

衛星遙測海面溫度和海況儀實測值的比較*

劉瑞貞¹劉倬騰²

摘 要

海面溫度的高低可在衛星上遙測海面熱(紅外)輻射而決定。本文採用 Strong and McClain (1984) 發表之經驗公式, 以 AVHRR 兩個頻道的資料作水汽訂正以求取海面溫度。衛星資料是由中央氣象局提供的72年9月14日06Z之 NOAA-7/AVHRR 海面數位輻射資料, 本文以每 12×12 像素, 約相當 $12.9\text{km} \times 13.2\text{km}$ (以本文研究區域計算) 範圍, 求取一個海面溫度代表值。由於衛星資料中, 預報的軌道參數準確度有限, 本文選擇小島及地形的尖端作為地面校準點, 與衛星軌道方程式作衛星資料的定位, 以利比較由衛星資料推導出之海面溫度 (T_s) 及由海況儀 CTD 實測所得海面溫度 (T_c)。由44對溫度值得到 T_s 平均偏低 0.35°C , 而均方根差為 0.6°C , 遠優於船舶報告的 1.5°C 準確度。McClain (1985) 亦認為其多頻道求取海面溫度的公式有 $0.3\text{--}0.4^\circ\text{C}$ 的偏差, 及 $0.5\text{--}0.6^\circ\text{C}$ 的均方根差, 與本研究結果完全吻合。將 T_s 的分布繪製在麥開脫投影海圖上, 再與日本海況旬報之海面溫度分布相比較, 兩者分布型態亦相當吻合。

一、前 言

海面溫度在氣象與海洋的研究應用上均是一個重要的參數, 在過去十年衛星遙測的發展中, 海溫遙測是最早也是最成功的應用之一。目前, 在美國與日本已廣泛的利用衛星收集海面熱輻射資料推算海面溫度, 將之與船測及各種浮筒記錄海面溫度同時發表, 提供海上作業及研究參考之用。遙測海面溫度所使用的儀器, 最普遍的是 NOAA 衛星系列上的極精密高解像度輻射儀 AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) 以及地球同步衛星之可見光與紅外掃描儀 VISSR (Visible and Infrared Spin Scan Radiometer)。經過近十年的研究, 對於由 AVHRR 亮度溫度值推算海面溫度, 無論利用理論近似法作大氣校正, 或使用實測的海面溫度作迴歸分析都已經得到較船舶報告更為精確的結果。

我國中央氣象局衛星資料接收站於民國70年1月28日正式啓用, 可以直接接收美國 NOAA 及日本 GMS 系列衛星所觀測雲圖及輻射數位資料。中

央氣象局衛星站早在民國71年已經解讀出 AVHRR 的輻射強度, 並進行海面溫度的計算。(曾及曹, 1982), 當時利用 McClain (1981) 發表的經驗公式作水汽訂正, 求得 NOAA-6/AVHRR 遙測海面溫度與臺灣水產試驗所發布的海況旬報比較, 曾及曹認為誤差在 $1^\circ\text{--}2^\circ\text{C}$ 之間。而 Strong and McClain (1984) 利用浮筒資料與 NOAA-7/AVHRR 導出海面溫度作迴歸分析, 所得到的結果是遙測與船測值比較, 均方根差為 0.6°C 。我們認為遙測海面溫度的精度與應用可行性的決定, 首先需具備有足夠精確的海真值 (Sea Truth) 供作校驗; 同時海洋研究的要求則還需要有精確的定位。本文遂以中央氣象局提供的 AVHRR 數位資料, 利用 Strong and McClain (1984) 發表的經驗公式作水汽訂正求取海面溫度, 再精確的決定每個溫度資料的位置, 以繪製臺灣附近海域的海面溫度分布圖。將遙測所得海面溫度與目前最精確的海溫探測儀器——海況儀 CTD (Conductivity Temperature-Depth) 於同時間在海中實測所得海面溫度, 及日本氣象廳發布的海況旬報相比較,

