

台灣四周海氣象調查研究 (四)

計劃主持人：海岸工程組組長 歐陽餘慶

協同主持人：所 長 梁乃匡

顧問：國立台灣大學
海洋研究所教授 王 霄

各港務局

參與人員：劉凡正 陳金水 賴福順 林元惠

研究人員：副研究員 徐進華

助理研究員 曾相茂 吳 基 林柏青
陳明宗

助理 江中權 張富東

技 工 楊怡芸 張喆音 吳啓萍
蔡金吉 何炳紹 蔡瑞成
李永勝 陳進冰

台灣四周海象氣象調查研究 (四)

目 錄

摘 要	1
壹. 資 料 蒐 集	2
貳. 外傘頂洲附近海域海況調查	17
參. 流對波浪觀測之影響	48
肆. 面積風域法風波能量授受係數之推求	61
伍. 蘇澳港港池盪漾實測	69
陸. 參考文獻	81

摘 要

本研究為本所重要研究項目之一，係長程計劃，自七十四年七月一日開始，往後每年辦理，茲將本年度工作內容摘述如下：

第壹章說明繼續蒐集過去之颱風、季風、波浪、海流及潮汐等原始資料，以及自行在蘇澳港、台中港、外傘頂洲、興達港等海域實測各項資料，並鍵入電腦資料庫。第貳章說明為瞭解冬季東北季風吹襲下，外傘頂洲附近海域有關海流、波浪及風等之情形，辦理現場海流、波浪調查作業。第參章以理論及數值計算解說流對波浪觀測結果所產生之影響。第肆章探討面積風域法風波能量授受係數之推求。第伍章說明繼續上年度蘇澳港港池盪漾實測工作。

壹. 資料蒐集

曾相茂 吳基 江中權

1 - 1 前 言

本計劃為一長期性的研究工作，本年度的工作重點仍承續 74 年 7 月 1 日開始執行之延續作業：繼續蒐集過去之颱風、季風、波浪、海流及潮汐等原始資料輸入電腦資料庫，成為本所基本標準檔；建立各有關單位已輸入 IBM-PC 個人電腦磁片之一般檔資料；及本年度在蘇澳港、台中港及外傘頂洲附近海域現場實測各項資料，茲將本年度（77 年 7 月 ~ 78 年 6 月）資料蒐集情形敘述如后：

1 - 2 資料鍵入部份

本年度內蒐集之各項海氣象資料除磁片、磁帶外，仍有部份資料係由各有關單位以報表紙方式提供，經由本組楊怡芸小姐，吳啓萍小姐，及數學模式組張喆音小姐以人工方法鍵入本所 VAX-780電腦中，總計本年度共鍵入了 405 個標準檔（以月份區分），包括潮汐資料檔 224 個，風速、風向資料檔 132 個，波浪資料檔 49 個，茲將各類型鍵入資料列舉如后：

表 1 - 1 潮汐鍵入資料表

測站名稱	代 號	時 間	提 供 單 位	檔案數	鍵入者
澎 湖	PH	1971/01 - 1987/12	海軍氣象中心	204	楊怡芸 張喆音 吳啓萍
台 中 港	TCNB	1988/07 - 1989/06	港 研 所	12	楊怡芸
基 隆 港	KL	1988/03 - 1988/10	基 隆 港 務 局	15	楊怡芸
		Total		224	

表 1 - 2 風速、風向鍵入資料表

測站名稱	代 號	時 間	提 供 單 位	檔案數	鍵入者
東 沙	TS	1986/01 - 1987/12	海軍氣象中心	24	楊怡芸
南 沙	NS	1978/01 - 1978/12 1986/01 - 1987/12	海軍氣象中心	36	張喆音 吳啓祥
台 中 港	TCNB	1988/07 - 1989/06	港 研 所	12	楊怡芸
外傘頂洲	WSTC	1988/01 - 1989/03	省 水 利 局	15	楊怡芸
塭 港	WK	1988/01 - 1989/03	省 水 利 局	15	楊怡芸
後 安 寮	HAL	1988/01 - 1989/03	省 水 利 局	15	楊怡芸
鹿 港	LK	1988/01 - 1989/03	省 水 利 局	15	楊怡芸
		Total		132	

表 1 - 3 波浪鍵入資料表

測站名稱	代 號	時 間	提 供 單 位	檔案數	鍵入者
基 隆 港	KL	1985/01 - 1987/09 1987/12 - 1989/03	基 隆 港 務 局	49	張喆音 楊怡芸

1 - 3 風速、風向資料

海軍氣象中心繼續提供 75 年、76 年之東沙與南沙群島之風速風向資料；台灣省水利局提供鹿港、後安寮、塭港及外傘頂洲 77 年 1 月至 78 年 3 月之風速風向資料；本所在台中港北堤觀測站之風速儀亦繼續觀測蒐集上述資料，如表 1-4 儲存於本所 VAX-780 磁帶中，另外由中國石油公司海域探勘處提供新竹外海 75 年 12 月至 77 年 6 月之風速風向資料直接儲存於個人電腦之磁片中。

1 - 4 波浪資料

波浪測站分佈全島四周及各離島（如圖 1-1），測站名稱及資料期間如表 1-5，1-6 續。

蘇澳港波浪觀測站，港外之海底電纜於 76 年 10 月 24 日至今尚未修復，港內之海底電纜亦於 77 年 5 月損壞至今尚未修復，以致無法取得資料，基隆港波浪觀測站，本所收取資料之個人電腦從 77 年 8 月 2 日起則不很穩定，斷斷續續故障，至今 78 年 3 月 8 日，已完全不能使用，以致無法取得完整之原始資料，但逐時之統計資料正常，已輸入本所 VAX-780 電腦之標準檔（見表 1-5，1-6 續）。另外由中國石油公司海域探勘處提供新竹外海 76 年 1 月至 77 年 6 月之間隔 2 小時之波浪資料，國立成功大學水利系高家俊教授提供鼻頭角觀測站 76 年及台東新港觀測站 77 年 1 月-5 月之波浪資料，直接儲存於個人電腦之磁片中；今年

度(78)1月31日至3月30日本所在外傘頂洲附近海域放置 NBA-DNW-5M 潮波儀觀測冬季期間東北風中之波浪，收回之資料在處理分析中；77年10月5日至6日在蘇澳港內放置 NBA-DNW-5M 潮波儀作短期性之觀測。

1 - 5 海流資料

外傘頂洲附近海域配合波浪觀測，同地點於78年1月31日至3月30日放置 RCM-4 海流儀，有關儀器施放時間、地點、以及資料回收情形等，均請詳見下章節；本年度內本所與台南水工試驗所計劃合作於興達港、急水溪、屏東縣屏東工業區附近海域作短期性之海況觀測（詳見表 1-6，1-9，1-9續）

1 - 6 潮汐資料

國立高雄海事專科學校提供民國65年～76年已儲存於個人電腦中之高雄港的潮汐資料；本所放置在台中港南內堤之潮位計亦繼續觀測中，目前潮汐蒐集情形如表 1-7。

1 - 7 颱風資料

颱風資料蒐集情形詳見上年度研(三)台灣四周海氣象調查研究(三)及表 1-8。

1 - 8 結語

本年度所蒐集的資料分兩種儲存方式，一為蒐集資料報表紙由本所同仁再鍵入電腦 VAX-780 中，建立標準檔式之資料庫；另一如執行單位已輸入個人電腦，則直接儲存於磁片內保存為一般檔之資料庫。

本計劃中資料蒐集承蒙中央氣象局劉文明科長；基隆港務局港埠工程處測量隊劉凡正隊長、林初曦先生；基隆港務局蘇澳分局測量隊徐洪銘隊長、陳金水先生；國立成功大學水利系高家俊教授；台南水工試驗所副研究員高瑞棋；國立高雄海事專科學校張國棟講師；台灣省水利局規劃總隊等提供資料以及本所同仁之共同辛勞始克有成，謹在此一併致謝。

為了方便國內學術界及工程界研究，本所提供已有之海象、氣象等資料，可利用本所之申請表索取。

表 1 - 4 風速風向測站名稱及時間表

>>>>> WIND <<<<<<<<					
NO.	AREA	DURATION	STATION CODE	KEY	REMARK(CODE)
1	GOONGEE	1955/01-1987/11	XX	46730 DG	69/10-70/09
2	HUALIEN	1955/01-1987/12	XX	46659 HL	
3	LANYU	1965/01-1987/11	XX	46762 LY	
4	PONGIAYU	1965/04-1987/11	XX	46695 PG	
5	PONHOC	1955/01-1987/12	XX	46735 PH	
6	SHINKUNG	1955/01-1987/12	XX	46761 SK	
7	TAITUNG	1965/01-1987/12	XX	46765 TT	
8	TAKU	1965/01-1983/12	XX	46754 TW	
9	TONSA	1971/01-1987/12	XX	46810 TS	
10	NANSA	1975/01-1987/12	XX	46902 NS	76/01-76/12 84/01-85/12 71/12
11	TAICHUNG	1971/01-1988/07	XX	TC	73/09-73/12 75/05-75/06 93/05-83/10 84/01-84/02
12	SHING-DAR	1986/07-1989/06	NE	SD	
13	KUAN-YIN	1984/06-1985/08	IN		
14	TA-PENG-WAN	1984/07-1985/03	CT		
15	YEN LIAO	1981/12-1982/08	XX	KI	
16	WAISANTINCHOU	1979/01-1984/12	XX	TP	
17	WENGHUNG	1982/01-1983/12	XX	YL	
18	HJUANLIAO	1988/01-1989/03		WA	
19	LUKUNG	1988/01-1989/03		WK	
	TOTAL 19 AREA	1983/01-1983/03		AL	
				LK	

表 1 - 5 波浪測站名稱及時間表

*****>>>>> WAVE <<<<<<<<*****					

NO.	AREA	DURATION	STATION	MONTH	TOTAL

1.	BETONGAC	1980/10-1987/12			(BT)

2.	DONGEE	1977/12-1987/12			(DG)

3.	HSIAOLIUCIU	1977/01-1987/10			(LC)

4.	SHINKUNG	1980/06-1987/12			(SK)

				REMARK(CODE)	-----
				82/07,83/11	
				84/03-84/06	
				84/08-84/11	
				78/01-81/06	
				83/06-85/01	
				85/08,85/09,87/09	
				78/02	
				78/07-78/08	
				80/08-80/09	
				81/05-81/10	
				82/01-82/04	
				83/01-83/12	
				85/07/95/08	
				81/10	
				83/01-83/12	
				84/10-85/11	
				87/07-87/08	

表 1 - 5 波浪測站名稱及時間表 (續)

* 5. TAICHUNG	1973/01-1981/11	(WV)	(TC)	73/06-74/12	*
* *				75/11-81/10	*
* *	1971/07-1987/03	(WN)		71/12,74/05	*
* *				75/01-75/12	*
* *				77/01-77/02	*
* *				78/02-79/08	*
* *				79/10-81/11	*
* *				82/01-86/02	*
* *				86/05-86/09	*
* *				86/11,87/02	*
* *	1971/11-1973/12	(WA)		73/06-73/09	*
* *				73/11	*
* 6. YU-AN	1981/12-1984/04		(YA)	82/10-83/04	*
* *				84/02-84/04	*
* 7. KEE-LONG	1983/06-1989/03		(KL)	83/08	*
* *				83/10-83/11	*
* *				87/10-87/11	*
* 8. SHING-DAR	1984/06-1985/10		(SD)	85/06	*
* 9. SU-AD	1984/07-1986/07	(WV)	(SA)	84/11-86/06	*
* *	1985/01-1987/07	(WA)		85/02-86/08	*
* *				86/10	*
* 10. HUA-LIAN	1984/06-1984/09			87/03-87/05	*
* 11. TA-PENG-WAN	1978/09-1984/12		(HL)	84/08	*
* TOTAL 11 AREA .			(TP)		*
*****					*****

表 1 - 6 海流測站名稱及時間表

*****>>>>> CURRENT <<<<<<<*****					

NO.	AREA	DURATION	STATION CODE	KEY	REMARK
1	LAN-YU	1982/06		LY	
2	SHING-DAR	1984/08-1985/11		SD	
3	TAI-CHUNG	1981/11-1986/04	RCM-4	TC	82/01-82/03
					82/06-82/07
					82/09-83/02
					83/04-85/11
					66/02
					66/05-86/11
					87/04-88/02
					83/01-84/01
4	HONG-TZAI	1982/12-1984/11		HT	
			SW		
			FW		
5	YU-ANN	1982/02-1983/07		YA	
6	SU-AO	1986/09-1986/11	RCM-4	SA	
			ACM-2		
	TOTAL 6 AREA .				82/06-83/04

表 1 - 7 潮汐測站名稱及時間表

*****>>>>> TIDE <<<<<<<*****									

NO.	AREA	DURATION	STATION	MONTH	KEY	REMARK	TOTAL		

1	TAICHUNG	1971/03-1989/05	SI		TC	75/5 76/09-77/04 78/07 78/10-78/11 79/02 79/06-79/07 79/09 79/11-79/12 83/09-83/10 87/11 76/01-84/05 84/09			
2	KAO-SHUNG	1971/01-1984/12	AA		KS				
3	YU-ANN	1982/04-1984/03	TT		YA				
4	SHING-DAP	1984/06-1985/11	IN		SD	84/08			
5	KEE-LONG	1986/01-1988/10	SS		KL	69/07-70/12 73/07,74/07			
6	HUALIAN	1979/03-1987/07			HL	73/04-79/12 80/08-83/12 84/03-84/07 85/04 85/08-85/09 83/04-83/05			
7	SU-AD	1981/01-1987/12			SA				
8	PUNHOO	1971/01-1987/12			PH				
		TOTAL 8 AREA .							

表 1 - 8 颱風資料時間表

YEAR	NO.	REMARK	YEAR	NO.	REMARK	YEAR	NO.	REMARK
1945	1		1949	5		1950	2	
1951	3		1952	6		1953	6	
1954	5		1955	5		1956	5	
1957	3		1958	7		1959	7	
1960	5		1961	7		1962	5	
1963	3		1964	3		1965	3	
1966	4		1967	4		1968	3	
1969	3		1970	3		1971	4	
1972	1		1973	3		1974	4	
1975	3		1976	3		1977	3	
1978	4		1979	4		1980	1	
1981	5		1982	3		1983	3	
1984	6		1985	3		1986	7	

TYPE: WAVE/WIND. TO ACCESS WAVE/WIND DATA. TYPE: BAEY BACK TO TOP DIRECTORY.

表 1 - 9 海流測站名稱及時間表

```
*****
*                >>> OCEAN STANDARD DATA FILE                *
* FILE NAME : AA8811SDXX1HM.SDF                                *
* DATA TYPE : TEMPERATURE, SALINITY,DEPTH,CURT DIRECT AND SPEED *
* AREA      : SIN DAR HAROUR                                    *
* STATION   : XX                                                *
* POSITION   : INSTRM LEVEL : -5.00 M LOT. & LAN. : 000/00'00"E 00/00'00"N *
* NO. PAIRS : 9                                                  *
* IN/OUT TM.: 88/11/23/17: 0-88/11/24/01:00                    *
* TIME GRID : 60.00 MIN                                         *
* UNIT      : C,M S,M,DEGREE,CM/SEC                            *
* FORMAT    : 18X,9F10.2                                        *
* INSTRM NO.: AANDERAA RCM-4 CURRENT METER SERIES NO. 7101-01  REV/COUNT=4.00 *
* DATA LEVEL: HOURLY MEAN DATA                                *
* PROJECT   : SIN-DAR RESEARCH                                  *
* SUPPORTER : COASTAL ENGINEERING DIVISION OF IHMT              *
* CONDITION : GOOD                                              *
* WATER DEP.: 18.00 M                                           *
* SHORE ANGL: 117.0 DEGREE WITH REPECT TO EAST-DIRECTION(ANTI-CLOCKWISE) *
*****
```

```
*****
*                >>> OCEAN STANDARD DATA FILE                *
* FILE NAME : AA8901PNXX1HM.SDF                                *
* DATA TYPE : TEMPERATURE, SALINITYPTH,CURT DIRECT AND SPEED *
* AREA      : PI-NA HAROUR                                    *
* STATION   : XX                                                *
* POSITION   : INSTRM LEVEL : -3.00 M LOT. & LAN. : 000/00'00"E 00/00'00"N *
* NO. PAIRS : 72                                                  *
* IN/OUT TM.: 89/01/23/21: 0-89/01/26/20:00                    *
* TIME GRID : 60.00 MIN                                         *
* UNIT      : C,M S,M,DEGREE,CM/SEC                            *
* FORMAT    : 18X,9F10.2                                        *
* INSTRM NO.: AANDERAA RCM-4 CURRENT METER SERIES NO. 8296-01  REV/COUNT=4.00 *
* DATA LEVEL: HOURLY MEAN DATA                                *
* PROJECT   : P.H.L. RESEARCH                                  *
* SUPPORTER : COASTAL ENGINEERING DIVISION OF P.H.L. $I.H.M.T. *
* CONDITION : GOOD                                              *
* WATER DEP.: 03.50 M                                           *
* SHORE ANGL: 150.0 DEGREE WITH REPECT TO EAST-DIRECTION(ANTI-CLOCKWISE) *
*****
```

```
*****
*                >>> OCEAN STANDARD DATA FILE                *
* FILE NAME : AA8811PNXX1HM.SDF                                *
* DATA TYPE : TEMPERATURE, SALINITYPTH,CURT DIRECT AND SPEED *
* AREA      : PI-NA HAROUR                                    *
* STATION   : XX                                                *
* POSITION   : INSTRM LEVEL : -3.00 M LOT. & LAN. : 000/00'00"E 00/00'00"N *
* NO. PAIRS : 68                                                  *
* IN/OUT TM.: 89/01/23/17: 0-89/01/26/12:00                    *
* TIME GRID : 60.00 MIN                                         *
* UNIT      : C,M S,M,DEGREE,CM/SEC                            *
* FORMAT    : 18X,9F10.2                                        *
* INSTRM NO.: AANDERAA RCM-4 CURRENT METER SERIES NO. 7101-01  REV/COUNT=4.00 *
* DATA LEVEL: HOURLY MEAN DATA                                *
* PROJECT   : P.H.L. RESEARCH                                  *
* SUPPORTER : COASTAL ENGINEERING DIVISION OF P.H.L. $ I.H.M.T. *
* CONDITION : GOOD                                              *
* WATER DEP.: 03.50 M                                           *
* SHORE ANGL: 150.0 DEGREE WITH REPECT TO EAST-DIRECTION(ANTI-CLOCKWISE) *
*****
```


表 1 - 10 海流測站名稱及時間表(續)

```

*****
*                                     >>> OCEAN STANDARD DATA FILE                                     *
* FILE NAME : AA8903wstX1HM.SDF                                             *
* DATA TYPE : TEMPERATURE, SALINITYPTH,CURT DIRECT AND SPEED               *
* AREA      : wai-san-ting-chou                                             *
* STATION   : XX                                                            *
* POSITION   : INSTRM LEVEL : -4.00 M LOT. & LAN. : 000/00'00"E 00/00'00"N    *
* NO. PAIRS : 701                                                            *
* IN/OUT TM.: 89/03/01/11: 0-89/03/30/15:00                                *
* TIME GRID : 60.00 MIN                                                     *
* UNIT      : C,M S,M,DEGREE,CM/SEC                                         *
* FORMAT    : 18X,9F10.2                                                    *
* INSTRM NO.: AANDERAA RCM-4 CURRENT METER SERIES NO. 8297-01  REV/COUNT=4.00 *
* DATA LEVEL: HOURLY MEAN DATA                                             *
* PROJECT   : wai-san-ting-chou (worker by t.s.m.)                        *
* SUPPORTER : COASTAL ENGINEERING DIVISION OF IHMT                         *
* CONDITION : GOOD                                                           *
* WATER DEP.: 12.00 M                                                        *
* SHORE ANGL: 060.0 DEGREE WITH REPECT TO EAST-DIRECTION(ANTI-CLOCKWISE)   *
*****

