



國立中山大學海洋生物科技暨資源研究所
碩士論文

指導教授：曾若玄 博士

利用 Lowered ADCP 觀測蘭嶼附近的黑潮流場
**Observations of Kuroshio flows near Lanyu by using
Lowered ADCP**

研究生：楊財銘 撰

中華民國九十七年一月

謝誌

在這段日子裡，首先感謝我的指導教授曾若玄老師，謝謝老師一路以來的指導。感謝中山大學海工系李忠潘老師、海軍官校楊穎堅老師、中山大學海下物所陳冠宇老師在口試時給予指正。感謝教育部五年五百億經費支持本校黑潮圈計畫，讓我們實驗室能夠添置儀器並完成觀測作業。感謝海研三號林嘉向學長，在我出海觀測時對我的協助。特別感謝張育嘉學長，不論是學業或生活上，當我面臨問題時，你總是用你獨特的方式帶我走出困境，謝謝你。也很感謝學長沈勇廷、陳育村、劉俊志，學姊石蓮滿，同學傅科憲、吳君豪、吳瑞中、張鈞翔、徐堂家、林育如和學弟邵煥傑、廖允強、張永昇、梁家睿出海觀測時的協助幫忙。

最後感謝我的家人，你們是我最大的支柱。還有一直陪伴我的朋友們。謝謝大家……



摘要

近十年來下放式聲學都卜勒海流剖面儀(Lowered ADCP, 簡稱 LADCP)已經成為國際海洋學界上觀測整層海流剖面分佈的一項重要儀器，這套設備的基本操作原理便是將一個或兩個自記式 ADCP 連同 CTD 溫鹽深儀一起在水文探測作業時下放到海中，藉由適當的資料處理程序便可以取得整層海流的垂直分佈。本研究分別於 2007 年 4 月 21~25 日，7 月 7~10 日以及 10 月 11~13 日利用國內第一套的 LADCP 設備完成了蘭嶼海域黑潮三個航次的探測，收集了多個測站的海流資料。研究結果顯示，黑潮有一支主軸是存在於台灣與蘭嶼之間，其強度與位置隨著季節而變化，上層海流往北的最大流速有 70~140 cm/s，10 月的流速較強(最大~140 cm/s)，並可從海面延伸到約 400 m 的深度；7 月的流速次之(最大~100 cm/s)，可延伸到海面下 600 m 的深度；4 月的流速較弱(最大~90 cm/s)，可延伸到海面下 400 m 的深度。靠近台灣東南側沿岸的海流中層(水深約介於 200 m 到 800 m 之間)有一股朝南的反流，流速在 30 到 60 cm/s 之間，觀測到的這股反流以 4 月最大(~60 cm/s)，7 月次之(~40 cm/s)，10 月較小(~30 cm/s)。

4 月航次在蘭嶼東邊的海域發現一個海表面高度較低、逆時針方向旋轉的冷渦。另外，7 月航次的觀測結果顯示，黑潮流向會受到當

地潮汐的影響，退潮時向西北流，漲潮時向東北流。根據溫鹽資料的分析結果，在蘭嶼附近的海域，越接近夏季，南海水入侵黑潮流域的趨勢越為顯著。

Abstract

In the last decade the lowered Acoustic Doppler Current Profiler (LADCP) has become an important instrument in measuring full-water-depth profile of velocity in the open ocean. The basic principle of the LADCP is to lower one or two self-contained ADCP, one looking downward and the other looking upward, together with the CTD rosette during the hydrographic cast. After careful analysis of the ADCP data it is possible to retrieve surface –to-bottom profile of horizontal current velocity. In the present study we have conducted three cruises (21-25 April, 7-10 July and 11-13 October of 2007) in the Lanyu area to survey the Kuroshio flow structure by using the first set of LADCP in Taiwan. A total of 34 LADCP/CTD casts were completed. The results indicate that a major branch of the Kuroshio is located at the region between Taiwan and Lanyu, with a seasonal variation of flow intensity and vertical extent. Surface currents can reach a maximum speed of 70-140 cm/s northward. Kuroshio has a strongest speed (~140 cm/s) in October followed by July (~100 cm/s) and April (~90 cm/s). The vertical extent of the Kuroshio can extend to 400-m depth in October, 600-m depth in July and 400-m depth in April. A southward reverse current can be observed off the southeast Taiwan coast in depths between 200 and 800 m and the speed ranges between 30 and 60 cm/s. This southward flow is strongest in April (~60 cm/s), followed by July (~40 cm/s) and October (~30 cm/s). A cyclonic, cold eddy was observed in the eastern side of Lanyu from the shipboard ADCP data during the April cruise. The Kuroshio flows to the northwest during ebbs and to the northeast during floods from the LADCP

observations at different tidal phases in July. Finally, analysis of the temperature-salinity characteristics of the CTD data reveals that the South China Sea waters can penetrate into and mix with the Kuroshio waters more significantly in summertime than in other season.

目錄

章次	頁次
中文摘要	III
英文摘要	V
目錄	VII
圖目錄	IX
表目錄	XI
一、 前言	1
二、 研究區域	5
2.1 地理位置及海底地形.....	5
2.2 基本潮位分析.....	6
2.3 風場.....	7
三、 實驗設計與資料來源	8
3.1 LADCP 基本操作與施放情形.....	9
3.2 Sb-ADCP.....	12
3.3 CTD 水文資料.....	13
四、 資料分析.....	14
4.1 LADCP 資料分析的兩種方法.....	14

4.1.1 剪切法(Shear method).....	14
4.1.2 逆推法(Inverse method).....	16
4.2 LADCP 資料處理過程.....	18
4.3 LADCP 數據後期處理的困難處.....	18
五、 結果與討論	20
5.1 LADCP 與 Sb-ADCP 的流速比較.....	20
5.2 資料品質.....	21
5.3 流場的季節性變化.....	22
5.4 台灣東南沿岸的反流與蘭嶼東邊的冷渦.....	25
5.5 潮汐的影響.....	27
5.6 南海水與黑潮水的混合.....	28
六、 結論與建議	30
七、 參考文獻	32

圖目錄

圖 1.研究區域的地理位置及等深線圖.....	34
圖 2.蘭嶼海氣象測站的潮序圖。(a)是 2007 年 4 月的潮位變化； (b)是 7 月的潮位變化.....	35
圖 3.蘭嶼氣象站的風向與風速大小。(a)的時間是 2007 年 4 月 20~26 日；(b)是 7 月 6~11 日；(c)是 10 月 10~14 日。.....	36
圖 4.下放式聲學都卜勒海流剖面儀(LADCP)與溫鹽深儀(CTD)鐵組。.....	37
圖 5. 2007 年 4 月 CR1217 航次的 Sb-ADCP 測線及 LADCP/CTD 測站位置。箭頭實線 表示 Sb-ADCP 測線，圓點表示 LADCP/CTD 測站位置。.....	38
圖 6. 2007 年 4 月 CR1217 航次的 Sb-ADCP 測線及 LADCP/CTD 測站位置。箭頭實線 表示 Sb-ADCP 測線，圓點表示 LADCP/CTD 測站位置。.....	39
圖 7. 2007 年 10 月 CR1250 航次的 Sb-ADCP 測線及 LADCP/CTD 測站位置。箭頭實 線表示 Sb-ADCP 測線，圓點表示 LADCP/CTD 測站位置。.....	40
圖 8. 2007 年 10 月 CR1250 航次的 Sb-ADCP 測線及 LADCP/CTD 測站位置。箭頭實 線表示 Sb-ADCP 測線，圓點表示 LADCP/CTD 測站位置。.....	41
圖 9.測站 T1 與 K1 的 LADCP 儀器之(a)下放與上收速度 W (m/s)，用顏色來表示 W 大小；(b)是在水面下的位置；(c)代表傾斜角大小。.....	42
圖 10.四月航次蘭嶼西邊四個測站的流速剖面圖，(a)是 K1 測站，(b)是 K2 測站，(c)是 T1 測站，(d)是 T2 測站。紅色實線代表 LADCP 的 U 、綠色 實線代表 LADCP 的 V ，黑色虛線為 Sb-ADCP 的 U ，藍色虛線為 Sb-ADCP 的 V 。	43
圖 11.七月航次蘭嶼西邊六個測站的流速剖面圖，(a)是 T1 測站 cast 1，(b) 是 T1 測站 cast 2，(c)是 T2P 測站 cast 1，(d)是 T2P 測站 cast 2，(e) 是 T2 測站 cast 1，(f)是 T2 測站 cast 2。.....	44
圖 12.十月航次蘭嶼西邊第一次觀測 5 個測站的流速剖面圖，(a)是 S1 測站 cast 1，(b)是 S3 測站 cast 1，(c)是 S4 測站 cast 1，(d)是 S5 測站 cast 1，(e)是 S6 測站 cast 1。.....	45
圖 13.十月航次蘭嶼西邊第二次觀測 6 個測站的流速剖面圖，(a)是 S1 測站 cast 2，(b)是 S2 測站 cast 2，(c)是 S3 測站 cast 2，(d)是 S4 測站 cast 2， (e)是 S5 測站 cast 2，(f)是 S6 測站 cast 2。.....	46
圖 14.十月航次蘭嶼西邊第三次觀測 4 個測站的流速剖面圖，(a)是 S1 測站 cast 3，(b)是 S2 測站 cast 3，(c)是 S3 測站 cast 3，(d)是 S1 測站 cast 3.....	47
圖 15.四月航次蘭嶼東邊四個測站的流速剖面圖，(a)是 K3 測站，(b)是 K4 測站，(c)是 T3 測站，(d)是 T4 測站。.....	48
圖 16.七月航次蘭嶼東邊兩個測站的流速剖面圖，(a)是 T3 測站 cast 1，(b)	

是 T4 測站 cast 1，(c)是 T3 測站 cast 2，(d)是 T4 測站 cast 2。...	49
圖 17. 研究區域內有發現到反流的測站流剖圖。(a)是 4 月航次 K1 站，(b)是 4 月航次 K1 站，(c)是 7 月航次 T1 站 cast 1，(d)是 7 月航次 T1 站 cast 2，(e)是 10 月航次 S1 站 cast 1，(f)是 10 月航次 S1 站 cast 2。黑色實線代表流速為 0 的地方。.....	50
圖 18. 4 月航次 Sb-ADCP 的流矢圖。資料取的是第一個 bin 的 Long time Average(每 10 分鐘一筆 data)的海流，bin 的範圍約在水深 12m~20m 的地方(每個 bin 設為 8 公尺)，箭頭代表流速大小與流向。.....	51
圖 19. 4 月航次 Sb-ADCP 的流矢圖，由上至下依序為 12~20m、44~52m、92~100m、140~148m 的深度。.....	52
圖 20. 2007 年 4 月 21~25 日的海表面高度距平值 SSH 圖。由上到下依序為 21 至 25 日，左邊尺度較小，右邊尺度較大。.....	53
圖 21. (a)代表 7 月航次 T2P 測站第一次觀測的流剖圖，(b)代表 T2P 測站第二次觀測的流剖圖，(c)是蘭嶼 2007 年 7/7~7/11 日的潮序圖。.....	54
圖 22. 7 月航次第一次觀測的流剖圖(沿著緯度線 21.92°；經度介於 121°~122° 之間)，(a)代表東西向流速 U，(b)代表南北向流速 V。.....	55
圖 23. 7 月航次第二次觀測的流剖圖(沿著緯度線 21.92°；經度介於 121°~122° 之間)，(a)代表東西向流速 U，(b)代表南北向流速 V。.....	56
圖 24. 7 月航次 Sb-ADCP 的流矢圖，(a)代表第一次觀測時，T1 站到 T4 站，(b)代表第一次觀測時，T4 站返回 T1 站，(c)代表第二次觀測時，T1 站到 T4 站，(d)代表 T4 站由右至左返回高雄港。.....	57
圖 25. 4 月航次的溫鹽圖，紅色線代表南海水，黑色線代表黑潮水，而測站的水文特性用藍色線來表示。上方的圖為蘭嶼北方的 K 測線，由左至右依序為 K1~K4 測站；下方的圖為蘭嶼南方的 T 測線，由左至右依序為 T1~T4 測站。.....	58
圖 26. 7 月航次兩次觀測的溫鹽圖，(a)、(b)代表 T1 站的兩次觀測，(c)、(d)代表 T2P 站的兩次觀測，(e)、(f)代表 T2 站的兩次觀測。.....	59
圖 27. 7 月航次兩次觀測的溫鹽圖，(a)、(b)代表 T3 站的兩次觀測，(c)、(d)代表 T4 站的兩次觀測。.....	60
圖 28. 4 月航次 T2、T3 站與 7 月航次 T2、T3 站第一次觀測的溫鹽圖，紅色線代表南海水，黑色線代表黑潮水，而測站的水文特性用藍色線來表示。.....	61
圖 29. 10 月航次第一次觀測的溫鹽圖，(a)~(f)依序代表 S1~S6 測站。.....	62
圖 30. 10 月航次第二次觀測的溫鹽圖，(a)~(f)依序代表 S1~S6 測站。.....	63
圖 31. 10 月航次第三次觀測的溫鹽圖，(a)~(d)依序代表 S1~S4 測站。.....	64

表目錄

表 1. 蘭嶼 2007 年 4 月~8 月潮位調和分析結果.....	7
表 2. 三個航次各測線及測站的詳細經緯度資料.....	11

一、前言

太平洋的北赤道流，為全球主要的洋流之一，向西流經呂宋島時分為南北兩支，南支為民答那峨海流(Mindanao Current)，北支即是台灣東緣的黑潮(Kuroshio)，黑潮流至琉球與日本海域時，日人稱之為黑潮。

黑潮又名為台灣海流(Taiwan Current)，是北太平洋很強的西方邊界流，在呂宋海峽和台灣東側的寬度約有 140 km，具有高溫、高鹽、高流速、高傳輸量等特性。最大流速每秒介於 1 ~ 1.5 公尺，而流通量約有 28 到 43 Sv (Nitani, 1972)。而劉等(1998)在 1990 年 10 月至 1995 年 5 月間，沿著宜蘭海脊調查台灣海流(黑潮)的水文，量測其流速結構與流量，此項調查屬於世界海洋環流實驗(WOCE)的一部份，發現以地轉流速推算台灣海流流量為 18.7 Sv 至 44.2 Sv 之間，在 600 公里下游的琉球附近，黑潮流量在 0 至 46.8 Sv 之間。在台灣和與那國島之間，黑潮的流軸多半靠台灣這邊，在上層 350 m 的流量是 19.7 Sv，若利用地轉流切推算 350 m 以下的流速，可得總流量約 22.6 Sv，它與琉球西方的黑潮 10 年平均流量 25.5 Sv 相當。由於黑潮攜帶大量的水、熱量及鹽類，經台灣東岸向北傳輸，對西北太平洋區的循環有莫大的影響。

在台灣和呂宋之間，沿著黑潮流徑有座海底山脊。在蘭嶼(21°55' N, 122°33' E)附近的黑潮流速結構受到此地形很大的影響。在山脊東邊的斜坡上常可發現一股反流，其寬度可達 50 km。自 1985 年以來，使用溫鹽深儀(CTD)的重覆調查顯示，海底山脊東坡上的海流以南向次數居多。山脊鞍部的表層流為東北向或西北向的地衡流，但是其底層流則為壓力與摩擦力平衡的穩定西向流，將西菲律賓海的中層水及底層水經巴士海峽輸送到南海(劉等, 1995)。

Liang et al. (2003)利用 1991~2000 年的 Sb-ADCP 流速資料分析台灣週邊海域上層流速(<300 m)，文中提出黑潮流經台灣東南方時會產生兩個支流，其中一個支流則沿著台灣東邊往北流，另一個支流流進南海。在台灣東邊黑潮的寬度約 100 km，其最大流速約 100 cm/s。在每年東北季風盛行期間，黑潮主軸會比較貼近台灣東岸，部分黑潮支流會從呂宋海峽進入南海北部，並沿著大陸棚邊緣進入台灣海峽南部。而夏季西南季風盛行期間，上述黑潮入侵南海的現象則不存在，取而代之的則是南海水經由呂宋海峽流入台灣東岸，與黑潮水混合，使得黑潮主軸向東偏移。另外，Centurioni et al. (2004)指出表層浮標只有在十月至一月期間會從菲律賓海穿越呂宋海峽到達南海的內部，平均速度為 70 ± 40 cm/s，最大每日向西速度超過 165 cm/s，其他季節浮標會隨著黑潮以套流的流動方式穿越呂宋海峽，然後沿著

台灣的西南海岸退出呂宋海峽。Hwang et al. (1996)利用 TOPEX/POSEIDON (T/P)高度計資料研究黑潮流速隨著季節的變化，研究結果指出黑潮行徑軌跡、最大速度、斜壓流量及寬度的平均變化量分別為 22 km、19 cm、8 Sv 及 27 km。

上述有關黑潮的結論是前人利用衛星高度計資料(Hwang et al . 1996)與漂流浮球資料(Centurioni et al. 2004)，以及錨碇式和船碇式 ADCP 資料(Liang et al . 2003)，分析得到的成果。但這些資料不可避免地都具有一些先天性的限制。例如，漂流浮球、錨碇式和船碇式 ADCP 資料和衛星高度計資料都侷限在海洋表面附近，無法獲得中下層海流的資訊。

近十年來下放式聲學都卜勒海流剖面儀(Lowered ADCP，簡稱 LADCP)已經成為國際海洋學界上觀測深海整層海流剖面分佈的一項重要儀器，所謂 Lowered ADCP 就是將一個(向下)或兩個(向上及向下)自記式的 ADCP 與 CTD 採水裝置固定在一起，整體一起下放到深海中。LADCP 可以彌補傳統的船碇式 ADCP(shipboard ADCP)有限測量範圍(約 150 m 到 500 m 不等)的缺點，可用於大洋的測流研究。第一次 LADCP 的測試下放是在 1989 年由 Firing and Gordon(1990) 在夏威夷附近完成，他們指出所收集到的海流資訊是可用的，但是系統誤差或許有些過大，誤差約 10 cm/s。不久之後，Fischer and Visbeck(1993)

利用一套相似的系統在赤道大西洋進行觀測，他們同時以另一個獨立的測流系統 Pegasus 來仔細評估 LADCP 的表現，結論是經過小心的處理過程，LADCP 可以得到相當準確可信的海流剖面分布。近年來 LADCP 已經廣泛地應用在世界海洋環流實驗(WOCE)和氣候變遷(CLIVAR)等大型的研究計畫上面，並且成功地收集到許多有用的海洋整層流速資料。

台灣在 LADCP 方面的應用仍在起步階段，中山大學在 2006 年底購置兩組 LADCP，並於 2007 年初利用海研三號開始測試，本研究分別於 2007 年 4 月 21 日至 25 日、7 月 7 日至 10 日以及 10 月 11 日至 13 日，利用海研三號分三季完成了蘭嶼海域黑潮三個航次共 12 天的探測，收集了多個測站的海流及水文資料。本文便是參考前人研究黑潮流域的歷史資料(第一章、第二章)，藉由分析處理海研三號 3 個探測航次收集到海流、水文資料(第三章、第四章)，獲得蘭嶼附近黑潮流場的一些 LADCP 觀測結果(第五章、第六章)。

二、 研究區域

2.1 地理位置及海底地形

台灣深海地區的地形特徵在台灣南部海域為南北走向的海脊(如恆春海脊、呂宋島弧)和海槽(如馬尼拉海溝、北呂宋海槽)；在台灣東部海域則呈現東西走向的地貌，如沖繩海槽、琉球島弧、一系列的弧前盆地(南澳海盆與東南澳海盆)、耶雅瑪海脊、琉球海溝等。

台灣東部海域水深最深處將近 7000 公尺，東南外海與蘭嶼、綠島之間有一系列南北向的海槽與海脊，南縱海槽可視為陸上台東縱谷的南沿，花東海脊可視為台灣東部海岸山脈的南沿，台東海槽可視為北呂宋海槽的北沿。整個台灣東部與南部海域的地形，可說是受到菲律賓海板塊與歐亞大陸板塊相互隱沒以及呂宋島弧碰撞上歐亞大陸所造成的。在台灣東北部海域的沖繩海槽屬弧後海盆，在地形上顯現了海底火山及深切東海大陸棚坡上延伸至沖繩海槽的海底峽谷，如棉花峽谷、北棉花峽谷等。本文之研究區域是位於台灣東南側，蘭嶼附近的黑潮流場，最接近台灣的測站(K1, 圖 1)距離台東約有 15 海哩，最遠的測站(T4, 圖 1)距離台灣約有 75 海哩，兩條測線長約為 60 海哩。

黑潮在離開呂宋島後，一部份水流將偏向西北穿越巴林塘海峽後進入呂宋海峽，這一部份水流是與南海發生作用的黑潮海水來源。冬

季時，穿越巴林塘海峽的黑潮分支將進入南海東北部；但夏季時這股水流將被由南海中部沿呂宋西側北上的海流阻擋而無法進入南海，只有偏轉沿海脊地形流向北北東方；另一方面，此時南海東北部的上層海水尚可由台灣南端向東流出南海，而呂宋東北角外海另一部份未轉向西北的黑潮源區海水則繼續沿巴坦群島至蘭嶼的南北向海底地形線往北流。這幾股不同的水流最後均流至台灣東南外海，因此會造成台灣東外海東西向斷面上海流流速分佈呈現多重核心的構造。(參考自王胃教授所編寫之物理海洋學教材)。

2.2 基本潮位分析

各分潮振幅根據一般的潮汐分類(Pond and Pickard, 1983)，以主要全日潮與半日潮的振幅比例來劃分潮汐類型(form ratio)，其中 $F = (K_1 \text{ 分潮振幅} + O_1 \text{ 分潮振幅}) / (M_2 \text{ 分潮振幅} + S_2 \text{ 分潮振幅})$ ，當 F 介於 0 到 0.25 之間，稱之為半日潮型；當 F 介於 0.25 到 1.5 之間，此潮汐是以半日潮為主的混合潮型；當 F 介於 1.5 到 3.0 之間，此潮汐是以全日潮為主的混合潮型；當 F 大於 3.0 時，則為全日潮型。本研究自中央氣象局購買了蘭嶼的海氣象測站潮位紀錄，時間涵蓋了 2007 年 4 月~8 月期間，經過調和分析結果顯示： M_2 分潮的振幅最大 (~40 cm)，其餘的 K_1 、 O_1 和 S_2 的振幅均相去不遠 (~15 cm)，計算所得