* 收稿日期: 74年9月4日 送審日期: 74年10月24日 修改日期: 74年11月19日

1. 臺灣大學, 海洋研究所專任助理

2. 臺灣大學, 海洋研究所副教授

以了解衛星遙測海面溫度在臺灣附近海域應用的可行性及其精度。

二、衛星遙測海面溫度的求取

AVHRR 計有 5 個頻道的感測器，其中第 1、第 2 頻道在可見光及近紅外波段，主要以偵測地表（或雲頂）反射的太陽輻射，提供地表（或雲區）的反照率資料；第 3、第 4 及第 5 頻道則屬紅外波段，主要是接收地表熱輻射，除可製作紅外雲圖之外，數位輻射資料主要用以推算雲量、雲頂溫度及無雲區之海面溫度。

由衛星偵測輻射強度來換算海面溫度，基本上是根据普朗克定律，但是由於海面並非完全黑體，而且海面輻射在到達衛星感測器之前會受到大氣的吸收和散射，加上太陽輻射的污染、雲區的覆蓋，因此必須作適當的假設與訂正，而後才能求得海面溫度。

AVHRR 的三個紅外頻道分別位於 3.7 μm ，11 μm 和 12 μm 波段，此三波段在海面的放射率都很接近於 1.0，且均屬大氣窗區波段，亦即大氣的吸收率很微小，因此海面放射率以及大氣吸收的影響可以略而不計，只有水汽的吸收較為嚴重，不可忽視，必須作水汽訂正（曾，1983），（但在火山爆發等某些特殊狀況下的大氣，氣溶膠及懸浮物質含量過高的情況下，只作水汽的訂正以求海面溫度則是不夠的）。至於太陽熱輻射只對第 3 頻道的影響較大（曾，1983），因此在白天第 3 頻道不用來求取海面溫度。由於紅外光不能穿透雲層，我們僅能求得無雲地區的海面溫度。

雲區的判定可由反照率決定。一般而言海面的反照率均在 15% 以下，因此我們以反照率大於 15% 視為雲區，不予處理，至於薄雲和碎雲則靠適當的過濾處理濾除。水汽訂正一般採用多頻道法，即計算所謂的 MCSST (Multi-Channel Sea Surface Temperature)。Prabhakara et al. (1974) 提出利用兩個頻道的亮度溫度作水汽訂正以推算海面溫度。對頻率為 ν 的電磁波而言，大氣透射函數 T_ν 和大氣含水量 W 的關係為：

$$T_\nu(W, T) \cong 1 - K_\nu A \quad (1)$$

其中 T 為溫度， K_ν 為吸收係數， A 在特定大氣狀態下為一常數。將(1)式代入輻射傳遞方程，再將普朗克函數對海面溫度 T_s 作泰勒展開，Prabhakara et al. (1974) 得到亮度溫度 $T_{B\nu}$ 可以下式表示：

$$T_{B\nu} \cong T_s - AK_\nu(T_s - \bar{T}) \quad (2)$$

其中 \bar{T} 為大氣平均溫度。因此，利用兩個以上頻道的亮度溫度即可求得海面溫度。

對 NOAA-7/AVHRR 而言，第 3 頻道在白天因受太陽輻射影響較嚴重，因此僅使用第 4 及第 5 頻道；晚上則使用第 3 ~ 第 5 頻道的亮度溫度求取海面溫度。Strong and McClain (1984) 利用浮筒記錄溫度與衛星推算亮度溫度作迴歸分析，得到推算遙測海面溫度的經驗公式為：

$$\begin{aligned} \text{白天: MCSST} = & -0.61 + 1.0346 T_4 \\ & + 2.58(T_4 - T_5) \end{aligned} \quad (3a)$$

$$\begin{aligned} \text{晚上: MCSST} = & 1.21 + 1.0170 T_4 \\ & + 0.97(T_3 - T_5) \end{aligned} \quad (3b)$$

其中 T_i 表示第 i 個頻道的亮度溫度 ($^{\circ}\text{C}$)，MCSST 則為海面溫度 ($^{\circ}\text{C}$)。將此式求得的海面溫度與實測值比較，均方根差為 0.6°C 。

三、衛星遙測海面溫度的定位

在求得遙測海溫之後，海溫資料的定位則是同等重要的工作，因為唯有確定了位置的海面溫度，其在海洋環境的認識與研究上才有利用的可能。

Ruff and Gruber (1975) 曾提出一個簡便的軌道預報模式來作衛星資料的定位，然而根據 Ruff and Gruber 本身的計算結果顯示，此預報模式的誤差大約在 0.2° (相當約 22km) 範圍內，最高則可達 0.4° - 0.6° ，這樣的準確度在海洋研究上顯然是不足的。(黑潮寬度在臺灣東岸約 50-100km，湧昇流範圍離岸不到 50km)。我們認為誤差的來源主要是由於採用預報的衛星昇交經度和昇交時間所至，而地球與衛星軌道的偏心率亦會產生較小量的誤差，因此我們考慮以地面校準點來反求昇交點經度，同時將定位參考點自赤道往北移到臺灣附近，以取代原來預報的昇交經度與昇交時間，以提高定位的準確度。

