



機器學習天氣預報模型FourCastNet 3 (FCN3) 於次季節尺度預報能力之初步評估

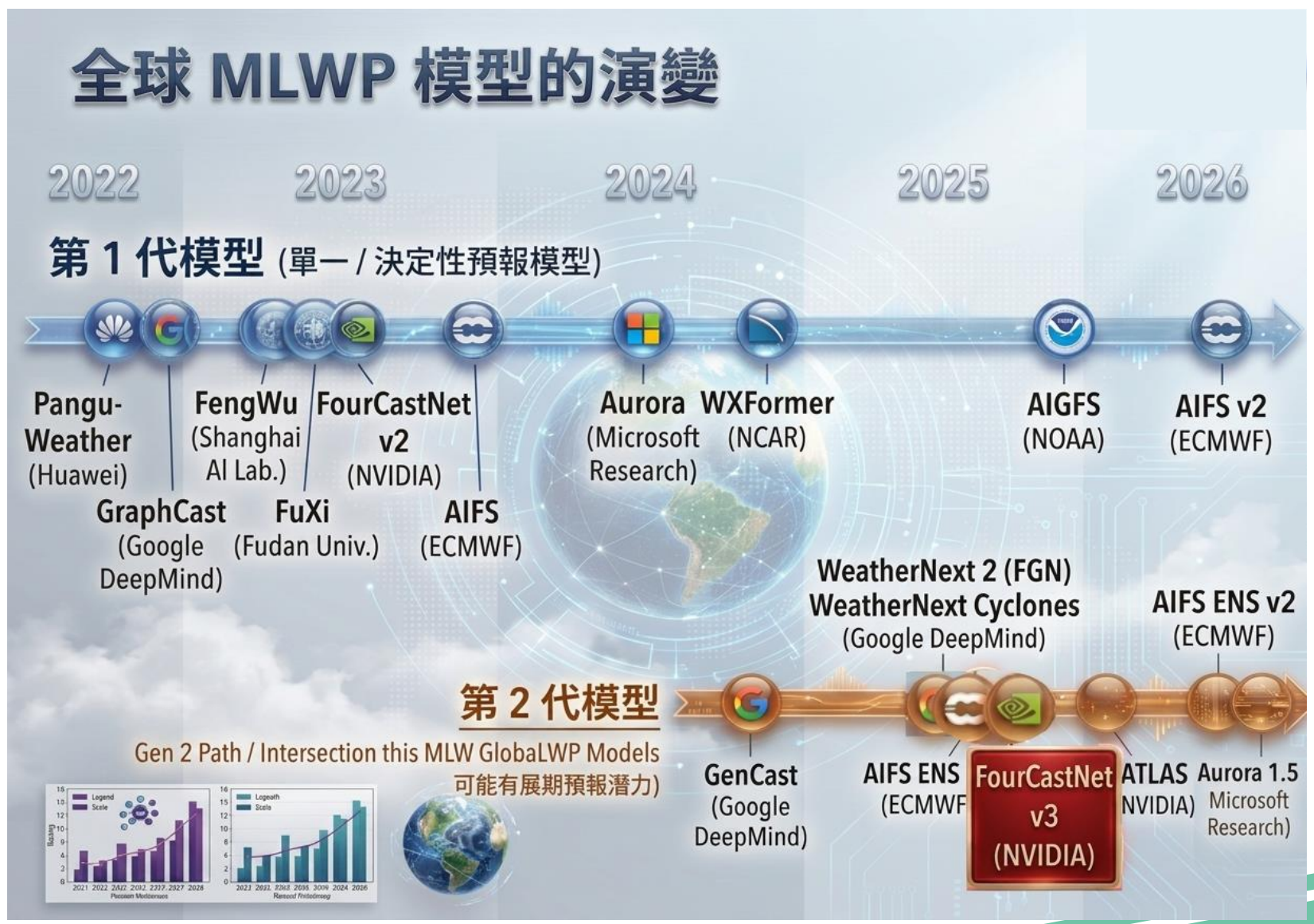
郭珮萱¹、李尚恩¹、李明營¹、劉邦彥¹、劉正欽¹、王志嘉²、蘇胤瑞²、連國淵¹、蕭玲鳳¹

¹中央氣象署科技發展組 ²中央氣象署海象氣候組

115年天氣分析與預報研討會
2025/9/1-3

➤ 研究背景與動機

- ⚡ **技術突破與演化**：近年機器學習天氣預報 (MLWP, Machine Learning Weather Prediction) 快速崛起，預報模型從初代「決定性預報 (Deterministic) 」迅速升級至第 2 代「機率與集系預報 (Probabilistic & Ensemble) 」。
- 🌐 **全球頂尖機構投入**：包含 ECMWF (AIFS)、Google DeepMind (GraphCast, GenCast)、NVIDIA (FourCastNet)、Microsoft (Aurora) 及 Huawei (Pangu) 等團隊相繼推動大模型迭代。
- ⚙️ **算力與效能革命**：MLWP 在極短時間內完成大氣狀態推算，大幅降低傳統數值天氣預報 (NWP) 所需的巨大算力成本。



➤ 預報能力的現狀與未知領域

ㄣ【已知優勢】2 週內的優異表現 (1-14 Days)

MLWP 模型在 2 週內的短期與中期預報中，已被證實具備極高精準度：

1. 傳統指標（如 H500 ACC, RMSE）表現媲美甚至超越目前頂尖 NWP（如 IFS）。
2. 集系模型（Ensemble Models）能有效量化不確定性，掌握氣旋與鋒面路徑。

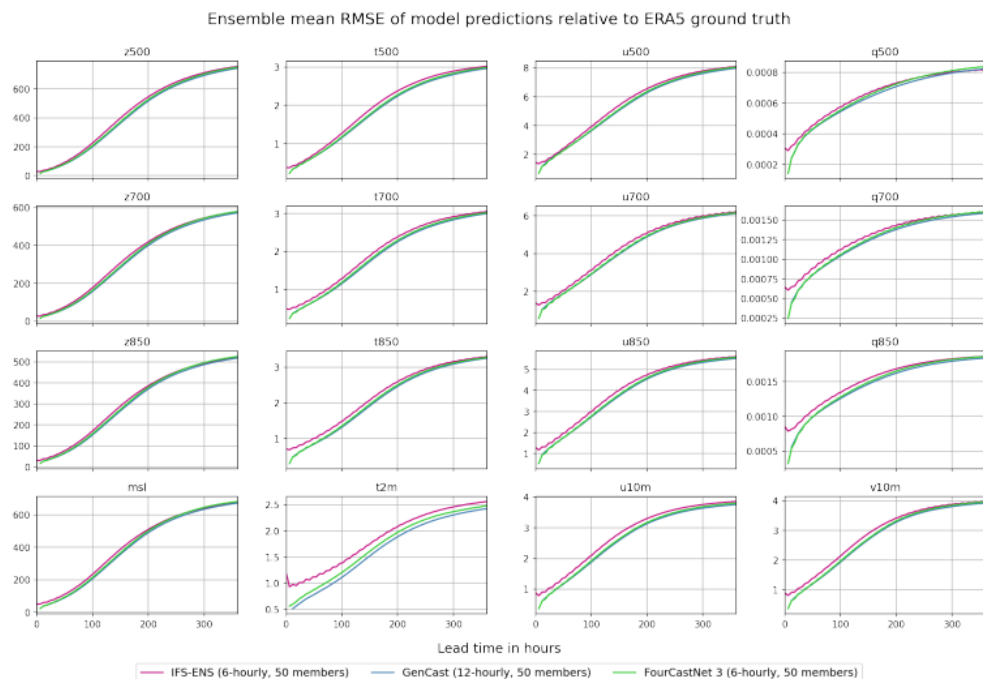


Figure 13: Ensemble-mean root mean squared errors (RMSE), averaged over initial conditions at 00:00:00 UTC and 12:00:00 UTC ranging from 2020-01-01 to 2020-12-31. Lower scores indicate better skill.
(Bonev et al., 2025)

【未知領域】次季節展期 (S2S, 3-4週) 預報挑戰

對於 3-4 週以上的展期（Sub-seasonal to Seasonal, S2S）預報結果仍不瞭解：

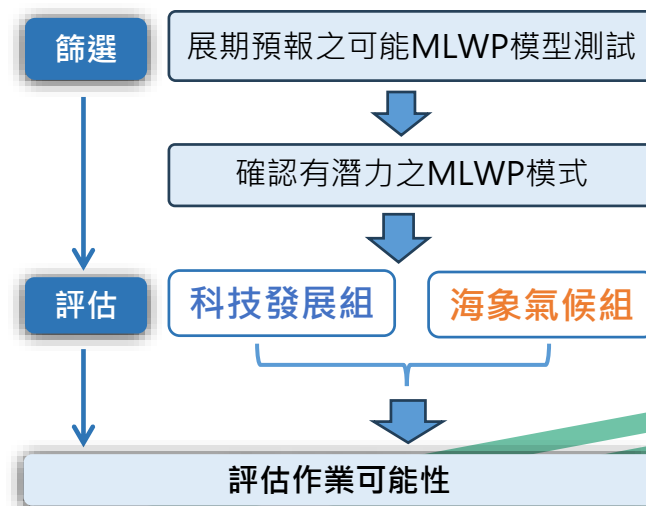
1. 大氣非線性混沌特徵隨時間加劇，誤差容易呈指數級累積。
2. MLWP 是否能有效捕捉長週期氣候訊號（如 MJO、平流層增溫等）尚缺乏全面檢驗。