的 form ratio 為 0.5367，再觀察其間的潮序圖(圖 2)，可見蘭嶼的潮型為以半日潮為主的混合潮型(表 1、圖 2)。

由於蘭嶼的潮位測站在 2007 年 9 月 5 日~11 月 15 日期間更換觀測儀器，故此段期間無實測紀錄。

表 1. 蘭嶼 2007 年 4 月~8 月潮位調和分析結果

tidal amplitude and phase with 95% CI estimates			
tide	period(hr)	amp(mm)	pha(deg)
K ₁	23.93	154.8694	97.72
M ₂	12.42	395.6098	226.18
O ₁	25.82	148.3686	41.91
S ₂	12.00	169.4298	250.54

Form ratio = 0.5367

2.3 風場

根據中央氣象局於蘭嶼測站的風速、風向觀測紀錄顯示，在本實驗研究期間:四月航次(4 月 21~25 日)風向為西南和東北方向參雜的型態，主要為西南風向；七月航次(7 月 7~10 日)風向主要集中於西南方向，是夏季西南季風型態；十月航次(10 月 11~13 日)風向主要集中於東北方向，是典型冬季東北季風型態。而風速大小以十月最強，約為 6~10 m/s，四月和七月較小，約為 5 m/s(圖 3)。

三、 實驗設計及資料來源

本研究於 2007 年 4 月 21 日至 25 日(共 5 日)、7 月 7 日至 10 日(共 4 日)以及 10 月 11 日至 13 日(共 3 日)的時間，利用中山大學海洋研究船海研三號，使用下放式聲學都卜勒海流剖面儀(Lowered ADCP, 以下簡稱 LADCP)、船碇式 ADCP(shipboard ADCP, 以下簡稱 Sb-ADCP)及溫鹽深儀(Conductivity, Temperature, Depth Recorder, 以下簡稱 CTD)於台灣東南側蘭嶼附近的海域完成了三個航次共計 12 天的黑潮流場及水文觀測。

另外由 Archiving Validation and Interpretation of Satellite data in Oceanography (AVISO)取得蘭嶼附近的海表面高度距平值(Sea Level Anomalies, SLA)資料，再加上一個全球平均的海表面高度值而得到海表面高度絕對值(以下簡稱為 SSH)。從 2007 年 4 月到 7 月，共計 3 個月的海表面高度資料。由中央氣象局蘭嶼的海氣象測站取得潮位資料從 2007 年 4 月到 7 月，共計 4 個月的潮位資料；蘭嶼的風速、風向測站取得風速資料從 2007 年 4 月到 10 月，共計 7 個月的風速資料。

3.1 LADCP 基本操作與施放情形

本研究 LADCP 裝置是使用兩台 ADCP(RDI, 6000 m housing, 300 kHz, 64 MB 記憶卡)分別為朝上與朝下發射音波，兩台 ADCP 以一條 star cable 連線，設定為同步發射音波，以避免互相干擾，兩台 ADCP 與一台 Seabird CTD 9 一起固定在自製的不鏽鋼架上，鋼架兩端並添加鉛塊以保持水平狀態(圖 4)。LADCP 設定為每秒 ping 一次，bin size 為 10 m，一共設定 20 個 bin，施放過程中，下放與上收速度盡可能不要超過 1 m/s，如果測站有做到 Bottom，則在離海底 80~100m 的深度停留 5 分鐘，以取得 Bottom track 的資料；如無法做到 Bottom，一樣在下放至最深處的地方停 2~5 分鐘再上收。作 LADCP 觀測時，要隨時注意 CTD 纜線與研究船的相對位置，如果 CTD 纜線太歪斜的話，則須馬上調整船身的位置，讓儀器的傾斜程度不致於太大。

除了之前的 LADCP 測試航次(分別於 2007 年 1 月與 3 月在高雄西南外海水深 700~800 m 的海域各做了一天、3 個 cast 的測試)，4 月航次是我們實驗室的 LADCP 第一次施放於大洋的觀測研究，於 2007 年 4 月 21~25 日在研究區域水深超過 1000 m 的海域完成了兩條測線 8 個測站的資料搜集(圖 5)。當時蘭嶼附近的海域主要是吹西南風，海況良好(3~5 級)，下放與上收速度控制在 0.8~1.0 m/s 之間。測線的規劃是從蘭嶼北邊的 K 測線(緯度 22.17°)由西往東做四個測站的

觀測，接著到蘭嶼南邊的 T 測線(緯度 21.92°)由東往西也是做四個測站的觀測。本航次除了做 LADCP/CTD 探測之外，也有其他的實驗室做了各深度的採水作業，以進行海水化學和葉綠素含量的分析，因此航程費時較長。

第二個航次於 2007 年 7 月 7~10 日於蘭嶼南邊的 T 測線進行(圖 6)，當時蘭嶼附近的海域也是吹西南風，是典型西南季風型態，風浪也不是很強(3~5 級)，下放與上收速度控制在 0.8~1.0 m/s 之間。測線的規劃是沿著 T 測線重複做兩次觀測，一條測線 5 個測站，總共有 10 個 cast。兩次觀測的間隔為 18 小時 37 分鐘，也就是落在 M_2 分潮(週期為 12 小時 25 分鐘)的相反相位上，兩次觀測的海流相加後平均可以濾掉潮汐，得到研究區域的淨流。相位平均法是利用控制時間差來濾除潮流，以 2 phase 平均法(Jan and Chao, 2003)為例，將觀測時間的間隔控制在 $1/2$ 的潮流週期，將兩次的觀測資料平均，理論上可將半日潮流的分量移除，但無法移除全日潮流。

第三個航次於 2007 年 10 月 11~13 日於台灣和蘭嶼之間的 S 測線(緯度 22.03°)進行，S 測線上共有六個測站(圖 7)，當時蘭嶼附近的海域已進入盛行東北季風型態，風浪較強，瞬時風速達到 6~7 級，原先的規劃是沿著 S 測線重複做三次觀測，相鄰兩次觀測間隔為 16 小時，再以三相平均的方式濾除潮流(Chang et al., 2008)，但由於風

浪過強與返航時間限制的因素，第三次測線只測得四站(S1~S4)的資料，所以總共有 16 個 cast 的資料。下放與上收速度由於風浪較大和檢討前兩航次如何改善資料品質的緣故，降低速度控制在 0.6~0.8 m/s 之間。在前兩個航次當中，在做 LADCP 作業時船身並沒有移動，由於黑潮流速甚強，因此 CTD 的纜線傾斜角度很大，導致 LADCP 的資料品質受到影響，本航次則針對此問題加以改善，在作業當中請駕駛台調整船隻位置，使 CTD 纜線儘量保持垂直狀態，因此 LADCP 的資料品質有很大的改善，第五章中將會進一步討論。三個航次各測線及測站的詳細經緯度資料如表 2。

表 2. 三個航次各測線及測站的詳細經緯度資料

CR1217 航次						
2007.04.21 ~ 25						
測站	開始時間	經度 (E)	緯度 (N)	水深(m)	下放深度(m)	BT*
K1	4/22 05:39	121° 00'	22° 10'	1238	1098	yes
K2	4/22 12:44	121° 24'	22° 10'	1957	1500	no
K3	4/23 17:08	121° 47'	22° 10'	> 3000	1500	no
K4	4/23 20:14	122° 00'	22° 10'	> 3000	1500	no
T1	4/25 04:11	121° 00'	21° 55'	1100	1000	yes
T2	4/24 15:05	121° 24'	21° 55'	2760	1500	no
T3	4/24 11:21	121° 47'	21° 55'	> 3000	1500	no
T4	4/23 22:48	122° 00'	21° 55'	> 3000	1500	no
CR1234 航次						
2007.07.07 ~ 10						
測站	開始時間	經度(E)	緯度(N)	水深(m)	下放深度(m)	BT
T1	7/07 18:25	121° 00'	21°	1320	1240	yes
T2P	7/08 16:49	121° 16'	21° 55''	1861	600	no
T2	7/07 22:48	121° 24'	21° 55'	2840	1500	no

T3	7/08 02:33	121° 47'	21° 55'	>3000	1500	no
T4	7/08 05:36	122° 00'	21° 55'	>3000	1500	no
T1	7/08 14:06	121° 00'	21° 55'	1323	1240	yes
T2P	7/10 00:17	121° 16'	21° 55'	1920	600	no
T2	7/08 18:32	121° 24'	21° 55'	2873	1500	no
T3	7/08 22:16	121° 47'	21° 55'	>3000	1500	no
T4	7/09 01:10	122° 00'	21° 55'	>3000	1500	no
CR1250 航次						
2007.10.11 ~ 13						
測站	開始時間	經度(E)	緯度(N)	水深(m)	下放深度(m)	BT
S1	10/11 17:11	121° 00'	22° 02'	1265	1185	yes
S2	10/11 19:36	121° 04'	22° 02'	1290	1200	yes
S3	10/11 22:05	121° 08'	22° 02'	1293	1200	yes
S4	10/12 00:22	121° 14'	22° 02'	1320	1200	yes
S5	10/12 02:05	121° 20'	22° 02'	2350	2250	yes
S6	10/12 04:20	121° 26'	22° 02'	1918	1800	yes
S1	10/12 09:04	121° 00'	22° 02'	1265	1185	yes
S2	10/12 11:58	121° 04'	22° 02'	1290	1200	yes
S3	10/12 14:00	121° 08'	22° 02'	1293	1200	yes
S4	10/12 16:18	121° 14'	22° 02'	1320	1200	yes
S5	10/12 18:13	121° 20'	22° 02'	2350	2250	yes
S6	10/12 20:39	121° 26'	22° 02'	1918	1800	yes
S1	10/13 01:05	121° 00'	22° 02'	1265	1185	yes
S2	10/13 03:35	121° 04'	22° 02'	1290	1200	yes
S3	10/13 06:03	121° 08'	22° 02'	1293	1200	yes
S4	10/13 08:31	121° 14'	22° 02'	1320	1200	yes

工作內容：LADCP、Sb-ADCP、CTD。

*代表 Bottom Track

3.2 Sb-ADCP

除了 LADCP/CTD 探測之外，本研究也利用海研三號的 Sb-ADCP 資料分析表層海流(<200 m 深度)。此套 Sb-ADCP 為美國 RDI 公司製造

的，頻率為 150 kHz，每層長度(Bin length)設定為 8 公尺，水面下第一層的海流資料為 20.4 公尺深。資料紀錄為每 1 分鐘平均 (short-time average)和每 10 分鐘平均資料(Long-time average)，資料品質以 percent good 在 85%內的資料始予使用。4 月航次 Sb-ADCP 測線是從 K1 測站往東到 K4 測站，再往南到 T4 測站，最後由 T4 測站往西回到 T1 測站。7 月航次 Sb-ADCP 測線的規劃是沿著 T 測線來回跑兩次測線，測站由西向東依序為 T1、T2P、T2、T3、T4。10 月航次 Sb-ADCP 測線的規劃是沿著 S 測線來回跑三次測線，測站由西向東依序為 S1、S2、S3、S4、S5、S6。利用 Sb-ADCP 觀測時，控制船速及刪除船轉向時及條件不良時的資料是必要的，所以這三個航次我們盡量控制船速於測線上保持約 8 節左右，以維護資料品質。

3.3 CTD 水文資料

本實驗的水文觀測是利用 Seabird 公司製的溫鹽深儀(CTD)，型號為 SBE-9，於 4 月測得 8 站、7 月測得 10 站、10 月測得 16 站，共 34 站的水文資料。分析 CTD 水文原始資料，先經過一套標準工作的程序處理，將 1 秒 24 筆的原始資料平均成每間隔 1 公尺的水溫、鹽度及密度垂直分布，再分別繪製溫度、鹽度垂直剖面圖或溫鹽圖(T-S 圖)來觀測期水文特性。

四、資料分析

LADCP的資料處理過程並不是非常簡單，國際海洋界目前普遍使用的兩種方法來處理LADCP的海流資料，即剪切法(Shear method)和逆推法(Inverse method)，前者是根據Fischer and Visbeck(1993)的理論由美國夏威夷大學編寫成軟體，後者則是根據Visbeck(2002)的理論由美國哥倫比亞大學編寫成軟體，本研究是使用美國哥倫比亞大學LDEO (Lamont-Doherty Earth Observatory)發展出來的軟體來分析處理LADCP海流資料，版本使用2002年的第9版，它的分析架構是以bottom track和inverse method寫成Matlab程式，處理過程中加入GPS、CTD和Sb-ADCP的資料來限制海流範圍，進而得到海流剖面的絕對流速。以下便是將LADCP的這兩種資料處理方法加以簡要說明(郭等, 2006)。

4.1 LADCP 資料分析的兩種方法

4.1.1 剪切法(Shear method)

LADCP測得的速度是海水相對於儀器的速度，要想獲得海水的絕對流速，即海水相對於大地的速度，就必須確定一個參考流速。在儀器能夠底追蹤(Bottom tracking)的情況下，參考流速可以選取底追

踪速度，但在深水海域一般很難能夠Bottom tracking，因此另外便利用GPS訊息來計算海水的絕對流速。

海水的絕對流速 $U_{ocean} = U_{bc} + U_{ref}$ ，其中 U_{bc} 為相對流速剖面， U_{ref} 為參考流速，相對流速容易求得，即先在每一個ensemble內計算出上下兩層水平流速的垂向剪切，然後以海表至測量的最深處進行深度平均，這樣便得到整個流速剖面的剪切，從海底向海表進行垂向積分，得到相對流速剖面。

LADCP測得的海水流速可以表示為

$$U_{adcp} = U_{ocean} + U_{ctd} = U_{bc} + U_{ref} + U_{ctd} \quad (1)$$

其中 U_{ctd} 為儀器的運動速度，它是船的漂移速度 U_{ship} 和儀器在水中一個無規律運動 U_f 的合成，即 $U_{ctd} = U_{ship} + U_f$ 。在儀器的整個下放時間 T 內，無規律運動 U_f 的時間積分為零，即 $\int U_f(t)dt = 0$ 。因此對(1)式在時間 T 內積分，有

$$U_{ref} = \frac{1}{T} \left\{ \int U_{adcp}(t)dt - \int U_{bc}(t)dt - dX \right\} \quad (2)$$

其中， $dX = \int U_{ctd}dt = \int U_{ship}dt$ 為船在儀器入水點與出水點之間的距離，這可以由GPS資訊求得。可見，利用此方法可以很容易地積分LADCP測量的流速及相對流速，並且計算出船的漂移距離，最終確定參考流速，代入(1)式得到絕對流速剖面。

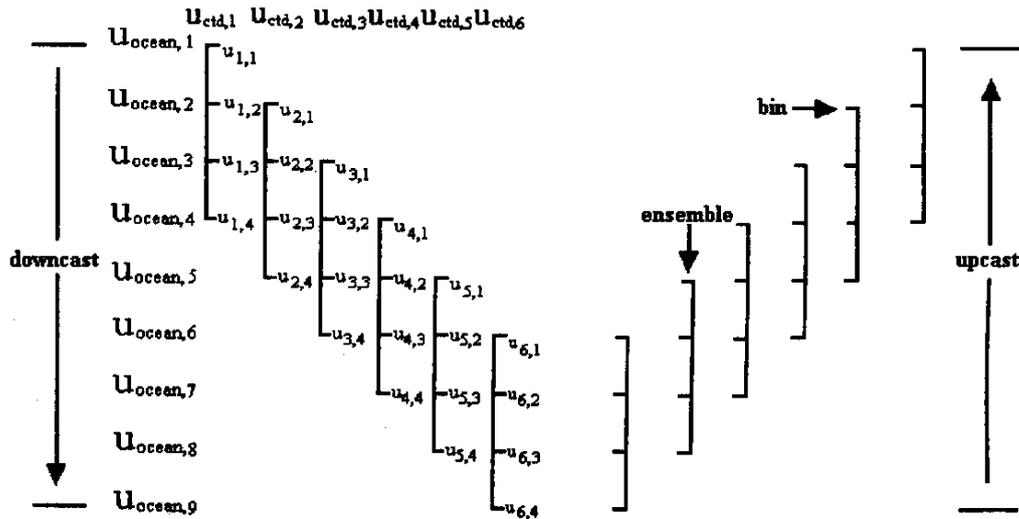


圖 A LADCP 測量海水流速的示意圖。其中左側部分為儀器的下行過程，右側部分為上行過程。

4.1.2 逆推法(Inverse method)

逆推法是基於矩陣運算的一種方法。4.1.1節中的式(1)

$U_{adcp} = U_{ocean} + U_{ctd}$ 可以寫成線性矩陣方程的形式：

$$d = Gm \quad (3)$$

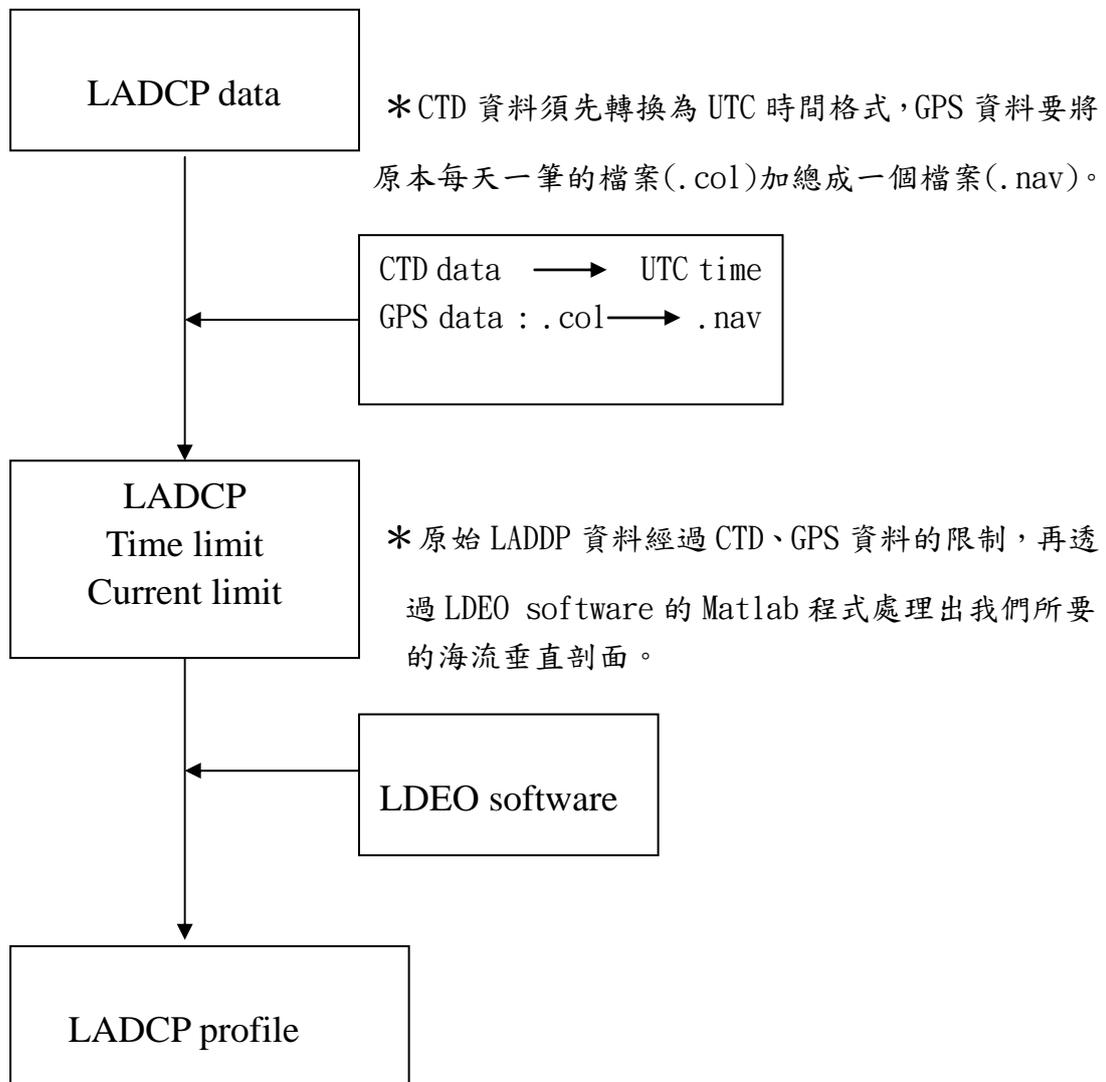
向量 d 表示LADCP在整個深度範圍內所有的觀測流速 U_{adcp} ，海水的絕對流速和儀器的運動速度置於向量 m 內，

即 $m = \begin{bmatrix} m_{ctd} \\ m_{ocean} \end{bmatrix}$ ， G 是一個模型矩陣。

圖A表示了一種簡單的情況，LADCP從海表至海底共有6個ensemble，即儀器具有6個速度，分別為 $u_{ctd,1} \sim u_{ctd,6}$ ，每個ensemble裏有4個bin，每個bin均對應著LADCP的一個觀測速度，分別為 $u_{1,1} \sim u_{6,4}$ ，

4.2 LADCP 資料處理過程

LDEO 軟件中處理 LADCP 資料的步驟大致可用以下這個流程圖來說明：



4.3 LADCP 數據後期處理的困難處

造成LADCP資料後期處理困難的原因主要有以下幾點:(1)有效資料不足。雖然有大量的流速信號被記錄，但是由於前面提及的大部分

參數未能控制在合理的範圍內，經過嚴格的品質控制後，有效的流速資料所剩無幾，從而不能成功地獲取絕對流速。如果品質控制太寬鬆或者不經過品質控制，得到的絕對流速誤差又太大，甚至達到10 m/s的量級，遠遠超出可以接受的誤差範圍。(2)回波信號太弱，只能記錄極少量的流速信號。尤其在大洋的深水處，由於生物體太少，水質太清，造成散射體極少，使得儀器發出的聲學信號不能有效地反射回來，從而只能記錄微量的流速信號，有時甚至任何流速信號都記錄不到。(3)參考速度的選取比較困難。LADCP測量的是海水相對於儀器的流速，要想獲得海水的絕對流速，必須選取一個參考流速。在LADCP實現Bottom tracking的情況下，可以選取Bottom tracking速度作為參考流速。但是在進行深水海域(>3000 m)調查時，很難實現LADCP的Bottom tracking，只能依據GPS的訊息來獲得參考流速。

