可提供放水排水的功能, 水槽前後兩端各設置一個造波槳, 一個為氣動式閘板另一端為 D 型造波槳(如圖 2-4)。

2. 氣動式閘板:

氣動式閘板設置在水槽左端約 30 公分處, 利用閘板升起之動作和搭配不同水體高度, 利用交接面落差製造出孤立內波。D 型造波槳在於水槽右端約 30 公分處, 利用馬達帶動造波槳, 可製造出表面波和連續內波。

3. 可調式數位板:

可調式數位板(如圖 2-6)可利用此數位板控制 D 型造波槳之轉速, 可調出 R1~R60 不同轉速, 利用 HHT 資料分析可計算出不同週期。另外設計了可調式斜板放置於水槽中段。

4. 可調式斜坡板:

可調整角度的厚鋼板(如圖 2-7), 長 2.5 公尺、寬 0.5 公尺、厚 0.01 公尺和長 3.5 公尺、寬 0.5 公尺、厚 0.01 公尺, 藉由斜板擺設角度變化以產生不同斜坡角供實驗使用。斜板側邊與水槽交接處會黏上不透水海棉已填滿水槽兩側與水槽玻璃壁間空隙, 防止滲漏, 並與斜板底部與底床交接面也放置一塊薄海綿以減少因斜板厚度與水槽底部所產生的渦漩(vortex)。

5. 鹽水攪拌箱:

自動鹽水攪拌水箱(如圖 2-9)為容量 2.5 立方公尺的鋼製水箱, 在攪拌箱底部有一部葉片馬達, 其功能是將所需要的工業用鹽份量和攪拌箱裡面的水徹底攪

拌，在以小型抽水馬達(如圖 2-10)將水抽到實驗造波水槽，供實驗使用。每一包工業用鹽為 50 公斤，和鹽水攪拌箱的水體依照比例搭配可配置出不同密度。體積約 150cm×150cm×100cm(長×寬×高)的水體要調配 1030kg/m³，需要放置 3 包工業用鹽(如圖 2-11)。當鹽水配置好後可先利用密度計(如圖 2-12)測量看是否達到所需要的密度，若不夠可在加上工業用鹽達到所需要的密度。

6. 儀器載具：

因為使用儀器設計量測點使用了儀器支架和儀器移動載具(如 2-13)，儀器支架上有刻度可量垂直升降之移動距離支架上可裝 MICRO ADV、超音內波計、表面波高計、密度剖面計等量測儀器，以利儀器垂直升降方便實驗率定和量測垂直方向剖面流速。儀器載具則可固定儀器支架，其底部有四個滑輪，能沿水槽上方鋼架水平移動，方便儀器水準方向的移動及架設。

2.1.2 觀測儀器與軟體

1. Micro ADV:

本實驗我們使用了 MICRO ADV(MICRO Acoustic Doppler Velocity)，MICRO ADV 是由 SonTek 所製造的(如圖 2-14)，是一個量測單點的儀器，儀器取樣頻率最大可達到 50 Hz，MICRO ADV 有三個接收發射端分別代表 U、V、W 三個方向的流速，MICRO ADV 在不同密度需要改變聲速的值，在做實驗之前要先做 check beam 這個動作，目的是為了要確定儀器是否正常動作和確定離底距離以及 correlation 的值是否達到可使用值，實驗中所量測到的點為三個發射端的交集點，約離發射端 5 公分處(如圖 2-15)，量測點體積約為 1cc，MICRO ADV 所量測出的資料有 U、V、W 三方向流速、corrleation、SNR，和 meanSNR、mean corrlection、mean speed，由於是一種聲學儀器，故需要在實驗水體中加入粒子，以增強回聲強度並提高信雜比，本研究購買了高嶺土來增加粒子濃度，將 corrleation 提高到最大值。Micro ADV 的垂直測量位置可由儀器架做調整，從

連續內波上方到下方均有涵蓋，以獲得整層流速剖面。

2. 超音內波計:

超音內波計(ultrasonic probe)(如圖 2-16)包括超音波探棒及主控主機(如圖 2-17)，購置法國 Grenoble，以供量測內波的振幅和波形，利用超音波在不同介質中不同傳遞的原理，紀錄分水層界面之波動，超音波探棒前端裝置超音波發射/接收器(emitter and receiver)，可向下發射超音波，在正下方有設銅板反射器(reflector)，將超音波回傳致探棒前端發射/接收器。超音波示意圖如圖因為超音波在每一種介質中的速度都不一樣，當上層水體厚度由 h_1 變為 h_2 時，因超音波由發射銅板反射器(reflector)至接收的時間改變，訊號傳回超音波計主控主機，主機內有處理晶片，可計算出在不同厚度液體中從發射到接收的時間差，在轉為電壓值輸出，便能得到界面層隨時間的變化，由於超音波計利用超音波反射的原理，往往會有包括二次、三次反射波及水面或底床反射波等的雜訊，所以在做實驗之前，我們需要利用示波器來調整超音波計來找出最佳訊號。

3. 表面波高計:

自動歸零容量電容式表面波高計(wave gauge and amplifier)(WHP-50)(如圖 2-18)與放大器(WHA-000)為國內盛邦科技公司所製造。波高計量測範圍為 52 公分，可將水位變化轉換成電壓值訊號，在經數位轉換卡轉換成可供電腦讀取的數位資料，經軟體計算可得波高波形等資料。

4. 類比數位轉換卡:

類比數位轉換卡(如圖 2-22)(A/D 轉換卡)(型號 PCL818-H)和數位轉換器(型號 CLD-789)為國內研華科技公司所研發，可將由波高計和超音內波高計量測得所輸出的數個電壓類比訊號，經轉接卡整合後，連接 A/D 卡，將資料轉成數位資料，供電腦讀取及軟體處理。

5. 數位示波器:

數位示波器(如圖 2-23)(digital oscillograph)，為 Tektronix 公司出品，型號為 TDS202 的數位示波器，有四個外接頻道及一個觸發頻道，具 200MHZ 頻寬，

搭配型號 TDS2MEM 通訊模組，可直接將量測結果儲存於 CompactFlash 記憶卡中。
在本實驗中，使用示波器校正及調整超音波計量測波形。

6. 使用軟體：

使用成大水工試驗所自行研發的中文套裝軟體(MNDS)來擷取數據，該套軟體能即時記錄 A/D 卡輸出之數位資料，並儲存成 binary 格式檔案，或轉換成 ASCII 格式之功能。使用電腦為 ASUS K40IN series 和個人電腦，安裝前述類比數位轉換卡(A/D 轉換卡)，套裝軟體(MNDS)，及 MATLAB 程式語言，可記錄實驗數據供日後分析變化使用。錄影方面是以數位攝影機架設在所要量測之位置，並利用軟體來處理影像，記錄整個實驗傳遞到斜坡之變化。

實驗儀器和設備：



圖 2-1 造波水槽(12m×0.5m×0.7m)



圖 2-2 造波水槽內部



圖 2-3 排水進水孔



圖 2-4 連續內波造波槳(D型槳)



圖 2-5 孤立內波造波槳



圖 2-6 轉速器



圖 2-7 斜坡放置水槽內部



圖 2-8 斜坡放置水槽內部(正面)



圖 2-9 鹽水槽



圖 2-10 抽水馬達



圖 2-11 工業用鹽



圖 2-12 密度計



圖 2-13 放置儀器載具



圖 2-14 Micro ADV

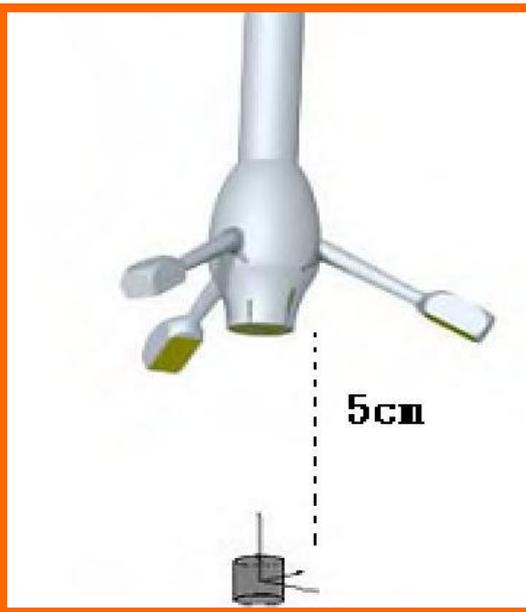


圖 2-15 量測點離音鼓位置圖



圖 2-16 超音內波計



圖 2-17 超音內波計主機



圖 2-18 電容式波高計



圖 2-19 電容式波高計主機



圖 2-20 密度剖面計



圖 2-21 轉接盒



圖 2-22 A-D 卡



圖 2-23 示波器

2.2 實驗設計

2.2.1 實驗條件

本實驗在長 12 公尺、寬 0.5 公尺、高 0.7 公尺的內波斷面水槽進行實驗。於水槽中佈置淡、鹽水分層之兩層水體系統(two-layer fluid system)；上層為淡水、下層為鹽水，上層淡水密度約為 1000kg/m^3 ，下層約為 1030kg/m^3 ，故上下水層密度差約 30kg/m^3 ，上下水層水深約維持在 $H_1+H_2=10\text{公分}+35\text{公分}=45\text{公分}$ 。

本實驗造波方式是利用 D 型造波槳上下造波擺動。D 型造波槳設置在水槽最右邊，並在水槽右端算來約 4 公尺處架設移動載台，在載臺上放置 Micro ADV、超音波高計、表面波高計(如圖 2-24，因圖為平面，實際上 Probe2、Probe3 和 Micro ADV 放在在同一個位置)，另外在另一個載臺上放置密度剖面計。利用這些儀器來量測粒子流速、表面波波形、內波波形以及密度剖面分佈。

在水槽右端 4 公尺處放置一個長約 2.5 公尺的斜坡板，並在頂端設計可調式的功能，能輕易調整斜坡角度，如圖 2-25 所示。並在斜板上設置可開關式的斜板，能在剛開始放置水體時讓淡鹽水流通。在斜板側邊兩水槽交接處黏上不透水海棉條以填滿斜板兩側與水槽玻璃壁間之空隙，並在斜板底部放置一片軟墊以減少與斜板厚度與水槽底部間之不連續交接所引起的局部渦漩(vortex)。

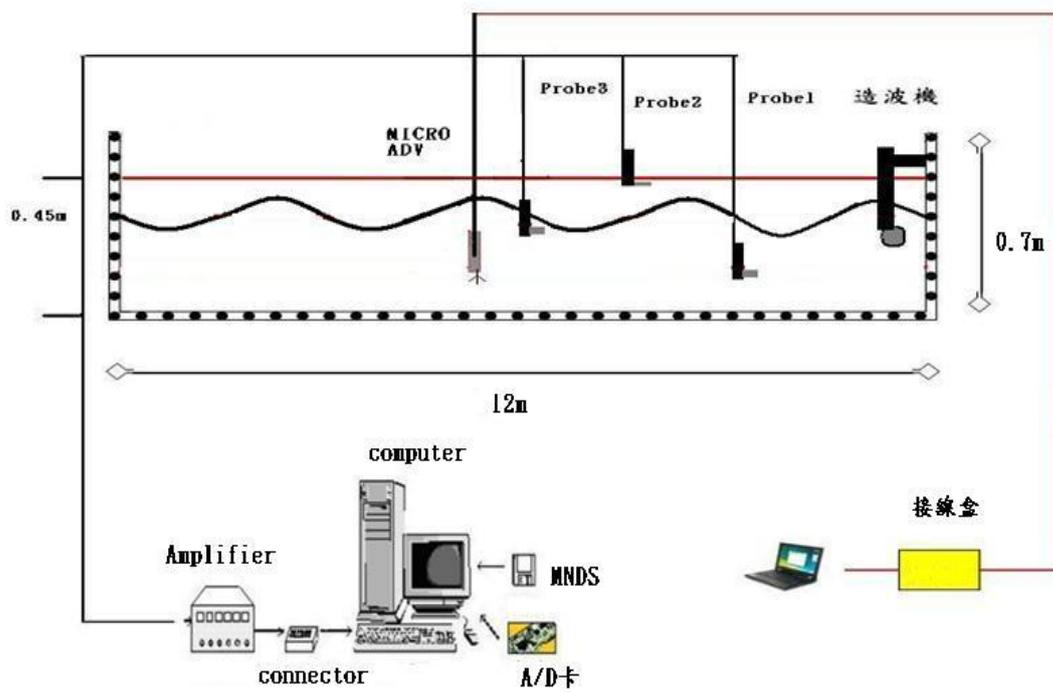


圖 2-24 實驗架構圖

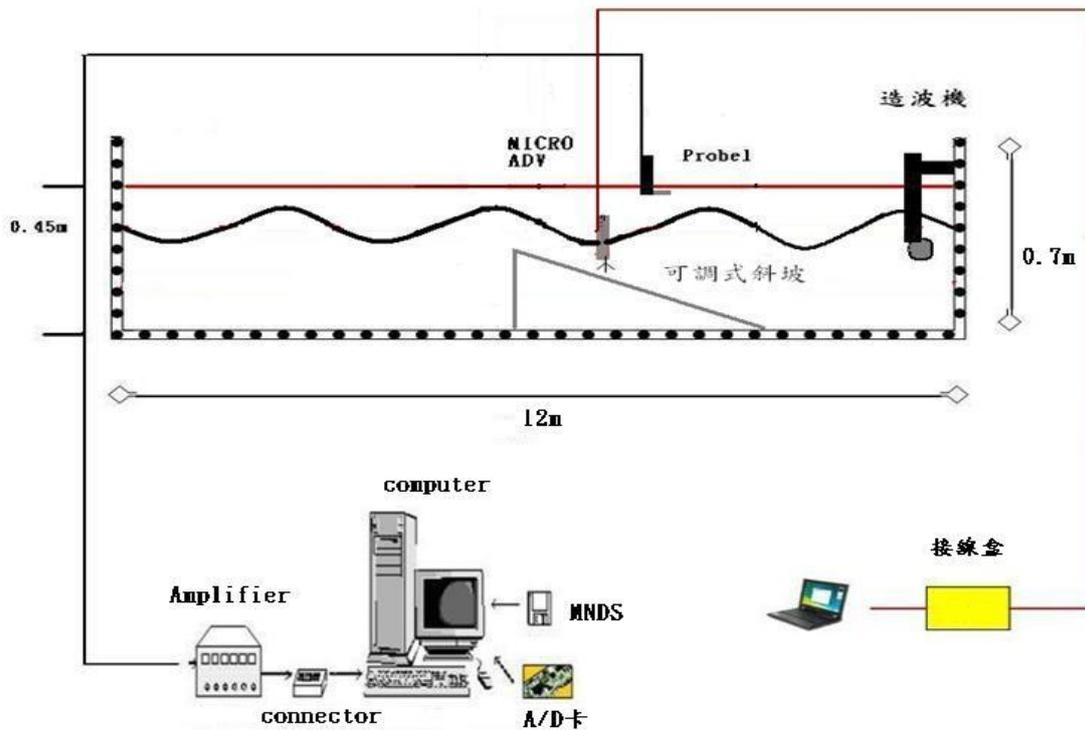


圖 2-25 放置斜坡實驗架構圖

實驗採分層注入染液方式可視化觀察。利用 Micro ADV 量測三維流速，超音波波高計量測內波波型，電容式波高計量測表面波波型，密度剖面計量測密度剖面分佈，在垂直面上設計了約 15 個量測點來進行實驗。

Micro ADV 是 SonTek 所製造的，由於 Micro ADV 是一種聲學儀器，故需要在實驗水體中加入粒子，以增強回聲強度並提高信雜比。Micro ADV 所量測到的流速為一單點，此一單點為 x y z 三軸所交集而成的一點，離音鼓約 5 cm，Micro ADV 的垂直測量位置可由儀器架做調整，從連續內波上方到下方均有涵蓋，以獲得整層流速剖面。

所有儀器之取樣頻率均為 25Hz，資料長度為五分鐘。造波方式是以馬達帶動 D 型槳，利用馬達之不同轉速，可搭配出不同週期。本次實驗設定馬達轉速 R=60、50、40，所得到的資料帶入計算得到週期分別為 2.5s、5.5s、6.6s。

利用斜坡可調整角度在本實驗設計了 8° 、 9.4° 、 11° ，並利用畢氏定理來計算出底和高的長度，進而設計好要量測的點。因為每個實驗角度都會改變，故所量測的點也會跟著改變，如下圖 (2-26)、(2-27)、(2-28) 所示。

在我們的這幾次實驗中(1)R60, $1030\text{kg}/\text{m}^3$ (2)R50, $1030\text{kg}/\text{m}^3$ (3)R40, $1030\text{kg}/\text{m}^3$ (4)R60, $1010\text{kg}/\text{m}^3$ (5)R60, 淡水(6)R60, $1030\text{kg}/\text{m}^3$ ，斜坡角度 11° (7)R60, $1030\text{kg}/\text{m}^3$ ，斜坡角度 9.5° (8)R60, $1030\text{kg}/\text{m}^3$ ，斜坡角度 8° ，我們將以下列編號代表各實驗:(1)A1030 (2)B1030 (3)C1030 (4)A1010 (5)A1000 (6)A1030_11 (7)A1030_9.4 (8)A1030_8，其中檔案編號 A 代表轉速 R60，B 代表轉速 R50，C 代表轉速 R40，1030、1010 與 1000 代表水體密度，_11、_9.4 和 _8 代表斜坡角度，如表格 2-1 所示。

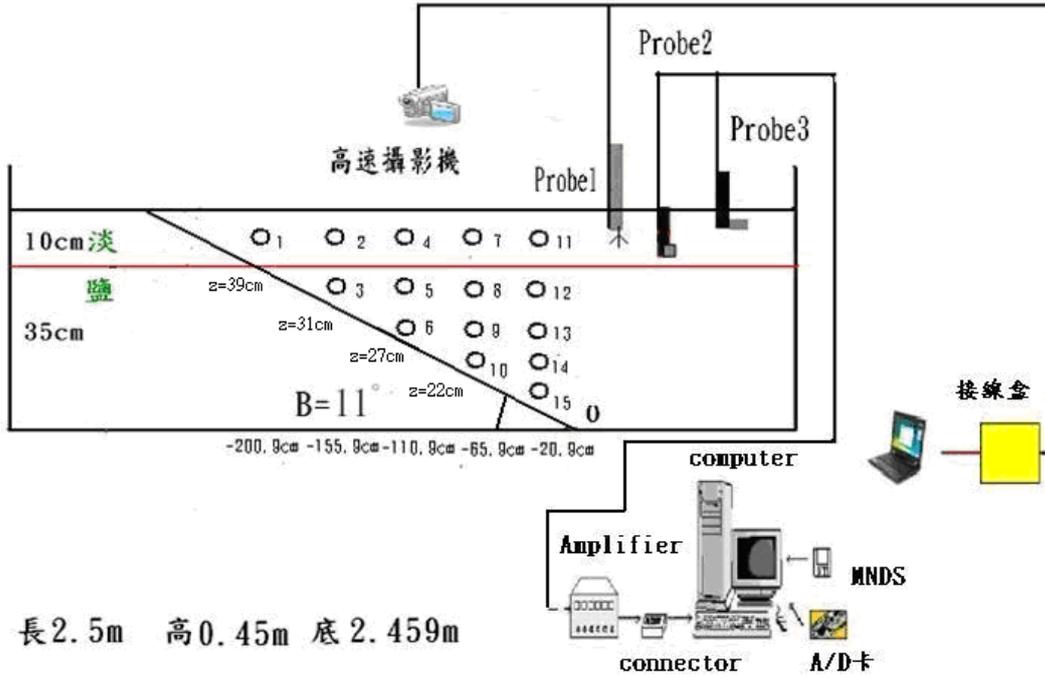


圖 2-26 角度 11 度實驗架構圖

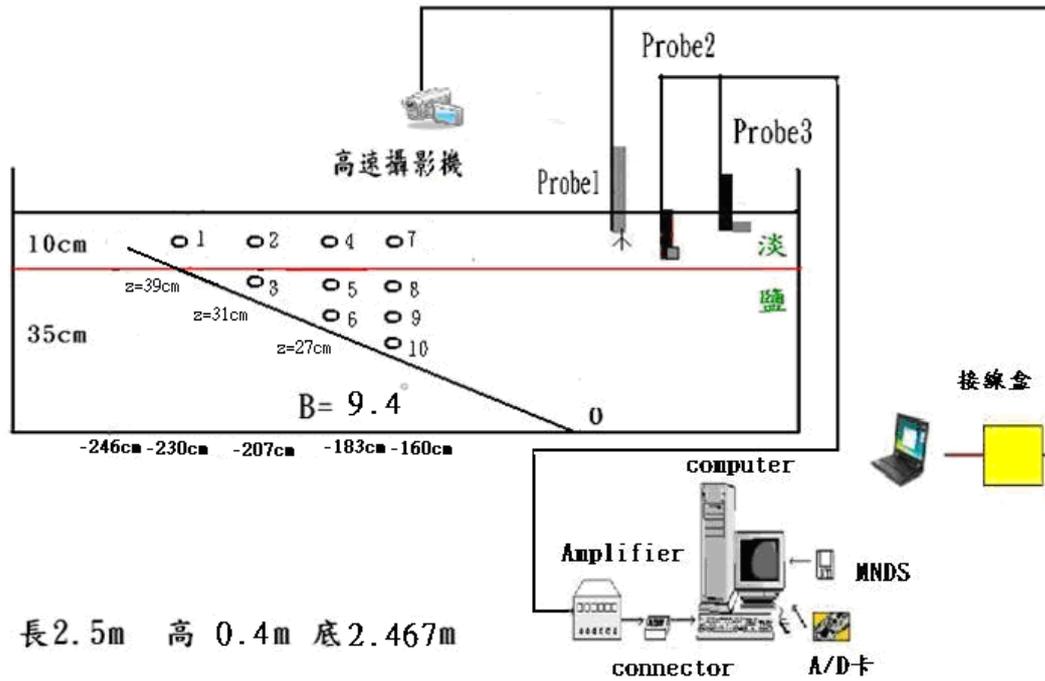


圖 2-27 角度 9.4 度實驗架構圖

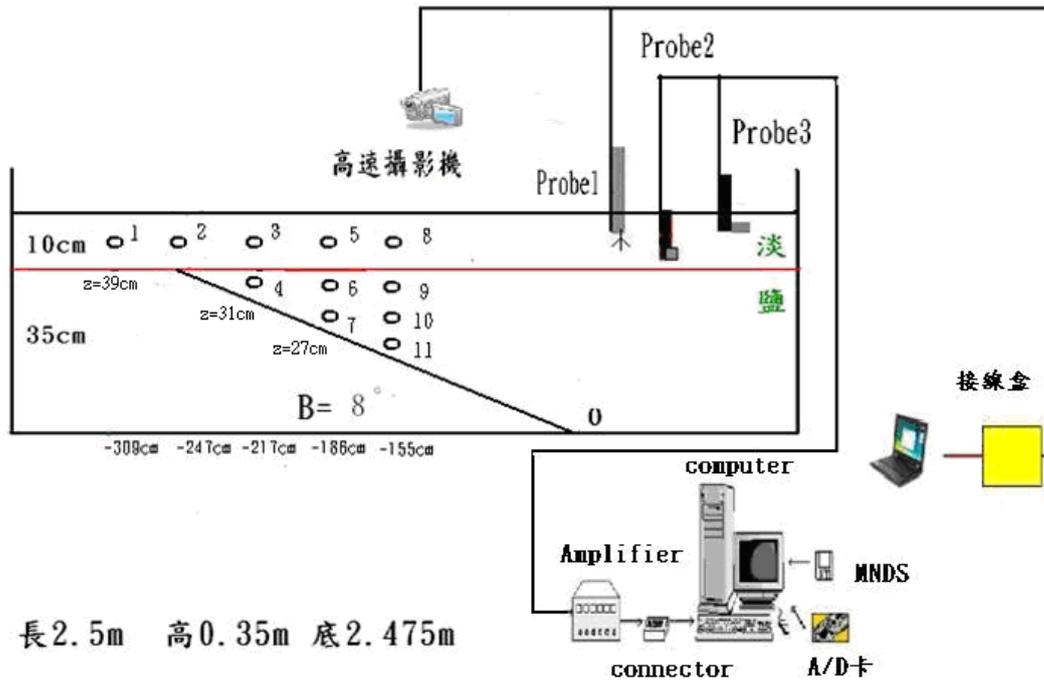


圖 2-28 角度 8 度實驗架構圖

表格 2-1 實驗條件總整理

實驗條件				實驗量測結果		
實驗編號	轉速	密度 (下層)	斜坡角度	週期	Surface wave height	Internal wave height
A1030	R60	1030kg/m ³	斜坡角度 0°	T=2.5s	1.8 cm	4.5 cm
B1030	R50	1030kg/m ³	斜坡角度 0°	T=5.5s	0.8 cm	3.2 cm
C1030	R40	1030kg/m ³	斜坡角度 0°	T=6.6s	0.5 cm	2.1 cm
A1010	R60	1010kg/m ³	斜坡角度 0°	T=2.5s	N/A	N/A
A1000	R60	1000kg/m ³	斜坡角度 0°	T=2.2s	N/A	N/A
A1030_11	R60	1030kg/m ³	斜坡角度 11°	備註：實驗首寫 A 表示轉速 R60 實驗首寫 B 表示轉速 R50 實驗首寫 C 表示轉速 R40 密度代表下層 1010kg/m ³ 和 1030kg/m ³ ，上層皆 1000kg/m ³ N/A: 沒取得此實驗資料		
A1030_9.4	R60	1030kg/m ³	斜坡角度 9.4°			
A1030_8	R60	1030kg/m ³	斜坡角度 8°			

2.2.2 實驗過程

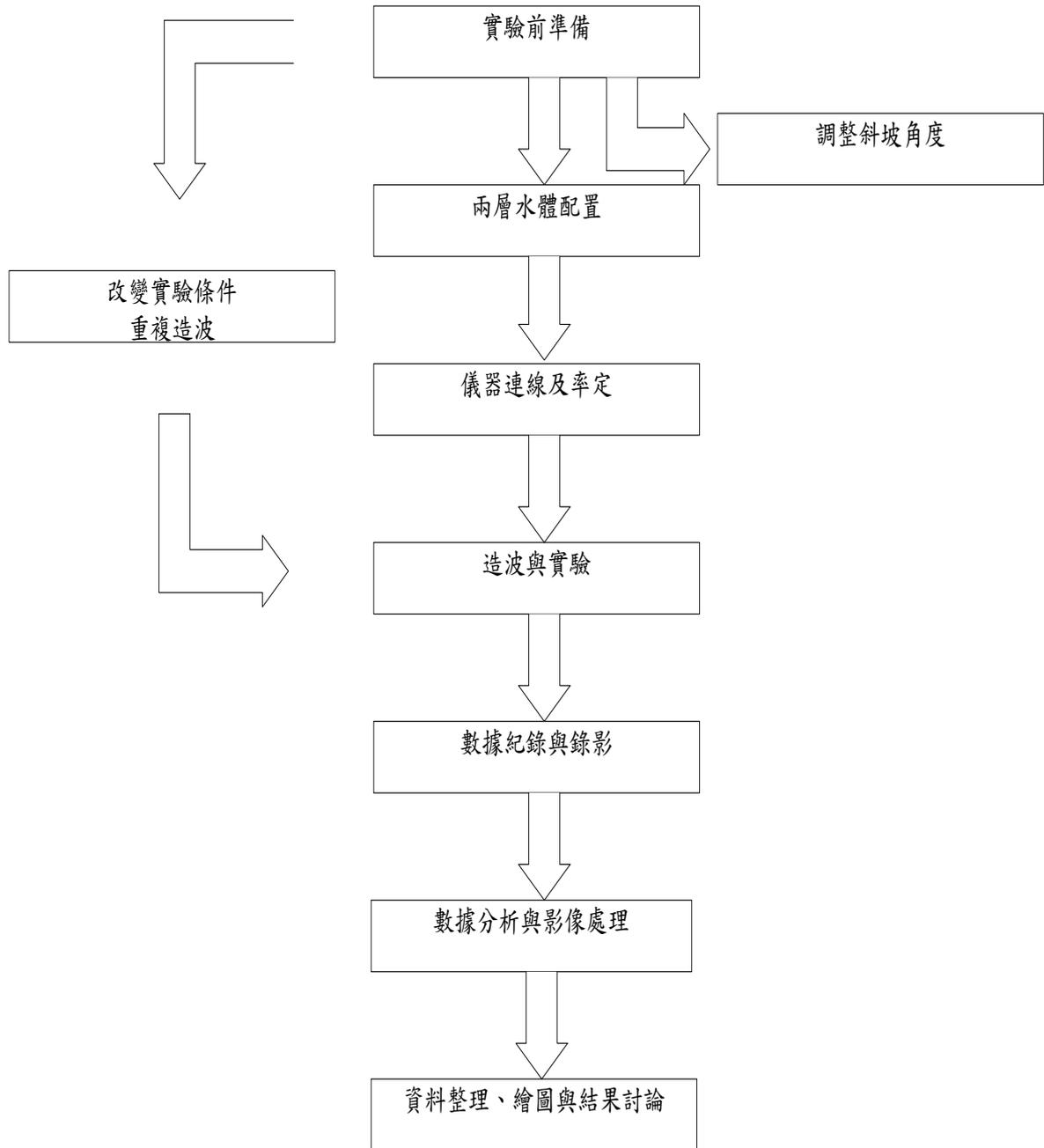


圖 2-29 實驗步驟圖

在水槽右端約 20 公分處把電源開關打開後，調整控制面板，便可調整造波槳的轉速，當造波槳打到水體後，造波槳底端約離水槽底部 38cm。

每支測波儀器(超音波高計和表面波高計)均分別裝載在劃有刻度可垂直升降的儀器支架上，以提供實驗佈置及儀器電壓值率定所需進行的儀器高度調整。該儀器支架分別固定在儀器載具上。儀器載具是為內波水槽而設計，各載具下裝有四個滑輪可行走於造波水槽上方設置之軌道，使測波儀器能於 12 公尺長的水槽上方自由移動，及供儀器調整水準方向佈置。

將超音波計、密度剖面計及波高計分別裝備在有垂直刻度儀器支架後，再將儀器支架固定於儀器載具。架設時應注意測波儀器擺設的方向，以減少儀器本身對波形所造成的干擾。

另外在於水槽外側面黏貼刻尺，作為儀器率定時的輔助及內波觀察的數據參考。並於背後透明玻璃處黏貼螢光色珍珠板，以利攝影、拍照及觀察。

照相、攝影器材的架設：本實驗使用數位式錄影機一台，架設在內波傳遞區到斜坡區斜板前方，以觀察拍攝內波在水槽中傳遞及斜坡上變化的動態現象。

於水槽底部共 20 個流體注入孔，於各孔位放置包裹過濾海綿的鐵網，以有效的降低住水時的水壓確保佈置兩層流體時，鹽水擴散的均勻性與阻止分水層之混合，且能達到過濾水質的功能。

依據實驗設計共有四種不同的斜坡角度，將斜坡板放置水槽中間固定斜坡角度後，調整斜坡放置位置，距水槽 D 型造波槳約 4 公尺。斜板定位後，需檢查斜板側邊與水槽內壁交界處之不透水海棉是否發揮功能，填滿斜板兩側與水槽玻璃壁間空隙，以防滲漏。並於面板底部敷治一片薄橡皮軟墊，以減少因斜坡厚度與水槽底部間不連續交界所引起局部渦漩(vortex)。

在本實驗水槽中佈置下層 35 公分的厚度需要用粗鹽約需要 130 公斤。水體佈置需在實驗前一天於鹽水槽中先注入淡水，並在攪拌水箱中儲放實驗所需鹽水之水量，放置一夜，使水溫與周圍環境溫度相同。實驗時，在於攪拌水槽中加入所需之粗鹽，均勻攪拌使其成為使水體密度為 1030kg/m^3 的鹽水，在由抽水馬達，

將鹽水抽入攪拌水箱上方之注水箱，以定水頭方式將鹽水由水槽底部之一系列注入孔緩緩地注入水槽，鹽水則會自然慢慢抬升上方的淡水層；在注入鹽水的過程中，需要注意隨時調整注入孔之水量大小，以避免鹽水注入太快或太慢影響淡、鹽水分層結果。由於淡鹽水分層會因造波實驗的進行會逐漸混合，當分層水體進行約 10~15 來次造波實驗後便認定無法繼續使用，需要重新佈置水體。

