

同化在海面水溫資料之應用

黃世任¹ 蔡政翰¹ 陳炫杉² 徐月娟³ 陳仁曾³

¹國立臺灣海洋大學海洋環境資訊系

²美國 NOAA 物理科學家

³中央氣象局海象中心

摘要

本研究以美國國家海洋暨大氣總署(NOAA) $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 之全球海水表面溫度場，作為涵蓋臺灣四周海域為主之範圍(21.375°N - 26.75°N ; 116.375°E - 122.75°E) $0.125^\circ \times 0.125^\circ$ 的海溫分析背景資料。並且對中央氣象局在臺灣海域現場量測之海水表面溫度資料進行資料品質檢驗，本研究以通過檢驗的海溫資料作為實測資料的依據。進而建立資料同化模式，使現場量測資料融入背景資料，製作臺灣地區海水表面溫度分析圖。本研究利用variational data assimilation以達成資料同化，此法現被NOAA應用於波浪預報模式與實測資料之同化。本研究的成果已在中央氣象局應用，將經資料同化後之臺灣附近海域水溫圖在中央氣象局網站上公佈，以供社會大眾使用。

前言

海水溫度是海洋生物生活環境的重要指標。例如臺灣的重要漁獲資源烏魚，每年都會隨著臺灣海峽大陸冷水團的移動，而洄游於臺灣與大陸沿海附近海域。同樣具高經濟價值的鮪魚、魷魚和鰹魚等，也有其習慣生活的海水溫度。所以海水溫度的分布圖的取得，可協助正確的判斷漁場位置。通常表層海水為混合層，這層海水的溫度呈均勻分布。所以海表面所測量到的水溫也可做為這層海水溫度的指標。

傳統的海面溫度觀測是利用商船或漁船在航行或作業時所測量的資料，其觀測方法大致可分為(1)水桶法，(2)引擎入口溫度法，(3)拖曳式電熱阻器法，及(4)船身接觸法等。傳統測量受限於研究經費及船舶的航道與作業區域，所觀測到的資料在間時及空間的分布上受到許多限制。而衛星觀測則能週期性地同時測量大範圍海域，可彌補傳統觀測的限制。因此衛星觀測的海溫已漸被接受與應用。

在1970年美國國家環境衛星部門(National Environmental Satellite Service, NESS)利用紅外線窗區頻道之亮度溫度與海面溫度間的正相關，建立了海面溫度反演方程式(Smith et al., 1970)，並用以求取全球海面溫度。由於紅外線窗區頻道亮度溫度值的大小會受到大氣中水汽的影響，Brower 等人(1976)在海面溫度的反演過程加入了水汽吸收頻道，以訂正水汽所造成的誤差。而 McMillin(1975)利用紅外輻射傳送方程的基礎，推導出從多重窗區頻道反演海面溫度的理論，並建立了海面溫度與衛星量測之亮度溫度間的線性關係(McMillin and Crosby, 1984)。McClain 等人(1985)將此線性關係應用到美國國家海洋暨大氣總署(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)所屬衛星所酬載的特高解析輻射計(Advanced Very High Resolution Radiometer, AVHRR)資料，建立