五、結果與討論

5.1 LADCP 與 Sb-ADCP 的流速比較

處理 LADCP 海流資料，主要是做它的海流垂直剖面圖來觀測分析，有別於 Sb-ADCP 只能觀測到上層海流，LADCP 能觀測到更深層，甚至到海底的海流剖面。而用 Sb-ADCP 觀測到的海流剖面來輔助、驗證 LADCP 的觀測。

圖 8 為四月航次的 T1 測站流速垂直分佈，圖 a 為 LADCP 的觀測結果，誤差範圍介於 2.9~9.2 cm/s(誤差的極大值發生在表層與最底層)，圖 b 為 Sb-ADCP 的觀測結果，是以 10 分鐘平均的資料來畫圖，因此圖中包含了好幾條線，圖 c 則為兩者畫在一起的比較圖，水深 0~200m 的地方 LADCP 與 Sb-ADCP 的流速海流趨勢大致吻合，惟 Sb-ADCP 的流速變化較大於 LADCP 的流速變化。分析此站的海流垂直剖面變化可以發現：上層海流(0~200 m)的南北向海流 V 明顯受到黑潮影響向北，極值出現在水深 50 m 的地方，約為 80~90 cm/s(LADCP 觀測到的 V 最大值約為 80 cm/s；而 Sb-ADCP 的 V 最大值約為 90 cm/s)。上層東西向海流 U 的最大值也是出現在 50 m 附近，LADCP 的最大值約為 10 cm/s，Sb-ADCP 的最大值約為 20 cm/s，原本北流的趨勢在水深 180 m 以下的地方出現一股向南的反流(圖 8a)，往下可

以延伸到水深 800 m 的深度，這股向南反流極值出現在水深 250m 的地方，約有 60 cm/s。再往下至海底(水深約 1200 m)，就沒有較明顯的流場變化了。由此可知 LADCP 與 Sb-ADCP 在上層海流的測量結果大致相似，但是 Sb-ADCP 所量測到的海流最大值要比 LADCP 為大，最小值也要比 LADCP 為小，這也是合理的結果，因為 LADCP 所得到的流速是在整個下放和上收過程(長約 1~2 小時)的平均值，而實際上的海流是會有時間上的變化。

5.2 資料品質

LADCP 的資料品質主要是取決於 LADCP 施放至水面下時傾斜角的大小，在 LDEO 軟件中當傾斜角大於 22 度時，將無法獲得正確資料。傾斜角大小取決於很多因素，例如觀測時風浪、流場的強弱、下放與上收速度的大小、LADCP 裝置本身的穩定度設計等，所以施放過程中，控制 LADCP 裝置的傾斜角在 22 度以內是確保資料品質最關鍵的步驟。

以 4 月航次 T1 與 K1 測站為例，由 LDEO 軟件處理所得到的下放、上收速度、深度與傾斜角隨時間變化的圖來看(圖 9)，可以發現 T1 測站的傾斜角都在 22 度以內，資料品質就沒問題；而 K1 測站在上收過程中，有一段時間的傾斜角大於 22 度，那一段就沒資料了。所以做 LADCP 觀測時，如何有效的控制傾斜角在 22 度以內是資料品質非

常重要的一個關鍵。

就本研究的三個航次而言，傾斜角大於 22 度的情況都發生在上收過程中，探討其原因，可能是因為下放過程中有重力的影響，使得整個裝置較為穩定；而上收過程中，可能是因為裝置在最低點時本來就是歪斜的狀態，上收時再加上海流、風浪的影響，使得它的歪斜程度更大，造成整個裝置傾斜角超過 22 度。4 月航次的 8 個測站，在上收過程中有 3 個測站發生傾斜角大於 22 度的情形；7 月航次 10 個測站中，有 4 個測站發生這樣的情形；而經過檢討改進以後，10 月航次的 16 個測站，只有 2 個測站的傾斜角大於 22 度。

5.3 流場的季節性變化

台灣與蘭嶼之間的流場

四月航次以蘭嶼西邊的四個測站 K1、K2、T1、T2(圖 10)LADCP 觀測到的海流剖面來看，這四個測站的上層海流(0~200 m)明顯受到黑潮影響向北，向北的最大流速都約有 70~90 cm/s，出現在水深約 50~150 米的深度，以 K2 測站 LADCP 的 V 值最大，出現在 150 米的深度，約有 90 cm/s，此測站 Sb-ADCP 觀測到的海流達到 110 cm/s，出現在水深接近 200 m 的地方。最西邊靠近台灣的測站(K1 和 T1)在水深 200m 以下到 800 m 的地方有一股向南的反流；K2、T2 測站往北較

強的流大概可以延伸到水深 400 m 的地方，400 m 以下到超過 1000 m 的深海就沒有較明顯的流場變化了。

七月航次蘭嶼西邊的測站 T1、T2P、T2 分別做了兩次 LADCP 觀測，其海流垂直剖面圖顯示於圖 11，上層海流(0~200 m)明顯受到黑潮影響向北，向北的最大流速略大於 4 月的流速，約有 70~100 cm/s，極值出現在第二次觀測 T1 站水深 50 m 的地方，約有 100 cm/s，此測站 Sb-ADCP 觀測到的海流有到 120 cm/s，一樣是出現在水深 50 m 的地方。最大流速出現在上層(0~200 米)，下層流速較小(~20 cm/s)，但也可以延伸到超過 1000 m 深度，七月的黑潮較四月強。而靠近台灣的 T1 測站兩次觀測的結果在水深 200 m 以下都有發現到一股反流，向南的流速最大約 30~40 cm/s，第一次觀測的結果發現此反流可延伸到水深 800 m 的地方，第二次觀測到的反流則可延伸到海底。除了 T1 測站以外，T2P 和 T2 兩次觀測的流速剖面顯示，從水面到海底都呈現北流，較強的北流可以延伸到水深 500~600 m 的地方，比四月航次的結果更往下延伸約 200 m，再往下的流場就無明顯變化了。

圖 12、圖 13、圖 14 依序是十月航次在蘭嶼西邊的六個測站三次觀測的海流剖面圖，與前兩航次比較不同的地方是最靠近台灣的 S1 測站前兩次觀測的上層海流剖面，沒有明顯的北流，向北的流速很小(最大只有到 10 cm/s)，一樣在水深 200 m 以下的地方有發現到一股

向南的反流(極值在水深 200 m 的地方，流速約有 30 cm/sec，向下可以延伸到 900 m 深)。而第三次觀測的結果就與前兩航次的 K1、T1 站的結果相似，最大的朝北流速約 80 cm/s，Sb-ADCP 的最大 V 流速約 100 cm/s，不過此站並沒有發現到反流。這三次觀測的 S2~S6 站的北流都很明顯，極值出現在第一次觀測的 S4 站附近，約有 140 cm/s，與 4 月航次與 7 月航次的結果做比較，上層海流往北的趨勢在此 5 個測站間以 10 月航次的結果最為明顯。

因此推斷春、夏、秋這三個季節，台灣與蘭嶼之間約 30 海浬的海域，黑潮有一支主軸是在此區間來回移動。10 月航次的 S2 測站第一次觀測的海流結果與 Sb-ADCP 的觀測結果比較發現，趨勢雖然相符，但流速相差甚大，推測可能是設定或操作時出現問題，導致此測站的流速剖面與 Sb-ADCP 的結果相去甚遠，所以此測站的流速以 Sb-ADCP 的流速剖面來代表。

蘭嶼東邊的流場

四月航次以蘭嶼東邊的四站 K3、K4、T3、T4(圖 15)的結果來看，K3、K4 站上層海流(0~200 m)明顯受到黑潮影響向北，極值出現在 K3 站水深 50 m 的地方，約有 70 cm/s，較強的北流可以延伸到水深 600 m 的地方，比蘭嶼西邊測站的結果更向下 200 m，再往下就較無明顯

的流場變化了。而 T3、T4 站可能是受到 eddy 的影響，表層海流(0~100 m)往南流，流速不大，只有 10~20 cm/s，100 m 以下才又出現北流，但此向北的流並沒有延伸到海底，中間又有出現一股朝南的流，其中 T3 站是在水深 600~1400 m 的地方，T4 站是在 400~700 m 的地方，流速不大，最大只到 20 cm/s 而已，再向下又變成朝北的流至最大的觀測深度。

七月航次以蘭嶼東邊的兩站 T3、T4(圖 16)兩次觀測的流速剖面來看，上層海流(0~200m)有別於 4 月航次，明顯受到黑潮影響向北，極值出現在第二次觀測 T3 站水深 50 m 的地方，約有 70~80 cm/s(LADCP 觀測到的 V 最大值約為 70 cm/s；而 Sb-ADCP 的 V 最大值約為 80 cm/s)，往比較強的流都可延伸到水深 400 m 的地方，再往下就沒有明顯的流場變化了。

5.4 台灣東南沿岸的反流與蘭嶼東邊的冷渦

大陸學者 Jing and Li(2003)使用浮球觀測，在研究區域內發現一股延著海岸線，從台東到台灣最南端的南向反流。圖 17 是研究區域內有發現到反流的測站流剖圖，圖 17a~f 分別為 4 月 K1 站、7 月航次 T1 站、10 月航次 S1 站、4 月航次 T1 站、7 月航次 T1 站 cast 2、10 月航次 S1 站 cast 2 的流剖圖。紅色實線代表 LADCP 東西向流速 U、

綠色實線代表 LADCP 南北向流速 V ，黑色虛線為 Sb-ADCP 的東西向流速 U ，藍色虛線為 Sb-ADCP 的南北向流速 V ，黑色實線代表流速為 0 的地方，圖中顯示研究區域內最西邊的測站，也就是四月航次的 K1、T1 測站，七月航次 T1 測站的兩次觀測與十月航次 S1 測站的前兩次觀測，在水深約 200m 以下，皆可發現到有別於黑潮北流，明顯向南的反流。向南的流速以四月航次的 T1 測站最大，在水深 250 m 地方，流速約有 60 cm/sec，向下可以延伸到 800 m 深。七月次之，第二次觀測的 T1 站，在水深 350 m 的地方，流速約有 40cm/sec，向下可以延伸到 1300 m 深。而十月最小，第二次觀測的 S1 站，在水深 200 m 的地方，流速約有 30 cm/sec，向下可以延伸到 900 m 深。

圖 18 是 4 月 21~25 日航次 Sb-ADCP 的流矢圖。資料取的是第一個 bin 的 Long time Average(每 10 分鐘一筆 data)的海流，bin 的範圍約在水深 12 m~20 m 的地方(每個 bin 設為 8 公尺)，箭頭代表流速大小與流向，圖中顯示在蘭嶼東方 4 個測站間觀測到的海流，發現有一個逆時針旋轉的 eddy，就 Sb-ADCP 的資料分析，大約可以往下延伸至水深 150 m 左右(圖 19)。

圖 20 是 2007 年 4 月 21~25 日的海表面高度距平值 SSH 圖。圖由上到下依序為 21 至 25 日，左邊尺度較小，右邊尺度較大，當時 2007 年 4 月 21~25 日蘭嶼附近的海表面高度距平值(SSH)，在蘭嶼東南方

也有找到一個海表面高度較低、逆時針旋轉的冷渦。而從四月航次 LADCP 觀測到的海流結果，也可發現：蘭嶼東南方的兩個測站 T3、T4 的上層海流也呈現往南的趨勢，範圍約介於海面至 100 m 深的地方(圖 15)。

5.5 潮汐的影響

圖 21(a), (b) 為代表 7 月航次 T2P 測站第一次與第二次觀測的流剖圖，圖(c)是蘭嶼 2007 年 7/7~7/11 日的潮序圖，以 7 月航次 T2P 測站 LADCP 兩次觀測測得的海流結果來看，可以發現東西向的海流(U) 會受到當地潮汐的影響，第一次觀測的潮汐為退潮，上層海流流向為西北流；第二次觀測為漲潮時，流向為東北流。

圖 22、23 是以沿著蘭嶼南方的 T 測線，緯度在 21.92° ，經度介於 $121^{\circ}\sim 122^{\circ}$ 之間作的流剖圖，和上述結果比較發現：就 v 而言，向北最大的流速出現在台灣與蘭嶼之間附近的上層海域，與上述 5.3 的推斷：台灣與蘭嶼之間約 30 海浬的海域，黑潮有一支主軸是在此區間來回移動的結果相符。而觀察最西邊靠近台灣的海流剖面，在海流中層一樣發現有一股向南的反流。就 U 而言，可以發現在台灣和蘭嶼之間的東西向表層海流，明顯地受到當地潮汐的影響，退潮時向西北流(第一次觀測的流剖圖)，漲潮時向東北流(第二次觀測的流剖圖)，

與上述的結果相符。

圖 24 是 7 月航次 Sb-ADCP 觀測到的上層海流結果，把這兩條間隔 18 小時的測線分成 4 個部份，圖 24(a)代表第一次觀測；圖 24(b)代表第一觀測的回程；圖 24(c)代表第二次觀測；圖(d)24 代表第二觀測的回程。結果顯示較強的北流是在台灣與蘭嶼之間 T2P 站附近，符合上述的結果。比較圖 24(a)與圖 24(c)Sb-ADCP 測線在台灣和蘭嶼間的東西向流速 U ，圖 24(a)在台灣與蘭嶼之間的測線，潮汐適逢退潮，表層海流流向為西北流；圖 24(c)在台灣與蘭嶼之間的測線，潮汐適逢漲潮，表層海流流向為東北流，符合上述台灣和蘭嶼之間的東西向表層海流，會受到當地潮汐影響的結果，退潮時向西北流，漲潮時向東北流。

5.6 南海水與黑潮水的混合

圖 25~31 為 4 月、7 月與 10 月航次的溫鹽圖，紅色線代表南海水，黑色線代表黑潮水，而測站的水文特性用藍色線來表示。圖 25 上方的圖為 4 月蘭嶼北方的 K 測線，由左至右依序為 K1~K4 測站；圖 25 下方的圖為蘭嶼南方的 T 測線，由左至右依序為 T1~T4 測站。圖中的黑潮水與南海水溫鹽曲線來自 Chen and Huang (1996)。比較 4 月航次(圖 25)與 7 月航次(圖 26、27)蘭嶼東西方的水文特性，可以發

現上層海水除了最靠近台灣的 K1、T1 測站是黑潮水與南海水混合以外，往東的測站水文特性顯示幾乎都是接近黑潮水的水文性質。

而下層海水在蘭嶼西邊的測站顯示，4 月與 7 月都是接近南海水，往東過了蘭嶼以後，4 月的 K3、T3 測站水文特性顯示南海水已經與黑潮水混合，而最東邊的 K4、T4 測站的下層海水已接近黑潮水性質了。但是，往東過了蘭嶼 7 月 T3 測站下層海水仍顯示為南海水的特性，到了 T4 測站才顯示出與黑潮水混合的狀態或者是說較接近黑潮水了(圖 28)。也就是說:越接近夏季，南海水入侵黑潮流域的趨勢越為顯著(更為向東)。

10 月航次只有做蘭嶼西方的觀測，上層海水 S1 到 S4 測站為黑潮、南海水混合的狀態，S5、S6 測站則較接近黑潮水了。而下層海水，S1 到 S6 測站都顯示為南海水，較為遺憾的是 10 月航次沒有觀測蘭嶼東邊的海域，對於 10 月時蘭嶼東邊海域的水文沒有辦法做更深入的探討(圖 29、30、31)。

六、結論與建議

本研究利用下放式聲學都卜勒海流剖面儀(Lowered ADCP)、船碇式都卜勒流剖儀(Sb-ADCP)、溫鹽深儀(CTD)於蘭嶼附近的海域進行流場、水文等觀測，配合分析研究期間蘭嶼當地的潮位、風場、SSH 等資料，獲得以下幾點結論：

LADCP 的海流剖面顯示，台灣與蘭嶼之間約 30 海浬的海域，黑潮有一支主軸是在此區間來回移動，此處上層海流往北的最大流速有 70~140cm/sec，以 10 月最大(~140 cm/s)，7 月次之(~100 cm/s)，4 月較小(~90 cm/s)。往北較強的海流 7 月(可延伸到水面下 600 m)比 4 月和 10 月(可延伸到水面下 400 m)更往下延伸 200 m。靠近台灣東南側沿岸的海流中層(水深約介於 200 m 到 800 m)有一股朝南的反流，在三次觀測期間都有發現此反流的存在，流速在 30 到 60 cm/s 之間，這股反流以 4 月最大(~60 cm/s)、7 月次之(~40 cm/s)、10 月較小(~30 cm/s)。

2007 年 4 月在蘭嶼東邊的海域發現一個海表面高度較低、逆時針方向旋轉的冷渦，衛星高度計資料也證實了這個現象。另外，七月航次的 LADCP 與 Sb-ADCP 的觀測是採用濾除 M_2 潮的 2 相法，比對當地潮汐的結果顯示，台灣和蘭嶼之間的東西向表層海流，會受到當地潮汐的影響，退潮時向西北流，漲潮時向東北流。

蘭嶼東西方的上層海水除了最靠近台灣的 K1、T1 測站是黑潮水與南海水混合以外，往東的測站水文特性顯示幾乎都是接近黑潮水的水文性質。而下層海水在蘭嶼西邊較接近南海水的特性，往東過了蘭嶼以後，4 月的結果顯示南海水已經與黑潮水混合，而最東邊的測站下層海水已接近黑潮水性質了。但是，7 月的結果要到最東邊的測站才顯示出與黑潮水是混合的狀態。也就是說：在蘭嶼附近的海域，越接近夏季，南海水入侵黑潮流域的趨勢越為顯著(更為向東)。

作 LADCP 觀測時，如何設置儀器裝置組，使它在下放時傾斜角小於 22 度和 CTD 纜線儘量保持在垂直狀態，是確保資料品質最重要的關鍵。經過本研究三個航次不斷檢討與改進後，對於 LADCP 的操作過程中需要注意的地方，有幾點建議：(1)下放和上收 LADCP 時，控制速率不要超過 1 m/s，儘量控制在 0.6~0.8 m/s 之間的速率。(2)在風浪與海流較強的區域觀測時，加重整個儀器組的重量，加強 LADCP 在水面下的平衡與穩定。(3)隨時注意 CTD 纜線的歪斜角度，太大時馬上要求駕駛台移動船位，盡量讓它保持在垂直(10 度以內)的狀態。

本研究是國內 LADCP 的首次觀測，根據這三個航次的實測資料分析，得到了許多有關黑潮流場的豐碩成果，另一方面，對於儀器的設定與操作方式、資料的收集與品質的確保、如何有效準確地分析處理資料等等方面上，還有很多的改進空間。

七、參考文獻

- Chen, C. and M. Huang, 1996, A mid-depth front separating the South China Sea water and the Philippine Sea water. *Journal of Oceanography*, **52**, 17-25.
- Centurioni, L. R. and P. P. Niiler, 2004, Observation of Inflow of Philippine Sea Surface Water into the South China Sea through the Luzon Strait, *Journal of Physical Oceanography*, **34**, 113-121.
- Chang, Y., Tseng, R. and C. Liu, 2008, Evaluation of tidal removal method using phase average technique from ADCP Surveys Along the Peng-hu Channel in the Taiwan Strait, *Terrestrial, Atmospheric & Oceanic Sciences* (in press).
- Fischer, J. and R. Gordon, 1990, Deep ocean acoustic Doppler current profiling. *Proc. IEEE Fourth Working Conf. on Current Measurements*, Clinton, MD, IEEE, 192-201.
- Fischer, J. and M. Visbeck, 1993, Deep velocity Profiling with self-contained ADCPs, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, **10**, 764-773.
- Hwang, C., 1996, A study of the Kuroshio's seasonal variabilities using an altimetric geoid and TOPEX/POSEIDON altimeter data, *Journal of Geophysical Research*, **101**, C3, 6313-6335.
- Jan, S. and S. Chao, 2003, Seasonal variation of volume transport in the major inflow region of the Taiwan Strait: the Penghu Channel. *Deep-Sea Research II*, **50**, 1117-1126.
- Jing, C. and L. Li, 2003, An initial note on quasistationary, cold-core Lanyu eddies southeast off Taiwan Island. *Chinese Science Bulletin*, **48**, **19**, 2101-2107.
- Liang, M., 2003, Upper-ocean currents around Taiwan, *Deep-Sea Research II*, **50**, 1085-1105.
- Nitani, H., 1972, Beginning of Kuroshio. In: *Kuroshio*, University of Washington Press, Seattle, WA, 129-163.
- Pond, S. and G. L. Pickard, 1983, Island wakes and headland eddies: A

- comparison between remotely sensed data and laboratory experiments, *Journal of Geophysical Research*, **92**, 783-794.
- Thurnherr, A.M., 2007, How To Process LADCP Data With the LDEO Software, 1-27.
- Visbeck, M., 2001, Deep Velocity Profiling Using Lowered Acoustic Doppler Current Profilers: Bottom Track and Inverse Solutions, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, **19**, 794-807.
- 劉倬騰、楊益、鄭世培、王正松、劉秦玉 (1995): 蘭嶼東南方的反流。 *台灣海洋學刊*, 第 34 期第一號。
- 劉倬騰、鄭世培、莊文思、楊益 (1998): 台灣海流(黑潮)的平均流速與流量。 *台灣海洋學刊*, 第 36 期第二號。
- 郭心順、楊慶軒、康建軍、田紀偉 (2006): LADCP 資料處理方法的探討及其對應套裝軟體的使用。 *海洋技術*, 第 25 卷第 4 期。
- 王冑: 物理海洋學教材。