氣象署機器學習天氣預報模型天氣之開發應用策略：跨組共同研發

為探索 AI 氣象預報之應用潛力，本署已建置現有主流開源機器學習天氣預報模型（MLWP）之在地化執行環境，現階段正進行平行測試與客觀檢驗，以掌握各模型在不同時空尺度下的預報特性與技巧。

更多模型在地化細節可參考: A7-5，劉正欽等人，
「中央氣象署機器學習天氣預報模型之應用與開發」

- 科技發展組
 1. 導入模式，並產出推論評估資料
 2. 評估預報技術得分
 3. 即時預報、再預報流程建置
- 海象氣候組
 1. 評估極端氣候個案

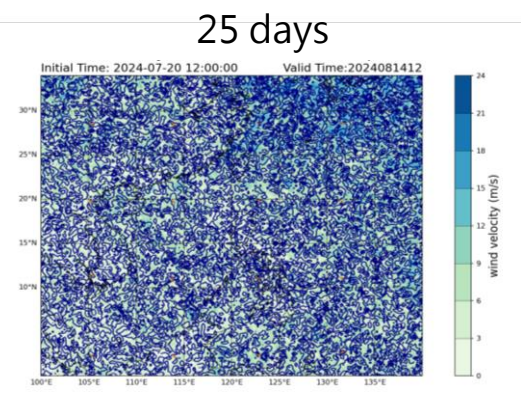
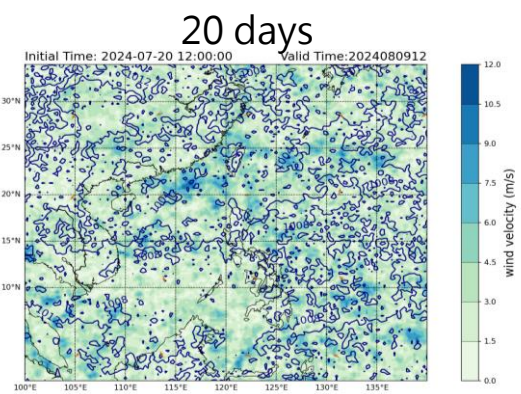


第 2 代模型展期預報可能性測試

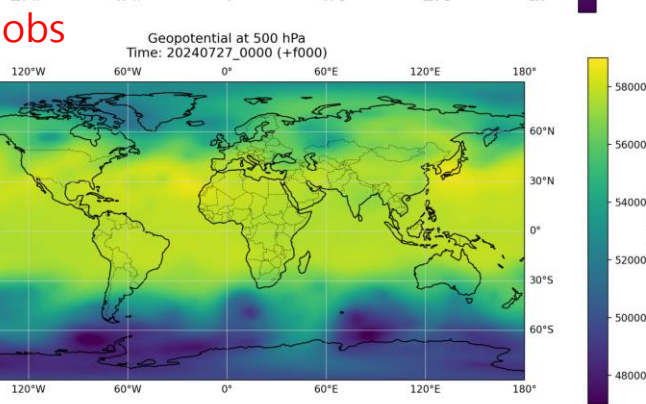
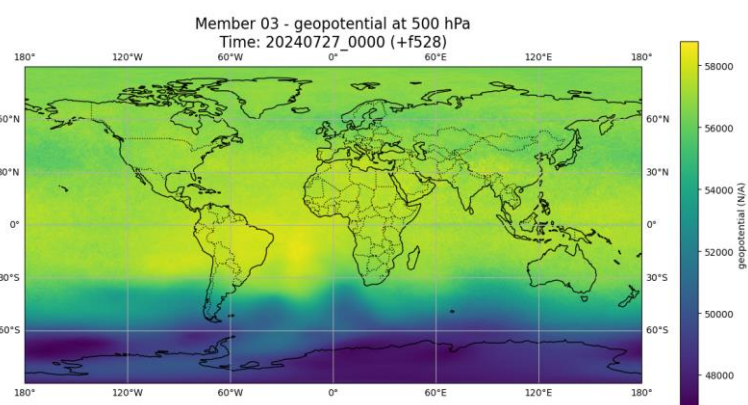
- ◆ GenCast：15 天之後預報有明顯雜訊
- ◆ AIFS ENS：預報後期誤差增長不合理
- ◆ FCN3：45 天內預報的誤差增長較合理，最具備展期預報之潛力

GenCast

10米風速(shading) & mslp(contour)

