

從諾曼第登陸作戰之氣象預報反思臺灣戰時 區域數值天氣預報之建立

單國卿、宋偉國

空軍航空技術學院軍事氣象系

摘要

1944年6月6日諾曼第登陸作戰距今已近80年，在當時缺乏衛星、超級電腦，甚至無網路情況下，盟軍與德軍均能預報到48小時後的戰區天氣預報，靠的是氣象人員已建立氣旋發展概念模式，以及對當地氣候特徵的瞭解。今日科技已突飛猛進，數值天氣預報已成為天氣預報不可或缺的預報工具，然而，如果臺海發生戰爭，很可能發生缺乏網路、電力情況，現有的數值天氣預報過於依賴網路與電力，很難在戰場運作正常。本文目的嘗試建立一套簡易中尺度數值天氣預報模式meso，在無網路情況下能快速提供戰區天氣情資，並在教學場域提供學生學習中尺度天氣概念模式，達到戰訓兩用目的。本文用Nozaki(1973)方式，以地面觀測建立邊界層高度(Planet Boundary Layer Height: PBLH)，並以ERA5的PBLH檢視本研究方法的可行性。結果顯示Nozaki方法具有可靠性。另外，選取meso預報模式，僅用地面觀測資料，即可預報海陸風、PBLH的演變。未來配合meso與其他如K指數、全指數以及閃電躍昇頻率，亦可建置雷暴客觀預報法則，做為戰區數值天氣預報模式。

關鍵字：諾曼第、天氣預報、PBLH、雷暴

1. 前言

1944年6月6日，英美聯軍主導的盟軍在歐洲諾曼第成功登陸，這是二次大戰中關鍵的戰役之一，扭轉了戰局。回顧諾曼第戰役已經接近80年，當時的技術相較於現今的人造衛星、超級電腦和數值天氣預報，顯得相當落後，然而當時的氣象人員仍能夠精準地預測氣旋的演變，這一項成就在近年來仍有不斷的研究發表。對於當日戰役請參閱Ambrose(2014)、Atkinson(2013)。

而在當時戰區對氣象預報的描述，ECMWF (2014)、Fleming (2004)、Shaw and Innes (1984)、Vassie and Choi (2018)、Anders (2020)亦有發表相關期刊，例如Vassie and Choi (2018)的研究顯示，D日登陸時的氣象預報對於成功的軍事行動至關重要，他們透過ECMWF ERA資料同化，處理潮汐-波浪-風

暴潮耦合數值模型，重新評估了當時的預測情況。

而Anders(2020)則提出了對D日天氣預報的看法，認為當時的天氣預報並不是特別準確，德國預報員對北大西洋大部分地區的大規模天氣狀況相當瞭解，而美國的預報方法表現不如預期。儘管有以上這些研究對D日天氣預報提出了不同的見解，但不可否認，D日的天氣預報確實並不容易，然而盟軍與德軍都在相當程度上預測到了氣旋的演變。關於諾曼第D日天氣預報的細節已有許多文獻探討，本研究的目的則是探討諾曼第登陸時的氣象預報概念，並思考在無法依賴完整網路和高空資料的情況下，如何建立一套適用於戰場、以地面觀測資料為主的即時天氣預報系統，以應用於戰術層面的氣象情報，為戰場指揮官提供實施戰術的決策依據。

2. 資料收集與處理

本研究採用成功大學與空軍航空技術學院聯合發展的中尺度氣象模式 meso model 作為戰場氣象預報工具。雖然 meso model 是一個物理完整但在水氣處理方面相對簡化的原始模式，但它的優勢在於預報時間短，只需使用個人電腦即可在幾分鐘內計算出 24 小時的天氣資料，且無需高空資料輸入，主要依賴地面觀測資料。在模式中，高空風假設初始值為地轉風，邊界層近地面風則遵循隨高度指數型分布，這使得模式能夠模擬氣流特徵、海陸風效應和邊界層的成长。然而，由於 meso model 在水氣處理方面的簡化，無法直接預測雷暴等降水情況。因此，本研究透過 meso model 模擬高空溫度、濕度和風場，若配合 K 指數、全指數、SWEAT 指數的計算，以及閃電資料的躍升頻率 (Tan et al., 2022[8])，未來可預報雷暴的發生。