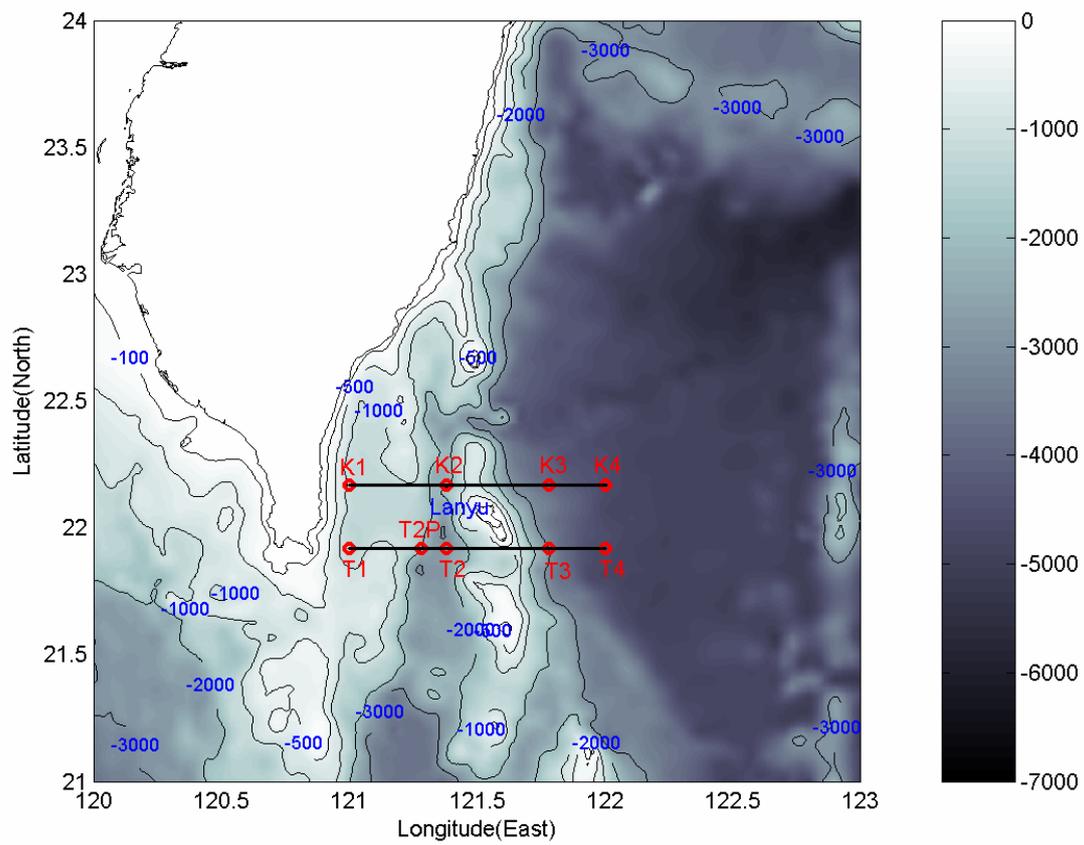


圖 1. 研究區域的地理位置及等深線圖。

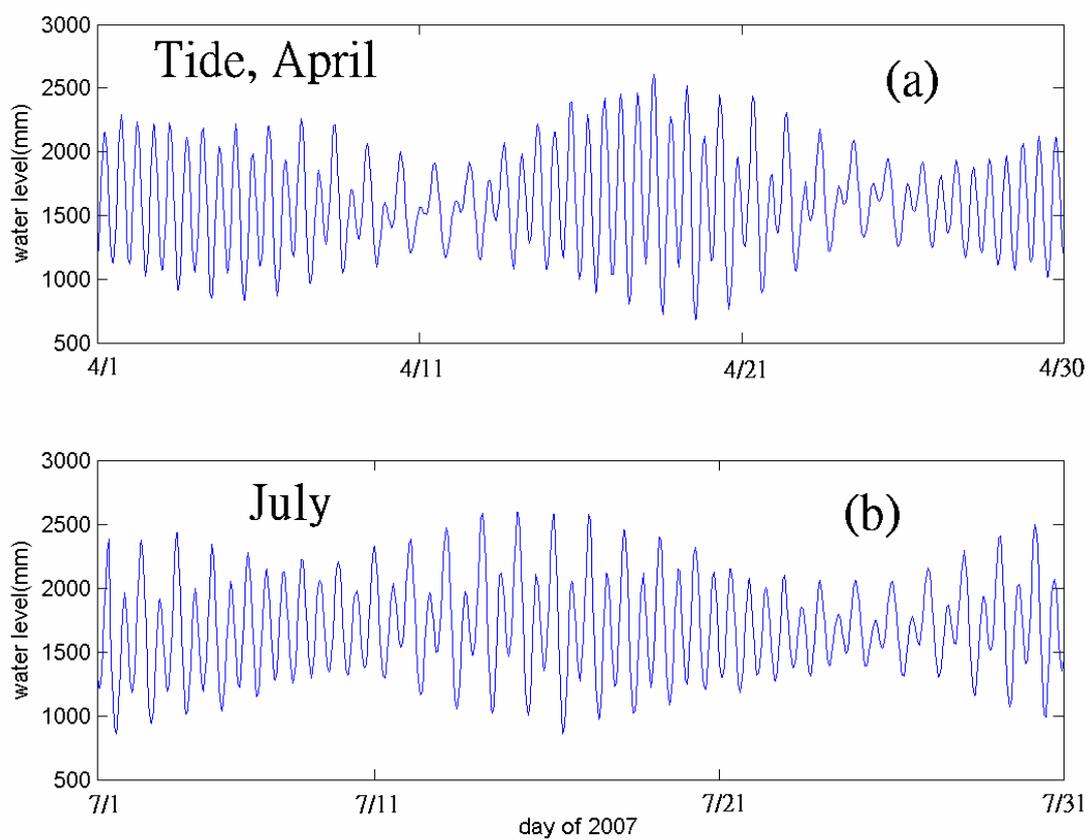


圖 2. 蘭嶼海氣象測站的潮序圖。(a)是 2007 年 4 月的潮位變化；
(b)是 7 月的潮位變化。

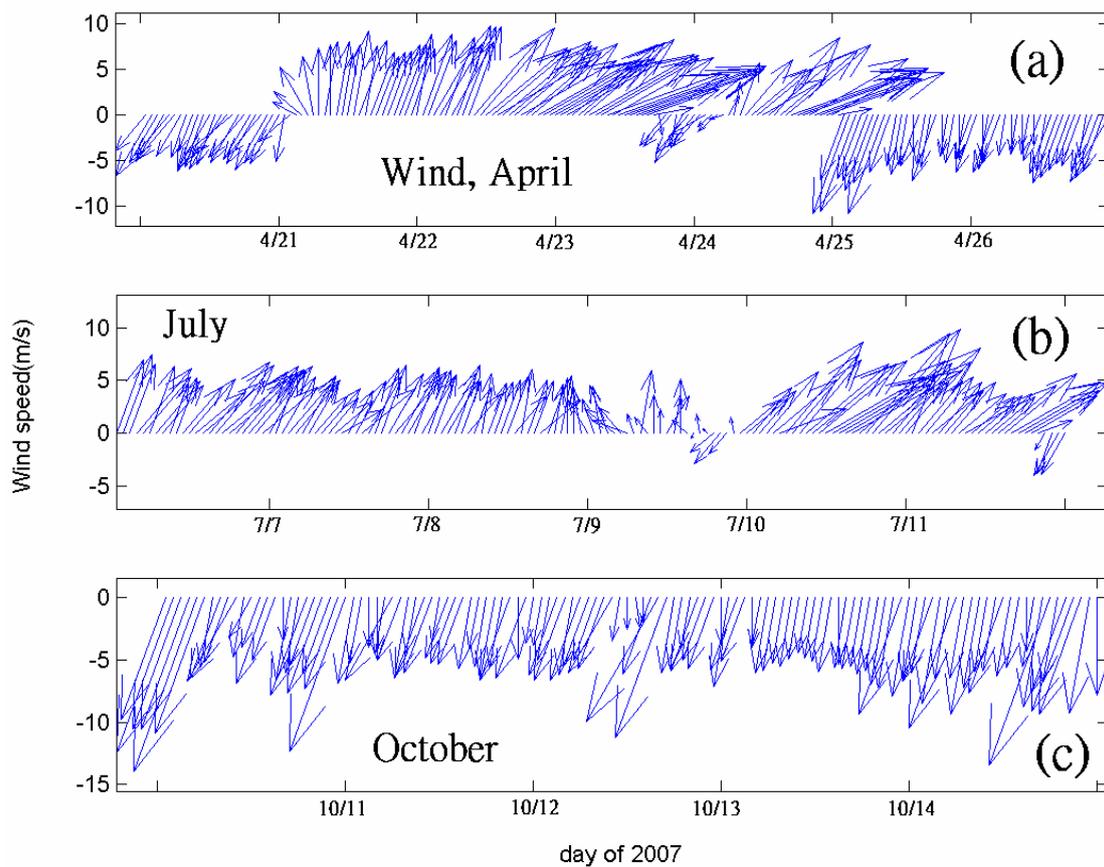


圖 3. 蘭嶼氣象站的風向與風速大小。(a)的時間是 2007 年 4 月 20~26 日；(b)是 7 月 6~11 日；(c)是 10 月 10~14 日。

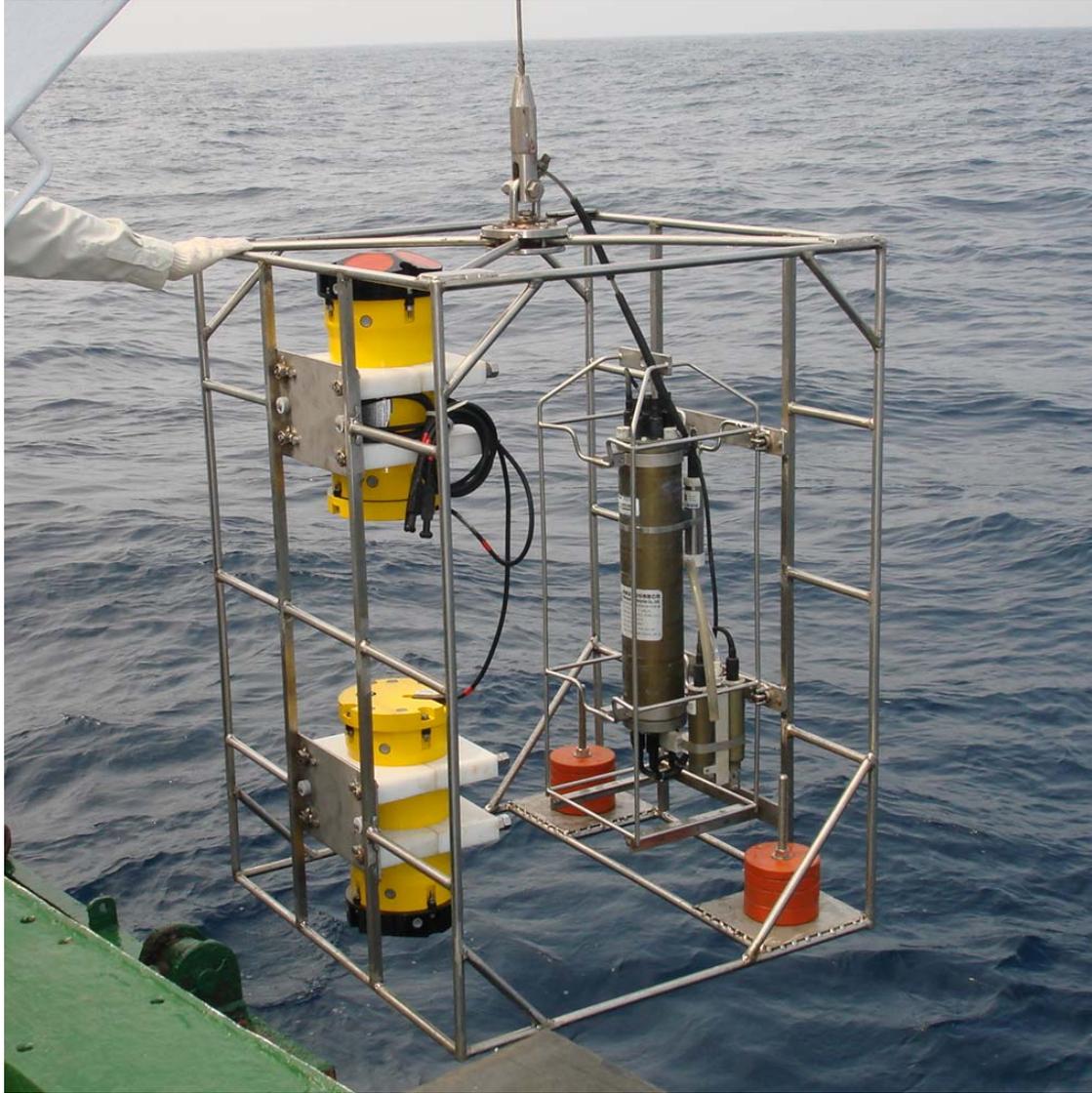


圖 4. 下放式聲學都卜勒海流剖面儀(LADCP)與溫鹽深儀(CTD)鋼架組。

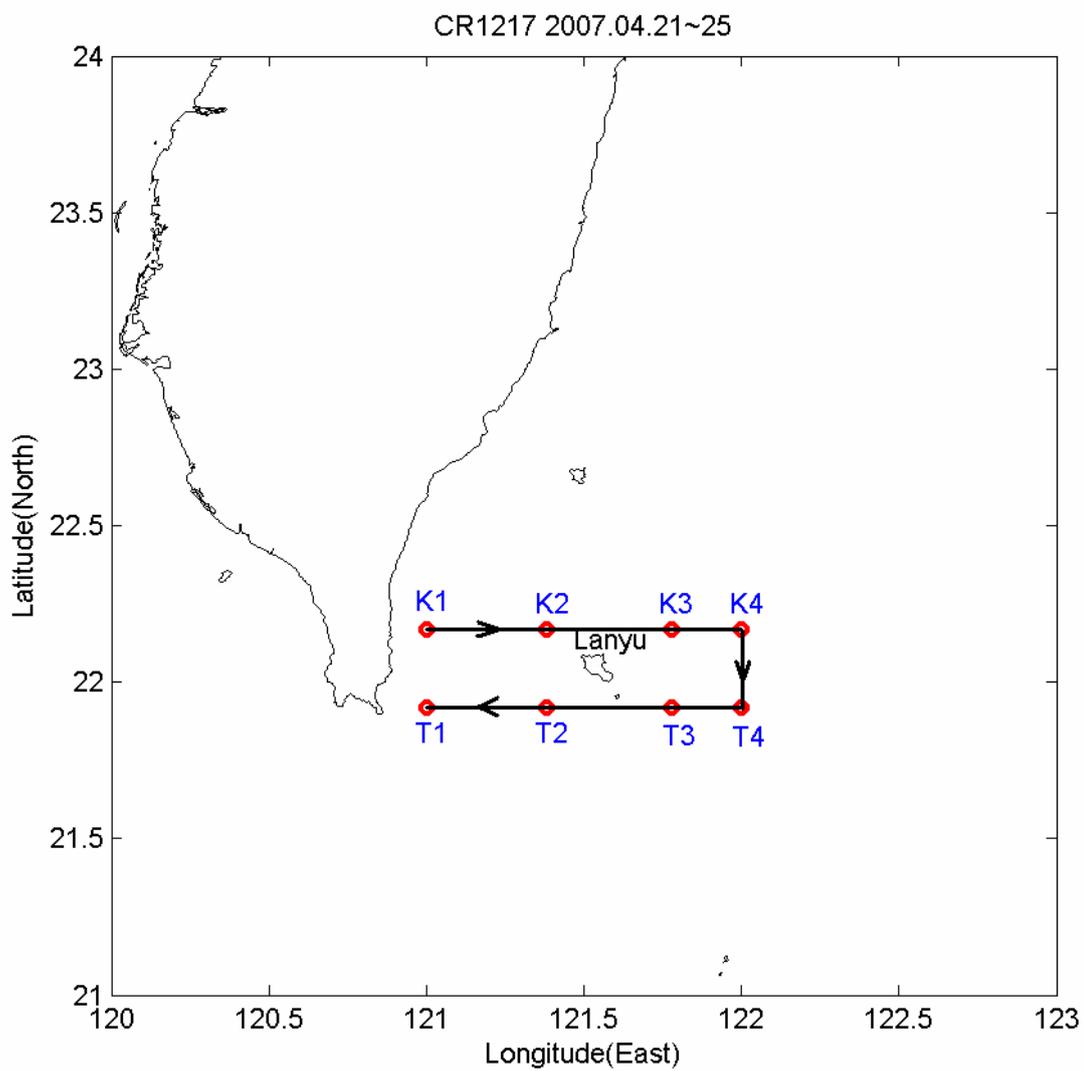


圖 5. 2007 年 4 月 CR1217 航次的 Sb-ADCP 測線及 LADCP/CTD 測站位置。箭頭實線表示 Sb-ADCP 測線，圓點表示 LADCP/CTD 測站位置。

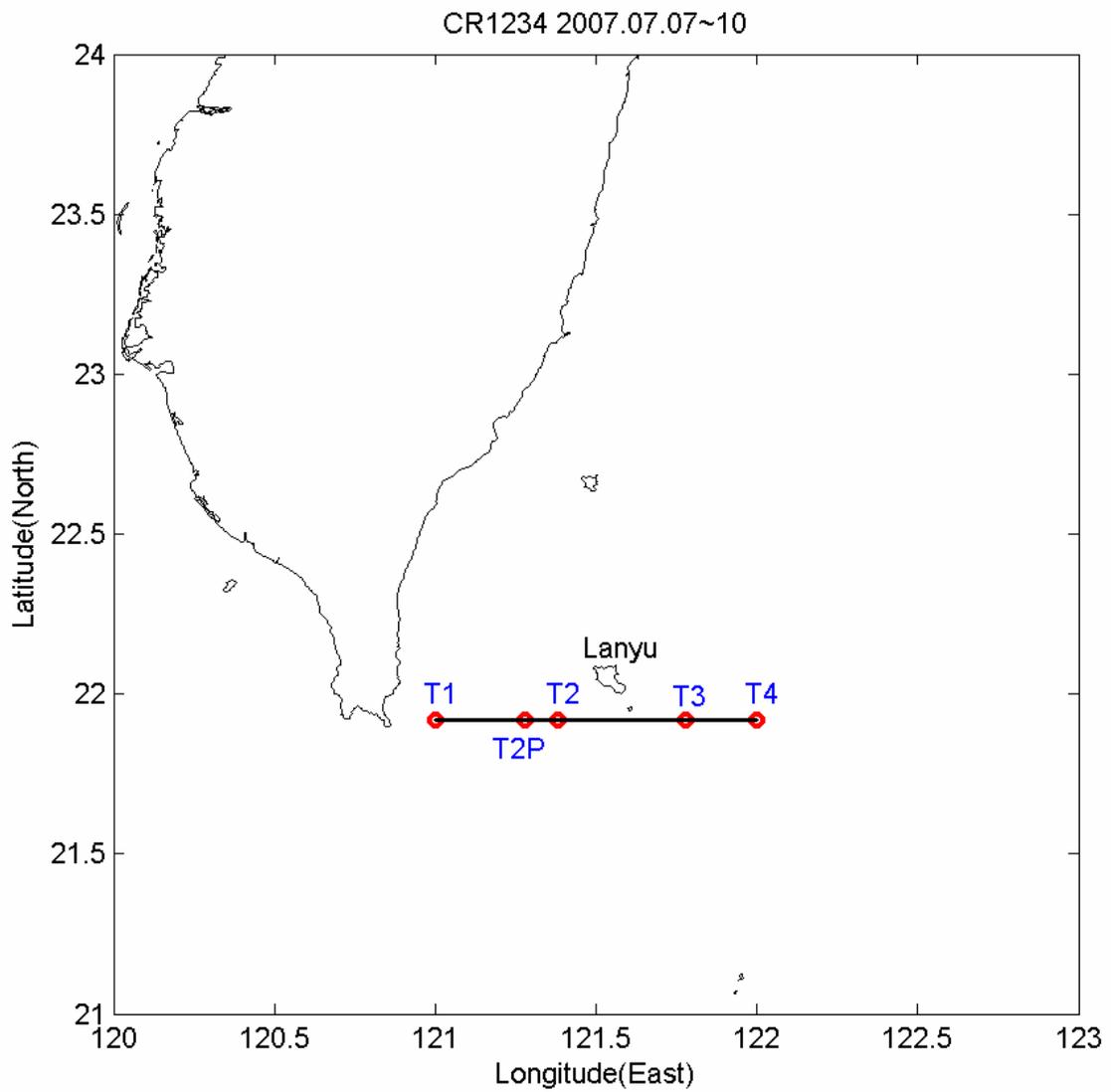


圖 6. 2007 年 7 月 CR1234 航次的 Sb-ADCP 測線及 LADCP/CTD 測站位置。箭頭實線表示 Sb-ADCP 測線，圓點表示 LADCP/CTD 測站位置。

