

雷達風場反演技術介紹與對天氣預報之應用

陳智昇¹、李程毅²、葉竣澤²

空軍航空技術學院¹

空軍氣象聯隊²

摘要

都卜勒氣象雷達是現代劇烈天氣監測與預警作業的核心工具，其高時空解析度的觀測能力，為掌握颱風、鋒面雨帶及午後對流等天氣系統的發展提供了不可或缺的資訊。然而，都卜勒雷達的觀測原理存在一項內在限制：它僅能測量降水粒子沿雷達波束方向移動的「徑向速度」，無法直接描繪出完整的三維風場結構。為了克服此限制，氣象學家發展出各式風場反演技術，旨在從有限的徑向速度資料中，推算出最接近真實大氣狀態的完整風場。

然而，這些技術的發展並非單一路徑，而是在現代氣象作業的核心張力——即計算速度、資料複雜度與分析深度之間的權衡中演化而成。本報告旨在深入剖析並比較三種具代表性的雷達風場反演技術：SingleDop、WISSDOM 與 SAMURAI。此三者不僅是獨立的工具，更代表了上述權衡光譜上的三種典型策略：SingleDop 追求單站作業的即時性與易用性；WISSDOM 致力於整合多雷達資料網以實現大範圍、高精度的即時監測；而 SAMURAI 則以犧牲即時性為代價，換取對特定個案深入的物理機制探究。透過對其核心原理、實作方法及應用情境的系統性分析，闡明這些技術如何體現不同的戰略選擇，共同提升天氣分析的準確性，並為災害防救與飛航安全等關鍵領域提供決策支援。

關鍵字：雷達風場反演技術、徑向速度、SAMURAI

一、前言

1.1 研究背景與動機

單一都卜勒雷達的觀測原理，使其只能測得大氣中降水粒子相對於雷達站的接近或遠離速度，即「徑向速度」（如圖1）。這意味著，單憑一部雷達的原始觀測，我們僅能得知風在特定方向上的分量，而無法獲取完整的水平風向、風速以及垂直氣流等關鍵資訊。然而，無論是氣象分析預報人員、災害防救應變單位，還是機場的飛航管制人員，其作業需求皆高度依賴對真實三維風場的精確掌握。

例如，我國空軍氣象聯隊與航空技術學

院合作的「國防先進合作研究案」即明確指出，為提升飛航安全，需要為機場預報人員提供更精確的機場周邊大氣流場資訊。同樣地，廖等人於「氣象預報與分析」期刊文章也強調，即時掌握劇烈降雨系統的發展、移動與垂直結構，是提升預警能力的關鍵。這些應用需求共同凸顯了一個核心問題：必須透過有效的反演技術，將雷達觀測到的徑向速度資料，轉換為更具實用價值的完整三維風場，才能真正發揮雷達觀測網的潛力。

1.2 雷達風場反演技術發展與介紹

風場反演技術是指利用都卜勒雷達等觀測資料，透過變分法等數學技巧，合成出大

氣中的「三維風場」結構的技術。早期的雷達風場反演技術方法，如速度方位顯示法（Velocity Azimuthal Display, VAD）速度體積處理技術（Volume Velocity Processing, VVP），為風場分析奠定了基礎。然而，這些方法普遍基於一個核心假設：風場在觀測範圍內呈現線性變化。此假設雖然簡化了計算，但在面對如鋒面切變區或中尺度渦旋等非線性、複雜的真實大氣流場時，其反演結果往往會出現較大偏差，限制了其在劇烈天氣分析中的應用。

隨著計算能力的提升與理論的發展，現代反演技術已變得更加精密與多元。針對特定天氣型態，科學家開發出專用的反演方法，例如針對颱風環流近似軸對稱特性的 GBVTD（Ground-Based Velocity Track Display）方法。此外，更發展出適用於一般天氣系統的單一都卜勒雷達反演技術，以及能夠整合多部雷達觀測、合成出更精確三維風場的多都卜勒雷達合成方法。這些技術的演進，催生出一系列各具特色的現代工具。

本報告將深入剖析三種代表性技術，它們分別體現了從快速單站分析、複雜多雷達合成到深度科學探究的不同應用策略。

二、雷達風場反演技術比較

本章節將深入剖析三種雷達風場反演技術：SingleDop、WISSDOM 與 SAMURAI。此三者分別代表了不同的應用取向與技術路徑：SingleDop 是一個易於部署的開源單站反演模組，WISSDOM 是一套針對全臺雷達網進行即時作業化合成的系統，而 SAMURAI 則是用於精密科學個案分析的研究工具。我們將從

各技術的核心原理、方法論、實作方式及應用案例等面向進行分析，旨在提供一個清晰的技術比較框架，以凸顯其各自的優勢與適用情境。

2.1 SingleDop 模組

2.1.1 技術概述

SingleDop 是一個由美國國家航空暨太空總署(NASA)開發、基於 Python 語言的開源軟體模組。其設計目標是從單一都卜勒雷達的觀測資料中，快速反演出二維的低空水平風場，特別適合應用於單一雷達站的即時作業化參考。

2.1.2 核心原理

此模組的技術基礎源於 Xu et al. (2006) 的研究。該方法的核心在於推導出背景徑向風（沿雷達波束方向）與切向風（垂直於雷達波束方向）分量誤差之間的交叉共變異函數。實質上，此函數透過數學模型描述觀測到的徑向風誤差與未觀測到的切向風誤差之間的關係，從而對完整的水平風向量進行統計上穩健的估算。此函數雖然在水平方向上是均勻的，但具有非各向同性的特性，使其能有效地利用單一雷達在低仰角掃描時觀測到徑向速度，進行中尺度的向量風分析。

2.1.3 作業流程與整合

SingleDop 的一大優勢在於其高度的整合性與自動化潛力。它可以與 PyART、wradlib 等廣泛應用的 Python 雷達資料處理模組庫無縫接軌。這使得從雷達原始二進位格式的解碼、品質管制（如去除雜訊回波、處理都卜勒風場折錯），到最終的風場反演，

