

出國報告（出國類別：開會）

參加2025歐洲地球科學聯合會年會 (EGU)

服務機關：台灣中油探採研究所

姓名職稱：許庭瑄 地質師

派赴國家/地區：奧地利 維也納

出國期間：114/4/27-114/5/6

報告日期：114/6/2

摘要

歐洲地球科學聯合會年會（European Geosciences Union General Assembly，EGU）是全球地球科學領域最大且最具影響力的國際會議之一，匯聚來自全球數萬位科學家與研究人員，展示最新的研究成果與技術發展。2025年的 EGU 會議於維也納舉行，涵蓋大氣、海洋、地質、遙測等多個地球科學分支，並特別強調跨領域合作與環境永續議題。

本報告基於2025 EGU 多場會議簡報、海報展示以及報告者補充資料，整合遙測技術於能源轉型與地表安全監測的應用，尤其聚焦於二氧化碳（CO₂）監測、礦區安全、火山監測及邊坡穩定等重要議題，並融合前瞻型衛星遙測、干涉合成孔徑雷達（InSAR）、無人機（UAV）、光達（LiDAR）、光譜分析與機器學習技術。透過綜合多尺度及多平台數據，本報告彙整遙測技術在監控氣體洩漏、地表變形及風險預警方面的顯著成效與未來發展潛力。本次派遣旨在為跨領域決策者提供清晰且全面的技術參考，協助能源轉型過程中的科學管理與可持續發展目標。

目次

摘要.....	1
一、目的.....	3
二、過程.....	4
三、具體成效	6
四、心得及建議	14

一、目的

本案藉由參與 EGU 2025——全球地球科學領域規模最大的年度研討會之一，系統性學習遙測技術的最新進展、前沿研究成果及實務案例，進一步提升本所遙測監測能力，為公司在能源轉型與地質安全管理領域提供有力支持。

EGU 2025吸引了來自120個國家、兩萬多名與會者，於維也納國際中心舉行。本次除了參與大地測量學（Geodesy, G）、能源、資源與環境（Energy, Resources and the Environment, ERE）、地球科學儀器與數據系統（Geosciences Instrumentation & Data Systems, GI）等核心分類外，亦積極參加自然災害（Natural Hazards, NH）、地形學（Geomorphology, GM）、大氣科學（Atmospheric Sciences, AS）、地球磁學與岩石物理（Earth Magnetism & Rock Physics, EMRP）等多項專題，拓展對相關領域遙測應用的廣泛認識。

遙測技術已廣泛應用於構造活動、火山監測、地殼沉降與抬升、邊坡安全、水文循環及結構工程安全評估等多個地質領域，對油氣探勘初期地表資訊蒐集及建築物安全監測均具有重要價值。藉由本次參會經驗，進一步了解遙測技術於地質空間資訊及相關應用的深化與整合，助力公司永續發展。

二、過程

本案出國日期為 113 年 4 月 27 日至 5 月 6 日，日程表如下：

天數	日期	起訖地點	行程摘要
第1天	4月27日	台灣至奧地利	啟程
第2天	4月28日	奧地利	抵達奧地利並參與歐洲地球科學聯合會年會
第3天	4月29日	奧地利	歐洲地球科學聯合會年會
第4天	4月30日	奧地利	歐洲地球科學聯合會年會
第5天	5月1日	奧地利	歐洲地球科學聯合會年會
第6天	5月2日	奧地利	歐洲地球科學聯合會年會
第7天	5月5日	奧地利至台灣	回程
第8天	5月6日	奧地利至台灣	回程

EGU 於維也納國際會議中心(圖 1)舉行，其擁有21個大型會議廳、134個會議室(圖 2)及5個展覽廳 (圖 3)，分布於5層樓，場地空間十分壯觀，總計約26,000平方公尺的活動空間。會議為期5天，共舉辦1,102場次，涵蓋18,934項報告，主題涵蓋多元地球科學領域。