```

```

*****
*                                     >>> OCEAN STANDARD DATA FILE                                     *
* FILE NAME : AA8905PNXX1HM.SDF                                             *
* DATA TYPE : TEMPERATURE, SALINITYPTH,CURT DIRECT AND SPEED               *
* AREA      : PIN-NA                                                        *
* STATION   : PIN-NA GS4                                                    *
* POSITION   : INSTRM LEVEL : -3.00 M LOT. & LAN. : 120/33'27.96"E,22/21'21.48"N*
* NO. PAIRS : 120                                                            *
* IN/OUT TM.: 89/05/05/14: 0-89/05/10/13:00                                *
* TIME GRID : 60.00 MIN                                                     *
* UNIT      : C,M S,M,DEGREE,CM/SEC                                         *
* FORMAT    : 18X,9F10.2                                                    *
* INSTRM NO.: AANDERAA RCM-4 CURRENT METER SERIES NO. 5951-11  REV/COUNT=2.00 *
* DATA LEVEL: HOURLY MEAN DATA                                             *
* PROJECT   : PIN-NA RESEARCH                                                *
* SUPPORTER : COASTAL ENGINEERING DIVISION OF IHMT (WORKER BY T.S.M.)      *
* CONDITION : GOOD                                                           *
* WATER DEP.: 19.00 M                                                        *
* SHORE ANGL: 145.0 DEGREE WITH REPECT TO EAST-DIRECTION(ANTI-CLOCKWISE)   *
*****

```

```

*****
*                                     >>> OCEAN STANDARD DATA FILE                                     *
* FILE NAME : AA8905PNXX1HM.SDF                                             *
* DATA TYPE : TEMPERATURE, SALINITYPTH,CURT DIRECT AND SPEED               *
* AREA      : PIN-NA                                                        *
* STATION   : PIN-NA BS1                                                    *
* POSITION   : INSTRM LEVEL : -3.00 M LOT. & LAN. : 120/30'34.97"E 22/23'22.28"N*
* NO. PAIRS : 120                                                            *
* IN/OUT TM.: 89/05/05/15: 0-89/05/10/14:00                                *
* TIME GRID : 60.00 MIN                                                     *
* UNIT      : C,M S,M,DEGREE,CM/SEC                                         *
* FORMAT    : 18X,9F10.2                                                    *
* INSTRM NO.: AANDERAA RCM-4 CURRENT METER SERIES NO. 7101-11  REV/COUNT=4.00 *
* DATA LEVEL: HOURLY MEAN DATA                                             *
* PROJECT   : T.S.M. RESEARCH                                                *
* SUPPORTER : COASTAL ENGINEERING DIVISION OF IHMT                         *
* CONDITION : GOOD                                                           *
* WATER DEP.: 20.00 M                                                        *
* SHORE ANGL: 145.0 DEGREE WITH REPECT TO EAST-DIRECTION(ANTI-CLOCKWISE)   *
*****

```


貳. 外傘頂洲附近海域海況調查

曾 相 茂

2 - 1 前 言

本所為瞭解冬季東北季風吹襲下，外傘頂洲附近海域有關海流、波浪、風速及風向等之情形，首先著予辦理現場海流、波浪調查。本年度報告仍以基本資料之統計為原則，風與波浪、潮汐與流間關係所扮的角色則有待下年度辦理長期間的觀測後，再進一步分析才能明瞭。

2 - 2 研究區域概述

台灣西海岸，北自彰化起南至台南止，沙洲廣達五萬多公頃，其中以雲林、嘉義海岸之外傘頂洲、統仙洲（圖 2-1, 2-2）最為廣闊，約有兩萬伍仟公頃長達 83 公里。該區域原為一具天然水深之海域，惟在西元 1898 年因嘉義縣境之草嶺潭崩潰，洪水爆發，帶來大量泥沙，於此形成海底沙丘，加上區內濁水溪、北港溪、朴子溪所夾帶大量泥沙之淤積，形成了台灣西海岸向外海突出最廣大之一區，而其外傘頂洲、箔子寮汕、統仙洲等，則是因外移泥沙，遭受海流及波浪作用，形成一南北走向之細條沙洲，沙洲外海岸坡度相當平緩，內側則為一片淺灘，地勢由北向南而降，北半灘區每月退潮時，可露出水面，南半灘則地勢較低，除距海岸線外 2.5 - 3.5 公里以及外傘頂洲內部約 1 公里，部份在退潮時可露出水面外，其餘部份在退潮時仍在水面下，外傘頂洲長 22 公里寬 3 公里，露出水面部份與雲林縣之海岸相鄰接，對於地狹人稠之台灣而言，若能充份加以利用開發，除可配合政府平衡地區發展之政策，促進地方之繁榮外，同時更可得到一廣大的新生地。

2 - 3 現場作業經過

調查觀測站地理位置如圖 2-2 所示，本所自民國 78 年 1 月 31 日至 78 年 3 月 30 日止，研究調查該區域冬季之波浪與海流調查，潮汐與風之資料則由台灣省水利局提供。

由於台灣西海岸沿海漁船作業頻繁，觀測期間特別避免每年 12 月至 1 月間之烏魚捕捉期，以避免造成網具及本所儀器無謂的損失，且事先由台灣省議會蘇洪議員月嬌女士配合地方人士與該附近海域作業漁民溝通以減少最輕微的損失。當準備工作就緒後，才於 78 年 1 月 31 日開始在雲林縣台子村船澳西南外 7 公里附近，水深 15 公尺處（見圖 2-2），底座安裝一具英製 NBA-DNW-5M 壓力式自記潮波儀，以觀測波浪之資料，另外在儀器處南北各距 50 公尺附近安裝閃光浮燈標，以防止漁民之網具掛上及本所儀器之安全。觀測儀器預定半個月後回收，經更換電池及記錄磁帶後再重新安放，2 月 14 日第一次收回潮波儀，3 月 1 日重新安放潮波儀，另外在底座上方，水面下 3 公尺處安裝挪威製轉子式的 AANDERAA RCM-4 自記海流儀一具，3 月 30 日收回所有觀測的儀器及閃光浮燈標，發覺海流儀上佈滿流刺網，以致轉子及舵板均已流失，非常遺憾的是 30 天內的觀測，只能取得 4 天的海流流速、流向資料（詳見表 2-1，2-2）。工作期間雖然遭遇人為的困擾，但在本所海岸工程組同仁的共同努力下排除萬難，完成此項任務。尤其難得的是這段期間內未有任何觀測儀器的損失，這是在同仁群策群力下的成果。

2 - 4 基本資料分析與特性

2.4.1 海流資料處理分析

本計劃之現場調查工作所使用海流儀為挪威製AANDERAA 的RCM-4，為內部盤式 1/4 吋磁帶自記式，取樣間隔定為 10 分鐘，收回之磁帶均在本所按照圖 2-3 之流程進行分析、處理。分析所使用之套裝程式主要功能：處理海流部份可以分為基本處理，統計分析及繪圖等。

- (1) 基本處理：將 AANDERAA 的 RCM-4 盤式磁帶由譯讀機輸入 IBM-PC 個人電腦，再傳輸入 VAX-780 小型電腦，將記錄轉換成 CGS 制之單位，再轉成 10 分鐘平均，1 小時平均及低通數值過濾之 1 小時平均之資料，同時亦錄入 $5 \frac{1}{4}$ 吋磁片或九軌磁帶以

供下一步分析之用。

- (2) 統計分析：包括全部資料之基本統計、能譜分析及機率分佈等。
- (3) 繪圖：包括原始觀測之海流流速流向逐時變化圖，行進向量圖（Progressive Vector Diagram 簡稱 PVD 圖），機率分佈直方圖（Histogram, Normalized distribution 等）及能譜圖等。

2.4.2 波浪資料處理分析

現場波浪調查工作所使用的波浪儀是英製 NBA-DNW-5M-045 潮波儀，係內部卡式磁帶自記，量測波浪場水壓變化情形。壓力式潮波儀所記錄到的波浪是相當於水位變化經過低通濾波器（Low-passed filter）重新加權後之結果，而且由波動所產生的壓力在海底對於不同的頻率有不同的衰減係數，所以只能反映出波浪能譜中偏低頻率的部份。故壓力式潮波儀只有量測暴風產生的大浪或是長週期的湧浪時才比較準確。等磁帶取回後，根據壓力值以及現場儀器水深之衰減係數反算成水面波浪值。

NBA-DNW-5M 潮波儀使用 615 BPI；1/4 吋寬的卡式磁帶，取樣間隔 2 小時，記錄 5 分鐘，收回之磁帶亦在本所按照圖 2-4 之流程進行分析、處理。分析所使用之套裝程式主要功能：處理波浪部份與上述海流部份甚為類似，在此不贅言：

2.4.3 海流資料之基本統計特性

觀測期間本區海流基本統計特性，由圖 2-5 是實測海流流向流速逐時變化圖，圖 2-6，2-7 是海流流向流速機率分佈直方圖，吾人可看出冬季風速小時，根據這些基本統計可以看出外傘頂洲附近海域之海流主要是長週期海流以及潮流所組合而成。圖 2-8 是海流向量行徑圖，更可看出長週期海流主要是沿著北北西方向運動。根據觀測時記錄所求出之最大流速是 78.50 cm/sec ，流向為 355.7 （見表 2-3）。圖 2-9 為海流之總能譜，顯示潮流運動以半日週期為主，全日週期為輔。

2.4.4 風速風向資料之基本統計特性

台灣省水利局提供觀測同時期在外傘頂洲上氣象站所觀測的風速風向資料，其中二月份先後有三次鋒面系統通過台灣，其日期分別在 8 日，17 日及 25 日，其中又以 8 日的鋒面強度最強；三月份有四次鋒面系統通過台灣，以上旬 5 日至 8 日是台灣地區受強烈寒流侵襲是今年入春來最強烈的寒流（見圖 2-10，2-11）。

有關風速風向，本地區係屬開敞型海灘，氣象情況與內陸情形有顯著差異，本地區冬春季風期中，強風歷時甚久，風速大時可達 20 公尺 / 秒，由圖 2-12 ~ 2-17 統計結果顯示，本區冬春之季節風向以北北西為最多。

2.4.5 波浪資料之基本統計特性

一般在海面上目視到的水面起伏，多半是風所產生的波浪，這些浪從產生以後便開始在海上傳播。如果風場能夠配合；那麼波浪可以繼續成長，波高逐漸加大，週期也持續增長。測站地理位置（見圖 2-1，2-1）；東有台灣海峽本島屏障，西有大陸阻擋，南方則有澎湖列島以及台灣淺灘可以遮擋部份由南海北傳的波浪，在這地理形狀下，只有北北東海域直通東海；吹風距離最長，其他方向由於受到陸地影響；吹風距離均不會超過 100 海浬。過去對風浪的研究指出；風浪代表波高及以及代表週期主要是受風速、吹風距離和吹風歷時所控制。當吹風距離一定時，風浪成長過程只隨風速與吹風歷時而改變。此時風已吹了相當時間，則波浪場不再成長

而達到成熟狀態。

一般而言，觀測期內所測到的波浪是以風浪為主，這可以由表 2-4，2-5 之聯合機率分佈所顯示， $H_{1/3}$ 與 $T_{1/3}$ 在二、三月份大致都呈正比的關係上看出。由圖（2-10, 2-11, 2-18, 2-19, 2-20, 2-21）實測的波高和週期以及波浪基本統計圖中顯示，外傘頂洲附近海域在本次觀測期內之吹風區域受到限制，所以波浪之成長與衰退迅速，風速與波高有良好的相關，但其所扮的角色則有待日後進一步分析才能明瞭。

本次觀測情形為典型的鋒面通過後形成之東北季風型天氣，波浪週期比較長，同時代表波高亦比較大。

2 - 5 結 論

由海流實測資料顯示，本次觀測期間，冬春季風下，當風速小時，海流主要是由長週期海流以及潮流組合而成，潮流以半日週期為主，振幅約 40 公分 / 秒，全日週期為輔。長週期海流主要流向為北北西相當穩定，流速約 7.31 公分/秒，水溫變化與天氣之間有密切關係，例如三月上旬，台灣地區受強烈寒流侵襲，平均水溫曾劇降 5°C 左右。

由於風域受到陸地限制，湧浪主要由東北方向傳來，冬季冷鋒過境時，引發較強之東北風，外傘頂洲氣象站二月份、三月份，實測之最大十分鐘平均風速為 19.8 公尺 / 秒，風向北北東，發生於 78 年 2 月 2 日 19 時。

冬季東北季風時期較容易產生大浪，實測波浪二月份最大之 $H_{1/3}$ 波高為 3.55 公尺， $T_{1/3}$ 週期為 9.24 秒，發於 78 年 2 月 2 日 18 時，三月份最大之 $H_{1/3}$ 波高為 3.81 公尺， $T_{1/3}$ 週期為 7.99 秒，發生於 78 年 3 月 6 日 22 時。觀測期間內實測波浪週期多在 6 至 9 秒之間。

2 - 6 誌 謝

本計劃中本地區之現場觀測能順利完成，承蒙台灣省議會蘇洪議員月嬌女士配合北港地區地方人士與雲林縣台子村地區漁民之溝通，使得施放之儀器能夠避免到無謂的損失是現場觀測能夠成功的最重要因素之一。台灣省水利局規劃總隊提供了風速記錄資料，更是完成本報告不可缺少的重要資料。此外，本所梁前所長乃匡先生，海岸工程組歐陽組長餘慶先生、吳基先生、蔡金吉先生、何炳紹先生、蔡瑞成先生、李永勝先生、陳進冰先生等均曾參與本計劃野外辛勞的工作，在此敬表謝意。

表 2 - 1 外傘頂洲附近海域潮波儀施放記錄

水深：15 公尺		
儀器：壓力式自記潮波儀（ NBA-DNW-5M-045 ）		
次序	期 間	說 明
1	78.01.31 - 78.02.14	每 2 小時記錄 5 分鐘，資料正確
2	78.03.01 - 78.03.30	每 2 小時記錄 5 分鐘，資料正確

表 2 - 2 外傘頂洲附近海域海流儀施放記錄

水深：15 公尺 儀器水深：-3 公尺		
儀器：轉子式自記海流儀（ RCM4-8297 ）		
次序	期 間	說 明
1	78.03.01 - 78.03.30	每 10 分鐘記錄一次，海水溫度、流速及流向，3 月 4 日下午 3 時左右舵板及轉子受到流刺網拉扯而脫落，以致流速流向亦告中斷，但海水溫度記錄不致影響正常運轉。

H 1/3 波高 (公尺)

	.0	.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	8.5	9.0	9.5	10.0>	%
4.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
5.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
6.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
7.0	.6	3.0	9.0	5.4	1.2	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
8.0	.6	4.2	10.2	16.8	10.8	1.8	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
9.0	.6	1.8	5.4	11.4	6.6	4.8	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
10.0	.0	.0	.0	.0	1.2	2.4	.6	.6	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
11.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
12.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
13.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
14.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
15.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
16.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
17.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
18.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
19.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
20.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
21.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
>22.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
%	1.8	9.0	24.6	34.7	19.8	9.0	.6	.6	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	100.00

TOTAL NO. PAIRS OF DATA : 167
 MEAN OF wave HEIGHT : 1.72
 MAX OF wave HEIGHT : 3.55
 MIN OF wave HEIGHT : .31
 MEAN OF wave period : 7.66
 MAX OF wave period : 9.87
 MIN OF wave period : 5.58
 LOST NO. PAIRS OF DATA : 0 (.00 %)
 VARIANCE OF wave HEIGHT : .34
 IT'S wave period : 9.24 AT TIME : 1989. 2. 2.18: 0
 IT'S wave period : 7.90 AT TIME : 1989. 2. 8.10: 0
 VARIANCE OF wave period : .65
 IT'S wave HEIGHT : 2.73
 IT'S wave HEIGHT : 1.90
 STANDARD DEVIATION OF wave HEIGHT : .58

表 2-4 H 1/3 與 T 1/3 聯合機率分佈表 (民國78年3月1日至3月30日外傘頂洲附近海域)

H 1/3 波高 (公尺)

	.0	.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	8.5	9.0	9.5	10.0	%
4.0																						
5.0	.0	.3	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.3
6.0	.0	2.6	1.4	4.0	.3	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	8.3
7.0	2.3	12.6	8.9	4.0	.9	.3	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	28.9
8.0	6.9	3.1	7.4	6.9	6.6	.9	.6	.6	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	32.9
9.0	3.7	.3	1.1	6.0	10.9	1.7	.3	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	24.0
10.0	1.1	.9	.0	1.1	.6	.6	.3	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	4.6
11.0	.0	.0	.0	.0	.3	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.3
12.0	.0	.0	.0	.0	.0	.3	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.3
13.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
14.0	.3	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.3
15.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
16.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
17.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
18.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
19.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
20.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
21.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
>22.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0

%	14.3	19.7	18.9	22.0	19.4	3.7	1.1	.6	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	99.71
TOTAL NO. PAIRS OF DATA :	350																					
MEAN OF wave HEIGHT	:	1.40																				
MAX OF wave HEIGHT	:	3.81																				
MIN OF wave HEIGHT	:	.14																				
MEAN OF wave period	:	7.43																				
MAX OF wave period	:	13.56																				
MIN OF wave period	:	4.97																				
LOST NO. PAIRS OF DATA : 1 (.29 %)																						
VARIANCE OF wave HEIGHT : .56																						
STANDARD DEVIATION OF wave HEIGHT :																						
IT"S wave period : 7.99 AT TIME : 1989. 3. 6.22. 0																						
IT"S wave period : 9.23 AT TIME : 1989. 3.14. 6: 0																						
VARIANCE OF wave period : 1.18																						
IT"S wave HEIGHT : .15																						
IT"S wave HEIGHT : .93																						

表 2-5 H 1/3 與 T 1/3 聯合機率分佈表 (民國78年1月31日至2月14日外傘頂洲附近海域)