將測波儀器組、轉接器及資料處理電腦連線並開啟電源，並將超音波計連接示波器由示波器，調整超音波計訊號，以利波高資訊之量測。

實驗所使用之測波儀器組，測得之表面波及內波波高變化輸出為電壓值，在進行實驗之前，為求實驗波高/電壓比的準確性，必須對實驗儀器做校正率定，使實驗儀器達到最佳狀況，確保量測所得之實驗紀錄的準確性，每支超音波計及表面波高計均裝備於一支具刻度可垂直升降之儀器支架，可用於儀器電壓值率定：率定的波高計分別向上下移動數公分，紀錄各電壓變化，並將儀器回歸原基準位置；在波高計的率定方面，就實驗設計及理論而言表面波高變化較微小，故只需以水面為基準。測波儀器需在每次儀器開機時率定，以其率定結果為率定值。每支完成電壓值率定程式儀器加上於基準點位置電壓值，利用線性迴歸，再訂定該儀器該次造波實驗之波高/電壓比值(volt/cm)。

測波儀器組所量得的電壓值經資料處理電腦之 A/D 卡轉換成數位資料，再由國立成功大學水工試驗所開發之中文套裝軟體 MNDS 記錄。

錄影方面是以數位攝影機架設在所量測之位置，並利用軟體來處理影像，記錄整個實驗傳遞到斜坡之變化。

第三章、資料分析方法

3.1 流速資料分析

儀器量測資料方面，本研究使用儀器 Micro ADV 所測得：三維流速資料，分別為 X 方向的速度 U、Y 方向的速度 V、與 Z 方向的速度 W，三軸訊號 correlation、三軸 SNR。並利用 Micro ADV 流速資料的 U 和 W 速度來做一連串的資料分析，因為 V 是水槽側向流速，影響到的流速範圍很小，而 U 是波沿著水槽水平方向的速度，W 則是水槽垂直方向的速度。流速品質的好壞需要靠 correlation 和 SNR 來判斷，在實驗時我們必須加入粒子以增加水體粒子來提高 correlation 和 SNR 值，讓 correlation 值在 70% 以上，以提高實驗的準確性。利用 Micro ADV 原始資料來分析出整層剖面流速、平均流速垂直剖面流速 U 與 W 分布。利用 W 流速資料來探討 power spectrum 頻譜分析，並計算出剪應力 τ 、摩擦速度 u^* ，以及把流速的原始資料經過 EMD 的方式處理，來探討理論值與實測值的不同。另外利用 U 流速資料來計算出反射率，可以很明顯的從原始資料看出入射流速和反射流速。利用 Phase average、bin average、moving average 將波和 turbulence 給區分開來，並計算出消散率，來一一探討其相關性。

3.2 表面波、內波資料分析

利用測波儀器組（包含超音內波計密度剖面計及波高計）量測內波及表面波波高變化，儀器輸出均為電壓值變化值，輸出至電腦經 A/D 卡轉換，交由 MNDS 軟體紀錄與轉換得到電壓值數據的純文字檔案，稱為原始電壓值（原始數據資料檔）。實驗所使用之測波儀器組，測得之表面波及內波波高變化輸出均為電壓值變化，在進行實驗之前為求實驗準確的波高/電壓比，必須對實驗儀器做校正率定，使儀器達到最佳狀況，確保量測所得之實驗紀錄的準確性。並利用超音內波計及波高計的原始資料來做分析，波形隨時間的變化以及波形隨流速的變化來加以分析。

3.3 HHT(Hilbert Huang Transform) and EMD (Empirical Mode Decomposition)

黃鐸博士(Huang et al.1998)在英國倫敦皇家學會期刊上提出經驗模態解 EMD (EMPIRICAL MODE DECOMPOSITION METHOD)，根據近代之名數家 Hilbert 的數學理論設計做為分析非穩態及非線性的訊號的新資料解析方法，由篩取資料變化的內部局部時間尺度做為能量，直接分析得到許多組內建模態函數 (Intrinsic Mode Function, IMF)分量將內建模函數做為基底展開，經過希爾伯特轉換(Hilbert Transform HT)可得到局部的即時能量及瞬時頻率，提供整個訊號的能量頻率時間的分佈，即為希爾伯特頻譜(Hilbert Spectrum)。

經驗模態分解法具有(1)完整性：可確保資料分解的精確度；(2)可適性：可運用在非線性及非穩態條件上，可表達原訊號之物理意義；(3)局部性：可使訊號表現出瞬時之特性及 (4)正交性：以保持能量的正定等優點，故經驗模態分解法完全改變以往對於非線性、非穩態訊號幾乎束手無策的窘境，解決傳統訊號分析必須在線性及穩態的狀態下才能解析出有意義結果。此方法對非線性或非穩態定性之歷時訊號特性較其它方法有更佳的解析能力。

Huang et al. (1998)提出一個新方法，來分解非線性及非平穩性的資料，及討論這種分解的物理意義。與所有先前方法不一樣的是，這個方法是直覺的、直接的以及可適性的，分解的基本是從原來的訊號推導而來的。這方法名之為經驗模態分解法(The Empirical Mode Decomposition，簡稱 EMD)，這是一種移動處理 (Sifting Process) 的方法。

這個 EMD 分解法是基於下列假設：

1. 訊號必項至少要有兩個極值：一個極大值和一個極小值。
2. 訊號的特徵時間尺度是定義成兩個極值之間的時間差。
3. 如果資料全無極值，但只包含曲點，那可將訊號微分一或多次，將極值找出來，最後結果可由分量積分而得到。利用 EMD 方法將主要週期和其它副週期分隔出來，進而來探討實驗和理論的比較。

3.4 理論公式解

由於波峰波谷的粒子流速是很上下均勻對稱，故計算出來的平均流速約為零，Umeyama(2002)，和 Umeyama 和 Shinomiya(2009)推導出實驗水槽內波理論公式，分別可計算出上下層任何一點 U 和 W 流速以及表面波和內波理論解(如圖 3-1)，本研究也比較出類似的結果。因為 Micro ADV 是一個高頻儀器，故所量測出的流速很有可能會受到雜訊影響，除了主要週期之外還會受到其它副週期所影響，本文將 Micro ADV 所量測到的流速資料經由 EMD 處理，將雜訊濾除，進而比較實驗和理論兩者的差異。

$$\eta_1 = a_1 \cos(kx+qt) \quad (3-1)$$

$$\eta_2 = a_2 \cosh(kx+qt) \quad (3-2)$$

$$U_1 = -nk[A \cosh(nkz) + B \sinh(nkz)] \cos(nqt) \quad (3-3)$$

$$W_1 = -nk[A \sinh(nkz) + B \cosh(nkz)] \sin(nqt) \quad (3-4)$$

$$U_2 = -nk[C \cosh(nk(z+h_2)) + D \sinh(nk(z+h_2))] \cos(nqt) \quad (3-5)$$

$$W_2 = -nk[C \sinh(nk(z+h_2)) + D \cosh(nk(z+h_2))] \sin(nqt) \quad (3-6)$$

U_1 : 上層水平流速、 W_1 : 上層垂直流速、 U_2 : 下層水平流速、 W_2 : 下層垂直流速、 n :

階數、 K : 波數、 Z : 離交界面的距離、 q : 常數 t : 時間、 η_1 : 表面波波高

η_2 : 內波波高 a_1 : 計算值 a_2 : 計算值

h_2 : 下層厚度、 A : 常數、 B : 常數、 C : 常數、 D : 常數

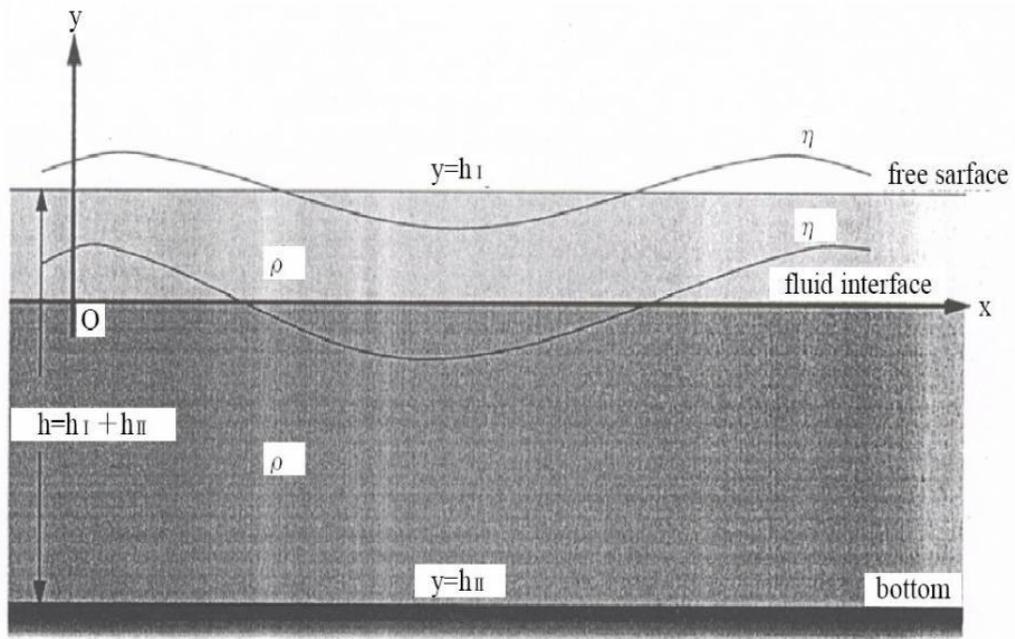


圖 3-1 理論架構圖 (Umeyama 2002)

3.5 反射率和反射能量計算

反射率 R_a :

為表面波反射實驗所定義的反射係數 R (reflection coefficient) 量化離開內斜坡邊界向深水區前進之反射波。

$R_a = a_r/a_i$ ，其中 a_r/a_i 為入 / 反射波波形之振幅

$R_a = E_r/E_i$ ，其中 E_r/E_i 為入 / 反射波波形之能量 (Michallet and Ivey, 1998)

上式中之 a_r/a_i 分別為內入射波和反射波的波高。由實驗值討論不同尖銳度的波浪傳遞至不同角度之斜坡邊界處時反射係數 r 的變化，發現內波的反射係數與表面波非常相似，當坡度非常平緩時，反射係數非常小，當坡度漸增，反射係數 R 接近一個臨界值常數。圖 3-2 中顯示當 $\theta > 30^\circ$ ，反射率接近一個臨界值。

反射能量:

Michallet and Ivey (1998) 以下式計算能量

$$E(\text{內波能量}) = c g \Delta \rho \left(\int_{t_0}^{t_1} \eta^2(t) dt \right) \quad (3-7)$$

在上式中， $\Delta \rho = \rho_2 - \rho_1$ ，為上下水體密度差， g 為重力加速度， C 為波相速度， t_0 與 t_1 為週期時間

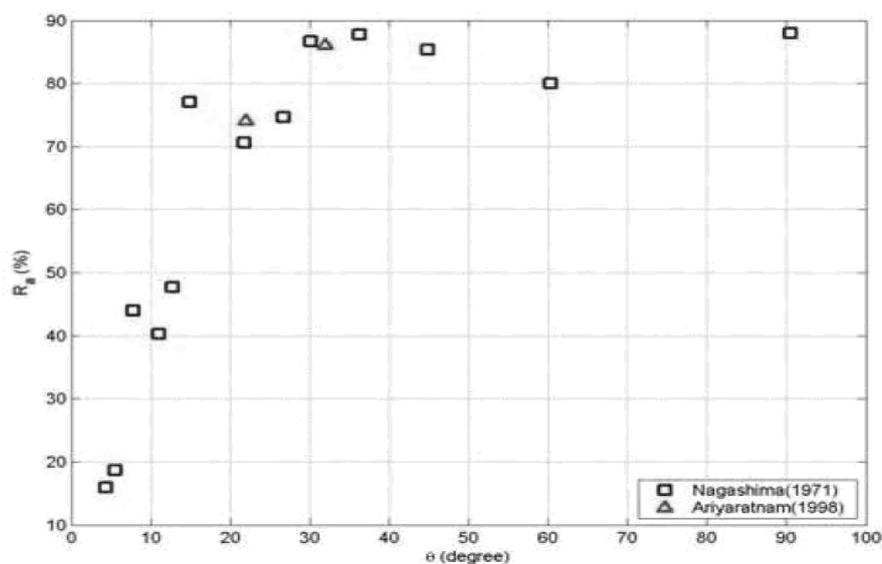


圖 3-2 斜坡角度與反射率 (Nagashima 1971, Ariyaratnam 1998)

3.6 剪應力和消散率的估算方法

3.6.1 TKE (turbulent kinetic energy) 法

TKE 法和渦流相關性法很相似，但此法可以利用頻譜圖把波浪影響的因素去除掉，所以能精確的計算出底層受海流影響所產生的剪應力，以下為 TKE 法計算剪應力的公式：

$$\text{TKE} = \bar{e} = 1/2 (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) \quad (3-8)$$

(Soulsby, 1983) 定義在邊界層中，底床剪應力和 turbulent kinetic energy density 成正比關係，而此比例常數定為 0.19，可得以下公式：

$$\text{剪應力 } \tau = 0.19 \times \rho \times \bar{e} \quad (3-9)$$

u ：平行水道流速， $u' = u - \bar{u}$ 。

v ：橫向水道流速， $v' = v - \bar{v}$ 。

w ：垂直方向流速， $w' = w - \bar{w}$ 。

ρ ：密度。

功率譜密度(Power Spectrum Density, PSD) (Stapleton and Huntley, 1995)：

$$[p, f] = \text{psd}(\text{vertical}, \text{nfft}, \text{fs}, \text{window}, \text{overlap})$$

vertical = W 流速。

fs = 取樣頻率。

nfft = 計算筆數，2 的次方。

window = hamming(nfft)，矩形窗用來平滑。

overlap = 重複筆數。

3.6.2 慣性消散 (inertial dissipation) 法

慣性消散法的理論為：水流在邊界層中因摩擦所減弱的速度和所產生的動能是守恆的，計算方式是在頻譜中的 wave number (k) 和 spectral energy 之間，找出符合斜率-5/3 關係的範圍，這範圍稱為次區間 (sub-range of the spectrum)，在次區間內能量耗散的速率為一定值，所以再從消散率去推算亂流，而本研究是使用 W 流速數據計算頻譜再算出剪應力：(Stapleton and Huntley, 1995)。慣性消散法計算方法在附錄一。

當內波傳遞經過斜坡發生淺化時，由於剪應力不穩定 (shear instability) 和流體黏滯性的衰減等原因，導致斜坡上水體中紊流及混合的發生，甚至造成內波的碎波，而使得內波大部分的能量消散。利用 power spectrum 分析結果得到 -5/3 進而再推導出 ε ，可得到 $\varepsilon = u_*^3 / kz$ (3-10)

K ：von Karman 常數 (0.4)。 z ：儀器距離底床的高度。

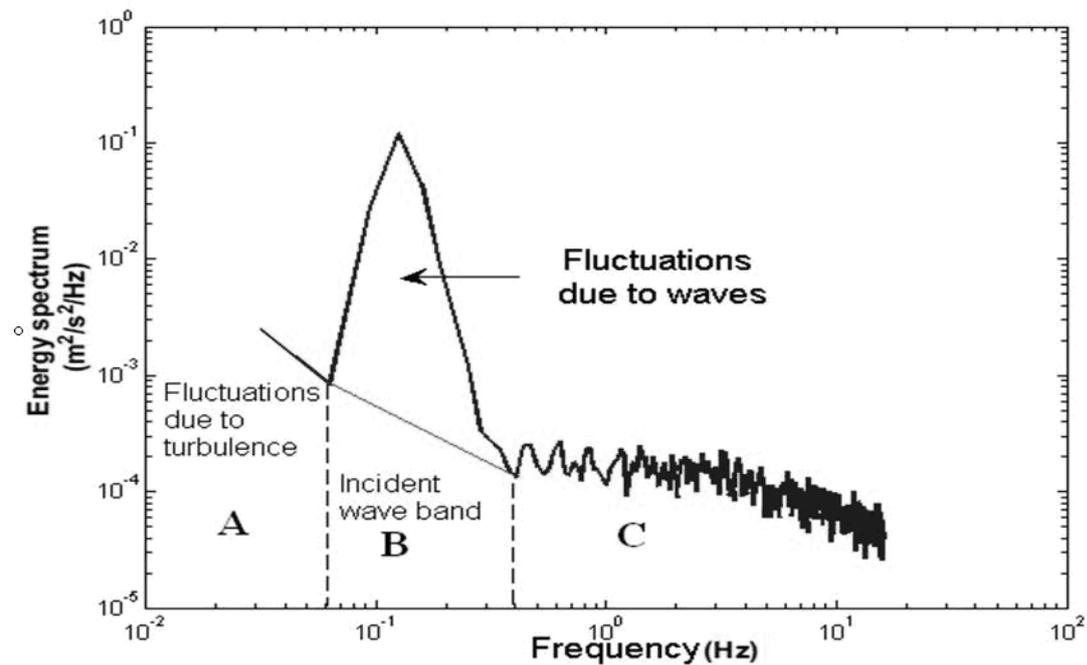


圖 3-3 power spectrum 入射波和擾動 (Stapleton and Huntley, 1995)

3.6.3 自相關(auto correlation)法

為了利用 auto correlation 來計算消散率，為了將波跟 turbulence 分開本文會使用了點平均法(bin average)、移動平均法(moving average)、相位平均法(phase average)，本文引用了 Sakakiyama and Liu(2001)所使用的方法。如下圖 3-4(1)為 bin average 的資料分析方法，假設有 n 筆資料點，在決定以其中幾筆來做平均，圖 3-4(1)中取 3 筆來做平均，以此類推下去……。

如下圖 3-4(2)為 moving average 的資料分析方法，假設有 n 筆資料點，在決定以其中幾筆來做 moving average，圖 3-4(2)中取 3 筆來做 moving average，先把第一筆第二筆第三筆做平均，然後再第二筆第三筆第四筆做平均，以此類推下去……。

Phase average 的方法是以原始流速資料畫出的圖型，在一個流速波形裡會有包含好幾個小 peak 在利用這些小 peak 自行取幾點來做平均(如附圖 3-5)。此三種方法可以將波動和擾動給區隔開來，進而利用擾動資料來分析。

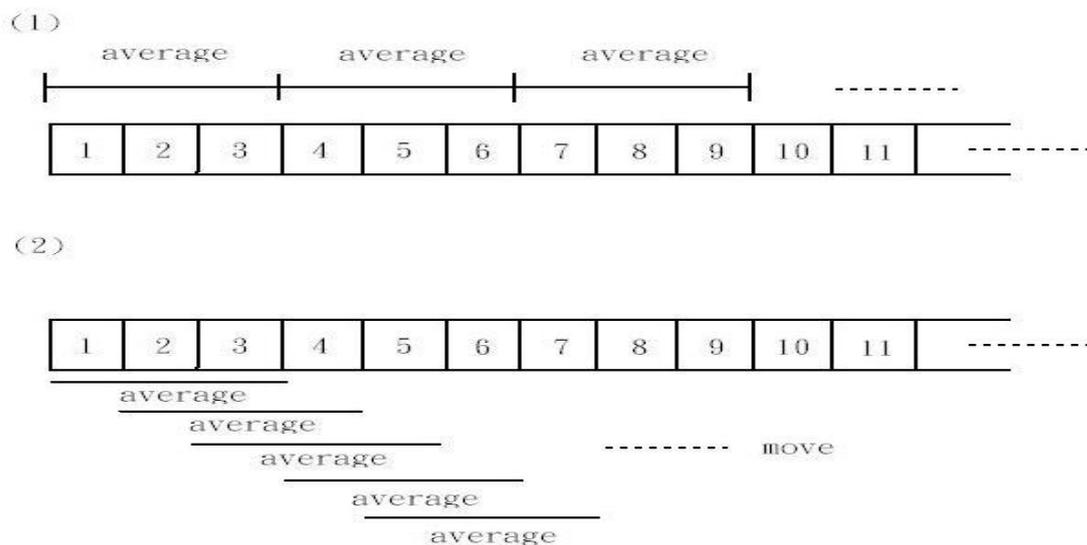


圖 3-4 bin average 、moving average

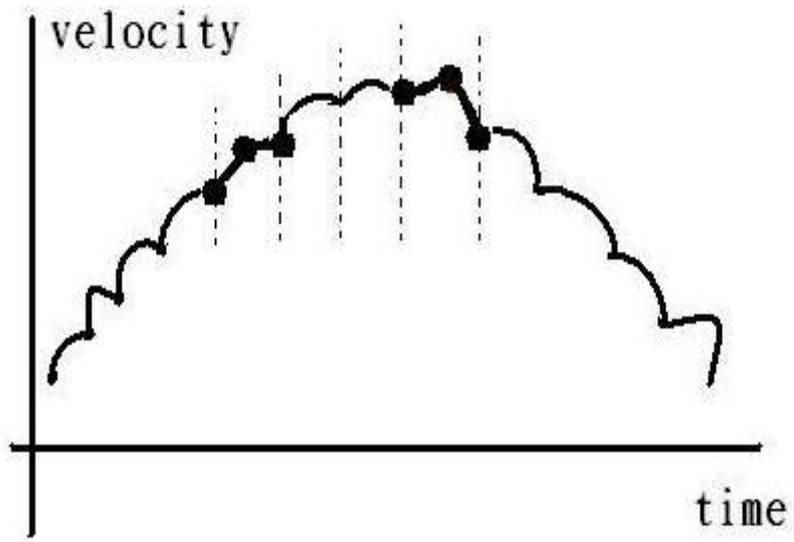


圖 3-5 Phase average

Wu et al. 1989 ; Kresta et al. 1993 推導出

$$U_i(s,t) = (\overline{U_i}(s) + \tilde{u}_i(s,t) + u_i'(s,t)) \quad , i=x,y,z \quad (3-11)$$

U_i 是時間序列， u_i 的成分是 turbulence，此方法是將原始流速資料，利用 moving average 的方法將波動和擾動給分隔開來，然後再將擾動的資料，利用 moving average 的方式將波動和 turbulence 給區隔開來使用以下公式再加以計算 R_{Ei} (temporal autocorrelation function)。

$$R_{Ei} = \frac{\overline{u_i(t)u_i(t+\tau)}}{u_i'^2} \quad (3-12)$$

注意： R_{Ei} 是假設同一個方向，在(20)式中 R_{Ei} 的積分範圍由 $0 \sim \infty$ ，(Wu et al. 1989)。在(19)式中，當 $\tau = 0, 1, 2, 3, \dots$ 時，會分別對應出一組 R_{Ei} ，再將計算結果帶入 τ_{Ei} 積分，

$$\tau_{Ei} = \int_0^{\infty} R_{Ei} dt \quad (3-13)$$

與

$$\varepsilon = A \frac{(u_{rms}')^2}{\tau_{Ei}} \quad (3-14)$$

τ_{Ei} : 是積分時間尺度

u_{rms}' 是紊流速度分量的均方根值，A 是一個常數 (one in this work)

ε : 消散率 (m^2/s^3)

第四章、實驗結果與討論

4.1 內波流速剖面及物理特性

在本實驗中因為量測波型主機及 A-D 卡老舊，會影響到內波和表面波的量測時間但不影響 Micro ADV，故量測時間上會比正常時間還要慢大約 1.51 倍的差距，也就是說正常時間跑了五分鐘，內波計主機才跑了約三分二十秒。

4.1.1 無斜坡

圖 4-1(A)(B)為實驗編號 A1030 中自由表面波動和流體界面波動圖，橫軸為時間序列，縱軸為波形變化，由圖顯示因為儀器放置在相同點位(X 方向和 Z 方向皆相同)，故相位皆相同。因為水槽設計關係，造波槳造波方式會產生表面波高，內波和表面波會相互拉扯，進而相互影響。因為是在表面造波，所以一定會有表面波產生，表面波會衰減，主要受內波影響，連續內波一定會有表面波存在，只是長週期連續內波比較不明顯。

週期越短，內波影響上層的距離越短，所以表面波也較大，無法減弱表面波，雖然兩者影響不大。故可看出在實驗 A1030 時($T=2.5s$)時，表面波高會比較明顯。

圖 4-2(A)(B)(C)為實驗 A1030 中表面波和流速比較以及內波波高和流速比較圖，A 圖為離底 37.5cm(第二點)流速，B 圖為自由表面波動，C 圖為流體介面波動，可以很清楚的看到三者間的關係性，也是因為將儀器架設在同一個位置上，故三者的相位大致上呈現一致性。

圖 4-3、4-4、4-5 分別為實驗編號 A1030、B1030、C1030 HHT 時頻分析圖，是將波高帶入計算，橫軸為週期。在圖 4-5 中週期前後兩端點有發散現象，研判是該轉速所產生的主波含兩個左右的主週期或是副週期的波高較大計算出的能量導致也較大，所以在圖中沒有出現單一主週期為主的圖形。因為儀器所量測到的時間比正常時間還要慢了約 1.5 倍，故所計算出的週期也慢少了 1.5 倍→圖 4-3: $2 \times 1.5=3s$ 、圖 4-4: $3.5 \times 1.5=5.25s$ 、圖 4-5: $4 \times 1.5=6s$ 。故三個轉速波週期約為 3s、5.25s、6s。如表 4-1。

圖 4-6 是實驗 A1030 中表面波波形實驗-理論對照圖。圖 4-7 是實驗 A1030 中內波波形實驗-理論對照圖。實線為原始波高資料，圈圈為理論計算值。對照後結果相當接近。

在波峰處，內波上方會呈現和波向相反的流速，在內波下方會呈現和波同向之移動流速，垂直方向流速也會比較大，反之在波谷處，內波上層會呈現和波同向移動的流速，在內波下層會呈現和波反向之移動流速。圖 4-8 是來自國立中山大學王瑋宏的碩士論文，利用 PIV 系統來觀測孤立內波之粒子運動軌跡，如圖所示也是呈現上下粒子運動相反之現象。

在本文的實驗裡面，我們將流速和波形比較如圖 4-9(A)(B)(C)。圖 4-9(A) 圖為密度交界面上方的點，(B)圖為密度交界面下方的點，(C)圖為內波波形圖，(A)圖的方向和(C)圖是反向，(B)圖的方向和(C)圖是同向，再進而比較(A)(B)兩圖，得知：內波上下流速相反。

