

美國作業單位波浪模式之評介

趙榮耀

美國氣象局

摘 要

NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) 轄下的 NWS (National Weather Service) 負有向民間發佈海象預報的任務。其屬下的 NMC (National Meteorological Center) 則負責研發大氣及波浪模式並提供作業化模式的輸出 (Output) 給各地區的海象預報單位做為發佈預報的依據。此外，海軍的 FNOC (Fleet Numerical Oceanography Center) 也從事波浪預報的作業，不過它的任務只限於軍方。本文就美國作業化波浪模式的發展背景，NMC 的預報程序，以及 NMC 和 FNOC 現有作業化模式的預報結果加以介紹。

一、歷史背景

近代波浪模式的發展可以說起源於圖示化的 S-M 顯著波法 (The Significant Wave Method; Sverdrup and Munk, 1947) 和 P-N-J 波譜法 (The Spectral Wave Method; Pierson, Neumann and James, 1955) 的創立。利用電腦預報波浪則始於 1956 年 7 月，由當時的 JNWP (Joint Numerical Weather Prediction Unit, 是氣象局和海空軍的氣象單位聯合組成的機構) 建立 (Hubert, 1957)。當時模式只預報風浪，不考慮湧浪 (Swell)，風浪則假定是完全成熟波 (Fully Developed Sea)，以簡單的公式， $H = AV^2/g$ 來計算，式中 H 是波高， A 是常數， g 是重力加速度， V 是風速。Hubert (1957) 的報告裏這個模式的預報結果 " 不很好，但也不完全失望 "。這個模式繼續在海軍的 FNWF (Fleet Numerical Weather Facilities, 即現在 FNOC 的前身) 研究改良，包括引進 P-N-J 法的波高與吹風時間 (Wind Duration) 的關係和 S-M 法的波高與風速的關係，也考慮湧浪的傳播，終於在 1964 年正式建立了海軍的第一個作業化波浪模式。

NMC 於 1966 年引進 FNWF 的模式，經過數次與觀測值比較的結果，調整海面風速的計算方法以及波浪模式中的常數，而於 1968 年 10 月作業化。所用網格點間距離與大氣模式 (Schuman and Hovermale, 1968) 相同，約 380 公里。預報時間是由 + 00 時至 + 48 時，時間間隔 12 小時。模式輸出項目包括風速、波高、週期和波向。但實際傳真到地方氣象單

位則只有風浪、湧浪以及兩者合併的等波高線圖 (Pore and Richardson, 1973)。這個模式一直運作到 1985 年初才被取代。

在這期間，由於波浪觀測在質和量上的急遽增加，波譜觀念的逐漸被重視，風浪理論的進展，以及電腦在容量和速度上的進步，以波譜模式來預報波浪也從萌芽而成長。1974 年底海軍開始以波譜模式從事北半球海浪預報 (不包括南半球傳來的湧浪)。所用的模式叫做 SOWM (Spectral Ocean Wave Model)。是採用 Pierson-Tick-Baer (1966) 在紐約大學研發的模式而建立 (Pierson, 1982 的報告書裏有詳盡的記述)。此模式現在常被歸類為第一代模式，以其沒有考慮海浪成份波相互間能量授受的機制之故。這個模式的網格點是建立在一種特殊的地圖投影叫做 Icosahedron Gnomonic Projection 上。在此投影上將地圖劃分成二十個等邊三角形，每一個三角形有 325 個網格點。其目的在使波浪於地球大圓上 (The Great Circle) 以直線傳播並以圖計算方便。但是這些三角形及網格點的配置關係相當複雜，本想簡化波浪傳播的計算反而變成極為麻煩，大有吃力不討好之嘆。這個模式由 Greenwood 和 Cardone (1977) 加以改良推算全球波浪並於 1985 年作業化，並改名為 GSOWM (Global Spectral Ocean Wave Model)。主要之改進點包括：(1) 使用 2.5° 等角距網格點以縮短網格點間的平均距離，(2) 直接計算地球大圓上的波浪傳播並使之合乎能量守衡原則，(3) 海域擴展至全球海洋，讓南、北半球的波浪能交互作用，以及 (4) 增加波向的解析度，即從十二個方向改成二十四方向。這個模式目前還在運作，其預報精確度會在下文中提及。

同年 (1985 年) 元月一個新的機構 OPC (The Ocean Products Center) 正式成立。此機構由 NWS 以及同屬於 NOAA 的 NOS (National Ocean Service)，NESDIS (National Environmental Satellite Data and Information Service) 和 NC (NOAA Corps) 聯合組成，設址在 NMC 內。其目的在將 NOAA 轄下所有關於海象資料的蒐集和發佈的活動集中在同一個單位。海浪預報模式的研發和作業化也交由這個單位負責。其實早在兩年前，NOAA 的 AOML/SAIL (Atlantic Oceanographic and Meteorological Laboratories/Sea-Air Interaction Laboratory) 已著手研發全球化的第二代波譜模式 (Oceanweather, Inc., 1983, 參看 Greenwood et al, 1985)。所謂第二代模式就是考慮到波浪成份波間能量授受的機制，但在實際計算上則加以簡化，以減輕電腦的負荷。OPC 引進此模式稍加改良後命名為 NOW (NOAA Ocean Wave) 模式，於 1985 年底正式作業至今 (Estera and Chao, 1991)。

上述兩作業化模式僅適用於深海地區，因其不考慮有限水深的影響，而且網格點間隔甚大，只能概觀全球性海浪的一般情況。在近岸地區及水深變化較為複雜的局部海域，風場及波浪情況也隨之變化很大。在這種地區，模式需要有較小的網格點間隔，也需要考慮有限水深的影響，否則無法把握實際狀況。1988 年 8 月 NMC 的第一個區域性 (Regional) 的波譜模式，簡稱 GMEX (The Gulf of Mexico)，開始從事墨西哥灣的預報作業。此模式的基本構想是根據英國氣象局開發的第二代模式 (Goldin, 1983)，包括折射 (Refraction) 和海底摩擦等淺水化影響。另外一個區域性模式也即將在今年 11 月中正式從事

阿拉斯加灣 (The Gulf of Alaska) 的預報作業 (Chao, 1993)。此模式簡稱 GAK，不同於 GMEX 的地方在於前者需要考慮從外海 (太平洋) 傳來的波浪，涉及邊界值 (Boundary Values) 的問題，而後者不考慮外來的波浪，假定墨西哥灣是一個封閉的海域。