了多頻道海面溫度反演法(Multi-Channel Sea Surface Temperature, MCSST)。而美國國家環境衛星及資料資訊局(National Environmental Satellite and Data Information Service, NESDIS)也陸續發展出非線性海面溫度反演法(Kidwell, 1995)。近年劉和劉(2000)應用具備與 AVHRR 相似紅外頻道的地球同步衛星(Geostationary Meteorological Satellite, GMS)資料及美國國防氣象衛星(Defense Meteorological Satellite Program, DMSP)上的特殊微波影像感應計(Special Sensor Microwave/Imager, SSM/I)資料，估算海面溫度及相關氣象參數，並探討梅雨季海上中尺度對流系統。目前在國內學術機構如海科中心與海洋大學海洋科學系已有將 NOAA 之 AVHRR 所測得之每日海水表面溫度公佈於各自網站上(www.ncor.ntu.edu.tw/nrsst 與 sun4.oce.ntou.edu.tw)，但因臺灣上空經常被雲遮蔽，臺灣附近每日海水表面溫度圖卻不盡理想，反而較長時間(如一個月)拼湊成或平均圖才可看到較完整之海水表面溫度圖。但此類資料有時無法滿足某些應用上的需求。氣象局海象中心現亦積極向大眾提供每日臺灣附近海域表面溫度圖，擬以 NOAA 在其網站(polar.ncep.noaa.gov/sst/)提供之全球海水表面溫度圖為基本架構，此水溫圖乃根據衛星量測之溫度、24小時內之海上浮標與船測資料與根據衛星測得之海冰覆蓋得到之水溫合成得到之經緯度各 0.5° 解析度之資料。根據 NOAA 之分析比對，認為此每日海溫資料在大西洋與太平洋黑潮海域之浮標資料皆很吻合。因此基本上若每天到此網站下載即可作出臺灣附近海域每日表面溫度圖。

另外中央氣象局海象中心在臺灣沿海設有海象浮標、觀測樁及潮位站，並在其上裝有溫度計。這些現場水溫可以融入上得之 0.5° 解析度之 NOAA 的每日表面溫度圖。本文引用 NOAA 應用於波浪預報之資料

同化程式,將現場海溫資料經品管過濾後以 variational data assimilation 資料同化技術以製作臺灣地區海水表面溫度分析圖。

研究方法

本研究首先由 NOAA 取得 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 解析度之海溫資料,其可稱為背景資料,接續是如何將現場水溫資料融入背景資料,以將臺灣附近海域之水溫更準確得表現出來。本研究所使用的同化技術為 Derber and Rosati (1989)與 Behringer (1994, 1998)所發展之一 variational data assimilation 法,又稱 DRB 法。此法與 Chen(2002)所介紹使用於波浪預報模式之同化技術近似。DRB 法利用 Lorenc(1986)之汎函數(functional)。Derber and Rosati(1989), Behringer et al. (1998) 和 Kelly, et al. (1999)曾應用此法於海面溫度場,而 Behringer (1994)則應用於海面高度場。

若將前述之背景資料,即由 NOAA 取得之水溫以 T_n 表示,其又可視為初臆值,現場水溫以 T_o 表示,分析值以 T_a 表示,其為目標真實值。另再定義 x_o 為現場測站位置之觀測增量陣列

$$x_o = T_o - T_n$$

而分析增量陣列,亦稱為校正場為

$$x = T_a - T_n$$

Lorenc(1986)之汎函數(functional), J 為

$$J = \frac{1}{2} x^T E^{-1} x + \frac{1}{2} [K(x) - x_o]^T F^{-1} [K(x) - x_o] \quad (1)$$

(1)式為矩陣式,其中上標 T 與 -1 分別表示轉置(transpose)與反矩陣(inverse), E 為 $N \times N$ 初臆值誤差 covariance matrix, K 為因初臆值位置點與現場測站位置不同所需之內差運算(interpolation operator),在此 K 為線性, F 為 $M \times M$ 觀測值誤差 covariance matrix, M 是現場測站數, N 是初臆值個數。(1)式第一項可視為初臆誤差之度量,第二項為觀測之度量。

本研究利用空間結構矩陣 E 將觀測增量 x_o 分配到初臆值場。依 Derber and Rosati(1989), Behringer (1994) 與 Behringer et al. (1998)之作法,在任兩點距離 r 時之 covariance 可假設為空間上具高式分配特性,

$$A \exp[-(r/B)^2]$$

其中 A 為初臆值誤差 variance, B 為初臆值誤差之空間尺度 correlation。 A 控制初臆值與觀測值間之相對比重,其可經由比較初臆值與觀測值得出。而可由初臆值變化量之 correlation 尺度得到。

在海面溫度場通常觀測值誤差 covariance matrix, F , 是不易知道的,但因觀測誤差可視為空間上不相關, F 變成對角線矩陣, F^{-1} 也就較易計算。此處 F^{-1} 的對角線將用觀測誤差變異數的估計值的倒數代。