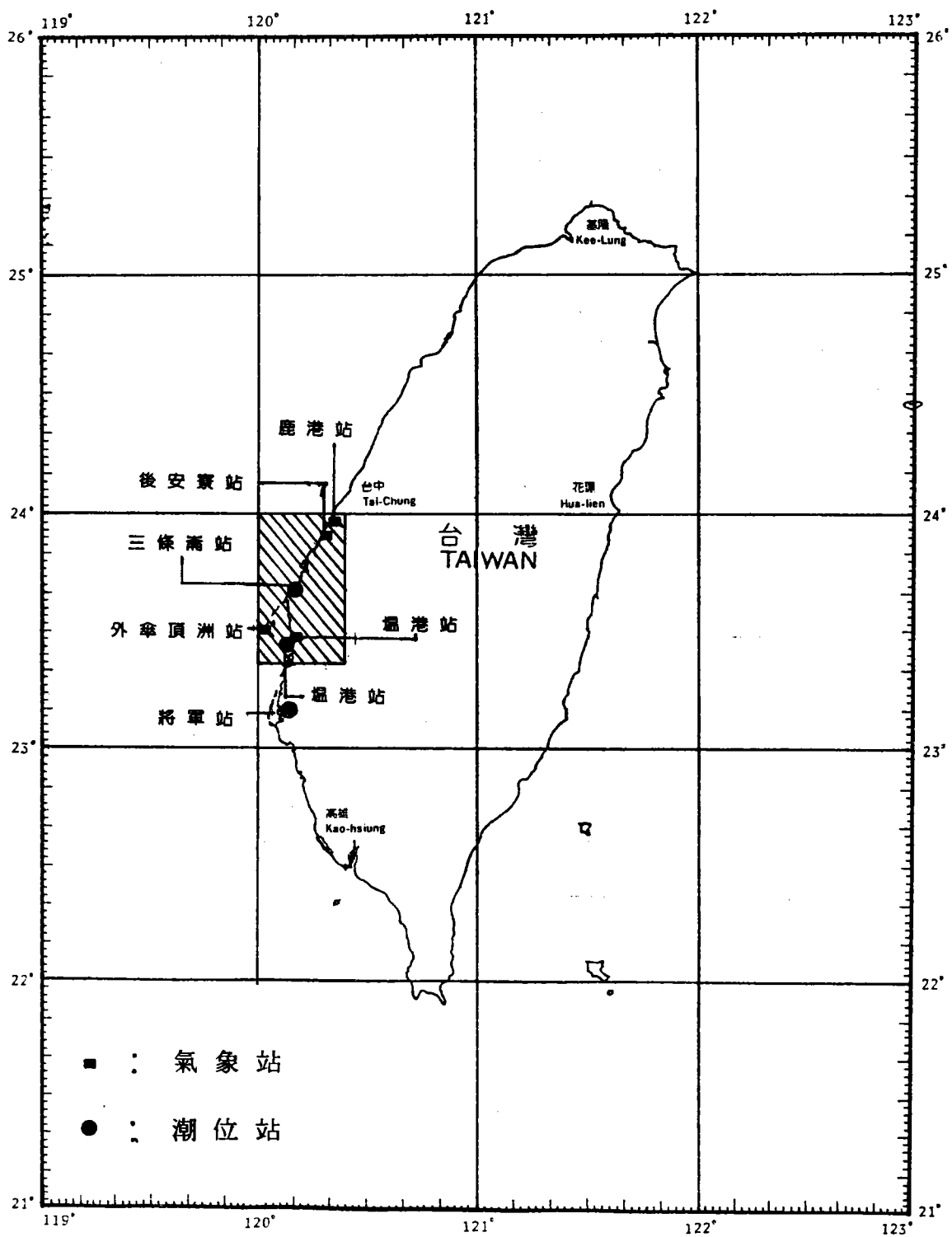


圖 2-1 省水局氣象站潮汐部份分佈圖

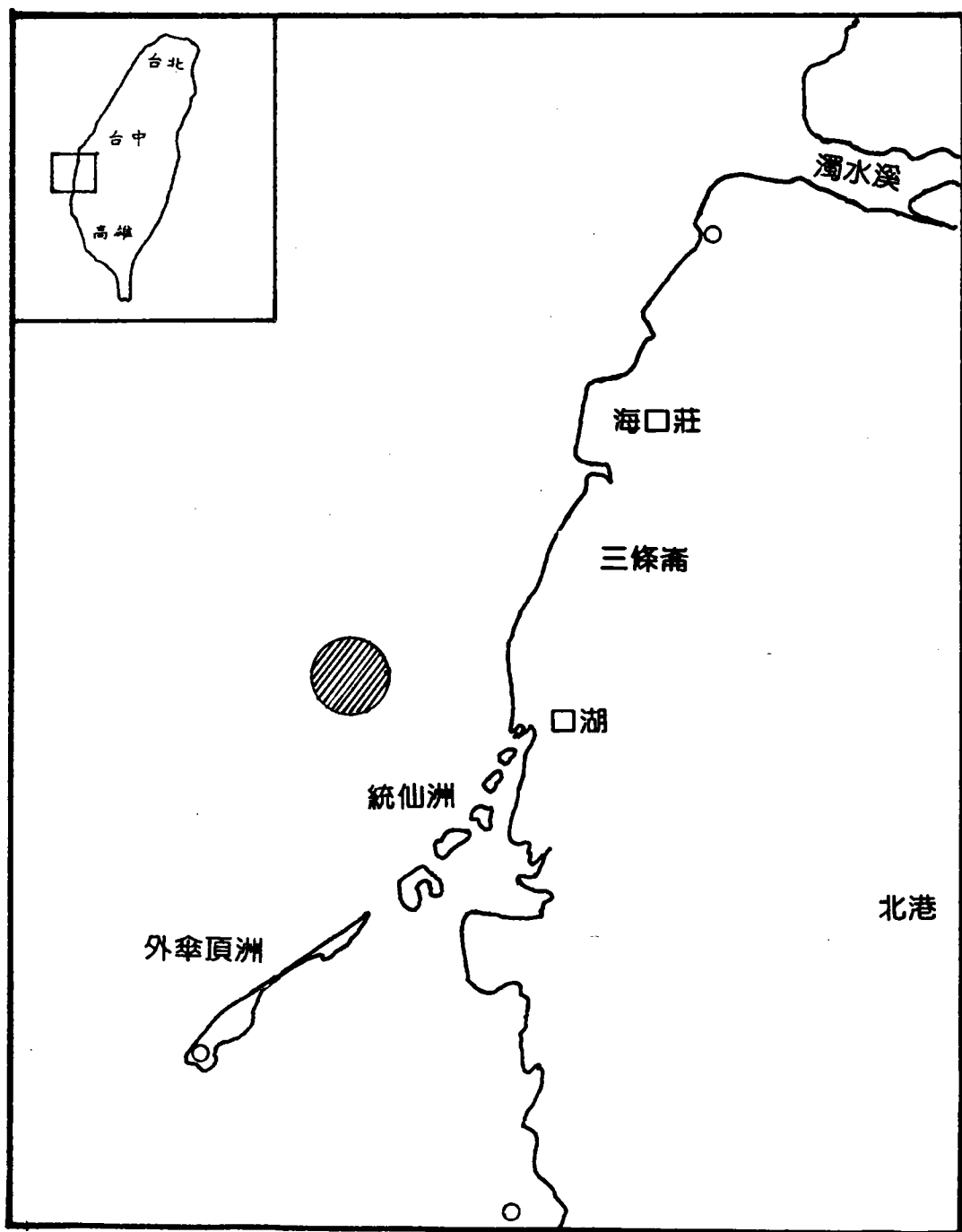


圖 2-2 外傘頂洲附近海域海象觀測站地理位置圖

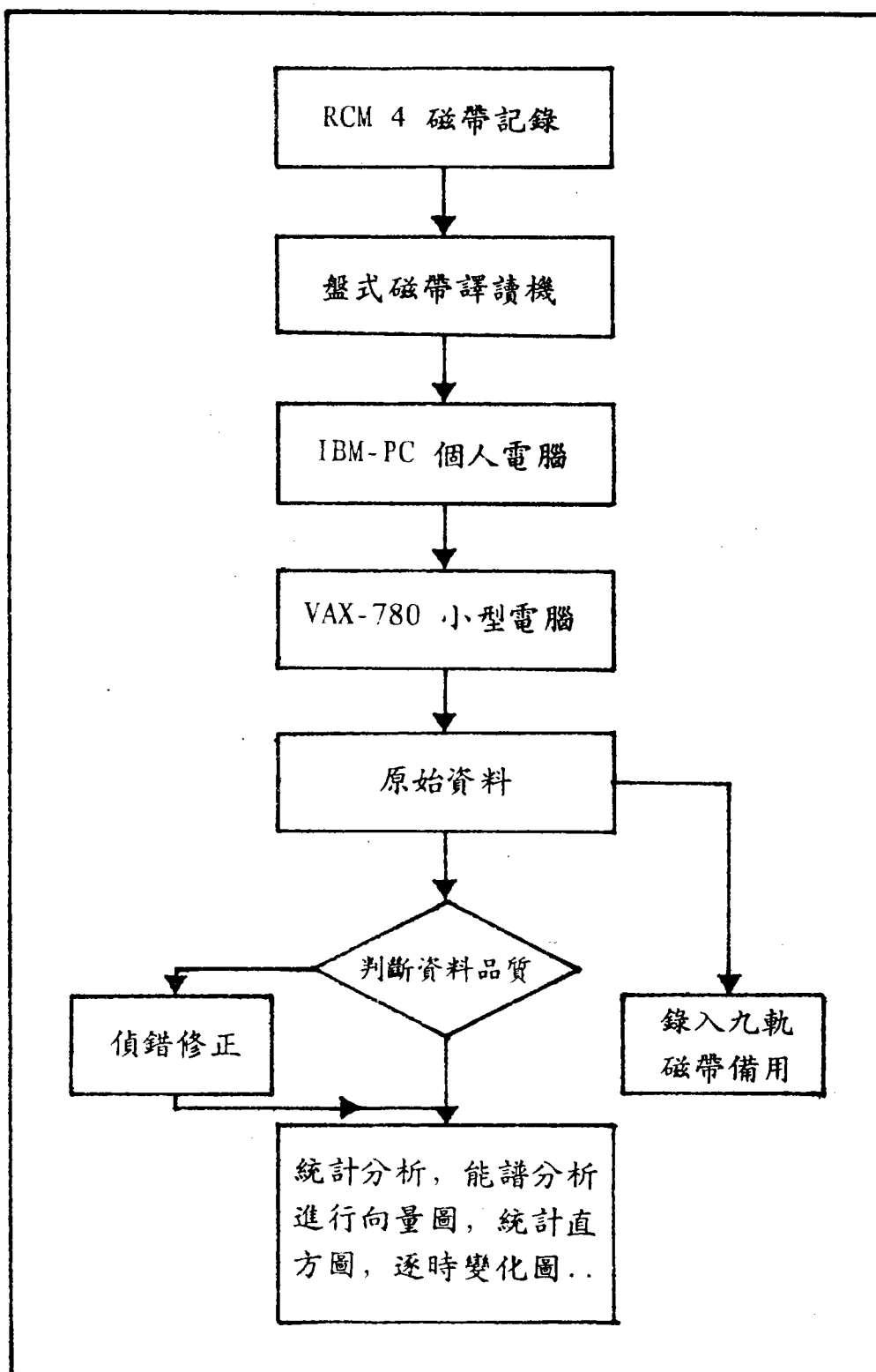


圖 2-3 海流記錄資料處理流程

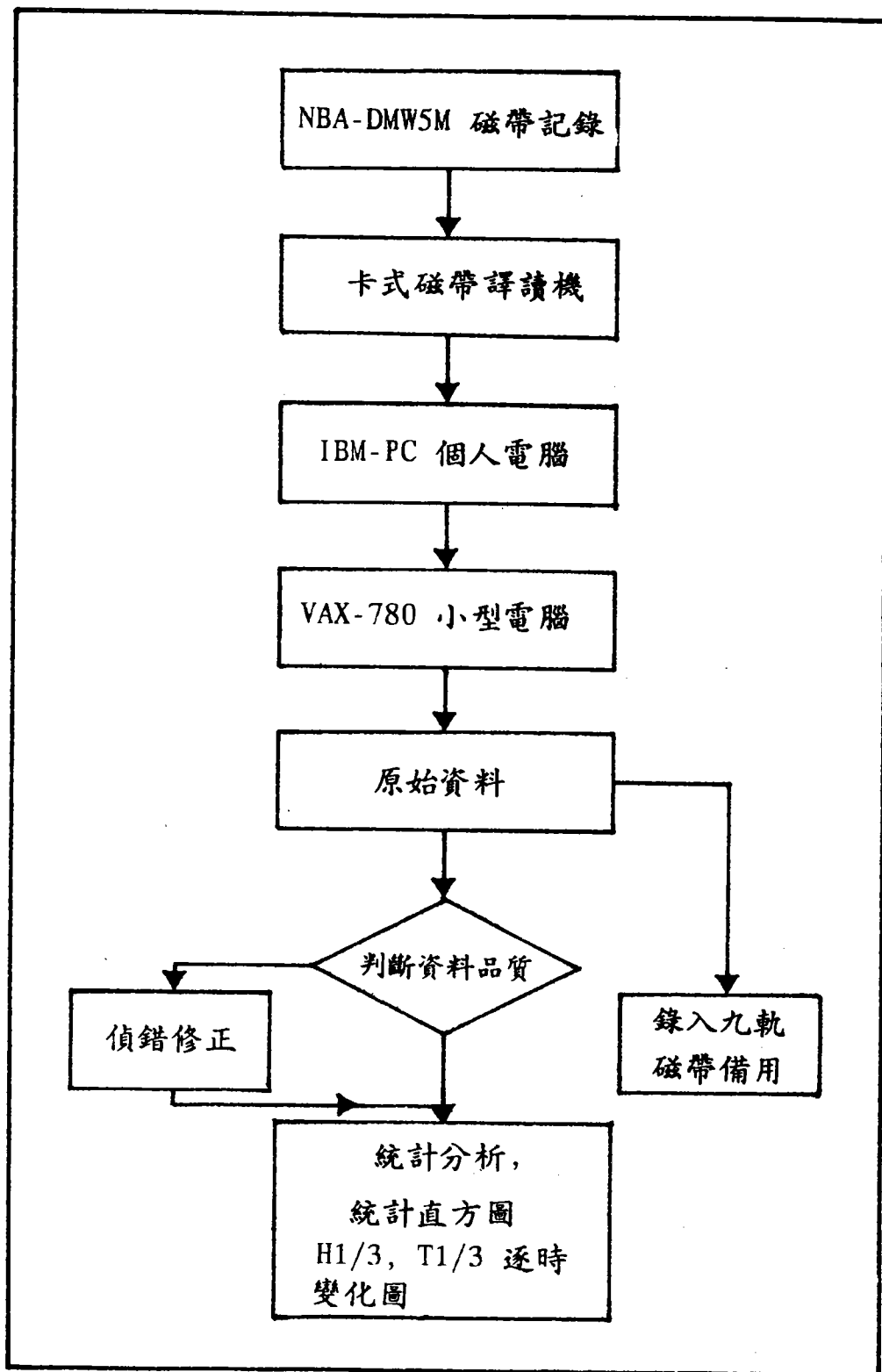


圖 2-4 波浪記錄資料處理流程

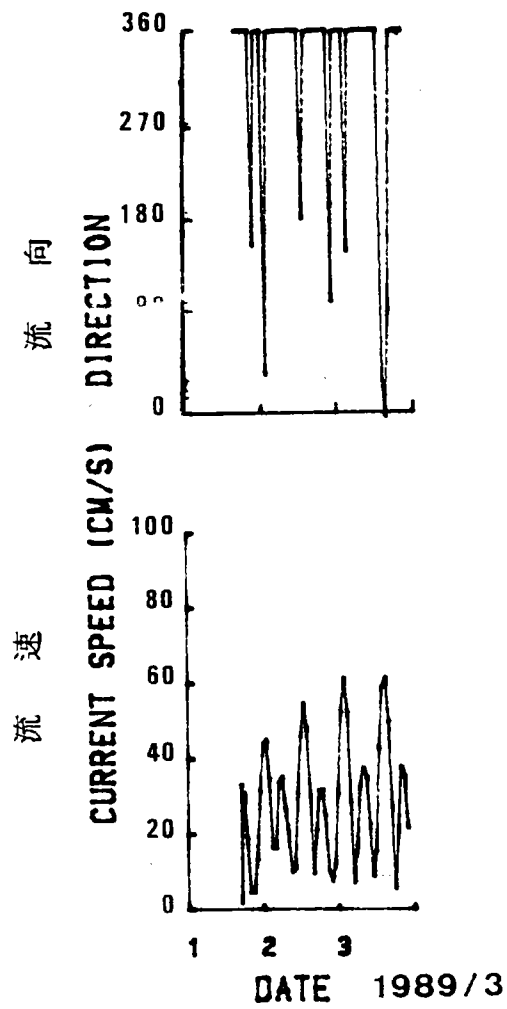


圖 2-5 外傘頂洲附近海域海流流向流速逐時變化

測 站：外傘頂洲附近海域

時 間：78年3月1日 至 3月4日

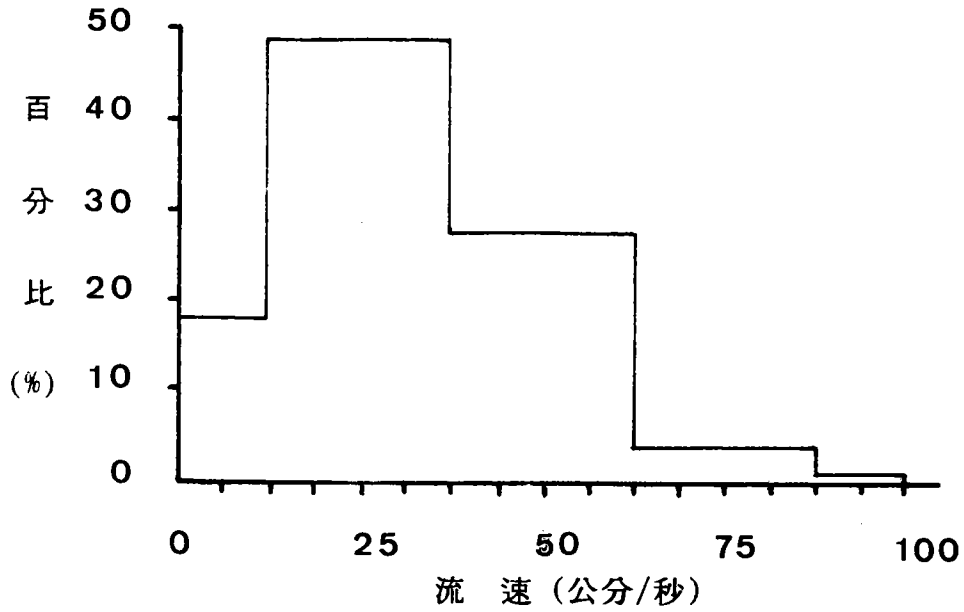


圖 2-6 流速分佈直方圖

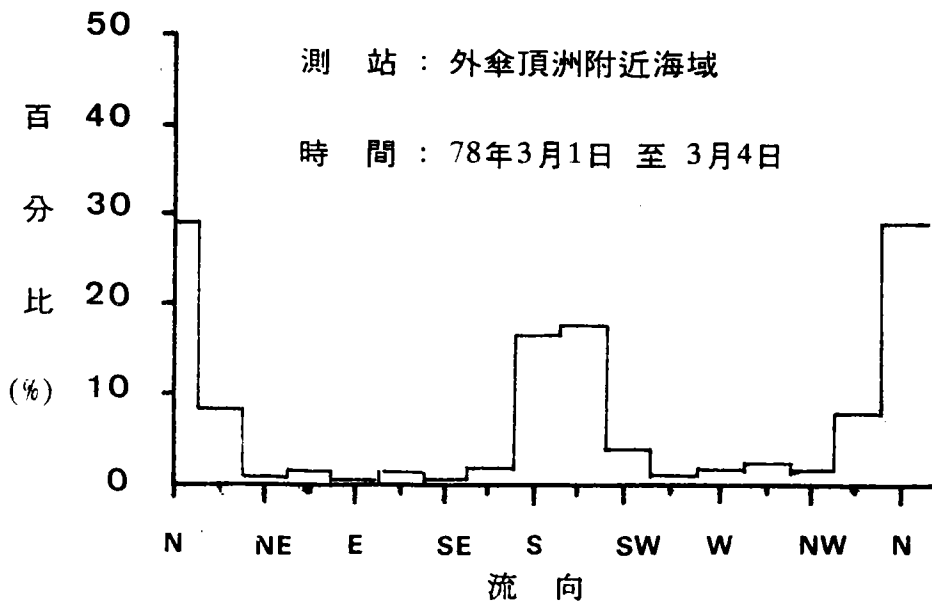


圖 2-7 流向分佈直方圖

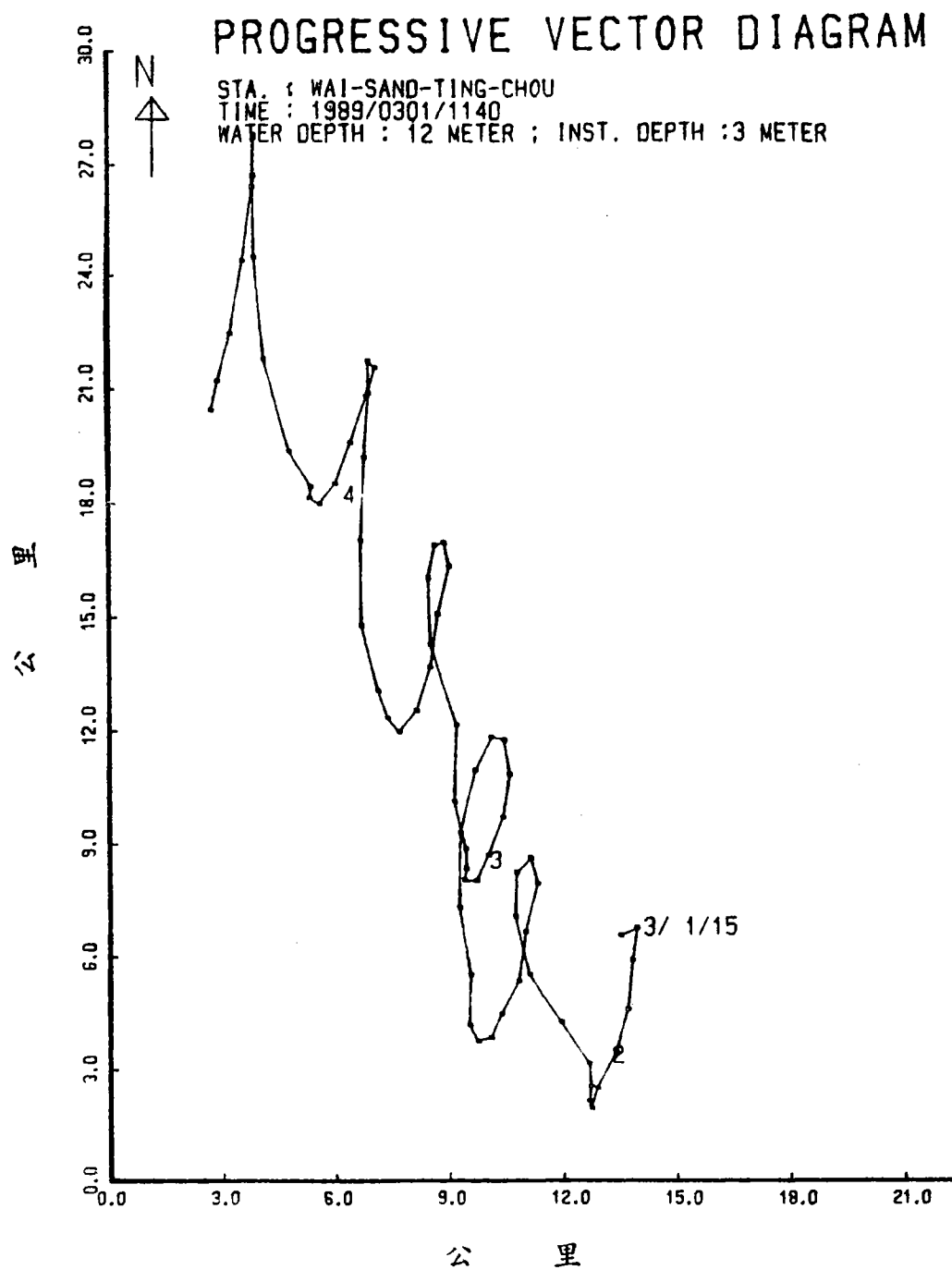


圖 2-8 海流行進向量圖

CURRENT FFT W.S.T.C. 1989/0301-0304(64)