能夠形成一個自動化的處理流程。這種易於部署的特性，大幅降低了技術應用的門檻。

SingleDop 的一個主要特點是其開源設計與模組化架構。它與其餘軟體緊密整合，軟體負責處理資料輸入、速度去模糊化和網格化等基礎任務，而 SingleDop 則在其之上進行風場檢索與可視化。這種協作模式使得各個工具能夠專注於各自的專業領域。

2.1.4 應用評估

在「國防先進合作研究案」中，莊(2024)利用白鹿颱風、莫拉克颱風及午後熱對流個案（如圖 2）對 SingleDop 進行了測試。其評估不僅是觀測性的，更包含了與雙都卜勒風場合成之「真實資料」進行的量化比較。結果顯示，對於颱風這類大範圍、結構清晰的氣旋式環流，SingleDop 能夠有效地掌握其主要的流場型態；以莫拉克颱風個案為例，其反演風場的 U、V 分量與合成風場的相關係數分別可達 0.84 與 0.70。然而，在反演尺度較小或結構更複雜的環流時，其結果對參數設定的敏感性非常高，這意味著作業者需針對不同天氣情境反覆調校，高度依賴使用者經驗。

雖然 SingleDop 為單一雷達站點提供了一個穩健、低計算負荷的解決方案，但要實現真正全面、覆蓋全國的大氣圖像，則需要整合多重資料來源——這正是 WISSDOM 系統設計旨在克服的挑戰。

2.2 WISSDOM 技術

2.2.1 技術概述

WISSDOM (Wind Synthesis System used to Doppler Measurement) 是由國立中央大

學廖宇慶教授團隊所開發的一套多都卜勒雷達三維風場合成方法。此技術的核心目標是整合臺灣全島的防災氣象雷達網資料，以建構大範圍、高解析度的即時三維風場，主要應用於劇烈天氣的防災監測。

2.2.2 核心原理

相較於傳統方法，WISSDOM 具備多項獨特的技術優勢，使其在處理臺灣複雜的地形與多雷達觀測網時更具彈性與準確性：

- A. 克服基線限制：能夠有效反演傳統雙都卜勒雷達技術中，因幾何限制而難以處理的雷達基線 (base line) 附近的風場。
- B. 納入渦度方程式：使用渦度方程式作為物理約束條件之一，有助於增進後續熱力反演的正確性。
- C. 處理複雜地形：引用沉浸邊界法 (Immersed Boundary Method, IBM)，使其能夠精確處理臺灣複雜山脈地形邊界的風場結構。
- D. 填補觀測空缺：可彈性使用探空或數值模式等不同的背景場資料，填補雷達訊號無法覆蓋的區域，確保風場的完整性。
- E. 支援多部雷達：演算法設計上可使用任意數目的雷達觀測資料，能充分利用臺灣密集的雷達網。

2.2.3 作業化挑戰與解決方案

WISSDOM 的精密演算法雖然準確，但也帶來了巨大的計算挑戰。若直接對全臺灣範圍進行一次性的高解析度風場反演，計算時間接近 12 小時，完全無法滿足即時防災應變的需求。為此，國家災害防救科技中心採用了「分散式計算」的創新解決方案。此方法將全臺灣劃分為 48 個相互重疊的子區域

(80x80 公里)，利用多核心主機同時對這些子區域進行獨立的反演計算，最後再透過雙線性內插法(bilinear interpolation)將所有子區域的結果無縫拼接成完整的全臺三維風場。透過此方法，整體計算時間被大幅縮短至 6-7 分鐘，成功克服了作業化的瓶頸。

2.2.4 主要應用

WISSDOM 技術的主要應用是建置「全臺風場反演分析系統」(如圖 3)。正是前述的計算效率突破，使得系統能夠以接近即時的頻率進行更新，最終實現了每 20 分鐘產製一次全臺三維風場、並整合每 10 分鐘更新雷達回波資料的作業能力。此系統為災防單位提供了一個監測劇烈降雨系統發展、移動路徑與三維垂直結構的強力工具。

相較於 WISSDOM 致力於大範圍的即時監測，另一類反演技術則專注於特定個案的微觀動力學分析，SAMURAI 即為此類科學研究工具的典範。

2.3 SAMURAI 技術

2.3.1 技術概述

SAMURAI(Spline Analysis at Mesoscale Utilizing Radar and Aircraft Instrumentation)是一種用於學術研究的精密風場反演技術，其設計目標並非即時作業化監測，而是針對特定的天氣個案進行深入且細緻的動力學分析，以揭示其內部的物理機制。

2.3.2 核心原理

SAMURAI 的技術核心是整合了三維變分資料同化(3DVAR)有限元素法。此方法透過最小化一個成本函數(cost function)，在

觀測資料與物理定律的約束下，估算出最可能接近真實大氣狀態的動力與熱力場。值得注意的是，它同樣整合了浸入邊界法(Immersed Boundary Method, IBM)，能夠將複雜地形的強迫作用納入反演計算中，使其分析結果更貼近臺灣的真實環境。

2.3.3 應用案例

劉(2025)於《TAHOPE SOP4 期間之準線性對流系統》中，便利用 SAMURAI 技術，對一個準線性對流系統(Quasi-Linear Convective System, QLCS)進行了深入分析。透過此技術，成功反演出水平解析度 1 公里、垂直解析度 0.5 公里的高解析度三維風場資料。此技術的價值不僅在於產出風場本身，更重要的是，這些高品質的風場資料能夠支援後續更深度的物理機制探討。例如，論文中即利用反演出的風場，進行了渦度收支的定量計算。這項能力使研究人員得以超越單純描述風場的層次，進而能定量診斷驅動風暴演變與結構的特定物理過程(如渦度的傾斜與拉伸作用)，達到其他兩種技術無法企及的分析深度。

SAMURAI 代表了風場反演在科學探索上的極致應用。為了系統性地呈現這三種技術的定位與差異，接下來將進行全面的綜合比較分析。

2.4 三種技術之比較分析

綜合前述內容，我們可將 SingleDop、WISSDOM 與 SAMURAI 這三種技術的特性進行歸納與對比，下表旨在清晰地呈現它們在不同維度上的差異，凸顯各自的適用情境(如表 1)。