3. 諾曼第 D 日天氣概述

諾曼第位於法國北部，與英國隔著 33.8 公里的英吉利海峽，1944 年 6 月 6 日的軍事行動如圖 1 所示。盟軍由英美兩國軍隊為主，總計 17.6 萬人從英國橫渡英吉利海峽，登陸諾曼第地區，成功攻佔了猶他、奧馬哈、金灘、朱諾和劍灘 5 處海灘。之後接近三百萬士兵也隨後渡過英吉利海峽前往法國諾曼第，成功開闢了歐洲大陸的第二戰場。

D 日-凌晨



圖 1 諾曼第 D 日盟軍登陸作戰示意圖。

在圖 2 中，顯示一股西南偏西的暖濕氣流將主導英吉利海峽地區。同時，愛爾蘭西部的冷鋒將移動到不列顛群島北部，但不會越過英吉利海峽。然而，另一股冷鋒預計將在 6 月 7 日星期三上午穿過英吉利海峽，這將導致天氣的進一步惡化。預計 6 月 5 日的天氣將呈現較低的雲層和較差的能見度，且直到 6 月 7 日英吉利海峽地區都將受到強風影響，伴隨著覆蓋率達 100% 的雲層，其中低度雲層高度約在 150~300 米之間。這樣的天氣條件對盟軍在當時計劃發動聯合登陸作戰並不利。

然而，值得注意的是，6 月 4 日當天盟軍的氣象人員進行了 6 月 6 日天氣預報的修正，結果顯示在當時英吉利海峽和諾曼第地區將會出現短暫的好天氣，這將是展開登陸聯合作戰的有利時機。盟軍的氣象預測人員在修正後提供了重要的信息，使盟軍能夠抓住天時，選擇適合的時刻進行登陸行動。這些氣象條件和預報修正成為諾曼第登陸的關鍵，幫助盟軍成功進行聯合登陸作戰，扭轉了戰局，這也展示了當時氣象預報對於軍事行動的重要性。

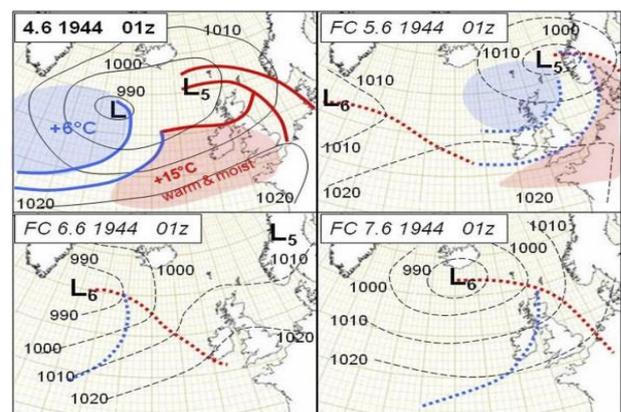


圖 2 1944 年 6 月 4 日 0100 UTC 分析圖 (左上)、6 月 5、6 及 7 日 0100 UTC 預報圖 (右上，左下、右下)，引用自 Anders (2020)。

4. D 日氣象預報對於臺灣戰時預報之省思

諾曼第位於北緯 49°N，處於中緯度西風帶，毗鄰大西洋與英吉利海峽，屬於溫帶海

洋性氣候，全年有雨，尤其在冬季降雨較多。由於這個地區處於南北氣團交界區，鋒面提供了溫帶氣旋發展的機會，因此這裡成為溫帶氣旋活動的主要路徑。溫帶氣旋的演變模式已成為教科書上經典的範例，如圖3所示，通過對溫帶氣旋的發展和移動路徑，可以預測氣旋通過前後的天氣條件。諾曼第登陸戰，盟軍與德軍氣象人員均有掌握到氣旋的預報，主要是中緯度氣旋概念模式已經成熟，而且雙方對於當地氣候資料已經有相當程度瞭解。

圖4展示了2023年5月17日0000 UTC初始時間之48小時預報至19日1200 UTC的天氣圖，現今隨著溫帶氣旋理論模式的完善，以及高速電腦執行數值天氣預報產品的進步，預報諾曼第48小時的天氣更是相對容易許多。