NOW 和 GAK 模式以及 GSOWM 的預報精確度將在第三節討論，至於 GMEX 則已在別處 (Chao, 1989) 報告不再贅述。

二、NMC 的波浪預報程序

波浪預報的程序從海上風場的預報開始。海上風速和風向是從 NMC 的大氣頻譜模式 (Atmosphere Spectral Model, Sela, 1982; Kanamitsu, et al., 1991) 中的短期預報模式叫做 AVN (Aviation 的簡稱) 模式求得。AVN 模式的主要目的，顧名思義就是提供飛機航行用的三天每 6 小時間隔的天氣預報。模式每天運算兩次，所需的初始值是由另外一個模式系統，叫做 GDAS (Global Data Assimilation System) 所提供。GDAS 每 6 小時操作一次，包括觀測資料的處理，客觀分析 (Objective Analysis)，初始值的決定 (Initialization)，每 6 小時的預報以及輸出資料的處理 (Kanamitsu, 1989; Parrish and Derber, 1992)。

AVN 模式的垂直方向現有 28 層，最低層的厚度是 10mb，因此計算出來的風速、風向，代表大約在海面上 50 公尺高的風場，但是波浪模式所需的風速是離海面 10 公尺的風速，是故還需根據地球邊界層理論 (The Planetary Boundary Layer Theory) 來修正 (Gemmill, Yu and Feit, 1988)。AVN 模式水平方向的解析度 (Resolution) 是根據模式波數來決定。目前模式的波數是 126，相當於 105 公里的網格點間隔。因全球性波浪模式 NOW 網格點間隔為 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ ，而區域性模式 GAK 是 30 海浬，是故還得以內插法 (Interpolation) 來求得網格點上的風速。

NOW 和 GAK 兩模式每天運算兩次。每次計算，首先根據 GDAS 模式算得的風場來追算 (hindcast) 從 - 12 時至 + 00 時的波浪。然後以 + 00 時的波場為初始值開始利用從 AVN 預報模式算出的海面風場來計算波浪。

NOW 模式預報的海域範圍是從南緯 70 度至北緯 75 度。計算時間間隔是 3 小時，預報至 72 小時。模式輸出包括顯著波高，波譜能量最大值之週期和波向。這些資料經由 AFOS (Automation of Field Operations and Services) 的線路傳至各地海象預報單位。另外也將區域性模式 GAK，所需要的方向波譜資料存檔備用。

GAK 模式的預報海域包括阿拉斯加海灣西南端，西經 155 度，北緯 53 度，至東北角的西經 132 度，北緯 61 度。網格點間隔是 30 海浬，在此海域內相當於 0.5° 緯度間隔和 0.85° 經度間隔。計算的時間間隔是 30 分鐘，預報至 + 48 時，模式除了需要初始值外，還需要南邊面臨太平洋方面的波浪邊界值。這些邊界值由 NOW 在北緯 52.5 度和北緯 55 度上 20 個網格點，每 3 小時的方向波譜來供給。在邊界區內 (Boundary Zone) GAK 模式網格點

上的波譜值由 NOW 模式網格點中的波譜值，以內插法求得再從 GAK 模式本身算得之值用權重平均（Weight Average）的方法算出，以確保區內波浪的平滑性。模式的輸出項目包括風速、風向、風浪和湧浪的顯著波高，平均週期和波向，以及全波譜的顯著波高（即風浪與湧浪合成），能量最大值的週期和波向。其中三種性質的波高、週期和波向以 WMO（The World Meteorological Organization）的 GRIB（Gridded Binary）格式送到阿拉斯加氣象單位。

三、模式之驗證

約在阿拉斯加海灣的中央，NDBC（National Data Buoy Center）設置有 46001 號浮標（位於西經 148.3 度，北緯 56.3 度），經年觀測波浪、風、水溫等海象資料。此外，在南邊有 46003 號浮標，在灣區東邊也有二、三個屬於加拿大的浮標。但是這些浮標的觀測資料收回率均不如 46001 號高。本節就以今年四月初至九月底在 46001 號的觀測資料來檢驗 GAK, NOW 和 GSOWM 三模式的計算結果。茲陳述如下：

(一)、圖 1 和圖 2 是三模式 + 12 時和 + 24 時的波高預報值和觀測值的比較。因為從 GSOWM 收集到的資料為數不多，而且同時擁有三模式的預報資料和實際觀測資料的機會又頗受限制，加起來不超過 60 點，約為這期間應有總數的 1/3。是故從統計學的觀點來看其傾向並不完全明顯，但至少可以看出端倪。即從資料點的分佈情況以及迴歸線（Regression Curve）的走向，可以看 GAK 的表現最好，其次是 GSOWM，NOW 模式殿後，雖然後兩者之差距並不很大，這個結果似乎說明了

1. 目前的第二代模式並不比第一代模式優秀。原因可能是因為第一代模式中的常數是根據長期，眾多的觀測值調整而得。另一個原因就是第二代模式中，參數化的成份波間能量授受所用的計算太過簡陋。

2. 較高的網格點解析度有助於模式預報的精確度。

(二)、針對 GAK 模式作進一步的檢討，茲將每 12 小時的預報波高與觀測值的比較（圖 3），圖內並將結果以幾項統計數字，即平均偏差（Mean Bias, 以 BIAS 表之），均方根誤差（Root-Mean-Square Error, 以 RMS 表之），相關係數（Correlation Coefficient, 以 CR 表之），分散度（Scatter Index, 以 SI 表之）以及迴歸線（Regression Curve）來表達。正如所預料，隨著預報時間的加長，預報精確度有逐漸降低的傾向，但一般來說結果還算滿意。在這 48 小時的預報內，平均偏差是 0.26 公尺，均方根誤差是 0.65 公尺，分散度是 30%，相關係數是 0.85。

(三)、GAK 模式的預報精確度除了受 NOW 模式在邊界區內的預報精確度的影響之外，還受風場預報精確度以及初始值，即 + 00 時的波浪和風場數據所左右。圖 3.a 和圖 3.b 表示 GAK 模式引用的風速、風向和觀測值的比較。圖 3.b 座標負值是指從正北逆時鐘方向量得的角度。一般而言，風向預報值尚可接受，但風速預報精確度就不敢恭維

了。主要原因可能是因海灣沿岸高山起伏，導致局部風場變化甚鉅。全球性的大氣模式無法兼顧到這種小尺度（ micro scale ） 的變動。圖 4 顯示+ 00 時的風速、風向、波高與實測值的關係，風場是 GDAS 模式的輸出項，是經過由人造衛星、飛機、氣球、船隻以及浮標等實測值修正過的，其結果比預報值良好。雖然風速和波高的估計值偏高，但用來做為初始值尚可接受。