三、SAMURAI 技術於嘉義機場午後熱對流之分析應用

3.1 資料來源及研究方法

雷達三維風場反演選擇 2 顆雷達含以上，所計算出來的風場較具有參考價值。高雄林園與臺中南屯均可觀測到個案對流胞的發展情況，但由於此個案初始發生位置為臺南，後續向北移動至嘉義，因此為避免因為距離太遠導致觀測誤差，故選擇高雄林園為主，臺中南屯為輔。

使用高雄林園與臺中南屯新建置波長 5 公分之降雨雷達(雙偏極化雷達)，可較一般都卜勒(單偏極化)氣象雷達提供更多元之降雨觀測資訊，除可提供更貼近地表之高時間解析度(每 2 分鐘一筆)與高空間解析度(250 公尺)之降雨觀測外(現行雷達網時間解析度為 10 分鐘、空間解析度為 1 公里)，亦可估算降水粒子大小與型態，能更即時、精準監測與掌握目前降雨的分布狀況。較佳觀測範圍為 150 公里，理想觀測範圍為 75 公里。

透過「大氣科學應用研究與資料庫」的TAHOPE(臺灣區域豪雨觀測與預報實驗Tai-wan Area Heavy rain Observation and Prediction Experiment) 2022 年實驗計畫，取得雷達觀測資料。再經過 python 軟體，與 Google Colab 雲端計算資源，處理雷達原始檔案，接著透過 Samurai 軟體去計算 2 顆雷達疊加出來的三維風場(如圖 4)。

3.2 個案影響說明

2022 年 8 月 7 日，太平洋高壓的外圍環流在海峽地區形成背風繞流，造成偏北風與偏南風在臺南交匯，並在夏季熱力作用下，午後生成強烈雷雨胞及短時強降雨。

研究結果顯示，到了下午 1530 至 1630 期間，嘉義地區逐漸形成明顯的輻合區(如圖 5，紅色虛線區)。此時，臺南一帶已有對

流系統發展，其風場外流可能影響嘉義南側的近地面風場，使該區域轉為西南風；同時，嘉義地區本身則受到西北風。兩股不同方向的低層氣流在嘉義附近交會，使當地輻合訊號進一步增強，並有利於後續的對流發展。1600 至 1700 時，雨帶已經進入嘉義，並在嘉義東北側出現輻合區。隨著 1700 至 1800 時，這一輻合區的對流開始成長並發展起來。可以看出，臺南午後的輻合區對對流的成長起到了積極作用，並且這些對流系統產生了外流邊界，進一步在下游產生輻合，促進了對流的發展。

3.3 雷達風場反演結果

於圖 7 至 8，可見自近地面連續發展至 12 至 14 km 的上升氣流核心，其軸線向下風側(北向)傾斜，高反射率帶主要位於核心的下風側，而非直接以降水負載覆蓋上升。使近地面暖濕入流得以沿前緣抬升進入上升區，而下沉與降水被有效分流至後側與下風側，避免早期的自我抑制。

剖面 3 至 6 km 的南向氣流持續跨越對流上部形成中層導引氣流，其上方輻散與上升核心重疊且在時間上保持穩定。低層徑向風與輻散場顯示，前緣近地層以輻合入流為主而非整層外吹；渦度場則在上升氣流兩側維持穩定的渦度正負偶極，反映低層風切所產生的水平渦度經傾斜項轉為垂直渦度，有助於在核心周邊維持動力低壓並強化上升(如圖 9)。

四、結論與未來展望

4.1 結論

綜合全文分析，不存在單一最優的風場反演技術，而是應根據特定應用場景與目標，選擇最合適的工具。SingleDop 的定位是一個易於部署的開源工具。它適合單一雷達站點進行快速、即時的風場趨勢分析。特別是在缺乏多雷達重疊覆蓋的區域，SingleDop 可作為機場預報人員判斷低空風場變化的輔助參考，為飛航安全提供多一分

保障。

WISSDOM 的定位是一個整合多雷達觀測網的作業化系統。它適用於國家級災害防救單位，能夠進行大範圍、即時且相對精確的劇烈天氣系統監測與預警。其處理複雜地形與克服基線限制的能力，使其成為臺灣地區防災應變的利器。

SAMURAI 的定位則是一個精密的科學分析工具。它主要應用於學術研究與個案的事後分析，透過其嚴謹的物理約束與高解析度反演能力，能夠揭示複雜天氣系統（如準線性對流系統）內部的詳細動力結構與物理過程，是推動氣象科學發展的重要研究手段。

4.2 未來展望

- A. 結合熱力學反演：未來的研究可進一步將風場反演與熱力學反演技術相結合。這將使得我們不僅能掌握大氣的動力結構（風場），更能獲取其熱力結構（溫度、氣壓等），從而建構出更完整的三維熱動力狀態，有助於更深入理解天氣系統的發展機制。
- B. 應用於數值天氣預報：反演出的高解析度、高頻率的三維風場，是極具價值的觀測資料。未來可透過先進的資料同化技術，將這些風場資訊融入對流尺度數值天氣預報模式中。此舉有望改善模式的初始場，從而顯著提升對劇烈天氣（如午後雷暴）的短期預報準確性。
- C. 強化專業應用：回歸「國防先進合作研究案」的目標，持續優化反演技術的穩定性與使用者介面，將能為機場預報人員提供更直觀、更精確的氣象資訊。這不僅有助於強化對低空風切、下衝氣流等危險天氣的預警能力，更能實質性地提升飛行任務的安全性與效率。

五、參考文獻

莊耀中，2024：空軍降雨雷達風場反演介面

建置暨提升飛航安全應用。國防科技學術合作研究。

廖信豪、林欣弘、林忠義、劉嘉騏、于宜強，2022：雷達大數據資料於全臺降雨熱區監測技術研究。氣象預報與分析，第 252 期。

Liu, Y. M., 2025: TAHOPE SOP4 期間之準線性對流系統：都卜勒雷達分析下的對流特徵與演變。臺灣大學。

Xu, Q., S. Liu, and M. Xue, 2006: Background error covariance functions for vector wind analyses using Doppler-radar radial velocity observations. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 132, 2887–2904