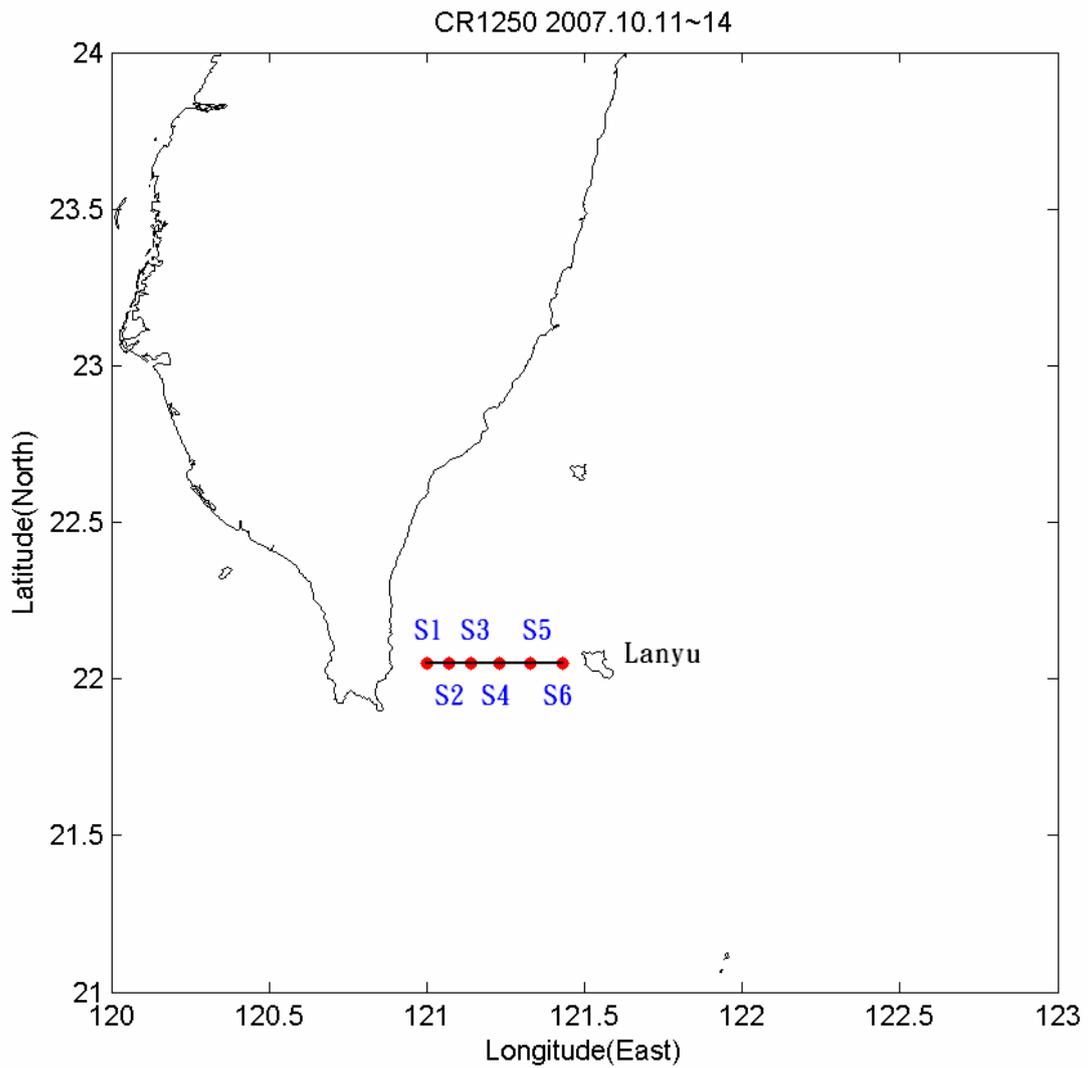


圖 7. 2007 年 10 月 CR1250 航次的 Sb-ADCP 測線及 LADCP/CTD 測站位置。箭頭實線表示 Sb-ADCP 測線，圓點表示 LADCP/CTD 測站位置。

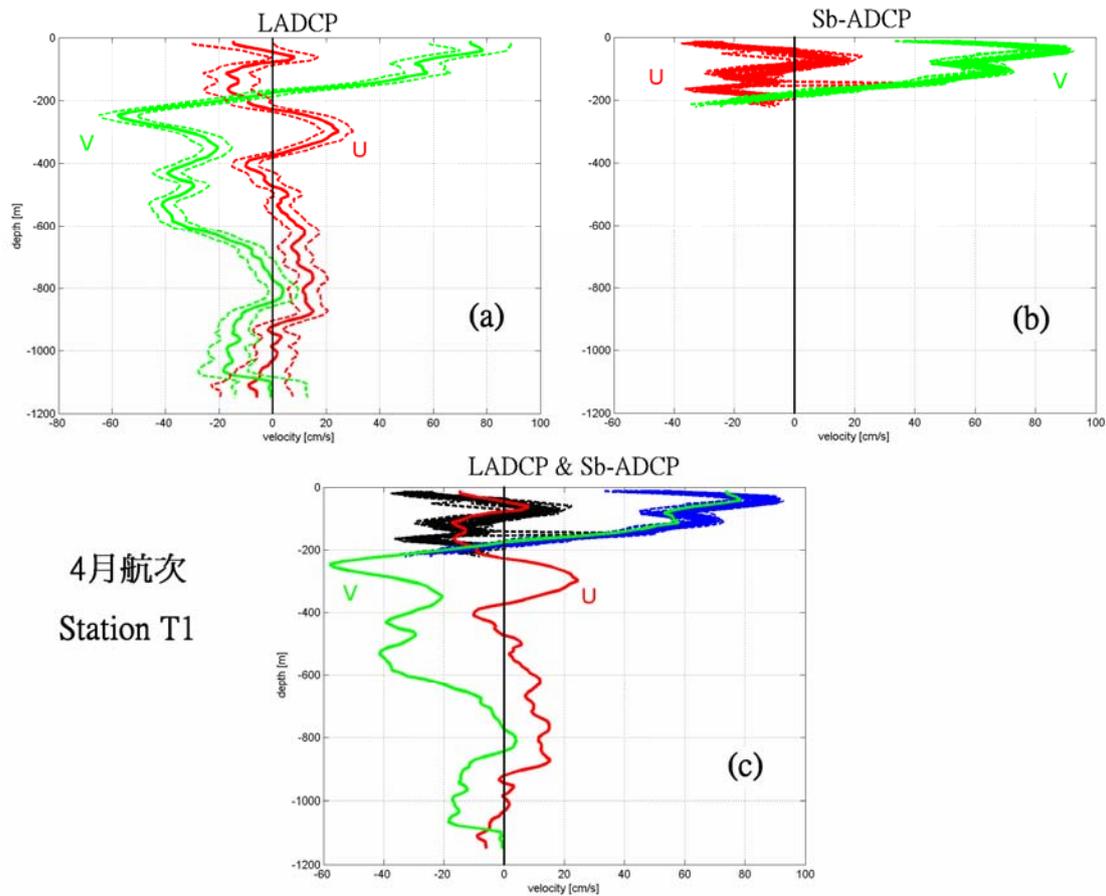


圖 8. 4 月航次 T1 測站的流速剖面圖，(a)是 LADCP 的結果，紅色線代表東西向流速 U，綠色線代表南北向流速 V，虛線代表它的誤差範圍，(b)代表 Sb-ADCP 的結果，(c)則是把兩個剖面圖畫在一起做比較，黑色線代表 Sb-ADCP 的 U，藍色線代表 Sb-ADCP 的 V。

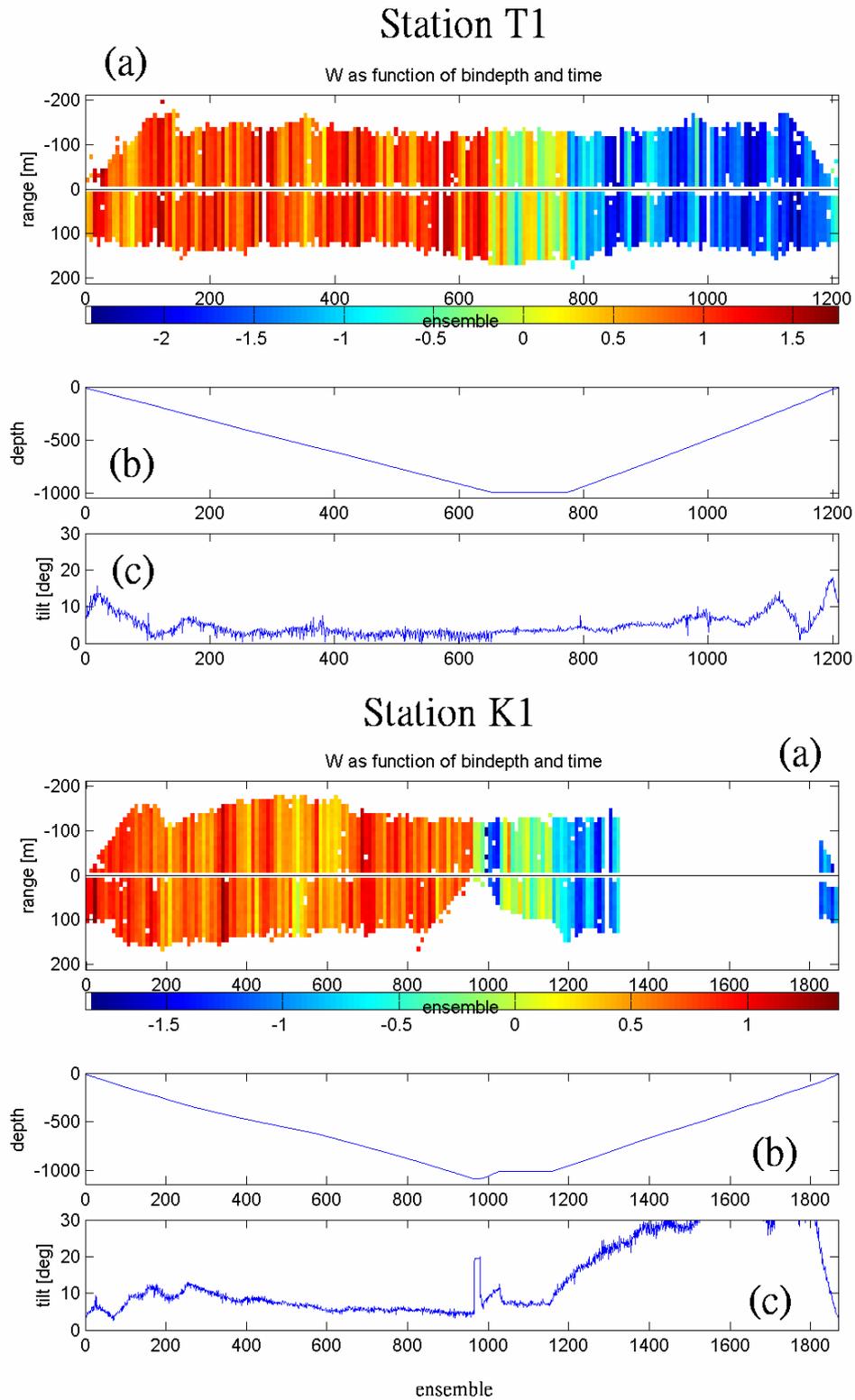


圖 9. 測站 T1 與 K1 的 LADCP 儀器之 (a) 下放與上收速度 W (m/s)，用顏色來表示 W 大小； (b) 是在水面下的位置； (c) 代表傾斜角大小。

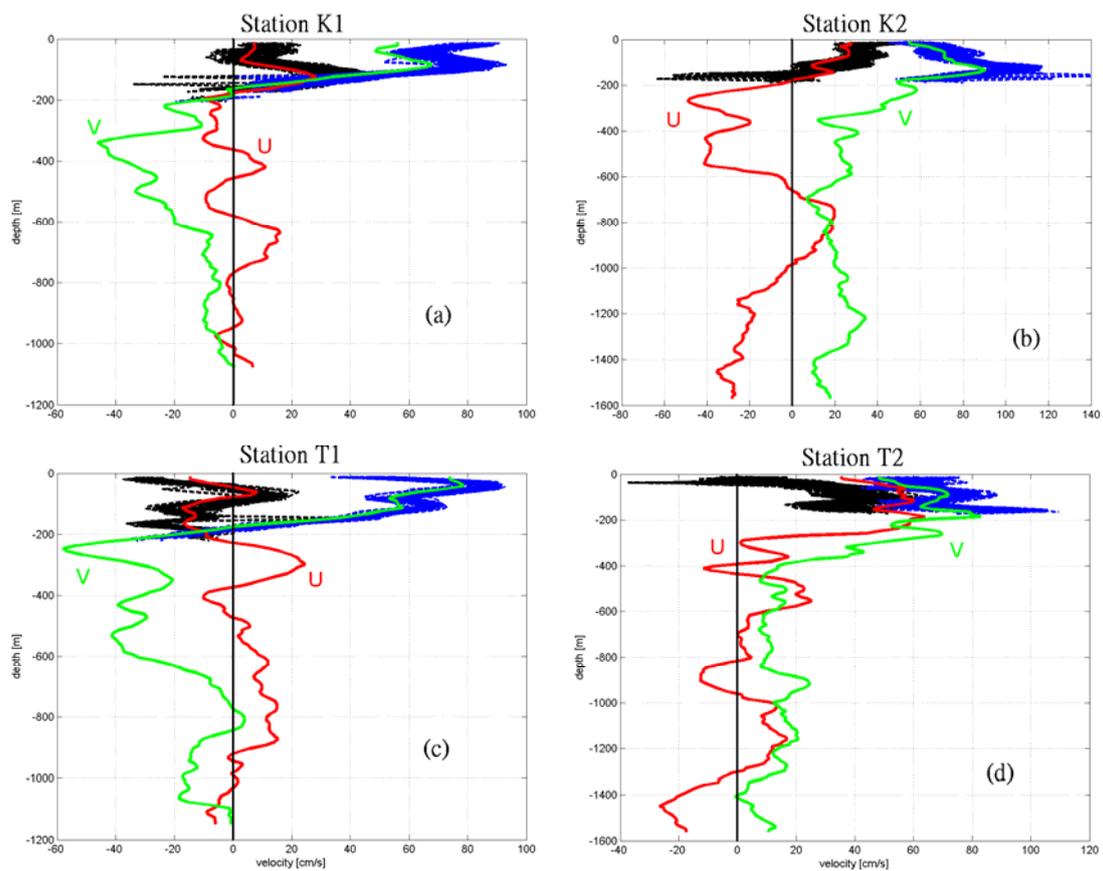


圖 10. 四月航次蘭嶼西邊四個測站的流速剖面圖，(a)是 K1 測站，(b)是 K2 測站，(c)是 T1 測站，(d)是 T2 測站。紅色實線代表 LADCP 的 U、綠色實線代表 LADCP 的 V，黑色虛線為 Sb-ADCP 的 U，藍色虛線為 Sb-ADCP 的 V。

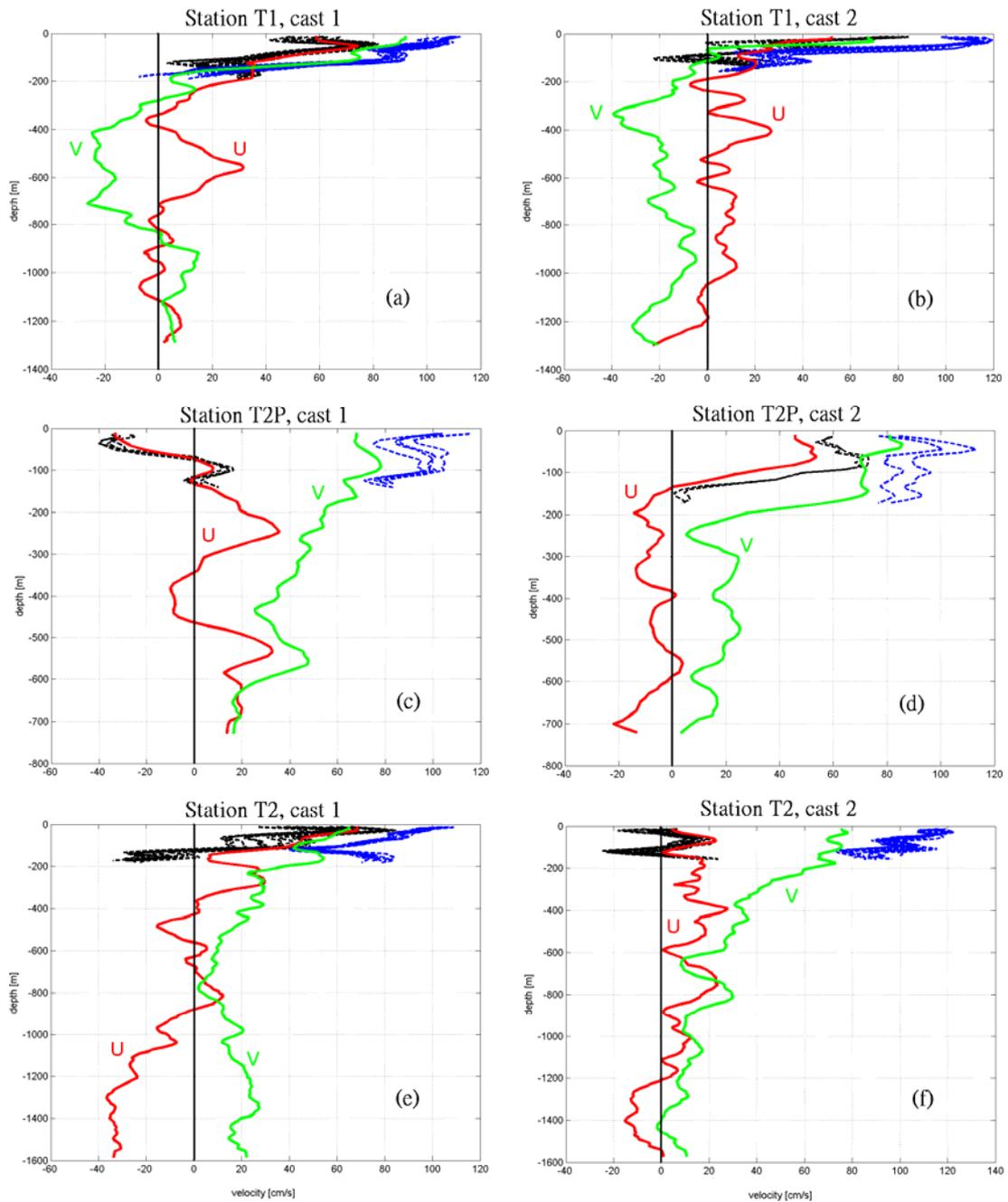


圖 11. 七月航次蘭嶼西邊六個測站的流速剖面圖，(a)是 T1 測站 cast 1，(b)是 T1 測站 cast 2，(c)是 T2P 測站 cast 1，(d)是 T2P 測站 cast 2，(e)是 T2 測站 cast 1，(f)是 T2 測站 cast 2。

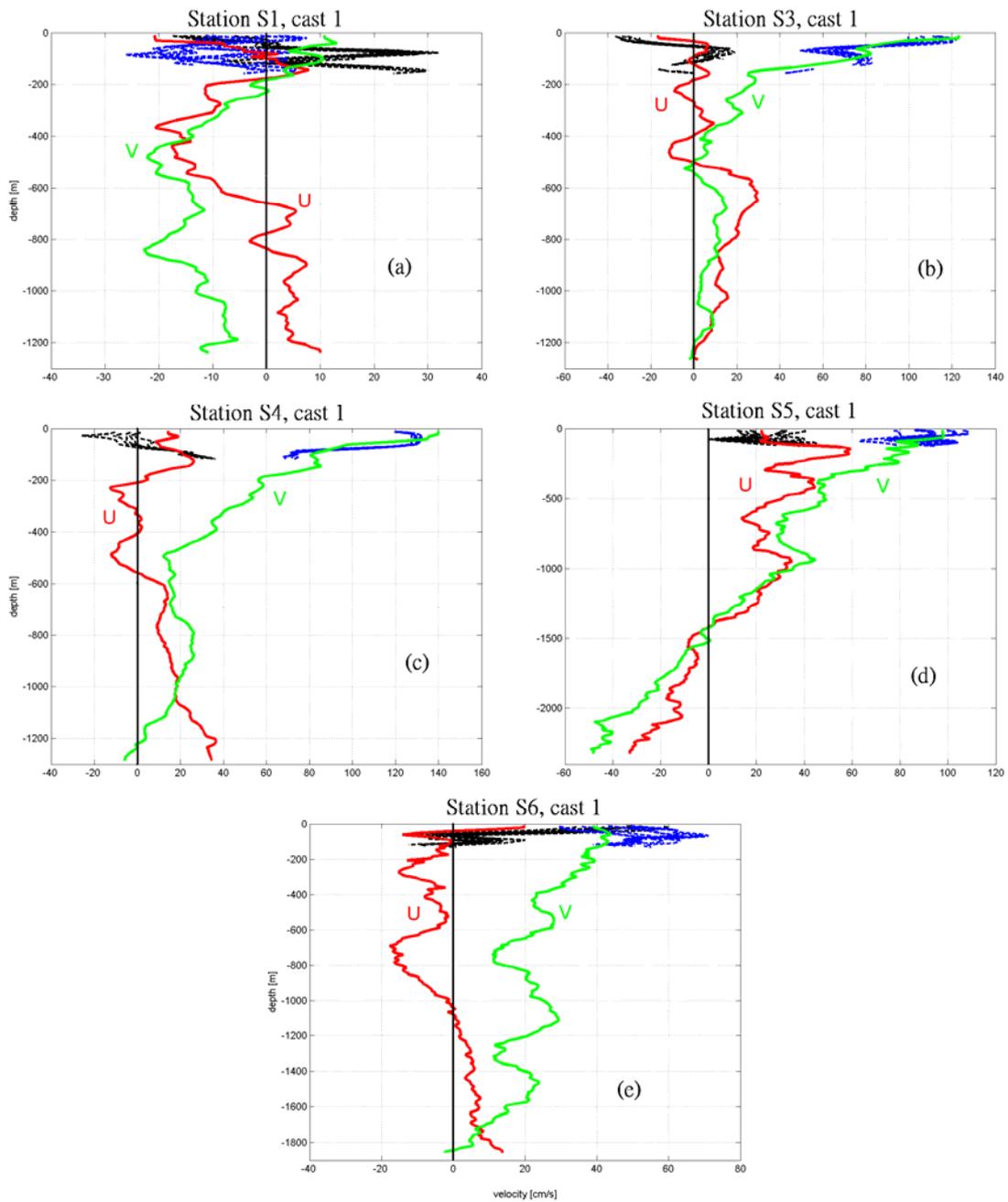


圖 12. 十月航次蘭嶼西邊第一次觀測 5 個測站的流速剖面圖，(a)是 S1 測站 cast 1，(b)是 S3 測站 cast 1，(c)是 S4 測站 cast 1，(d)是 S5 測站 cast 1，(e)是 S6 測站 cast 1。