然而，對於臺灣的戰時氣象預報來說，臺灣屬於亞洲季風區，四面環海且中央山脈佔據了島上三分之一的面積。因此，季風大尺度環流與地形的交互作用在這裡顯著，加上海陸風效應及邊界層結構的影響，臺灣的天氣系統屬於跨尺度天氣系統，預報方面相比中緯度溫帶氣旋預報要複雜得多。此外，一旦發生戰爭，網路、電力等基礎設施可能會受到攻擊，這將導致無法使用複雜的數值天氣預報模式。在這種情況下，本文建議提出一種簡易版的數值天氣預報模式，此模式運算快速，只需在單機上運作，同時能夠涵蓋中尺度天氣系統的數值模擬。成大與航院共同發展的meso model正具備這些功能。meso model原本是用來預報核汙染的模式，因此不涉及降水處理，而空氣污染模式主要處理邊界層，能夠應對複雜地形下中尺度天氣系統的變化。透過此模式在戰場情境中，可以輸入地面監測氣象資料後，即時提供48小時內的中尺度氣象環流變化預報。若結合其他客觀預報法則，如K指數、全指數等參數，以及閃電偵測資料，還可以發展雷暴預報

(Tan et al., 2022)，為戰場指揮官提供更多氣象情報，幫助做出更明智的作戰決策。

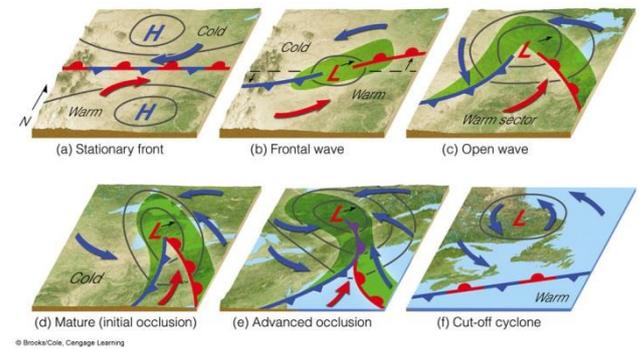


圖3 溫帶氣旋發展模式。

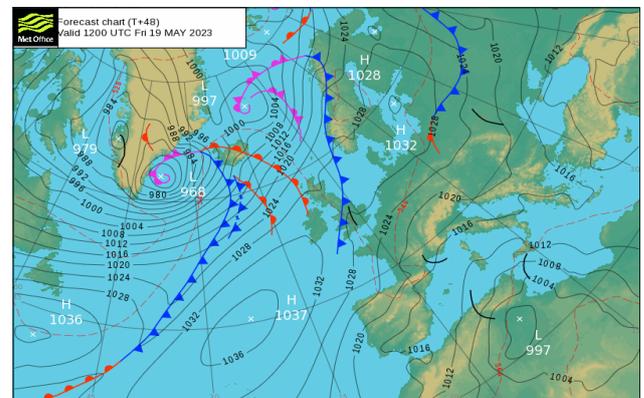


圖4 英國氣象局發布2023年5月17日0000 UTC為初始時間之48小時預報至19日1200 UTC天氣圖。

5. 建立區域天氣預報模式

在影響飛航安全的天氣中，雷暴、低能見度和低雲幕均和邊界層關係顯著。在預測邊界層高度(PBLH)方面，使用僅依賴地面氣象資料的方法在文獻中並不常見，Nozaki (1973)的方法即是以地面資料建立PBLH的概念。該方法的求解步驟如下：

(1)使用熱力紊流方法求得邊界層高度

$$L1 = (121/6) * (6-p) * (T-Td) :$$

- p : Pasquill穩定度分類

- T : 溫度

- Td : 露點溫度

(2)根據地面輻射量和風速來估算Pasquill穩

定度類別，如表1所示。

(3)使用風切紊流方法求得邊界層高度

$$L2=0.169 * p * (U+0.257) / [12 * (fo) * \ln(Z/Z0)] :$$

- U：風速
- fo：科氏參數
- Z：測站高度
- Z0：地表粗糙長度

(4)最後求出邊界層高度為L=L1-L2。

在Nozaki(1973)的方法中，如果一些地面監測站只有相對溼度RH而沒有露點溫度，可以使用T和RH來求取露點溫度Td： $Td = T - (100 - RH) / 5$ 。