圖 1 EGU 會場維也納國際會議中心



圖 2 各種容納人數不同之會議室



圖 3 海報展示廳

其中 PICO（Presenting Interactive COntent）演講(圖 4)讓人印象格外深刻，其結合了傳統海報展示與口頭簡報的優點，講者需先在展場講解2分鐘的口頭簡報，向與會者簡要說明研究重點，待各講者快速講解完畢後，會移至互動式螢幕以電子海報進行展示，這種發表方式鼓勵與聽眾進行面對面互動與即時討論，促進跨領域的科學交流與合作。



圖 4 PICO 演講及虛擬海報展示區

另外，EGU 議程主題實為豐富多元，大會尚發布一實用 app「EGU25」，出發前即可先點選好感興趣之議程，方便查詢欲前往會議之時間與地點，app 亦有會場地圖供索引，也提供關鍵字搜尋摘要和議程名稱，有公開下載的補充材料亦在期間內開放於 app 內下載，整體而言十分方便實用。

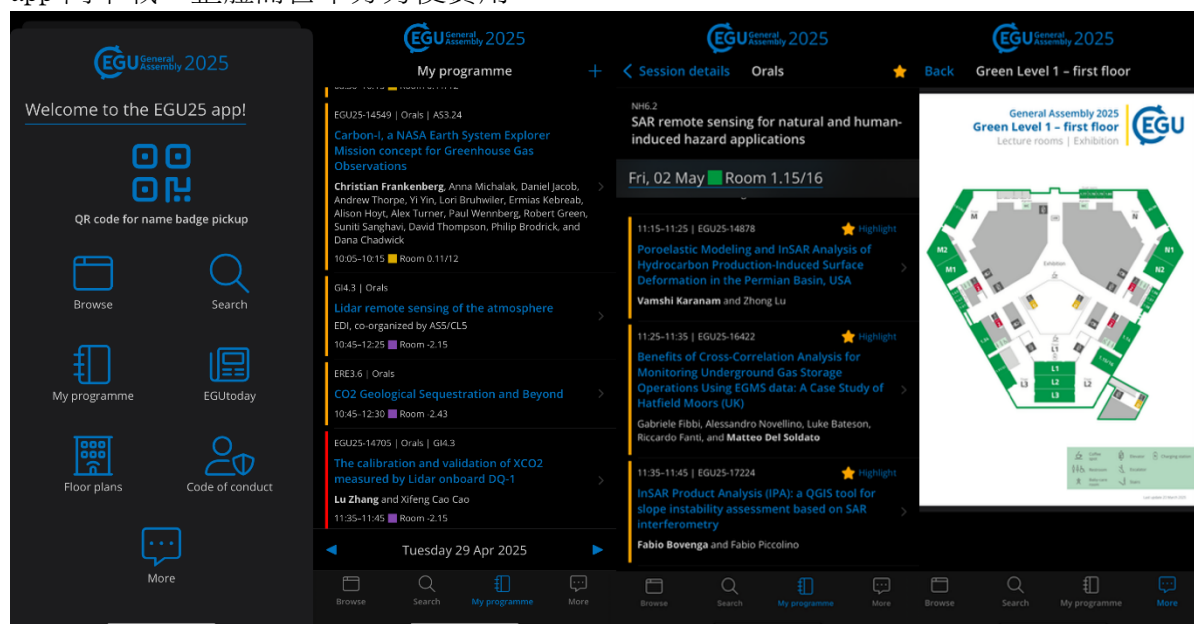


圖 5 EGU25 app 介面

三、具體成效

EGU 會議涵蓋地球科學各項領域，應用成果不勝枚舉，以下為綜合本次參與議程各項主題盡力進行分類，由於本次目的以遙測應用於能源轉型與地表安全監測為主，本報告彙整方式大致分為遙測 CO₂應用、礦區安全遙測應用、遙測技術應用於邊坡監測、InSAR 相關技術近況及進階應用，以及機器學習應用於遙測監測，加上會後整理補充資料及初步分析，希望以具體案例呈現各技術的現況實務成效與應用潛力。