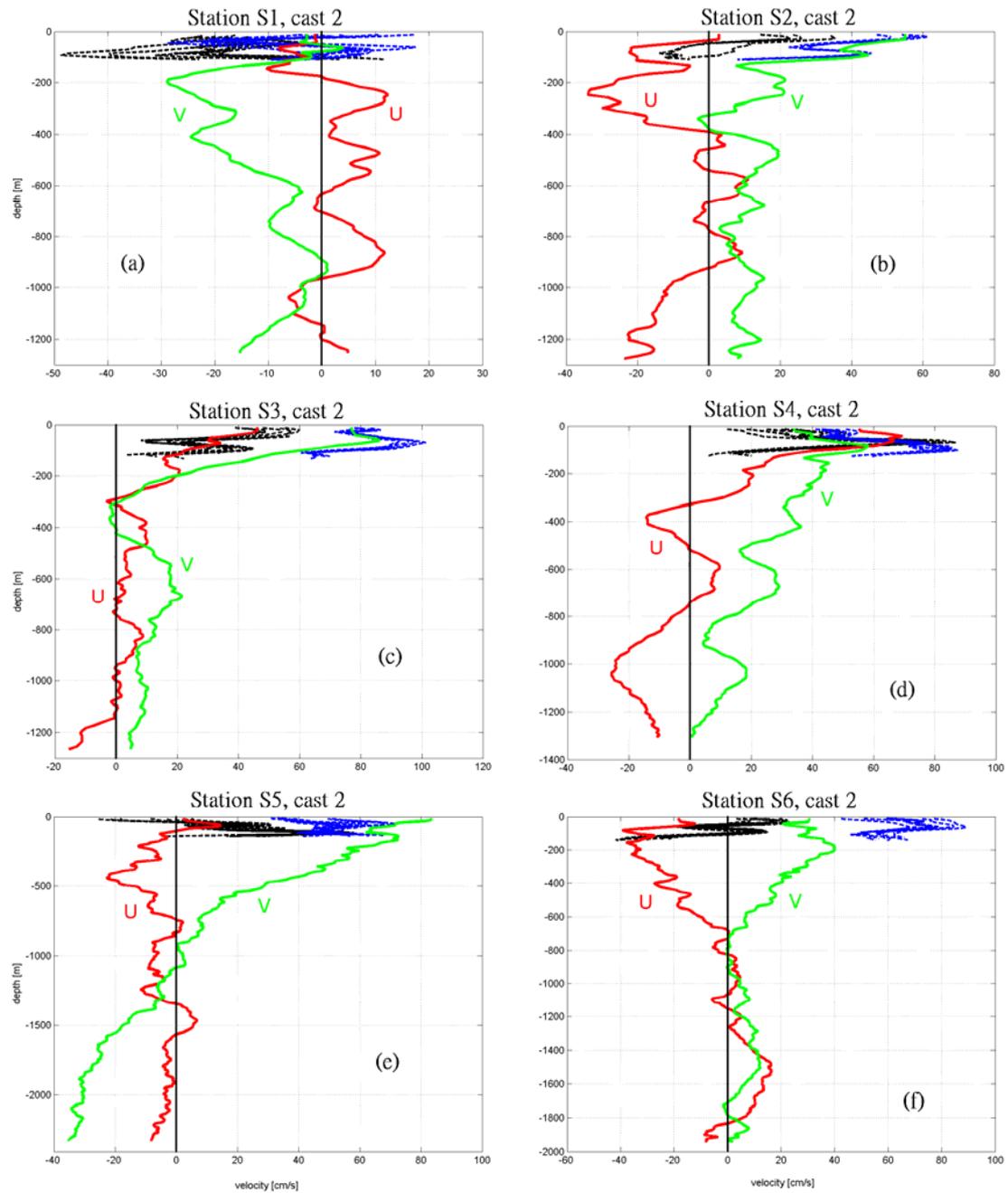


圖 13. 十月航次蘭嶼西邊第二次觀測 6 個測站的流速剖面圖，(a)是 S1 測站 cast 2，(b)是 S2 測站 cast 2，(c)是 S3 測站 cast 2，(d)是 S4 測站 cast 2，(e)是 S5 測站 cast 2，(f)是 S6 測站 cast 2。

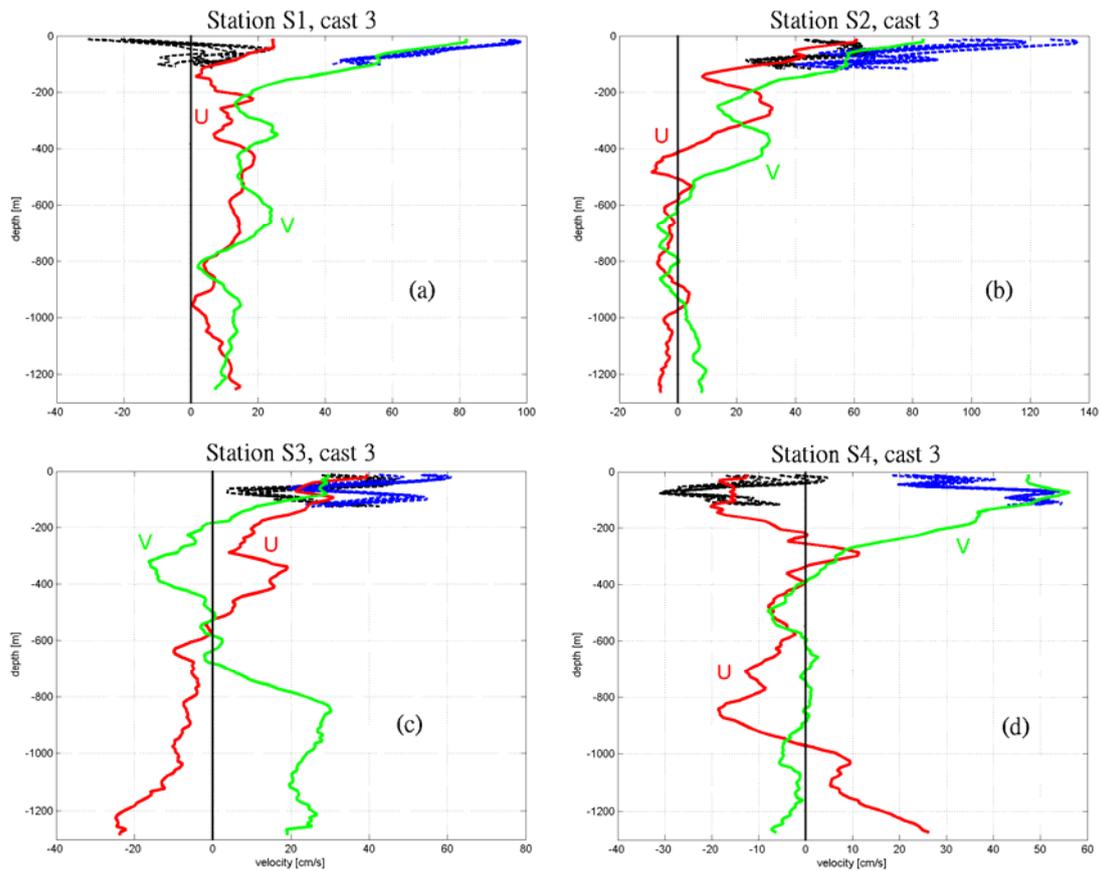


圖 14. 十月航次蘭嶼西邊第三次觀測 4 個測站的流速剖面圖，(a) 是 S1 測站 cast 3，(b) 是 S2 測站 cast 3，(c) 是 S3 測站 cast 3，(d) 是 S4 測站 cast 3。

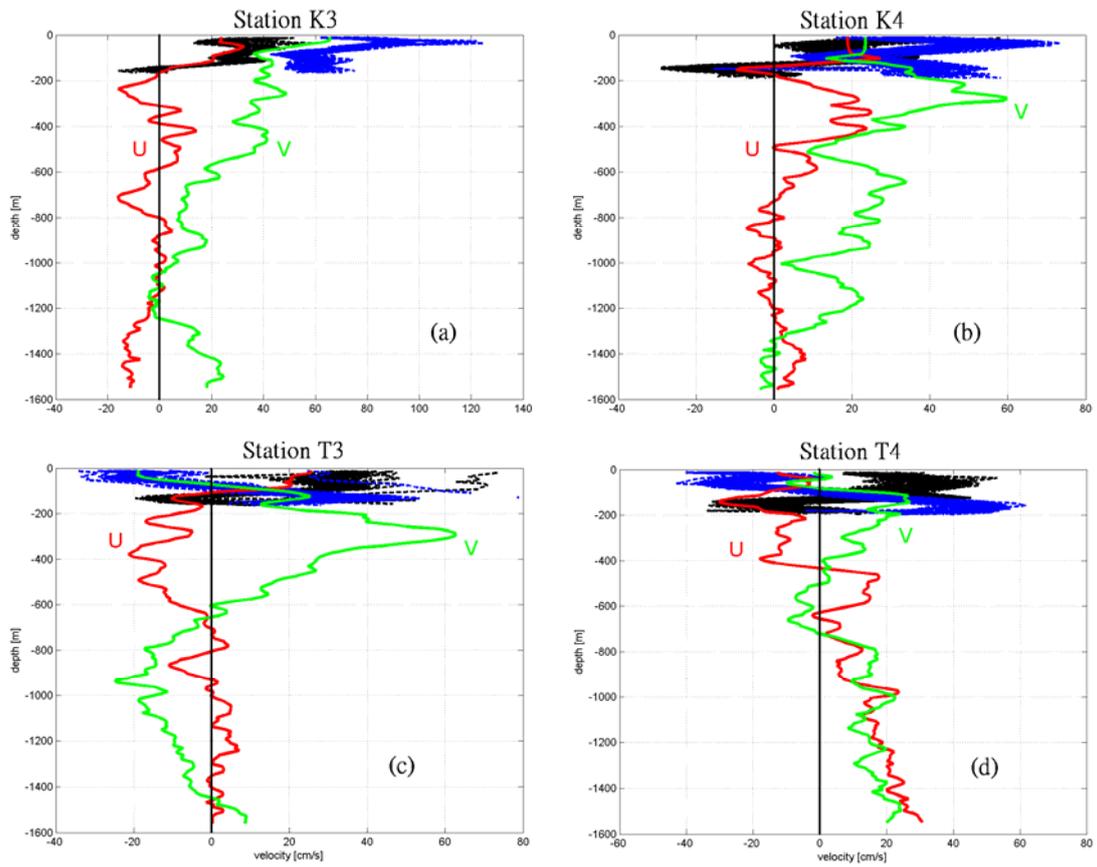


圖 15. 四月航次蘭嶼東邊四個測站的流速剖面圖，(a)是 K3 測站，(b)是 K4 測站，(c)是 T3 測站，(d)是 T4 測站。

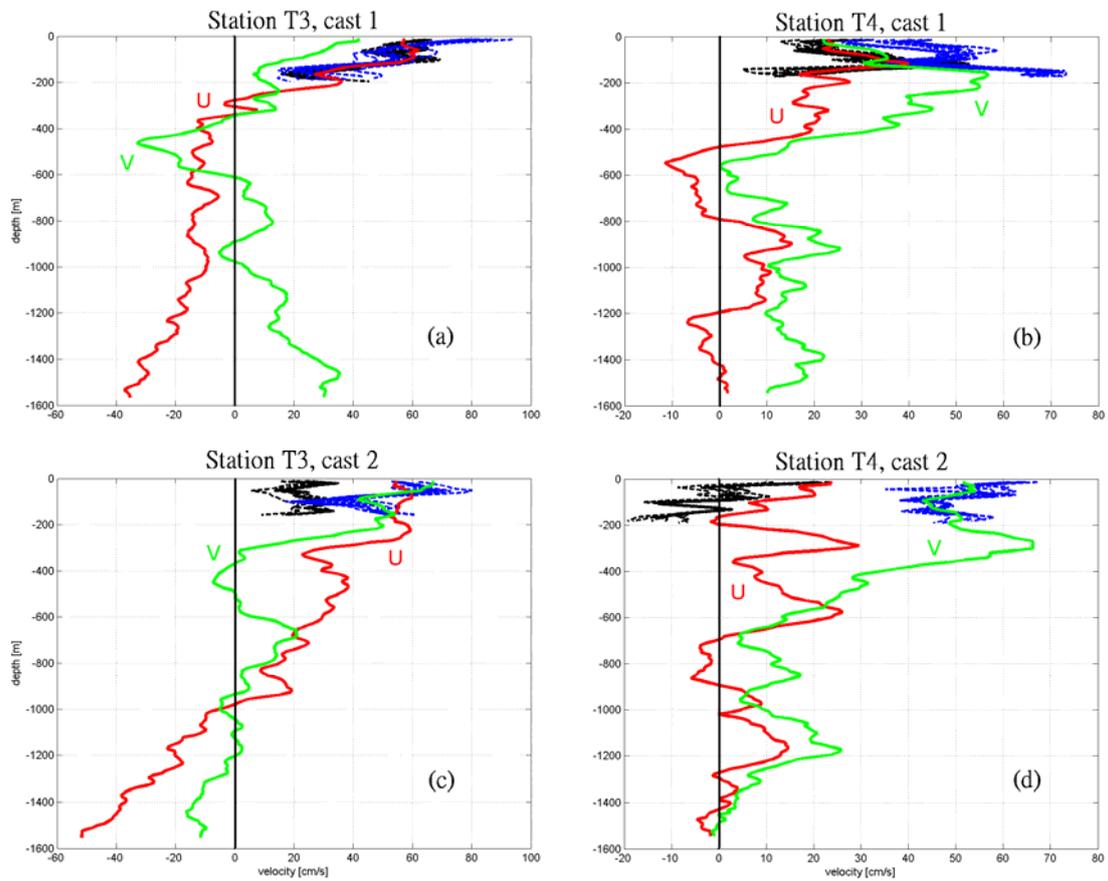


圖 16. 七月航次蘭嶼東邊兩個測站的流速剖面圖，(a)是 T3 測站 cast 1，(b)是 T4 測站 cast 1，(c)是 T3 測站 cast 2，(d)是 T4 測站 cast 2。

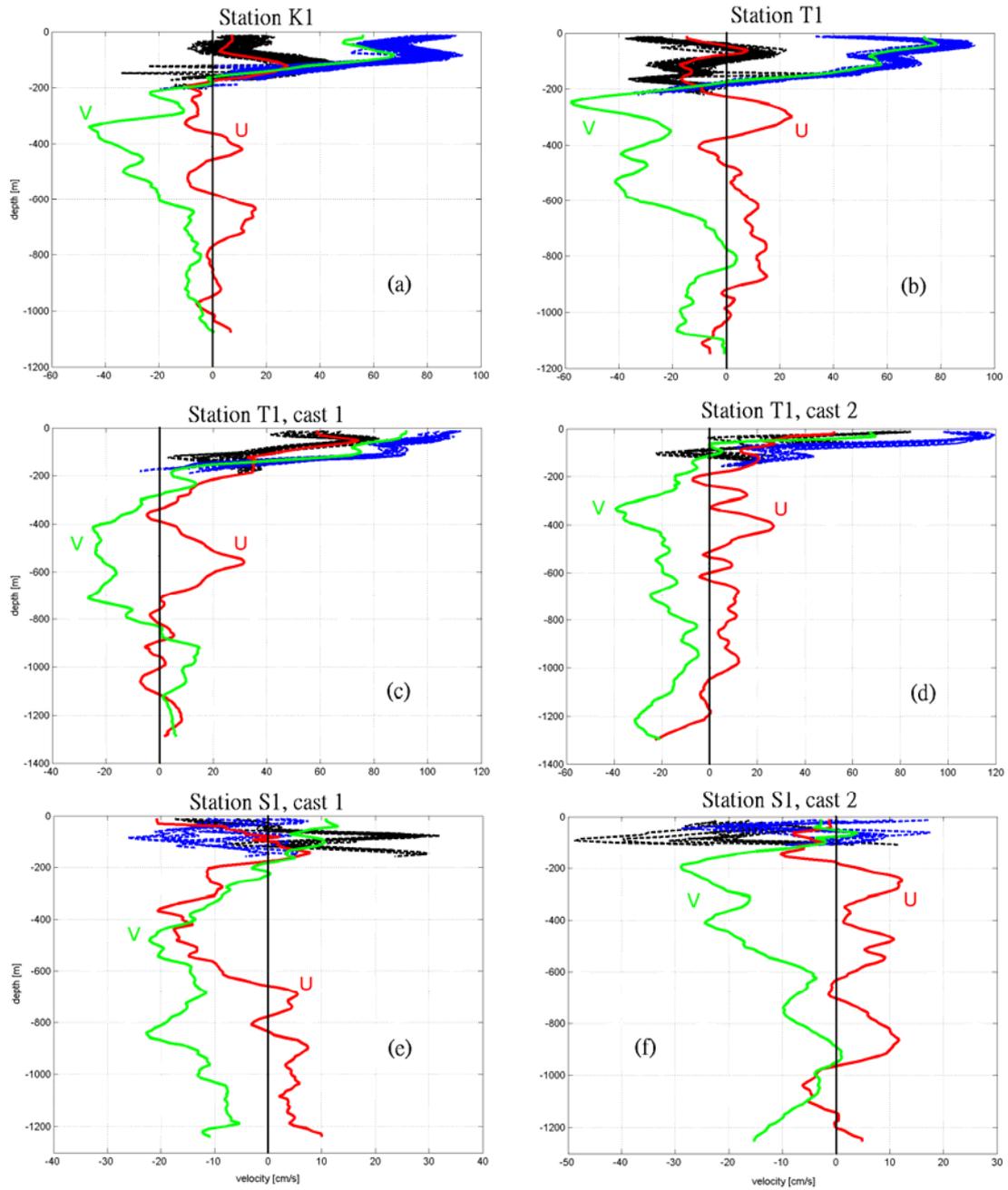


圖 17. 研究區域內有發現到反流的測站流剖圖。(a)是 4 月航次 K1 站，(b)是 4 月航次 K1 站，(c)是 7 月航次 T1 站 cast 1，(d)是 7 月航次 T1 站 cast 2，(e)是 10 月航次 S1 站 cast 1，(f)是 10 月航次 S1 站 cast 2。黑色實線代表流速為 0 的地方。

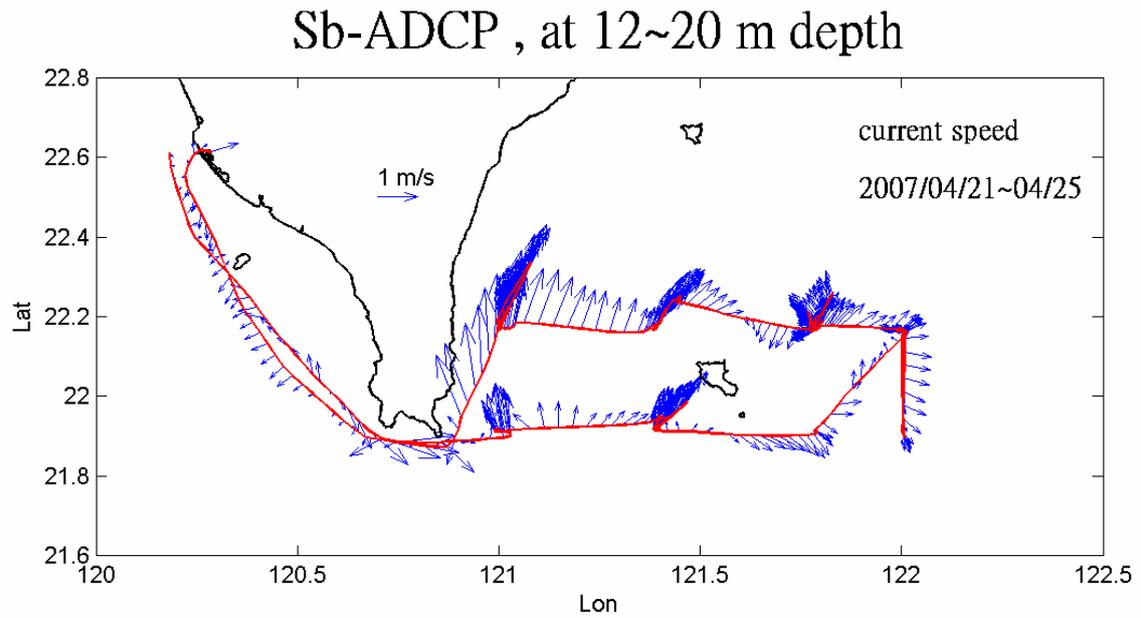


圖 18. 4 月航次 Sb-ADCP 的流矢圖。資料取的是第一個 bin 的 Long time Average(每 10 分鐘一筆 data)的海流，bin 的範圍約在水深 12m~20m 的地方(每個 bin 設為 8 公尺)，箭頭代表流速大小與流向。