本文作者曾經使用這種方法來計算PBLH高度(宋等, 2013a)，並且給出了相應的結果如圖5。從這些結果中可以看出不同季節的PBLH高度有所變化，其中熱力效應和風切效應在不同季節對PBLH高度的影響不同。此外，使用ERA5數據所求得的PBLH高度顯示(圖6)，冬季和夏季的PBLH高度由熱力條件主導，風切效應不顯著。然而，與Nozaki(1973)方法求解的熱力條件引發的PBLH高度進行對照(圖7)，可以發現有些差異。這可能是由於ERA5資料的解析度較粗糙，而Nozaki方法是以高雄測站計算PBLH值，導致了這種差異。儘管如此，Nozaki方法所得到的PBLH逐時分佈趨勢與ERA5數據大致相符，表明Nozaki方法是可靠的，未來可以通過實際觀測高雄地區的PBLH值來驗證Nozaki方法的準確性。

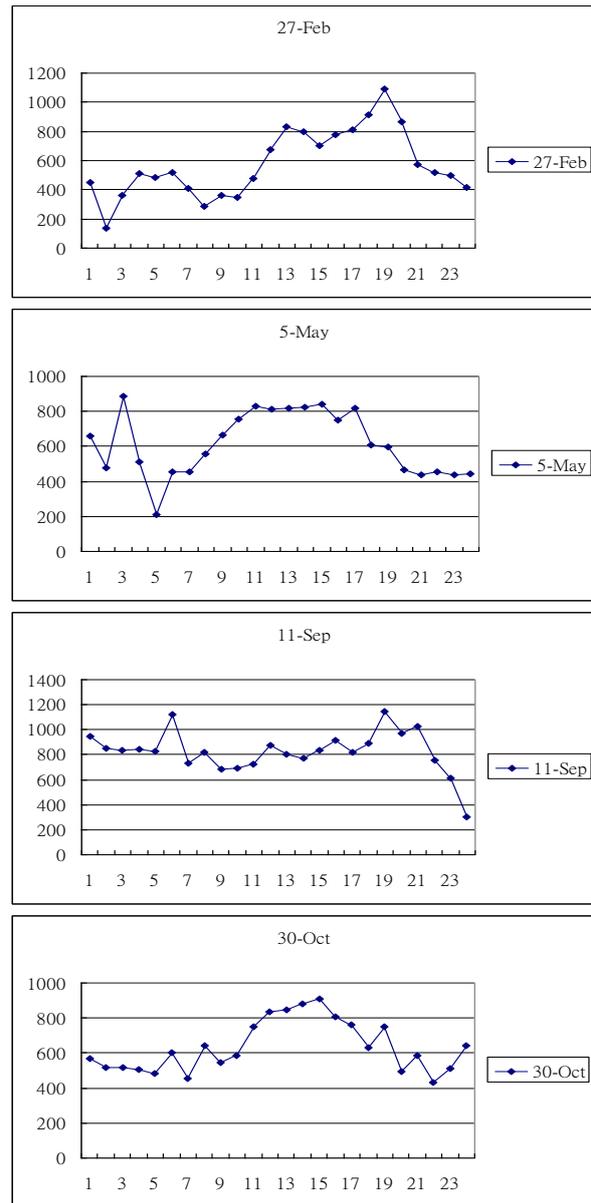


圖5 Noziki法2010年高雄地區2月27日、5月5日、9月11日、10月30日4個案PBLH逐時變化。

表 1 穩定度類別求法(A=1,B=2,C=3,D=4,E=5,F=6)。

風速 m/s	白天總輻射量 J/(m2.s)				夜間輻射	
	>700	525-700	350-525	=<350	>338	<=338
<2	A	A	B	B	E	F
2-2.9	A-B	B	B	C	E	F
3-4.9	B	B	C	D	D	E
5-5.9	C	C	D	D	D	D
>6	C	D	D	D	D	D