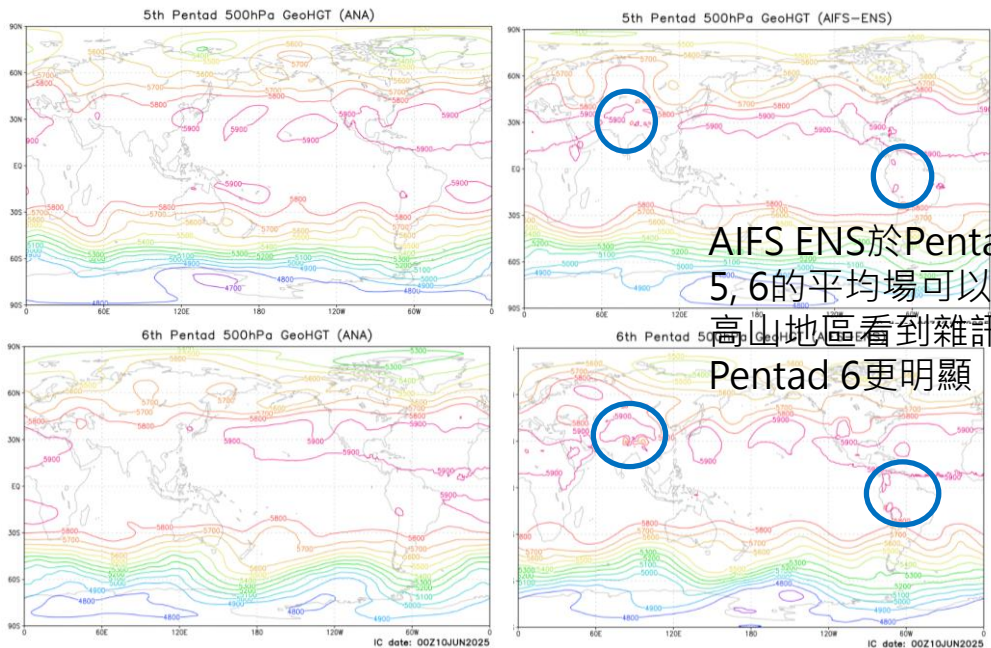


500hPa HGT – case 2025061000

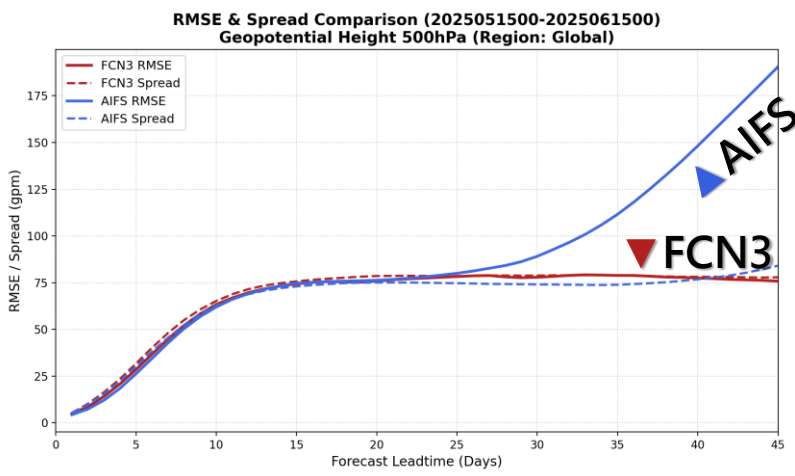


AIFS ENS

500hPa HGT – case 2025061000



RMSE & spread



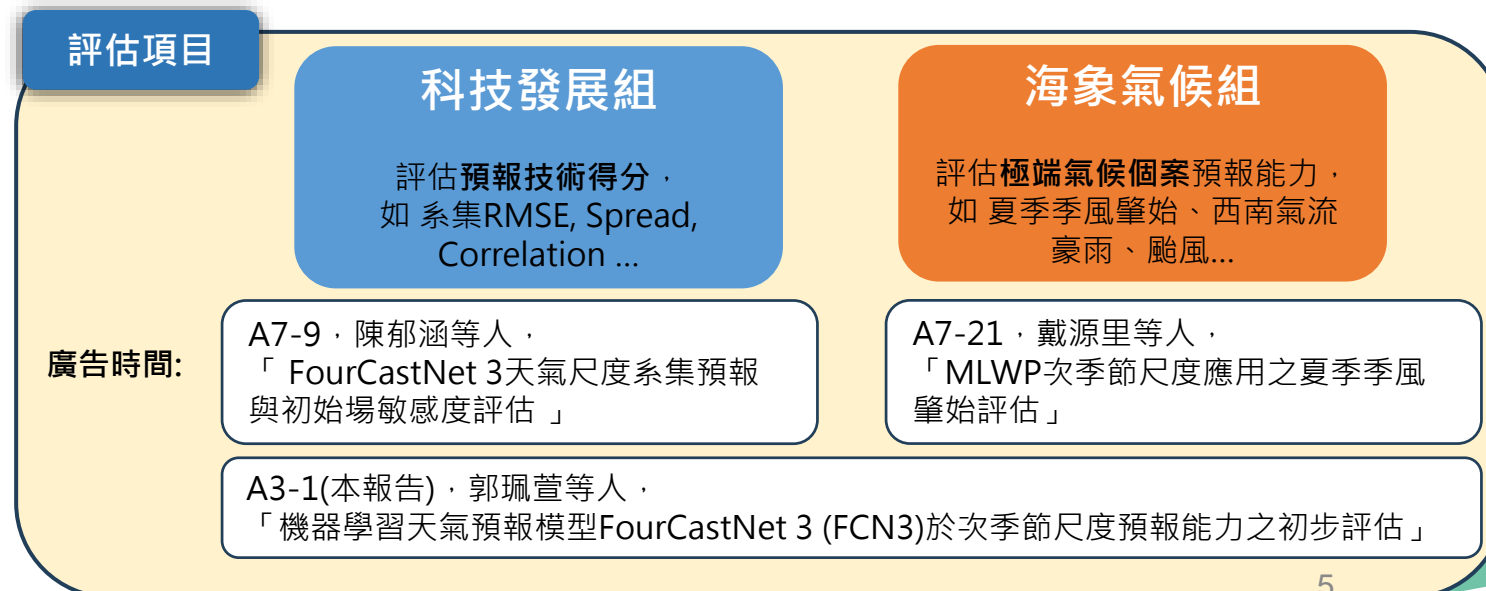
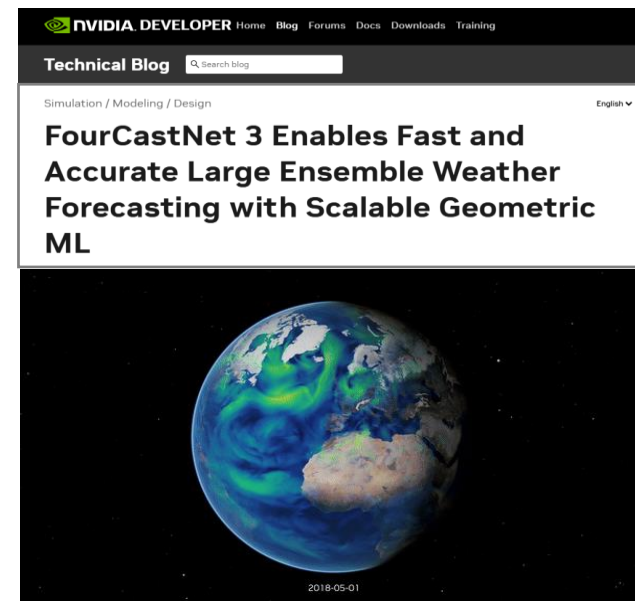
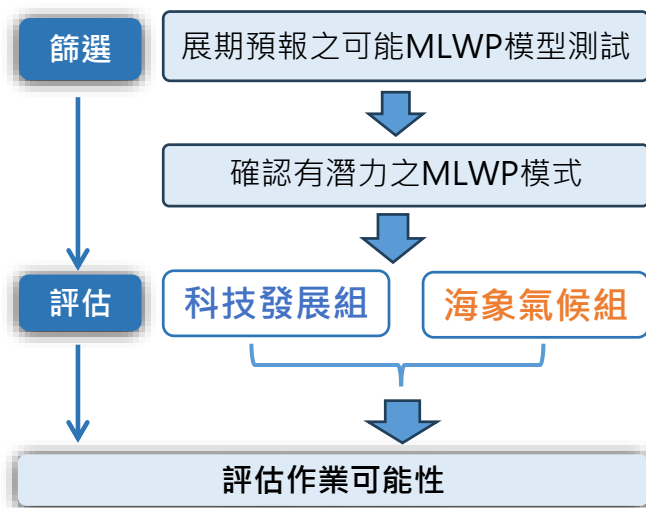
變數容易不穩定，GENCAST 無法支援展期預測。

(圖片海象氣候組提供)

FourCastNet 3 (FCN3)核心技術亮點

-  **可擴展的幾何機器學習 (Geometric ML)**：採用可擴展的球型幾何學習方法，極大地提升了機率與大規模集系 (Large Ensemble) 天氣預報的精確度。
-  **算力效能的巨大飛躍**：在單張 **NVIDIA H100 GPU**上，只需不到**4分鐘**即可完成 60 天 (0.25°解析度)全球氣象預報——速度比 GenCast 快 8 倍、比傳統 IFS-ENS 快 60 倍。
-  **次季節 (S2S) 卓越穩定性**：具備優秀的機率技能、頻譜忠實度 (Spectral Fidelity) 與集系校準能力，為 3-4 週以上的長展期預報奠定強大基礎。

 使用本署 1 GPU A100節點，運行 50 成員 45 天預報所需時間約 3.5小時



次季節預報評估架構與指標



目標個案

個案目標說明	個案數(IC)	初始場來源(初始場成員數)
2025年冬季(1/15-2/15)	31	ECMWF IFS ENS ensemble IC (50)
2025年夏季(7/1-7/31)	31	ECMWF IFS ENS ensemble IC (50)
小計	62	

模式資料概述

模式	成員數	預報長度(天)	產品解析度	校驗解析度
FCN3	50	45	0.25	0.8
ECS2S	100 (部分使用50個)	45	0.8	0.8
NCEP GEFS	30	35	0.5	0.8
CWA GEPSv3 (平行測試版)	20	30	0.5	0.8
ERA5	再分析資料			2.5 (MJO校驗)

檢驗指標



定量驗證指標 (Quantitative Metrics)

均方根誤差 (RMSE)：檢驗預報誤差隨時間累積與擴散之趨勢。



氣候現象 (Teleconnections)

MJO 季內振盪：檢驗 FCN3 能否維持熱帶對流與東傳訊號之相位。

季風指標：檢驗 FCN3 能否掌握季風之趨勢。



系集均方根誤差(RMSE)及系集離散度(Spread)校驗

個案日期: (冬季)2025/01/15-2/15 00Z
(夏季)2025/07/01-31 00Z

模式	成員數	預報長度(天)	產品資料解析度	校驗使用解析度
FCN3	50	45	0.25	0.8
ECS2S	100	45	0.8	0.8
NCEP GEFS	30	35	0.5	0.8
CWA GEPSv3 (平行測試版)	20	30	0.5	0.8

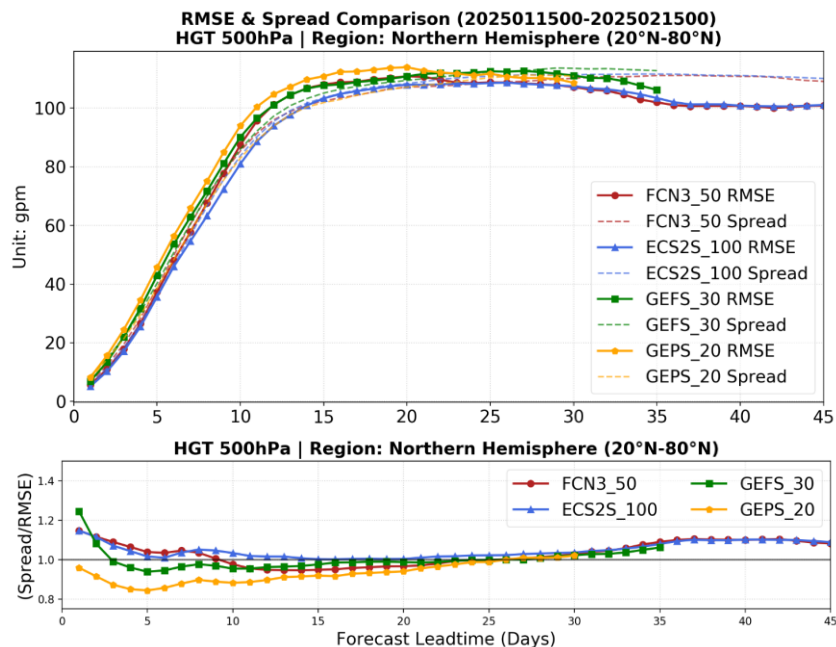
註: 產品資料解析度非等於模式解析度

HGT 500 (冬)