- ④、最後舉一代表性例子來檢視 GAK 模式波譜的特性。圖 5 顯示在 48 小時內，每 12 小時間隔的波譜形狀。模式方向波譜的成長、擴散和減衰似乎很能反映當時的吹風狀況。一般來說波譜能量最高的頻率（ Frequency ） 與觀測結果頗為接近。率波譜的形狀大小隨著風速估算之誤差而與觀測相異。在成長期間高頻率處波譜與實測值接近，但波浪開始衰減後高頻率帶的波譜能量似乎衰減過慢。

四、結語

以上簡單地介紹了美國目前的作業化預報模式的種類及其預報精確度。一般來說，在綜觀尺度（ Synoptic Scale ） 和中尺度（ Meso Scale ） 的天氣條件下，現有的作業化模式還算有不錯的表現，但距離理想還很遠。目前正在 NMC 進行的改良及研發工作有如下幾項：

- (一)、引用區域性大氣模式如” ETA ” 模式或區域性大氣頻譜模式（ Regional Atmosphere Spectral Model ） 的輸出來提供區域性波浪模式的風場。
- (二)、在波浪追算過程中引用從人造衛星、浮標、船隻等觀測得來的波高、週期、甚至波譜來改善初始值問題。
- (三)、第三代深海模式的作業化以及研發淺水及流場區內的第三代模式。
- (四)、大氣與海浪偶合（ Coupling ） 系統的研發以及風與浪之間的基本關係的再檢討。

波浪的成長、衰減和消散的物理過程雖經眾多學者數十年的努力，還無法充分的把握，但至少暗中摸索的時期已過，我們多少知悉問題的關鍵所在，今後仍應從實際觀測和模式預報的驗證中求取經驗，從而啟發理論的修正和發展，再回歸應用於實際的運算，這一連串的過程中繼續努力。

參考文獻

- Chao, Y. Y. (1989) : An operational spectral wave forecasting model for the Gulf of Mexico. 2nd International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting, Vancouver, B.C. April 25-28, 1989, Published by Environment Canada, Atmospheric Environmental Service.
- Chao, Y. Y. (1993) : An operational regional wave forecasting model for the Gulf of Alaska. In preparation.
- Esteva, D. C. and Y. Y. Chao (1991) : the NOAA ocean wave model hindcast for LEWEX. In: Directional Ocean wave Spectra (ed. by R. C. Beal), The Johns Hopkins University Press, Baltimore. 218 pp.
- Gemmill, W.H., T.W.Yu and D.M.Feit (1988) : A statistical comparison of methods for determining ocean surface winds. Weather and Forecasting, 3(2), 153-160.
- Goldin, B. (1983) : A wave prediction system for real-time sea state forecasting. Quart. J. Royal Meteor. Soc., 109, 393-416.
- Greenwood, J.A. and V.J. Cardone (1977) : Development of a global ocean wave propagation algorithm. Final report to Navy Fleet Numerical Weather Central, Monterey, CA.
- Greenwood, J.A., V.J. Cardone and L.M. Lawson (1985) : Intercomparison test version of the SAIL wave model. In: Ocean Wave Modeling, The SWAMP Group, 221-233.
- Hubert, W.E. (1957) : A preliminary report on numerical sea condition forecasts. Monthly Weather Review, 85(6), 200-204.
- Hubert, W.E. (1964) : Operational forecasts of sea and swell. 1st U.S. Navy Symposium on Military Oceanography, U.S. Naval Oceanographic Office, Washington, D.C., pp. 113-124.
- Kanamitsu, M. (1989) : Description of the NMC global data assimilation and forecast system. Wea. Forecasting, 4, 335-342.
- Kanamitsu, M., J.C. Alpert, K.A. Campana, P.M. Caplan, D.G. Deaven, M. Jredell, B. Katz, H.L. Pan, J.E. Sela and G.H. White (1991) : Recent changes implemented into the global forecast system at NMC. Wea. Forecasting, 6, 425-435.
- Oceanweather Inc. (1983) : Development and evaluation of a coupled discrete wave prediction model. Final report submitted to NOAA/AOML/SAIL,

Miami, Florida.

- Parrish, D.F. and J.C.Derber (1992) : The National Meteorological Center's spectral statistical-interpolation analysis system. Mon. Wea. Rev., 120, 1747 -1763 .
- Pierson, W.J.,G.Neumann and R.James (1955) : Preactical methods for observing and forecasting ocean waves by means of wave spectra and statistics. H.O.Pub. 603, U.S.Navy Hydrographic Office, Washington,D.C.,284 pp.
- Pierson, W.J.,L.J.Tick and L.Baer (1966) : computer-based procedures for preparing global wave forecasts and wind field analyses capable of using wave data obtained by a spacecraft. Proceeding of the Sixth Naval Hydrodynamics Symposium Publication, ACR-136, Office of Naval Research , Deopartment of the Navy, Washington, D.C.
- Pierson, W.J.(1982): The Spectral Ocean Wave Model (SOWM), a Northern Hemisphere computer model for specifying and forecasting ocean wave spectra. DTNSRDC-82/011, David W. Taylor Naval Ship Research and Development Center, 187pp.
- Pore, N.A. and W.S.Richardson (1973) : Weather Service Program in objective wind-wave and swell forecasting. National Weather Service, Techniques Development Laboratory.21 pp.
- Sela, J. (1982) : The NMC spectral model. NOAA Tech. Rept. NWS 30, U.S. Department of Commerce, NOAA, National Weather Service, 36 pp.
- Schuman, F.G. and J.B.Hovermale (1968) : An operational six-layer primitive equation model. J. Applied Meteorology, 7(4),525-547.
- Sverdrup, H.U., and W.H.Munk (1947) : Winds, Sea, and Swell: Theory of Relations for forecasting. U. S. Navy Hydrographic Office, H. O. Publ. 601.
- Takacs, L.(1985) : A two-step scheme for the advection equation with minimum dissipation and dispersion errors. Mon. Wea. Rev., 113,1050-1065.