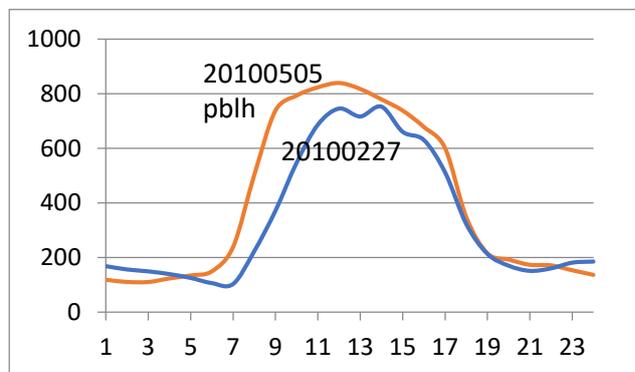


圖6 ERA5求出高雄2010年2月27日(藍色)及5月5日(紅色)PBLH逐時分佈。

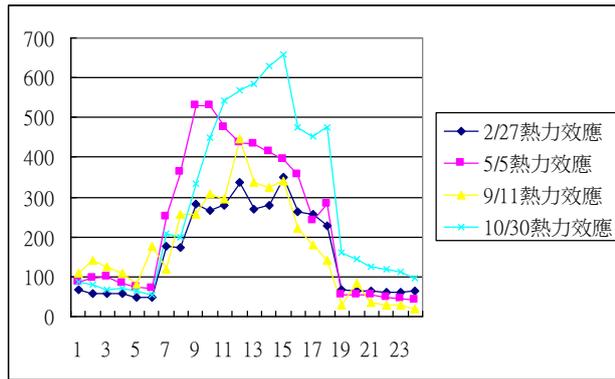


圖7 Noziki法求出2010年4個案熱力效應引發PBLH逐時變化。

本研究除了使用Nozaki方法求解PBLH高度外，還曾使用meso model來預測臺灣地區的流場分布(宋等，2013b)，並且以該模式做為教材，讓航院學生練習數值天氣預報，並從模式模擬結果建立中尺度天氣系統概念模式。meso model是一種中尺度數值模式，本研究使用臺灣地區東北風個案為例進行模擬。初始時間風場顯示東北風(圖8a)，風速約2.5 m/s，經過15小時的模擬後，當到達1500 LST時，臺灣中北部的風向已轉為西北風(圖8b)。海風效應使得氣流由東北風轉變為西北風型態，臺灣冬季東北風南下至午後產生西北風為相當常見的現象。同時，在北部的西北側出現了一個中尺度低壓，這是由氣流繞山產生尾流效應所致。

在本文中，還進一步模擬了邊界層的變化情況，並分析了邊界層紊流動能的逐時變化。高雄地區的紊流在1400 LST達到最強，根據動能值 $1m^2/s^2$ 來估算，PBLH高度約為1000 m左右(圖9)。這些結果是在假設風場為東北風的情況下所獲得，本文以ERA5產生的PBLH做一比對，由於2023年1月1日臺灣為東北風個案，下午高雄地區為西北風，與meso model初始為東北風，午後高雄轉為西北風的情境一致，故ERA5時間選為2023年1月1日，ERA5 PBLH數據顯示(圖10)中午有極大值，約400多公尺高度，meso模擬的PBLH高度與

ERA5存在差距。其中，meso模式的紊流動能在400多公尺處有相對極大值，與ERA5的PBLH高度400多公尺一致，但在800-1000公尺處出現另一個紊流動能極大值，ERA5並未顯示出800-1000公尺的PBLH高度，這可能是因為ERA5資料是水平範圍200多公里的平均狀態，無法反映高雄地區極端處發生的紊流動能。儘管如此，meso模式的發展趨勢與ERA5大致一致，顯示meso模式在預測方面具有實用性。