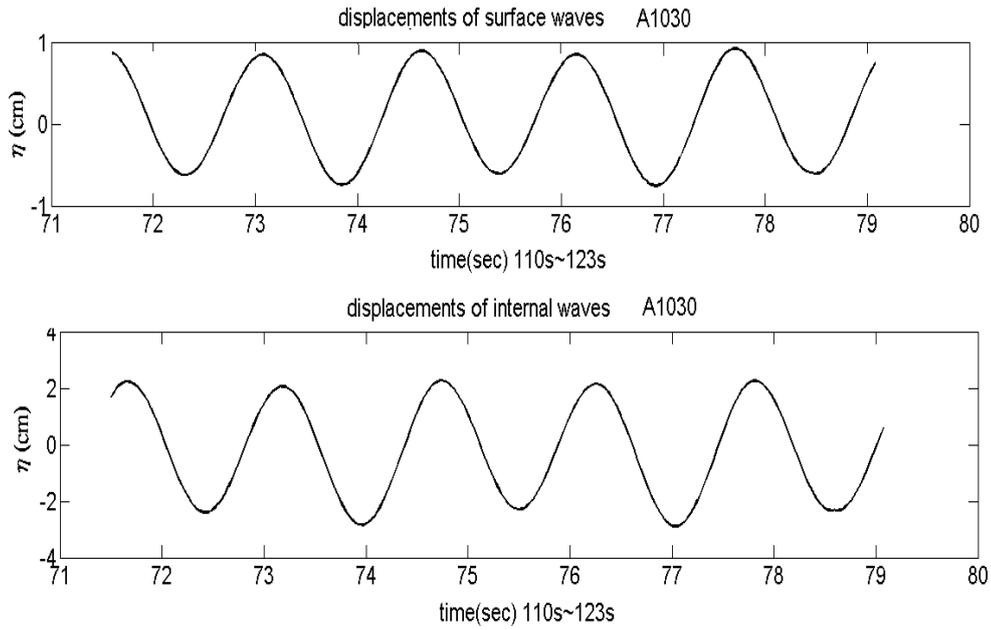


圖 4-1 實驗 A1030(A)自由表面波動(B)流體介面波動

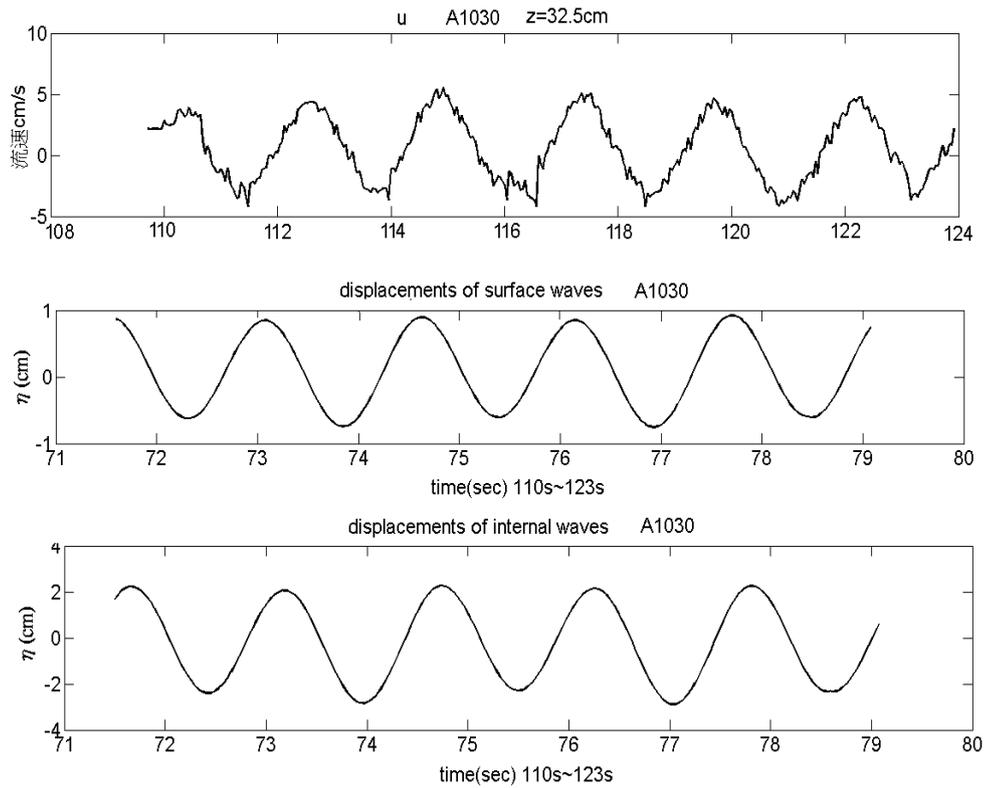


圖 4-2 實驗 A1030(A)流速 (B)自由表面波動(C)流體介面波動

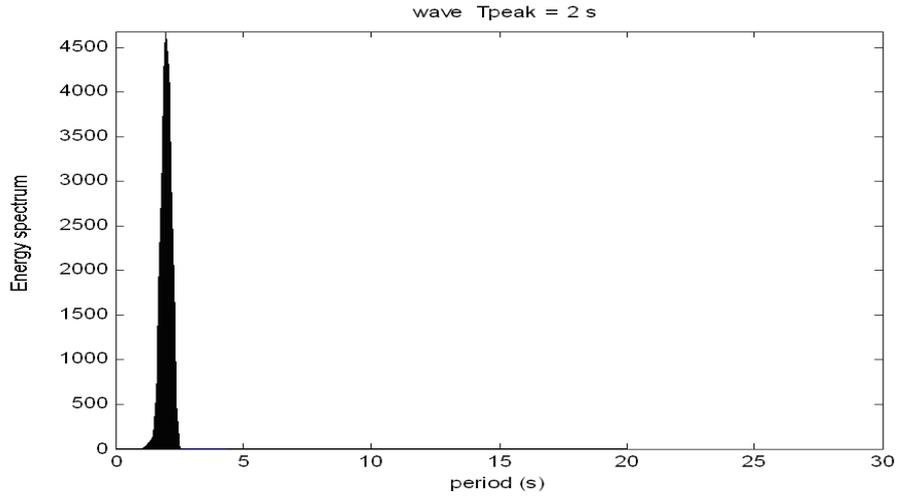


圖 4-3 實驗編號 A1030 HHT 時頻圖 內波波動分析圖

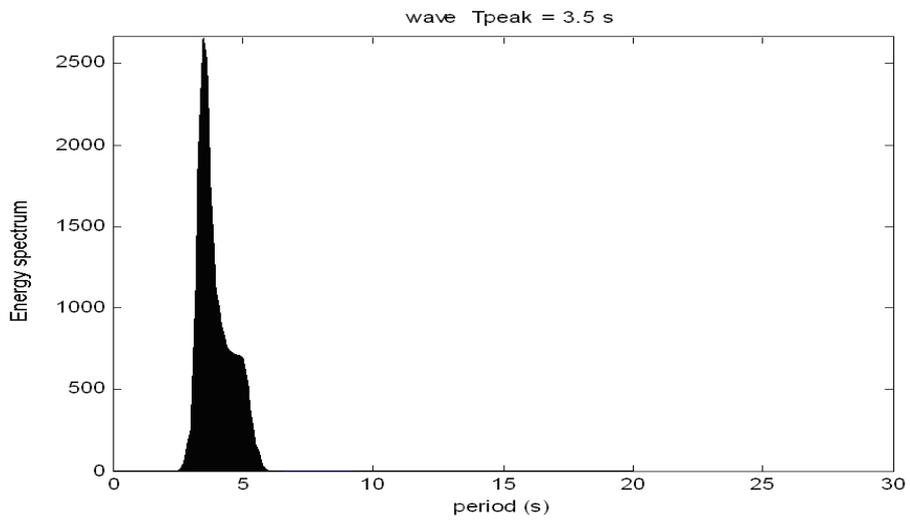


圖 4-4 實驗編號 B1030 HHT 時頻圖 內波波動分析圖

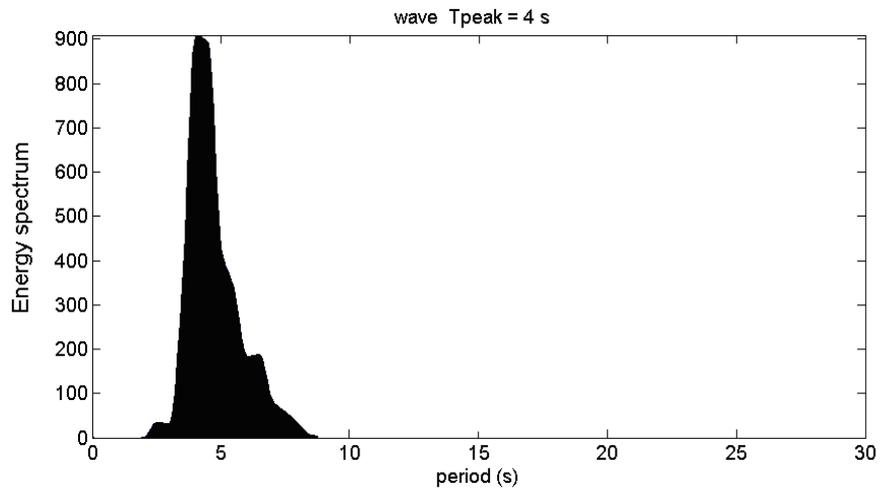


圖 4-5 實驗編號 C1030 HHT 時頻圖 內波波動分析圖

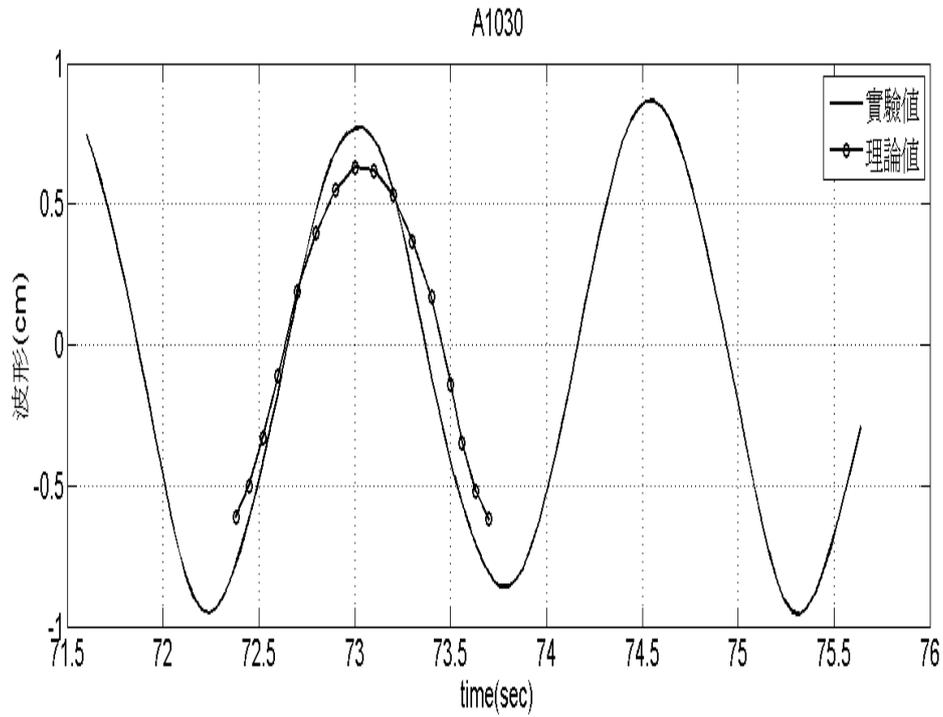


圖 4-6 實驗 A1030 自由表面波動 實驗-理論對照圖。
 圈圈線表示理論值、實線表示實驗值

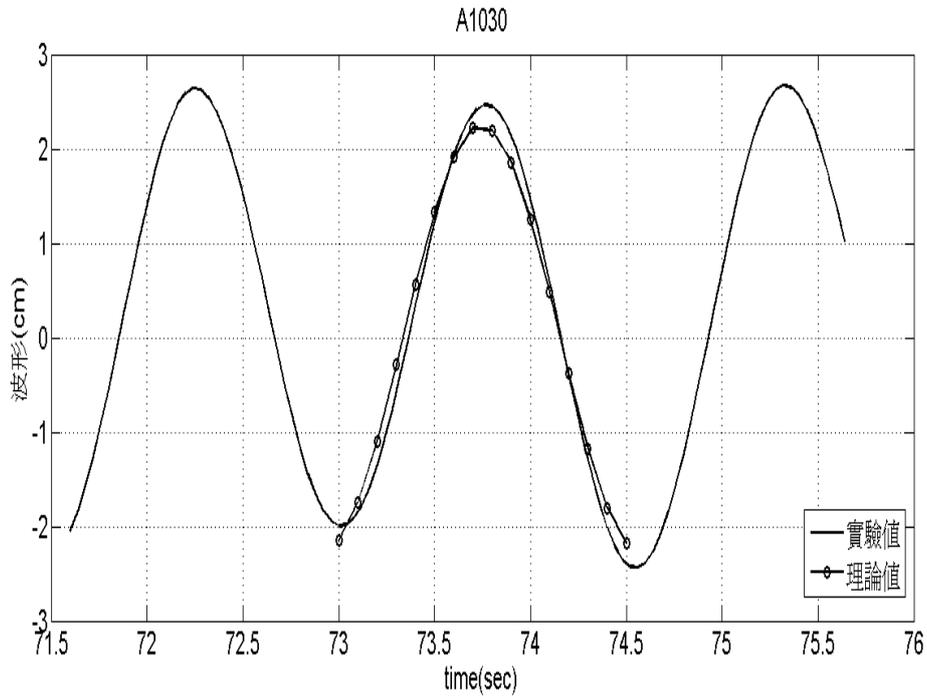


圖 4-7 實驗 A1030 流體介面波動 實驗-理論對照圖。
 圈圈表示理論值、實線表示實驗值

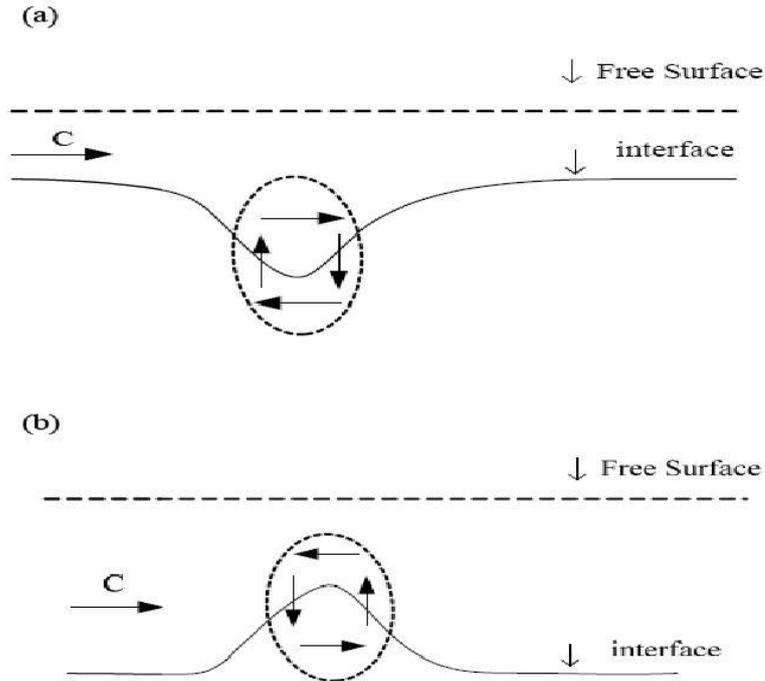


圖 4-8 內波在(a)波谷處 (b)波峰處內波上下流速相反
(王瑋宏，2008)

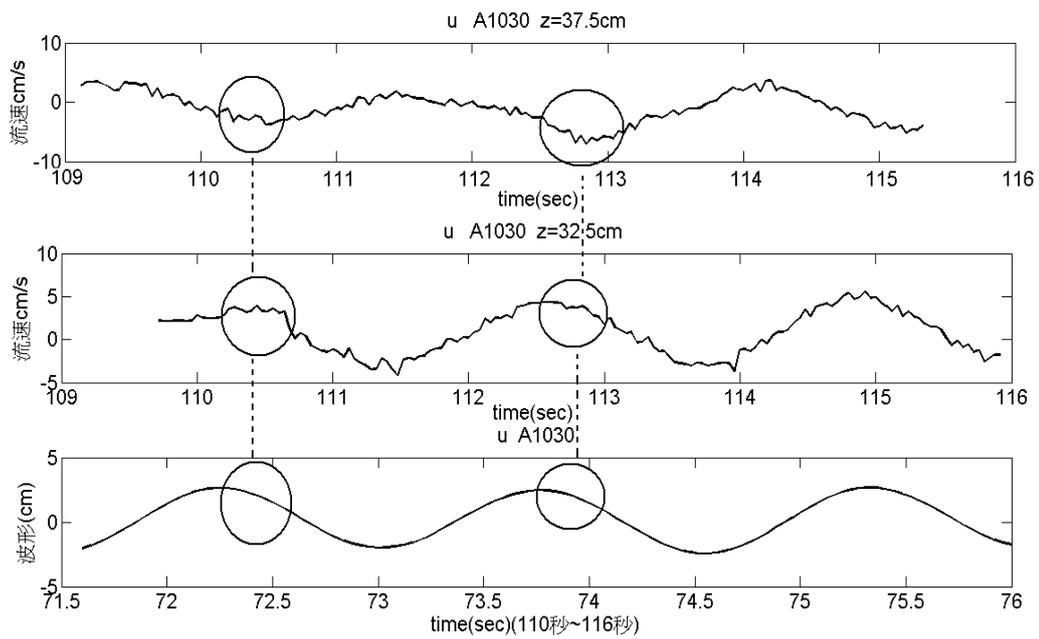


圖 4-9 實驗編號 A1030(A) 密度交接處上方(離底 37.5cm)(B) 密度交接處下方(離底 32.5cm)(C)波形 內波上下流速相反

表 4-1 各實驗週期

轉速	週期	
	超音波高計	Micro ADV
R60	3s	2.5s
R50	5.25s	5.5s
R40	6s	6.6s

圖 4-10(A)(B)(C)、4-11(A)(B)(C)分別為實驗編號 A、B、C，為 Micro ADV 量測出來的原始資料，為內波交接處的量測點，橫軸為時間序列(2000 筆資料，約 80 秒)，縱軸為流速。在轉速 R60 實驗中最大流速可達到 $U=4.5\text{cm/s}$ ， $W=1.4\text{cm/s}$ ，在實驗 B 實驗中最大流速可達到 $U=4\text{cm/s}$ ， $W=1.2\text{cm/s}$ ，實驗 C 最大流速可達到 $U=2\text{cm/s}$ ， $W=0.8\text{cm/s}$ ，可以很清楚的看到連續內波的流速上下擺動很平均。

根據量測結果顯示，若轉速調大，連續內波的週期會比較短，內波振幅會比較大，粒子流速就會比較大，在靠近密度交接處，所得到的 U 流速最大，越接近底層，流速也就會越小，因為造波槳所接觸到剛好在水層的最上方，又因為摩擦力導致越接近下層流速越小。如圖 4-12 橫軸為 velocity，縱軸為無因次化的離底高度（量測點/總水深），綠色圈圈部分為流速最大處。

在轉速實驗中最大流速可達到 $U=4.5\text{cm/s}$ ， $W=1.4\text{cm/s}$ ，最大振幅可達到 2.3cm 左右，若轉速調小，週期較長，所得到的流速、振幅就會比較小。圖 4-13、4-14 為實驗編號 A($T=2.5\text{s}$)、實驗編號 B($T=5.1\text{s}$)、實驗編號 C ($T=6.6\text{s}$)的 U 和 W 流速，橫軸為時間序列縱軸為流速，虛線圈圈為 A1030 的流速值，實線菱形為實驗 B1030 的流速值，實線圈圈為實驗編號 C1030 的流速值，如圖 4-14 色圈圈部分，在內波交接處 W 方向流速會比較大，是因為粒子在交接處呈現橢圓方式上下運動。橫軸為 velocity，縱軸為無因次化（量測點/總水深）。

圖 4-15 為密度 1010kg/m^3 和放置完全淡水的整層剖面流速分布圖，橫軸為時間序列縱軸為流速，實線圈圈為實驗編號 A1000 完全淡水的流速值，虛線圈圈為實驗編號 A1010 的流速值，其結果和實驗 A1030 是一致的。橫軸為 velocity，縱軸為無因次化的離底高度(量測點/總水深)。但 1010kg/m^3 流速會較小，是因為上下層密度差變小，導致內波能量變小，故流速變小。

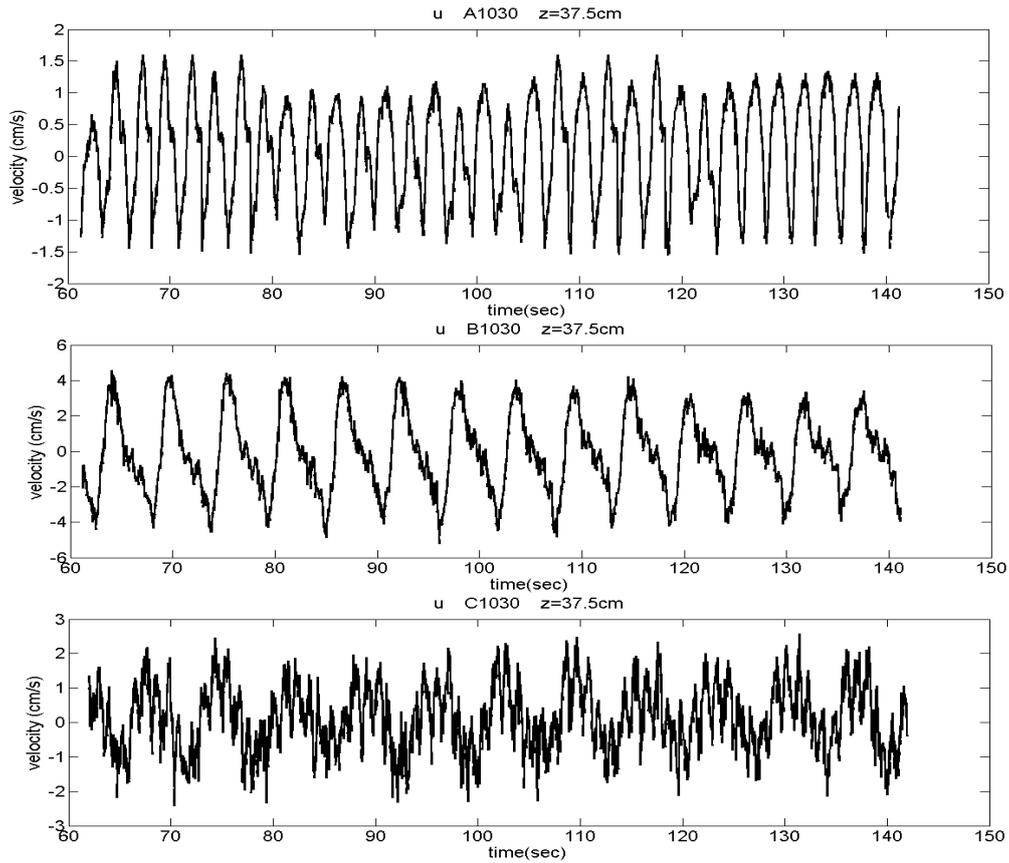


圖 4-10 (A)實驗編號 A1030(B)實驗編號 B1030(C)實驗編號 C1030
U 方向原始資料(離底 37.5cm)

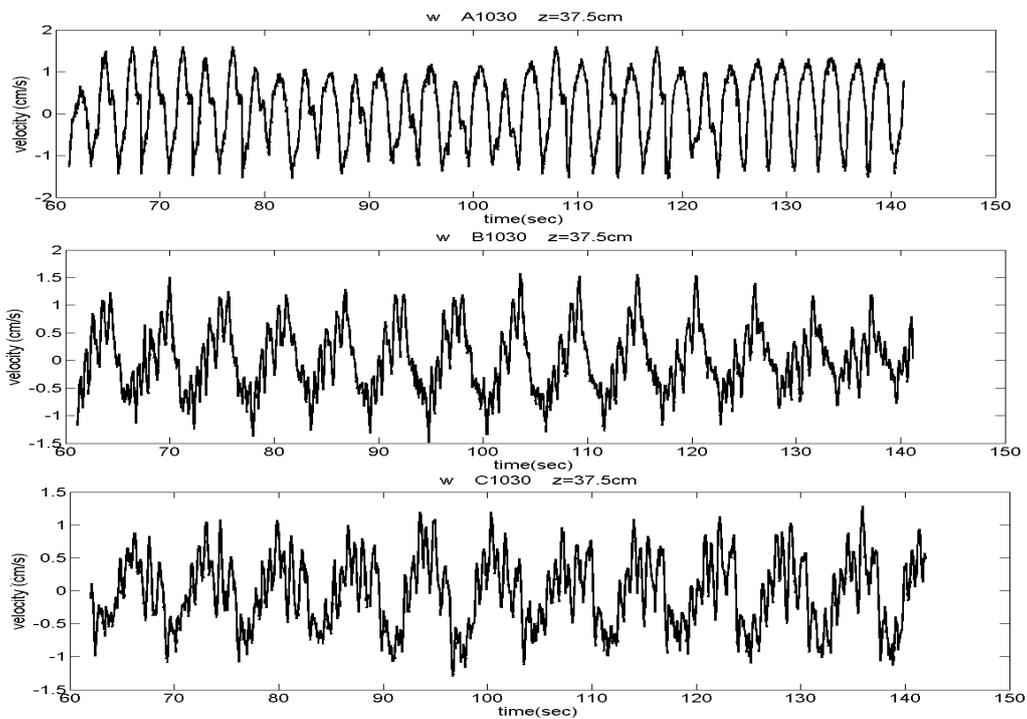


圖 4-11 (A)實驗編號 A1030(B)實驗編號 B1030(C)實驗編號 C1030
W 方向原始資料(離底 37.5cm)

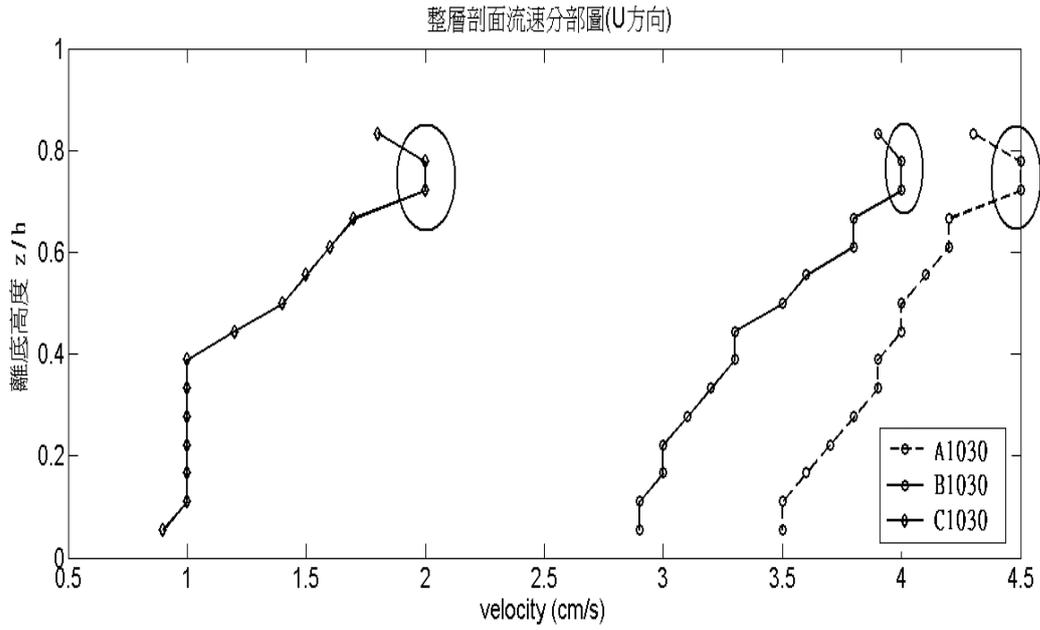


圖 4-12 實驗編號 A1030、實驗編號 B1030、實驗編號 C1030
U 方向最大流速剖面圖(波峰處)

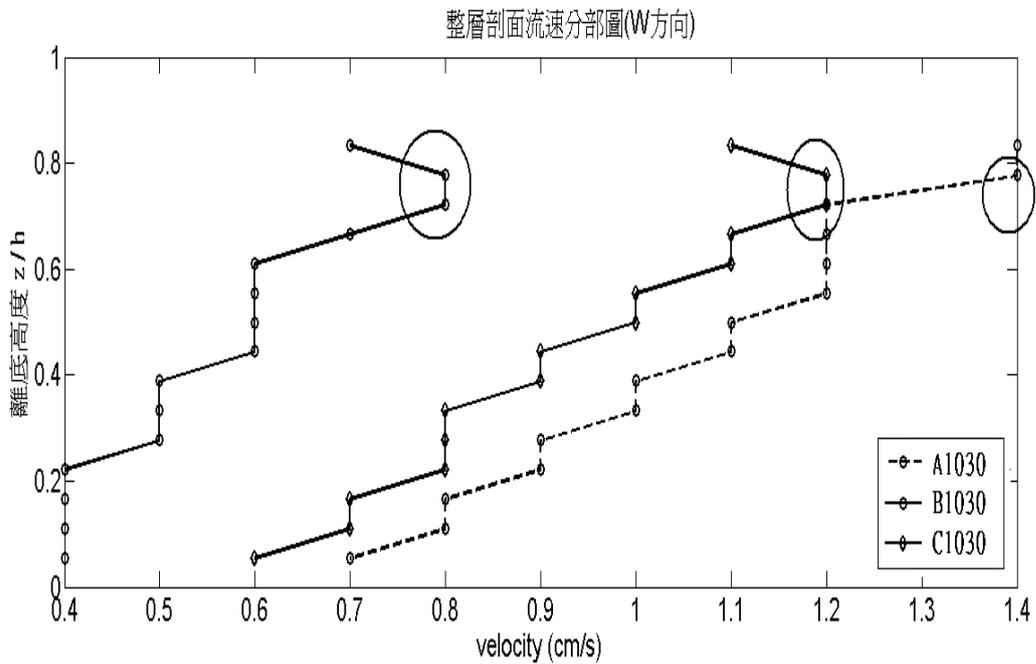


圖 4-13 實驗編號 A1030、實驗編號 B1030、實驗編號 C1030
W 方向最大流速剖面圖(波峰處)

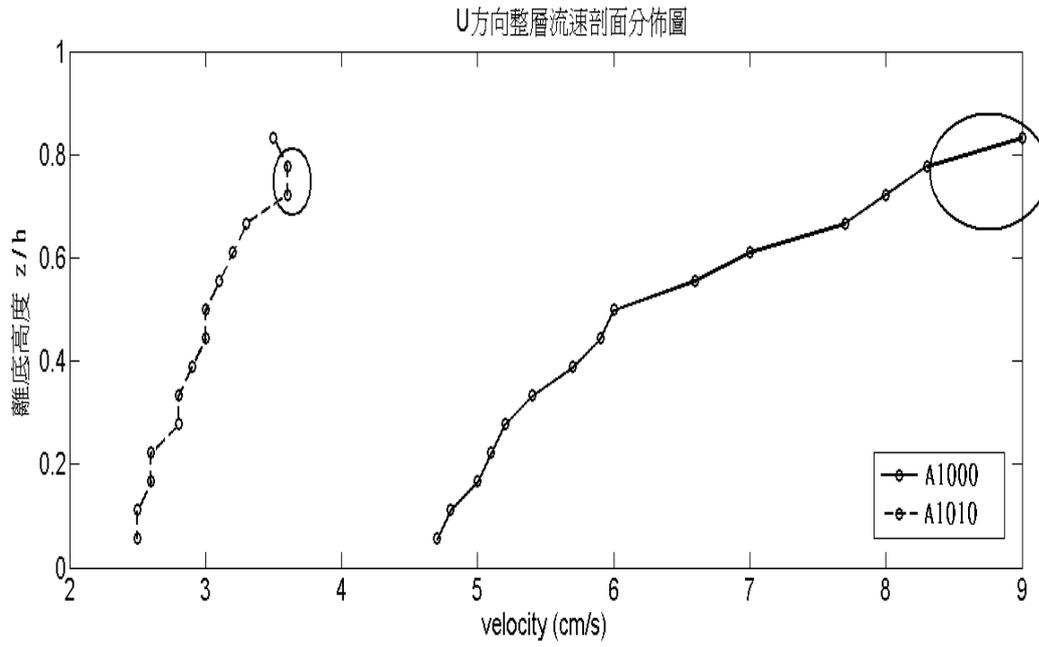


圖 4-14 實驗編號 A1000、實驗編號 A1010 U 方向最大流速剖面圖(波峰處)

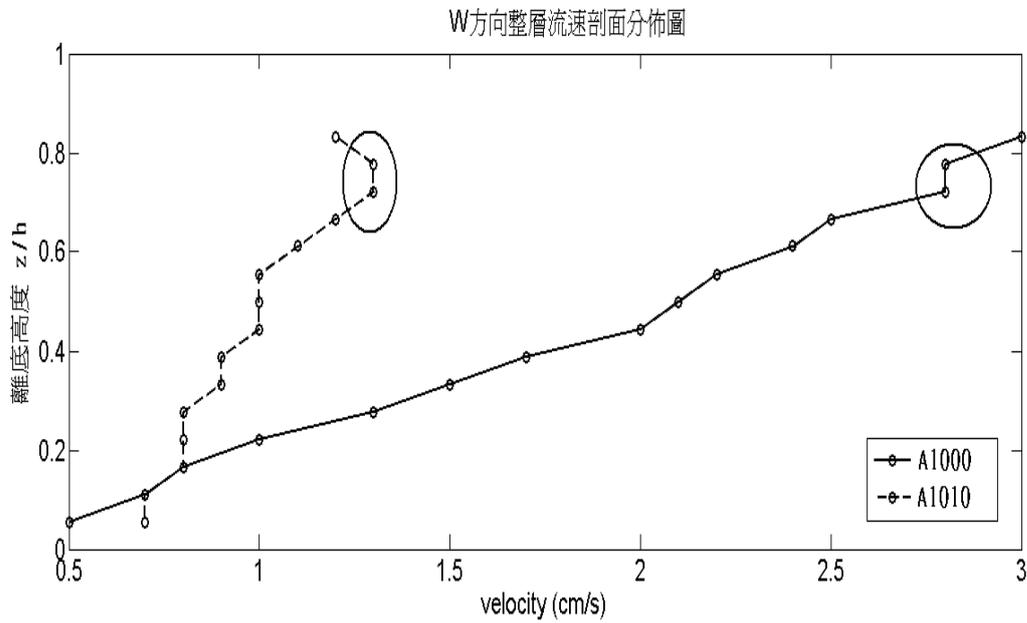


圖 4-15 實驗編號 A1000、實驗編號 A1010 W 方向最大流速剖面圖(波峰處)

4.1.2 有斜坡

如圖 4-16(A)(B)~4-17(A)(B)為放置斜坡地型後的結果，我們利用設計的支架，來調整與設定斜坡角度為 8° ~ 18° 。每個實驗各取一點來討論(最接近表面反射最明顯的點)，橫軸為時間序列，縱軸為流速(cm/s)。圖中可以很明顯的看到加入斜坡後的變化，很明顯的可看到流速波動一大一小的情況，如圖中箭頭 1 黑色圈圈處為入射波流速波動，特別注意的是：因為入射波碰到斜坡後會產生反射波，在同一個時間點裡，又會有另一個入射波產生(因為是連續內波)，故一個反射波和一個入射波相互抵消，就會像箭頭 2 黑色圈圈處的情況。

由實驗值討論不同尖銳度的波浪傳遞至不同角度之斜坡邊界處時反射率的變化，會發現內波的反射係數與表面波非常相似，當坡度非常平緩時，反射係數非常小，當坡度漸增，反射係數 R 接近一個臨界值常數。

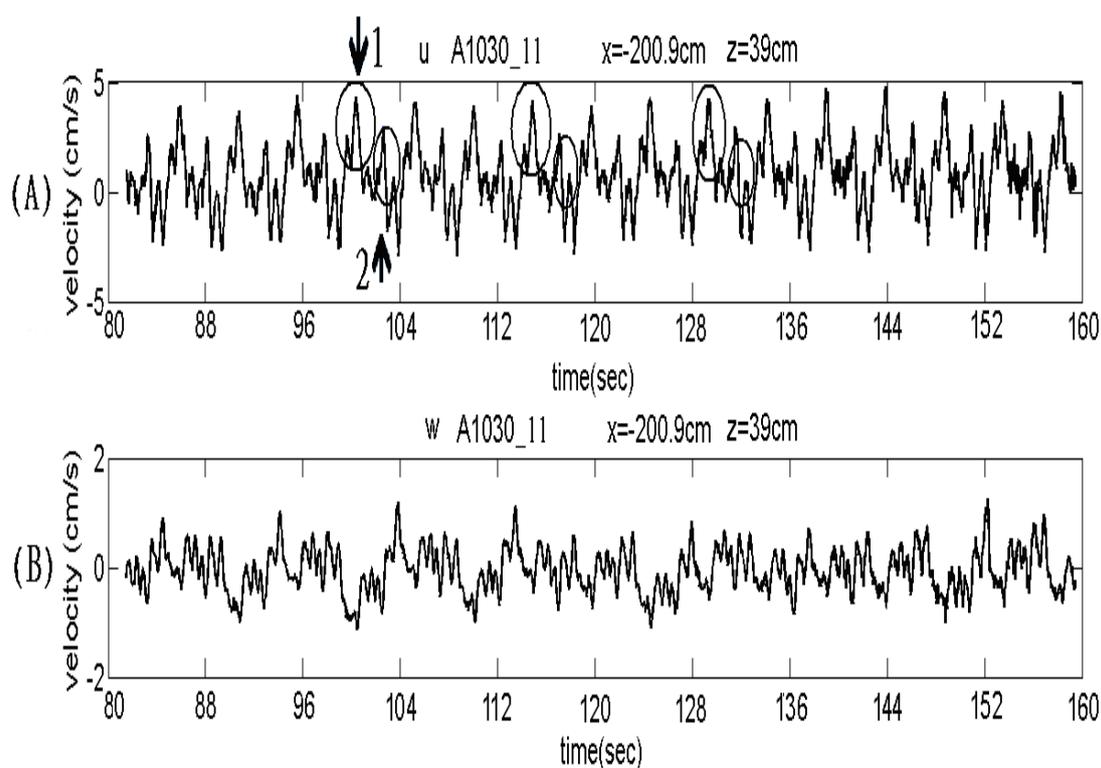


圖 4-16 實驗編號 A1030_11(A) U 方向 $x=-200.9\text{cm}$, $z=39\text{cm}$ (B) W 方向 $x=-200.9\text{cm}$, $z=39\text{cm}$ 。箭頭 1 黑色圈圈處為入射波、箭頭 2 黑色圈圈處為反射波