表 1 SingleDop、WISSDOM 與 SAMURAI 技術的特性

特性	SingleDop	WISSDOM	SAMURAI
1.核心原理	單督卜勒雷達反演	多都卜勒雷達風場合成	單督卜勒雷達反演 多都卜勒雷達風場合成
2.方法	交叉共變異函數	變分法合成法	三維變分資料同化(3DVAR)整合有線元素法
3.資料來源	單一都卜勒雷達的觀測資料。	多個都卜勒雷達的徑向風場觀測資料	都卜勒雷達觀測資料，以及多種飛機觀測資料(如投落水儀、都卜勒雷射雷達等)。
4.實作方式	開源Python軟體模組。處理資料套件可系統化安裝在雷達站端，無須商業化軟體。	由中央大學廖宇慶教授開發。 災防科技中心採用分散式計算(分48區再拼接)。	開源python軟體
5.主要應用	單站即時作業參考、飛安輔助	全臺範圍內高解析度三維風場的即時反演，應用於劇烈降雨系統的監測與預警	科學個案任務研究分析
6.優勢	易於部署、計算快速	整合任意數量雷達；利用分散式計算，全臺計算時間大幅縮短至約6-7分鐘。	分析深度足、物理一致性高
7.缺點或侷限	對參數敏感，複雜流場準確性低	計算成本高、耗時較其他資料久	計算複雜度高、需要較高的記憶體及核心數，才能提高計算速度。