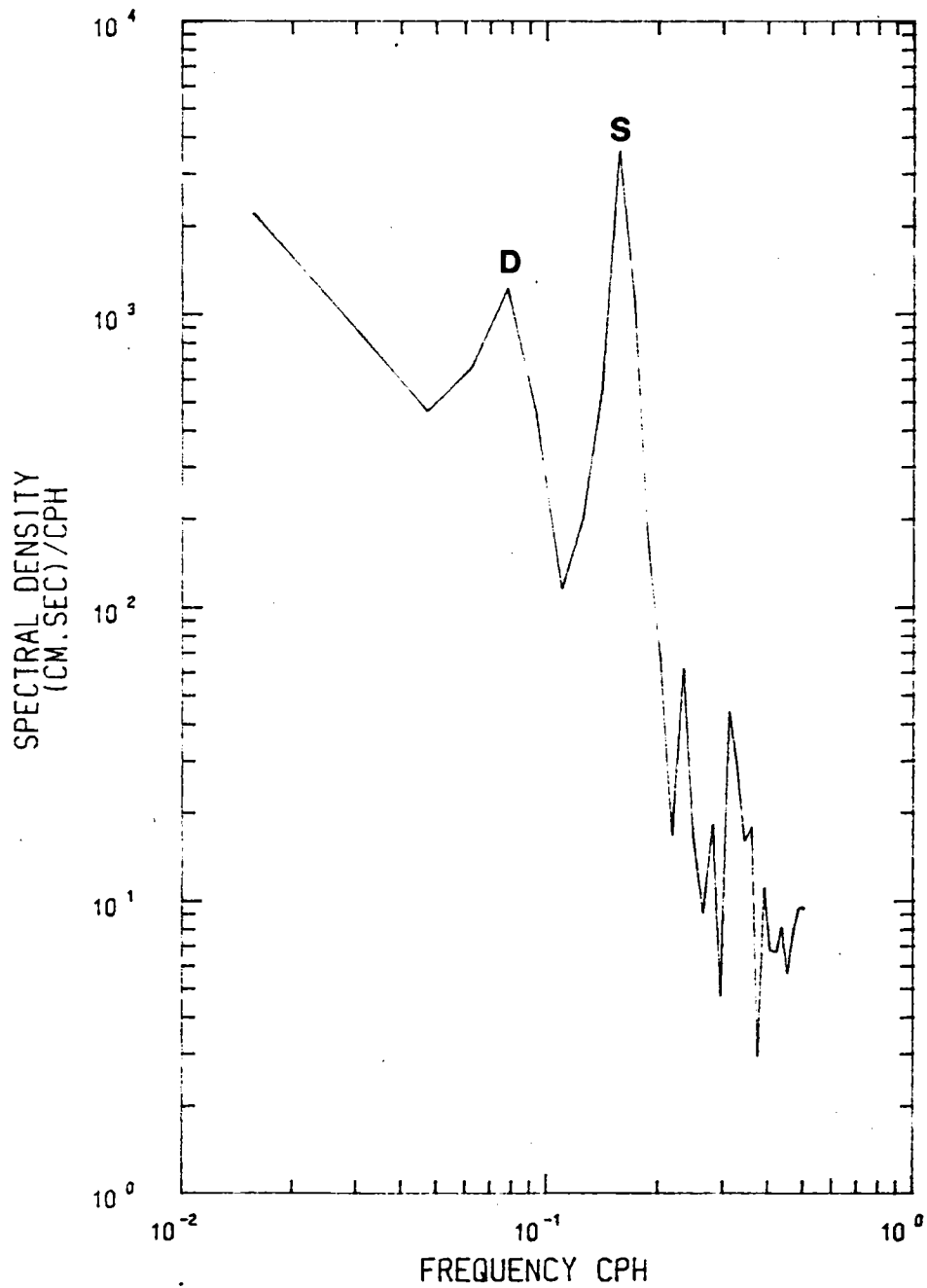


圖 2-9 外傘頂洲站附近海域潮流能譜圖 S:半日週期 D:全日週期

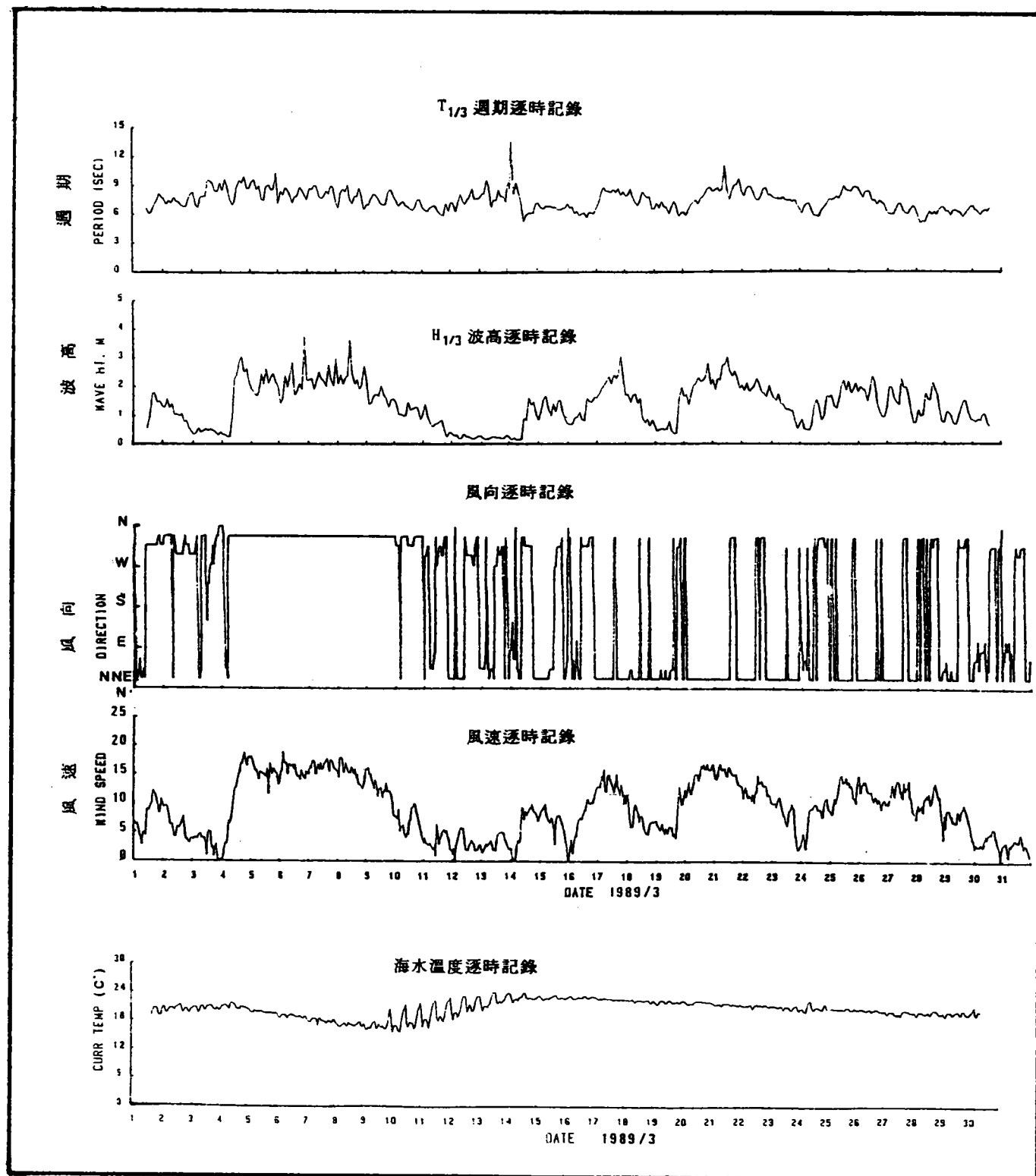


圖 2-11 外傘頂洲站附近實測波高期、風速風向、水溫逐時變化

WAI-SAND-TING-CHOU WIND ROSE 1989/02

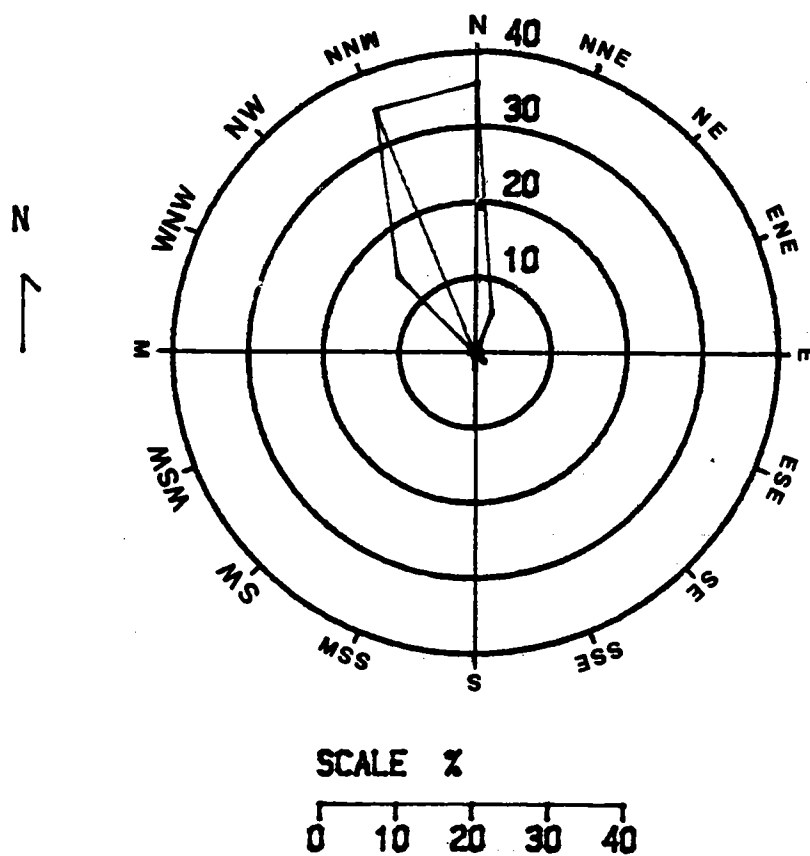


圖 2-12 外傘頂洲站七十八年二月份風向玫瑰圖

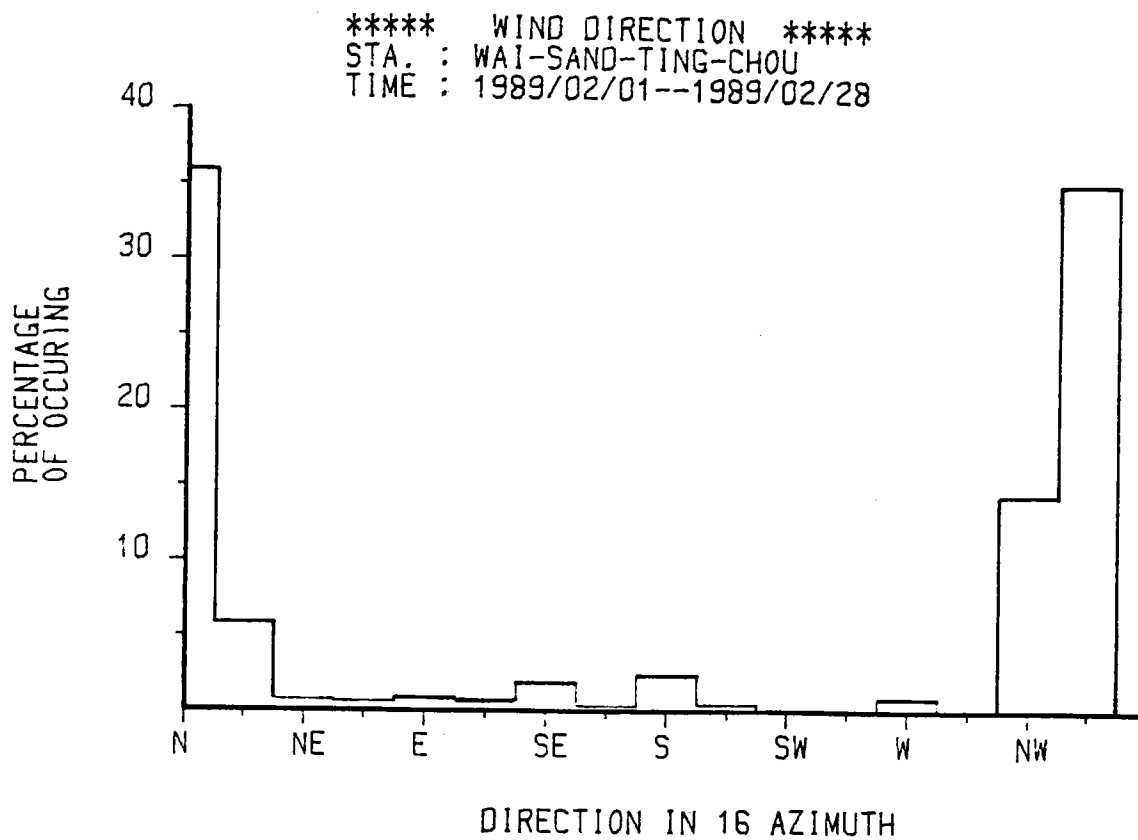


圖 2-13 外傘頂洲七十八年二月份風向分佈直方圖

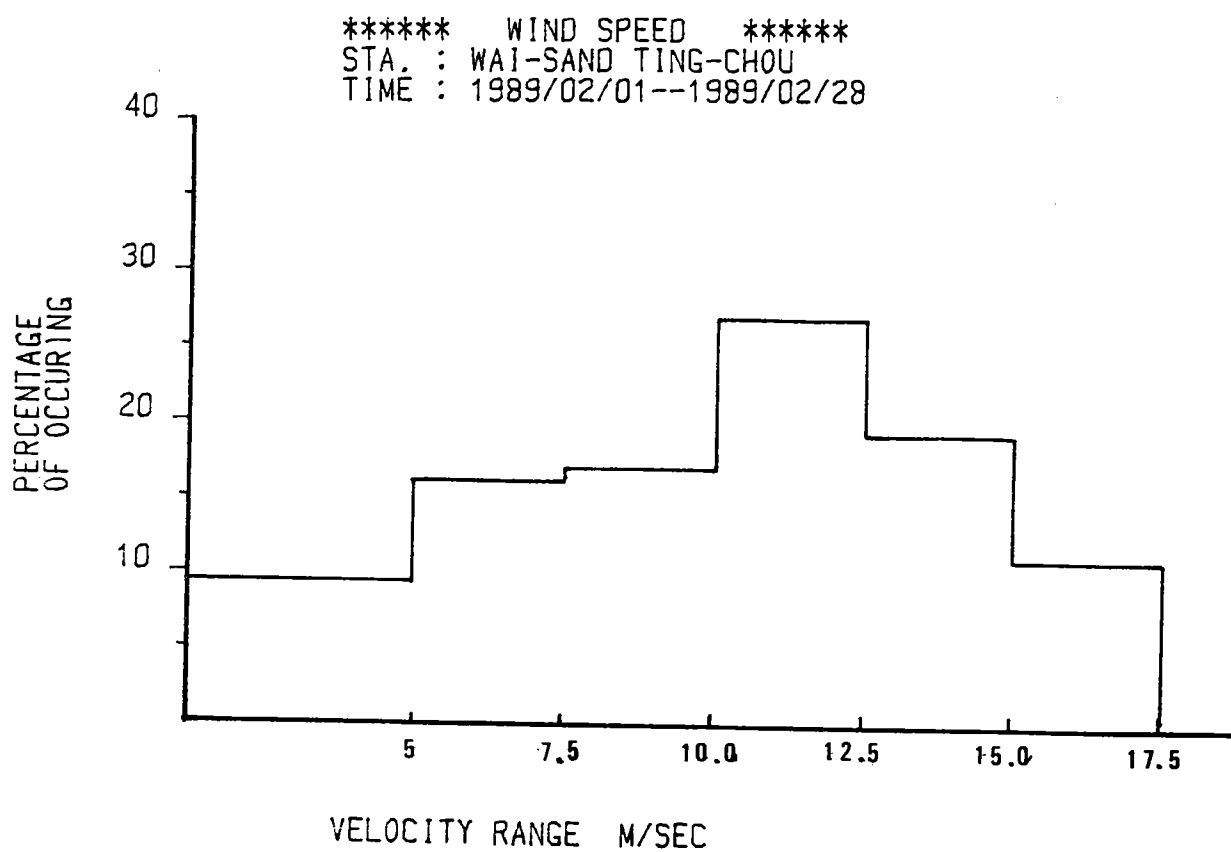


圖 2-14 外傘頂洲七十八年二月份風速分佈直方圖

**** WAI-SAND-TING-CHOU WINE ROSE CHART 1989/3 ****

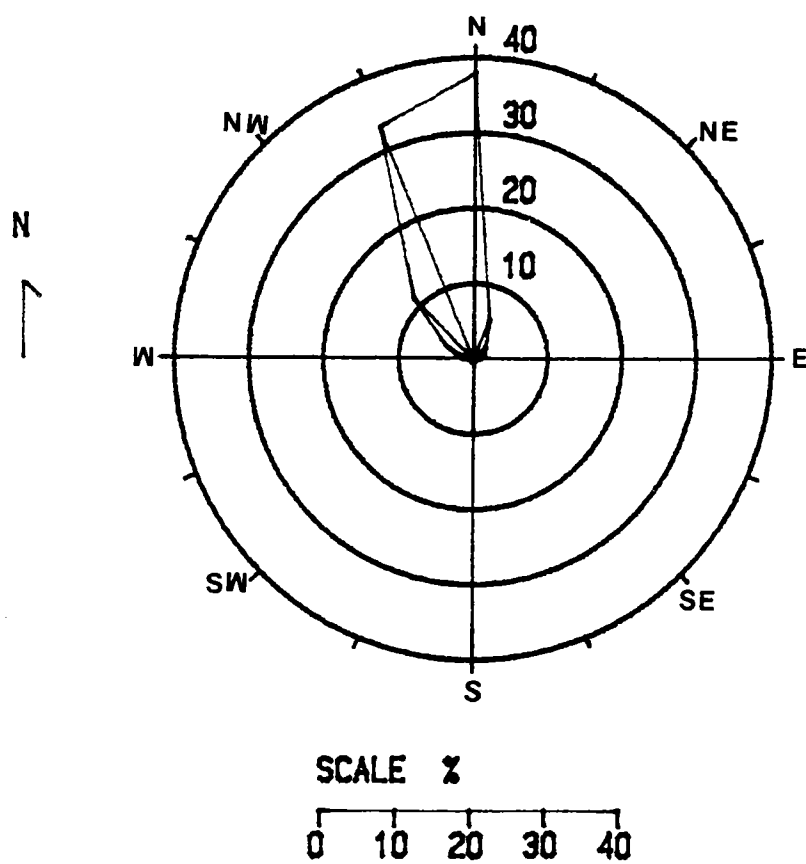


圖 2-15 外傘頂洲七十八年三月份風向玫瑰圖

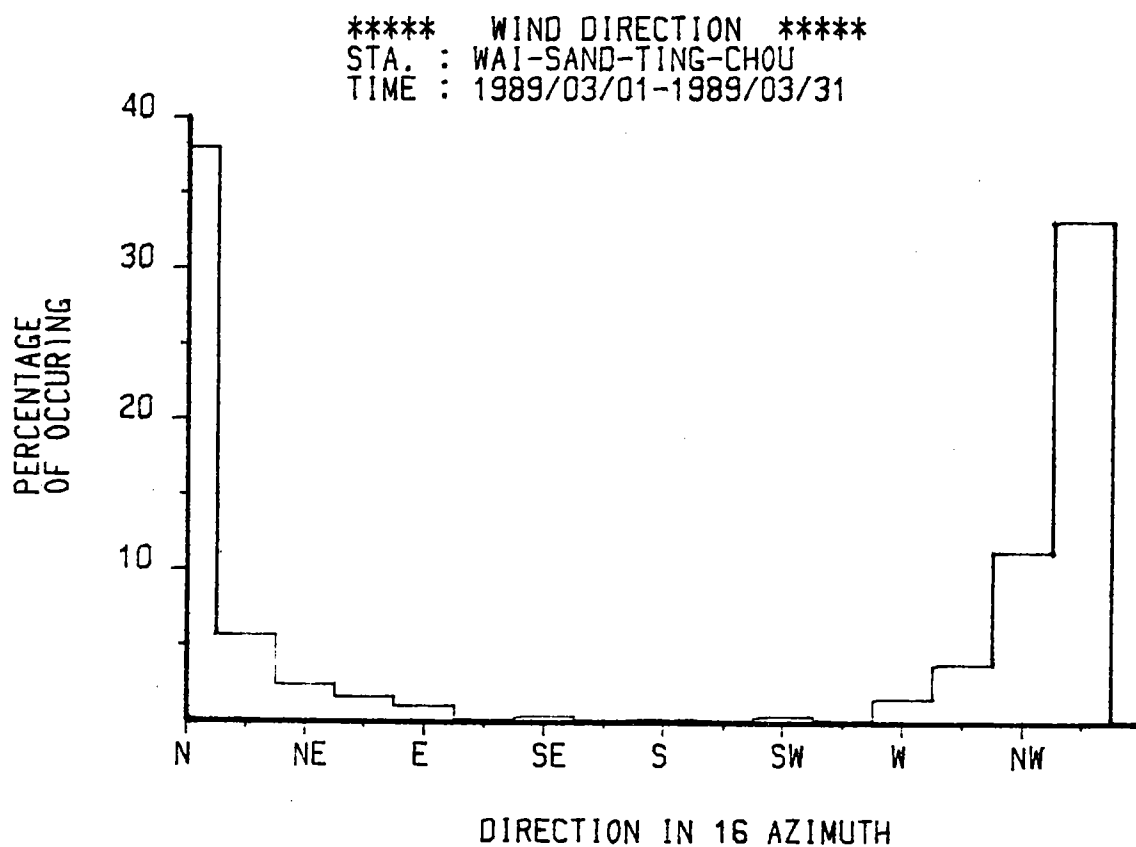


圖 2-16 外傘頂洲七十八年三月份風向分佈直方圖

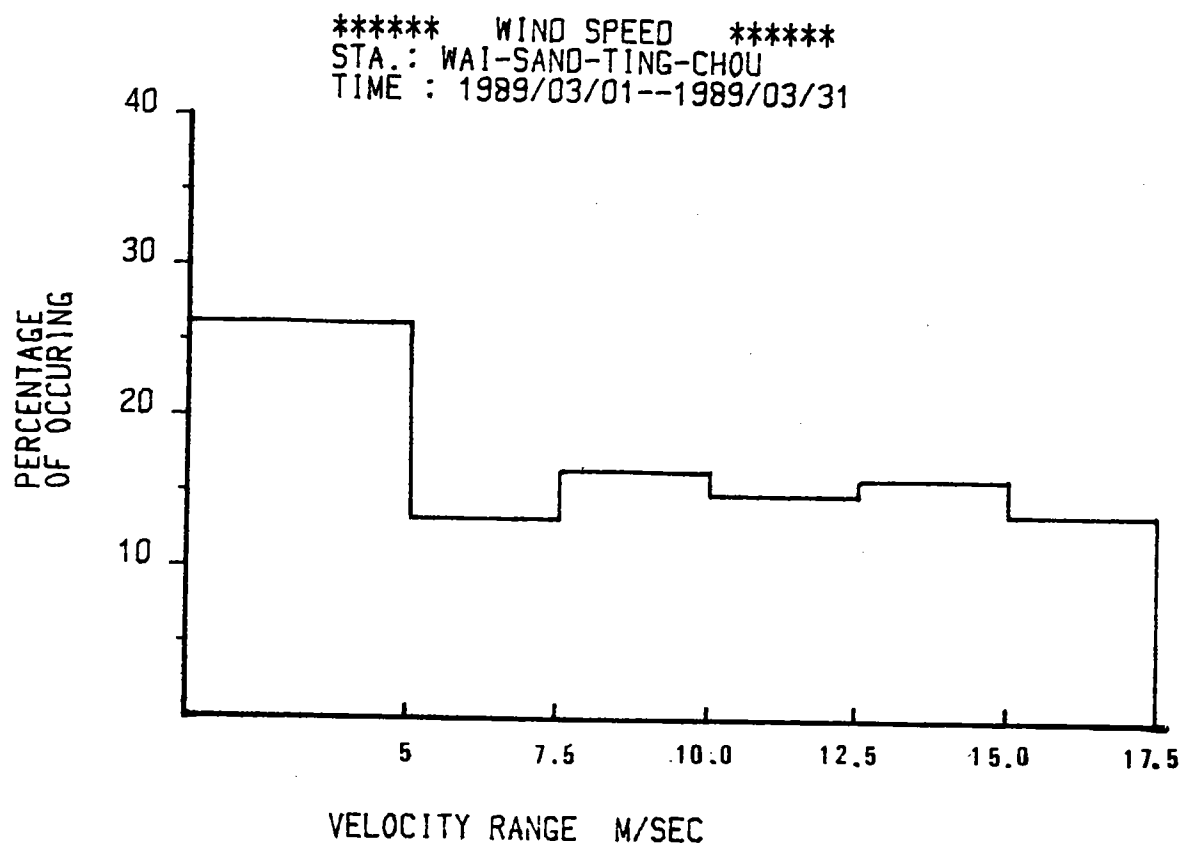


圖 2-17 外傘頂洲七十八年三月份風速分佈直方圖