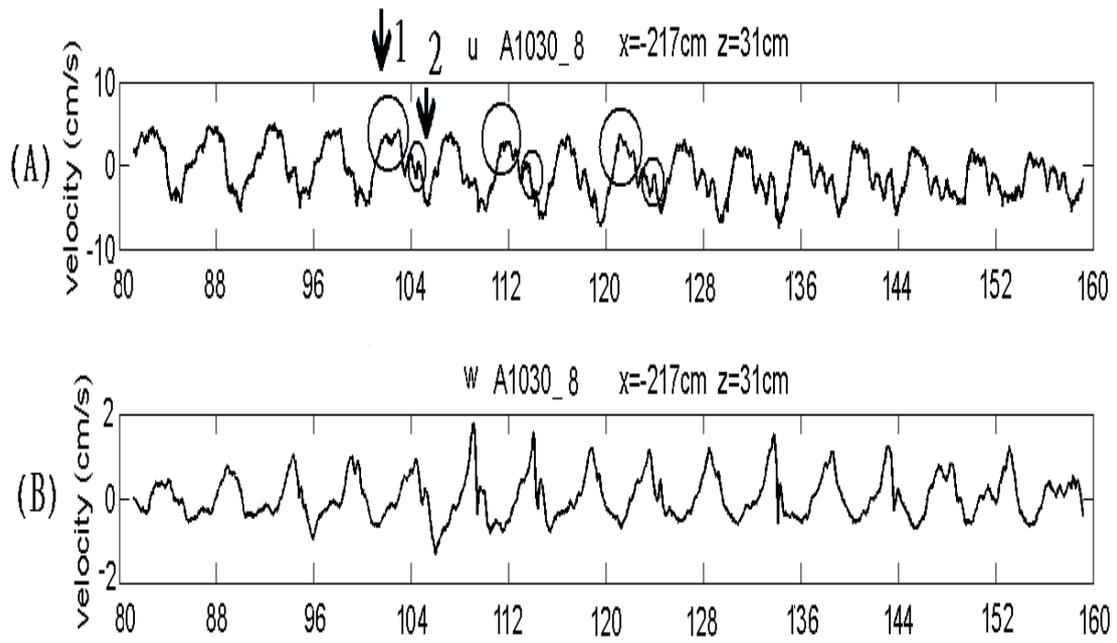


圖 4-17 實驗編號 A1030_8(A) U 方向 $x=-217\text{cm}$ $z=31\text{cm}$ (B) W 方向 $x=-217\text{cm}$ $z=31\text{cm}$ 原始流速資料。箭頭 1 黑色圈圈處為入射波、箭頭 2 黑色圈圈處為反射波

4.2 實驗-理論

因為 Micro ADV 是一個高頻儀器,故所量測出的流速很有可能會受到雜訊影響,除了主要週期之外還會受到其他副週期所影響,本文將 Micro ADV 所量測到的流速資料經由 EMD 處理,將雜訊濾除,進而比較實驗和理論兩者的差異。

圖 4-18~4-23 是利用 U 和 W 的原始資料帶入 EMD (Empirical Mode Decomposition method),經由 EMD 處理後,會跑出 n 個分量。首先,先目測原始資料,然後再取出 EMD 裡適合的分量。如圖 4-18、4-19 目測原始資料的週期大約 2.4s,當經由 EMD (Empirical Mode Decomposition method)處理過後,會出現一個接近週期 2.4s 的分量,此分量就是本文所要求得的,如圖黑色圈圈為本文所要求得的,為週期 2.5s。將其他的分量將它視為雜訊。

圖 4-20、4-21 是實驗編號 B(T=5.5s)U 和 W 的原始資料帶入 EMD (Empirical Mode Decomposition method),也是一樣先目測原始資料,然後再經由 EMD 處理後,如圖黑色圈圈為本文所要求得的,為週期 5.5s。

如圖 4-22、4-23 我們目測原始資料的週期大約 6.6s,當經由 EMD (Empirical Mode Decomposition method)處理過後,也是一樣會出現一個接近週期 6.6s 的分量,此分量就是本研究所要求得的。如圖黑色圈圈為所要求得的,為週期 6.6s。

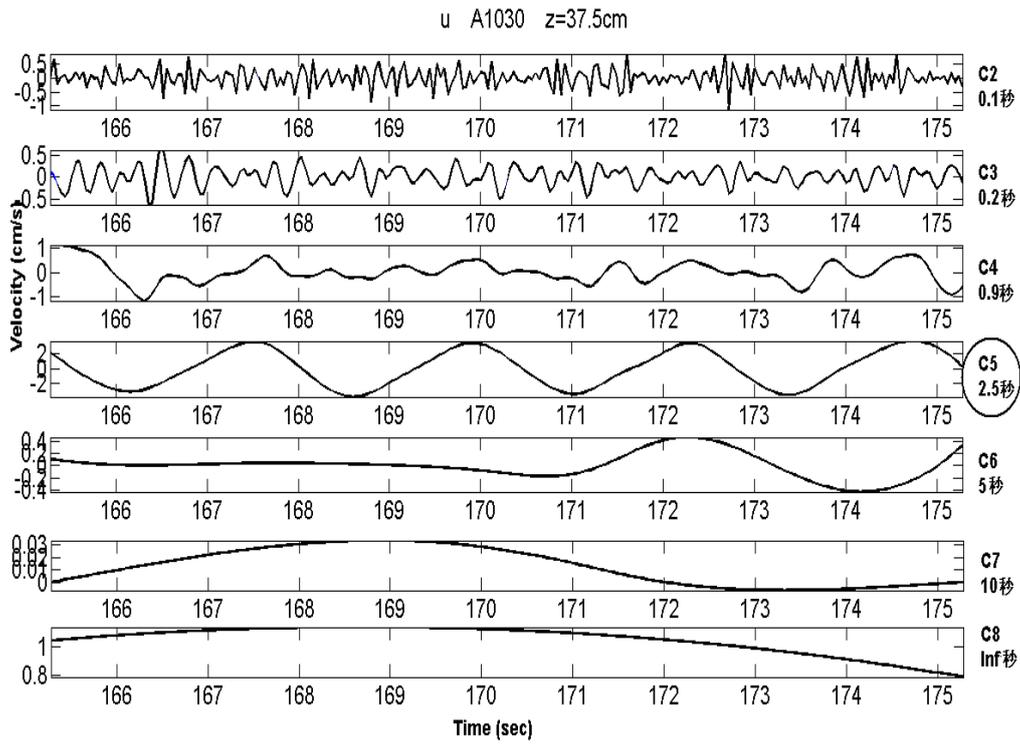


圖 4-18 實驗編號 A1030 U 方向資料經 EMD 分解後之 IMF

(C5 是本文所要的分量)

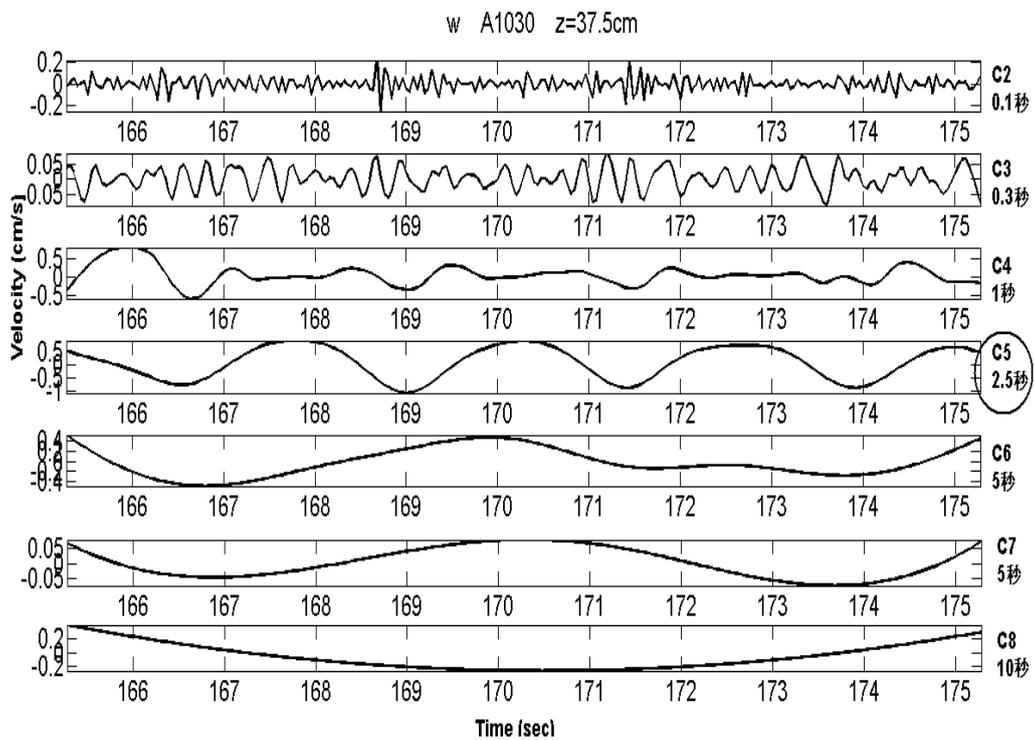


圖 4-19 實驗編號 A1030 W 方向資料經 EMD 分解後之 IMF

(C5 是本文所要的分量)

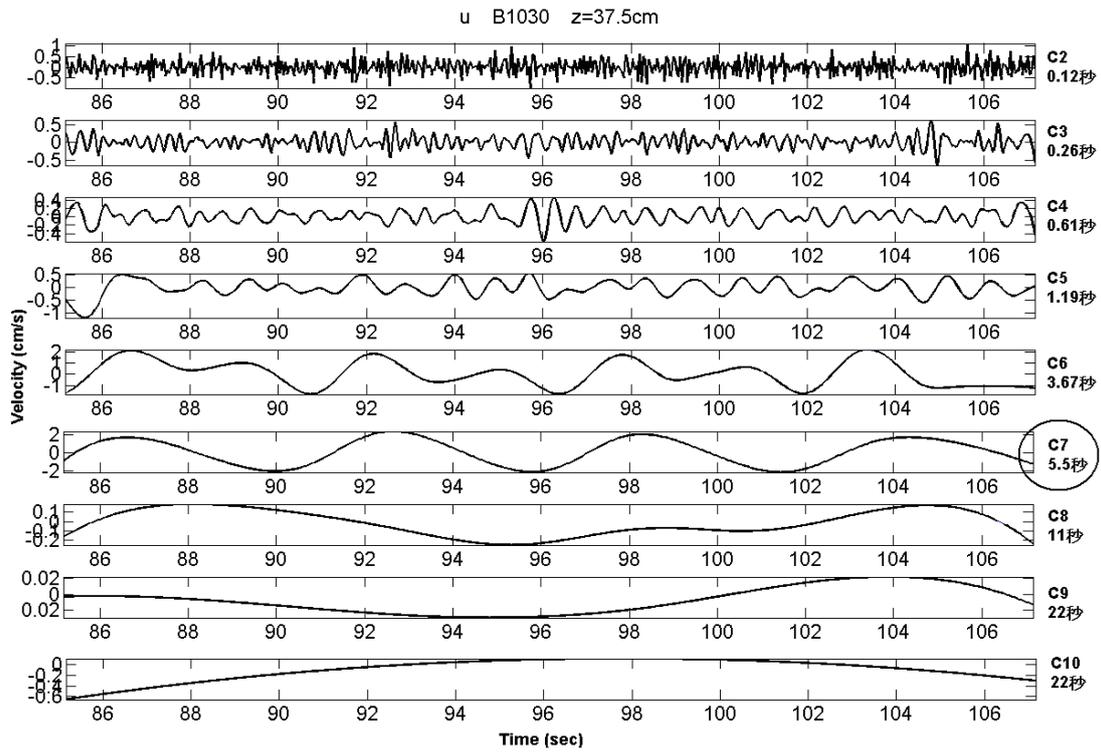


圖 4-20 實驗編號 B1030 U 方向資料經 EMD 分解後之 IMF

(C7 是本文所要的分量)

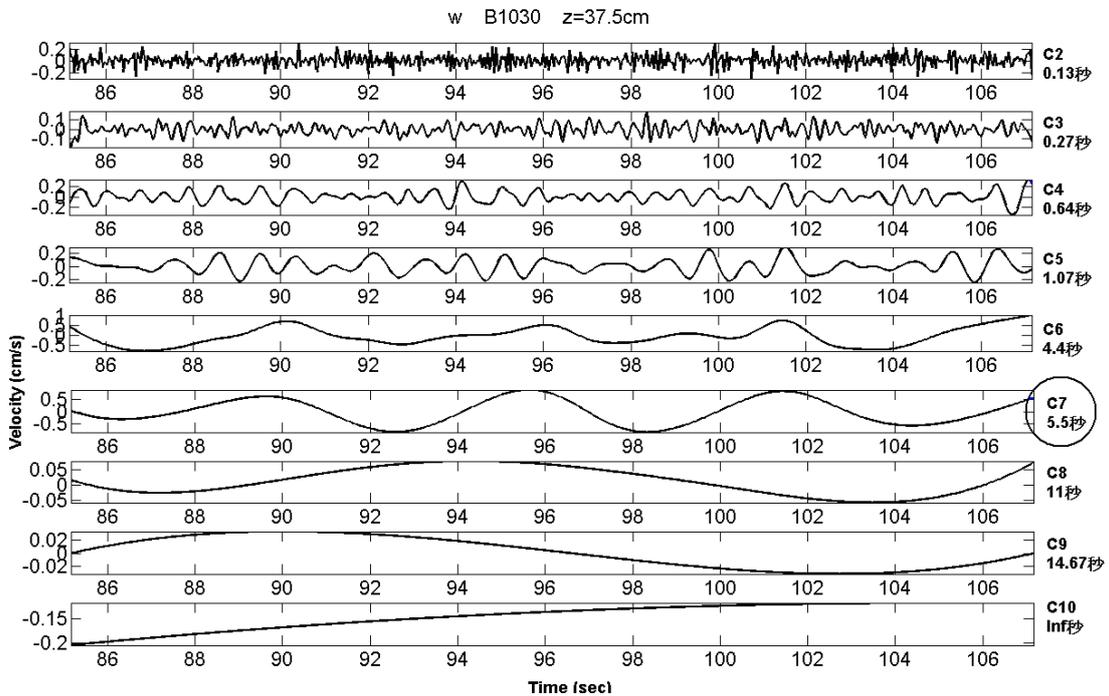


圖 4-21 實驗編號 B1030 W 方向資料經 EMD 分解後之 IMF

(C7 是本文所要的分量)

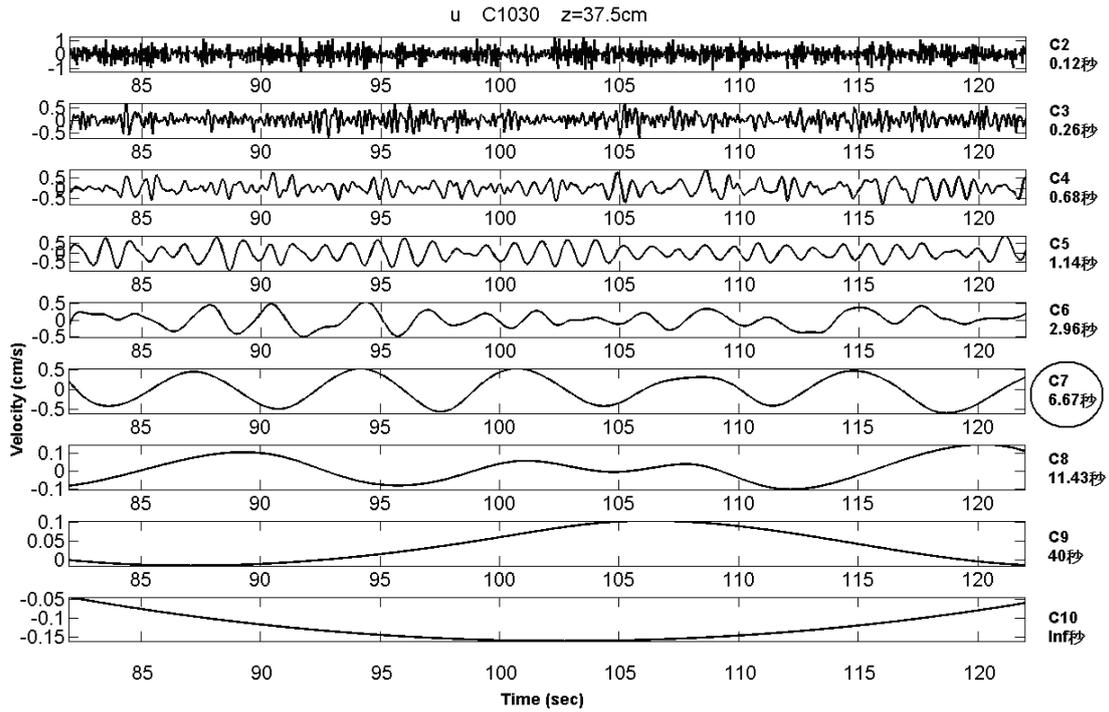


圖 4-22 實驗編號 C1030 U 方向資料經 EMD 分解後之 IMF

(C7 是本文所要的分量)

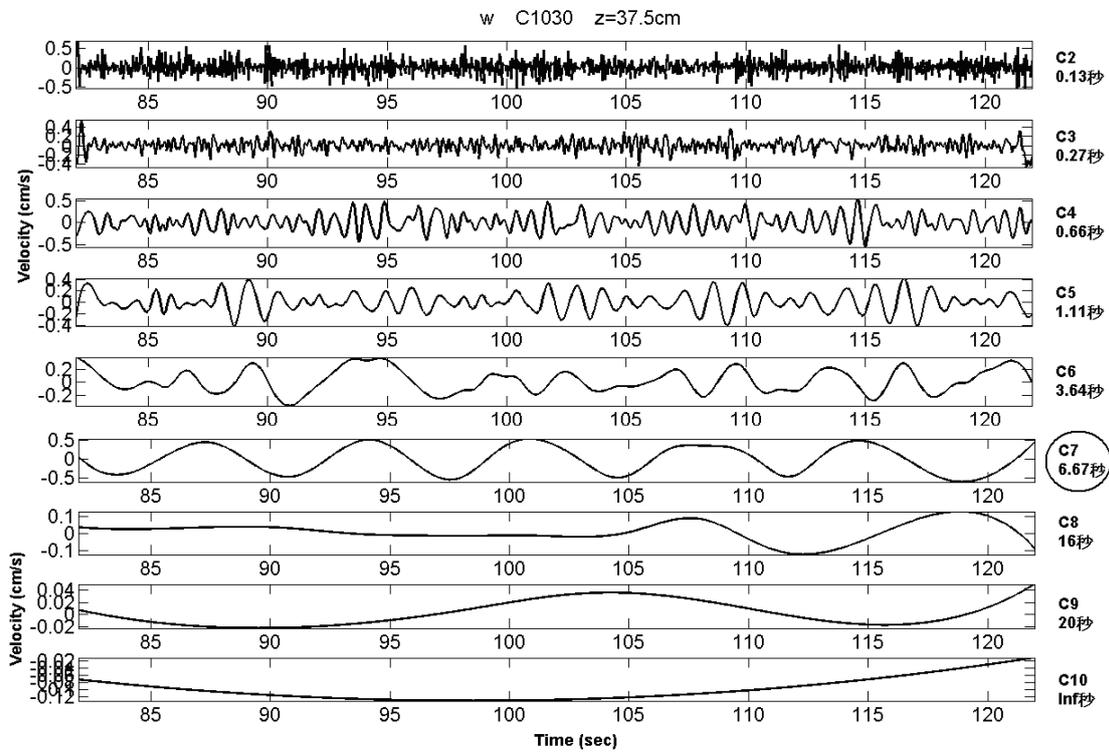


圖 4-23 實驗編號 C1030 W 方向資料經 EMD 分解後之 IMF

(C7 是本文所要的分量)

由於波峰波谷的粒子流速是很上下均勻對稱，故計算出來的平均流速約為零，Umeyama(2002, 2009)推導出實驗水槽內波理論公式，分別可計算出上下層任何一點 U 方向和 W 方向的流速，本研究也比較出類似的結果。因為 Micro ADV 是一個高頻儀器，故所量測出的流速很有可能會受到雜訊影響，除了主要週期之外還會受到其他副週期所影響，本文將 Micro ADV 所量測到的流速資料經由 EMD 處理，將雜訊濾除，進而比較實驗和理論兩者的差異。

以下為計算理論值的公式和微小振幅波理論(small amplitude wavetheory，Airy 1845 所創立)相似。理論中假設波浪的振幅 a 對波長 L 或對水深 h 而言均為微小量，即 $a/L \ll 1$ 或 $a/h \ll 1$ 。

我們利用了前式(3-3)~(3-6) 如下式來計算出理論值。

$$U_I = -nk[A\cosh(nkz) + B\sinh(nkz)]\cos(nqt)$$

$$W_I = -nk[A\sinh(nkz) + B\cosh(nkz)]\sin(nqt)$$

$$U_{II} = -nk[C\cosh(nk(z+h_{II})) + D\sinh(nk(z+h_{II}))]\cos(nqt)$$

$$W_{II} = -nk[C\sinh(nk(z+h_{II})) + D\cosh(nk(z+h_{II}))]\sin(nqt)$$

U_I : 上層水準流速、 W_I : 上層垂直流速、 U_{II} : 下層水準流速、 W_{II} : 下層垂直流速

n : 階數、 K : 波數、 Z : 離交界面的距離、 q : 常數 t : 時間、

h_{II} : 下層厚度、 A : 常數、 B : 常數、 C : 常數、 D : 常數

圖 4-24~4-29 為實驗編號 A(T=2.4S)U 和 W 的流速(量測點離底 37.5cm), 分別為一階、二階、三階, 實線部分為 Micro ADV 經由 EMD 處理過後的流速, 圈圈部分為理論公式計算, 經由實驗理論比較出兩者的差異性。結果比較後可發現越高階的理論值跟實驗會比較符合雖然還是有誤差, 但比起一階的理論值有比較準確。在前人 Umeyama 所計算出的三階理論值與實驗比對相當符合。

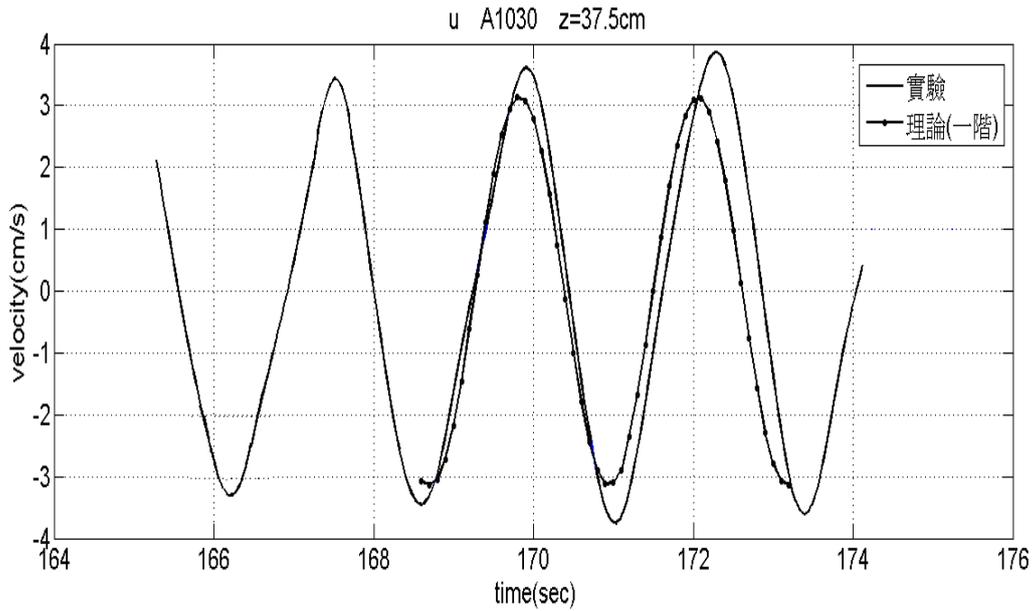


圖 4-24 實驗編號 A1030 U 方向(量測點離底 37.5cm) 一階理論
-實驗對照圖。實線為實驗值、圈圈加實線為理論值

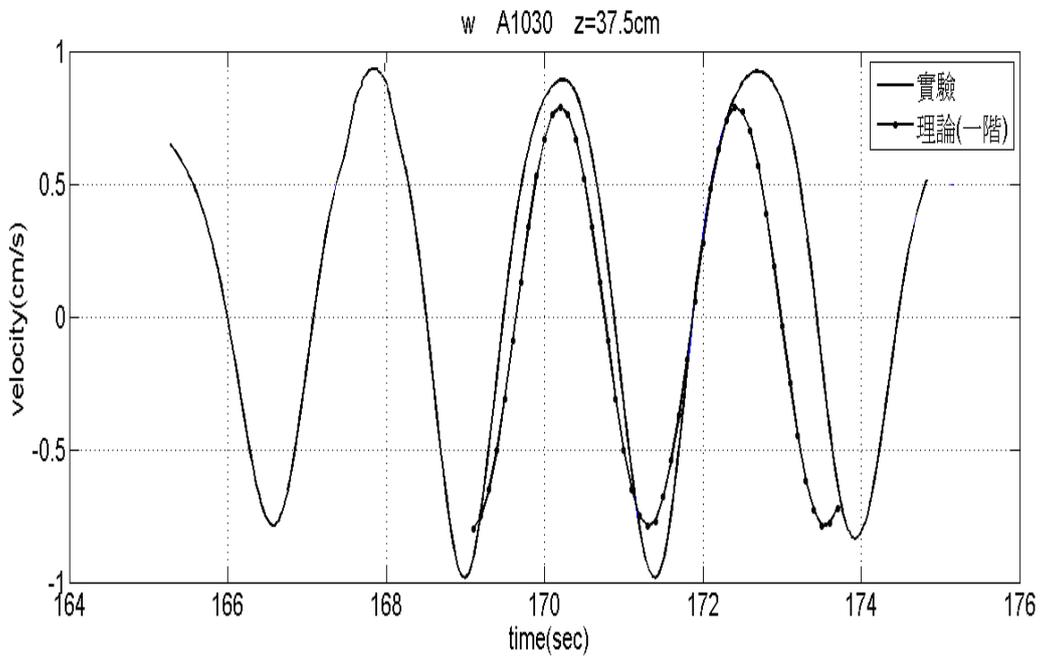


圖 4-25 實驗編號 A1030 W 方向(量測點離底 37.5cm) 一階理論
-實驗對照圖。實線為實驗值、圈圈加實線為理論值

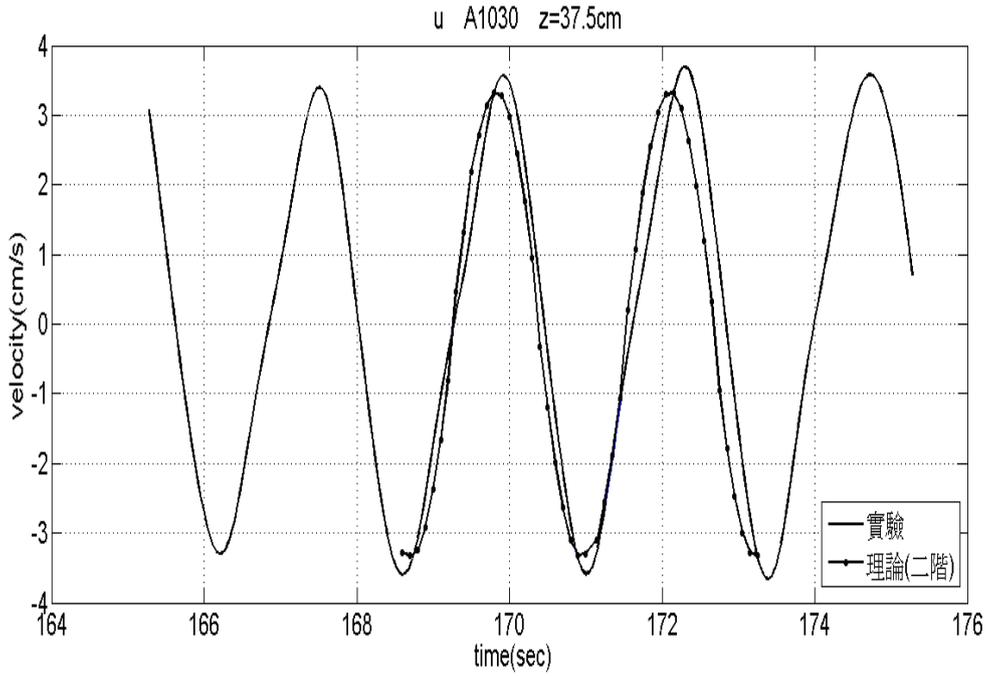


圖 4-26 實驗編號 A1030 U 方向(量測點離底 37.5cm) 二階理論
-實驗對照圖。實線為實驗值、圈圈加實線為理論值

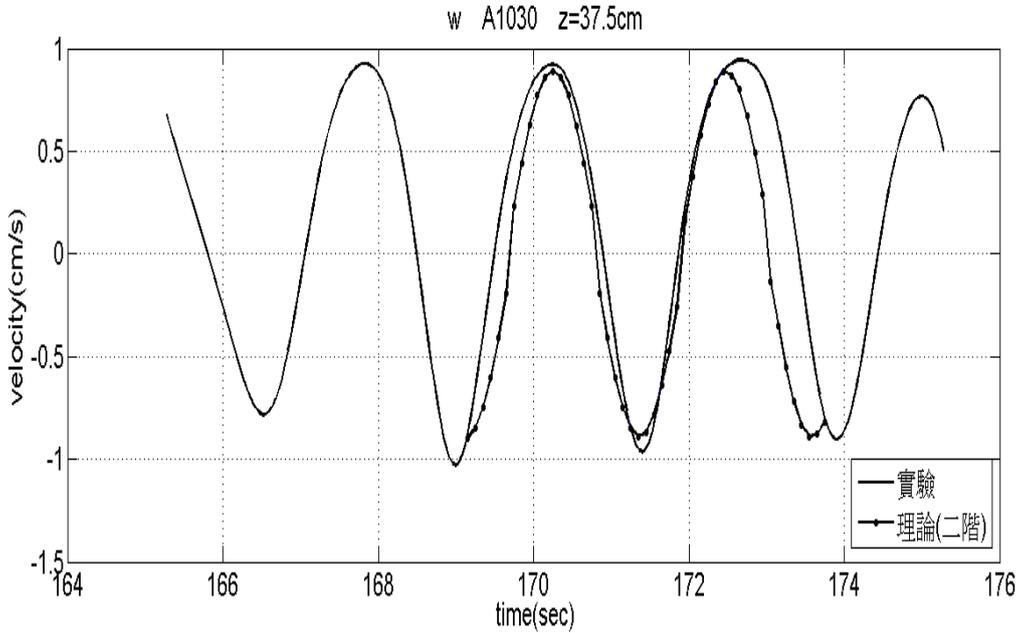


圖 4-27 實驗編號 A1030 W 方向(量測點離底 37.5cm) 二階理論
-實驗對照圖。實線為實驗值、圈圈加實線為理論值

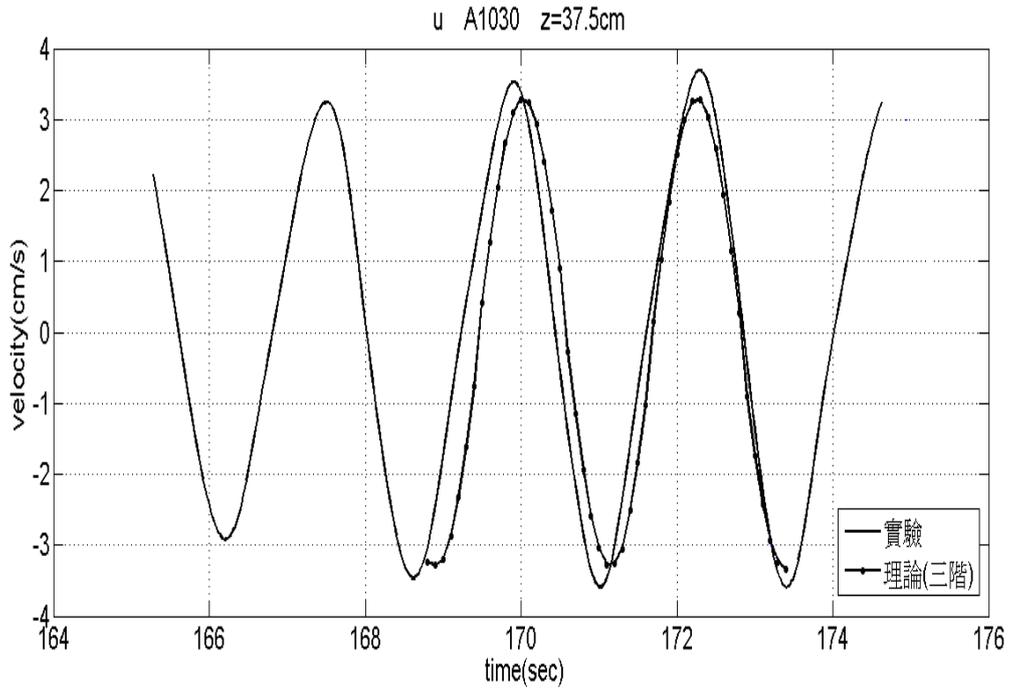


圖 4-28 實驗編號 A1030 U 方向(量測點離底 37.5cm) 三階理論
-實驗對照圖。實線為實驗值、圈圈加實線為理論值

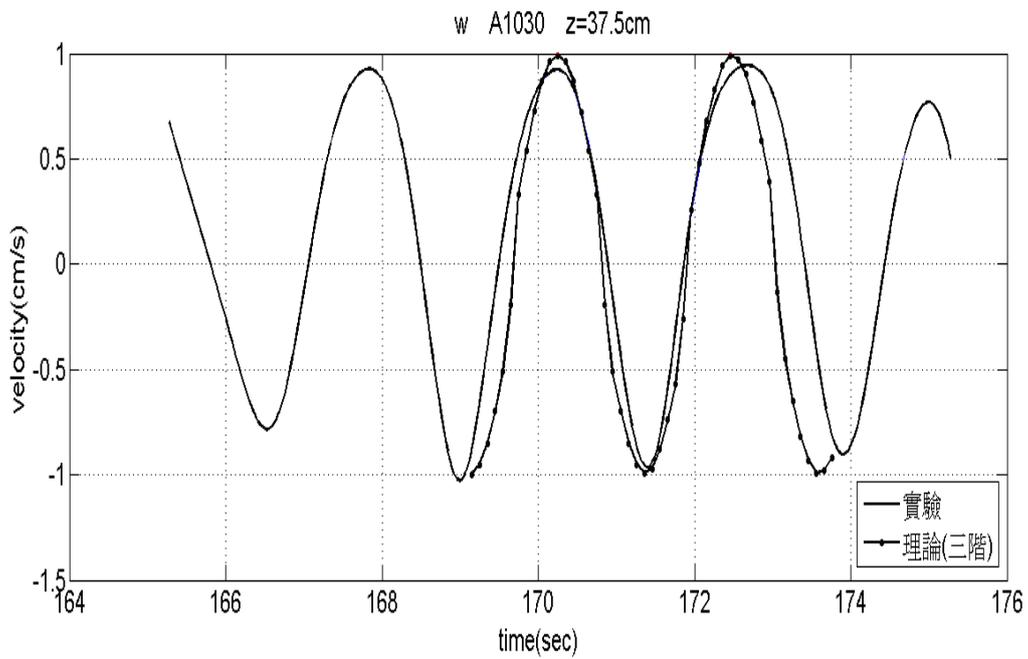


圖 4-29 實驗編號 A1030 W 方向(量測點離底 37.5cm) 三階理論
-實驗對照圖。實線為實驗值、圈圈加實線為理論值

4.3 power spectrum

本小節利用頻譜分析(Power spectrum)來探討 turbulence 是否符合斜率 $-5/3$ 的 sub-range, 並利用 TKE (turbulent kinetic energy) 法、慣性消散 (inertial dissipation) 法來計算剪應力 τ 與摩擦速度 (u_*), 再利用 u_* 推算出能量消散率 ε 。