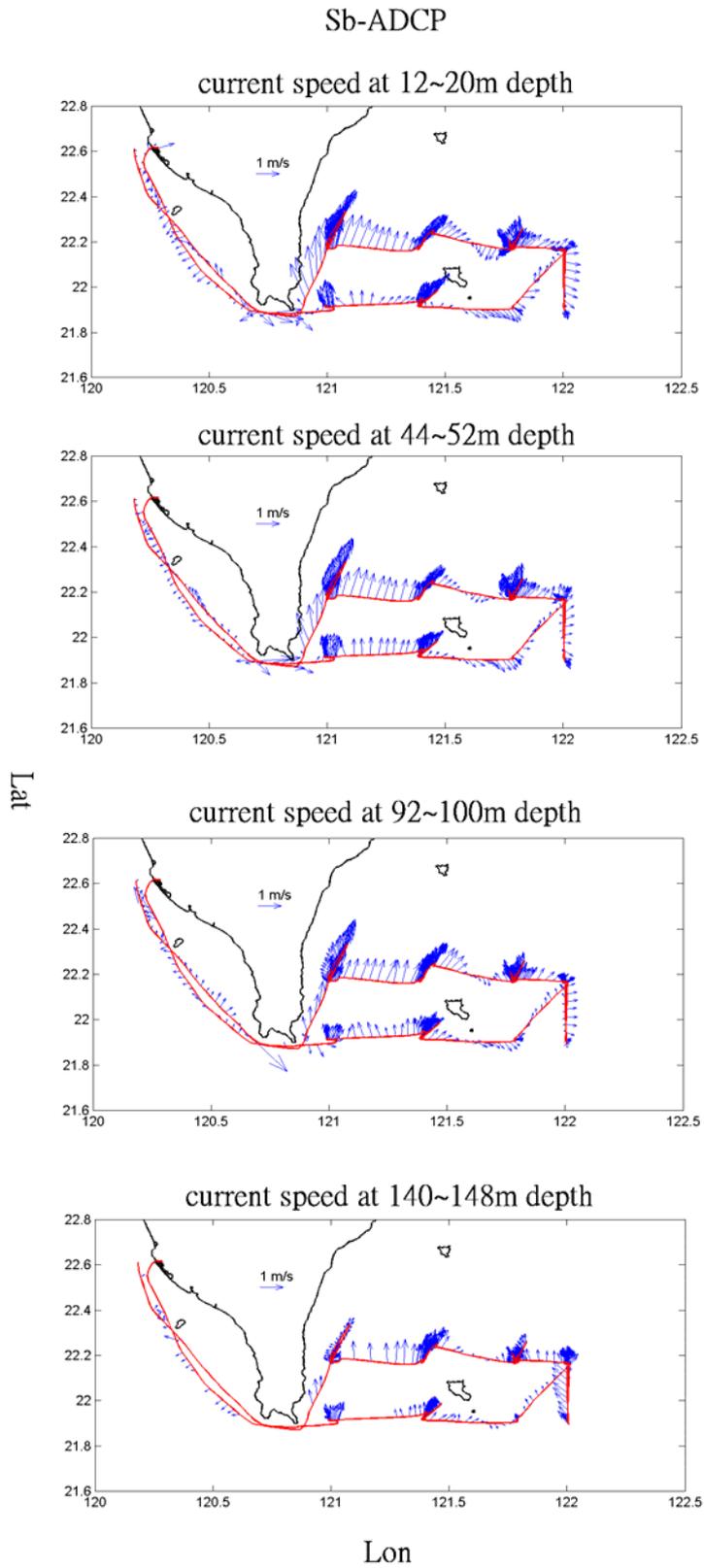


圖 19. 4 月航次 Sb-ADCP 的流矢圖，由上至下依序為 12~20m、44~52m、92~100m、140~148m 的深度。

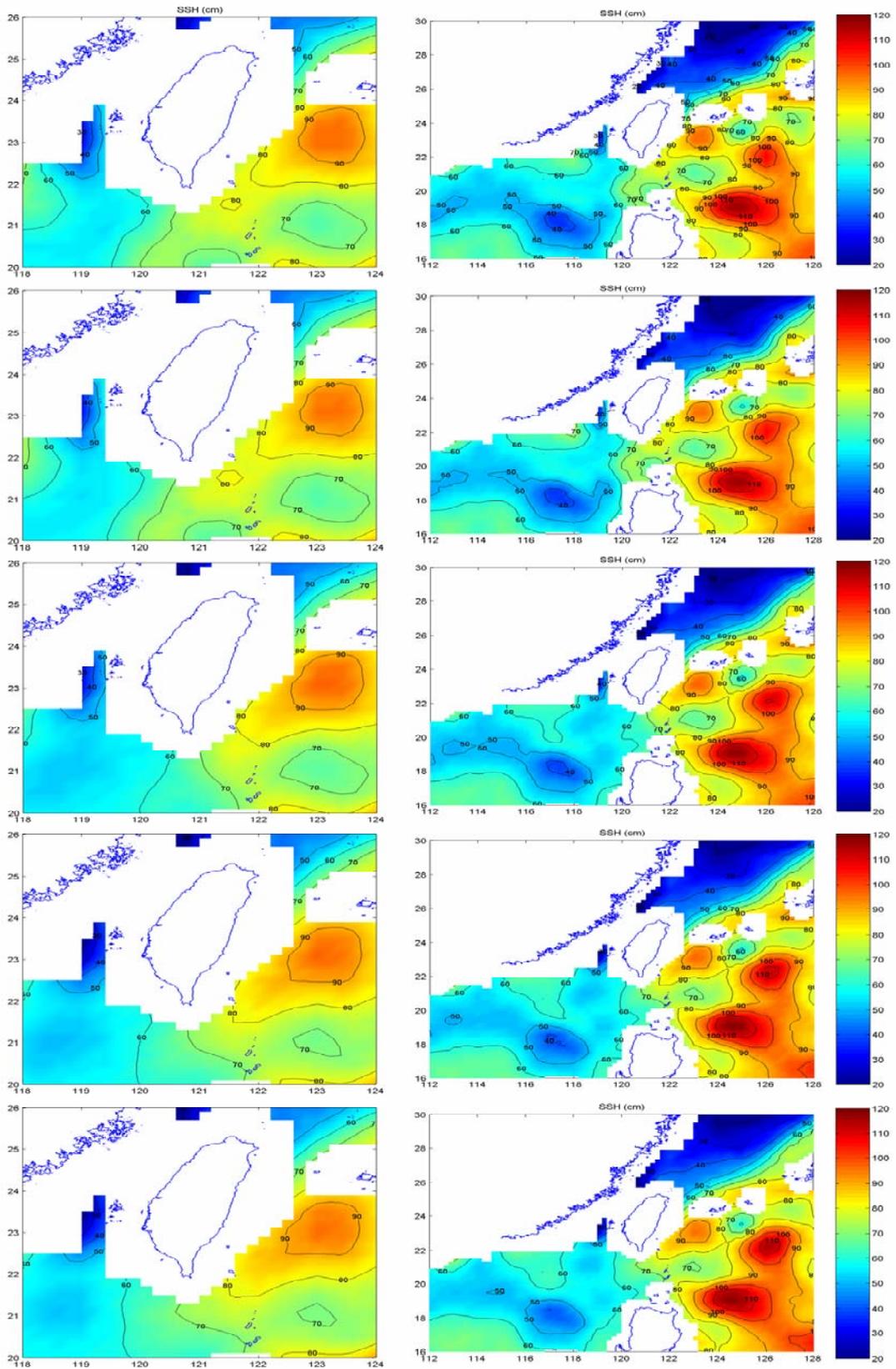


圖 20. 2007 年 4 月 21~25 日的海表面高度距平值 SSH 圖。由上到下依序為 21 至 25 日，左邊尺度較小，右邊尺度較大。

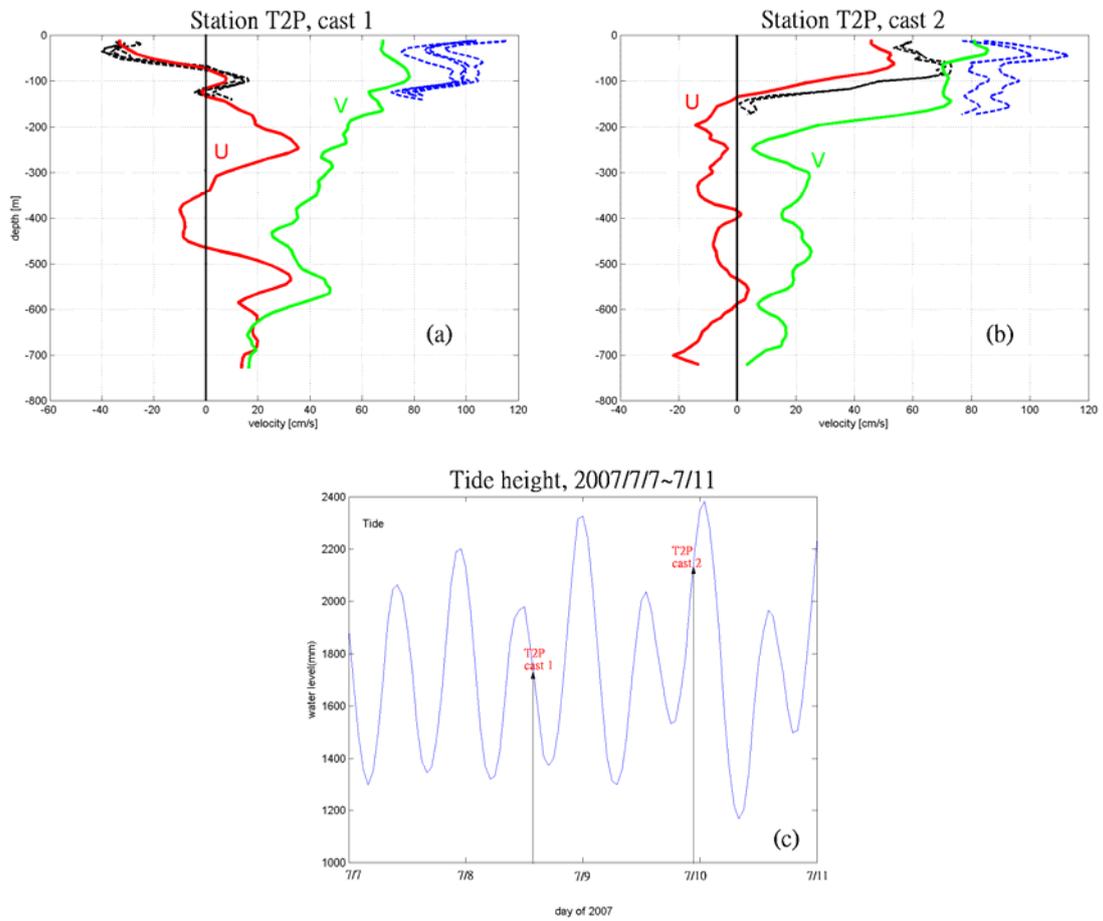


圖 21. (a)代表 7 月航次 T2P 測站第一次觀測的流剖圖， (b)代表 T2P 測站第二次觀測的流剖圖， (c)是蘭嶼 2007 年 7/7~7/11 日的潮序圖。

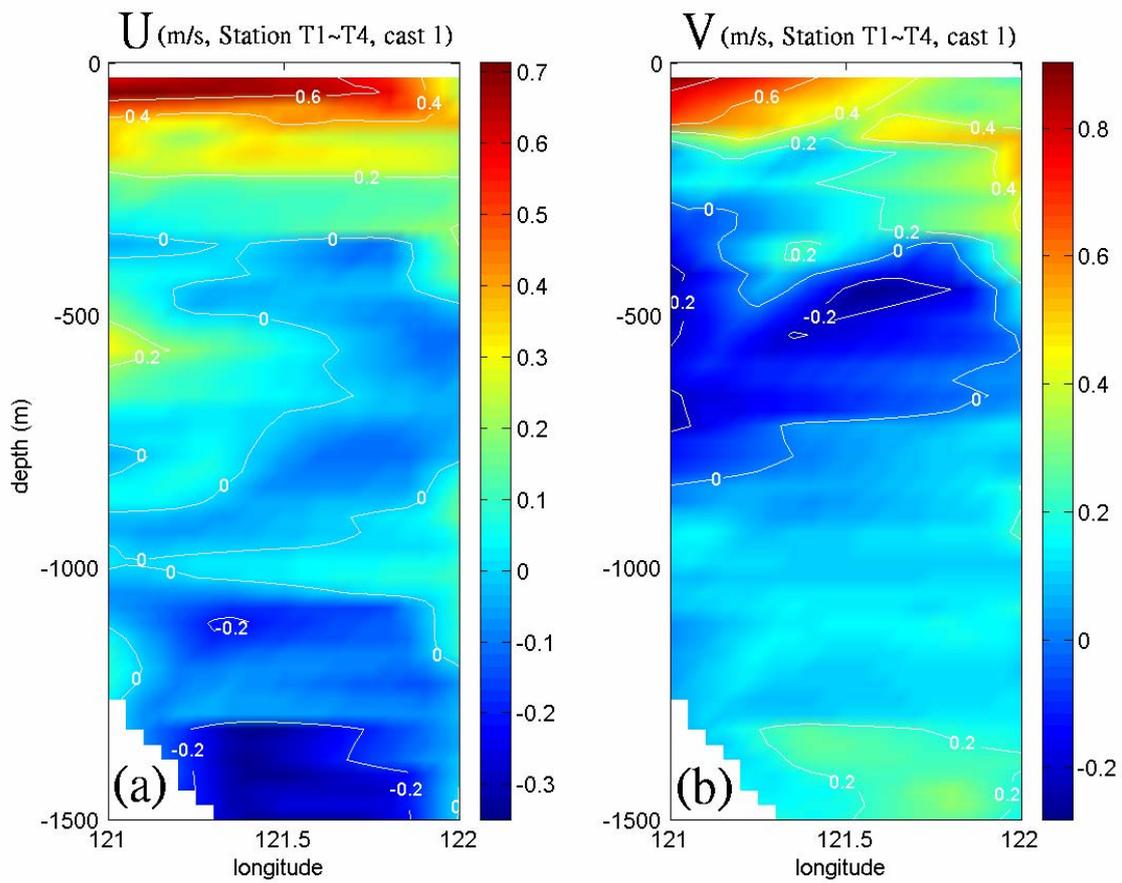


圖 22. 7 月航次第一次觀測的流剖圖(沿著緯度線 21.92° ; 經度介於 121° ~ 122° 之間), (a)代表東西向流速 U , (b)代表南北向流速 V 。

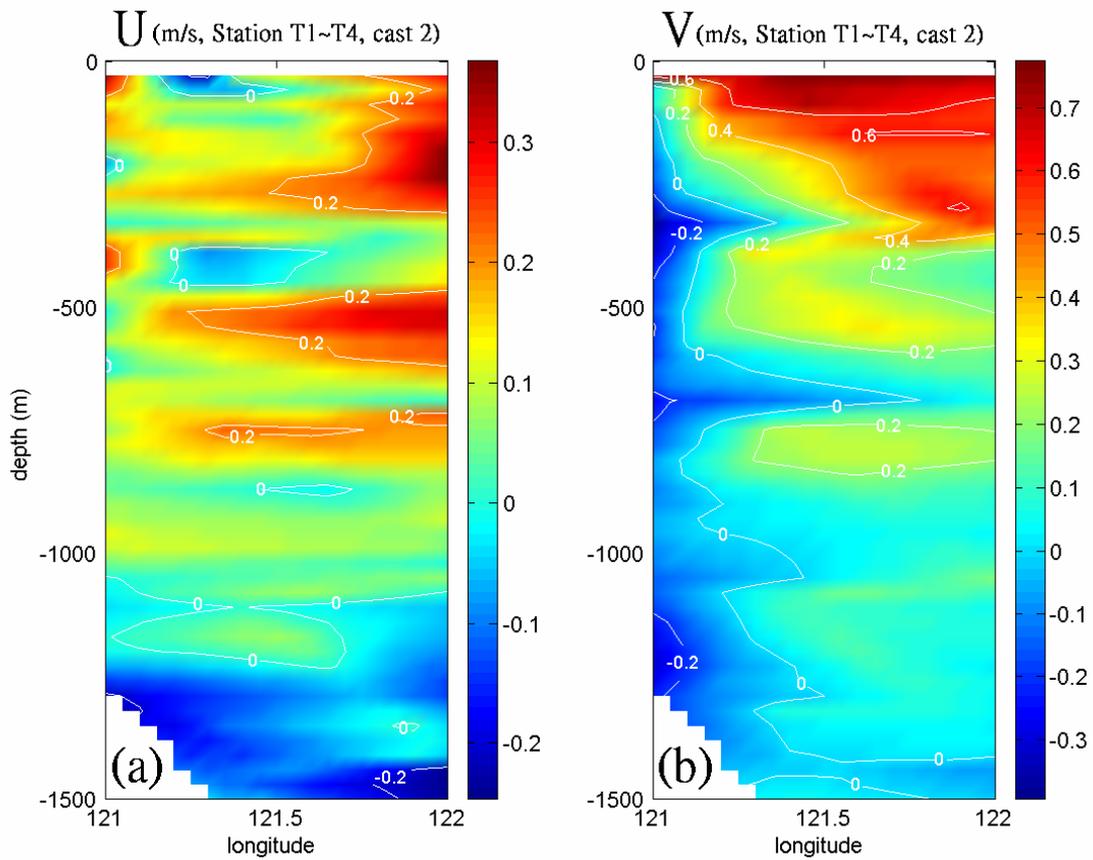


圖 23. 7 月航次第二次觀測的流剖圖(沿著緯度線 21.92° ; 經度介於 121° ~ 122° 之間), (a)代表東西向流速 U , (b)代表南北向流速 V 。

July Sb-ADCP, 20m depth

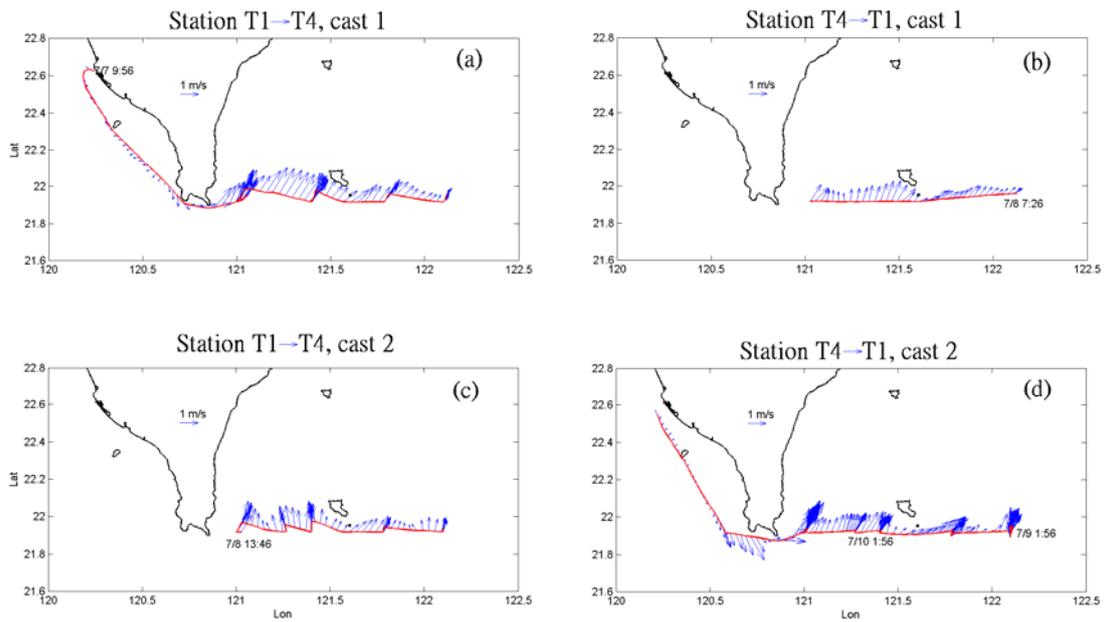


圖 24. 7 月航次 Sb-ADCP 的流矢圖，(a)代表第一次觀測時，T1 站到 T4 站，(b) 代表第一次觀測時，T4 站返回 T1 站，(c)代表第二次觀測時，T1 站到 T4 站，(d)代表 T4 站由右至左返回高雄港。

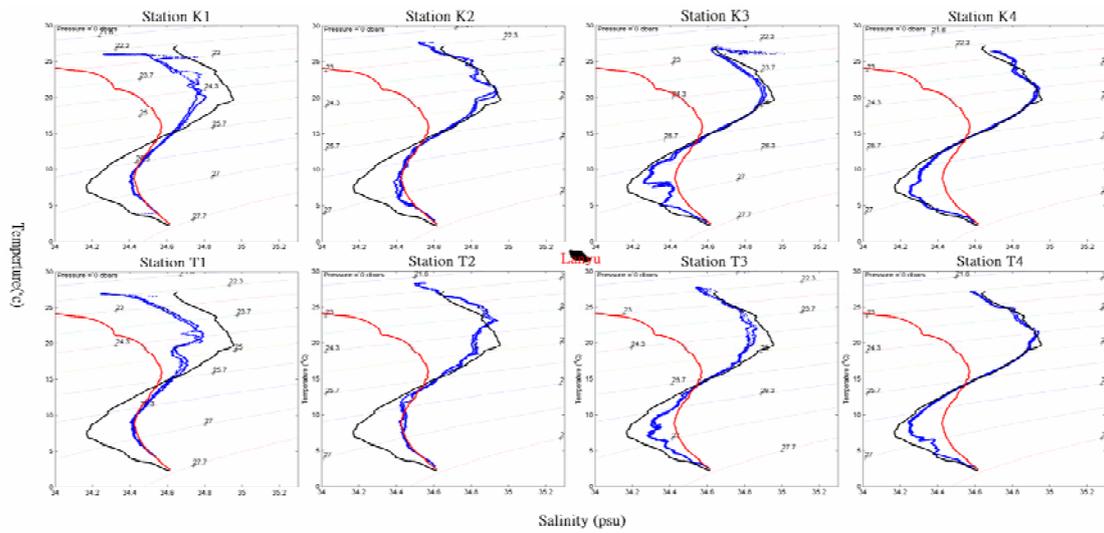


圖 25. 4 月航次的溫鹽圖，紅色線代表南海水，黑色線代表黑潮水，而測站的水文特性用藍色線來表示。上方的圖為蘭嶼北方的 K 測線，由左至右依序為 K1~K4 測站；下方的圖為蘭嶼南方的 T 測線，由左至右依序為 T1~T4 測站。