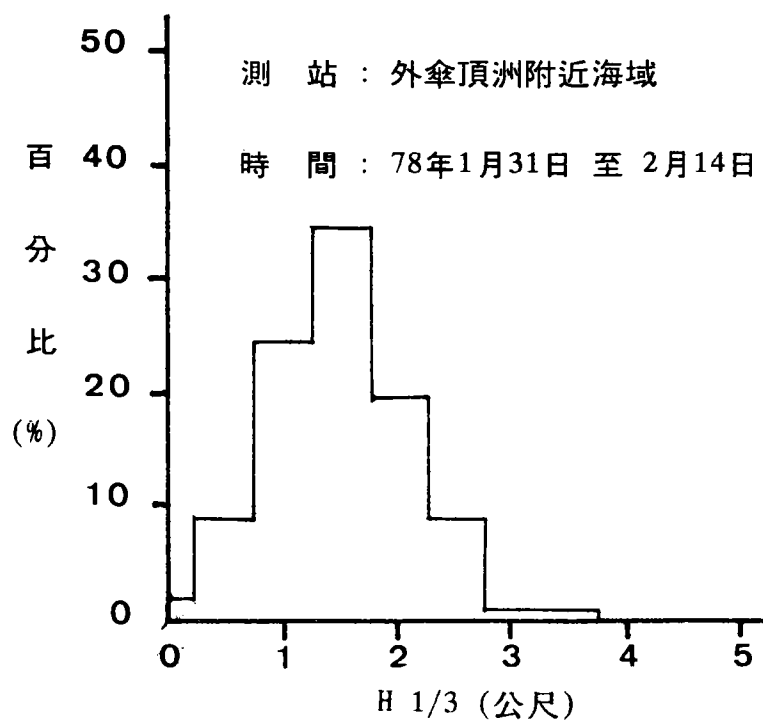


圖 2-18 實測 H1/3 波高之機率分佈直方圖

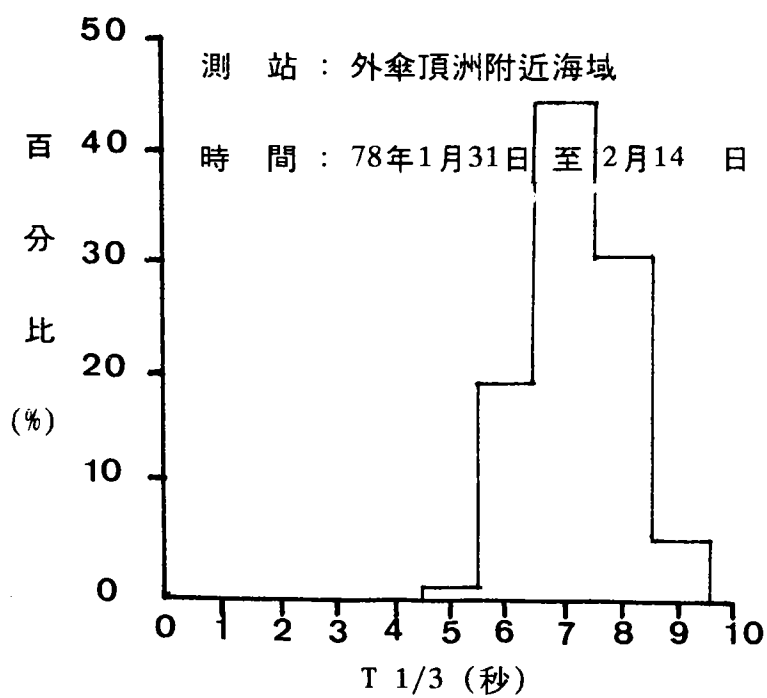


圖 2-19 實測 T1/3 週期之機率分佈直方圖

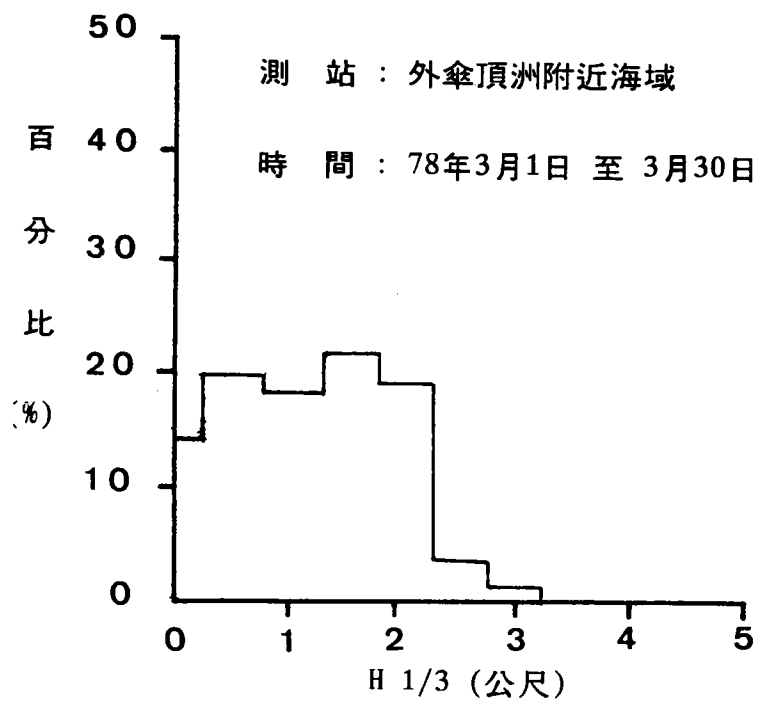


圖 2-20 實測 $H_{1/3}$ 波高之機率分佈直方圖

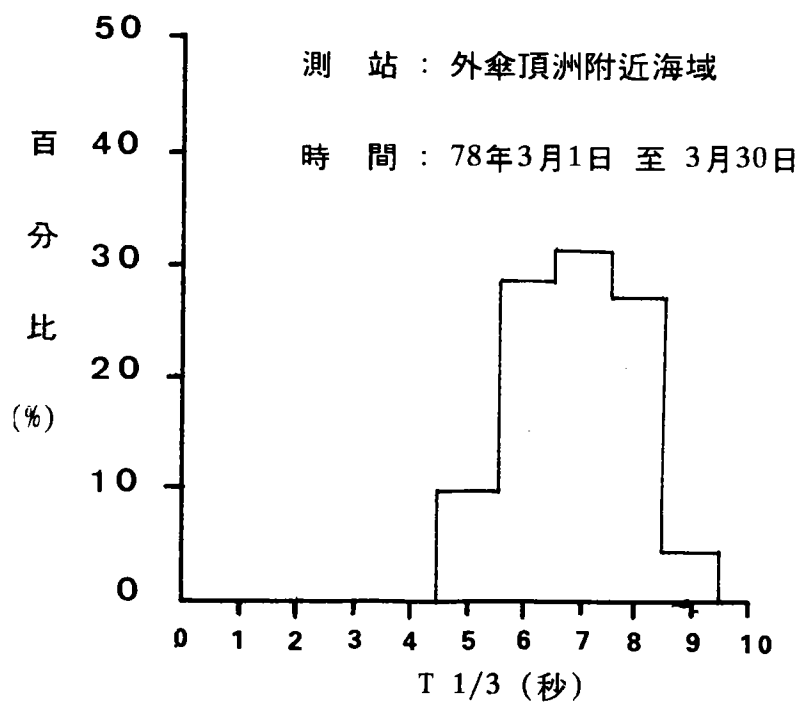


圖 2-21 實測 $T_{1/3}$ 週期之機率分佈直方圖

參. 流對波浪觀測之影響

徐 進 華

3 - 1 引 言

在海上觀測波浪比較簡單的方法是測量頻率譜，它可以經由在一個固定點使用單獨一個波高計測得，但此項資料相對的來講也較無法顯示海面真正的狀況，即使我們已知各成份波進行的方向，要由頻率譜轉換成波數譜亦並非時常可行，特別是當有流存在的時候。

當有流存在時，波浪將產生各種顯著的變化，包括波長與振幅的調變，折射，阻塞以及反射等現象，即使流在水平方向不改變，波浪也將產生都卜勒轉移（ Doppler shift ）的現象，且當流為旋性時，波的離散關係式以及振幅與能量密度間的關係式都將發生顯著的變化；後者乃新近由 Teles da Silva & Peregrine（ 1988 ）所指出，這些變化將對於如何解釋在一個定點所觀測到的波浪記錄產生影響。