得到汎函數 J 後, J 可用來解分析增量 x , 然後再解 T_a 。若將 J 對 x 最小化雖可求解,但 DRB 法是用疊代法(iteration)求解。現定義 g 為汎函數之微分

$$g = \partial J / \partial x = E^{-1} x + K^T F^{-1} [K(x) - x_o]$$

$$h = Eg$$

疊代法第一步時, x 設為零。因此

$$x^1 = 0,$$

$$g^1 = -K^T F^{-1} x_o,$$

$$h^1 = Eg^1$$

上標 1 表示疊代法之第一次。搜尋方向(d 與 e) 在初始亦設為 0,

$$d^0 = 0$$

$$e^0 = 0$$

然後用下列之計算順序於各疊代步驟中即可解出 x 。

$$d^n = -h^n + \beta^{n-1} d^{n-1}$$

$$e^n = -g^n + \beta^{n-1} e^{n-1}$$

$$f^n = e^n + K^T F^{-1} K d^n$$

$$a^n = (g^n)^T h^n / [(d^n)^T f^n]$$

$$g^{n+1} = g^n + \alpha^n f^n$$

$$x^{n+1} = x^n + \alpha^n d^n$$

$$h^{n+1} = Eg^{n+1}$$

$$\beta^{n+1} = (g^{n+1})^T h^{n+1} / [(g^n)^T h^n]$$

上標 n 表示第 n 次之疊代, n 初始質為 1。通常 3 次漸代就可收斂(Derber and Rosati 1989)。

實測海溫資料分析與品管

中央氣象局海象中心將海溫分析分為大範圍及小範圍兩種,兩範圍之區域經緯度由海象中心供給。大範圍: $1^\circ N-41^\circ N$; $99^\circ E-155^\circ E$ (圖 1),

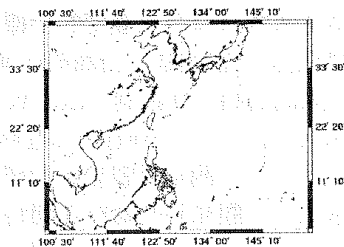


圖 1: 大範圍區域經緯度($1^\circ N-41^\circ N$; $99^\circ E-155^\circ E$)。

小範圍: $21.375^\circ N-26.75^\circ N$; $116.375^\circ E-122.75^\circ E$ (圖 2)。大範圍資料直接採用 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ NOAA 之資料,小範圍之海溫才加入現場量測之海水表面溫度以作資料同化(assimilation), 網格大小為 $0.125^\circ \times 0.125^\circ$ 。

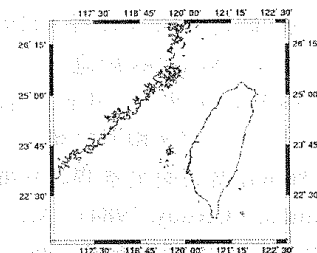


圖 2: 小範圍區域經緯度($21.375^\circ N-26.75^\circ N$; $116.375^\circ E-122.75^\circ E$)。

中央氣象局海象中心提供本研究 2003/01/01~2003/02/15 期間 10 潮汐站之海溫與潮汐資料和 6 浮標站與七股樁之海溫。其中較值得注意的是竹圍(圖 3)與新竹之海溫有明顯的突跳現象。若將海溫與潮汐水位相比較,由圖 4 即可看出突跳現象發生於低水位時,此現象可能與溫度探針接近水面有關。另外圖中也顯示許多測站之海溫資料有中斷現象,較嚴重為花蓮潮汐站(圖 5)與成功潮汐站。爲了避免因溫度探針問題所產生的誤差,海象中心會對各站之溫度探針作定期檢校。