在本實驗中, 內波傳遞要產生 turbulence 的現象是不多的。原因是因為內波傳遞時所產生的波高、流速不大, 在本實驗所產生最大波高只有 4.5cm, 最大流速只有 4.5cm/s, 產生 turbulence 的現象也只有在上層內波交界面附近才會有比較明顯的 turbulence。

前人 Liu(2001)在實驗水槽長 51 公尺、寬 0.8 公尺、高 1.2 公尺的水槽做了一連串實驗, 實驗中最大流速可達到 1m/s, 波高可達到 26.4cm, 在傳遞中就有足夠的能量產生碎波, 產生 turbulence。另外前人 Wickley-Olsen (2008)在實驗水槽長 32 公尺、寬 0.6 公尺、高 12 公尺的水槽造波, 實驗中最大流速可達到 15cm/s, 波高可達到 25cm, 在傳遞中就有足夠的能量產生碎波並產生 turbulence。

在圖 4-30~圖 4-37 利用攝影機拍攝連續內波傳遞到斜坡上的變化分別是 A1030_11 和 A1030_9.4, 發現當內波傳遞到斜坡時, 淺化開始發生, 內波波形逐漸抬升, 波峰變得尖銳, 在更接近斜坡邊界時, 後半段波形變得比較陡直造成流體剪應力不穩及紊流, 使水體內部翻轉, 最後在斜坡上產生反射、破碎、混合等現象。

將實驗編號 A1030 的 W 流速資料做頻譜分析, 取 W 的原因是因為 W 方向是垂直剖面流速, 對底床的摩擦力是以垂直距離來計算, 但實際 Power spectrum 頻譜分析也是可將 U 和 V 也帶入計算, 但因本實驗 U 和 V 帶入分析後得到沒有符合斜率 $-5/3$ sub-range, 故我們將探討 W 為主。

如圖 4-38(A)(B)(C) 為 $z=40\text{cm} \sim z=32.5\text{cm}$ 和圖 4-39(A)(B)(C) $z=30\text{cm} \sim z=25\text{cm}$, 可看出圖中會有好幾個 peak, 是因為入射波所造成的現象, 在

圖中綠色圈圈處為入射波周期($T \approx 2.4\text{s}$)，能量為最大。很清楚的可以看到 $z=40\text{cm} \sim z=30\text{cm}$ 符合 $-5/3$ ， $z=27.5\text{cm} \sim z=25\text{cm}$ 不符合(因量測點太多只取前幾個量測點來比較)。另外還有一個比較重要的現象是：虛線部分可將波和 turbulence 給區隔開來。在 $z=40\text{cm}$ 虛線($f=2\text{Hz}$)和 $z=37.5\text{cm}$ 、 $z=32.5\text{cm}$ 比較後，可發現沒有符合 $-5/3$ (在較高頻處)，原因是因為 $z=37.5\text{cm}$ 、 $z=32.5\text{cm}$ 比較接近內波交接處所產生的 turbulence 比較大， $z=40\text{cm}$ 和 $z=30\text{cm}$ 由於 turbulence 較小，可將它視為白噪音。

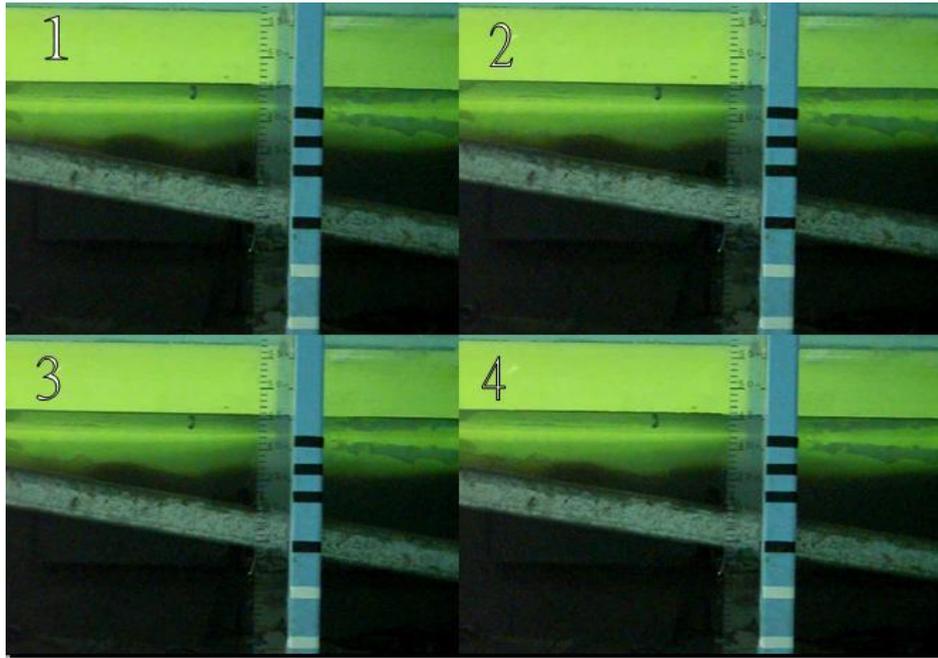


圖 4-30 利用攝影機拍攝內波傳遞至地形變化圖(A1030_11)

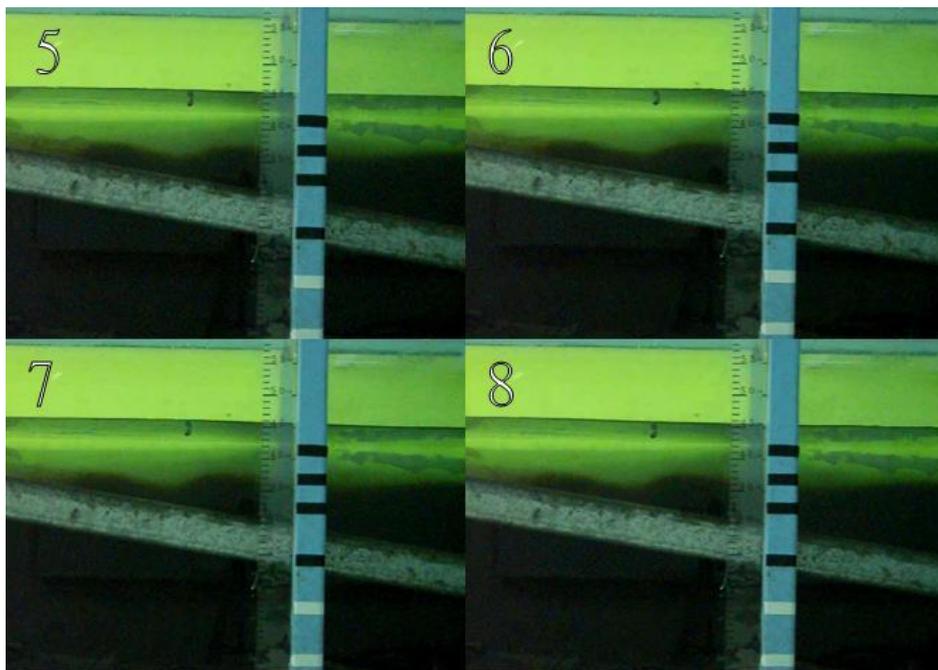


圖 4-31 利用攝影機拍攝內波傳遞至地形變化圖(A1030_11)

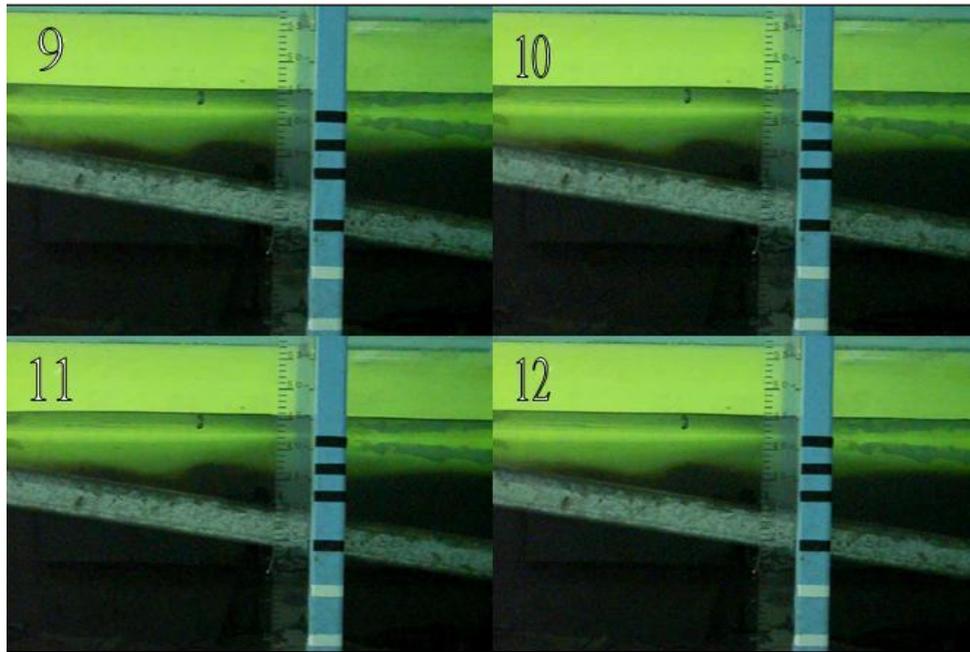
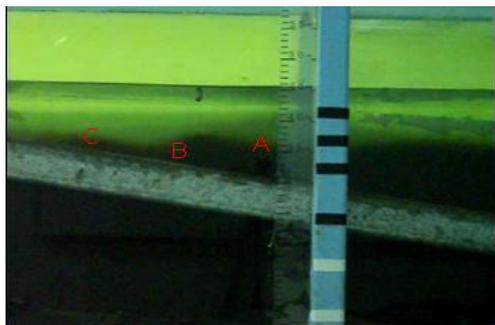


圖 4-32 利用攝影機拍攝內波傳遞至地形變化圖(A1030_11)



- (A)淺化開始發生時,內波波形逐漸向上抬升,
- (B)波峰變的尖銳,在更接近斜坡邊界時,後半段波型變的比較陡直,造成流體剪應力不穩定及紊流,使水體內部 **overturn**,
- (C)最後在斜坡上產生反射,破碎,混合等現象

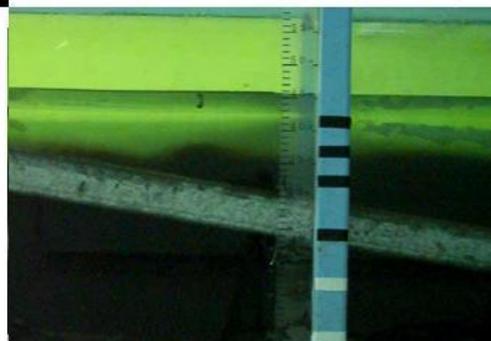
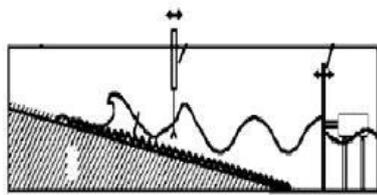


圖 4-33 利用攝影機拍攝內波傳遞至地形變化圖(A1030_11)

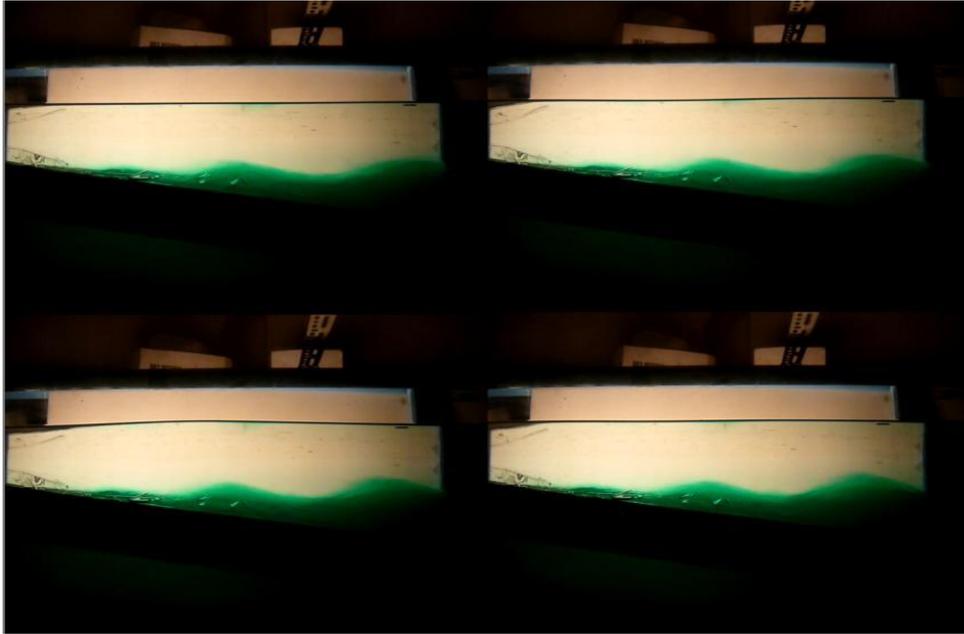


圖 4-34 利用攝影機拍攝內波傳遞至地形變化圖(A1030_9.4)

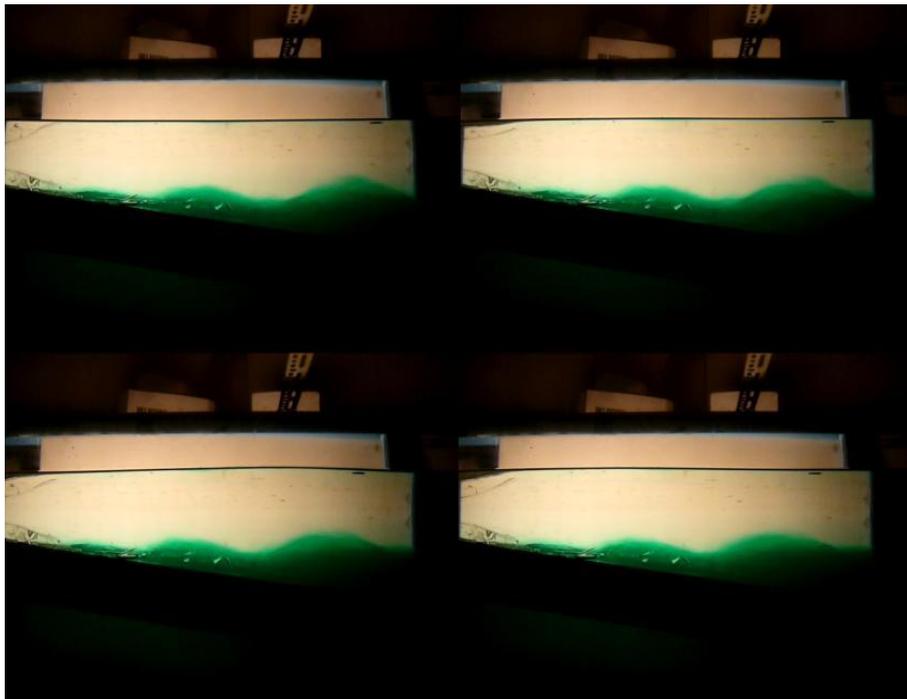


圖 4-35 利用攝影機拍攝內波傳遞至地形變化圖(A1030_9.4)



圖 4-36 利用攝影機拍攝內波傳遞至地形變化圖(A1030_9.4)

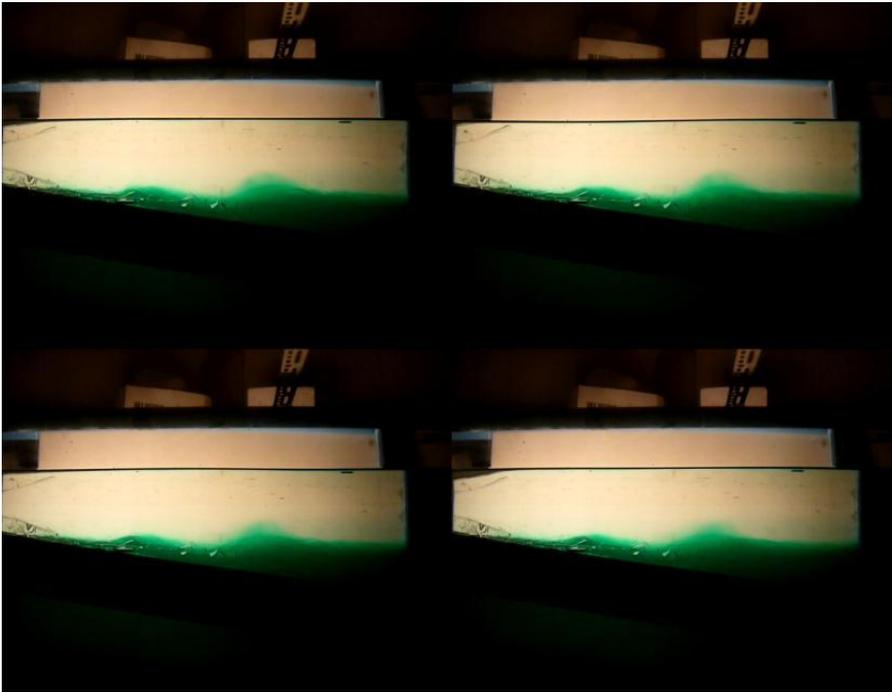


圖 4-37 利用攝影機拍攝內波傳遞至地形變化圖(A1030_9.4)

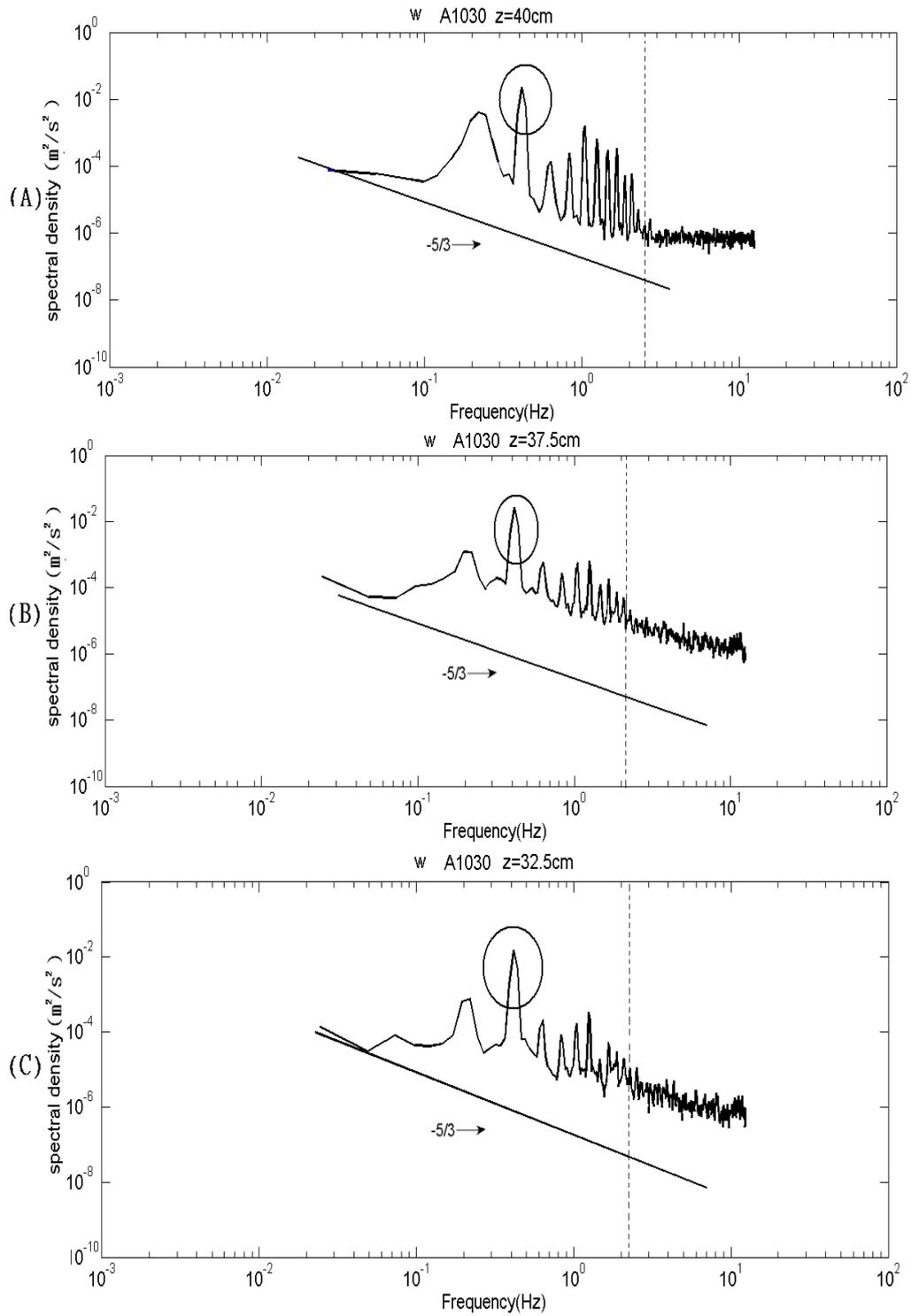


圖 4-38 實驗編號 A1030 (W 方向) (A) z=40cm (B) z=37.5cm (C) z=32.5cm
power spectrum 頻譜分析圖。黑色圈圈為入射波所造成

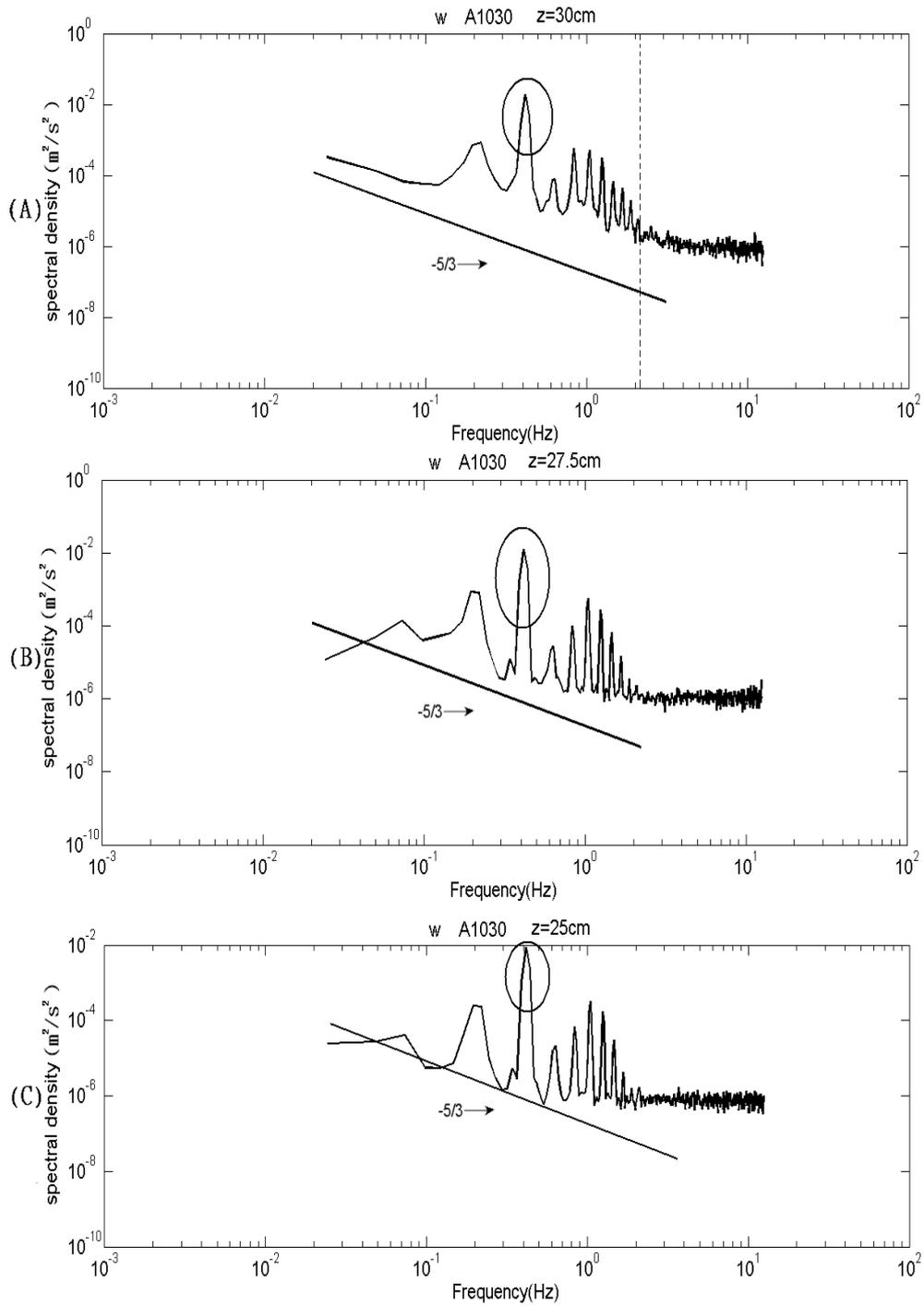


圖 4-39 實驗編號 A1030 (W 方向) (A) $z=30cm$ (B) $z=27.5cm$ (C) $z=25cm$ power spectrum 頻譜分析圖。黑色圈圈為入射波所造成

當內波傳遞到斜坡時淺化開始發生，內波波形逐漸抬升，波峰變得尖銳，在更接近斜坡邊界時後半段波形變得比較陡直造成流體剪應力不穩及紊流，使水體內部 overturn，最後在斜坡上產生反射、破碎混合等現象。

如圖 4-40(A)(B)(C)~圖 4-41(A)(B)(C)放置一個角度 11° 的斜坡，power spectrum 頻譜分析圖中出現好幾個 peak，是因為入射波和反射波所造成的現象，在圖中黑色圈圈處為入射波周期($T=$ 約 2.4s)，能量應該為最大，但是很清楚的可以看到會有一個 peak 週期 $T=$ 約 5s，如圖箭頭 1，是因為原始流速資料一大一小的關係(圖 4-42 有詳細圖解)，圖中顯示出加了斜坡後斜率 $-5/3$ 會比較明顯，但是由於 turbulence 較小還是會有幾點會呈現出白噪音。

如圖 4-43 放置斜坡角度 8° ，power spectrum 頻譜分析。跟斜坡角度 11° 比較可看出 turbulence 情況很明顯，由於斜坡角度越小所產生的碎波越明顯，雖然都還是溢波，但比起角度 11° 分析出來結果 turbulence 很明顯的增強。sub-range 的範圍明顯也變寬了許多。

如圖 4-44 放置斜坡角度 8° ，power spectrum 頻譜分析。跟斜坡角度 11° 和 9.4° 比較可看出 turbulence 情況很明顯，而且 sub-range 的範圍也略大一些 ($f=2\text{Hz}\sim 7\text{Hz}$)，由於斜坡角度越小所產生的碎波越明顯，雖然都還是溢波，但比起角度 11° 和 9.4° 分析出來結果 turbulence 很明顯的增強。sub-range 的範圍明顯也變寬了許多。