本文不在於討論波與流之間能量交換的問題，故僅考慮流在水平方向不改變的狀況，且為簡化計，在解說時僅考慮一個二度空間的流場。在此種情況下，一個最簡單的現象是我們在一個定點所觀測到的各成份波的頻率 n 將與在一個靜止的水中所觀測的頻率 σ 不同，兩者的關係為

$$n = \sigma + Uk \quad (1)$$

其中 U 代表水面的流速， k 代表此成份波的波數， Uk 則代表由對流作用所導致通過觀測點波的數目。此種波頻率的轉移可稱為都卜勒轉移。由 (1) 式我們可明顯的看出，若要由觀測的頻率 n 求出 k (k 將不改變)，除必須測得 U ，且需知道 σ 和 k 的關係式，此關係式在一均勻流裡是和沒有流存在時完全相同 -- 此時流的作用與我們採用一個移動座標者完全相同，故對於一個深水重力波而言，

$$\sigma = \sqrt{gk} \quad (2)$$

但若流在垂直方向上有變化（表旋性流），則上式將無法成立。有關波行進在一個旋性流上的理論到目前為止為數並不多，且大都限制在渦旋度（vorticity）為均勻的流。波浪行進在此種流上，依照 Tsao (1959)，Simmen & Saffman (1985) 和 Teles da Silva & Peregrine (1988) 的討論

$$\sigma = \sqrt{gk + \omega_y^2/4} - \frac{\omega_y}{2} \quad (3)$$

其中 $\omega_y = \partial U / \partial z$ 表渦旋度在 y 方向的分量（我們在此定波浪實際進行方向為 x 方向，且 z 座標垂直向上）。由 (1) 和 (3) 可以看出當流存在且具有旋性時，兩者都將影響我們在一個固定點所觀測到的頻率，其結果將改變我們所測得的頻率譜。

另外，Teles da Silva & Peregrine (1988) 也發現當流為旋性時，即使只考慮一個線性波，其動能與位能密度兩者並不相等，故若由水面高度變化，利用以往的公式計算波的能量，將明顯產生誤差，此點亦顯示若要由在一定點所測得的水面高度變化之時間序列來計算波的能譜，必須考慮流的旋性，特別是當水面有強風時。

為解說以上所說的效應，在本文裡我們將以JONSWAP Spectrum 為例，計算旋性流和非旋性流對此種波浪場所產生的影響，但首先我們將簡單地介紹在一個旋度為均勻的流上線性波的理論，此項理論在 Teles da Silva & Peregrine (1988) 的文章中乃與求非線性波的數值解的理論合併討論，故頗不易理解。

3 - 2 在均勻旋度流中線性波的理論

由於渦旋度在整個流場內為均勻分佈，故根據 Kelvin's circulation theorem，當流場為二度空間時，渦旋度將始終維持均勻，此乃確保由波浪所引起的擾動速度將為非旋性，故仍可用一個速度勢函數 ϕ 來代表，且滿足 Laplace equation

$$\nabla^2 \phi = \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad (4)$$

再者，由於水面的起伏皆由波的擾動所產生，故其運動邊界條件可表為

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + U \frac{\partial \eta}{\partial x} = \frac{\partial \phi}{\partial z}, \quad (z = 0) \quad (5)$$

其中 η 代表由波浪所引起的水面垂直位移， $z=0$ 表水面平均的位置， U 代表流在 x 方向的速度分量，另外要注意的是在目前的情況，由於 $\partial U / \partial x = 0$ 且流在垂直方向的速度 $W(z=0) = 0$ ，故由連續方程 W 在每一點皆為零。上式實際代表一個線性波的近似。

在上述的旋性流場裡，一個最主要與非旋性流場不同之處在於其動力邊界條件無法用伯努利方程式 (Bernoulli's equation) 來表示，但由於旋性流的部份目前為穩定 (steady)，故我們可以將運動方程式改寫為

$$\nabla \left\{ \frac{\partial \phi}{\partial t} + gz + \frac{p}{\rho} + \frac{1}{2} \left[\left(U + \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \phi}{\partial z} \right)^2 \right] \right\} = -\vec{\omega} \times \vec{u}$$

其中 \vec{u} 代表旋性流速和非旋性流速的向量和， $\vec{\omega}$ 代表渦旋度，乃為定值。上式可以應用在流場內任一點，故當應用到自由表面，乃具有以下的近似分量

$$\frac{\partial}{\partial x} \left\{ \frac{\partial \phi}{\partial t} + g\eta + \frac{1}{2}U^2 + U \frac{\partial \phi}{\partial x} + \eta U \frac{\partial U}{\partial z} \right\} = -\omega_y \frac{\partial \eta}{\partial t}, \quad (z=0) \quad (6)$$

上式仍代表線性波的近似，且由於 $\partial U / \partial x = 0$ 和 $\partial U / \partial z = \omega_y$ ，故可化簡為

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x \partial t} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} + U \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + U \omega_y \frac{\partial \eta}{\partial x} + \omega_y \frac{\partial \eta}{\partial t} = 0, \quad (z=0) \quad (7)$$

我們目前得到 (4), (5) 和 (7) 三個有關 η 和 ϕ 的控制方程式，其中 (4) 和 (5) 式乃與波浪行進在一個均勻流中的方程式完全相同，故若

$$\eta = a e^{i(kx - nt)} \quad (8)$$

則可証明

$$\phi = -i \frac{\sigma}{k} a e^{i(kx - nt)} e^{kz} \quad (9)$$

其中

$$\sigma = n - Uk \quad (10)$$

將 (8) 和 (9) 代入 (7) 式，並消去共同項，可得

$$-\sigma n + gk + Uk\sigma + Uk\omega_y - n_0\omega_y = 0$$

再利用 (10) 式消去 n

$$\sigma^2 + \sigma\omega_y - gk = 0 \quad (11)$$

故最後得到

$$\sigma = \sqrt{gk + \omega_y^2/4} - \frac{\omega_y}{2} \quad (12)$$

上式與 (10) 式乃分別和 (3) 式與 (1) 式相同，且當 $\omega_y = 0$ 時，上式乃化簡為 (2) 式。

由上面的 ϕ 和 η 的解，我們又可以分別求出波的平均動能與位能，乃為

$$\begin{cases} \text{K.E.} = \frac{\rho}{4} \frac{\sigma^2}{k} a^2 \\ \text{P.E.} = \frac{\rho}{4} g a^2 \end{cases} \quad (13)$$

故參照 (11) 式可以很明顯的看出平均動能與位能兩者不相等，此項結果也和 Teles da Silva & Peregrine (1988) 的結果相符合。

在旋性流中波的動能與位能不相等的現象將使得利用水面高度記錄計算波的能量產生困難，因為我們通常都是利用線性波在非旋性流中的能量與振幅間的關係式

$$E = \frac{\rho}{2} g a^2 \quad (14)$$

計算波的能量，可是由（13）式，當流為旋性且具有均勻渦旋度時

$$E = \frac{\rho}{4} \left(g + \frac{\sigma^2}{k} \right) a^2 \quad (15)$$

此項結果再加上離散關係式的變化以及都卜勒效應，終將改變我們所觀測到的頻率譜，其效果我們將在下一節以一個實際的例子來加以解說。

3 - 3 頻率譜的變化

在本節裡我們假設某地區海面上的各成份波的能量密度與 JONSWAP spectrum 所描述者相同，（參考 Hasselmann et al., 1973）亦即

$$\left. \begin{aligned} \Phi(\sigma) &= \beta g^2 \sigma^{-5} \exp\left\{-\frac{5}{4}\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^{-4}\right\} \gamma^r \\ r &= \exp\left\{-\frac{(\sigma - \sigma_0)^2}{2m^2\sigma_0^2}\right\} \\ m &= \begin{cases} m_a & \text{for } \sigma \leq \sigma_0; \\ m_b & \text{for } \sigma > \sigma_0. \end{cases} \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

上式中包含 β , γ , m_a , m_b 以及巔峰頻率 σ_0 五個參數，其中 $\gamma = 3.3$, $m_a = 0.07$, $m_b = 0.09$, 而 σ_0 和 β 則與風域以及風應力有關，在此我們定 $\sigma_0 = 2 \text{ rad sec}^{-1}$ 及 $\beta = 1.2 \times 10^{-3}$ 。

在 (16) 式中 σ 代表各成份波的頻率，但它為滿足 (2) 式的頻率，故僅在波行進在一原本為靜止的海面方才代表所觀測到的頻率。若波浪行進在一等速的流上，則對於每一個成份波（波數 k 為固定）所觀測到的頻率為

$$n = \sigma + Uk$$

其中 σ 仍滿足 (2) 式，故由在一個定點所測得之水面高度變化直接做波譜分析所獲得的結果，將與 (16) 式中的 $\Phi(\sigma)$ 的函數曲線有顯著的不同。若更進一步，流

具有均勻旋度時，則不僅上式中的 σ 需改用 (3) 代入，且因各成份波能量與振幅間的關係式改變，故在計算實際能譜時，依照 (15) 式，須將 (16) 式乘以不同的係數，亦即乘以 $\rho(g + \sigma^2/k)/4$ 而非 $\rho g/2$ 。

圖 1 即顯示此種頻率譜變化的情形，在圖 1 中我們假設在各種流況下各成份波的能量皆不改變（由於在目前情況下，波和流之間沒有能量交換，故此項假設僅與波的生成有關），故當 ω_y 為正時，為達到相同的能量密度，其頻率譜在各點皆增大，表對應到相同的能量，水面的起伏必須增加。

另外一個有趣的現象是有關頻率譜在短波範圍的變化，為清楚地顯示此種變化，我們將圖 1 的結果在圖 2 中重新以對數的方式來描繪。由於原來的 JONSWAP spectrum 在高頻區趨近於 Phillips (1958) 所建議之 n^{-5} 分佈，故圖 2 中的實曲線乃逐漸趨近於 n^{-5} ，但由於流的都卜勒效應以及其他效應，圖 2 中虛線所代表的頻率譜乃更趨近於 n^{-4} 的變化。

3 - 4 結 論

在本篇報告中我們解說了流以及其所包含的渦旋度對頻率譜所產生的影響，由於都卜勒效應以及離散關係式的改變，使頻率譜在橫軸方向產生平移以及拉長或收縮的現象，此種現象使我們在估計最大能量的波的頻率時，甚至在估算湧浪的頻率時，將產生誤差。另外當流為旋性時波的位能與動能不相等，故我們以往利用水面高度變化來計算波的能量時，有時僅能代表一個近似。

都卜勒效應對短波的影響更顯著，此種短波在最近由於遙感技術的發展引起人們極大的興趣，但經由以上的分析，我們在解釋所觀測到的頻率譜時必須相當的謹慎，或改用其他方法來測量波數譜。

参 考 文 献

- Hasselmann, K. *et XV al.* 1973 Measurements of wind wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP). *Herausgegeben vom Deutsch. Hydrograph. Institut.*, Reihe A, no. 12, 95 pp.
- Phillips, O. M. 1958 The equilibrium range in the spectrum of wind-generated waves. *J. Fluid Mech.* 4, 426–434.
- Simmen, J. A. & Saffman, P. G. 1985 Steady deep water waves on a linear shear current. *Stud. Appl. Maths* 73, 35–57.
- Teles da Silva, A. F. & Peregrine D. H. 1988 Steep, steady surface waves on water of finite depth with constant vorticity. *J. Fluid Mech.* 195, 281–302.
- Tsao, S. 1959 Behaviour of surface waves on a linearly varying current. *Tr. Mosk. Fiz.-Tekh. Inst. Issled. Mekh.*

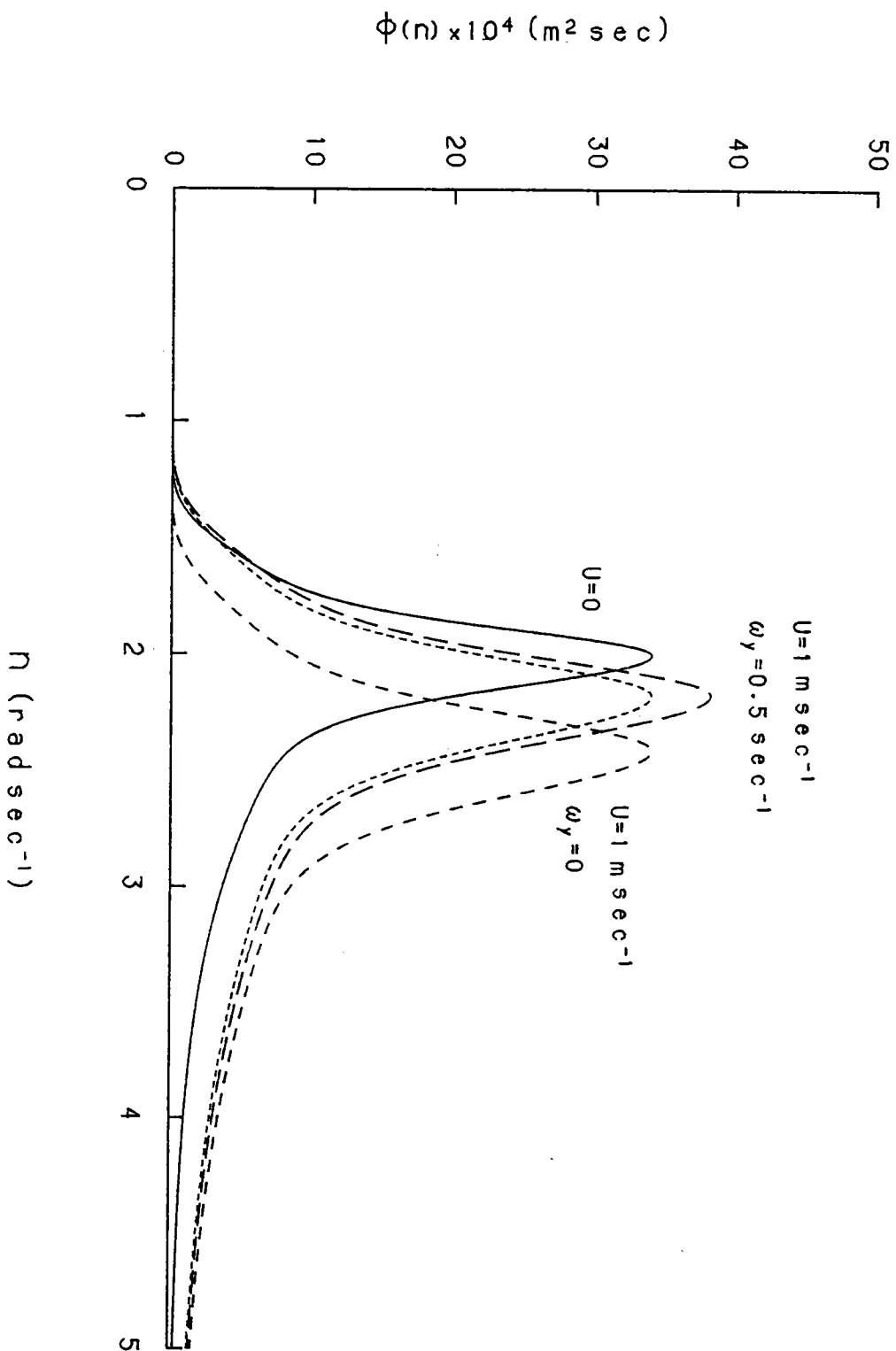


圖 1 當各成份波的能量密度不變時，在不同流況下頻率譜的變化。最短的折線代表當 $\omega_y = 0.5 \text{ sec}^{-1}$ 時，僅由都卜勒效應所產生的變化。

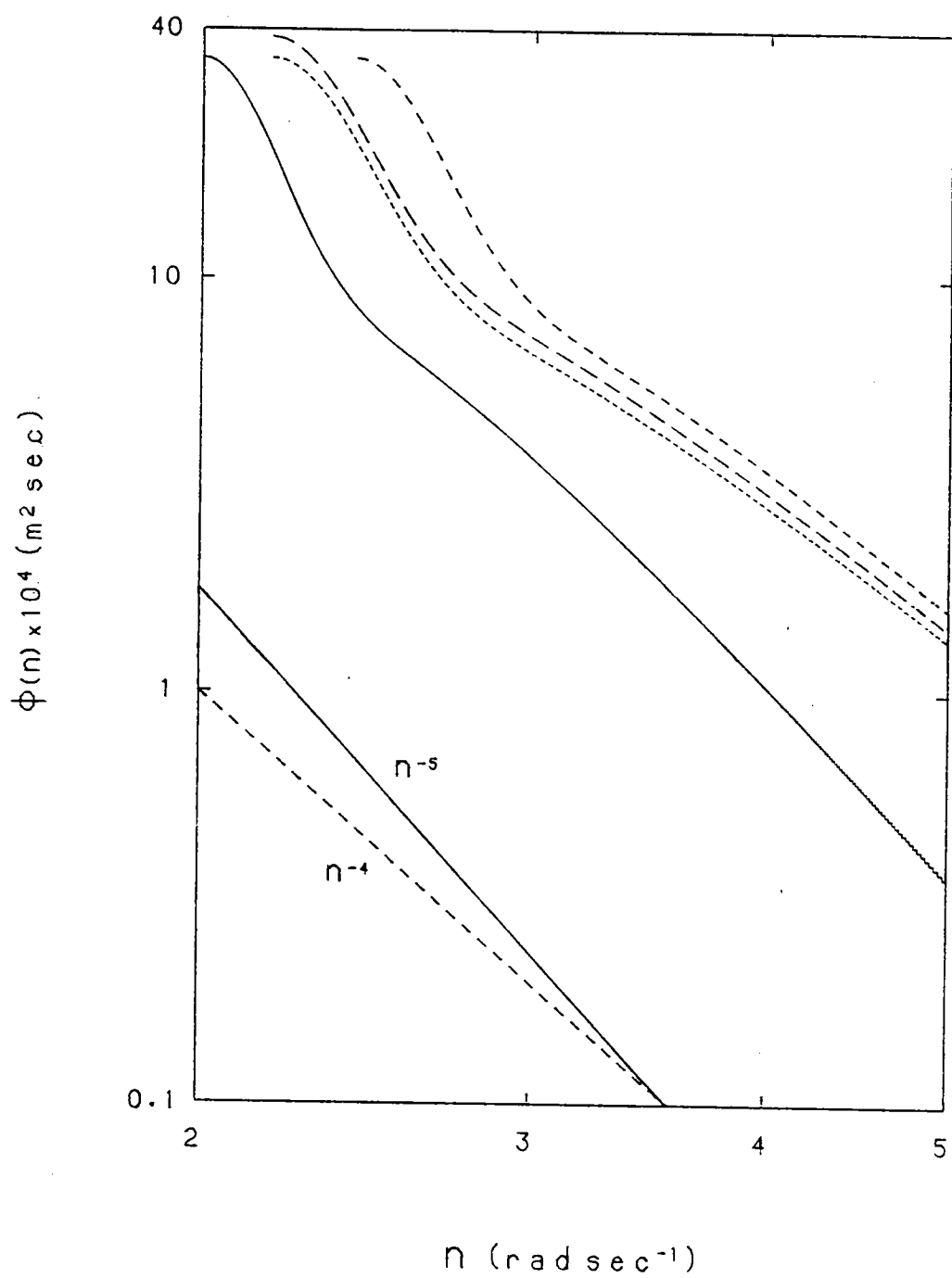


圖 2 與圖 1 相同的頻率譜，但改用對數表示。

肆. 面積風域法風波能量授受係數之推求

吳 基

4 - 1. 前 言

對於季風波浪之推求，以往較常用的是 S.M.B 法，梁乃匡先生於 1973 年提出一個新風波生成觀念，稱為元素波模式，認定有效風域面積（含風向、風速）為影響波高的主要因子，至於複雜的風波能量授受機制，不予深入探討，只將其揉合在一個經驗係數 ξ 中，（有關面積風域法之觀念與詳細內容，請看本所與中央氣象局合作計畫〈台灣附近海域波浪預報模式研究——波浪部份〉各次研究報告），因此對某一個海域而言，代表波高 $H_{1/3}$ 與風波能量授受係數 ξ 中有如下之關係：

$$\xi_K = \frac{g(H_{1/3})^2_K (T_{1/3})_K}{[8 \cdot (suubb)_K]} \dots\dots\dots (4-1)$$

$$K = 1, 2, \dots\dots L$$

$$(SUUBB)_K = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M U_{ij}^2 \cos^2 \theta_{ij} \exp\left(\frac{-\beta r_j}{U_{a1j}^2}\right) \cdot \frac{1}{r_j} \cdot dA_j \dots\dots (4-2)$$