Ruff and Gruber (1975) 在地球為完全球體，而衛星軌道為大圓的假設下，建立一個以衛星軌道面為赤道面，而輻射儀掃描線為經線之衛星軌道座標系統，利用球面三角公式求得軌道座標與地球座標之關係如下：

$$\begin{aligned} \sin \phi = & \cos i \sin \phi - \sin i \cos \phi \\ \sin(\lambda_D - \frac{360t}{P_E}) \end{aligned} \quad (4a)$$

$$\sin \tau = (\sin i \sin \phi + \cos i \cos \phi \sin(\lambda_D - \frac{360t}{P_E})) / \cos \phi \quad (4b)$$

式中 ϕ 及 τ 分別為軌道座標緯度與經度， ϕ 為地球緯度， λ_D 為地球座標之衛星昇交點經度與像點所在經度之差，向西為正*。i, P_E 及 t 分別為衛星軌道傾斜角、地球自轉週期以及衛星昇交時間與掃描時間差。因此在衛星軌道高度、傾斜角、掃描速度、昇交經度及時間已知的條件下，若已知地球上某一點之經緯度則可以求得其在衛星影像上之位置，同時亦可將影像投影到地球座標上。

令 τ_0 為參考掃描線之軌道經度， λ_0 為昇交點地球經度，則(1)式表為：

$$\sin \phi = \cos i \sin \phi - \sin i \cos \phi \sin(\lambda_0 - \lambda - \frac{360t}{P_E}) \quad (5a)$$

$$\sin(\tau' + \tau_0) = (\sin i \sin \phi + \cos i \cos \phi \sin(\lambda_0 - \lambda - \frac{360t}{P_E})) / \cos \phi \quad (5b)$$

設衛星週期為 P_s ，則飛行速度為 $\frac{360}{P_s}$ ，經度 τ 可表為：

$$\tau = \frac{360t}{P_s} \quad (5c)$$

選擇幾個小島或地形的尖端作為地面校準點，找出它們在衛星影像上的像點位置和地球座標之經緯度，本文共選用 7 個地面校準點。以第 1 組像點所在掃描線為參考掃描線，令其 τ'_1 值為 0，則其餘 τ'_i , $i=2, \dots, 7$ 為已知，然後利用(2)式分別求得 7 組 (τ_0, λ_0) ，計算結果（詳見劉（1984）文）：

$$\begin{aligned} \tau_0 &= 22.227^\circ & \delta\tau_0 &= 0.0077^\circ \\ \lambda_0 &= 124.564^\circ \text{ E} & \delta\lambda_0 &= 0.0052^\circ \end{aligned}$$

據此，再利用(5)式作影像之定位。

田中總太郎等（1982）製作黑潮流動向量圖，指出其定位誤差之標準差約為 0.9km，但其定位過程十分複雜，且仍須地面校準點。而本文計算結果求得 λ_0 的標準差 0.0052°（約 0.55km，相當於像

註：〔各個參數之定義以衛星南下之考慮請參閱原文。又，劉文俊、沈秀蓉（1984）亦曾將該模式在國內介紹。〕

點的一半寬）， τ_0 的標準差 0.0077°（約 0.85km），顯示此簡便的定位模式應用於臺灣附近 500×500km 海域亦具有相當高的準確度。

四、資料處理的結果

本文所使用的船測資料是國立臺灣大學海洋研究所九連號研究船第 395 航次的 CTD 探測資料，其航線如圖 1。遙測資料則為中央氣象局提供 72 年 9 月 14 日 NOAA-7/AVHRR 5 個頻道的海面輻射資料。我們取用其中 750 條掃描線，每一條掃描線 1000 個像點的資料以分析處理，資料涵蓋臺灣四週及東太平洋海域（參閱圖 2）。