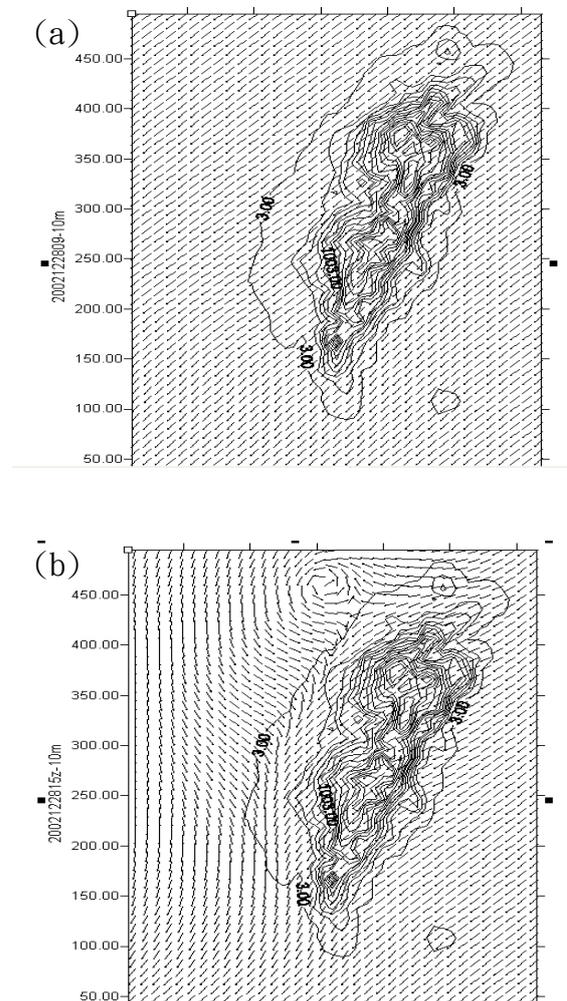


圖8 meso model (a)初始風場與(b)模擬15小時(1500L)地面風場分布。

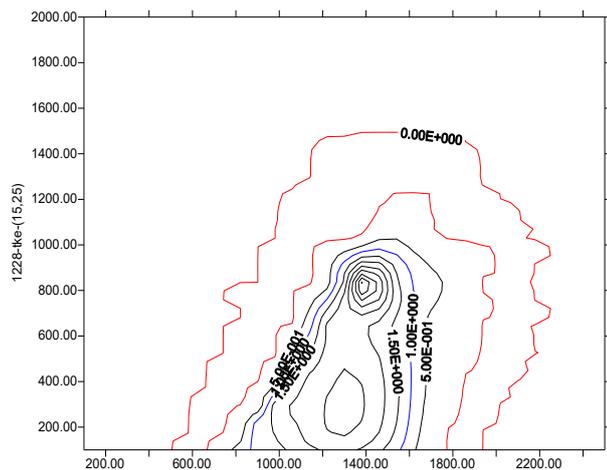


圖9 meso model模式模擬高雄紊流動能隨時間變化，單位 $1\text{m}^2/\text{s}^2$ ，紅線為0，藍色為1，等值線0.5。

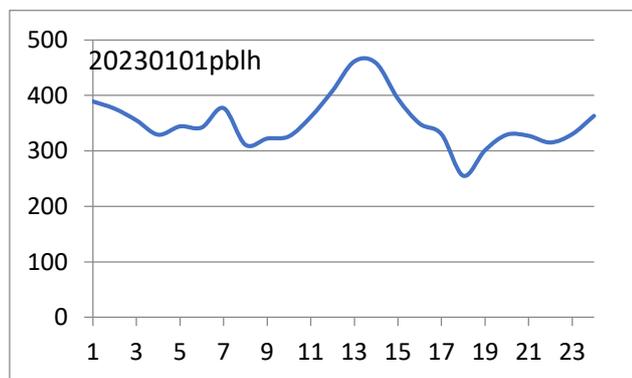


圖10 ERA5求出高雄2023年1月1日PBLH逐時分布。

6. 結論

本研究透過對諾曼第D日天氣預報的省思，探討在缺乏高空觀測資料、超級電腦，甚至無網路情況下，如何建置戰區的數值天氣預報模式。諾曼第登陸的氣象預報包含潮汐、浪高、天氣系統，盟軍與德軍均掌握到這些天氣與海象預報。其預報成功的因素是造成這些氣象因子的中緯度氣旋理論已相當成熟，且雙方預報人員也投入許多時間瞭解當地氣候特徵。然而臺灣天氣屬於跨尺度的中尺度天氣系統，遠比中緯度氣旋模式複雜許多，且現在數值天氣預報模式過於複雜，需要網路與電力、超級電腦才能運作，這在實際

戰場上將有困難。本文試圖建立簡單中尺度數值天氣預報系統meso model，無須透過網路，甚至無須高空觀測資料，即可合理模擬出中尺度天氣現象。本文運用Nozaki (1973)的PBLH方法，以地面觀測資料建立PBLH，並以ERA5的PBLH資料檢視這種方法的可行性，結果顯示Nozaki方法具有可靠性。此外，在預報PBLH方面，meso模式僅使用地面觀測資料，就能預測PBLH的演變，且使用時間相當有效率，24小時預報在個人電腦上執行僅幾十分鐘即可執行完畢。透過對比ERA5資料，雖然meso模式的PBLH預報偏高，但隨時間變化的趨勢與ERA5結果一致，顯示meso模式在戰區PBLH預報功能上是可行的。