U_{ij} ：第 i 段、第 j 個風場網格點之風速

θ_{ij} : 第 i 段、第 j 個風場網格點之風向與推算點連線之夾角

r_j : 網格元素至推算點距離

dA_j : 網格點之面積

β : 衰減常數

N : 風場段數

M : 風場網格點個數

L : 波浪資料段數

另外，此波能是否能在適當時刻到達預定位置，則由傳遞常數 α 來決定

$$LD_{ij} = \alpha \cdot U_{ij} \cdot (N-i) \cdot 3.6 \cdot \Delta t \quad \dots\dots\dots (4-3)$$

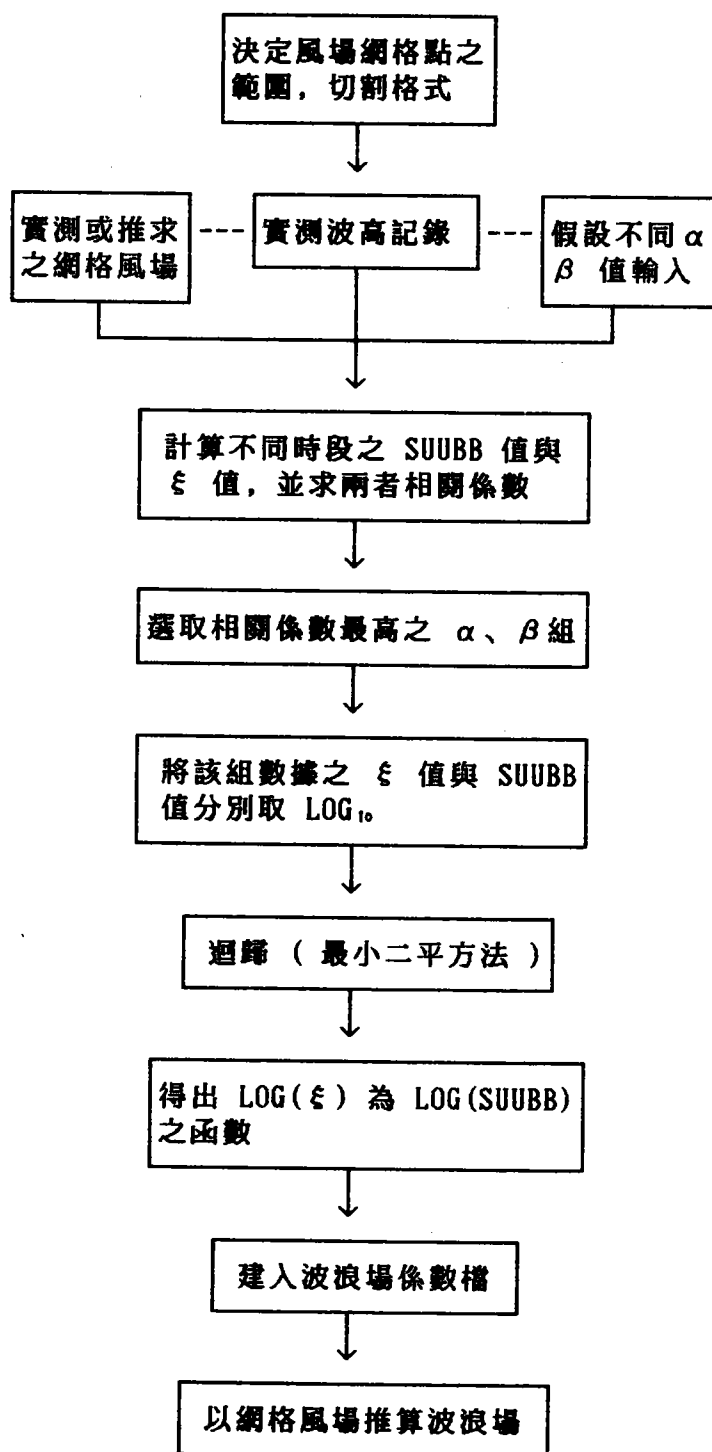
$$LU_{ij} = \alpha \cdot U_{ij} \cdot (N-i+1) \cdot 3.6 \cdot \Delta t \quad \dots\dots\dots (4-4)$$

式中 : α 為傳遞常數

Δt 為天氣圖時間間隔 (HR)

吾人如能利用一段實測的波浪觀測記錄，配合實測或推求之大區域風場，則可導出 ξ 與 SUUBB 之間之關係，並決定 α 、 β 之最適當值，得出此等關係後，該測站附近地區於該季節時之波浪狀況均可由風場而推得。

4 - 2. ξ 與 SUUBB 之關係推求及季風波浪推算流程



4 - 3. 推算結果

今年度之內我們採用了中央氣象局小琉球測站1987年 6 月波浪記錄及基隆港務局 1989 年 1 月下旬的波浪記錄，配合中央氣象局之風場經電腦處理，推算出小琉球夏季及基隆港冬季之諸項係數，如表 4-1、4-2 所示。兩段資料的 ξ 與 SUUBB 相關係數均達到 0.80 以上，以相關係數最高之資料組加以迴歸，(Least-square method) 得到的結果點繪於圖 4-1 圖 4-2，因此我們可歸納為下列兩式

基隆港冬季

$$Y = 1.53X^2 - 11.1X + 17.18 \quad \dots\dots\dots (4-5)$$

小琉球夏季

$$Y = 0.119X^2 - 1.859X + 2.983 \quad \dots\dots\dots (4-6)$$

$$Y = \text{LOG}(\xi)$$

$$X = \text{LOG}(\text{SUUBB})$$

表 4-1 基隆港冬季 SUUBB 與 ξ 關係推算結果

波 浪 測 站	基隆港	經緯度：25.2° N 121.7° E
風 場 時 間	1989.01/19/02:00 ~ 1989.01/30/20:00	
波 浪 記 錄	1989.01/24/02:00 ~ 1989.01/30/20:00	
風 場 範 圍	10° ~ 35° N	110° ~ 135° E
時 間 間 隔	6 小時	
波浪資料總數	28 組	
風場網格點個數	676 (26 × 26)	

不同 α 、 β 值下 SUUBB 與 ξ 之相關係數

$\beta \backslash \alpha$	0.70	0.80	0.90
0.1	0.76	0.79	0.80
0.2	0.80	0.82	0.81
0.3	0.81	0.81	0.79

最佳 α 、 β 組合為 $\alpha = 0.80$

$\beta = 0.20$

表 4-2 小琉球夏季 SUUBB 與 ξ 關係推算表

波 浪 測 站	小琉球	經緯度：22.4° N 120.3° E
風 場 時 間	1987.06/18/02:00 ~ 1987.06/25/23:00	
波 浪 記 錄	1987.06/23/02:00 ~ 1987.06/25/23:00	
風 場 範 圍	10° ~ 40° N	110° ~ 135° E
時 間 間 隔	3 小時	
波浪資料總數	24 組	
風場網格點個數	806 (31 × 26)	

不同 α 、 β 值下 SUUBB 與 ξ 之相關係數

$\beta \backslash \alpha$	1.20	1.35	1.40
0.2	0.81	0.81	0.80
0.4	0.79	0.83	0.82
0.6	0.77	0.81	0.80

最佳相關之 α 、 β 組合為 $\alpha = 1.35$

$\beta = 0.40$

圖 4 - 1 基隆港冬季 ξ 與 SUUBB 迴歸圖

時間 : 1989/01/24/02:00 - 1989/01/30/20:00

$$Y = 1.53X^2 - 11.1X + 17.18$$

$$Y = \text{LOG}(\xi)$$

$$X = \text{LOG}(\text{SUUBB})$$

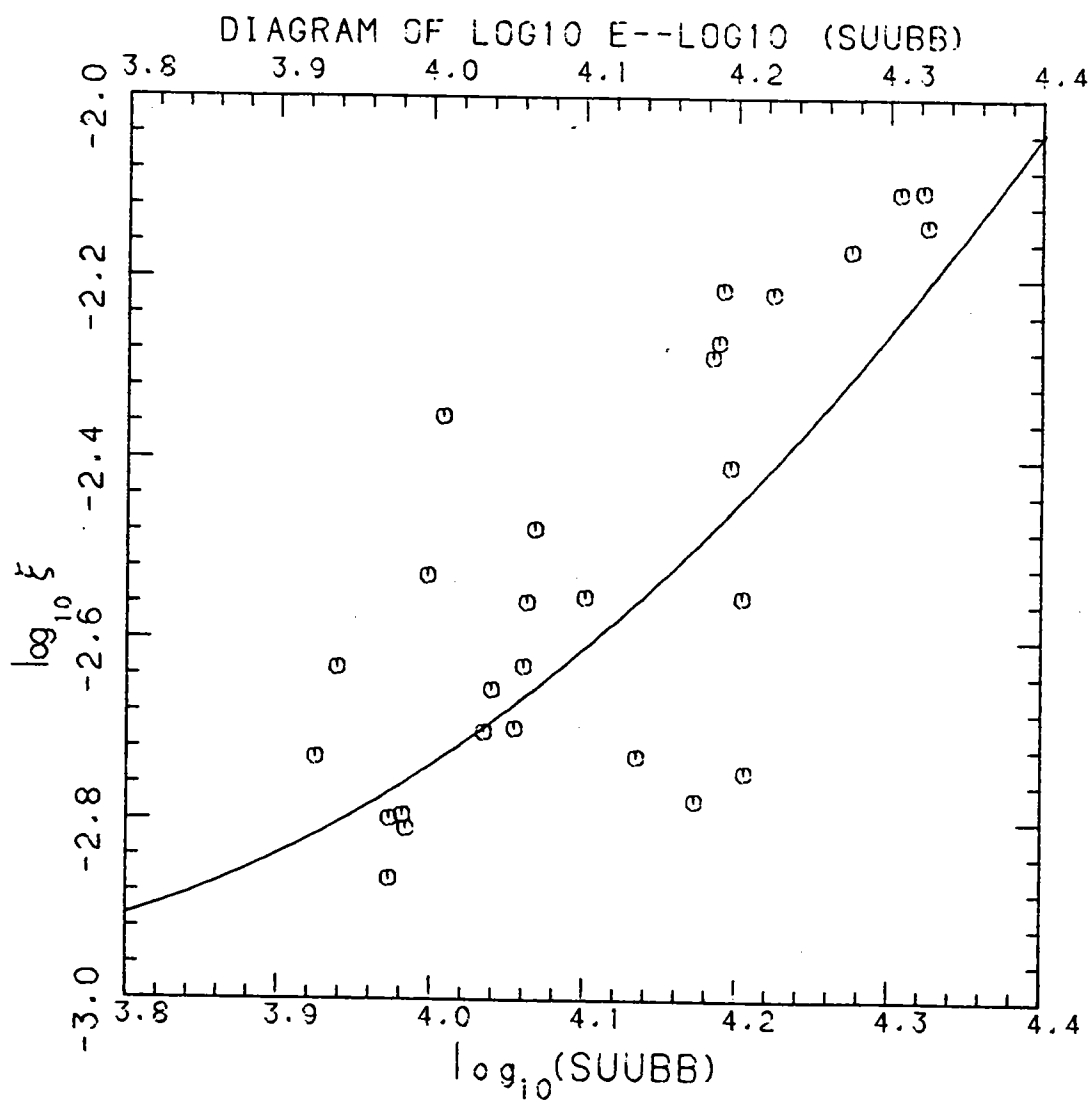


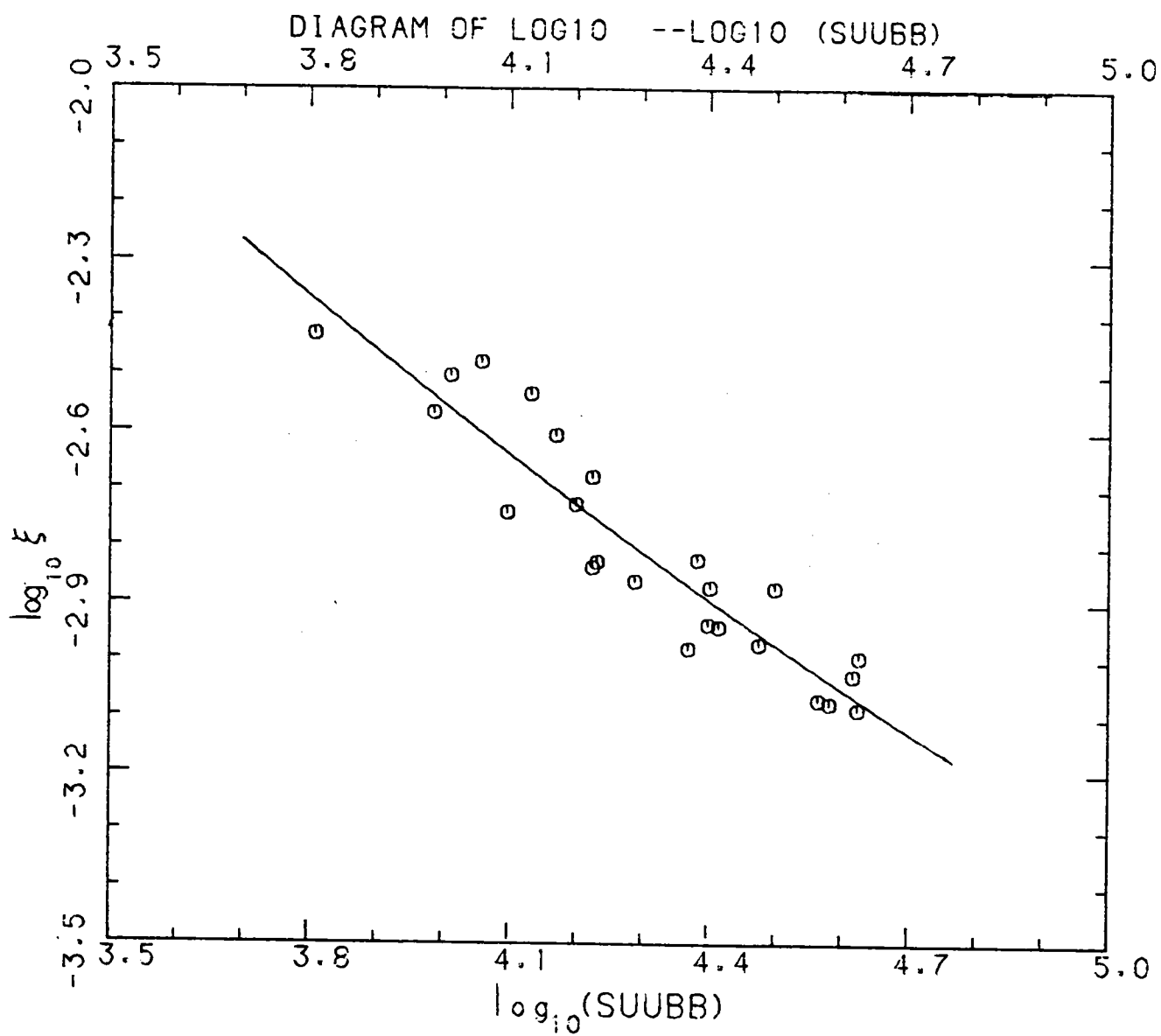
圖 4 - 2 小琉球夏季 ξ 與 SUUBB 迴歸圖

時間 : 1987/06/23/02:00 - 1987/06/25/23:00

$$Y : 0.119X^2 - 1.859X + 2.983$$

$$Y = \text{LOG}(\xi)$$

$$X = \text{LOG}(\text{SUUBB})$$



伍．蘇澳港港池盪漾實測(續)

歐陽餘慶

5 - 1 前 言

本節繼續上年度於蘇澳港池內選點施測盪漾工作，經於民國 77 年 10 月 5 日尼爾森颱風過境，在蘇澳港 F 點（如圖（5-1））釋放 DNW-5 潮波儀作每小時記錄 50 分鐘波浪紀錄，茲就基本理論，實測紀錄分析、結論及往後研究計畫陳述如後：



圖 (5-1) 蘇澳港港池及測點 F 位置

5 - 2 基本理論

5-2-1 輻射應力

當一系列波浪受到一阻礙物時會產生反射，其原先具有之動量將反轉，在動量守恒原則下，必有一力作用於該阻礙物上，其值等於波浪動量變化率，此力可作為輻射應力之一種說明。

由於輻射應力為一動量流，因此輻射應力被定義為波浪作用下之過剩動量流（the excess flow of momentum due to the presence of the waves）。設輻射應力之主成份為 S_{xx} ，其大小依定義為（Longuet-Higgins 1964）

$$S_{xx} = \overline{\int_h^{\zeta} (P + \rho u^2) dz} - \int_{-h}^0 P_0 dz \quad (5-1)$$

式中 P ， P_0 分別為任一點有波浪與無波浪時之壓力， ρ 為水之密度， u 為 x 方向水粒子速度， h 表水深， ζ 表水位變化，積分上方橫線表示一週期之平均。（5-1）可改寫為：

而
$$S_{xx} = S_{xx}^{(1)} + S_{xx}^{(2)} + S_{xx}^{(3)} \quad (5-2)$$

$$\left. \begin{aligned} S_{xx}^{(1)} &= \overline{\int_{-h}^{\zeta} \rho u^2 dz} \\ S_{xx}^{(2)} &= \overline{\int_{-h}^0 (p - p_0) dz} \\ S_{xx}^{(3)} &= \overline{\int_{-h}^{\zeta} p dz} \end{aligned} \right\} \quad (5-3)$$

將 $S_{xx}^{(1)}$, $S_{xx}^{(2)}$, $S_{xx}^{(3)}$ 分別處理再合併可得：

$$S_{xx} = E \left(\frac{2kh}{\sinh 2kh} + \frac{1}{2} \right) \quad (5-4)$$

式中 $k = \frac{2\pi}{\text{波長}}$, $\sigma = \frac{2\pi}{\text{週期}}$, $E = \frac{1}{2} \rho g a^2$, a 為振幅

$$\text{深水中 } S_{xx} = \frac{1}{2} E \quad (5-5)$$

5-2-2 平均水位變化

設群波波能為

$$E = E_0 \left\{ 1 + b \cos \Delta k (x - C_g t) \right\} \quad (5-6)$$

式中 E_0 表深海波能, Δk 表組合群波波數之帶寬量, C_g 表群波速, 考慮水深 h 與成份波長相比甚大時, 即 $kh \gg 1$, 則

$$S_{xx} = \frac{1}{2} E = \frac{1}{2} E_0 \left\{ 1 + b \cos \Delta k (x - C_g t) \right\} \quad (5-7)$$

將水深分為兩部份：一為上層即實際上所有輻射應力集中之區, 其厚度 $D \sim k^{-1}$, 另一為下層亦即僅對任何因輻射應力所導致之平均表面水位變化有影響之區。

在上層區內, 水平動量方程式為：

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} - \frac{1}{D\rho} \frac{\partial S_{xx}}{\partial x} - g \frac{\partial \bar{\zeta}}{\partial x} \quad (5-8)$$