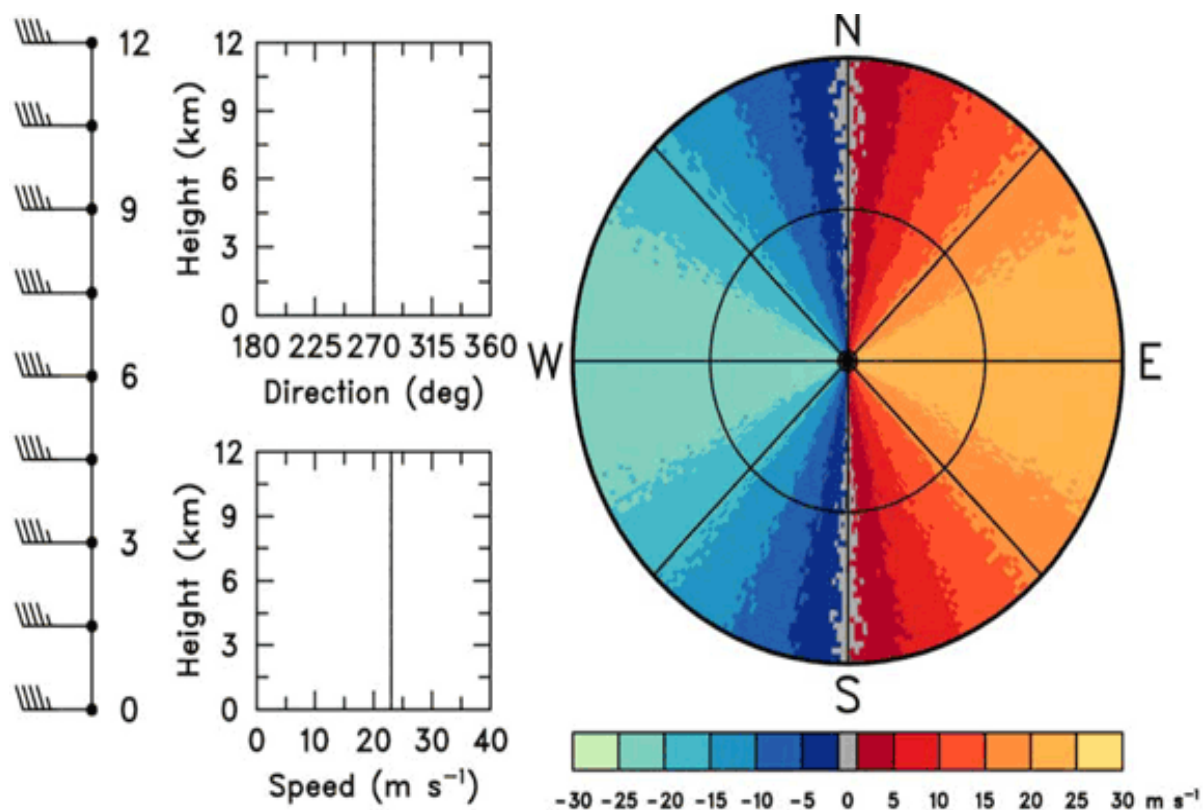


圖 1 雷達徑向風場示意圖（資料來源 Dr. Kevin Kloesel 2014 Training & Education）

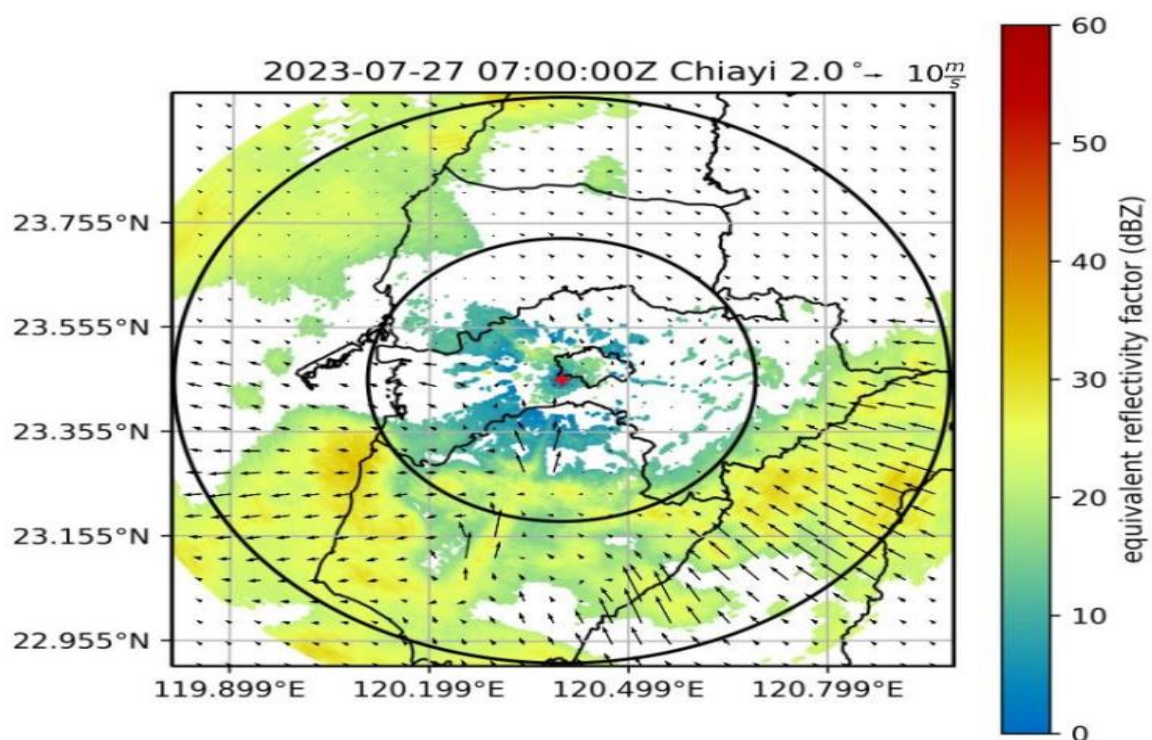


圖 2 2023 年 7 月 27 日 0700UTC 嘉義雷達 2.0 度仰角降水回波和反演風場合成圖
（資料來源：113 年國防科技學術合作研究計畫）

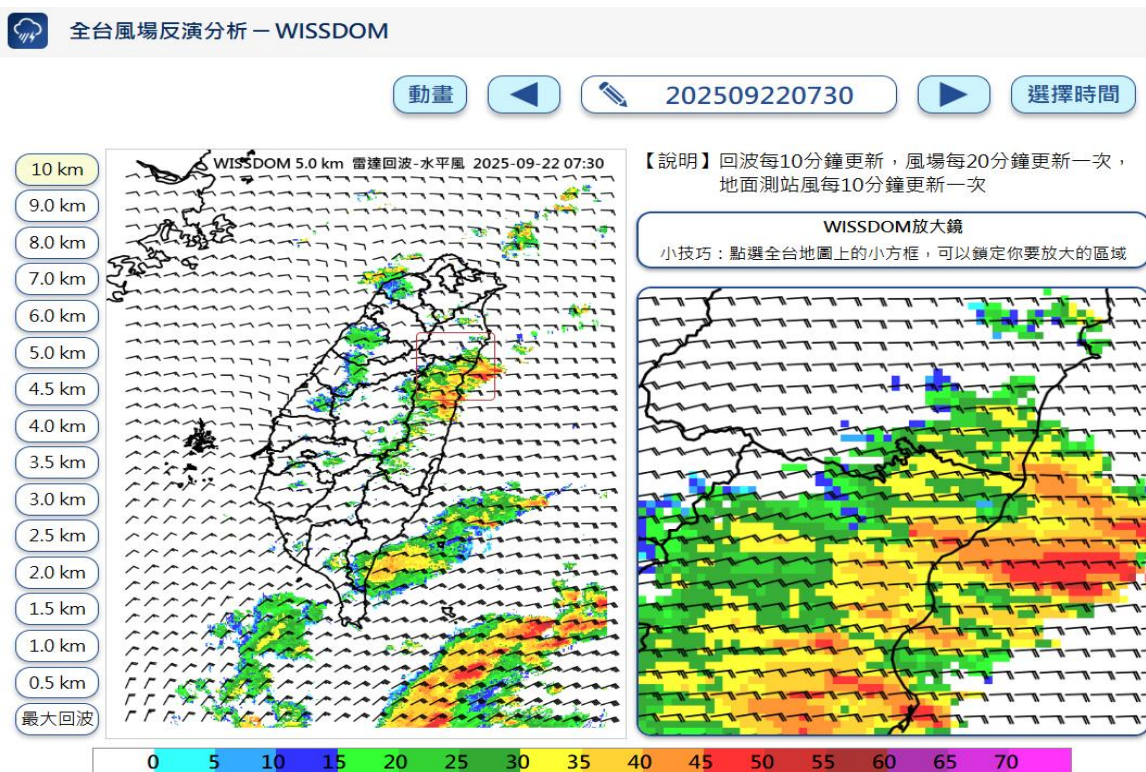


圖 3 2025 年 9 月 22 日 0730LTS 全臺三維風場反演結果-WISSDOM 展示頁面
(資料來源：NCDR 災害防救中心網頁)