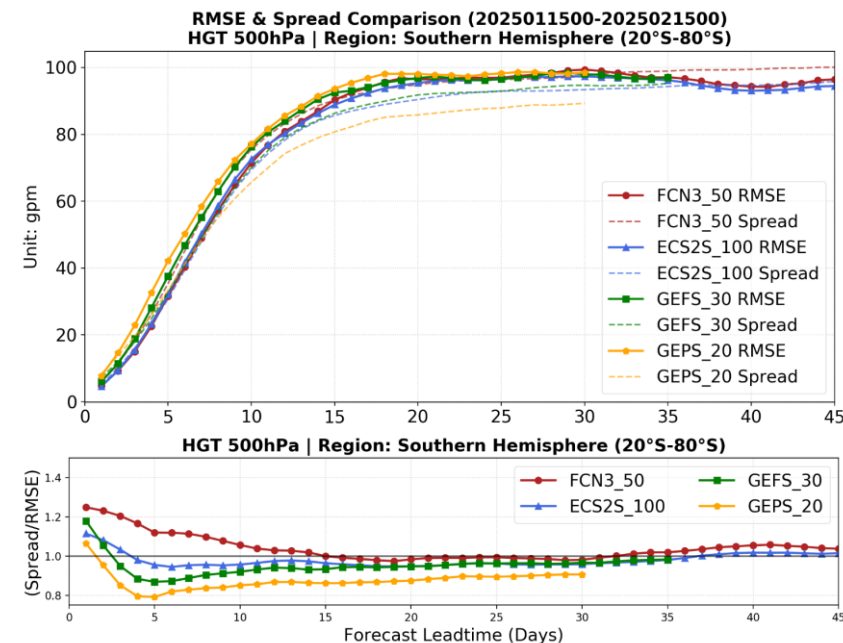
IC: 2025/01/15-02/15 00Z

模式	成員數
FCN3	50
ECS2S	100
NCEPGEFS	30
CWAGEPS	20

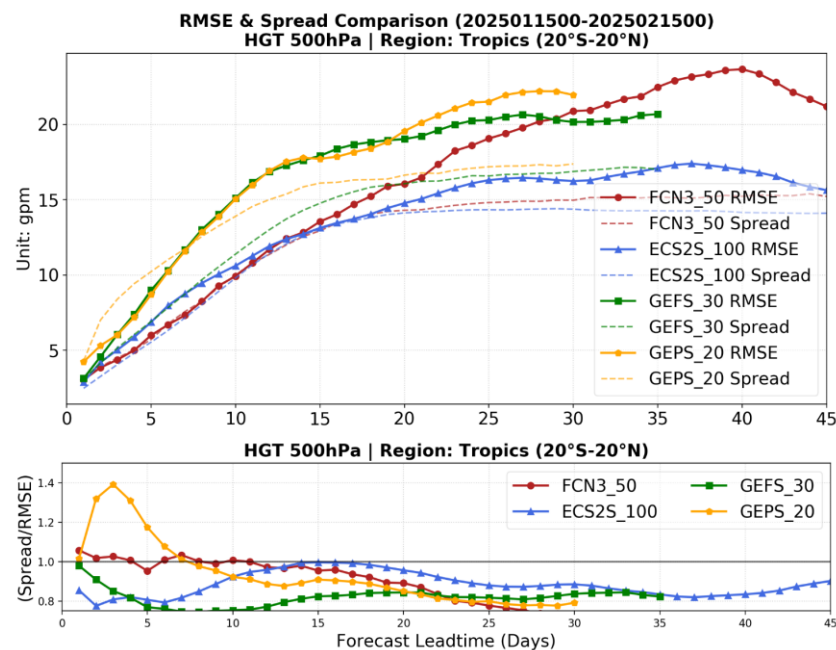
H500, 北半球



H500, 南半球



H500, 熱帶



➤ HGT500 (以RMSE判定):

	北半球	南半球	熱帶
Week1-2	ECS2S	FCN3	FCN3
Week3-4	ECS2S	ECS2S	ECS2S

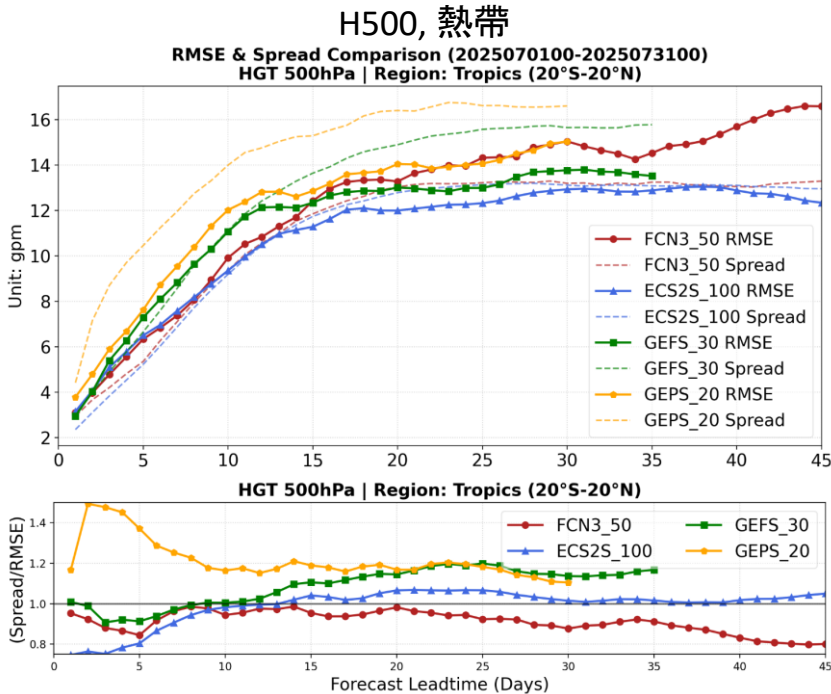
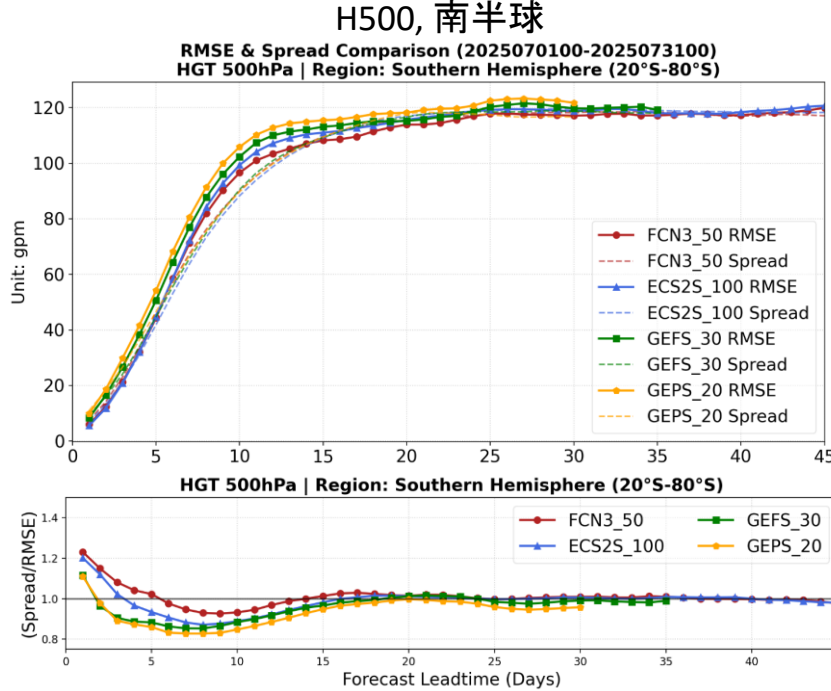
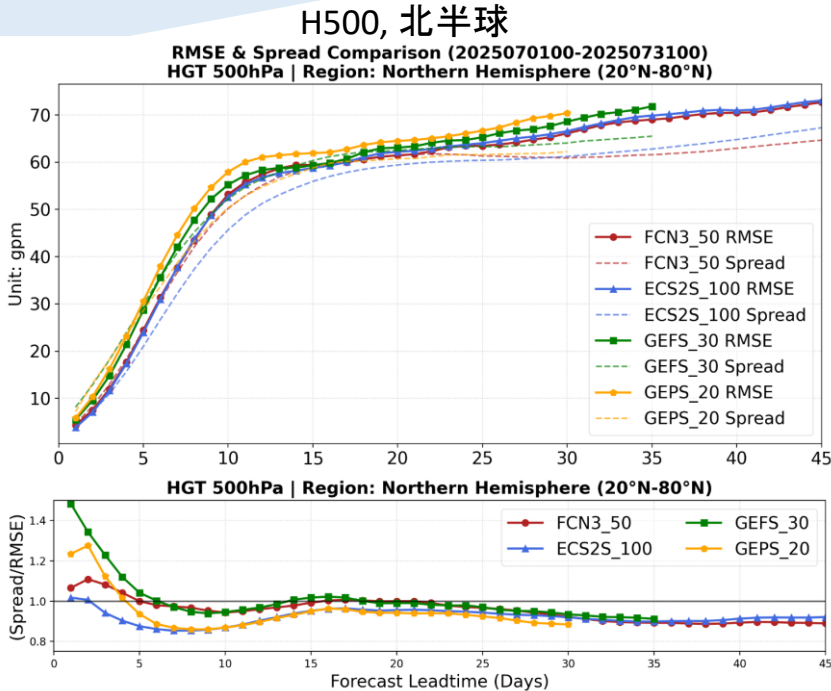
整體排序(表現好>不好): ECS2S > FCN3 > NCEP GEFS > CWA GEPS

1. FCN3在熱帶預報20天以後RMSE有隨時間增加的現象
2. GEFS與GEPS在熱帶RMSE有明顯較大的問題

HGT 500 (夏)

IC: 2025/07/01-31 00Z

模式	成員數
FCN3	50
ECS2S	100
NCEPGEFS	30
CWAGEPS	20



➤ HGT500 (以RMSE判定):