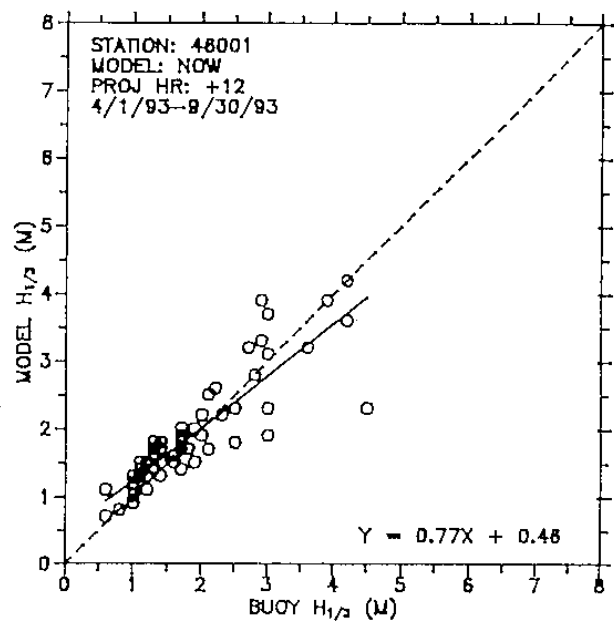
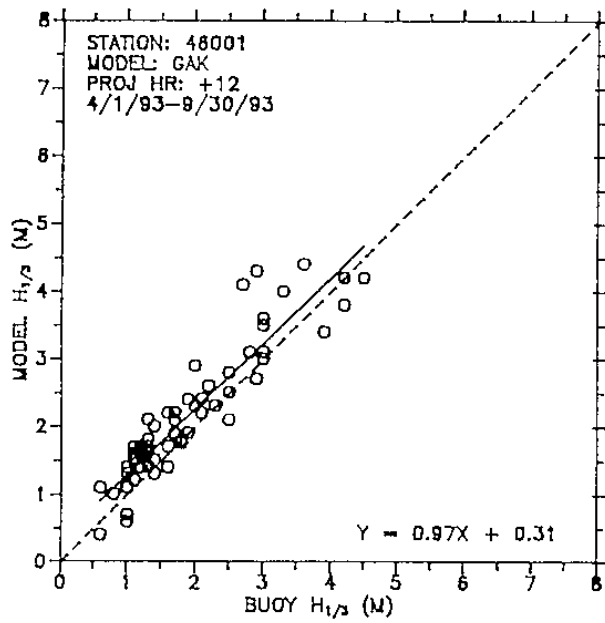
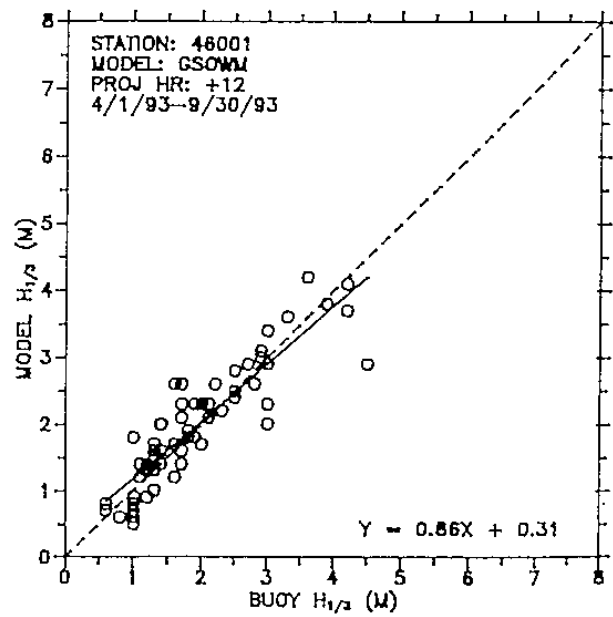


圖 1a、作業化模式 GAK, NOW 和 GSOWM 的預報波高和實測值的比較, (a) +12 時預報。



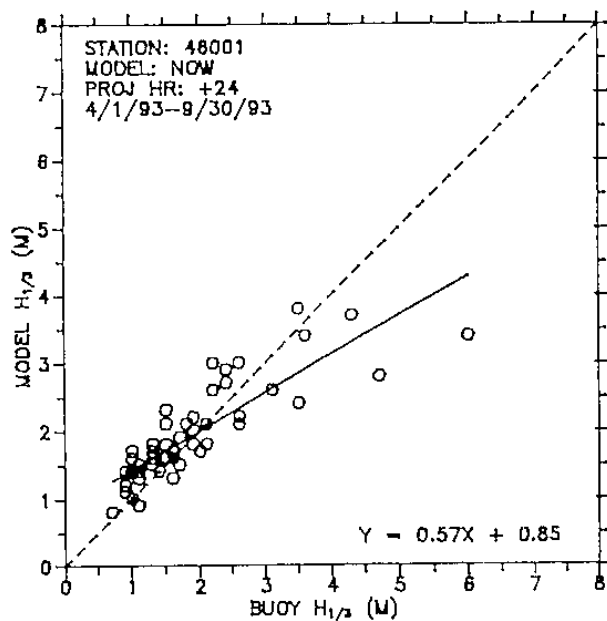
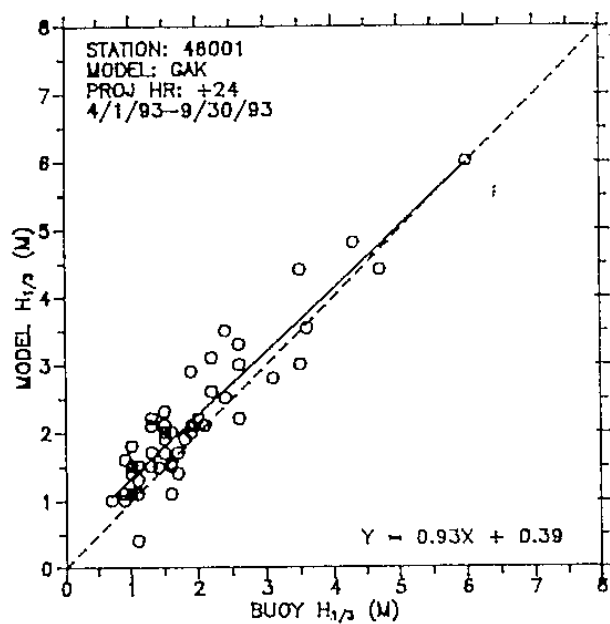
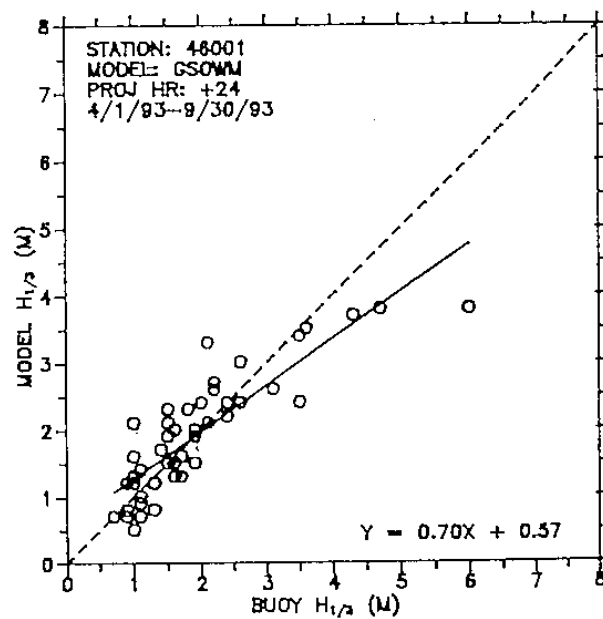