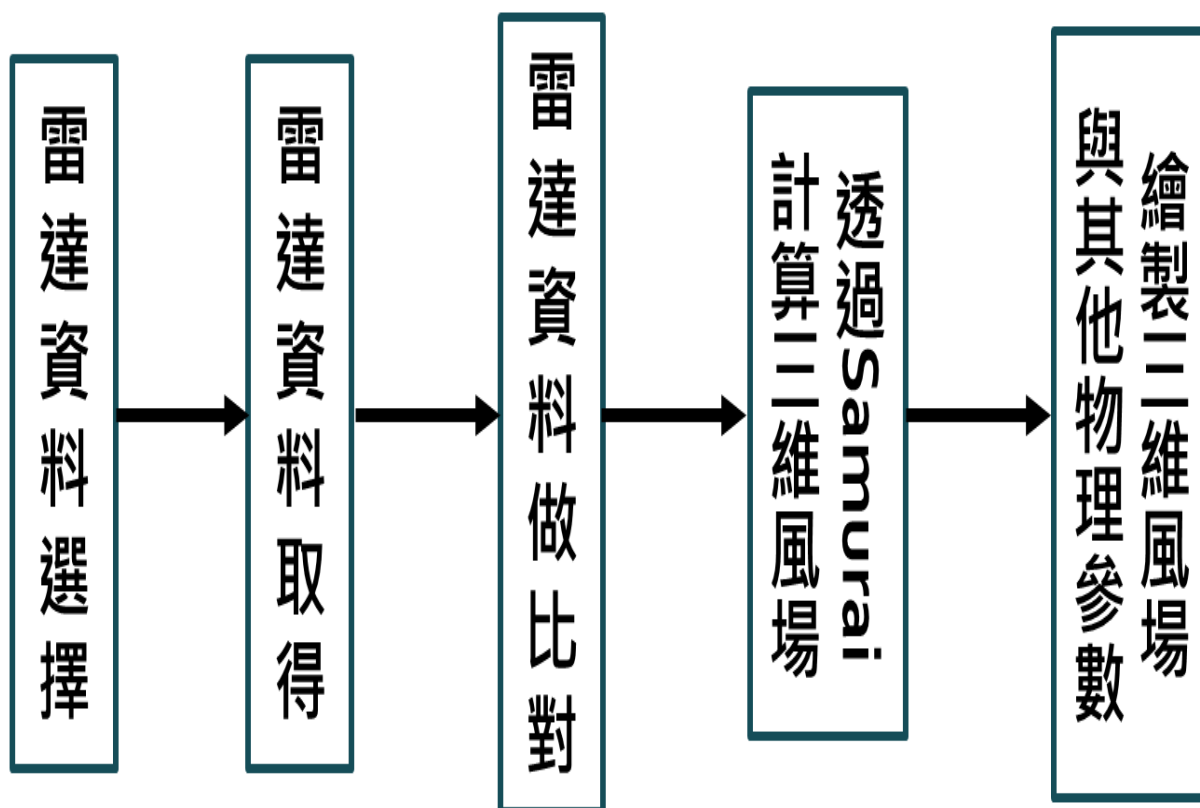


圖 4 資料處理流程與研究方法

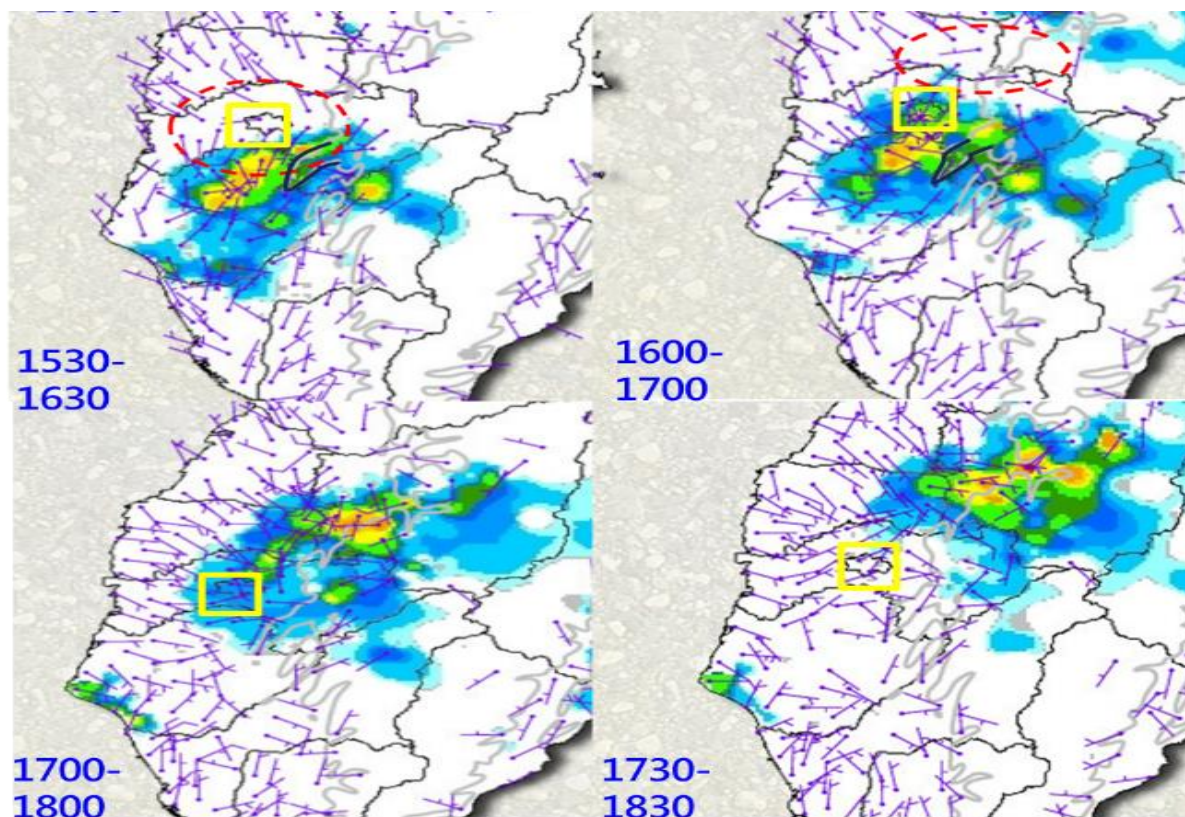


圖 5 2022 年 8 月 7 日雨量與風場圖（黃色框為嘉義機場、紅色虛線為風場輻合位置）

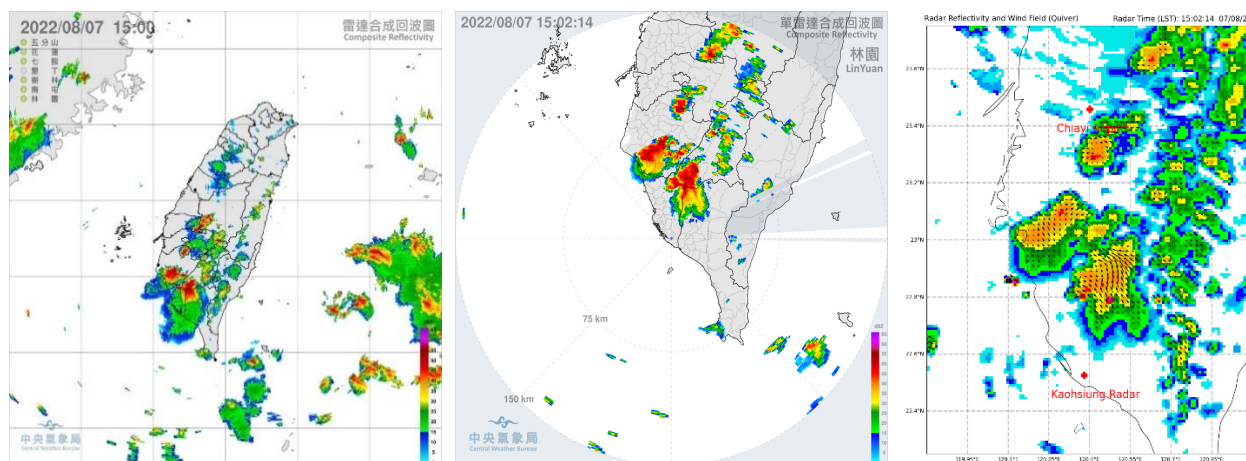