AVHRR 資料推算海面溫度的步驟：

1. 首先將 AVHRR 原始數位資料，由第 2 頻道去除雲區後，計算第 4 及第 5 頻道亮度溫度值。
2. 由公式 (3a) 計算海面溫度值。
3. 經由過濾處理，每 12×12 個像點求出一個海面溫度值。
4. 利用預先選定的校準點求出昇交點經度 λ_0 和參考掃描線軌道經度 τ_0 。
5. 將 λ_0 和 τ_0 代入 Ruff and Gruber (1976) 的公式，計算每一個溫度值的位置。

6. 利用套裝繪圖程式 NCAR 繪製海面溫度分布圖。圖 2 即為結果，其中點線為 28°C 等溫線，實線為 29°C 等溫線，虛線為 30°C 等溫線。

7. 根據各個 CTD 測站的經緯度，以內差法自衛星觀測海面溫度分布中，求出相同位置的海面溫度俾便比較。

我們首先將 CTD 實測海面溫度與衛星遙測海溫比較，其中離臺灣東岸 25km 以內之實測溫度皆被捨棄不用（因其易受陸地溫度及沿岸流的影響，海溫隨時間與空間的變化較大，不同時間測得之 CTD 海溫不能當作海真值。）共取得 44 對溫度值加以比較，各測站遙測及船測海面溫度之變化（見圖 3）顯示兩者關係良好。計算其平均偏差及均方根差分別為 -0.35°C 及 0.6°C，衛星遙測海溫偏低（劉，1984）。

再將海溫分布與日本氣象廳發布之海況旬報比較。圖 4 為九月中旬海況旬報之海面溫度分布，其中 29°C 等溫線自臺灣西南海域向東北延伸，大體而言，臺灣東岸高於 29°C 而西岸之臺灣海峽西部則低於 28°C。由圖 2 亦可見上述顯著之溫度差異，兩者的海溫分布型態亦相當吻合。

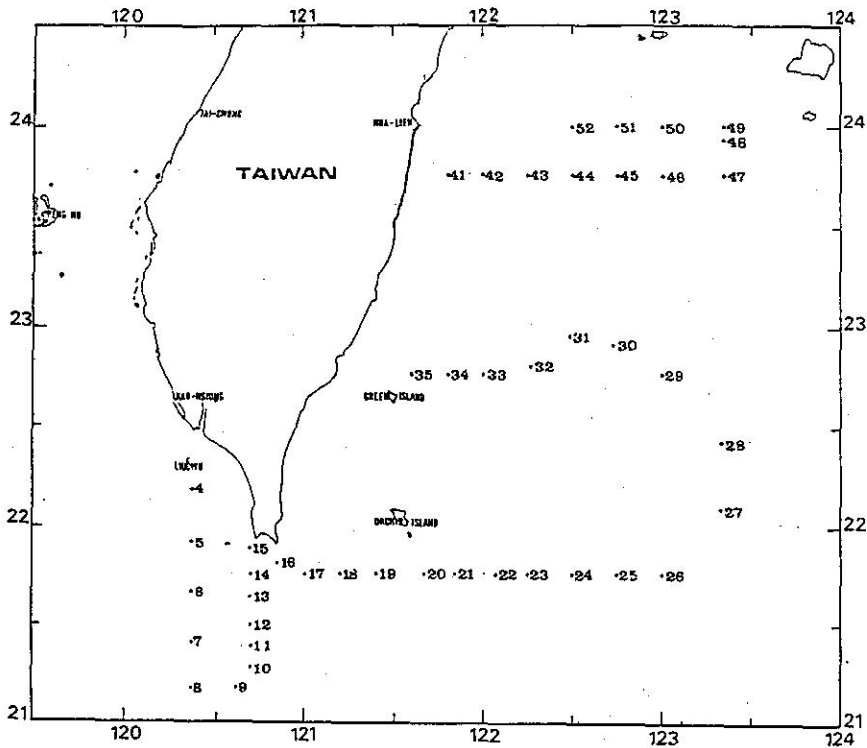


圖 1. 44個船測海真值位置圖(台大海洋所九連號研究船第395航次CTD測站位置)。

Figure 1. Map of the 44 sea-truths for the satellite derived sea surface temperatures. These are the CTD stations of cruise 395, R/V Chiu-Lien of Institute of Oceanography, National Taiwan University.