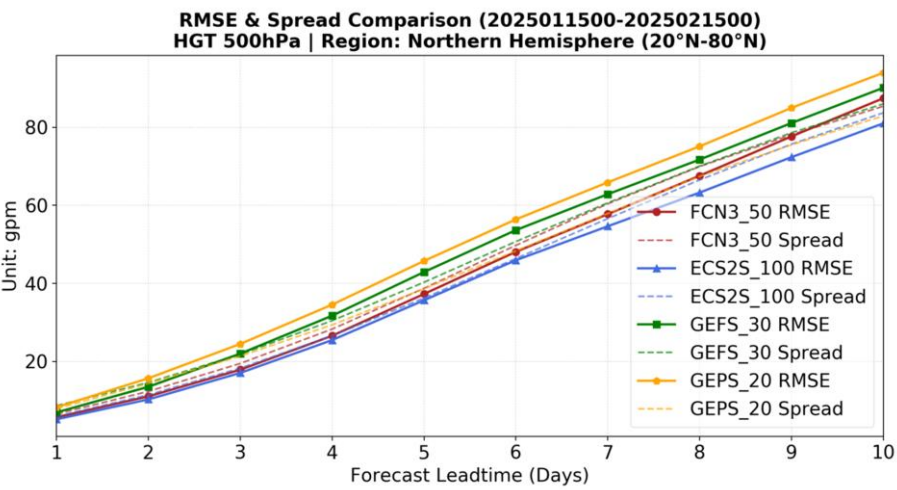
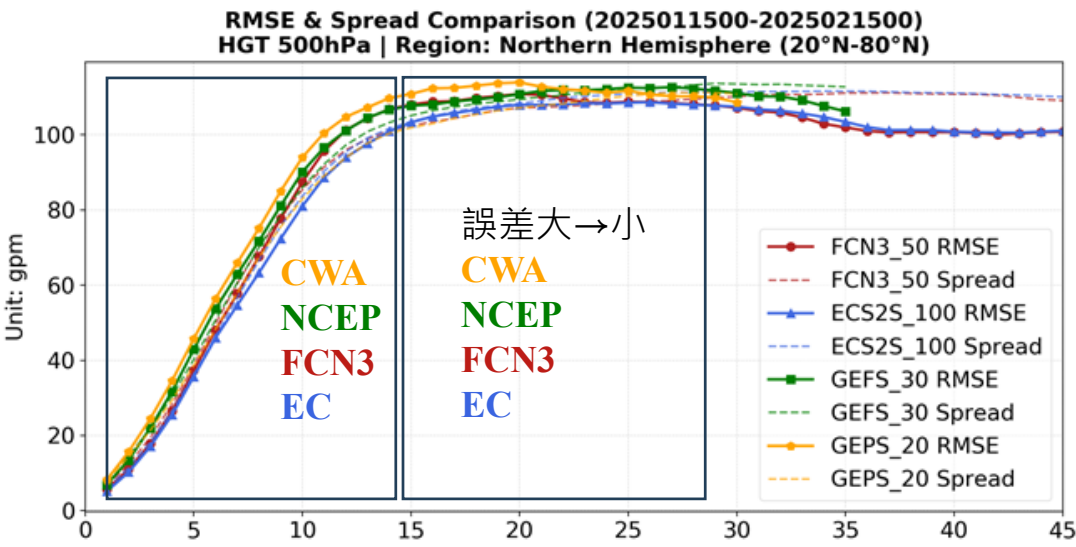
	北半球	南半球	熱帶
Week1-2	FCN3 ≈ ECS2S	FCN3	FCN3 ≈ ECS2S
Week3-4	FCN3	FCN3	ECS2S

- 1. FCN3在熱帶預報20天以後RMSE有隨時間增加的現象
- 2. GEFS與GEPS在熱帶有spread過大的問題

➤ 系集平均均方根誤差

測試小結

- ◆ FCN3 優於NCEP GEFS及CWA GEPS
- ◆ 接近但略遜於ECS2S



以均方根誤差為評比標準，選出預報能力最佳的模式

2025/1/16~2/15		北半球	南半球	熱帶	表現最好模式
Week1-2	H500	ECS2S	FCN3	FCN3	FCN3
	T850	ECS2S	ECS2S	ECS2S	ECS2S
	U200	ECS2S	ECS2S ≈ FCN3	ECS2S	ECS2S
	U850	ECS2S	ECS2S	ECS2S	ECS2S
	V200	ECS2S ≈ FCN3	ECS2S ≈ FCN3	ECS2S	ECS2S
	V850	ECS2S ≈ FCN3	ECS2S	ECS2S	ECS2S
Week3-4	H500	ECS2S	ECS2S	ECS2S	ECS2S
	T850	ECS2S	ECS2S	ECS2S	ECS2S
	U200	ECS2S	ECS2S	ECS2S	ECS2S
	U850	ECS2S	ECS2S	ECS2S	ECS2S
	V200	ECS2S	ECS2S	ECS2S	ECS2S
	V850	ECS2S	ECS2S	ECS2S	ECS2S

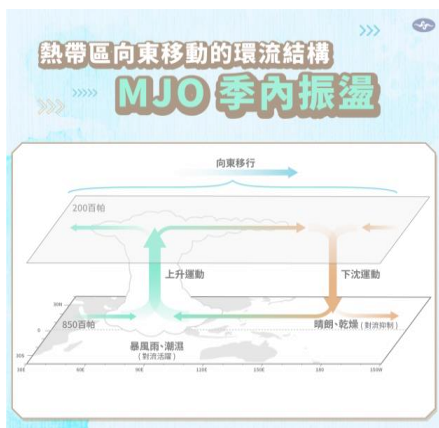
2025/7/1-31		北半球	南半球	熱帶	表現最好模式
Week1-2	H500	FCN3 ≈ ECS2S	FCN3	FCN3 ≈ ECS2S	FCN3
	T850	FCN3 ≈ ECS2S	FCN3 ≈ ECS2S	ECS2S	ECS2S
	U200	FCN3 ≈ ECS2S	FCN3	FCN3	FCN3
	U850	ECS2S	FCN3 ≈ ECS2S	FCN3	FCN3 ≈ ECS2S
	V200	FCN3 ≈ ECS2S	FCN3	FCN3 ≈ ECS2S	FCN3 ≈ ECS2S
	V850	ECS2S	FCN3	ECS2S	ECS2S
Week3-4	H500	FCN3	FCN3	ECS2S	FCN3
	T850	FCN3	FCN3	ECS2S	FCN3
	U200	ECS2S	FCN3 ≈ ECS2S	FCN3	FCN3 ≈ ECS2S
	U850	ECS2S	ECS2S	ECS2S	ECS2S
	V200	ECS2S	FCN3	ECS2S	ECS2S
	V850	ECS2S	FCN3	ECS2S	ECS2S



冬季(MJO)及夏季(BSISO)相關指標校驗

➤ FCN3模式缺少向外長波輻射(Outgoing longwave radiation, OLR)的對流預報資料，且未做reforecast，僅以MJO/BSISO動力環流相關的物理量進行診斷：

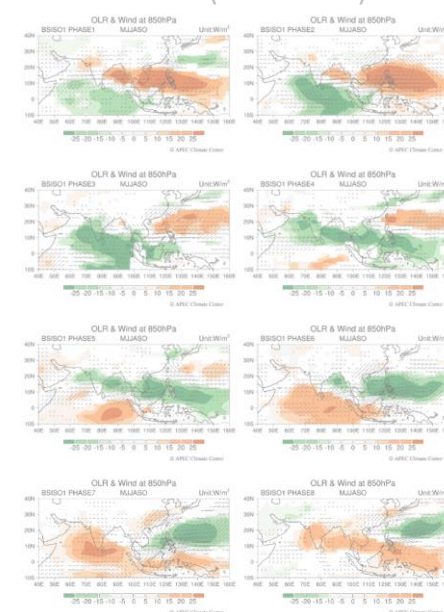
1. 利用高空 200 hPa 速度位勢(200 hPa Velocity Potential, χ_{200})捕捉大尺度高空輻散場的結構演變與移動特徵。
2. 結合低空 850 hPa 緯向風(850hPa U-wind, U850)評估熱帶低層環流場的配置趨勢。



個案日期: (冬季)2025/01/15-2/15 00Z
(夏季)2025/07/01-31 00Z

模式	成員數	預報長度(天)	產品資料解析度	校驗使用解析度
FCN3	50	45	0.25	2.5
ECS2S50	50	45	0.8	2.5
ERA5	再分析資料			2.5 (MJO index校驗)

BSISO OLR圖(1991-2020)



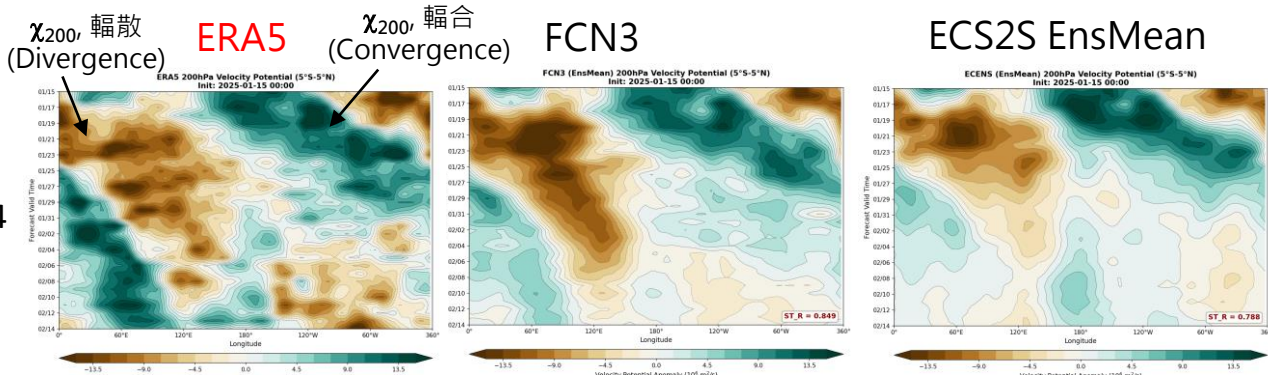
冬季MJO (Madden-Julian Oscillation, MJO):