圖 1b- 作業化模式 GAK, NOW 和 GSOWM 的預報波高和實測值的比較 (b) +24 時預報



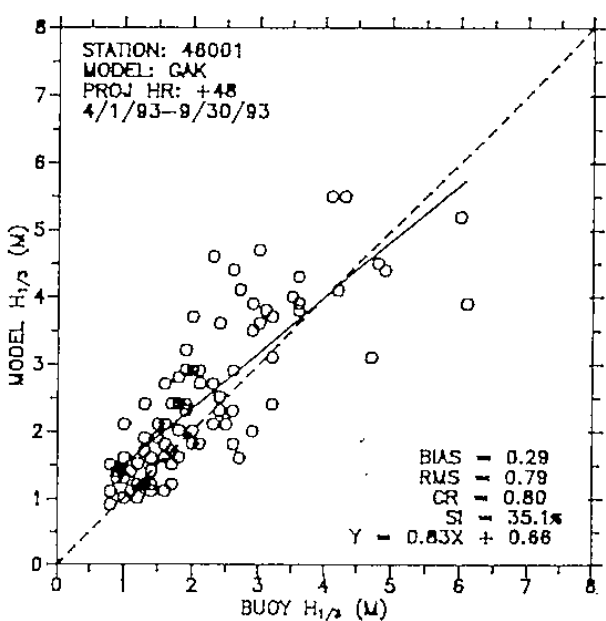
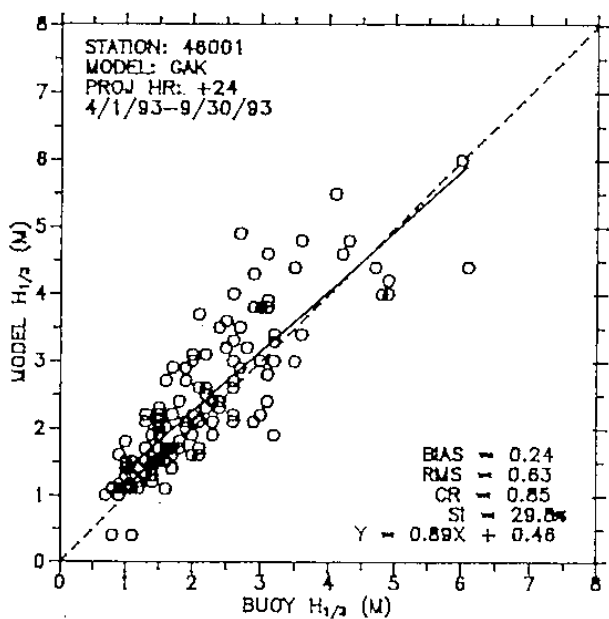
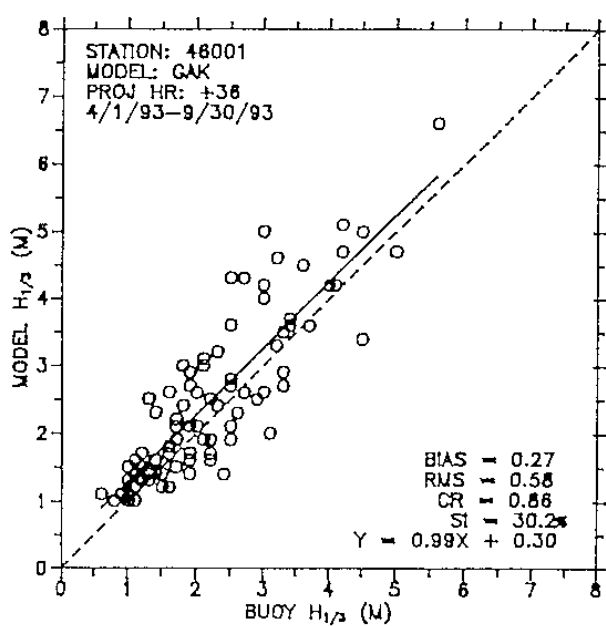
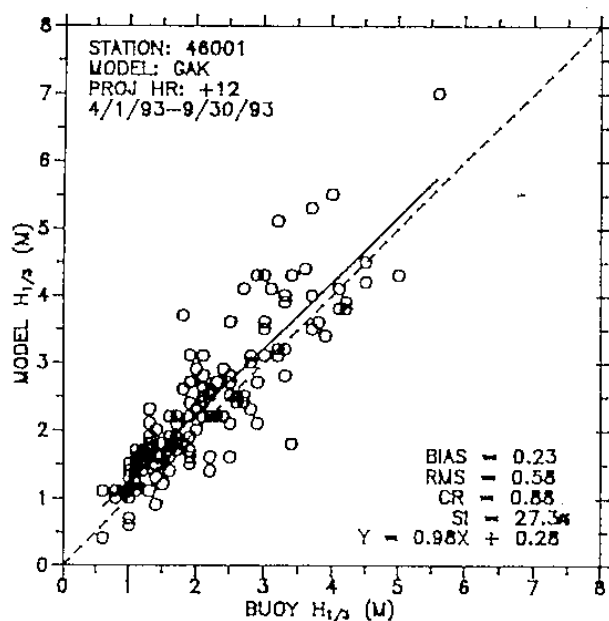