由於實驗點數很多將統整成一個表格:如表格 4-2 顯示斜坡角度越緩，power spectrum 頻譜分析斜率符合 $-5/3$ 的點數則越多。

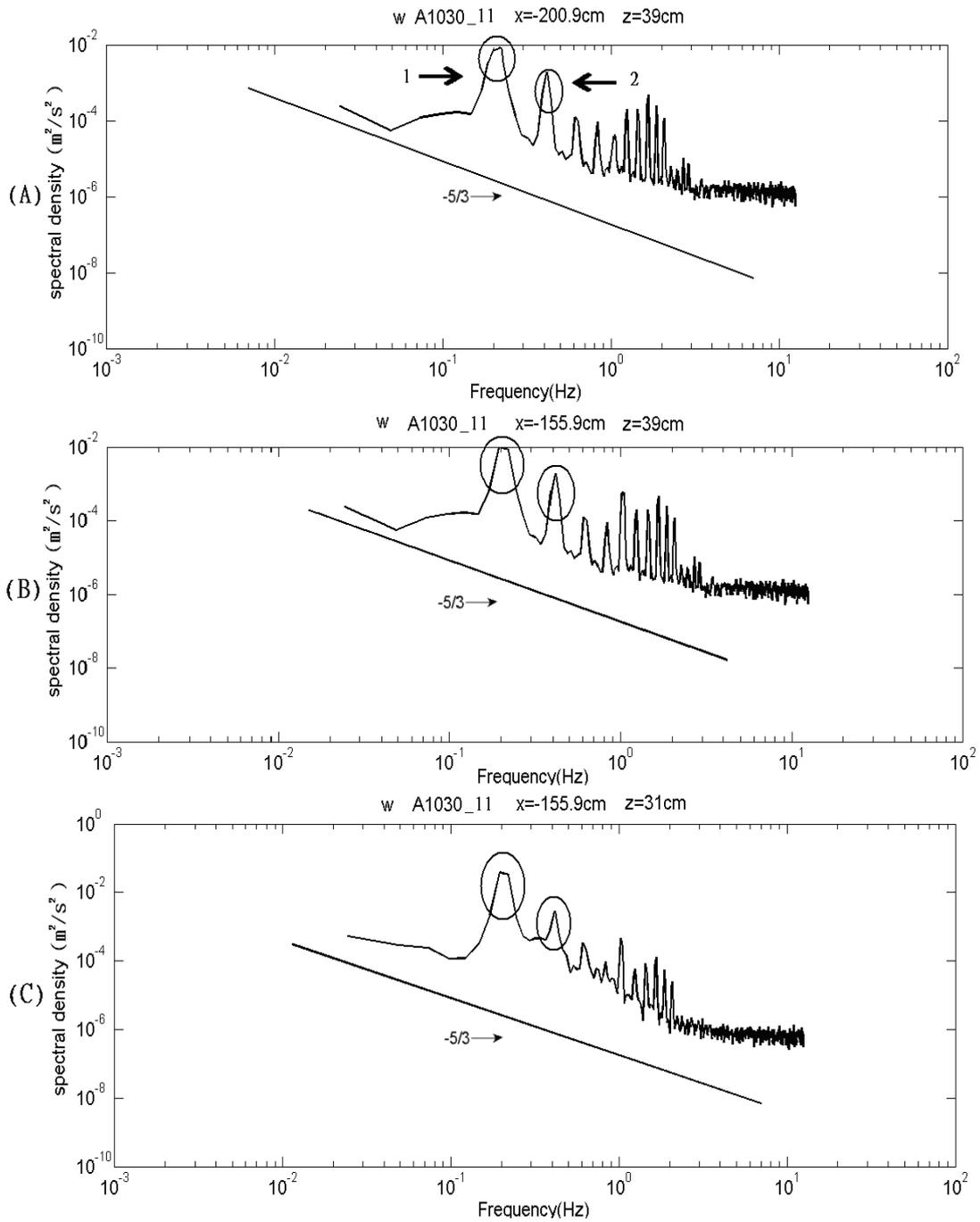


圖 4-40 實驗編號 A1030_11 (W 方向) (A) $x=-200.9$ $z=39\text{cm}$ (B) $x=-155.9\text{cm}$ $z=39\text{cm}$ (C) $x=-155.9\text{cm}$ $z=31\text{cm}$ power spectrum 頻譜分析圖。
 箭頭 1 為斜坡所造成，箭頭 2 為入射波所造成

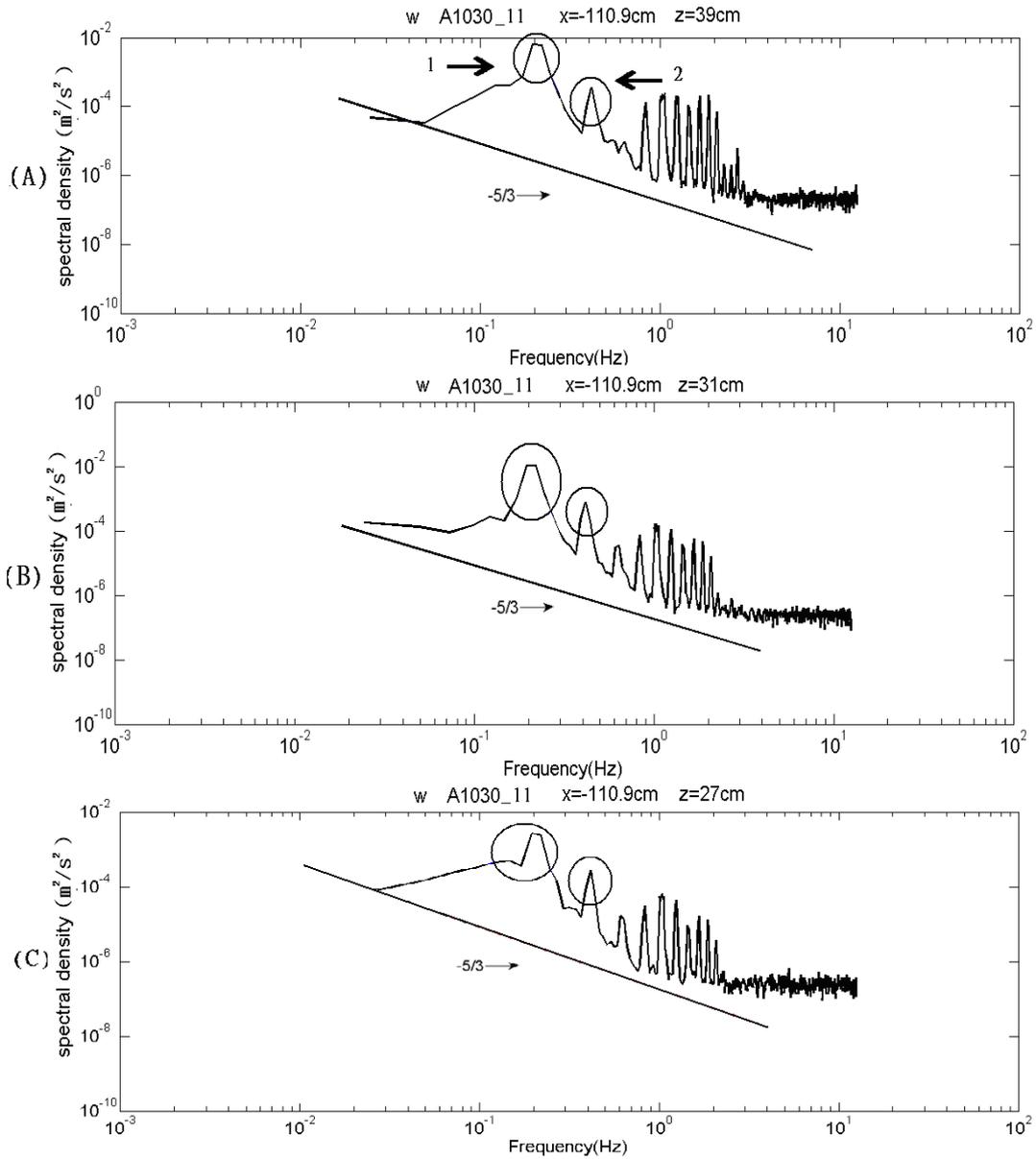


圖 4-41 實驗編號 A1030_11 (W 方向) (A) $x=-110.9\text{cm}$ $z=39\text{cm}$ (B) $x=-110.9\text{cm}$ $z=31\text{cm}$ (C) $x=-110.9\text{cm}$ $z=27\text{cm}$ power spectrum 頻譜分析圖。箭頭 1 為斜坡所造成，箭頭 2 為入射波所造成

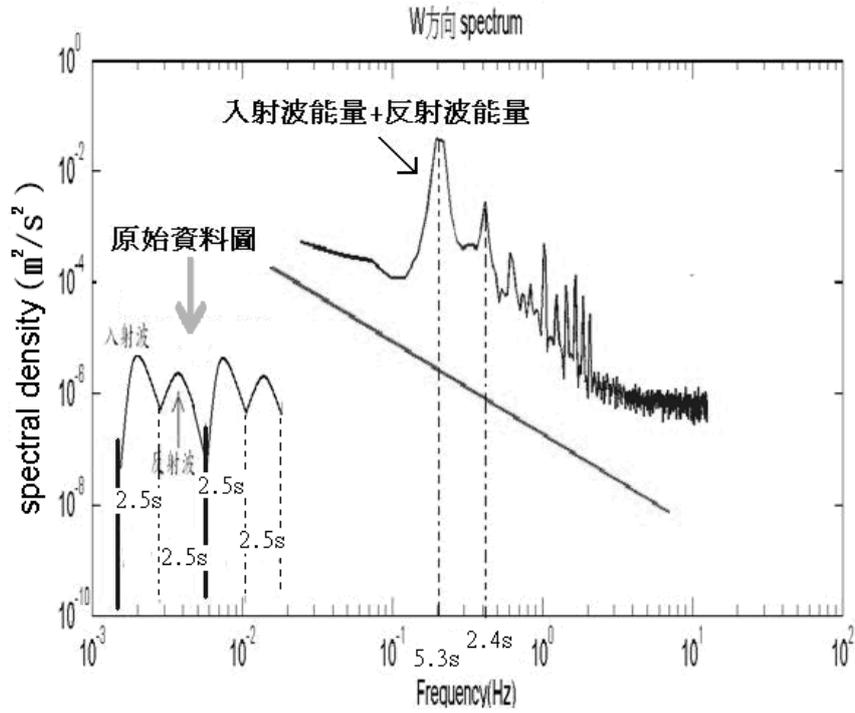


圖 4-42 解釋斜坡 power spectrum 分析

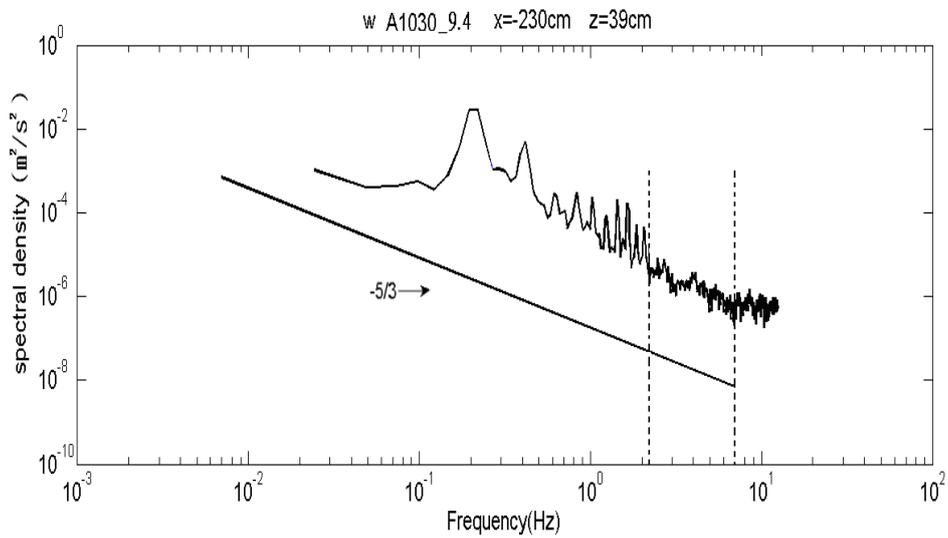


圖 4-43 實驗編號 A1030_9.4 (W) x=-230cm z=39cm power spectrum 頻譜分析圖(虛線部分將波動和擾動區隔)

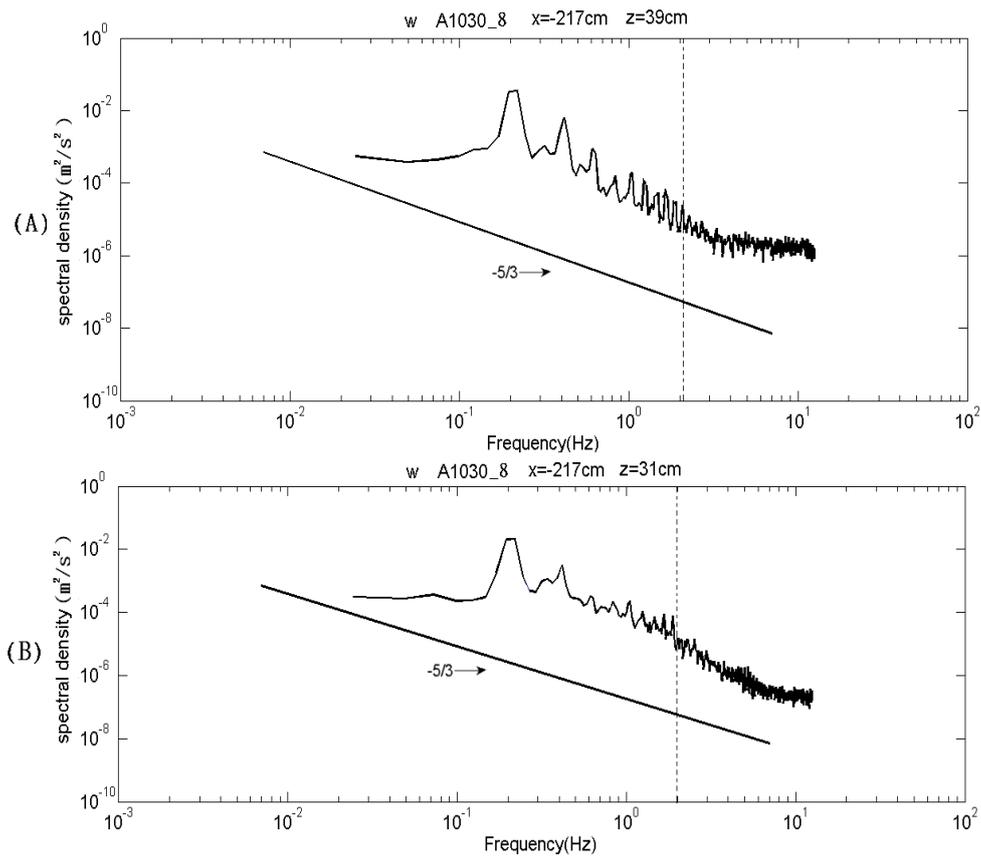


圖 4-44 實驗編號 A1030_8 (W) (A) $x=-217\text{cm}$ $z=39\text{cm}$ (B) $x=-217\text{cm}$ $z=31\text{cm}$ power spectrum 頻譜分析圖。(虛線部分將波動和擾動區隔)。 $f=2\text{Hz}$

表 4-2 實驗統整

	A1030	B1030	C1030	A1030_11	A1030_9.4	A1030_8	
1	●	●	X	●	●	●	實驗編號大寫 A1030:轉速 R60
2	●	●	X	●	●	●	B1030:轉速 R50
3	●	X	X	●	●	●	C1030:轉速 R40
4	●	X	X	●	／	●	A1030_11:斜坡 角度 11°
5	X	X	X	●	／	●	A1030_8: 斜坡 角度 8°
6	X	X	X	●	／	●	1~15:量測點位 置
7	X	X	X	X	／	●	● : 有-5/3
8	X	X	X	X	／	●	X : 無-5/3
9	X	X	X	X	／	●	／ : 無此量測點
10	X	X	X	X	／	●	
11	X	X	X	X	／	●	
12	X	X	X	X	／	／	
13	X	X	X	X	／	／	
14	X	X	X	X	／	／	
15	X	X	X	X	／	／	

4.4 反射率和反射能量計算

反射率 R_a :

為表面波反射實驗所定義的反射係數 R (reflection coefficient) 量化離開內斜坡邊界向深水區前進之反射波。

$$R_a = a_r / a_i,$$

其中 a_r/a_i 為入 / 反射波波形之振幅

$$R_a = E_r / E_i,$$

其中 E_r/E_i 為入 / 反射波波形之能量(Michellet and Ivey, 1998)上式中之 a_r/a_i 分別為內入射波和反射波的波高。由實驗值討論不同尖銳度的波浪傳遞至不同角度之斜坡邊界處時反射係數 R 的變化，。圖 3-3 中顯示當 $\theta > 30^\circ$ ，反射率接近一個常數。計算反射能量如前式(3-7)。

我們利用圖 4-45(A)(B)詳細解釋入射波和反射波的波型，可計算出反射率和反射能量率。

圖 4-46 是前人 Nagashima(1971)和 Ariyaratnam(1998)實驗後的結果，紫色圈圈處和本文的實驗結果相符合。

圖 4-47 和圖 4-48 是實驗編號 A1030_11，橫軸是角度，縱軸是計算出來的反射率和反射能量率，將所計算出來的結果和前人的比對很清楚的看到在角度 11° 和 8° 所計算出來的反射率約在 40% ~50% 之間。顯示出當坡度非常平緩時，反射係數非常小，當坡度漸增，反射係數 R 接近一個常數。

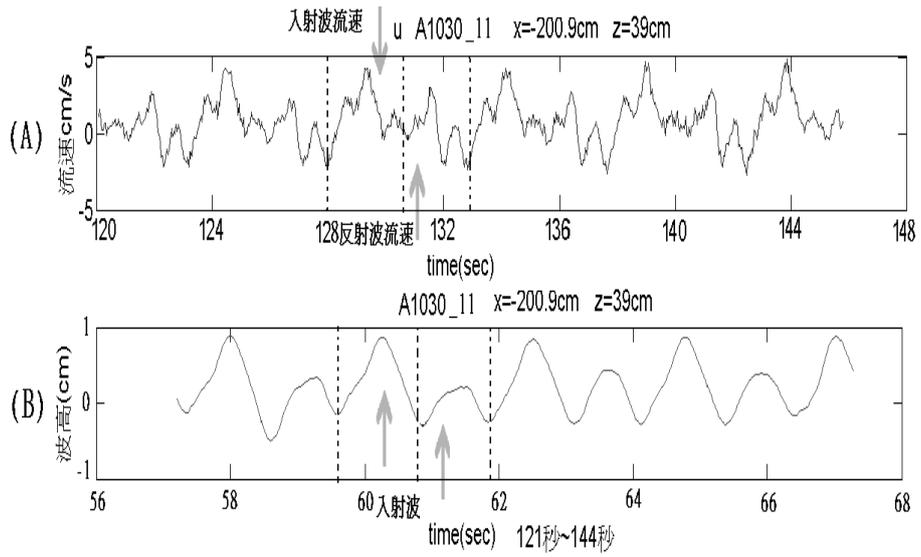


圖 4-45 實驗編號 A1030_11 流速-表面波型比對(一大一小為加入地形後所產生的反射現象)

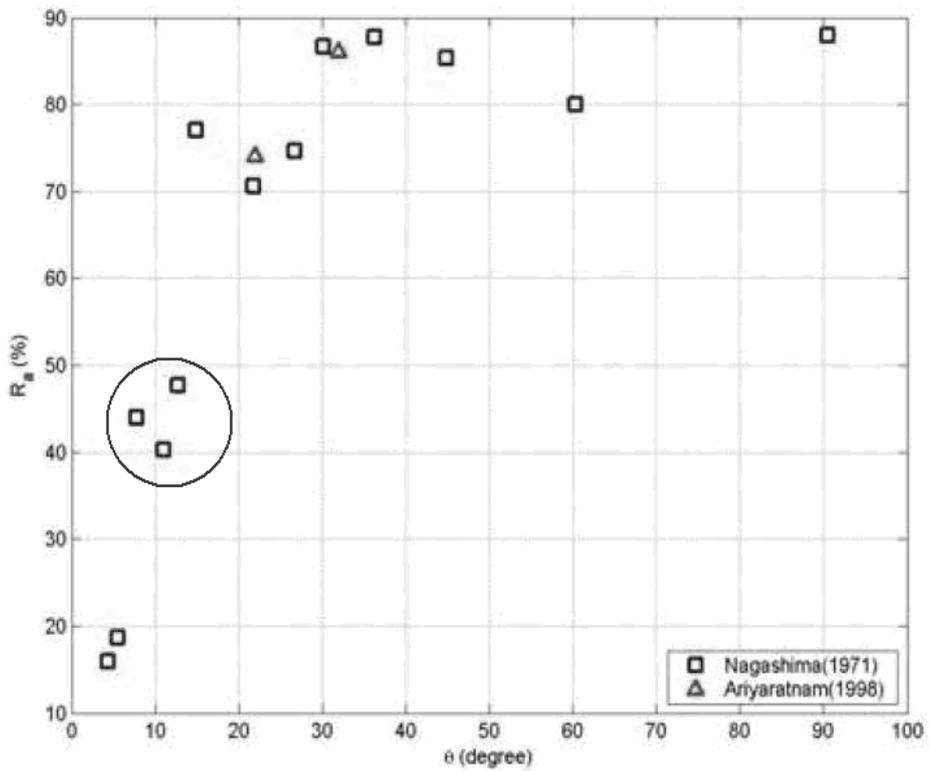


圖 4-46 斜坡角度與反射率(圈圈處跟本實驗角度相近)

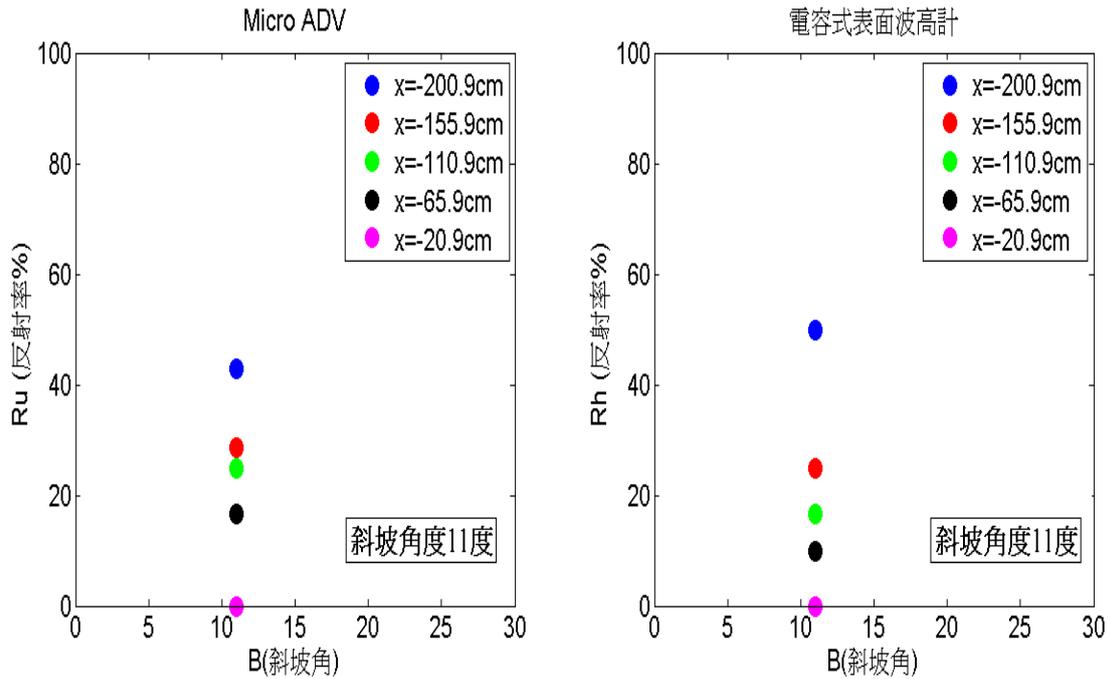


圖 4-47 實驗編號 A1030_11 反射率 (藍色點是最斜坡頂點故反射率最大，紫色較靠近底端)

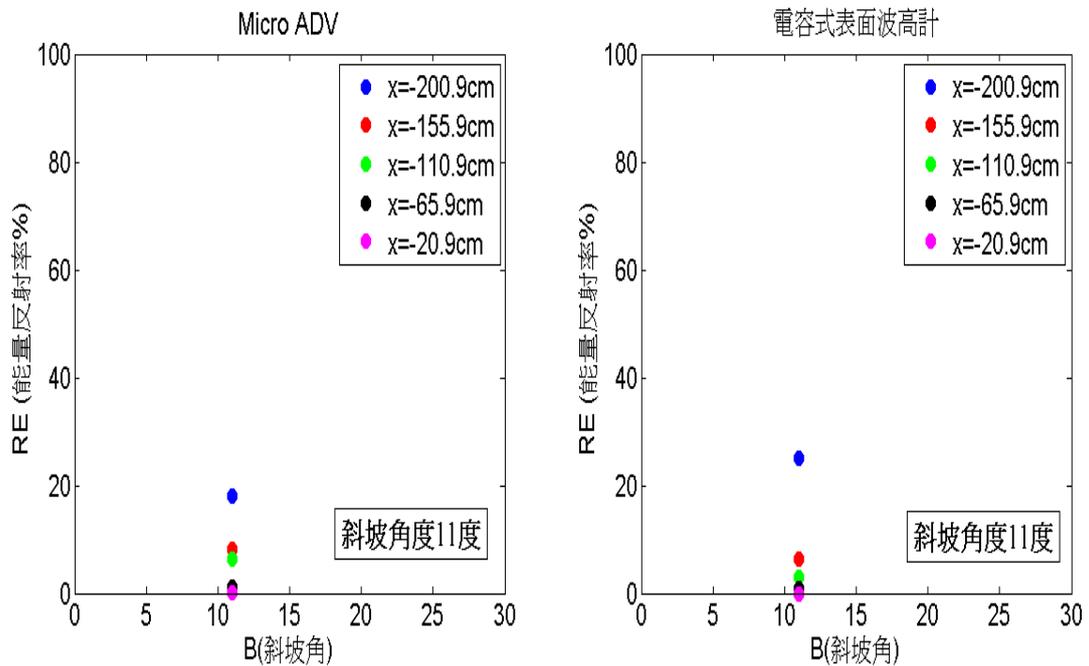


圖 4-48 實驗編號 A1030_11 反射能量率 (藍色點是最斜坡頂點故反射率最大，紫色較靠近底端)

4.5 turbulence

我們在實驗中設計了很多量測點，在這些實驗中本研究將以實驗編號 A1030 和實驗編號 A1000 以及實驗編號 A1030_11 來探討。因為目的就是要把波跟 turbulence 給分隔開，因次我們在此章節將文字敘述放在前面探討此三種方法

4.5.1 點平均法(Bin average)

圖 4-49 為實驗編號 A1030 的 U 流速，橫軸為時間序列，縱軸為流速。紅色為原始流速資料，黑色為經過 bin average 處理過後的資料，藍色部分就是兩者的差也就是 turbulence velocity，前人 Sakakiyama and Liu(2001)在沒有碎波的情況下在波峰處和波谷處的 turbulence velocity 最大，在有碎波的情況下 Turbulence velocity 呈現出很平均上下擺動。

在本實驗分析結果，在沒有碎波的情況下當流速越大(圖 4-50, A1000 的 U 流速)，可較明顯看出在波峰波谷處 turbulence velocity 會比較大，如圖紫色圈圈部分。

圖 4-51~4-52 為實驗編號 A1030_11 U 流速分別為第一點和第三點，在 turbulence velocity 是很平均的上下擺動。表示加上斜坡後，turbulence 很明顯增加，利用 turbulence velocity 來計算出消散率 ε 。

4.5.2 移動平均法(Moving average)

圖 4-53 為實驗編號 A1030 的 U 流速，橫軸為時間序列，縱軸為流速。綠色為原始流速資料，黑色為經過 moving average 處理過後的資料，藍色部分就是兩者的差也就是 turbulence velocity。

在本實驗分析結果，在沒有碎波的情況下當流速越大(圖 4-54), A1000 的 U 流速)，在前人的研究裡，若是波高或是流速較大的實驗中可較明顯看出在波峰

波谷處 turbulence velocity 會比較大。

圖 4-55~4-56 為實驗編號 A1030_11 U 流速分別為第一點和第三點，在 turbulence velocity 是很平均的上下擺動。表示加上斜坡後，turbulence 很明顯增加，利用 turbulence velocity 來計算出 ε 消散率。

4.5.3 相位平均法(Phase average)

圖 4-57, 圖 4-58, 圖 4-59, 圖 4-60 為實驗編號 A1030 第二點(離底高度為 37.5cm). A1000, A1030_11 第一點與 A1030_11 第三點的 U 流速，橫軸為時間序列，縱軸為流速。綠色為原始流速資料，黑色為經過 phase average 處理過後的資料，藍色部分就是兩者的差也就是 turbulence velocity。

圖 4-59~4-60 為實驗編號 A1030_11 U 方向的流速分別為第一點和第三點，在 turbulence velocity 是很平均的上下擺動。表示加上斜坡後，turbulence 很明顯增加。

但此分析方法比起 bin average 和 moving average 誤差會較大。原因是因為要很準確的抓取原始資料的 peak 是比較不容易，會容易產生誤差。