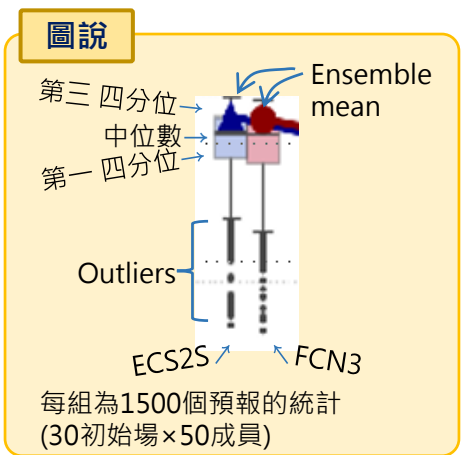
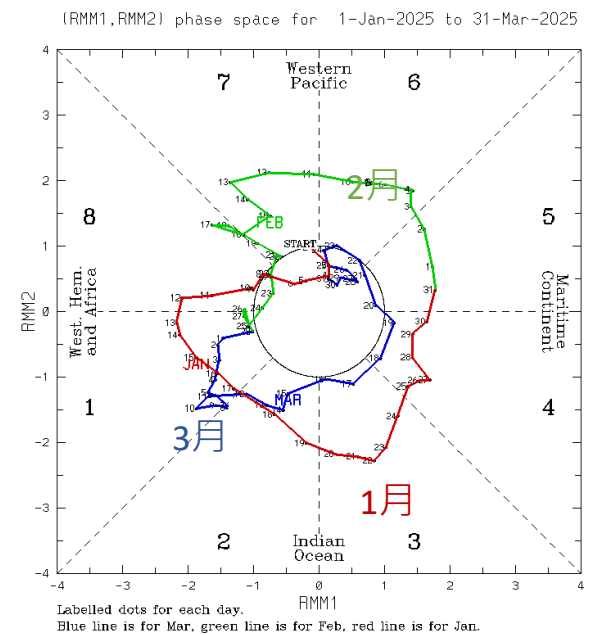
模式	成員數
FCN3	50
ECS2S	50 (1-50)

- 1. 初始場: 2025/1/15-2/15 00Z
- 2. 變數: 200 hPa速度位勢(χ_{200}) anomaly、850 hPa緯向風(U850) anomaly
- 3. 氣候值: ERA5(1990-2019)
- 4. 統計範圍: (0E-360E, 15S-15N)

IC: 2025/1/15
Plot: 1/15-2/14

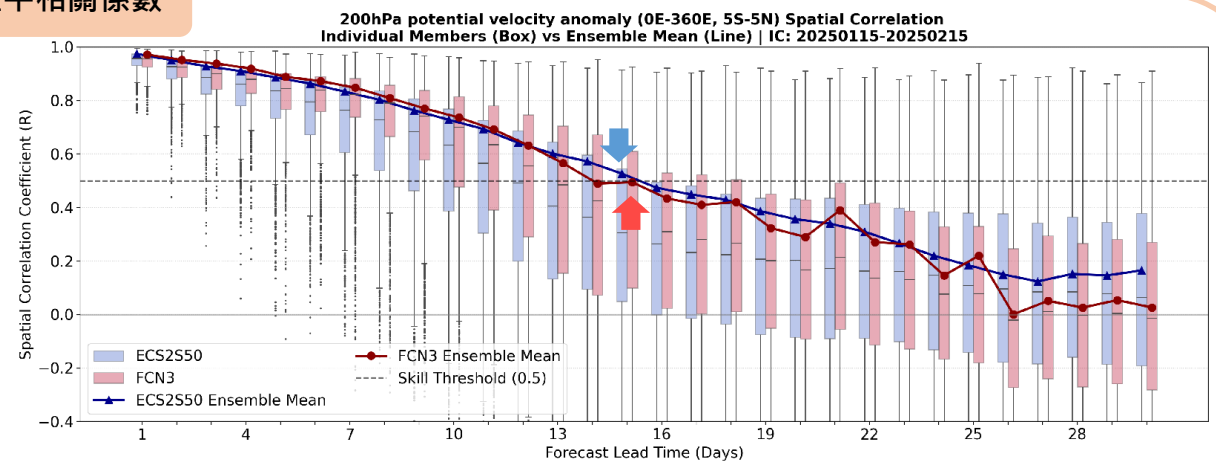


2025/1-3月MJO案例

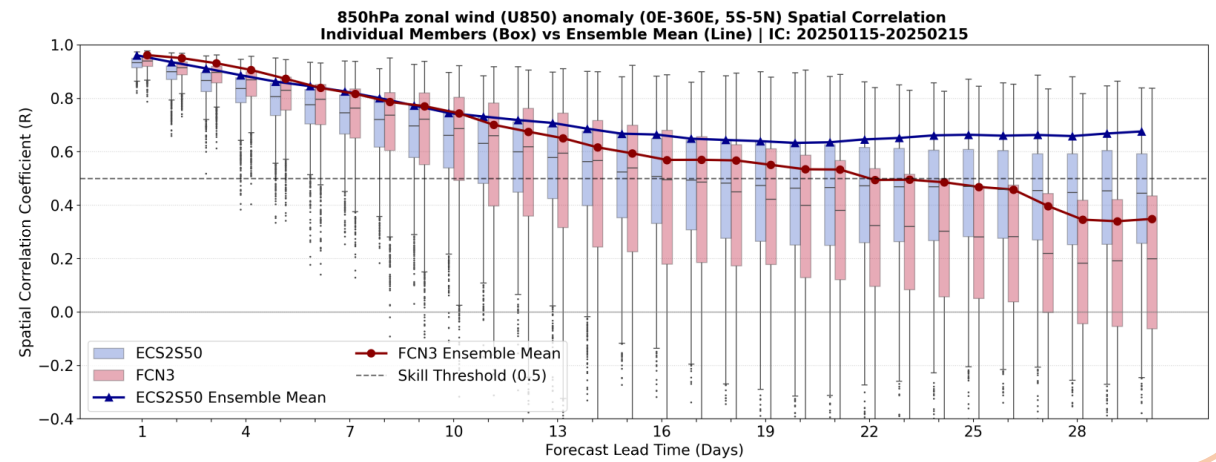


空間距平相關係數

χ_{200}

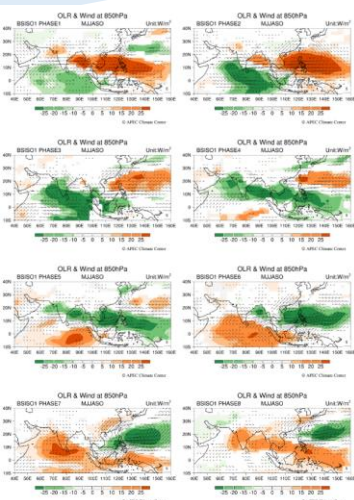


U850



夏季BSISO (Boreal Summer Intraseasonal Oscillation, BSISO):

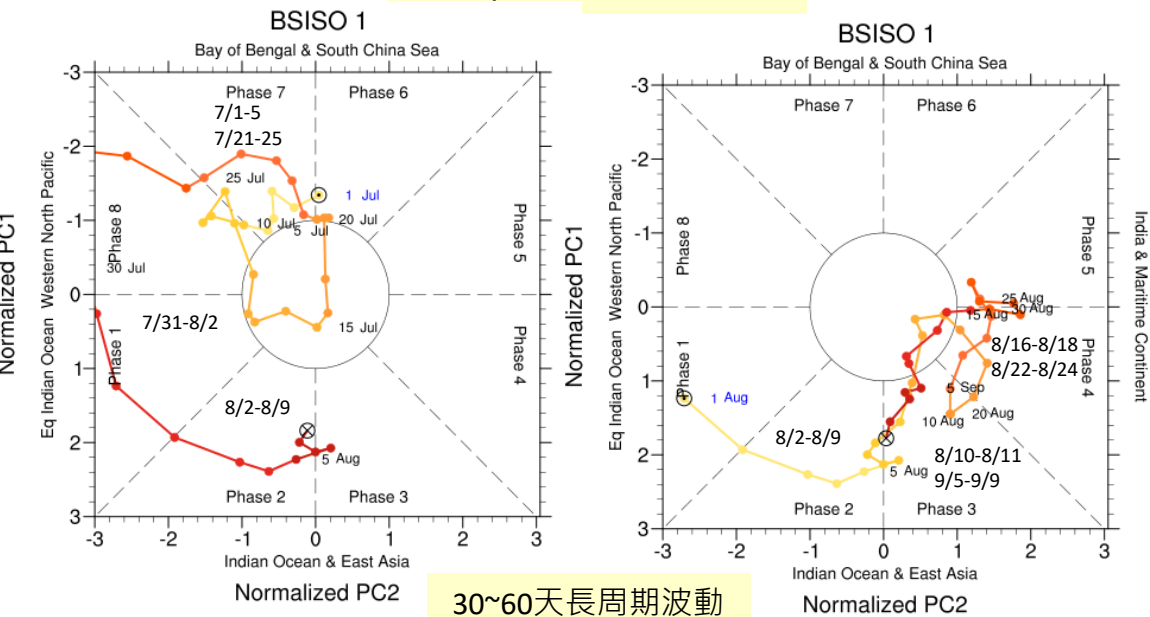
BSISO OLR圖(1991-2020)



模式	成員數
FCN3	50
ECS2S	50 (1-50)

- 1. 初始場: 2025/7/1-7/31 00Z
- 2. 變數: 200 hPa速度位勢(χ_{200}) anomaly、850 hPa緯向風(U850) anomaly
- 3. 氣候值: ERA5(1990-2019)
- 4. 統計範圍: (60E-90E, 10S-40N)(印度洋) (110E-140E, 10S-40N)(台灣、華南到菲律賓海)

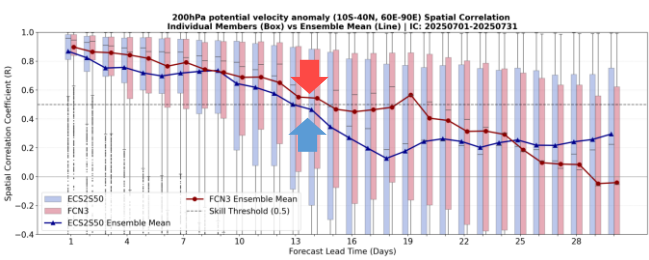
2025/7-8月BSISO案例



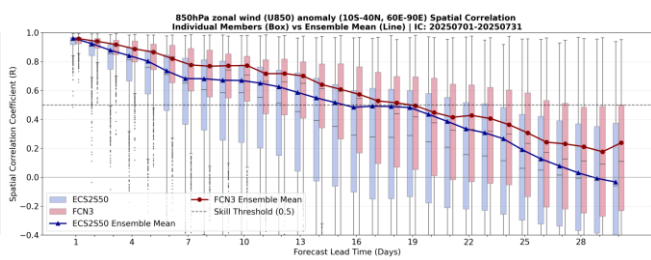
空間距平相關係數

(60E-90E, 10S-40N)
印度洋海域

200 hPa速度位勢(χ_{200})