圖 6 2022 年 8 月 7 日雷達回波圖。左：全島雷達合成回波圖。中：林園雷達回波圖。右：雷達回波疊加 SAMURAI 風場反演圖。

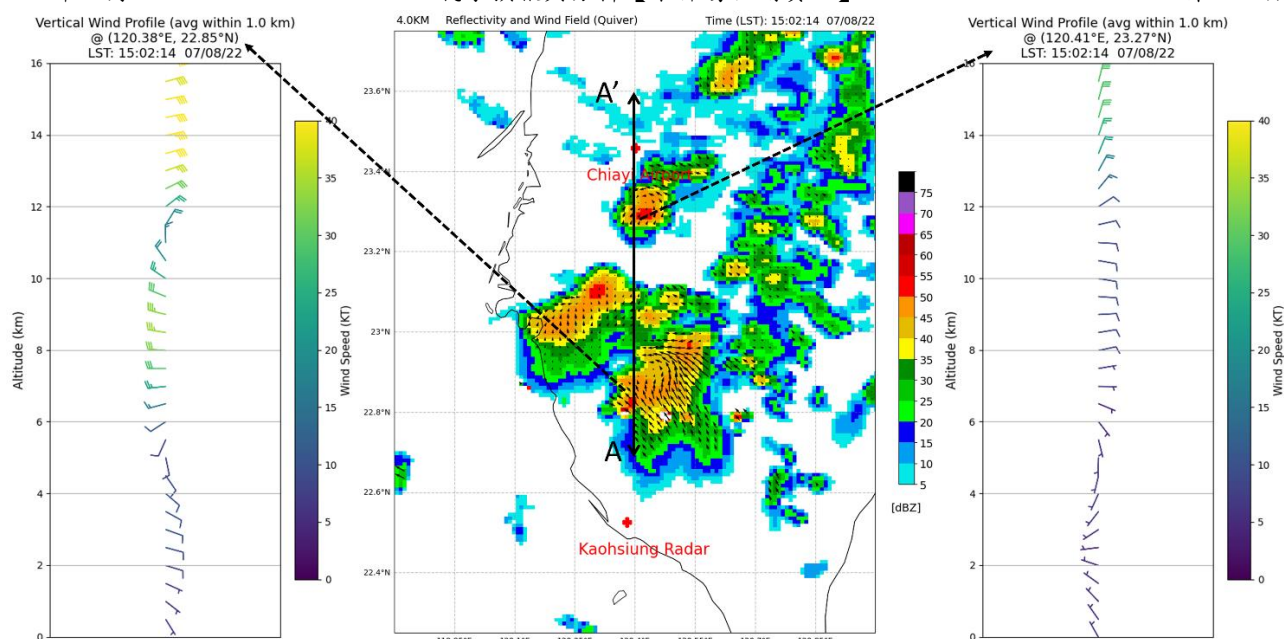


圖 7 2022 年 8 月 7 日 1502 時雷達回波疊加 SAMURAI 風場反演圖。左圖為(120.38°E、22.85°N)的垂直風場剖面圖；右圖為(120.41°E、23.27°N)的垂直風場剖面圖