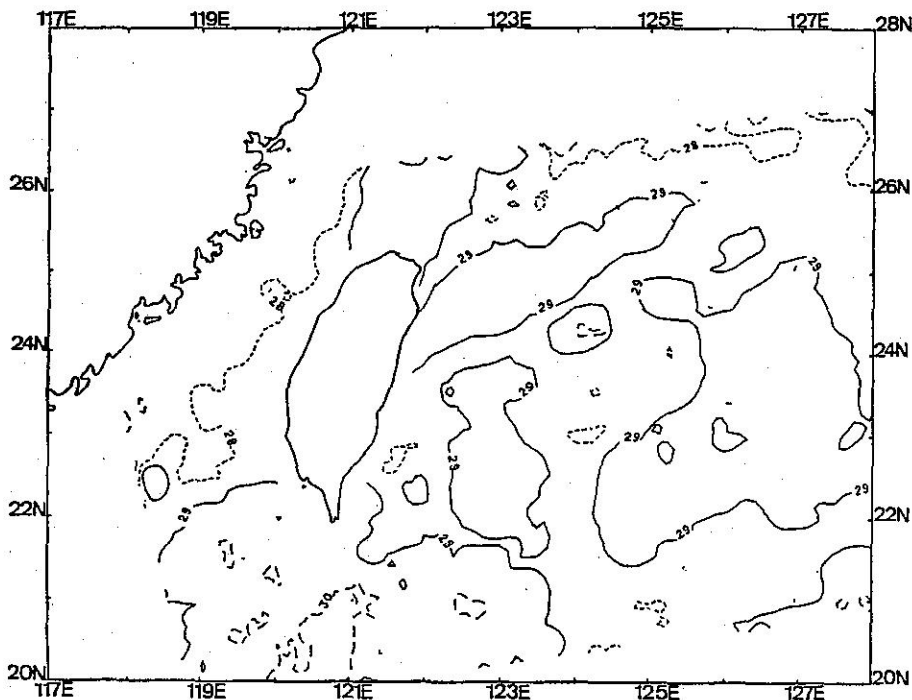


圖 2. NOAA-7/AVHRR 導出 SST 分布圖 (說明見本文)。

Figure 2. Sea surface temperature distribution derived from NOAA-7/AVHRR data (see text for discussion).

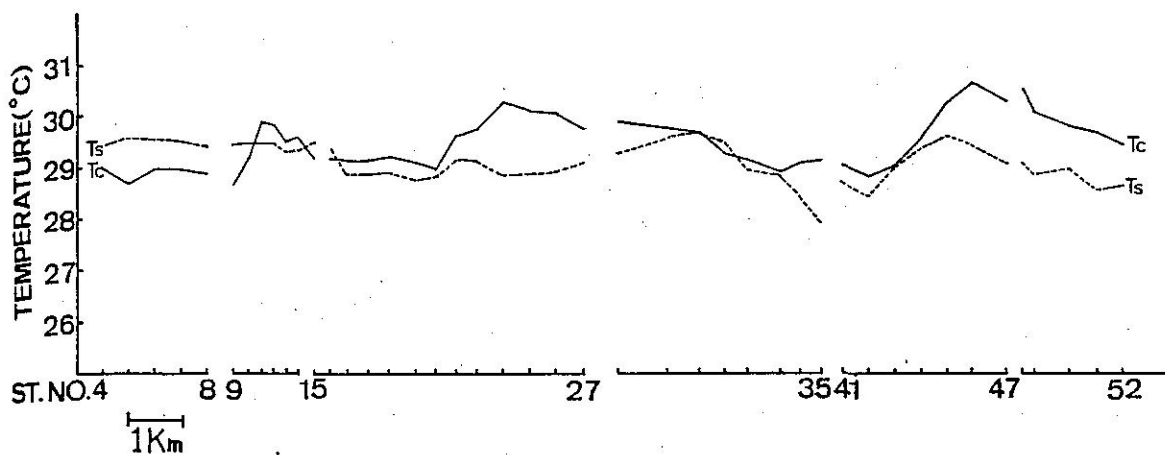


圖3. AVHRR 推導海溫(T_s)與CTD實測值(T_c)之比較。

Figure 3. AVHRR-derived SST (T_s) vs CTD-measured SST (T_c).