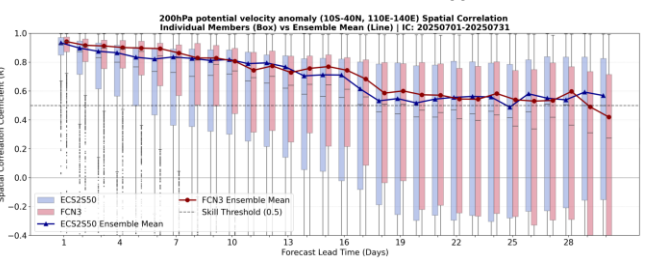


低空緯向風(U850)

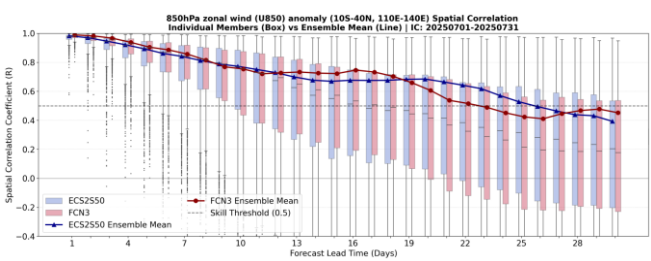


(110E-140E, 10S-40N)
西北太平洋與東亞海域

200 hPa速度位勢(χ_{200})



低空緯向風(U850)

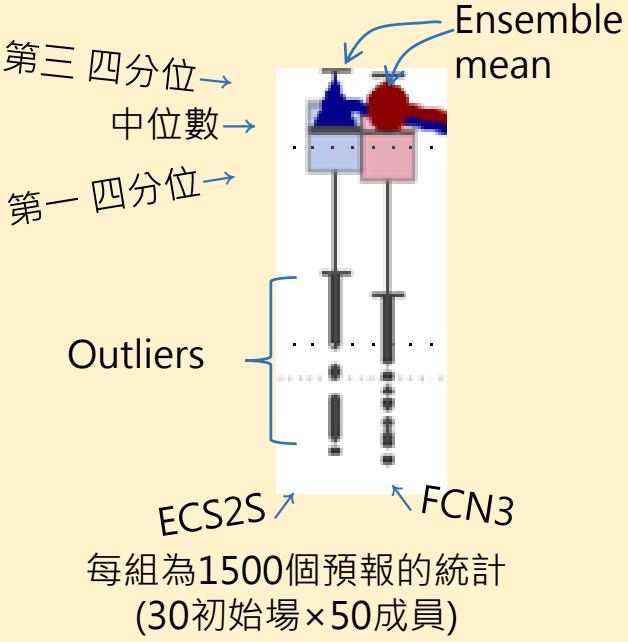


➤ 200 hPa速度位勢(χ_{200}) anomaly相關係數

測試小結

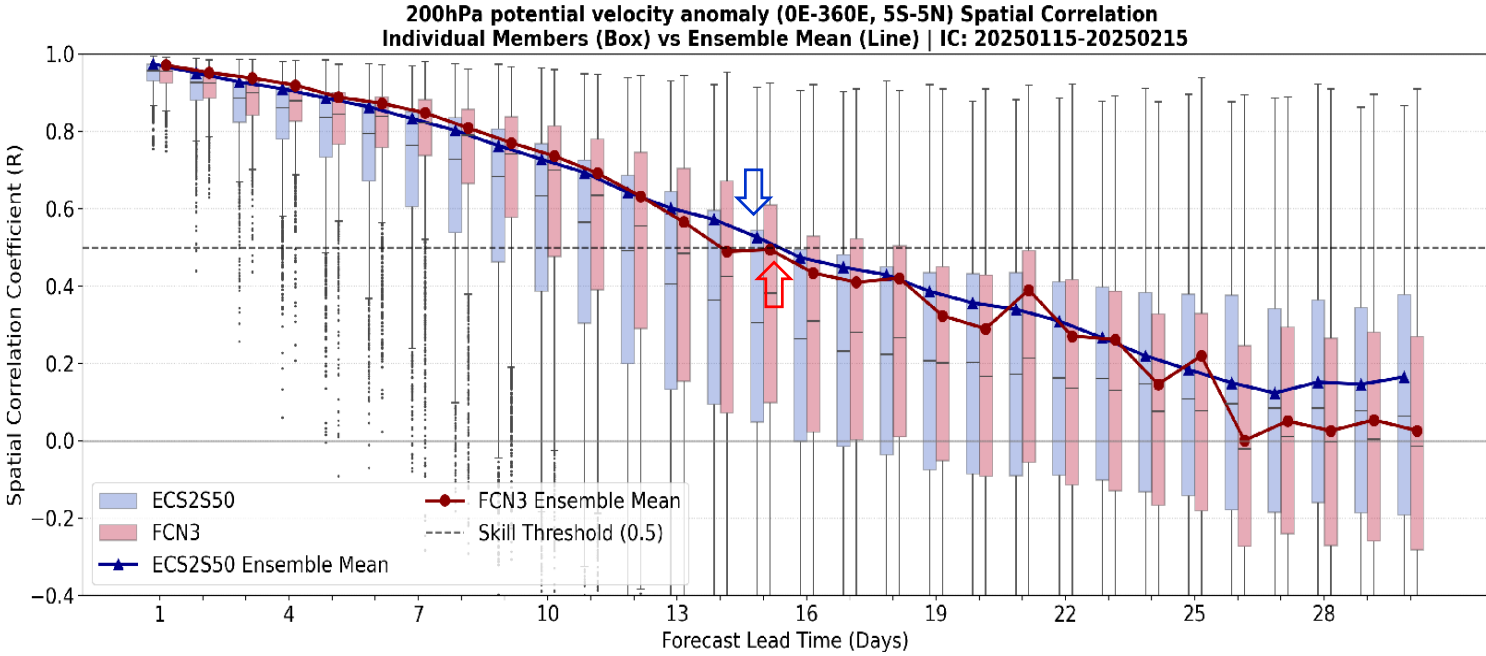
- ◆ FCN3 表現大致略優或接近於ECS2S
- ◆ 惟Week3-4的850百帕風場以ECS2S表現較好

圖說



以相關係數為評比標準，選出預報能力最佳的模式

	預報週數	變數	空間距平相關係數
2025/2	Week1-2	200百帕速度位勢	FCN3
		850百帕緯向風	FCN3 (W1較好) ≈ ECS2S (W2較好)
	Week3-4	200百帕速度位勢	Corr>0.5: ECS2S (15天) ≈ FCN3 (15天)
		850百帕緯向風	Corr>0.5: ECS2S (30天)>FCN3 (20天)
2025/7	Week1-2	200百帕速度位勢	FCN3
		850百帕緯向風	FCN3
	Week3-4	200百帕速度位勢	Corr>0.5: FCN3 (14-28天) > ECS2S (14-28天) FCN3相關係數較ECS2S高
		850百帕緯向風	Corr>0.5: ECS2S (20-25天)> FCN3 (約20天)