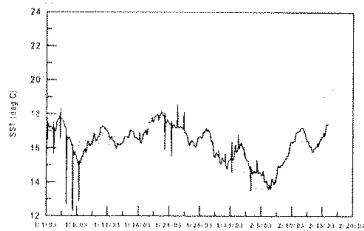


圖 3：竹圍潮汐站海溫。

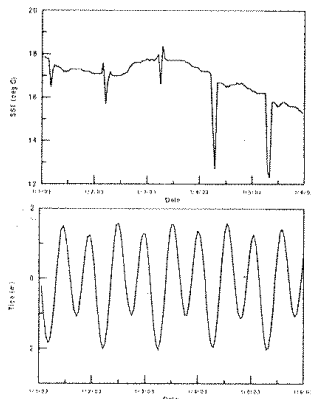


圖 4：桃園竹圍潮汐站海溫與潮汐。

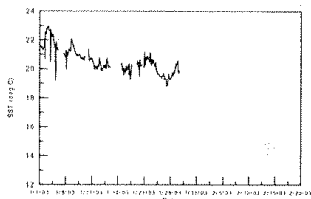


圖 5：花蓮潮汐站海溫。

爲了解各站海溫,圖 6 顯示其於 2003/01/01~2003/02/15 之海溫平均值與標準偏差。值得注意的是龍洞、蘇澳、花蓮、新竹站同時有潮汐與浮標站,浮標站都位於較外海處。由圖 6 可看出龍洞與蘇澳站之兩種海溫之平均值與標準偏差較接近,但其他兩站差別較大,花蓮站之平均值差到 3.5°C,這又顯示溫度探針作定期檢校之需要。

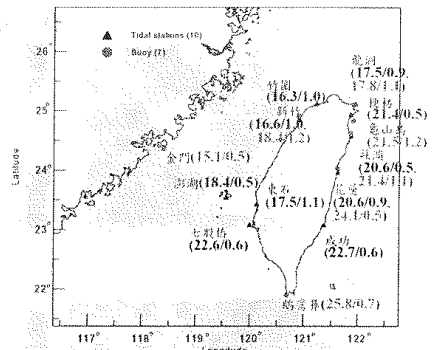


圖 6：2003/01/01~02/15 各站水溫之平均值與標準偏差(°C)。

爲避免將有突跳現象之觀測海溫用來作同化,本研究以各站一天之海溫爲單位,先求出一天海溫之平均與標準偏差值,並將超過平均值上下 3 個標準偏差之海溫去掉。由中央氣象局所提供之臺灣沿岸海域實測海面溫度資料,全部 17 測站於 2003/01/01~2003/02/15 中總共有約 13,500 筆資料,以原始海溫作品管之程式共去除 57 筆有問題之資料。然而此方式還會有漏挑突跳資料的情況。因爲突跳發生時海溫對時間之斜率也會增大,所以本研究進而以海溫對時間之一次微分找其超過平均值上下 3 個標準偏差之資料,作爲資料品管的依據,如此共去除 169 筆資料。結果顯示這種方法將竹圍海溫之 2003/01/01 在 03:00 的突跳現象挑出,而在 2003/01/05 則挑出 06:00 與 08:00 之資料。另外經由平均海溫的品管方法,去除的資料中並未顯示任何浮標站資料,而經由一次微分的品管方法僅有少數之浮標站資料。這可能與浮標站之定期維修有關。若將此兩種方法一併考慮應可將突跳資料較完整得挑出,雖然會犧牲一些可用的資料。但這只是少數,最多一天兩筆。

因 NOAA 之全球海溫資料經緯度解析度各爲 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$,圖 7 上圖爲經雙向線性內插法作成 $0.125^\circ \times 0.125^\circ$ 解析度,在臺灣附近(21.375°N - 26.75°N ; 116.375°E - 122.75°E) 經內插後 2003/01/01 之海溫資料圖。圖 7 下圖爲當日東亞範圍(1°N - 41°N ; 99°E - 155°E , 未內插,解析度爲 0.5°)。