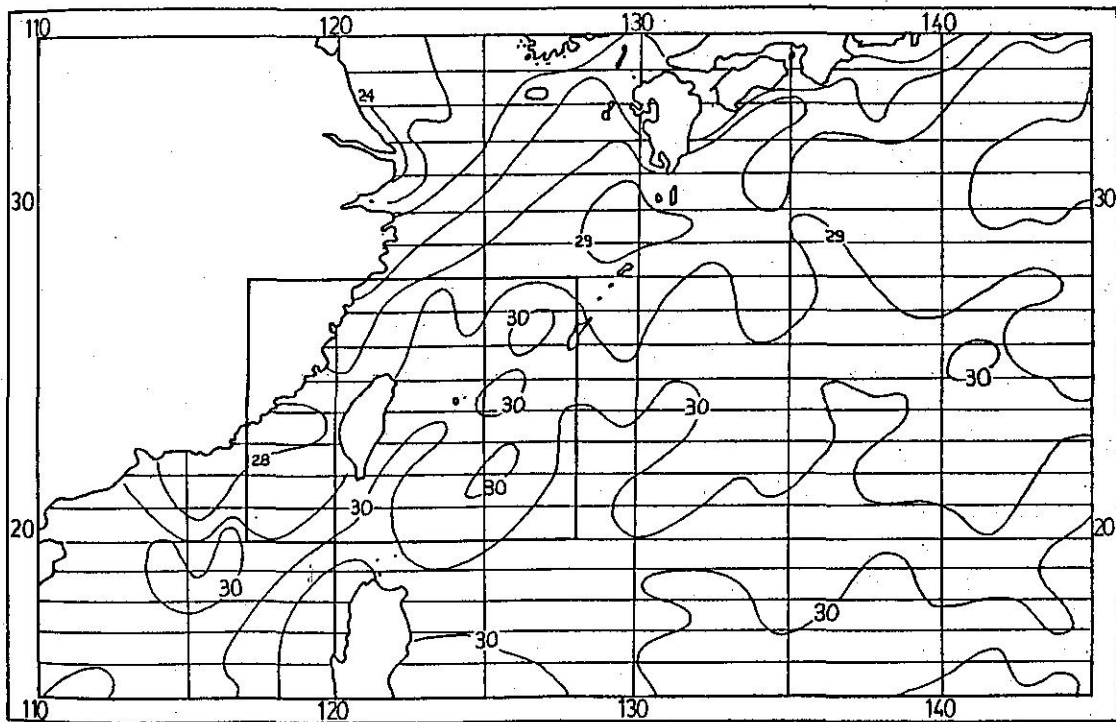


圖4. 日本氣象廳發布海況旬報9月中旬海面溫度分布圖(部分)。圖中粗線方塊為本文研究區域。

Figure 4. SST distribution for Mid-September, 1983; replotted from Japan Meteorological Agency's publication. The rectangle enclosed by the heavy lines is the studied area as in Figure 2.

五、討 論

用以作為遙測海面溫度校準的海真值是決定遙測值準確度的關鍵要素之一。我們選用 Strong and McClain (1984) 發表的經驗公式求取海面溫度，再與目前最精密的海溫探測儀器海況儀 CTD 實測值比較，遙測海面溫度平均偏低 0.35°C ，而均方根差只有 0.6°C ，較船舶報告的 1.5°C 要好得多。McClain (1985) 表示，由 MCSST 的公式 (3a) 及 (3b) 計算所得之海面溫度，較船舶報告之海面溫度平均偏低 0.3°C 至 0.4°C ，標準誤差為 $0.5-0.6^{\circ}\text{C}$ 。因此，只要修正推算遙測海溫的迴歸方程，即可獲得偏差值在 0.05°C 以下的遙測海溫。最直接的方式為修改公式 (3a) 中的常數項，即

$$\text{MCSST} = -0.26 + 1.0346 T_4 + 2.58(T_4 - T_5) \quad (6)$$

但是，若要同時改進（減低）標準誤差，我們得重作迴歸分析，或者更精確地計算水汽效應。前者需要許多對涵蓋了各個地區及季節，且同時測得的遙測及實測海面溫度值，再由理論推導之公式推算海面溫度。而後者需要即時的水汽剖面資料，如 TOVS (TIROS Operational Vertical Sounder) 資料，但是 TOVS 的解析度不佳，不適用於臺灣海峽。所以目前較為可行，亦即國內研究人員所採用的途徑為尋求較適於臺灣附近海域的經驗性公式。其方法如下：1. 收集臺灣附近在不同季節裏的遙測及實測海面溫度對，再用迴歸分析法微調 Strong and McClain 的經驗性公式，使其較適合臺灣附近海域；或者 2. 由臺灣附近海域的歷史性探空資料（應包括陸上及海上各個區域，尤其是黑潮流域內外水汽含量差異較大的海域），以理論或數學模式推導出遙測及實測海溫的關係。兩種方法各有其優點，其成果將指日可待。