圖 2、GAK 模式 - 12, - 24, - 36, - 48 時的預報波高與實測值的統計關係（數字說明，請參看本文）。

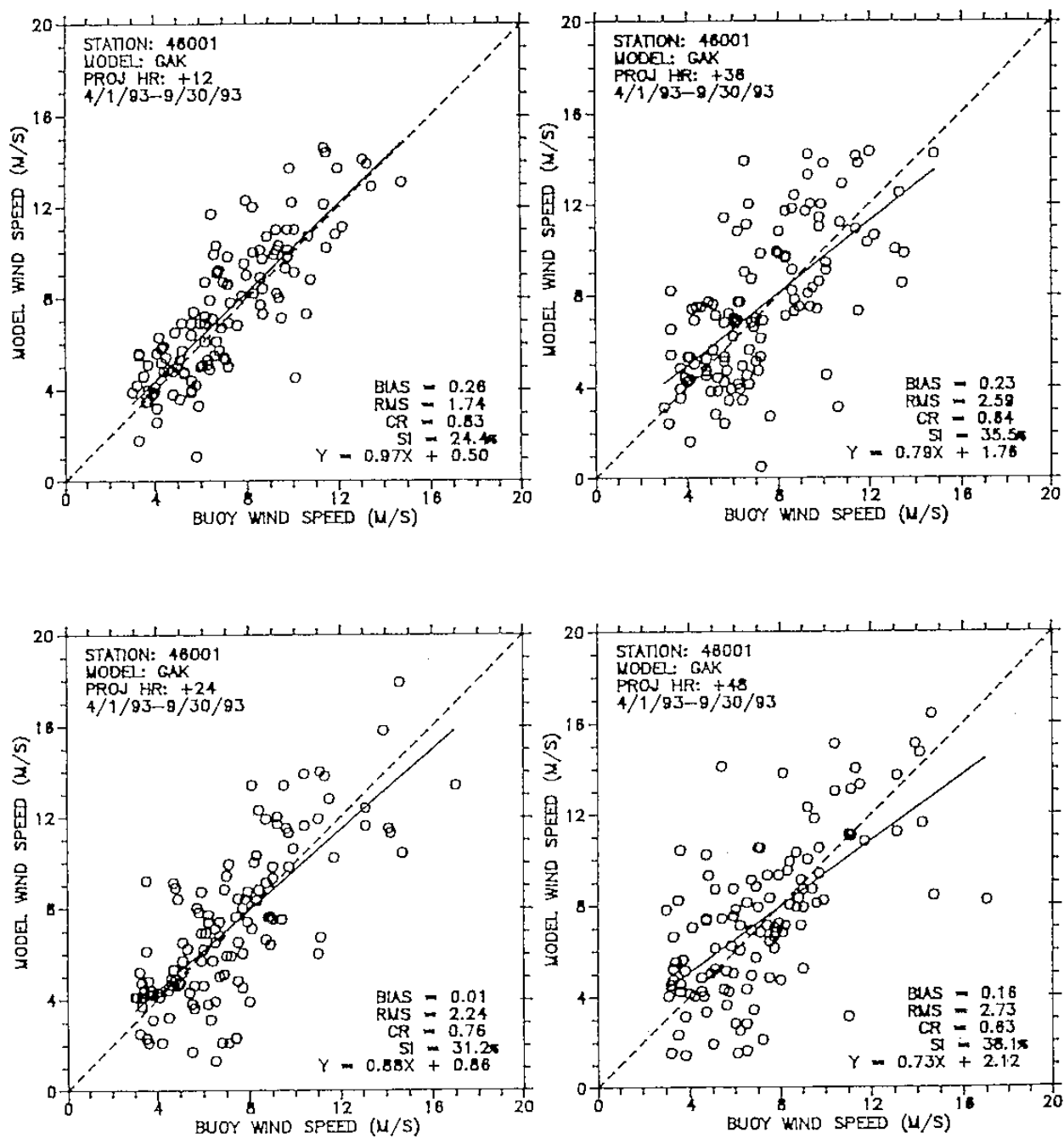


圖 3a、模式預報風場與實測值的比較，(a) 風速；

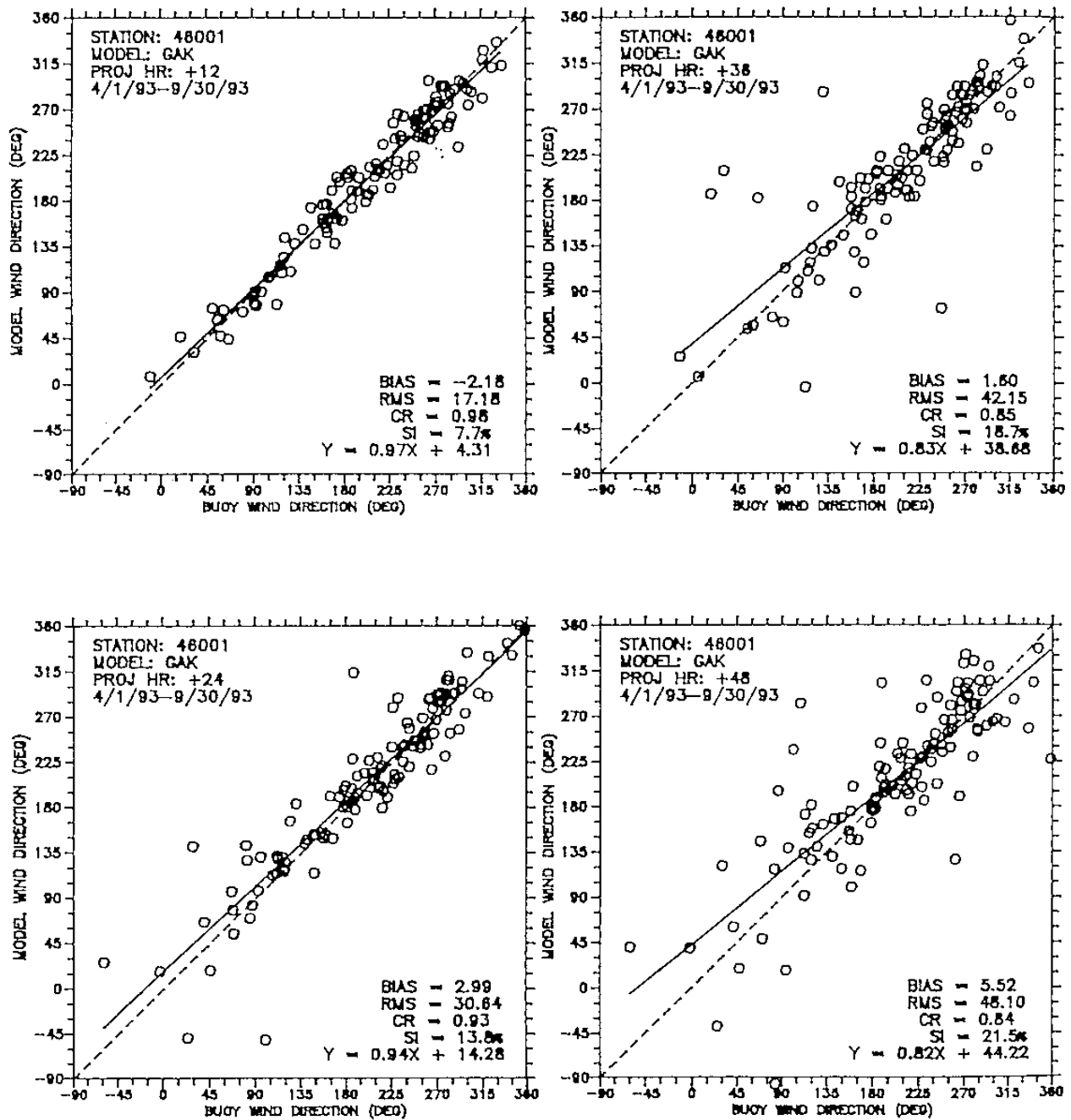