後續可以進一步將meso模式整合其他參數，例如K指數、全指數以及閃電躍升頻率等，以建立雷暴預報模式，提供更全面的戰區天氣預報，並提高對戰術層面的氣象情報，以協助戰場指揮官做出更明智的作戰決策。另外，由於meso模式容易執行，運作的理論基礎並不困難，可以在教學情境上訓練學生瞭解中尺度天氣系統，建立臺灣地區中尺度天氣概念模式。本研究開發之戰區數值天氣預報模式，在教育、作戰上具有潛力，可以提供臺海戰爭行動的戰區氣象情資支援系統。

7. 參考文獻

- Ambrose, S. E., 2014, D-Day June 6, 1944, The Climactic Battle of World War II. Simon & Schuster.
- Atkinson Rick, 2013, The Road to D-Day: Behind the Battle That Won the War. Foreign Affairs, 92-4, 55–75.
- Anders Persson, 2020, Right for the Wrong Reason? A New Look at the 6 June 1944 D-Day Forecast by a Neutral Swede. Bulletin of the American Meteorological Society, 101, 993–1006.
- ECMWF, 2014, Revisiting the meteorology of

- the D-Day period, using a modern analysis and forecasting system (website: <http://www.ecmwf.int/en/research/projects/era-clim/d-day-analyses>).
- Fleming J. R., 2004, Sverre Petterssen, the Bergen School, and the forecasts for D-Day. Proceedings of the International Commission on History of Meteorology, 75–83.
- Nozaki, K. Y., 1973, Mixing depths model using hourly surface observations. USAF Environmental Technical Applications Center Report, 7053.
- Shaw RH, Innes W., 1984, Some meteorological aspects of the D-Day invasion of Europe, 6 June 1944. American Meteorological Society.
- Tan, P.-H., Soong, W.-K., Tsao, S.-J., Chen, W.-J., Chen, I.-H., 2022, Impact of Lidar Data Assimilation on Simulating Afternoon Thunderstorms near Pingtung Airport, Taiwan: A Case Study. Atmosphere, 13, 1341.
- Vassie, J. and Choi, B. H., 2018, Simulation of Normandy Invasion on 6th of June, 1944. Journal of Coastal Research, Special Issue No. 85, 13-18.
- 宋偉國、吳冠霖、曾維德、黃廷為、蕭榮庭，2013，高雄地區細懸浮微粒與氣象環境相關性研究。航空技術學院學報。
- 宋偉國、呂冠毅、張而合，2013，高雄地區大氣邊界層特性研究。2013第三屆航空科技與飛航安全學術研討會。

Reflections on the Establishment of Regional Numerical Weather Forecasts during the Taiwan War from the Weather Forecasts of the Normandy Landing Operation

Kuo-Ching San, Wei-Kuo Soong

Department of Military Meteorology, Air Force Institute of Technology

Abstract

It has been nearly 80 years since Normandy landed on June 6th, 1944. In the absence of satellites, supercomputers, and even no internet at that time, the Allies and the Germans were able to forecast the weather in the war zone 48 hours later, relying on the conceptual model of cyclone development established by meteorologists and their understanding of the local climate characteristics. Nowadays, with the rapid advancement of technology, numerical weather prediction has become an indispensable forecasting tool for weather forecasting. However, if a war breaks out in the Taiwan Strait, it is likely that there will be a lack of network and electricity, and the existing numerical weather prediction is too dependent on network and electricity, which makes it difficult to operate normally in the battlefield. The purpose of this paper is to establish a simple meso-scale numerical weather prediction model, which can quickly provide weather information in the battlefield without network, and provide students with a meso-scale weather concept model in the teaching field, so as to achieve the dual-purpose of war and training. In this paper, we use the Nozaki (1973) method to establish the Planet Boundary Layer Height (PBLH) by ground observation, and examine the feasibility of the method with ERA5 PBLH. The results show the reliability of the Nozaki method. In addition, by choosing the meso prediction model, the evolution of sea-land winds and PBLH can be predicted using only ground-based observations. In the future, by combining the meso with other methods such as K-index, total-index, and the frequency of lightning rise, the objective prediction law of thunderstorms can be constructed as a numerical weather prediction model for war zones.

Keywords: Normandy, weather forecast, pblh, thunderstorms