誌 謝

本文承中央氣象局衛星站提供衛星資料；黃鴻榮、顏泰崇與劉文俊三位先生提供衛星軌道及儀

器參數；國立中央大學太空及遙測研究中心提供 VAX-IDIMS 機器使用時間；以及邱爾文教授提供處理海溫之經驗，謹表最深之謝忱。

參 考 文 獻

- 曾忠一 (1983) 大氣遙測——原理與應用。中央研究院物理研究所：287pp.
- 曾忠一、曹幼民 (1982) 氣象衛星遙測資料之應用——海面溫度之求取。第三屆大氣科學學術研討會論文集編：402-406.
- 劉文俊、沈秀蓉 (1984) 繞極衛星之軌道預報及其應用。氣象學報，第三十卷第三期：31-39.
- 劉瑞貞 (1984) 衛星遙測海面溫度之初步研究。國立臺灣大學海洋研究所碩士論文：78pp.
- 田中總太郎、杉村俊郎、西村 司、二宮 泰及島山祐二 (1982) NOAA-6/AVHRR データによる 黒潮流動ベクトル圖の作成と海洋渦および短週期蛇行に関する考察。日本リモートセンシング學會誌 Vol. 2 No. 3: 11-32.
- McClain, E. P. (1981) Multiple atmospheric window techniques for satellite derived sea surface temperature. In "Oceanography from space", edited by J. F. R. Gower, Plenum: 73-85.
- McClain, E. P. (1985) Comparative performance of AVHRR-based multichannel sea surface temperatures. Amer. Geophys. Union Trans. EOS, Vol. 66, No. 18, p. 284.
- Prabhakara, C., G. Dalu and V. G. Kunde (1974) Estimation of sea surface temperature from remote sensing in the 11-to 13- μm window region. J. Geophys. Res. 79 (33): 5039-5044.
- Ruff, I. and A. Gruber (1975) Geographical relations between a satellite and a point viewed perpendicular to the satellite velocity vector (side scan). NOAA Tech. Memo. NESS 65, U. S. Dept. of Commerce, Washington, D. C.: 14pp.
- Strong, A. E. and E. P. McClain (1984) Improved ocean surface temperatures from space-comparisons with drifting buoys. Bull. of Amer. Meteorol. Soc., 65:138-142,

The Comparison between Satellite Derived and in Situ Measured Sea Surface Temperatures

Pay-Jen Liu and Cho-Teng Liu

Research Associate Associate Professor

(NTU/Institute of Oceanography)

ABSTRACT

The thermal radiation of the sea surface can be remotely sensed up on the satellite and used to derive the sea surface temperature (SST). To remove the atmospheric moisture contamination on the measurements, we adopted Strong and McClain's (1984) empirical method of deriving SST with two infrared channels of AVHRR data. The satellite data, provided by the Central Weather Bureau, are NOAA-7/AVHRR High Resolution Picture Transmission (HRPT) data at 06 Z of September 14, 1983. Each derived SST represents an area of the size of 12 pixels \times 12 pixels, which is about 12.9km \times 13.2km in this study. To overcome the inaccuracy imbedded in the forecasted satellite orbital parameters, we use small islands and satellite's orbital equations to pinpoint the geographical position of each pixel, in order to compare satellite derived SST(T_s) against co-located SST (T_c) measured by the Conductivity-Temperature-Depth (CTD) instrument. From the comparison of 44 pairs of T_s and T_c , T_s is biased 0.35°C lower than T_c , with rms difference of 0.6°C, which is much better than the 1.5°C accuracy of ship injection temperatures. McClain (1985) reached similar conclusion: T_s , computed from their empirical formula, is biased lower than the ship-observed SST by 0.3-0.4°C, with rms deviation of 0.5-0.6°C. The computer-contoured SST distribution, derived out of this single satellite image, agrees well with the 10-day (September 11-20, 1983) mean SST distribution published by Japan Meteorological Agency.