爲了比較 NOAA 與海象中心提供之海溫資料,圖 8 爲各測站海溫於 2003/01/01~2003/02/15 與 NOAA 海溫之均方根偏差(root mean square deviation)值。此偏差最小爲 1.1°C ,最大爲 5°C 。新竹、竹圍、新竹、龍洞、花蓮、東石、澎湖都超過 2°C 。圖 9 爲同一時期之平均偏差。其顯示多數站觀測海溫比背景低。

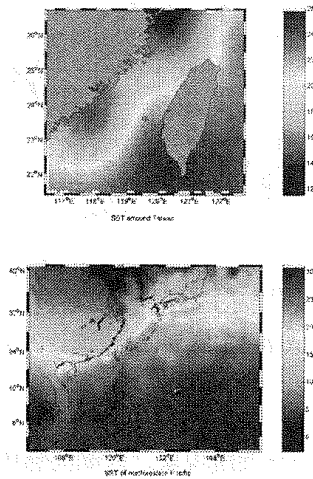


圖 7：NOAA 公佈之 2003/01/01 之海溫。上圖為臺灣附近(21.375N-26.75N; 116.375E-122.75E) 海溫圖，其資料已用線性內插成 $0.125^\circ \times 0.125^\circ$ 經緯度解析度。下圖為東亞地區之海溫圖，其解析度為 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 。

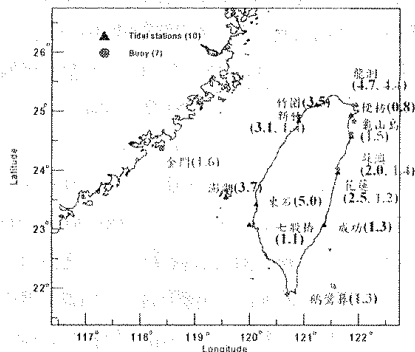


圖 8：2003/01/01~02/15 期間 NOAA 資料與各測站之海溫之均方根(rms)偏差。

在內插方法上本研究更進一步參考 Press et al. (1992)，以雙向三次函數 bicubic spline 方式進行內插。其方法為以欲得內插值之位置點為中心以雙向原資料各 3 點範圍作內插。亦即內插出來之值是用到雙向各為經緯度各 1.5° 的範圍的 NOAA 海溫值。圖 10 為 2003/01/01 之 NOAA 海溫以線性和 bicubic spline 的內插之海溫分佈、等溫線與現場觀測海溫比較圖。其顯示兩內插法得到的海溫相差不多，但仔細可看出以 bicubic spline 內插之海溫，其等溫線比以線性內插之等溫線較圓滑。由於觀測站皆在岸邊，近岸網格無法用 bicubic spline 內插。本研究僅用雙向線性內插法作 0.125° 背景海溫。

結果與討論

以氣象局提供 2003/01/01 觀測資料為例，經統計分析，在同化前背景值與觀測值間平均偏差(背景值 - 觀測值) $xmbe = 1.122$ ，背景值與觀測值間平均絕對偏差 $xmae = 1.831$ ，背景值與觀測值間均方根偏差 $rmse = 2.023$ ，背景值與觀測值間偏差值之標準偏差 $sdd =$

1.683，背景值與觀測值間相關係數 $cor = 0.876$ 。經同化以後之背景值，相同參數為 $xmbe = -0.073$ ， $xmae = 0.787$ ， $rmse = 1.032$ ， $sdd = 1.029$ ， $cor = 0.949$ 。顯然同化以後之背景值與觀測值較吻合。

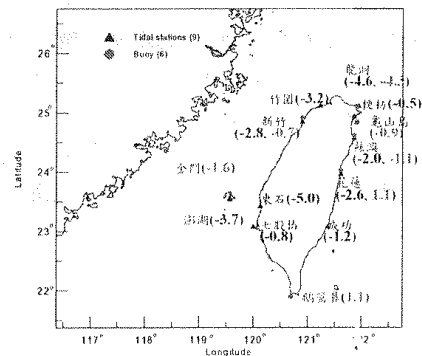


圖 9：2003/01/01~02/15 期間 NOAA 資料與各測站之海溫之平均偏差(觀測-背景)。

圖 10：NOAA 公佈之 2003/01/01 之海溫分佈、等溫線與現場觀測海溫比較圖。上圖為臺灣附近 (21.375°N - 26.75°N ; 116.375°E - 122.75°E) 海溫圖，其資料已用線性內插成 0.125° 經緯度解析度。下圖為用雙向三次函數(bicubic spline) 內插成 0.125° 經緯度解析度。