圖 3b、模式預報風場與實測值的比較， (b) 風向。

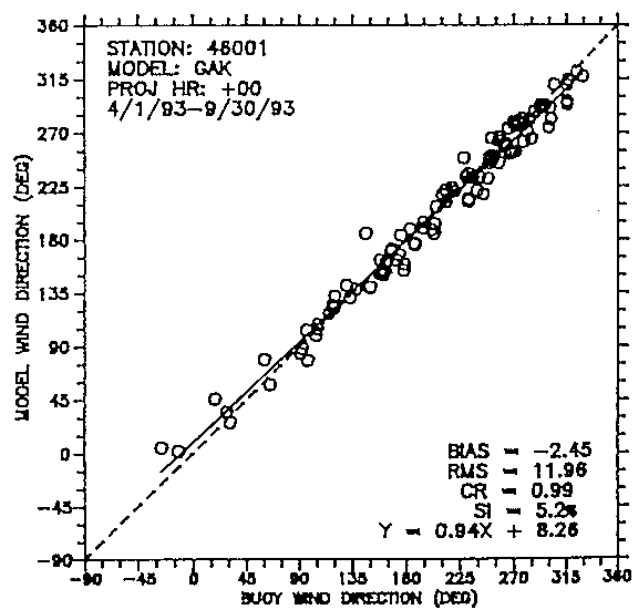
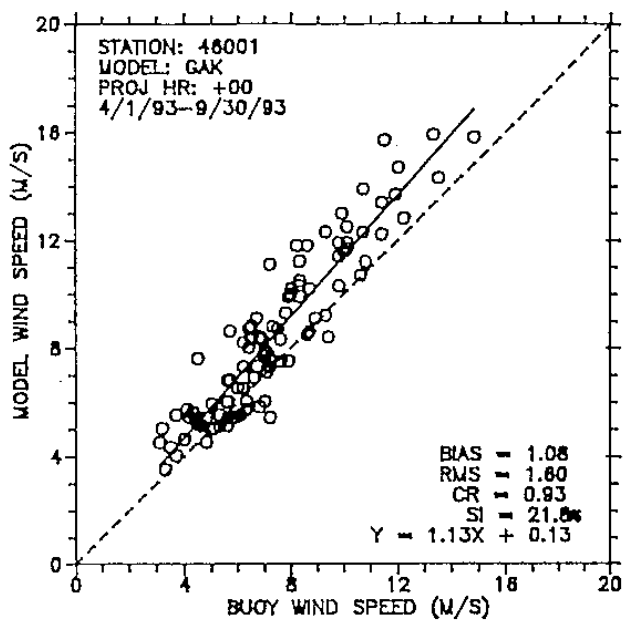
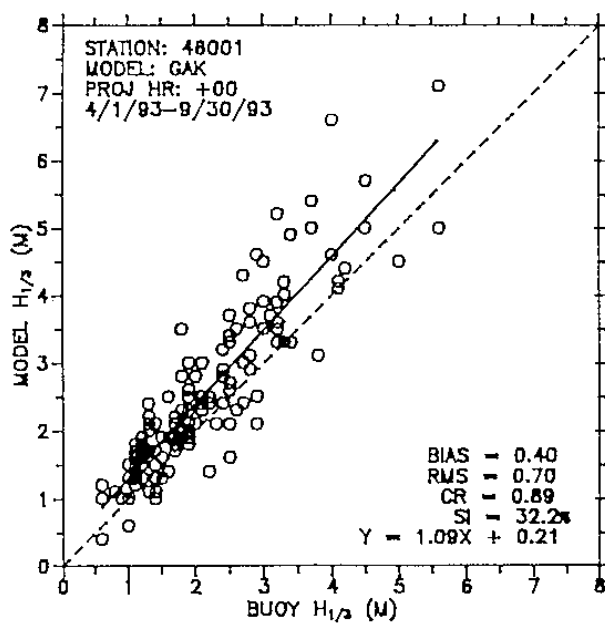