式中 \bar{u} , $\bar{\zeta}$ 為水平速度與水位一波長之平均。由於 D 小可視 (5-8) 右端第一項甚大於第二項, 因此

$$D \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial S_{xx}}{\partial x} \quad (5-9)$$

積分上層區連續方程式可得

$$\bar{w}_D = -D \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{\zeta}}{\partial t} \quad (5-10)$$

\bar{w}_D 為水深 D 處一波長之平均垂直速度, 由 (5-9), (5-10) 兩式可得

$$\frac{\partial \bar{w}_D}{\partial t} - \frac{\partial^2 \bar{\zeta}}{\partial t^2} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial^2 S_{xx}}{\partial x^2} \quad (5-11)$$

設滿足 u , w 之流速勢為

$$\phi = \frac{AC_g}{\sinh kh} \cosh \Delta k (z+h) \sin \Delta k (x-Cgt) \quad (5-12)$$

在 $z = -D \rightleftharpoons 0$ 處之壓力 \bar{p}_0 須滿足下述兩條件：

$$\frac{1}{\rho} \bar{p}_0 = g (\bar{\zeta} + D) \quad (5-13)$$

與

$$\frac{\partial \bar{\phi}_0}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \bar{p}_0 - gD = 0 \quad (5-14)$$

(5-13), (5-14) 合併得：

$$\bar{\zeta} = -\frac{1}{g} \frac{\partial \bar{\phi}_0}{\partial t} \quad (5-15)$$

將 $W_0 (= \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial z})$, $\bar{\zeta}$ 以及 S_{xx} 代入 (5-11), 且 $D\Delta k \ll 1$ 得：

$$-ACg^2 + \frac{A}{g} \Delta k Cg^4 \coth h\Delta k = -\frac{E_0 b}{2\rho} \quad (5-16)$$

因 $kh \gg 1$, $Cg^2 = g/4k$, (5-16) 可改寫成：

$$A = \frac{E_0 b k}{2\rho g \left\{ \frac{1}{4} - \frac{1}{16} (\Delta k/k) \coth h\Delta k \right\}} \quad (5-17)$$

由 (5-15) 求得 $\bar{\zeta}$ 為

$$\begin{aligned}
\bar{\zeta} &= \frac{-E_0 b \Delta k \cos \Delta k (x - C_0 t)}{2 \rho g \left\{ \tanh h \Delta k - \frac{1}{4} \Delta k / k \right\}} \\
&= - \frac{(E - E_0) \Delta k}{2 \rho g \left\{ \tanh h \Delta k - \frac{1}{4} \Delta k / k \right\}} \\
&= - \frac{(a^2 - a_0^2) \Delta k}{4 \left\{ \tanh h \Delta k - \frac{1}{4} \Delta k / k \right\}} \quad (5-18)
\end{aligned}$$

由 (5-18) 知 $\bar{\zeta}$ 與 a^2 不同相位，亦即波高愈大，平均水位愈下降，波高愈小平平均水位愈上升，這種下降、上升本身即形成一週期甚長之長波（如圖 (5-2) 中虛線所示），此種長波進入港池後，由於能量無法消散，且週期較接近港池或船舶自然振動週期，久而久之，形成盪漾（本所 76 研 (三)）。

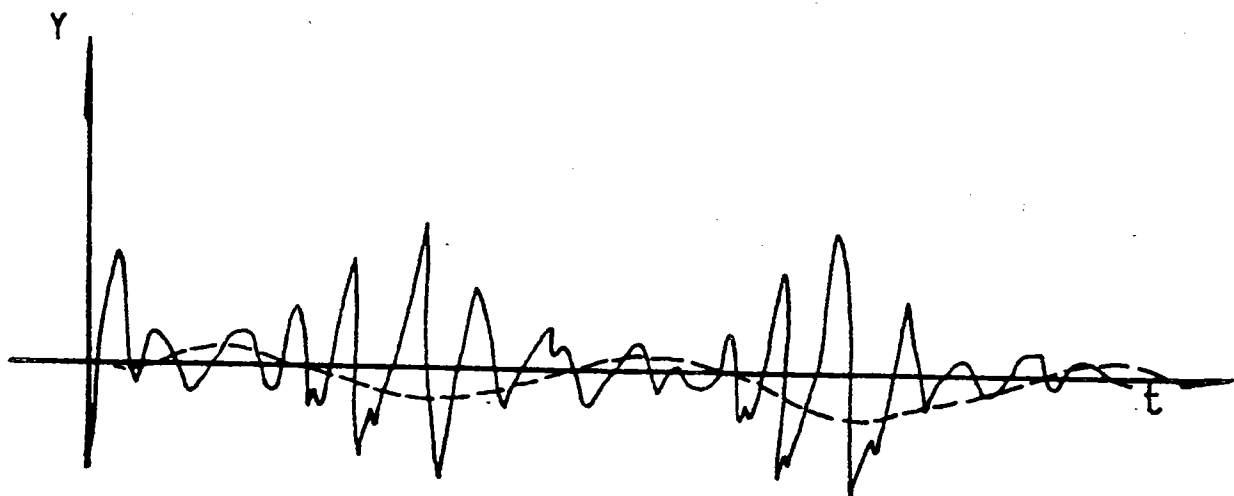


圖 (5-2) 群波產生之長波

5 - 3 實測紀錄分析

本所於 77 年 10 月 5 日 於蘇澳港商港第 12 碼頭前 F 點 (如圖 (5-1) 所示) 施放 DNW-5 潮波儀,經將施測紀錄分析繪成波譜如圖 (5-3-1) ~ (5-3-3) 所示, 按圖 (5-3-1), (5-3-2) 中能量集中之長週期波 (即本所 76 研(三)中所稱雙峰譜中低頻峰) 週期均約為 3 分鐘,圖 (5-3-3) 者為 4.17 分鐘亦即港池盪漾週期當分別為 3 分鐘與 4.17 分鐘。然圖 (5-3-1), (5-3-2) 中低頻峰不若圖 (5-3-3) 者之凸顯,推測該兩圖施測時間之港外入射波群中長週期成份波之週期與港池自然振動週期尚有相當差距, 以致盪漾程度不明顯 (指低頻峰形狀平緩不尖突), 而圖 (5-3-3) 施測時間之港外入射波群中長週期成份波之週期與港池自然振動週期較為接近, 以致盪漾程度較明顯 (指低頻峰形狀尖突), 換言之港池盪漾週期應接近為 4.17 分鐘。

S0-AUO WAVE 1988/10/05/19:10-20:00 (4096)

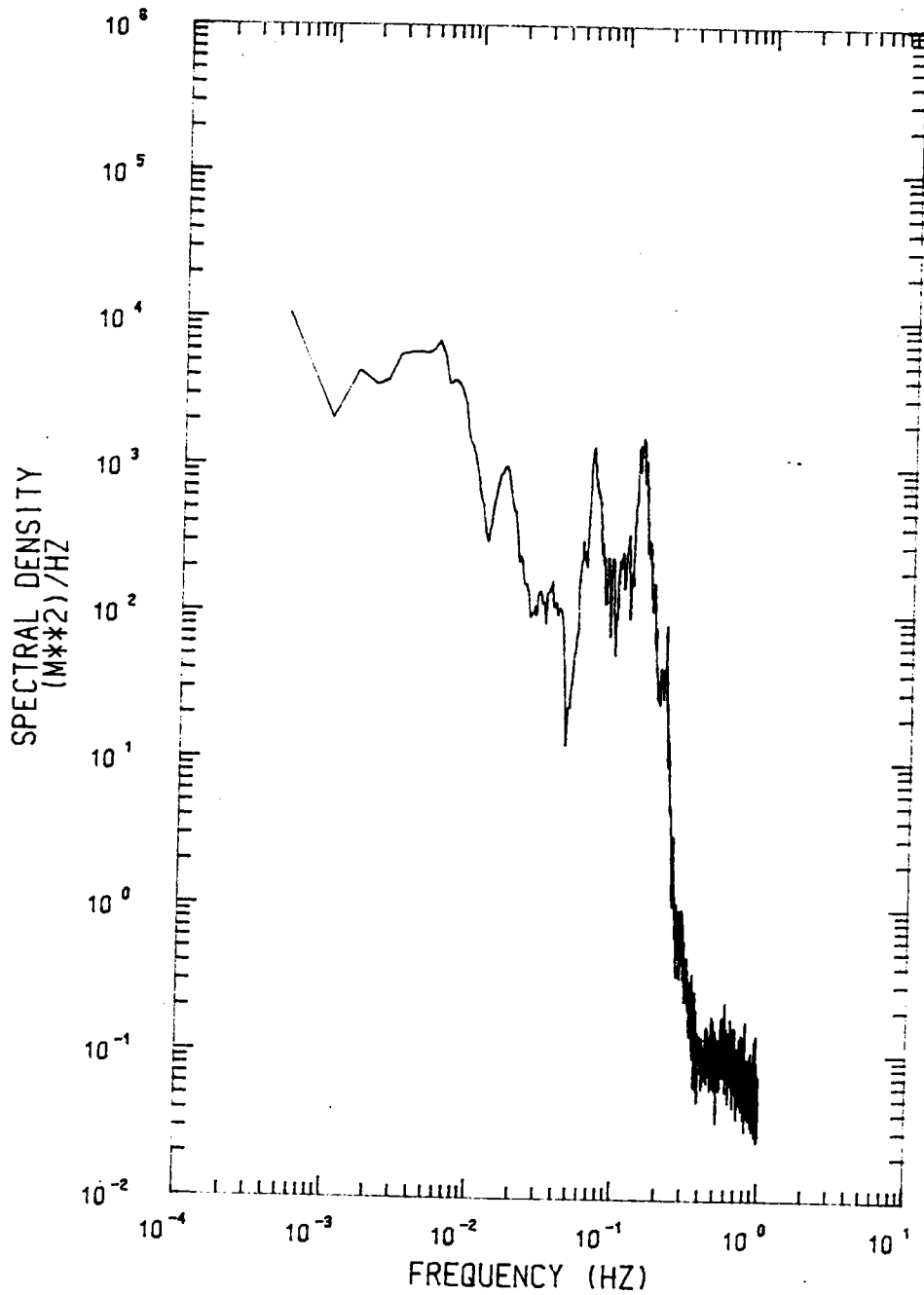


圖 (5-3-1) 實測波譜 (FFT 4096, 1988/10/05/19:10-20:00)

S0-AU0 WAVE 1988/10/05/20:10-21:00(4096)

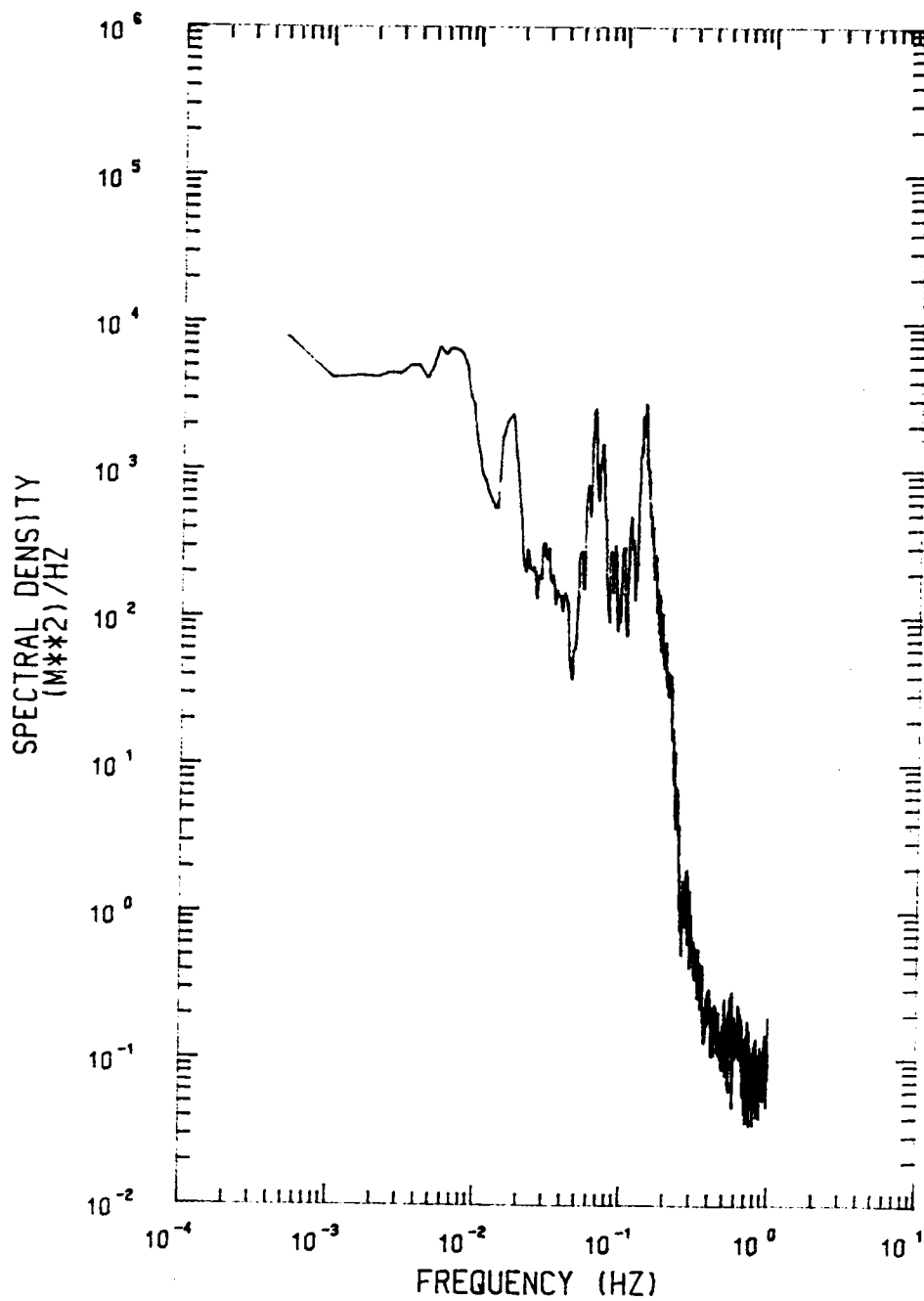


圖 (5-3-2) 實測波譜 (FFT 4096, 1988/10/05/20:10-21:00)

S0-AU0 WAVE 1988/10/05/21:10-22:00(4096)

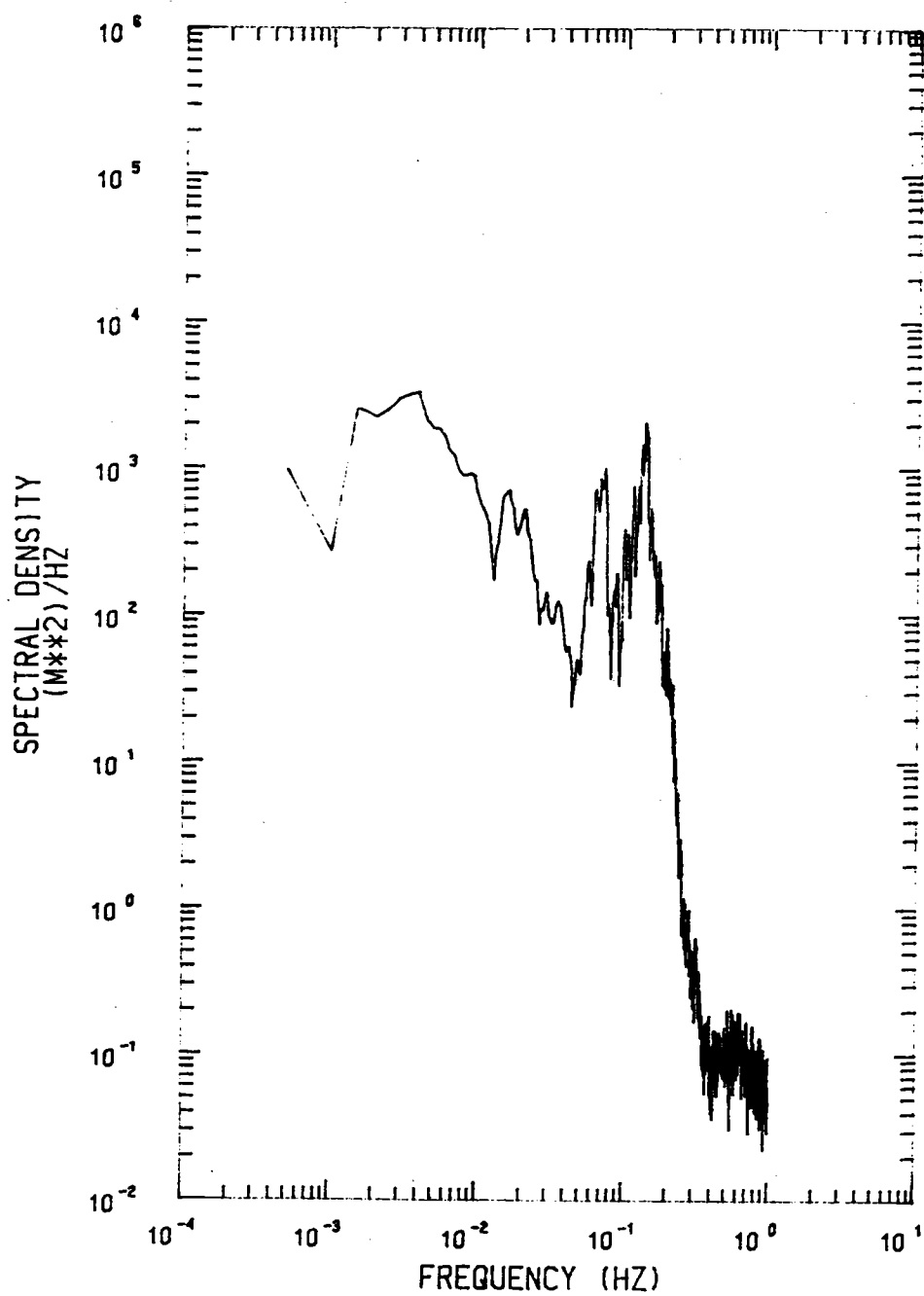


圖 (5-3-3) 實測波譜 (FFT 4096, 1988/10/05/21:10-22:00)

陸. 參考文獻

1. 王 宵、陳慶生 (1985) CBK 區海域海象調查報告 (73年7月至74年3月)。國立台灣大學海洋研究所專刊第 46 號。
2. 王 宵、陳慶生、吳 基、陳俊賢 (1986) CBK 區海域海象調查報告 (74年4月至12月)。國立台灣大學海洋研究所專刊第 48 號
3. 王 宵、陳慶生、陳俊賢、黃耀瑩 (1987) 長康海域海象觀測及預報系統之研究。國立台灣大學海洋研究所專刊第 53 號。
4. 王慶福、梁乃匡 (1985) 雲嘉沿海沙洲海埔地及新港開發之初步可行性研究。中國土木水利工程學會74年年會論文專集。
5. 湯麟武 (1986) 波浪學綱要。
6. 歐陽餘慶、梁乃匡 (1988) 台灣四周海氣象調查研究 (三), 港灣技術研究所 77 研 (三)。
7. Longuet-Higgins M.S., Stewart R.W. (1964), Radiation Stresses in Water Waves; A Physical Discussion, With Applications, Deep-Sea Research, Vol.11, pp.529 ~ 562。