圖 11 為 2003/01/01(冬季)未同化的海溫。其與圖 10 之上圖稍有不同，雖然同是用線性內差得到的海溫。圖 10 之內插時並未排除陸地上之虛假海溫(原 NOAA 海溫包含陸地上之虛假海溫)，而圖 11(a)為已排除陸地海溫，因此兩圖有些許差別。圖 11(b)為 2003/01/01 以 3 網格為觀測站之影響半徑(即 0.38°)之同化結果。比較圖 11(a)與(b)可看出在有測站資料的影響下海溫分佈的確有改變，等溫線較不規則，而且也往南移。 18°C 等溫線下到臺灣西北角，這是新竹與竹圍測站之效果。 24°C 等溫線在東海岸由臺東出海再於花蓮回到岸線再出海，其為花蓮測站之效。另因鵝鑾鼻測站在臺灣南部有一圈 26°C 等溫線。

為了比較不同影響半徑的同化效果，圖 12(a)與

(b)分別為以 0.5° 和 0.75° 作影響半徑之同化結果。這兩圖顯示出測站海溫的確因影響半徑加大其影響範圍也變大。這可從臺灣南 26°C 等溫線隨影響半徑變大可看出來。影響半徑到底要用多大，在沒有更多資料佐證下，似乎不易決定。但根據 NOAA 在同化技術的經驗，3 個網格大小似乎是可接受，因此本研究建議使用 0.38° 之影響半徑。

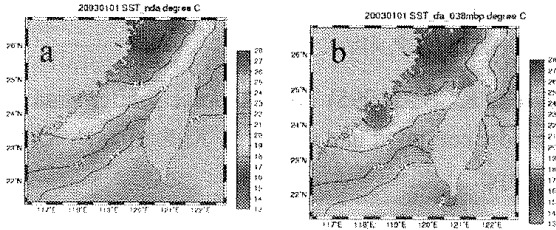


圖 11：2003/01/01(a)未同化之海溫圖，(b)2003/01/01 用 3 網格(0.38°)影響半徑之同化之海溫圖。

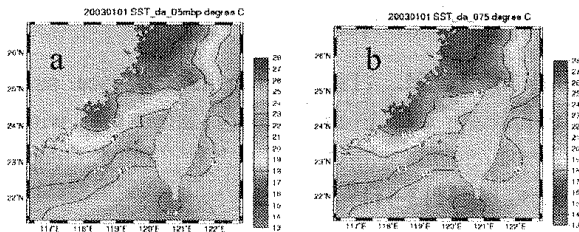


圖 12：2003/01/01(a)用 0.5° 影響半徑之同化之海溫圖，(b)用 0.75° 影響半徑之同化之海溫圖。

表 1:資料同化前後背景與觀測海溫之平均偏差(背景值 - 觀測值, xmbe)與相關係數(cor)

日期	同化前 xmbe	同化後 xmbe	同化前 cor	同化後 cor
2003/01/01	1.122	-0.073	0.876	0.949
2003/04/02	0.916	-0.050	0.700	0.955
2003/07/01	0.210	0.037	-0.225	0.961
2003/10/01	0.031	-0.005	0.317	0.940

氣象局海象中心也提供 2003/04/02、2003/07/01 與 2003/10/01 之觀測海溫以供測試。圖 13a 為 2003/04/02(春季)同化前的背景海溫圖，經同化後 20°C 等溫線往南移至臺灣北海岸，西海岸與花蓮海溫些微上昇(如圖 13b)。在 2003/07/01(夏季)未同化前的海溫分布圖臺灣東海岸與西海岸海溫相似(如圖 14a)，圖 14b 是經同化處理後，西海岸於呈現海溫上昇，東海岸海溫下降。在 2003/10/01(秋季)未同化處理前，在臺灣西南海域有較高海溫，其他區域則界於 28°C 左右(如圖 15a)。圖 15b 為同日經同化後的海溫圖，顯示北海岸海溫下降，其餘海溫上昇。若以統計數目看(表