圖 4、GAK 模式的初始 (+00)
波高、風速和風向與實測
值的比較。

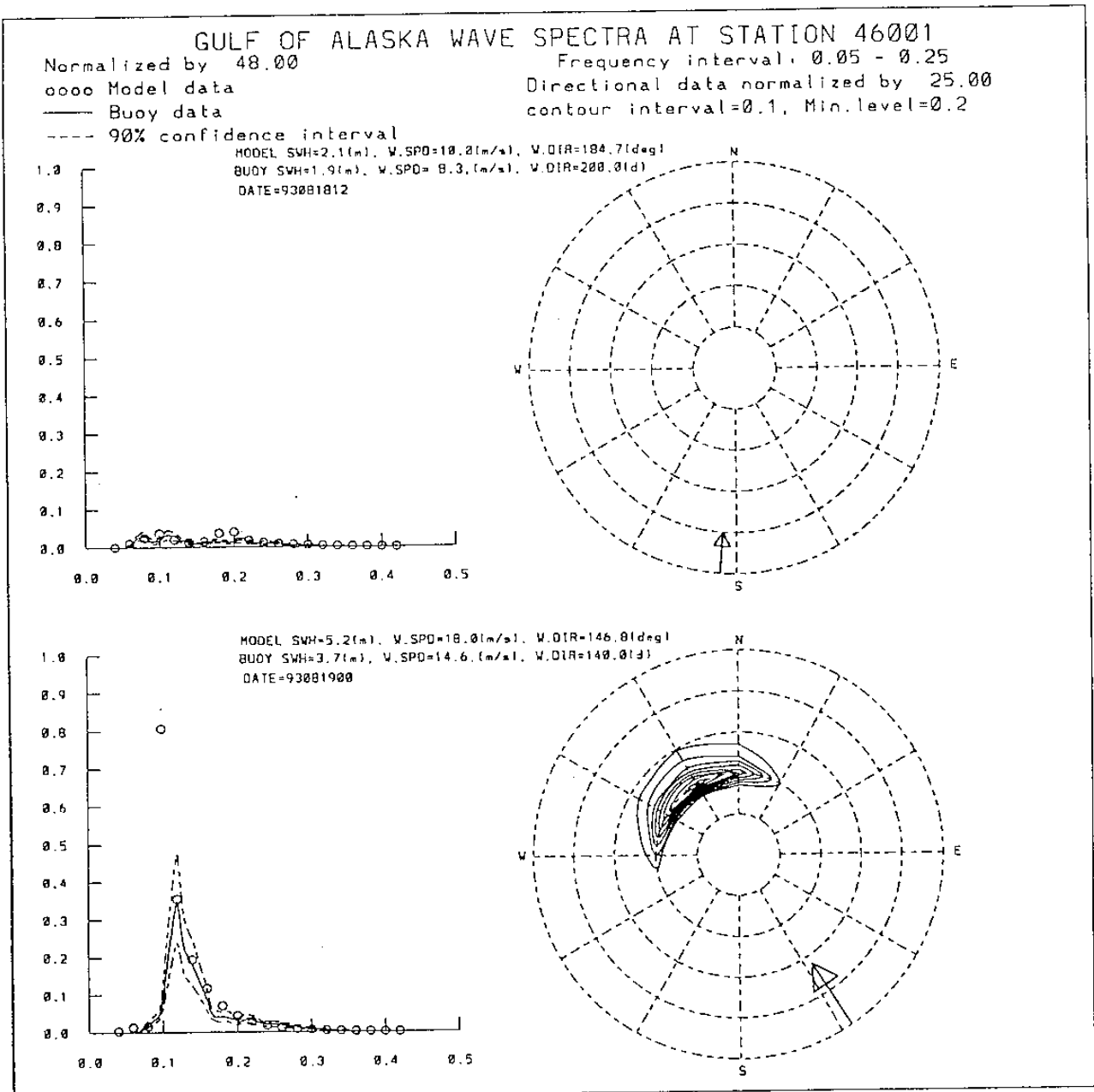


圖 5a、GAK 模式波譜與實測波譜的比較 (a) 成長期；

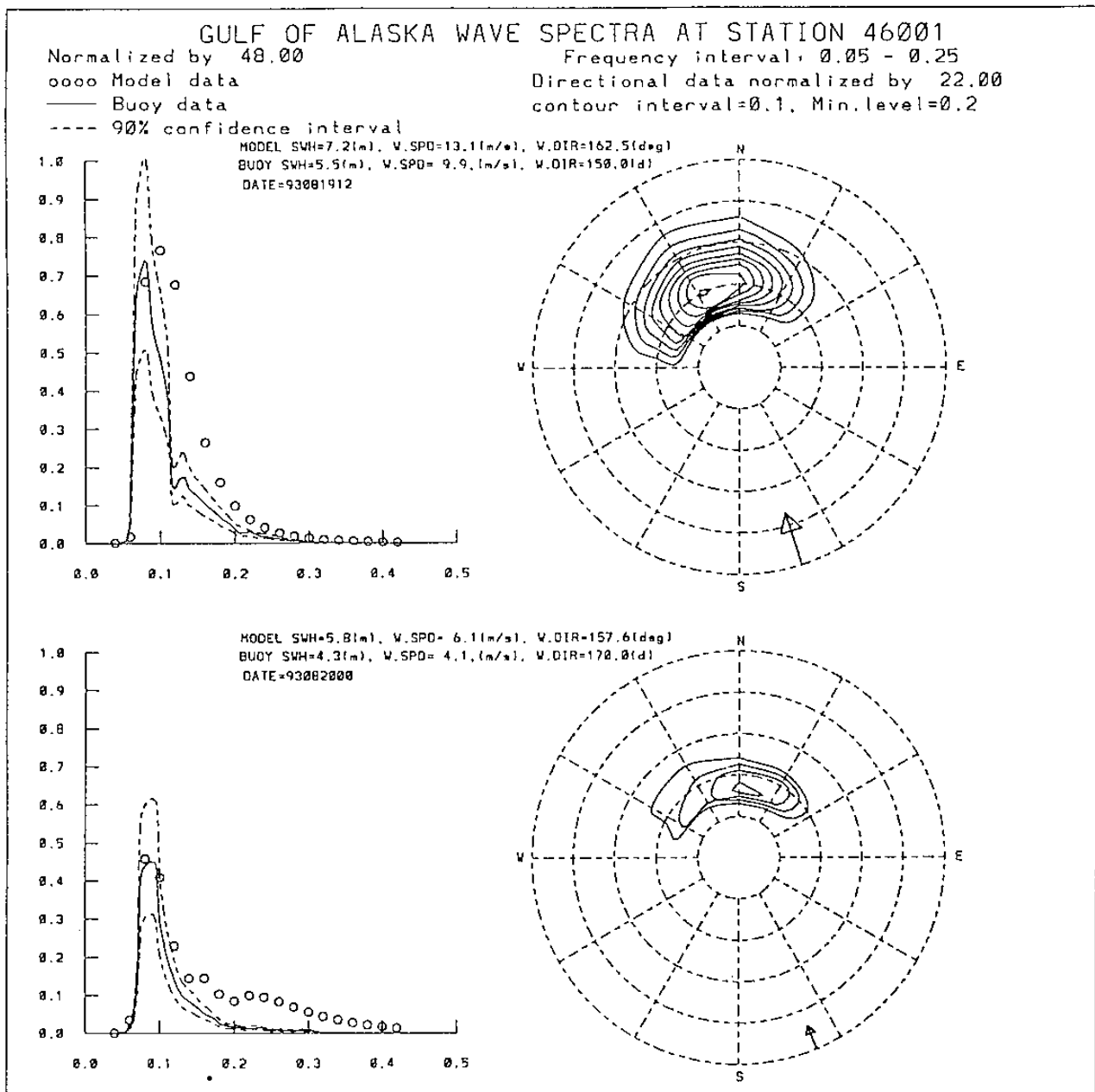


圖5b、GAK 模式波譜與實測波譜的比較 (b) 減衰期。

Operational Wave Forecasting in the United States

Yung-Yao Chao

National Weather Service

Abstract

The National Weather Service (NWS) of the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) is responsible for issuing ocean wave forecasts to the civilian sector. The National Meteorological Center (NMC) , which is a part of NWS, is in charge of developing operational wave models to provide forecast guidance to NWS regional forecast offices. The Navy's Fleet Numerical Oceanography Center (FNOC) , on the other hand, provides wave information to the military sector. In this paper, the historical development of operational wave forecasting models in the United States, the NMC forecasting procedures, and the performance of present NMC and FNOC wave models are presented.