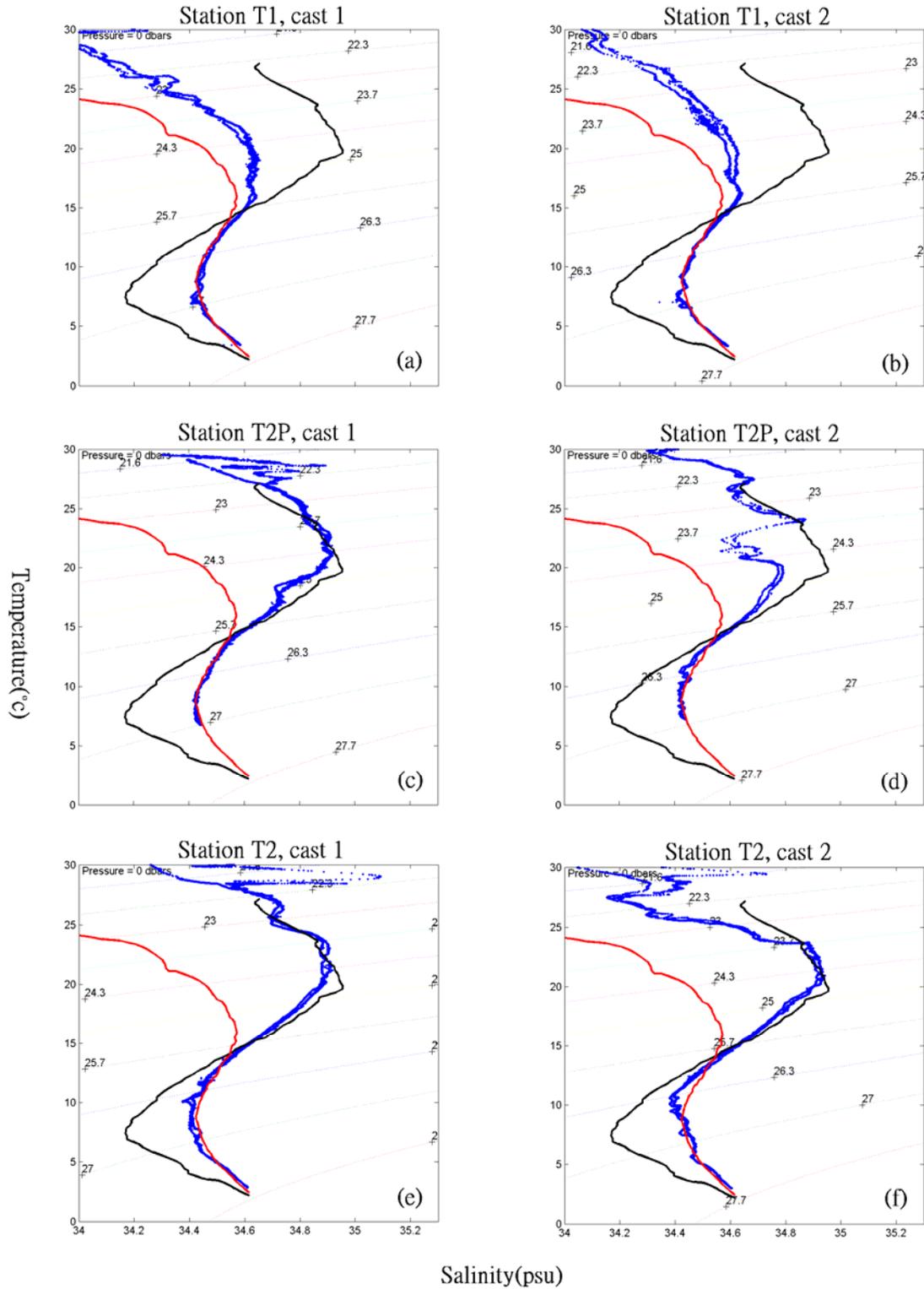


圖 26. 7 月航次兩次觀測的溫鹽圖，(a)、(b)代表 T1 站的兩次觀測，(c)、(d)代表 T2P 站的兩次觀測，(e)、(f) 代表 T2 站的兩次觀測。

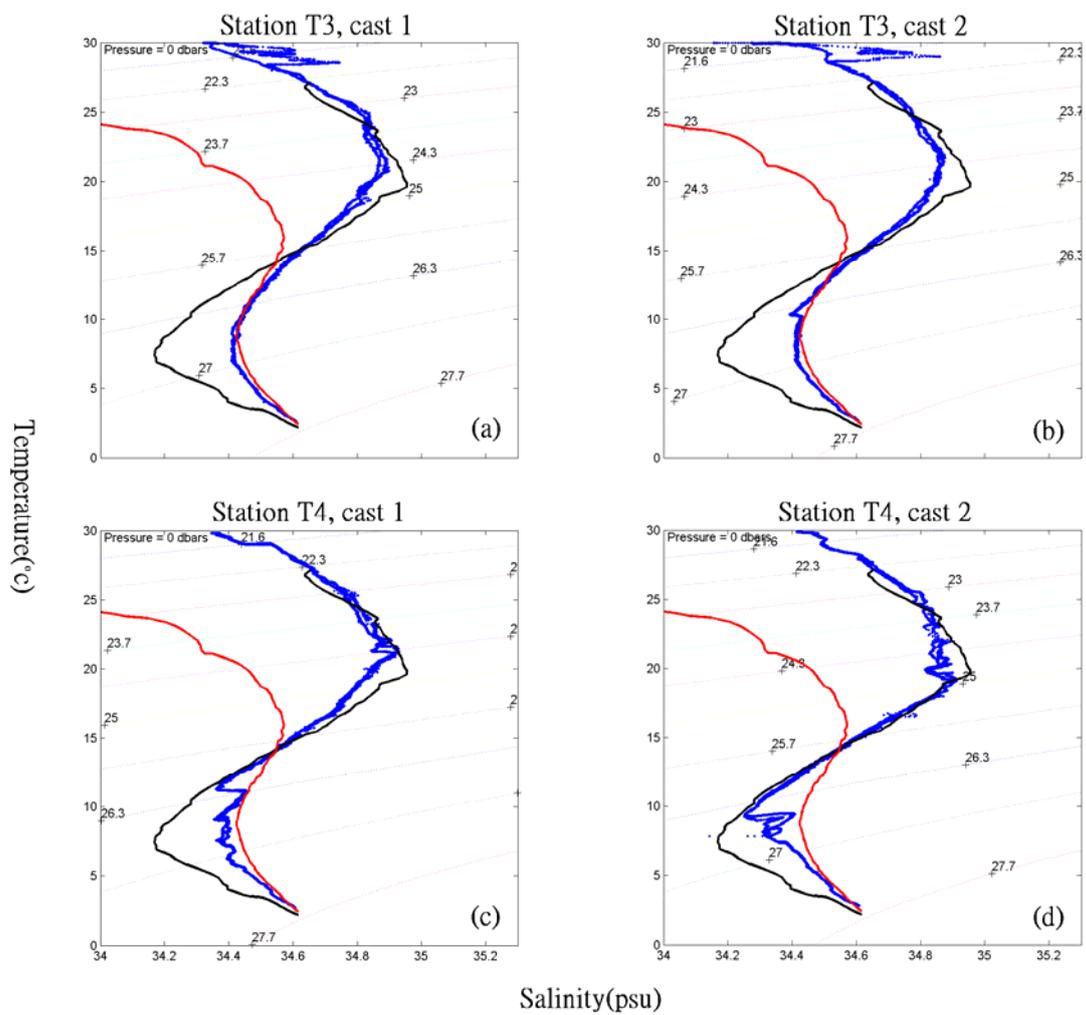


圖 27. 7 月航次兩次觀測的溫鹽圖，(a)、(b)代表 T3 站的兩次觀測，(c)、(d)代表 T4 站的兩次觀測。

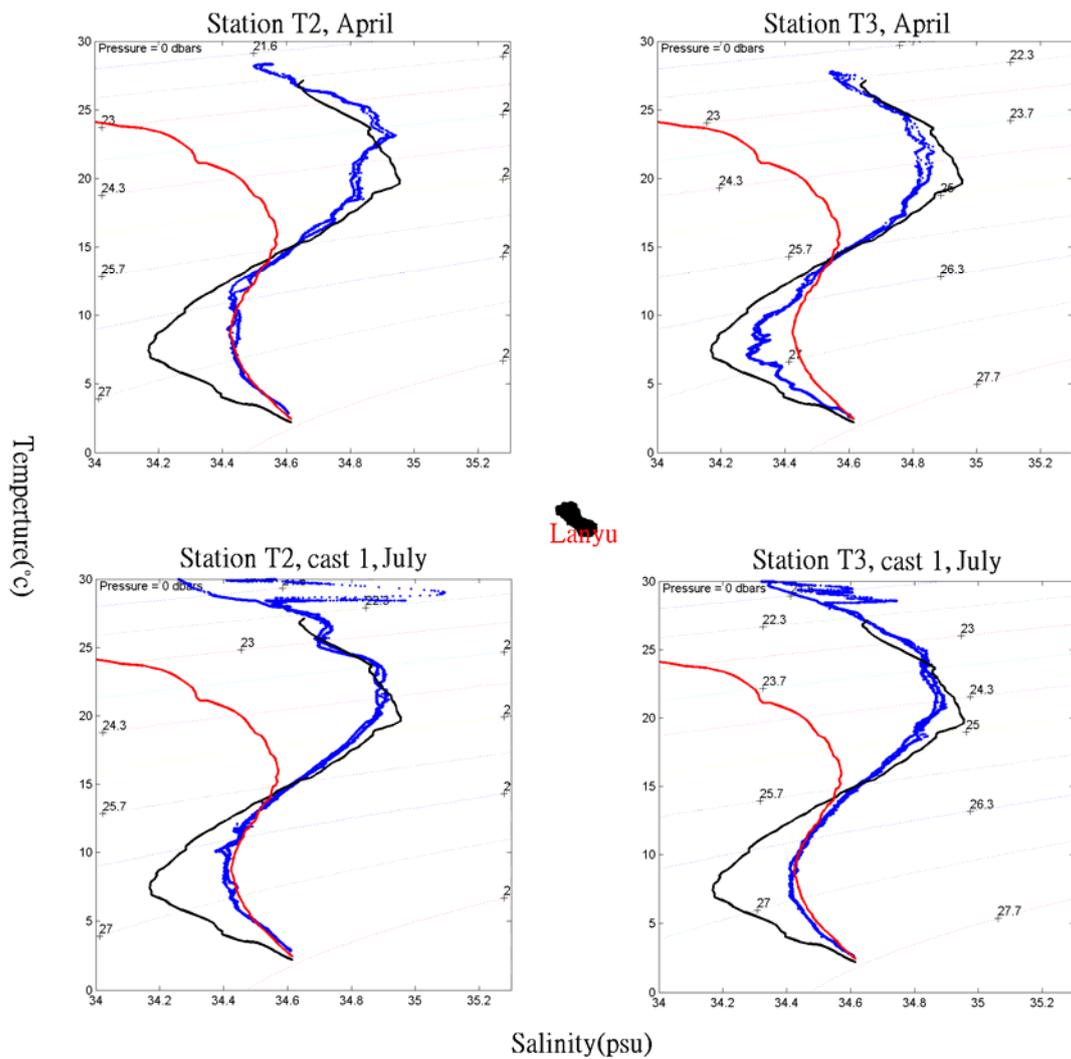


圖 28 4 月航次 T2、T3 站與 7 月航次 T2、T3 站第一次觀測的溫鹽圖，紅色線代表南海水，黑色線代表黑潮水，而測站的水文特性用藍色線來表示。

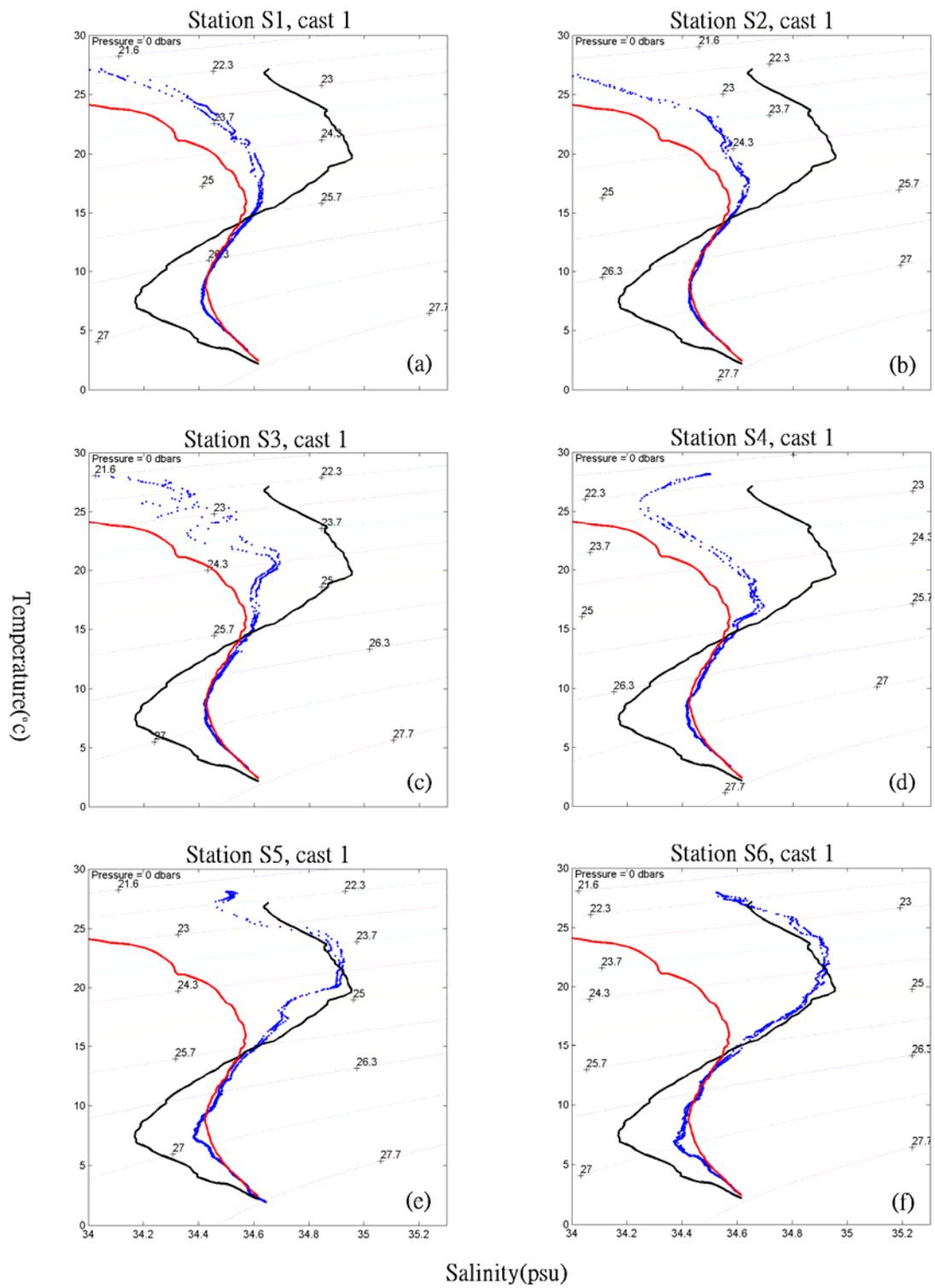


圖 29. 10 月航次第一次觀測的溫鹽圖，(a)~(f)依序代表 S1~S6 測站。

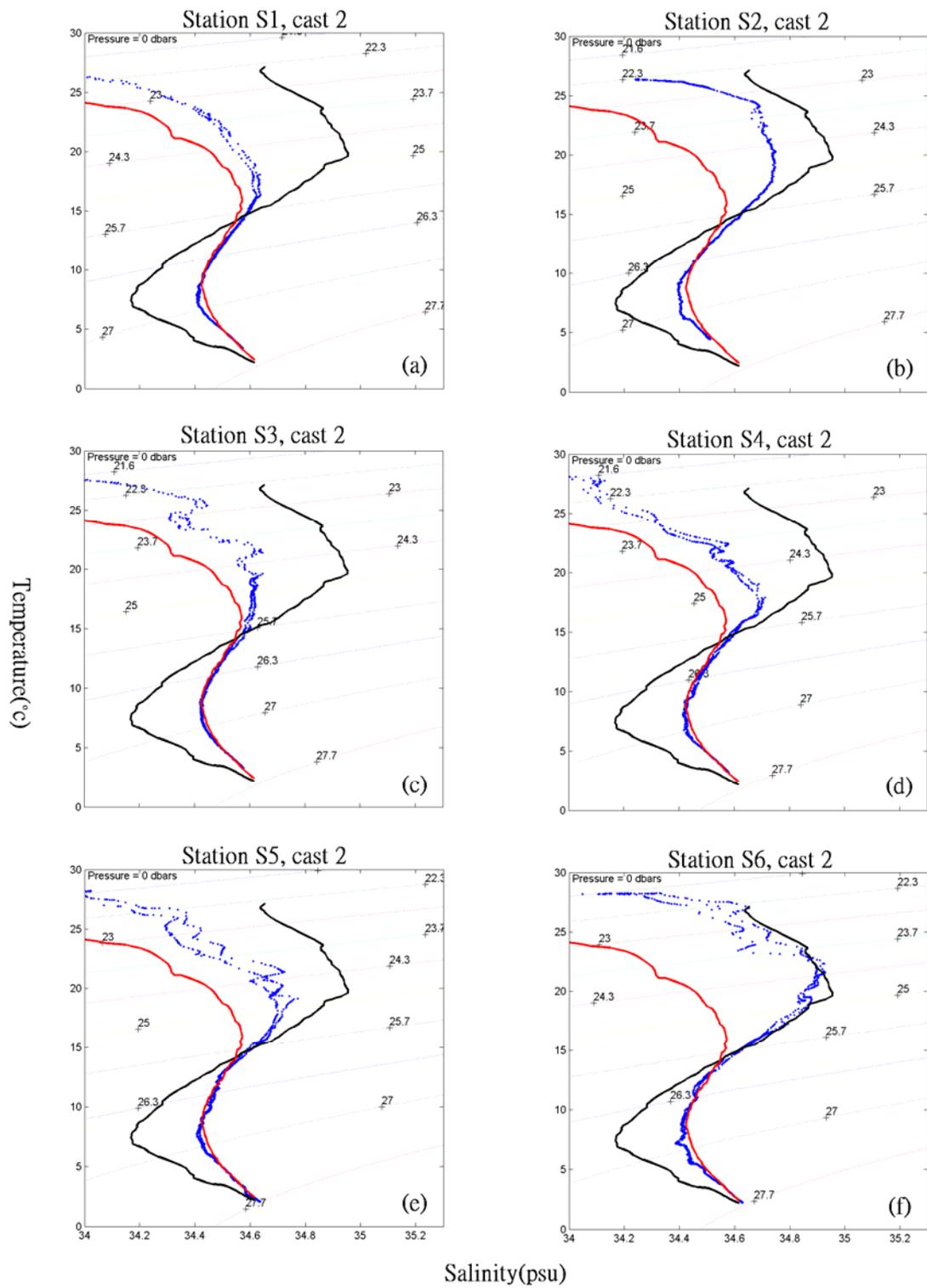


圖 30. 10 月航次第二次觀測的溫鹽圖，(a)~(f)依序代表 S1~S6 測站。

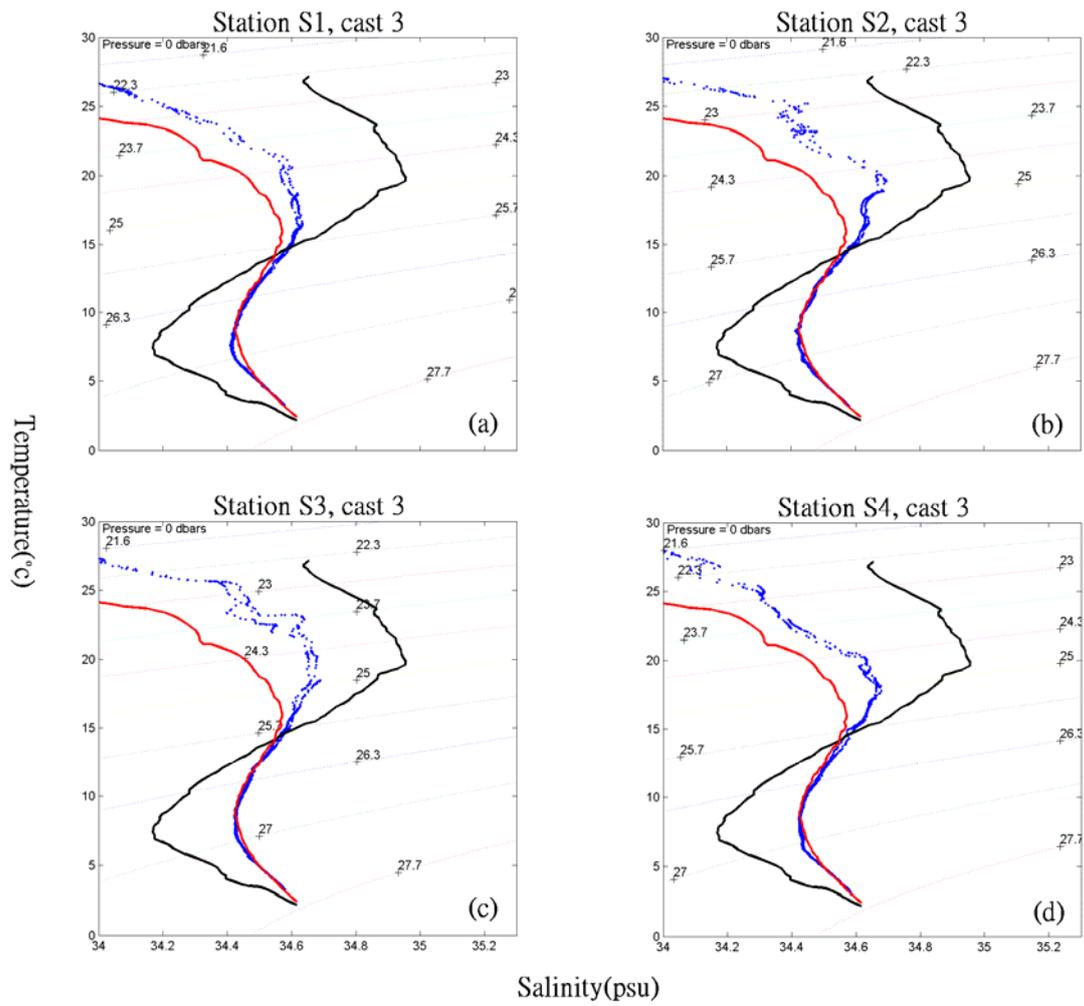


圖 31. 10 月航次第三次觀測的溫鹽圖，(a)~(d)依序代表 S1~S4 測站。