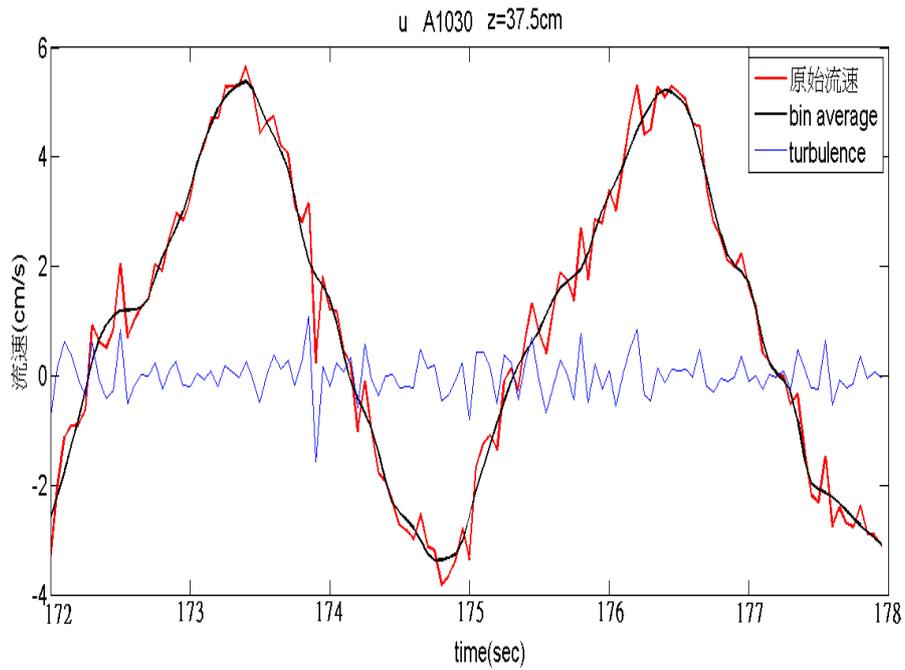


圖 4-49 實驗編號 A1030(第二點) bin average。紅色為原始流速、黑色為平均、藍色為擾動

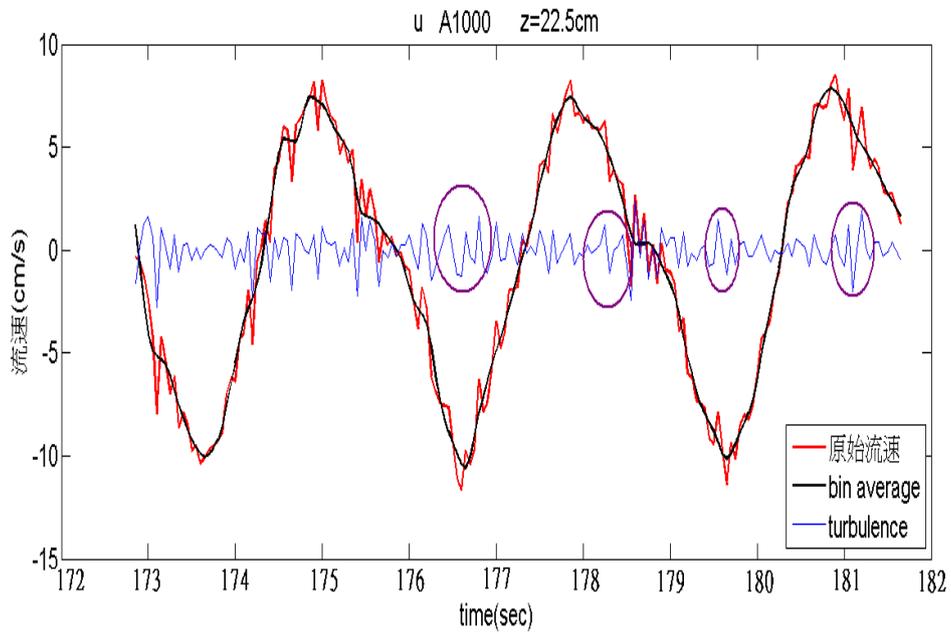


圖 4-50 實驗編號 A1000(離底 22.5cm) bin average。紅色為原始流速、黑色為平均、藍色為擾動

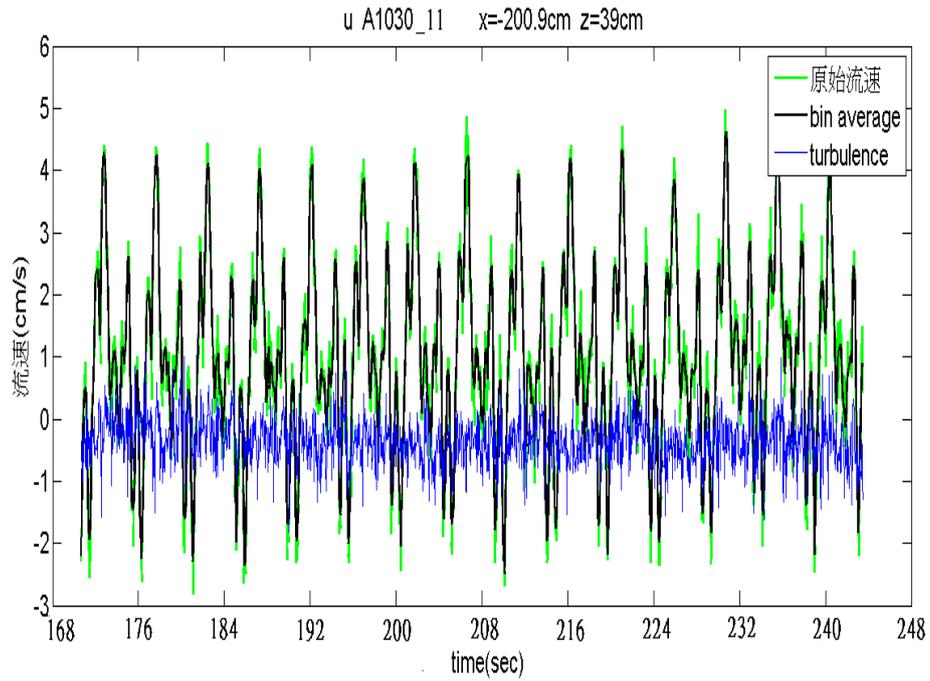


圖 4-51 實驗編號 A1030_11 第一點 bin average。綠色為原始流速、黑色為平均、藍色為擾動

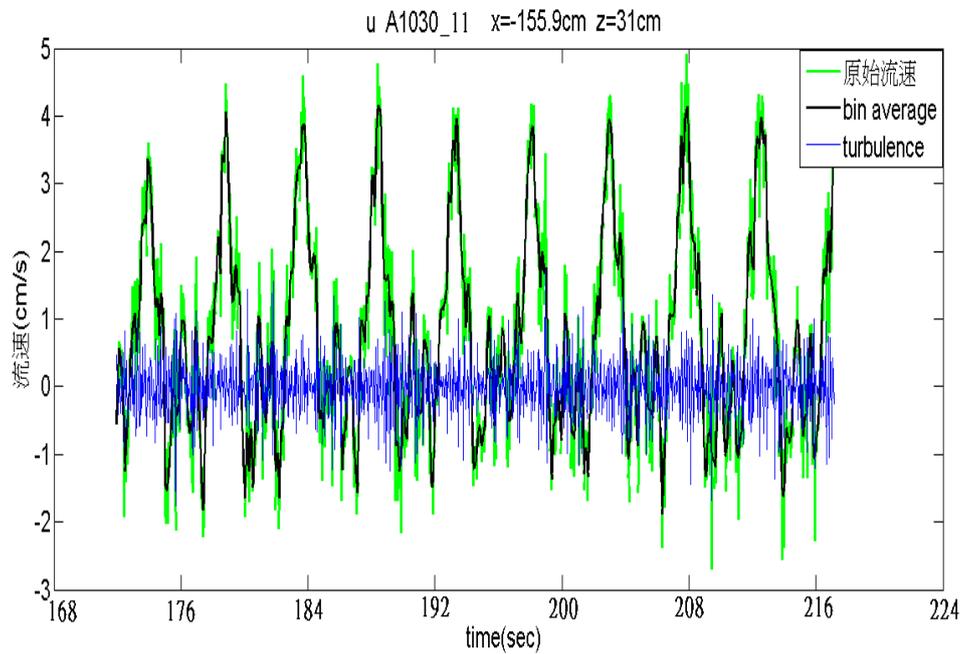


圖 4-52 實驗編號 A1030_11 第三點 bin average。綠色為原始流速、黑色為平均、藍色為擾動

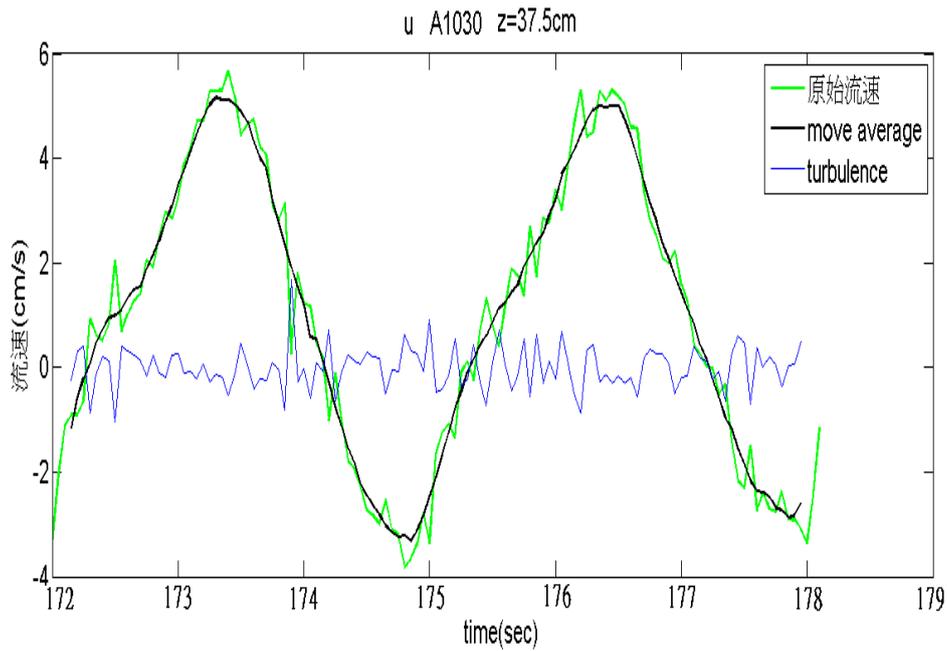


圖 4-53 實驗編號 A1030(第二點) moving average。綠色為原始流速、黑色為平均、藍色為擾動

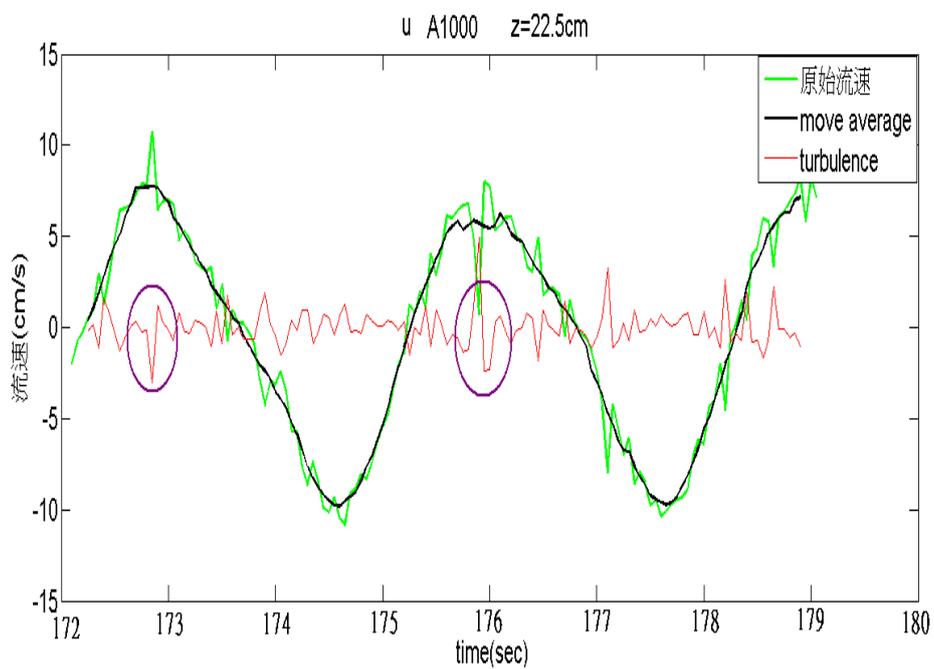


圖 4-54 實驗編號 A1030(離底 22.5cm) moving average。綠色為原始流速、黑色為平均、紅色為擾動

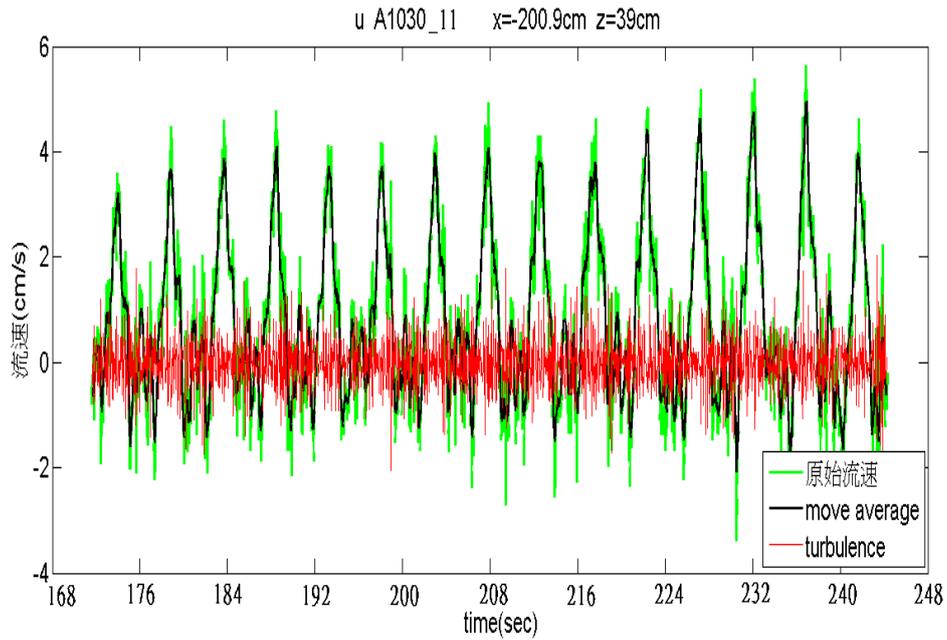


圖 4-55 實驗編號 A1030_11 第一點 moving average。綠色為原始流速、黑色為平均、紅色為擾動

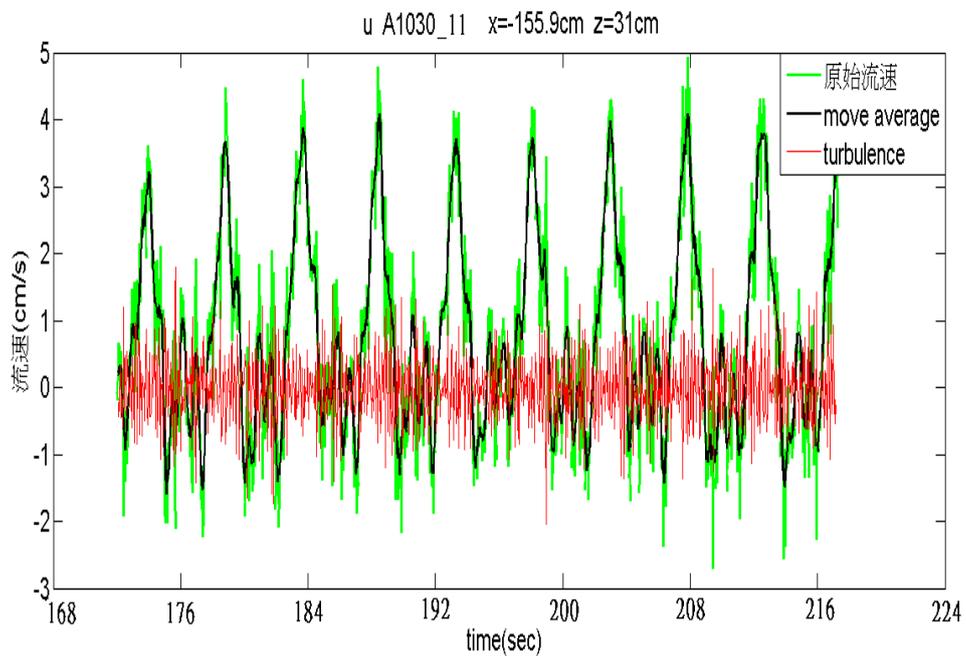


圖 4-56 實驗編號 A1030_11 第三點 moving average。綠色為原始流速、黑色為平均、紅色為擾動

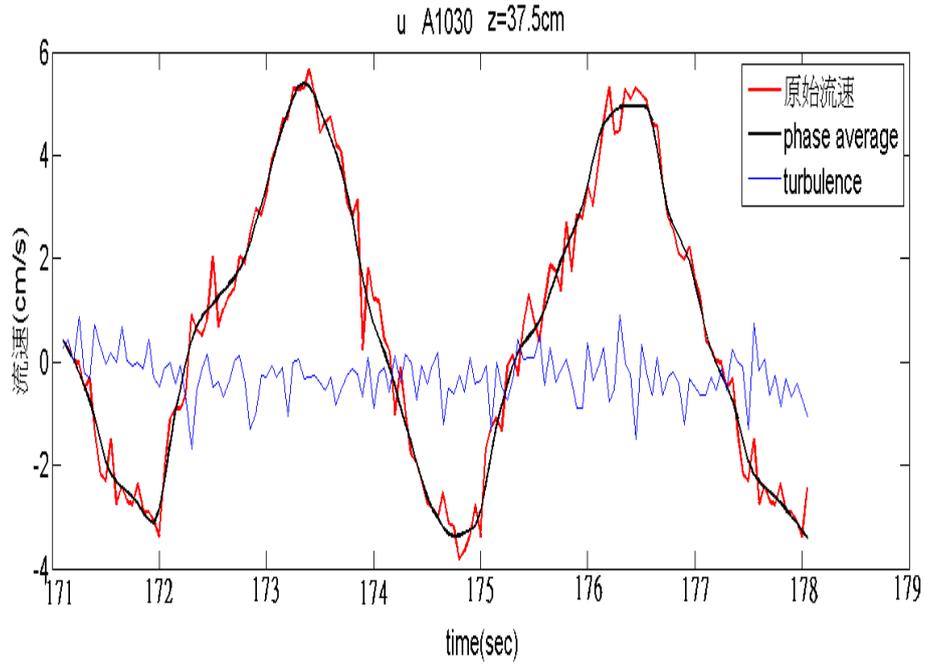


圖 4-57 實驗編號 A1030(第二點) phase average。紅色為原始流速、黑色為平均、藍色為擾動

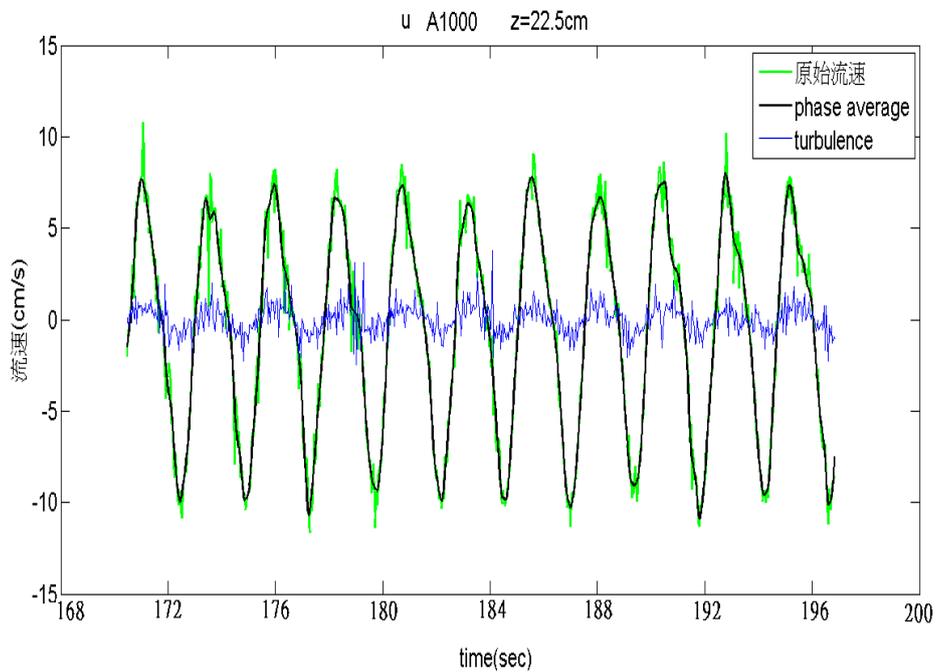


圖 4-58 實驗編號 A1000(離底 22.5cm) phase average。綠色為原始流速、黑色為平均、藍色為擾動

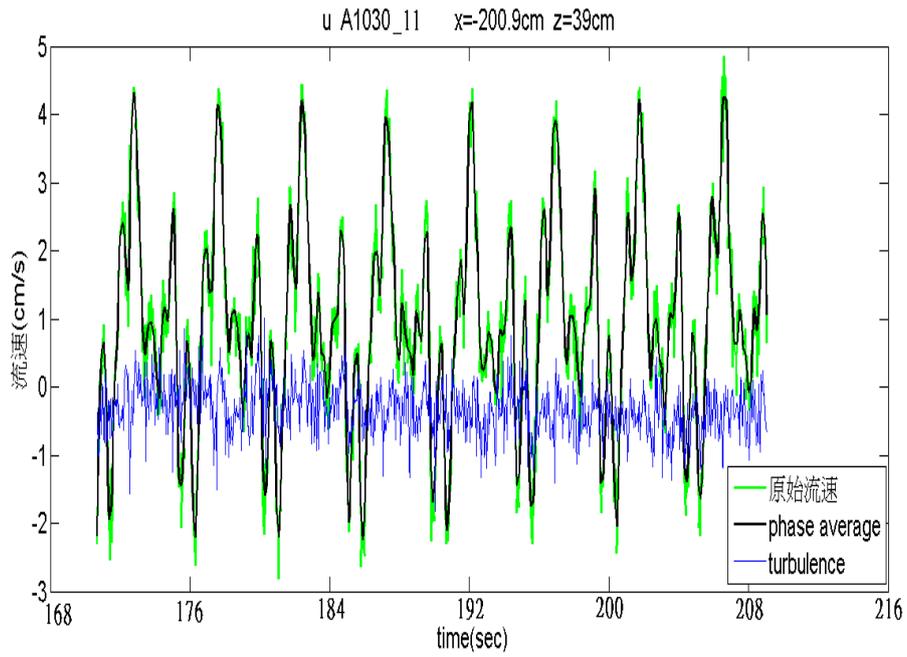


圖 4-59 實驗編號 A1030_11 第一點 moving average。綠色為原始流速、黑色為平均、藍色為擾動

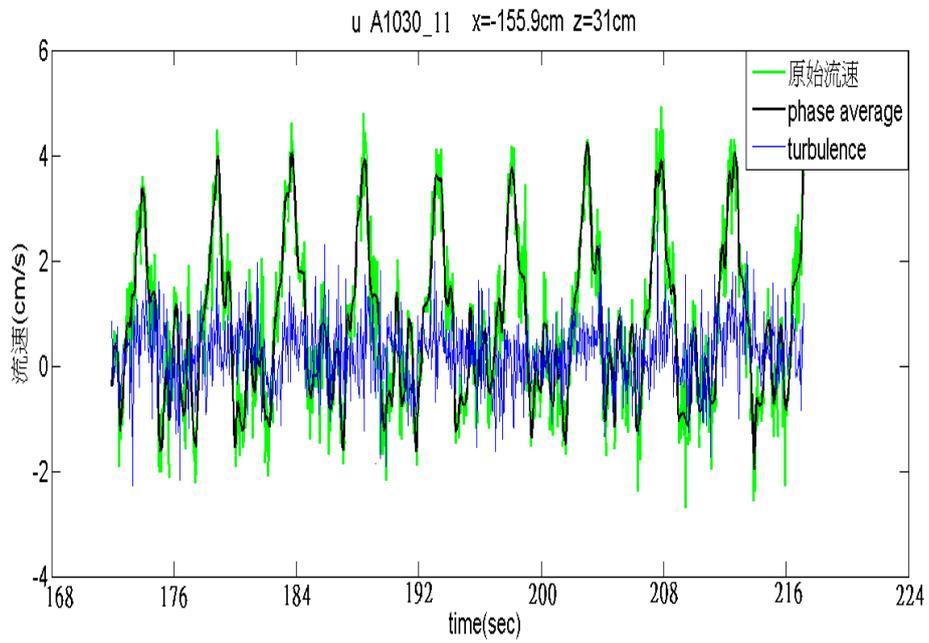


圖 4-60 實驗編號 A1030_11 第三點 moving average。綠色為原始流速、黑色為平均、藍色為擾動

4.6 消散率 (ε)

4.6.1 慣性消散法

因慣性消散法符合斜率 $-5/3$ ，才會有 turbulence，在本文的實驗中，斜率 $-5/3$ 中的 sub-range 包含了入射波所產生的 peak 和 turbulence，但因探討 turbulence 要把波動給去除掉。前人高(2011)在造波水槽做了波流交互作用的實驗，在他的實驗中先造流，然後再增加不同波高。

如圖 4-61 前人高(2011) 在此後灣觀測中最大流速 25.99 cm/s 所對應的頻譜圖其 sub-range 範圍很大，界於頻率 1 Hz~9 Hz 之間。就可利用這段 sub-range 來計算 u^* 、 τ ，進而計算出 ε 消散率。

如圖 4-62 從圖中可以看出在同樣的轉速之下，波高較高的 case 量測到的流速也會略高，證明了波浪會影響流速的大小，而 RPM1700 的頻譜圖中，在於頻率 1 Hz 的位置可以明顯的找到波浪的訊號，且波高 10 公分的 case 比波高 6 公分的 case 更為明顯。在圖中可以看到除了一個主要入射波，其它的都為 turbulence，sub-range 範圍也都呈現出 turbulence 也符合 $-5/3$ 。因此可以利用慣性消散法來計算。

在本文的實驗中，如圖 4-63 虛線部分為 sub-range 範圍，但其它量測點大多都是入射波的 peak 故在下節我們將探討以 TKE 方法，將波動成分給去除掉，進而計算剪應力。

在實驗編號 A1030_8 $x=-217\text{cm}$ $z=39\text{cm}$ 計算出的 $u^*=3\times 10^{-3}\text{m/s}$ 、 $\tau=0.0091\text{N/m}^2$ ， ε 消散率= $5.74\times 10^{-7}\text{m}^2/\text{s}^3$ ，在實驗編號 A1030_8 $x=-217\text{cm}$ $z=31\text{cm}$ $u^*=3.4\times 10^{-3}\text{m/s}$ 、 $\tau=0.0117\text{N/m}^2$ ， ε 消散率= $9.57\times 10^{-7}\text{m}^2/\text{s}^3$ ，兩者比較後可得知在 $x=-217\text{cm}$ $z=31\text{cm}$ 計算出的結果都比 $x=-217\text{cm}$ $z=39\text{cm}$ 還來的大。在實驗編號 A1030_9.4 $x=-230\text{cm}$ $z=39\text{cm}$ 計算出 $u^*=3.4\times 10^{-3}\text{m/s}$ 、 $\tau=0.0076\text{N/m}^2$ ， ε 消散率= $4.84\times 10^{-7}\text{m}^2/\text{s}^3$ 。

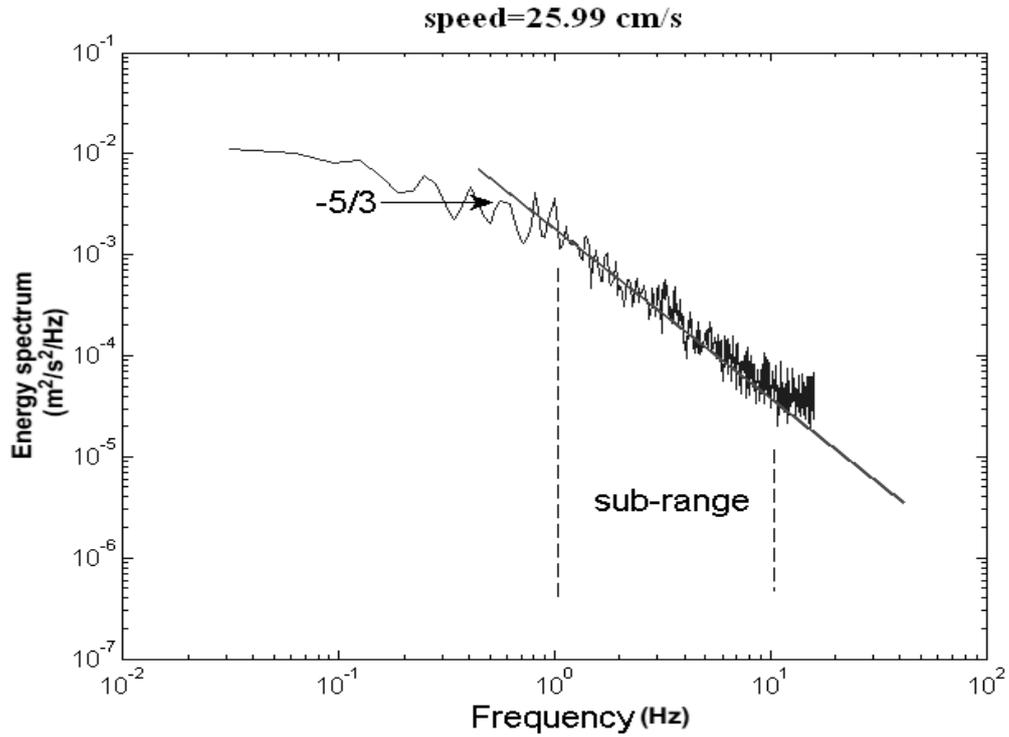


圖 4-61 後灣觀測頻譜分析圖(高, 2011) 虛線部分為 sub-range 流速為 25.99cm/s

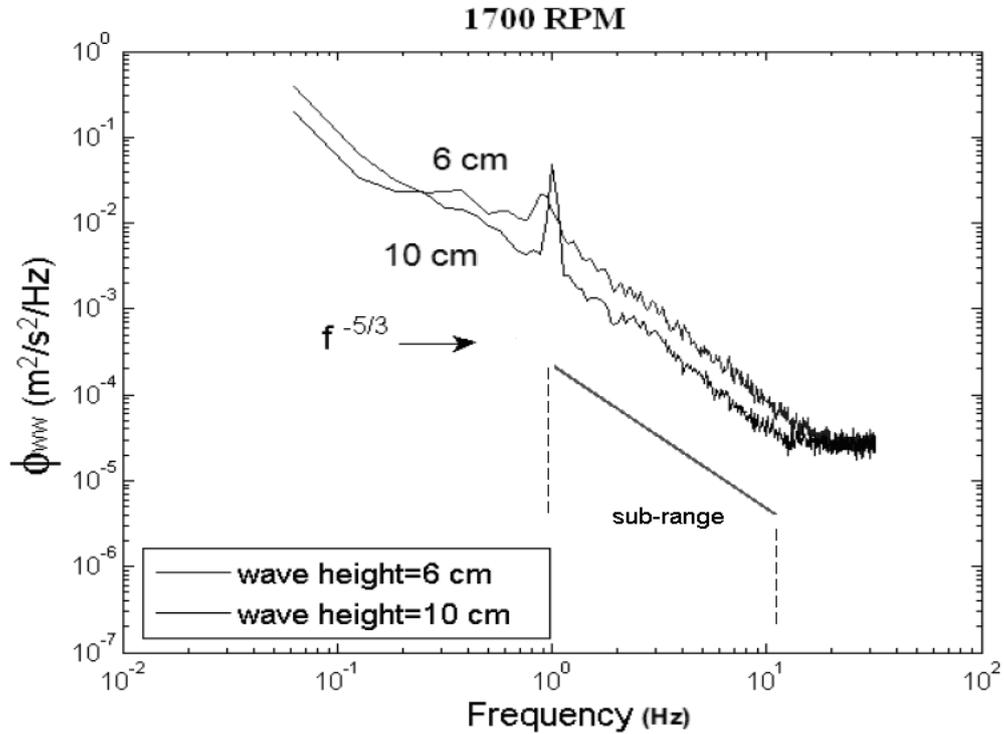


圖 4-62 水槽實驗頻譜分析圖(高, 2011) 虛線部分為 sub-range，藍色為波高 6cm，黑色為波高 10cm

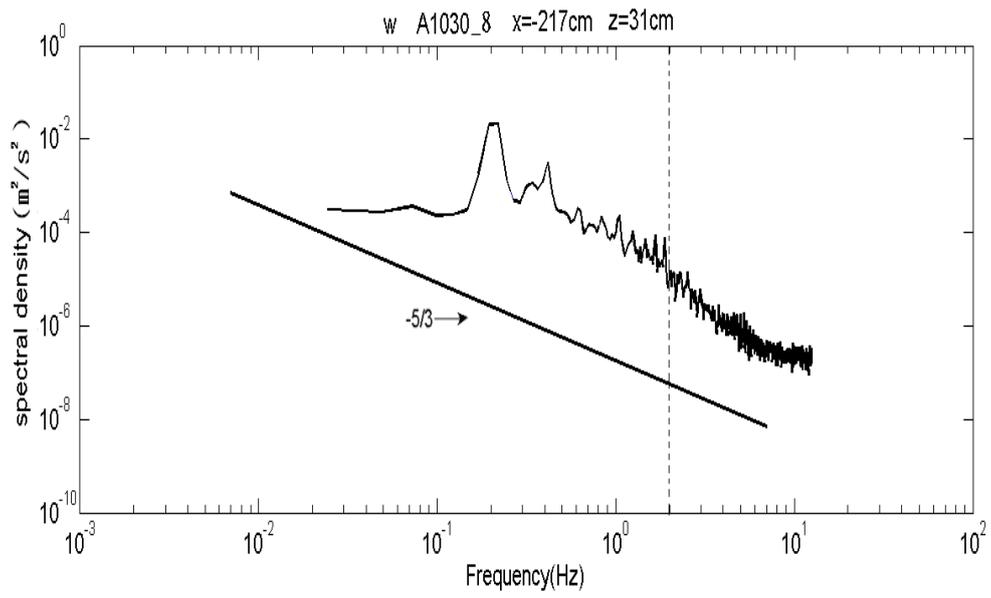


圖 4-63 實驗編號 A1030_8 頻譜分析圖(虛線部分為 turbulence)

4.6.2 TKE

它是假設底床擾流動能和底床剪應力存在一個相對的關係，所以算出擾流動能後乘上一個係數可得剪應力，而此法的特點是可以利用頻譜圖把波浪影響的因素去掉 (Soulsby, 1983) 定義在邊界層中，底床剪應力和 turbulent kinetic energy density 成正比關係，如前式(3-8)。

如圖 4-64 所示將主要入射波 peak 去除掉後，剩下 turbulence，來計算出表 4-3。

我們將實驗符合 power spectrum 斜率 $-5/3$ 的量測點來計算探討，表 4-3 是我們利用 TKE 法計算出的結果，實驗編號 A1030_11 和實驗編號 A1030_9.4、實驗編號 A1030_8 相互比較後可發現出有固定的趨勢，在較接近斜坡地型的點所計算出來的 τ 都會比其它量測點還要來的大，原因是因為當連續內波接近到斜坡後所產生的 turbulence 是最明顯的，愈遠離斜坡處所產生的 turbulence 比較不明顯。斜坡角度越緩所產生的碎波會更加明顯，turbulence 會越大，剪應力 τ 也就越大，前人高(2012)所計算出的剪應力約在 $0.027\text{N/m}^2 \sim 0.144\text{N/m}^2$ 。