1)，平均上觀測海溫四季皆比未同化之背景值低，但冬春天差值比夏秋明顯偏高。在同化後平均偏差皆在 0.06°C 以下。至於背景與觀測海溫之相關係數，未同化時由冬季之 0.87 至春季之 0.70，至夏季之 -0.22，至秋季之 0.32。後兩季之相關係數皆很低，在同化後相關係數則皆昇到 0.94 以上。

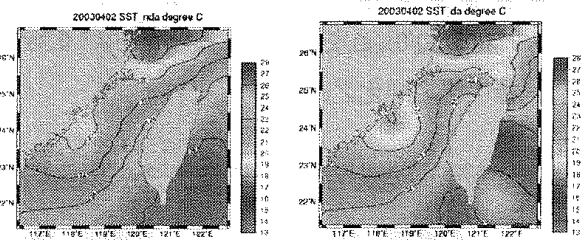


圖 13：2003/04/02(a)未同化之海溫圖，(b)用 0.38° 影響半徑之同化之海溫圖。

結論與建議

NOAA 之海溫背景資料為 0.5° 網格資料，其代表大洋海溫。在海岸附近自然較不準。因此海象中心之實測海溫與其會有相當差距，甚至有差到 4°C 以上(冬季之龍洞與東石)。冬季之近岸海溫比大洋海溫低實屬合理。而這差值隨夏季之到來也有下降之現象。趨勢似乎是對的。另因現場資料為岸邊海溫，運用資料同化正可將岸邊海溫加入欠缺岸邊資料的 NOAA 海溫以顯示臺灣之近岸海溫。不過這須在觀測海溫是正確的前提下。還有實測資料實在不是很多，至多 20 站。因此，本同化程式之設計是可以輸入衛星資料視為觀測資料。以下為目前氣象局海象中心應用本同化程式的刊載於其網站(mmc.cwb.gov.tw)成果。圖 16a 為 2005/2/10 未經同化處理前 NOAA 海溫分布圖，而圖 16b 是經同化後的海溫分布圖。圖中顯示，以沿岸實測與 MODIS 衛星海溫資料進行同化後， 24°C 等溫線離岸較遠且近岸的海溫也呈現較低的情形。圖 17 為 2005/8/10 的結果，圖 17a 為同化前的 NOAA 海溫分布圖，經以沿岸實測資料與 MODIS 衛星資料進行同化後，臺灣鄰近海域海溫呈現降低的情形(如圖 17b)。如衛星觀測海溫資料具足夠的精確度，則可視為實測資料的延伸，使同化結果更趨近於真實海溫分布。結果也顯示，沿岸測站之實測海溫資料有異常跳動或缺失情形。建議沿岸測站之海溫計須定期維修，其資料須經品管。