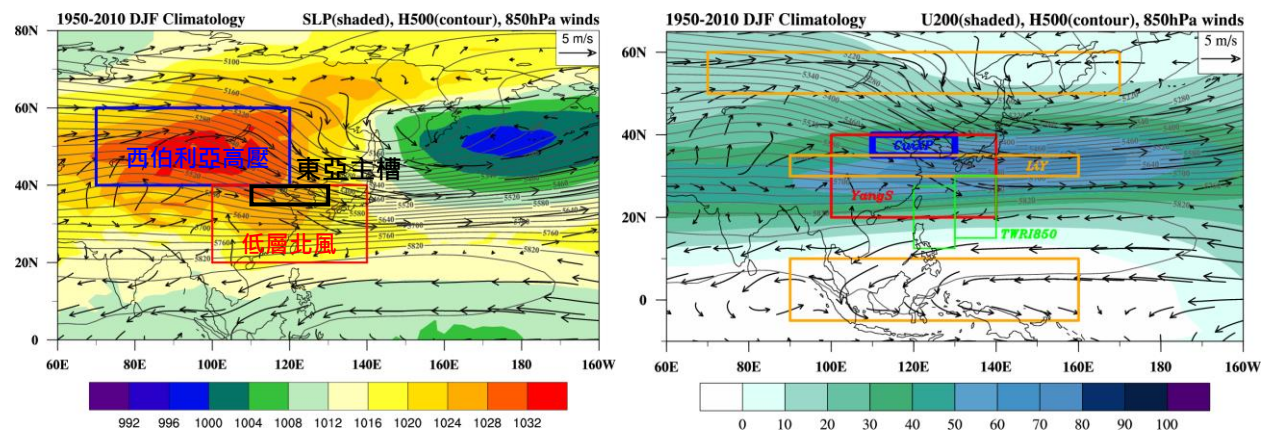


季風指標

測試小結

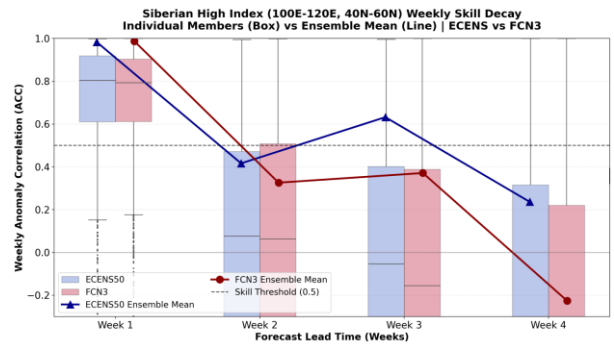
◆ 以ECS2S表現較好

冬季 Winter Monsoon Indices

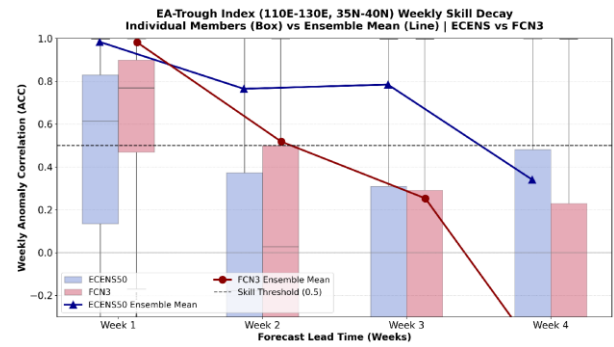


Winter	Indices	Variable	Definition
西伯利亞高壓	GongDY, S.-M. High Gong et al. (2001)	Mean Sea Level Pressure (MSLP)	(40°-60°N, 70°-120°E)
東亞主槽	CuiXP, EA-Trough Cui and Sun (1999)	500hPa Geopotential Height (H500)	(35°-40°N, 110°-130°E)

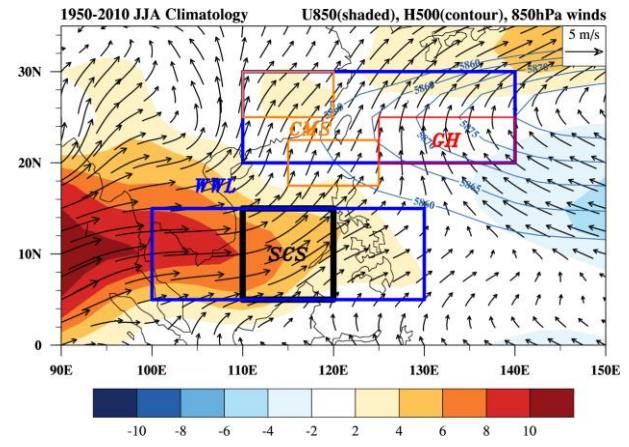
西伯利亞高壓



東亞主槽

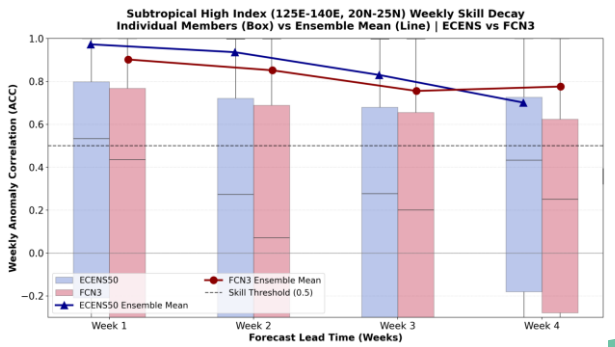


夏季 Summer Monsoon Indices

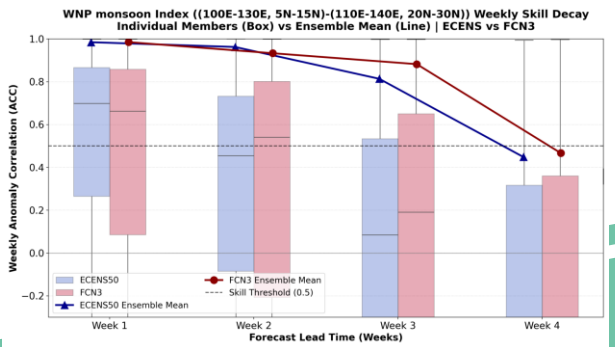


Summer	Indices	Variable	Definition
副熱帶高壓	GH, Subtropical High Gong and Ho (1999)	500hPa Geopotential Height (H500)	(20°-25°N, 125°-140°E)
西北太平洋季風	WWL, WNP monsoon Wang et al. (2001)	850hPa Zonal Wind (U850)	(5°-15°N, 100°-130°E) - (20°-30°N, 110°-140°E)

副熱帶高壓



西北太平洋季風



➤ 初步評估結論與未來展望

- 個案日期: (冬季)2025/01/15-2/15 00Z
(夏季)2025/07/01-31 00Z
- FCN3有極高的算力效率優勢，預報能力表現亮眼，整體技巧直逼國際頂尖 NWP (ECMWF)。

- 1.系集均方根誤差(RMSE):
評估 H500、T850、U/V200/850 等關鍵變數，FCN3 表現顯著優於 NCEP GEFS 及 CWA GEPS。前 1-2 週表現可媲美甚至超越 EC，惟中長期 (3-4 週) 衰退較快，整體略遜於 ECENS。
2. 熱帶環流與對流 (200hPa 速度位勢空間相關):
第 1-2 週 FCN3 掌握度最佳；第 3-4 週則與 EC 相當。
3. 季風指標 (Monsoon Index):
預報趨勢與 EC 接近，但趨勢掌握仍有差距，整體仍以 ECENS 最優。
- MLWP(FCN3)的限制：
- 1. 物理機制缺失：缺乏海氣耦合與海冰動態之預報資訊。
 - 2. 極端事件外推限制：受限於歷史訓練資料 (Data-driven)，對破紀錄極端天氣事件之預報能力存疑。
 - 3. 訊號平滑效應(Blurring Effect): 隨預報時間增加，極值易被平滑化，導致氣候平均態可能偏向。

未來研究應用

為提升次季節尺度 (3-4週) 之預報能力，氣象署目前正研擬 FourCastNet 3 (FCN3)模型之在地化作業可行性；同時將持續引進並評估最新開源機器學習天氣模型 (MLWP)，以擴充展期與次季節尺度之氣象預報技巧。

1.系集均方根誤差(RMSE):

2025/1/16~2/15		北半球	南半球	熱帶	表現最好模式	2025/7/1-31		北半球	南半球	熱帶	表現最好模式
Week1-2	H500	ECS2S	FCN3	FCN3	FCN3	Week1-2	H500	FCN3 ≈ ECS2S	FCN3	FCN3 ≈ ECS2S	FCN3
	T850	ECS2S	ECS2S	ECS2S	ECS2S		T850	FCN3 ≈ ECS2S	FCN3 ≈ ECS2S	ECS2S	ECS2S
	U200	ECS2S	ECS2S ≈ FCN3	ECS2S	ECS2S		U200	FCN3 ≈ ECS2S	FCN3	FCN3	FCN3
	U850	ECS2S	ECS2S	ECS2S	ECS2S		U850	ECS2S	FCN3 ≈ ECS2S	FCN3	FCN3 ≈ ECS2S
	V200	ECS2S ≈ FCN3	ECS2S ≈ FCN3	ECS2S	ECS2S		V200	FCN3 ≈ ECS2S	FCN3	FCN3 ≈ ECS2S	FCN3 ≈ ECS2S
	V850	ECS2S ≈ FCN3	ECS2S	ECS2S	ECS2S		V850	ECS2S	FCN3	ECS2S	ECS2S
Week3-4	H500	ECS2S	ECS2S	ECS2S	ECS2S	Week3-4	H500	FCN3	FCN3	ECS2S	FCN3
	T850	ECS2S	ECS2S	ECS2S	ECS2S		T850	FCN3	FCN3	ECS2S	FCN3
	U200	ECS2S	ECS2S	ECS2S	ECS2S		U200	ECS2S	FCN3 ≈ ECS2S	FCN3	FCN3 ≈ ECS2S
	U850	ECS2S	ECS2S	ECS2S	ECS2S		U850	ECS2S	ECS2S	ECS2S	ECS2S
	V200	ECS2S	ECS2S	ECS2S	ECS2S		V200	ECS2S	FCN3	ECS2S	ECS2S
	V850	ECS2S	ECS2S	ECS2S	ECS2S		V850	ECS2S	FCN3	ECS2S	ECS2S

2. 熱帶環流與對流 (200hPa 速度位勢空間相關):

	預報週數	變數	空間距平相關係數
2025/2	Week1-2	200百帕速度位勢	FCN3
		850百帕緯向風	FCN3 (W1較好) ≈ ECS2S (W2較好)
	Week3-4	200百帕速度位勢	Corr>0.5: ECS2S (15天) ≈ FCN3 (15天)
		850百帕緯向風	Corr>0.5: ECS2S (30天)>FCN3 (20天)
2025/7	Week1-2	200百帕速度位勢	FCN3
		850百帕緯向風	FCN3
	Week3-4	200百帕速度位勢	Corr>0.5: FCN3 (14-28天) > ECS2S (14-28天) FCN3相關係數較ECS2S高
		850百帕緯向風	Corr>0.5: ECS2S (20-25天)> FCN3 (約20天)

3. 季風指標 (Monsoon Index):

	指標名稱	Variable	Definition	表現較好模式
Winter	西伯利亞高壓	Mean Sea Level Pressure (MSLP)	(40°-60°N, 70°-120°E)	ECS2S
	東亞主槽	500hPa Geopotential Height (H500)	(35°-40°N, 110°-130°E)	ECS2S
Summer	副熱帶高壓	500hPa Geopotential Height (H500)	(20°-25°N, 125°-140°E)	ECS2S
	西北太平洋季風	850hPa Zonal Wind (U850)	(5°-15°N, 100°-130°E) - (20°-30°N, 110°-140°E)	ECS2S