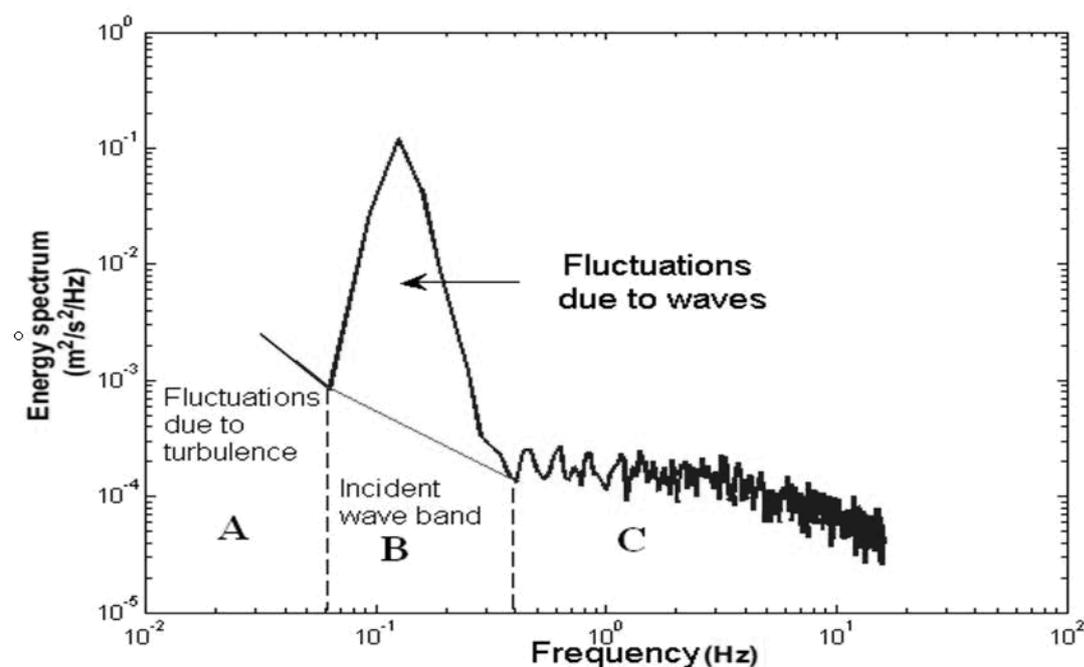


圖 4-64 可將波動部分利用 TKE 去除掉 (Stapleton and Huntley, 1995)

表 4-3 τ (N/ m²)計算結果

(X：無-5/3 \：無此量測點)

	A1030_11	A1030_9.4	A1030_8
	τ (N/ m ²)	τ (N/ m ²)	τ (N/ m ²)
1	0.0048	0.01	0.0031
2	0.0041	0.0081	0.0027
3	0.0030	0.0084	0.0112
4	0.0014	\	0.0140
5	0.0017	\	0.0020
6	0.0021	\	0.0014
7	0.0012	\	0.0013
8	0.001	\	0.0021
9	0.001	\	0.0010
10	0.002	\	0.0012
11	X	\	0.0014
12	X	\	\
13	X	\	\
14	X	\	\
15	X	\	\

實驗首寫 A 表示轉速 R60
A1030_11:斜坡角度 11° A1030_9.4: 斜
坡角度 9.4° A1030_8: 斜坡角度 8° X:
無-5/3 \：無此量測點 1~15:量測點
 τ : (N/ m²)

4.6.3 Auto correlation

Wu et al.1989 ; Kresta et al.1993 推導出

$$U_i(s,t) = (\overline{U_i}(s) + \tilde{u}_i(s,t)) + u_i'(s,t) \quad , i=x,y,z$$

U_i 是時間序列， u_i 的成分是 turbulence，此方法是將原始流速資料，利用 moving average 的方法將波動和擾動給分隔開來，然後再將擾動的資料，利用 moving average 的方式將波動和 turbulence 給區隔開來使用以下公式再加以計算。

如前式(3-20)式當 $t=0, 1, 2, 3, \dots$ 時，計算出來的 Re_i 顯示在下圖 4-65(A)(B)(C)(D)。表4-4是將有符合斜率 $-5/3$ 的量測點帶入計算 ε (消散率)， X : 無 $-5/3$ \ : 無此量測點， ε 大約都在 $10^{-6} \sim 10^{-8}$ 之間，越靠近斜坡處， ε 越大。結果和TKE是一致的。原因是因為當連續內波接近到斜坡後所產生的turbulence是最明顯的，愈遠離斜坡處所產生的turbulence比較不明顯。斜坡角度越緩所產生的碎波會更加明顯，turbulence會越大，消散率 ε 也就越大。

圖4-66(A)(B)為A1030_8 $x=-309\text{cm}$ $z=39\text{cm}$ 的隨時間變動的 ε ，可看到 ε 其實很平均，但圖中會有一些特別突出的“spikes”，原因是比較低的correlation造成的，這個“spikes”像是會造成Micro ADV量測上的誤差，所以要提高Micro ADV的correlation值，但實際上Micro ADV的correlation值都相當的高。

圖中紅色圈圈處可看出當 ε 很平均時沒有特別突出的“spikes”，correlation的值相當的高，其它有“spikes”的時間點correlation的值都會較低會跟著變動。圖4-67(A)(B)為A1030_8 $x=-217\text{cm}$ $z=31\text{cm}$ 的隨時間變動的 ε 結果也是一樣黑色圈圈處可看出當 ε 很平均時沒有特別突出的“spikes”，correlation的值相當的高，其它有“spikes”的時間點correlation的值都會較低會跟著變動。圖4-68(A)(B)(C)~4-69(A)(B)(C)為TKE所計算出來的 τ 值和 Autocorrelation，可明顯的看出這兩張圖兩種算法結果趨勢都是一致的，越接近斜坡的量測點 ε 越大。

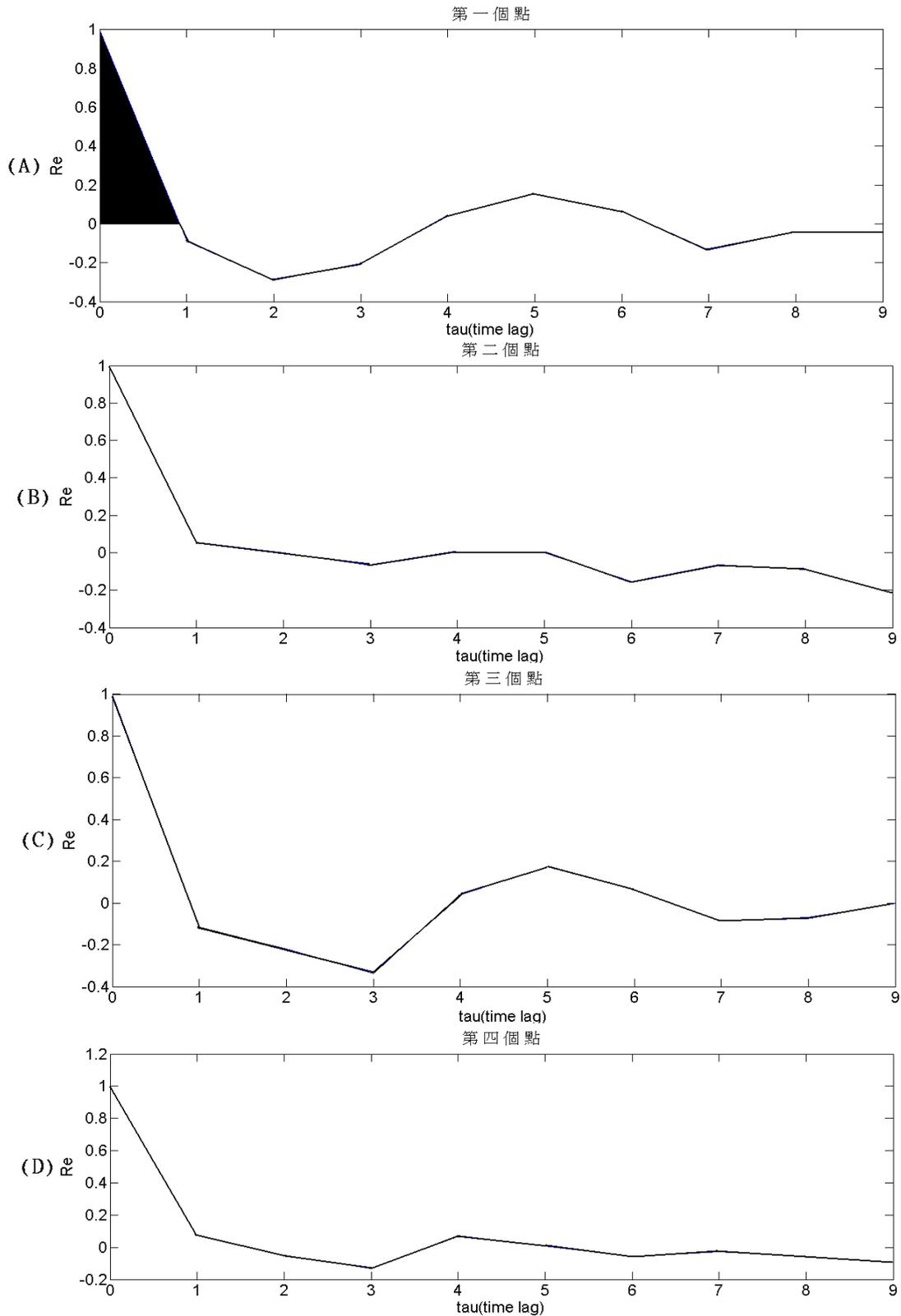


圖 4-65 實驗編號 A1030_8 (A)第一點(B) 第二點(C) 第三點
(D) 第四點 tau-Re。黑色為積分範圍

表 4-4 Auto correlation ε (消散率)

	A1030_11	A1030_9.4	A1030_8	實驗首寫 A 表示 轉速 R60
	ε (消散率)	ε (消散率)	ε (消散率)	
1	7.23×10^{-7}	9.33×10^{-7}	8.93×10^{-7}	A1030_11: 斜坡 角度 11°
2	5.34×10^{-7}	7.24×10^{-7}	4.37×10^{-7}	
3	6.15×10^{-7}	8.45×10^{-7}	9.31×10^{-7}	
4	6.64×10^{-8}	\	2.31×10^{-6}	A1030_8: 斜坡角 度 8°
5	6.68×10^{-8}	\	1.37×10^{-7}	
6	5.12×10^{-7}	\	9.17×10^{-8}	
7	2.01×10^{-7}	\	5.83×10^{-7}	A1030_8: 斜坡角 度 8°
8	3.03×10^{-7}	\	2.83×10^{-7}	
9	4.29×10^{-7}	\	3.12×10^{-7}	
10	5.01×10^{-7}	\	3.02×10^{-7}	1~15: 量測點
11	x	\	5.11×10^{-7}	X: 無-5/3
12	x	\	\	\: 無此量測點
13	x	\	\	
14	x	\	\	ε : 消散率
15	x	\	\	

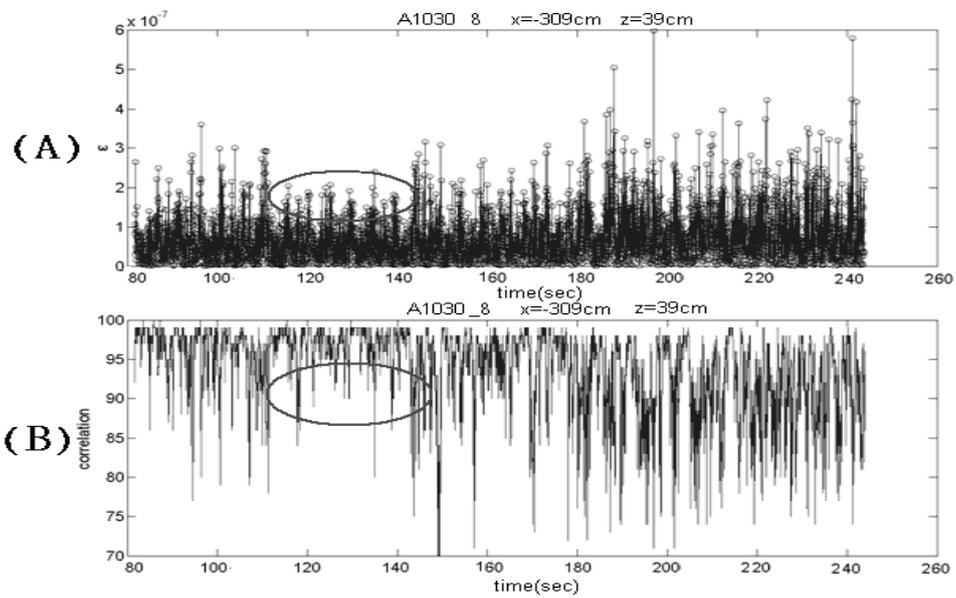


圖 4-66 (A)隨時間變化的 ε (B)correlation (實驗編號 A1030_8 $x=-309\text{cm}$ $z=39\text{cm}$)。黑色圈圈可明顯看出趨勢相同

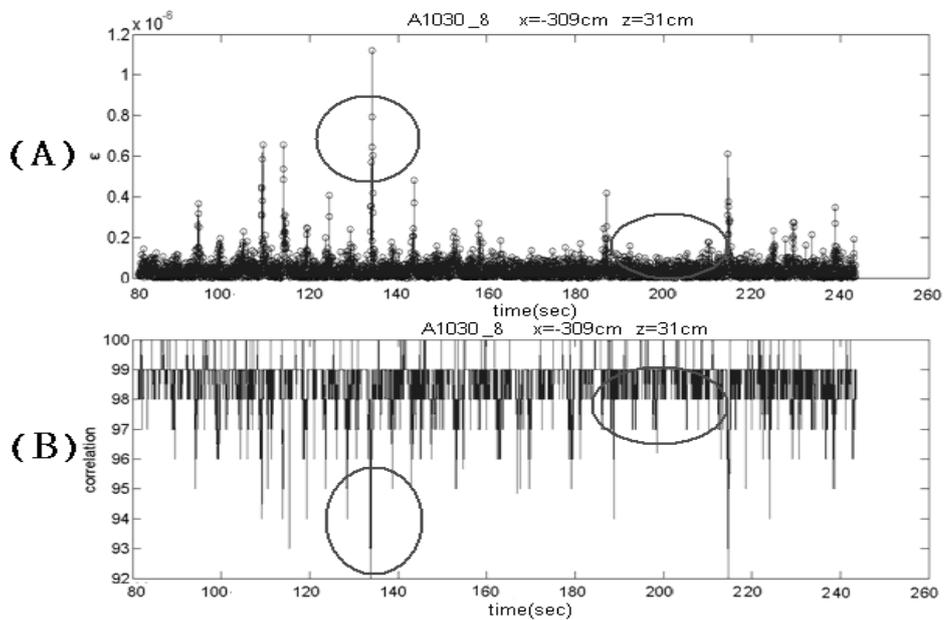


圖 4-67 (A)隨時間變化的 ε (B)correlation (實驗編號 A1030_8 $x=-309\text{cm}$ $z=31\text{cm}$)。黑色圈圈可明顯看出趨勢相同

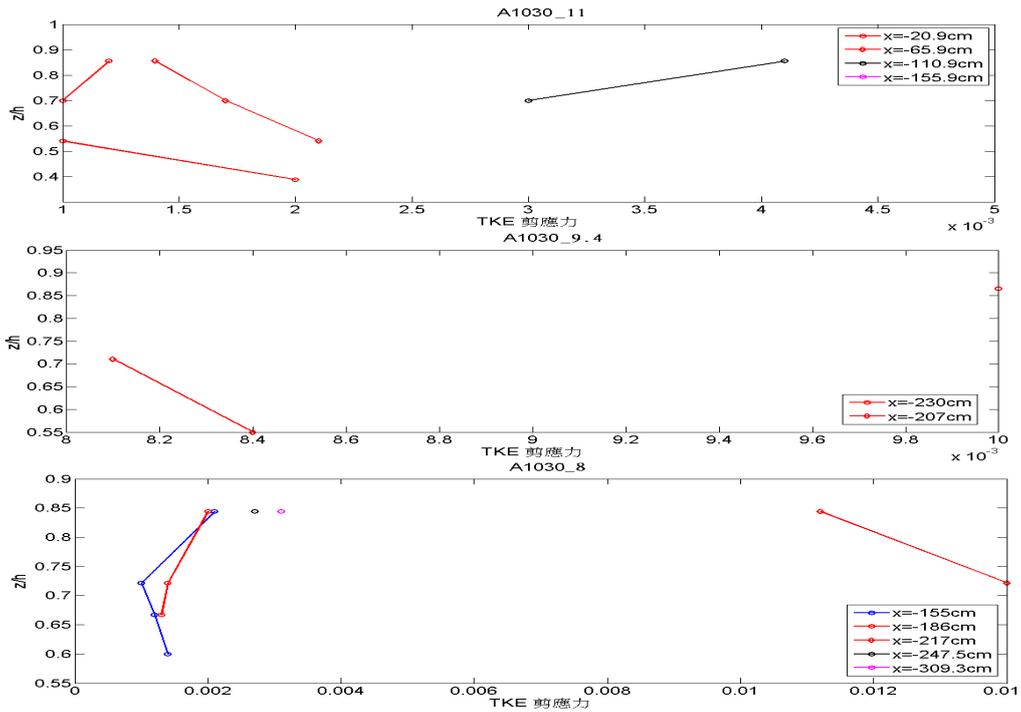


圖 4-68 (A)實驗編號 A1030_11(B)實驗編號 A1030_9.4(C)實驗編號 A1030_8
TKE 剪應力比較

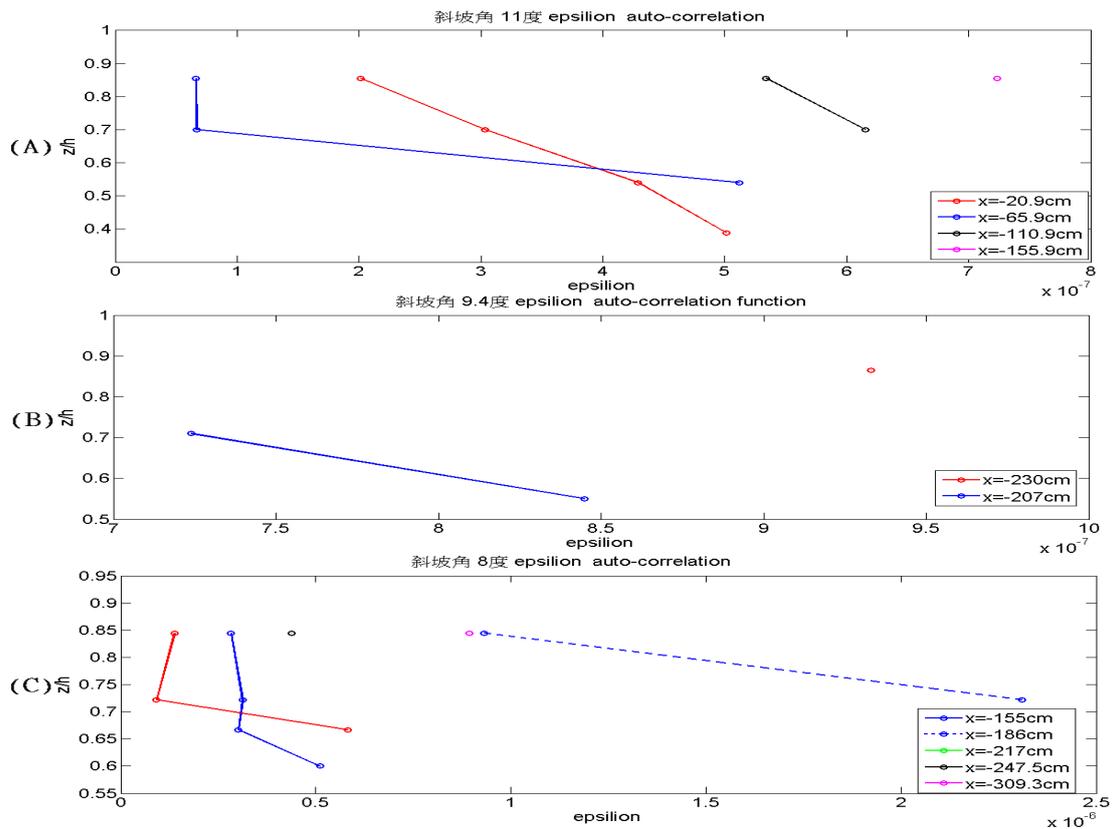


圖 4-69 (A)實驗編號 A1030_11(B)實驗編號 A1030_9.4(C)實驗編號 A1030_8
auto correlation 消散率比較

第五章、結論

本研究為了更了解連續內波傳遞的特性, 在內波水槽中做了一系列的兩層流體系統實驗所得到重要結論如下:

1. 連續內波粒子流速特性

由於波峰波谷的粒子流速是很上下均勻對稱, 故計算出來的平均流速約零, 從這 15 點垂直移動結果, 因為在內波交接處水粒子會呈現橢圓的方式的移動, 故在交接層 W 流速是最大的(因粒子上下移動), 越往上或越往下流速會越小。根據量測結果顯示, 若轉速調大, 連續內波的週期會比較短, 內波振幅會比較大, 粒子流速就會比較大, 在靠近淡水層和鹽水層交接處, 所得到的 U 流速最大, 越接近底層, 流速也就會最小, 在轉速實驗中最大流速可達到 $U=4.5\text{cm/s}$, $W=1.4\text{cm/s}$ 。鹽水密度使用 1010kg/m^3 時, 流速會較小, 是因為上下層密度差變小, 導致內波能量變小, 故流速變小。

內波在傳遞時交接面會產生些物理現象在波峰處, 內波上方會呈現和波向相反的流速, 在內波下方會呈現和波向相同之流速, 反之在波谷處, 內波上層會呈現和波同向移動的流速, 在內波下層會呈現和波反向之移動流速。

Umeyama(2000)在水槽實驗中, 因自由表面所產生的流場也會受到內波的流場所影響, 因而互相牽引, 本文實驗所量測出來的自由表面波波高約為 1.8cm , 內波波高約為 4.5cm , 與理論實際比較結果, 理論值在一階時差異性較大在二階、三階的差異性較小。

2. 連續內波傳遞到斜坡的變化

當連續內波傳遞到斜坡上, 可發現當內波傳遞到斜坡時淺化開始發生, 內波波形逐漸抬升, 波峰變的尖銳, 在更接近斜坡邊界時後半段波形變的比較陡直造成流體剪應力不穩及紊流, 使水體內部 overturn, 最後在斜坡上產生反射、破

碎混合等現象。由實驗值討論不同尖銳度的波浪傳遞至不同角度之斜坡邊界處時反射率的變化，會發現內波的反射係數與表面波非常相似，當坡度非常平緩時，反射係數非常小，在(Nagashima1971, Ariyaratnam1998)的實驗中當坡度漸增，反射係數 R 接近一個臨界值常數。

3. Power spectrum 頻譜分析

在分析 Power spectrum 頻譜分析中，取 W 的原因是因為 W 是垂直方向流速，對底床的摩擦是以垂直距離來計算，但實際 Power spectrum 頻譜分析也是可將 U 和 V 也帶入計算，但因本實驗 U 和 V 帶入分析後得到沒有符合斜率 $-5/3$ sub-range，故本文將探討 W 為主。

Power spectrum 頻譜分析圖中會有好幾個 peak，是因為入射波所造成的現象，在圖中入射波周期 ($T=$ 約 2.4s)，能量為最大。很清楚的可以看到 $z=40\text{cm}\sim z=30\text{cm}$ 符合 $-5/3$ ， $z=27.5\text{cm}\sim z=25\text{cm}$ 不符合(因量測點太多只取前幾個量測點來比較)。另外還有一個比較重要的現象是：虛線部分可將波和 turbulence 給區隔開來。在 $z=40\text{cm}$ 虛線 ($f=2\text{Hz}$) 和 $z=37.5\text{cm}$ 、 $z=32.5\text{cm}$ 比較後，可發現沒有符合 $-5/3$ (在較高頻處)，原因是因為 $z=37.5\text{cm}$ 、 $z=32.5\text{cm}$ 比較接近內波交接處所產生的 turbulence 比較大， $z=40\text{cm}$ 和 $z=30\text{cm}$ 由於 turbulence 較小，可將它視為白噪音。

4. turbulence

在本實驗中，內波傳遞要產生 turbulence 的現象是不多的。原因是因為內波傳遞時所產生的波高、流速不大，在本實驗所產生最大內波波高也只有 4.5cm，最大流速也只有 4.5cm/s，產生 turbulence 的現象也只有在上層內波交界面附近才会有比較明顯的 turbulence。但加入斜坡後，由於內波傳遞到斜坡的一連串變化，導致 turbulence 很明顯的增加， ε (消散率) 也增加。

5. ε (消散率)

在較接近斜坡地型的點所計算出來的 ε 消散率都會比其它量測點還要來的大，原因是因為當連續內波接近到斜坡後所產生的 turbulence 是最明顯的，愈遠離斜坡處所產生的 turbulence 比較不明顯。斜坡角度越緩所產生的碎波會更加明顯，turbulence 會越大，消散率 ε 也就越大。在斜坡角度較緩利用慣性消散法計算出的 ε 消散率= $5.74 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}^3$ ， ε 消散率= $4.84 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}^3$ 。在斜坡角度 $8^\circ \sim 11^\circ$ 利用 Auto-correlation 法計算出的消散率約為 $2.31 \times 10^{-6} \sim 7.23 \times 10^{-7}$ 。

這幾種計算消散率結果顯示趨勢是一致的，越靠近斜坡處內波受到斜坡影響為最劇烈。

參考文獻

- 陳信旭(2004): 孤立內波的傳遞在單斜坡上反射之實驗研究, 國立中山大學海洋物理研究所碩士論文。
- 郭青峰(2005): 孤立內波的傳遞及受障礙物影響之實驗研究, 國立中山大學海洋物理研究所碩士論文。
- 鄭明宏(2006): 孤立內波於變動地形之數值模擬, 國立中山大學海洋物理研究所碩士論文。
- 王瑋宏(2008): 孤立內波傳遞之粒子運動軌跡, 國立中山大學海下科技暨應用海洋物理研究所碩士論文。
- 謝世圳、林呈、余詩敏(2009): 孤立波底床邊界層之流場特性探討, 第三十一屆海洋及海岸工程研討會論文集, 第81-86頁。
- 高郁峰(2012): 沿岸海域底床剪應力特性之研究, 國立中山大學海洋生物科技暨資源學系研究所碩士論文。
- Ariyaratnam, J.(1998): Investigation of slope stability under internal wave action *.B.Eng., (Hons.)thesis*, Dept.of Environmental Eng., University of Western Australia, Australia.
- Huang, Z.-C., L. Lenain, W. K. Melville, J. H. Middleton, B. Reineman, N. Statom, and R. M. McCabe (2012): Dissipation of wave energy and turbulence in a shallow coral reef lagoon, *Journal of Geophysical Research*, 117, C03015, doi:10.1029/2011JC007202.
- Kresta, S. M. and P. E. Wood (1993). "The flow field produced by a pitched blade turbine: characterization of the turbulence and estimation of the dissipation rate." *Chemical Engineering Science*, 48(10), 1761-1774.
- Kim, S.C., C.T.Friendrichs, M. ASCE, J.P.-Y.Maa, and L.D.Wright(2000) : Estimating Bottom Stress in Tidal Boundary Layer From Acoustic Doppler Velocimeter Data, *Journal of Hydraulic Engineering*, 126, 399-406.

- Kaku, V. J., Miche, C. Boufadel, M.Asce; and A. D. Venosa(2006):Evaluation of Mixing Energy in Laboratory Flasks Used for Dispersant Effectiveness Testing, *Environmental Fluid Mechanics*, 6, 385–406 doi 10.1007/s10652-006-0003-3.
- Vikram J., Boufadel Michel C., Venosa Albert D. and Weaver James (2006) : Flow Dynamics in Eccentrically Rotating Flasks Used for Dispersant Effectiveness Testing, *Environmental Fluid Mechanics*, 6, 385–406, doi 10.1007/s10652-006-0003-3.
- LeBlond, P.H.and Mysak, L.A.(1978):Wave in the Ocean.Amsterdam:Elsevier.
- Michallet, H.and Ivey, G.N.(1998):Experimental study on mixing due to internal solitary waves breaking on slopes.*J.Geophysical Research*, 366, 159-177.
- Mazumder, B.S., and S.P.Ojha(2007) : Turbulence statistics of flow due to wave–current interaction, *Flow Measurement and Instrumentation*, 18, 129–138.
- Nagashima, H.(1971):Reflection and breaking of internal waves on a sloping Beach, *J.Oceanographical Soc.Japan*, 27, 1-6.
- Wu, H. and G. K. Patterson (1989). “Laser-Doppler measurements of turbulent-flow parameters in a stirred mixer.” *Chemical Engineering Science*, 44(10), 2207-2221.
- Soulsby (1983) : Selecting record length and digitization rate for near-bed turbulence Measurements, *Journal of Physical Oceanography*, 10, 208-219.
- Stapleton, K. R., and D. A. Huntley (1995) : Seabed Stress Determinations Using The Inertial Dissipation Method And The Turbulent Kinetic Energy Method, *Earth Surface Processes and Landforms*, 20, 807-815.
- Sakakiyama, T.and P. L.-F. Liu (2001): Laboratory experiments for wave motions and turbulence flows in front of a breakwater, *Coastal Engineering*, 44,

117–139.

Shimizu, R., T. Shintani, and M. Umeyama (2006) : Instantaneous and Lagrangian velocity fields of internal waves on a slope by PIV measurement and numerical simulation, *JOURNAL OF WATERWAY, PORT, COASTAL AND OCEAN ENGINEERING*, 52, 1–5.

Umeyama, M.(2000) : Third-order Stokes Internal Waves for a Density-stratified Two-layer Fluid, *MEMOIRS OF GRADUATE SCHOOL OF ENG.TOKYO METROPOLITAN UNIV*, 50, 120-136.

Umeyama, M.(2002) : Experimental and Theoretical Analyses of Internal Waves of Finite Amplitude *JOURNAL OF WATERWAY, PORT, COASTAL AND OCEAN ENGINEERING*, 128, 133–141.

Umeyama, M. and T.Shintani(2004) : Visualization Analysis of Runup and Mixing of Internal Waves on an Upper Slope, *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 130, 89-97.

Umeyama, M. and T.Shintani(2006) : Transformation, Attenuation, Setup, and Undertow of Internal Waves on a Gentle Slope, *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 132, 477-486.

Umeyama, M. (2008):PIV Techniques for Velocity Fields of Internal Waves over a Slowly Varying Bottom Topography, *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 134, 286-298.

Umeyama, M. and H. Shinomiya (2009):Particle image velocimetry measurements for Stokes progressive internal waves, *Geophysical Research Letters*, 36, L06603 , doi:10.1029/2008GL036821.

Venosa, A.D., V. J.Kaku and M.C.Boufadel, K.Lee(2005): Measuring Energy Dissipation Rates in a Wave Tank, *International Oil Spill Conference*, 1-4.

Wickley-Olsen.E, Michel C.B., King.T, Z. Li, K.L, D.Venosa(2008) : Regular and
Breaking Waves in Wave Tank for Dispersion Effectiveness Testing, 2008
International Oil Spill Conference, 499-508.

附錄一 慣性消散法公式

$$\Phi_{ii} = \alpha_i \varepsilon^{2/3} k^{-5/3} \quad (1)$$

$$u_* = (\Phi_{ii}(k) k^{5/3} / \alpha_i)^{1/2} (Kz)^{1/3} \quad (2)$$

利用 Taylor 提出的 frozen turbulence 觀念把 wavenumber 轉換成 frequency :

$$\Phi_{ii}(k) = \Phi_{ii}(f) \bar{u} / 2\pi \quad (3)$$

$$\Phi_{ii}(f) = \alpha_i \varepsilon^{2/3} (2\pi / \bar{u})^{-2/3} f^{-5/3} \quad (4)$$

兩邊取 log :

$$\log[\Phi_{ii}(f)] = \log[\alpha_i \varepsilon^{2/3} (2\pi / \bar{u})^{-2/3}] - 5/3 \log(f) \quad (5)$$

計算出 $\Phi_{ii}(f)$ 後可以代回(4)算出 $\Phi_{ii}(k)$ 再代回(3)算出 u_* :

$$\tau = \rho u_*^2 \quad (6)$$

Φ : spectral energy 。

α_i : 一維的 Kolmogorov 常數 (0.69) 。

ε : 消散率 。

k : wavenumber 。

u_* : 摩擦速度 。

K : von Karman 常數 (0.4) 。

z : 儀器距離底床的高度 。