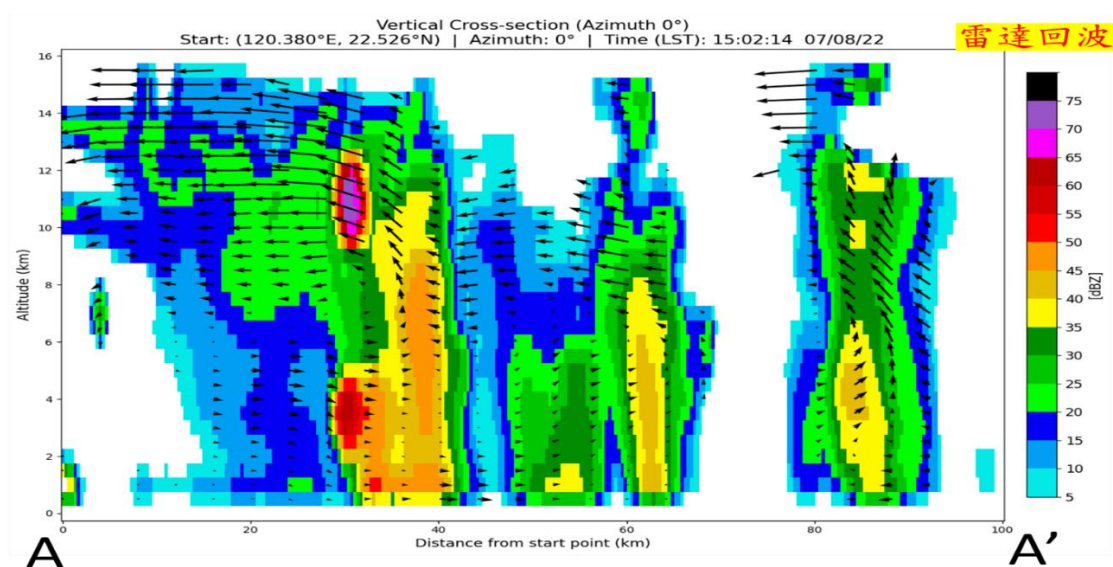


圖 8 沿著嘉義機場做 A(22.5°N、120.4°E)至 A' (23.6°N、120.4°E)的風場反演疊加雷達回波剖面圖

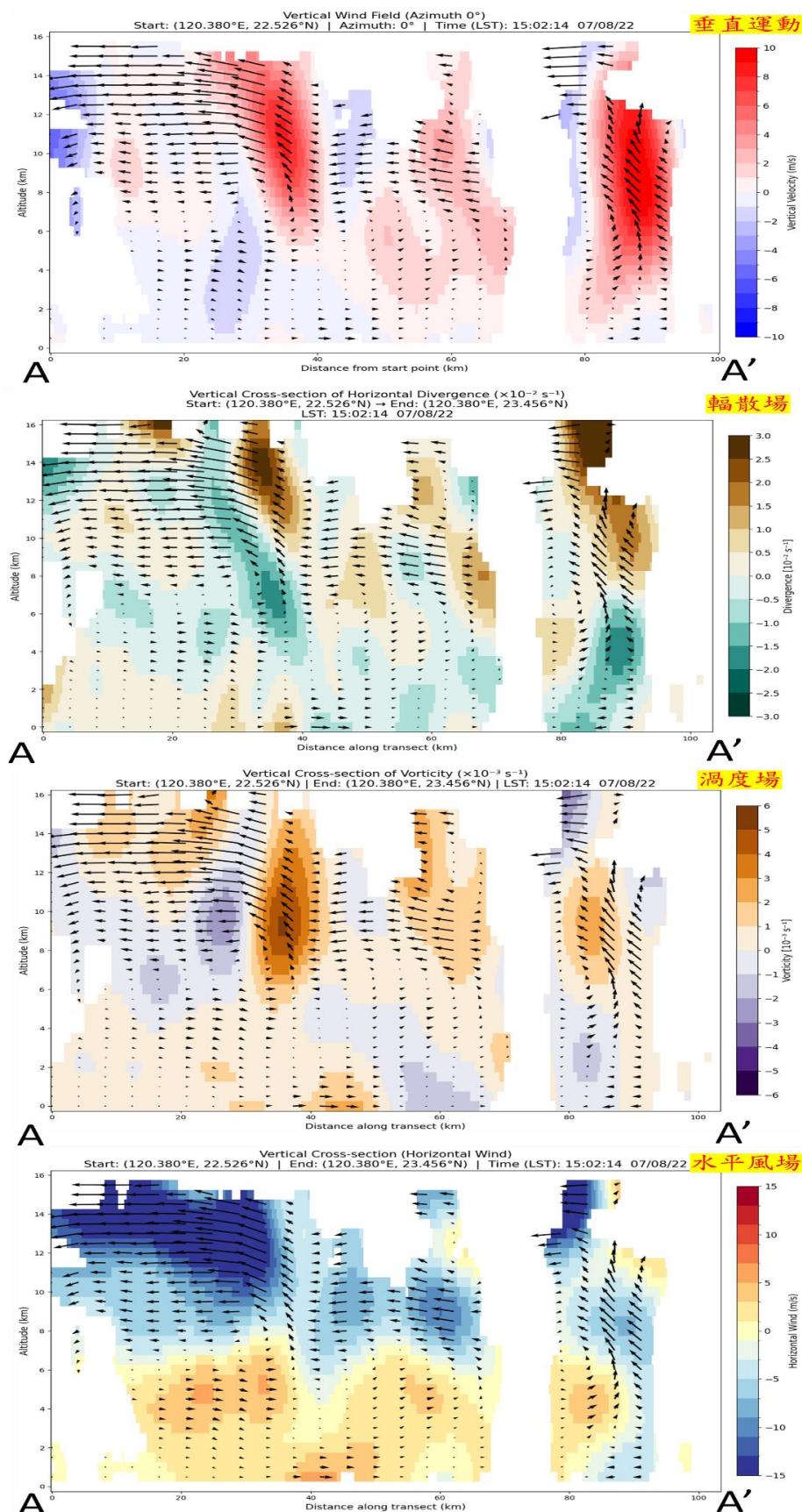


圖 9 風場反演疊加垂直運動、輻散場、渦度場及水平風場等圖資。剖面方式同圖 7

Introduction to Radar Wind Retrieval Techniques and Their Applications in Weather Forecasting

Chih-Yi Chen¹, Cheng-Yi Lee², and Jun-Ze Yeh²

Air Force Institute of Technology¹

Air Force Weather Wing²

Abstract

Doppler weather radar is an essential tool for modern severe-weather monitoring and early-warning efforts. Its high-resolution data provides vital insights into the development of weather systems like typhoons, frontal rainbands, and afternoon convection. However, there's a key limitation: Doppler radar can only measure the radial velocity of precipitation particles along the radar beam, and it can't directly show the full three-dimensional wind field. To address this, meteorologists have come up with various wind retrieval techniques that estimate the most accurate full wind field from limited radial-velocity data.

These techniques haven't developed in a single way. Instead, they've evolved amid an important balance in modern meteorology: the trade-off between computational speed, data complexity, and analysis depth. This report offers a thorough look and comparison of three representative radar wind retrieval methods: SingleDop, WISSDOM, and SAMURAI. These aren't just separate tools—they illustrate three common strategies along this spectrum. SingleDop focuses on real-time use and simplicity for single-radar operations. WISSDOM seeks to combine multiple radar networks for broad-area, high-precision, real-time monitoring. Meanwhile, SAMURAI prioritizes detailed analysis of physical mechanisms in specific weather cases, even if it means sacrificing real-time capability. By exploring their core principles, methods, and applications, this report highlights how these techniques reflect different strategic choices, improve weather analysis accuracy, and support crucial fields like disaster prevention and aviation safety.

Keywords : radar wind retrieval; radial velocity; SAMURAI