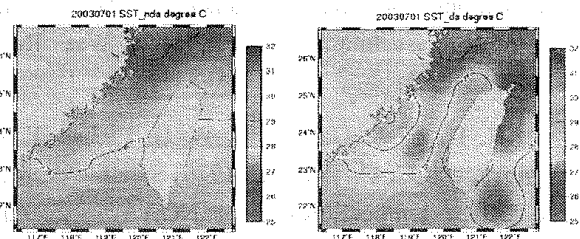


圖 14：2003/07/01(a)未同化之海溫圖，(b)用 0.38° 影響半徑之同化之海溫圖。

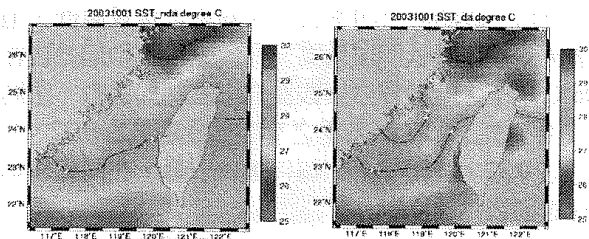


圖 15：2003/10/01(a)未同化之海溫圖，(b)用 0.38° 影響半徑之同化之海溫圖。

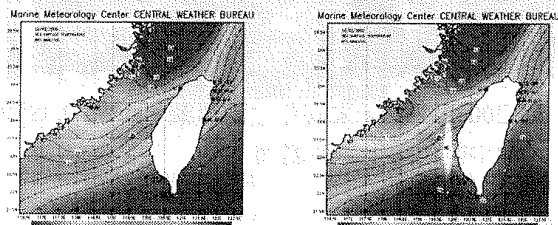


圖 16：2005/2/10(a)未同化之海溫圖，(b)用 0.38° 影響半徑之同化之海溫圖。

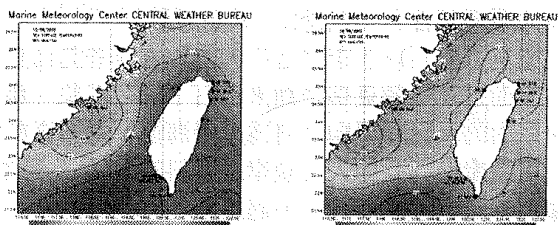


圖 17：2005/8/10(a)未同化之海溫圖，(b)用 0.38° 影響半徑之同化之海溫圖。

參考文獻

劉崇治 和 劉振榮, (2000) 應用衛星資料在梅雨季海上中尺度對流系統生成前兆之初步探討, 大氣科學, Vol. 28, No. 4, 317-341.

Behringer, D.W., (1994) Sea surface height variations in the Atlantic Ocean: A comparison of TOPEX Altimeter data with results from an ocean data assimilation system, JGR, 99, 24685-24690.

Behringer, D.W., J. Ming and A. Leetma, (1998) An improved coupled model for ENSO prediction and implications for ocean initialization, Part I: The ocean data assimilation system, Mon. Wea. Rev., 126, 1013-1021.

Brower, R. L., H. S. Gohrband, W. G. Pichel, T. L. Signore, and C. C. Walton, (1976) Satellite derived sea-surface temperatures from NOAA spacecraft, NOAA Tech. Memo, NESS 78, 73pp.

Chen, H. S., (2002) Some NCEP ocean analysis, modeling and forecasting and a variational data

Assimilation. 24屆海洋工程研討會專題講座論文集, 台中梧棲, 97-104.

Derber, J. and A. Rosati, (1989) A global oceanic data assimilation system, JPO, 19, 1333-1347.

Kelly, J. G. W., D. W. Behringer and H. J. Thiebaux, (1999) Description of the SST data assimilation system used in NOAA coastal ocean forecast system (COFS) for the U.S. east coast, OMB Con. No. 174, NOAA/NCEP, 49pp.

Kidwell, K. B., (1995) NOAA polar orbiter data users guide, compiled and edited by Katherine B. Kidwell, 385pp.

Lorenc, A. C., (1986) Analysis methods for numerical weather prediction, QJRM, 112, 1177-1194.

McClain, E. P., W. G. Pichel, and C. C. Walton, (1985) Comparative performance of AVHRR-base multichannel sea surface temperatures, J. Geophys. Res., 90, 11587-11601.

McMillin, L. M., (1975) Estimation of sea surface temperatures from two infrared window measurements with different absorption, J. Geophys. Res., 80, 5113-5117.

McMillin, L. M. and D. S. Crosby, (1984) Theory and validation of the multiple window sea surface temperature technique, J. Geophys. Res. 89, 1093-1107.

Press, W. H., S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling and B. P. Flannery, (1992) Numerical Recipes in Fortran, Cambridge University Press.

Smith, W.L., P. K. Rao, R. Koffler, and W. R. Curtis, (1970) The determination of sea surface temperature from satellite high resolution infrared window measurements, Monthly Weather Review, 98, 604-611.