3.1 遙測 CO₂應用：含陸、海、空平台與洩漏監測 (圖 6)

1. Carbon-I 任務 (NASA)

Carbon-I 任務由 NASA 噴射推進實驗室 (JPL)、哥倫比亞大學和加州理工學院等機構共同提出，是 NASA Earth System Explorer 計畫的任務之一，專注於彌補熱帶與赤道地區溫室氣體觀測空白。搭載高光譜解析度 (0.1 – 0.2 nm) 光譜儀，並配合穿透雲層的軌道設計，可同時量測大氣中 CO₂、CH₄與 CO。Carbon-I 已完成設計與技術驗證階段，預計2030年前執行。

此任務提供多氣體同步觀測能力，提升溫室氣體來源辨識，並透過高頻次覆蓋改善熱帶區雲層遮蔽問題，為 CCUS 場址背景濃度動態評估提供準確基線。Carbon-I 設

計上亦考量與 OCO-2等衛星互補，強化資料解析度和精度。未來將持續優化光譜演算法與跨平台數據整合，期望對全球碳循環監測和氣候政策提供重要支持。

2. OCO-2、GOSAT 與 GHGSat 整合應用

OCO-2 (Orbiting Carbon Observatory-2) 是由 NASA 於2014年發射的衛星，GOSAT 衛星 (Greenhouse gases Observing SATellite) 是日本宇宙航空研究開發機構 (JAXA) 於2009年發射的全球溫室氣體觀測衛星，兩者皆專門設計用以高解析度監測全球大氣中 CO₂的垂直柱狀 CO₂濃度 (XCO₂) 並行之有年，提供長期全球背景 CO₂資料，為氣候變遷研究與碳循環分析提供關鍵支撐。GHGSat (Greenhouse Gas Emissions Monitoring Service) 則是一家加拿大航太公司，運用小型高解析度衛星針對工業設施的 CH₄與 CO₂排放進行點源監測。CO₂偵測則正持續優化中，針對複雜排放環境如多點源、高排放點等條件進行技術突破。相較於傳統以全球或區域為主的衛星，其能針對單一煉油廠、發電廠等進行排放量化與追蹤。相互結合可實現跨尺度碳排放監控，從全球背景到設施點源均有涵蓋。

3. DQ-1大氣環境監測衛星 (Daqi-1，大氣1號)

DQ-1衛星搭載的 Aerosol and Carbon Detection Lidar (ACDL) 是中國第一個空基積分路徑差吸收 (Integrated Path Differential Absorption, IPDA) 雷射雷達，於2022年4月成功發射，專為測量大氣中 XCO₂設計。系統持續優化光譜處理，經地面 TCCON (Total Carbon Column Observing Network) 和 COCOON (Comprehensive Carbon Observation Network) 校驗，CO₂測量誤差達設計標準1ppm，展現穩定性與高精度。講者提及 DQ-1彌補了國際衛星在熱帶及中低緯度地區 CO₂監測的空白並未來將持續優化數據算法，提升解析度與穩定性。

4. 船載 FTIR 聯合觀測系統

參考成果海報由日本國立環境研究所 (NIES) 主導研發，並與德國和奧地利多個國際合作機構共同完成。系統安裝於貨櫃船「Nichiyu Maru」，搭載半自動傅立葉轉換紅外光譜儀 (FTIR, EM27/SUN) 與可見光光譜儀，定期巡航日本沿海航線。能同時測量大氣中 CO₂、CH₄、CO 及 NO₂的柱狀濃度，並結合 TCCON、COCOON 地面監測網的現場測量數據，提升資料準確性及衛星校驗能力。初步成功偵測排放煙羽，並透過氣體濃度比分析排放特徵。該系統是即將發射衛星任務 (GOSAT-GW、Copernicus CO₂M) 重要的數據支援平台。

5. 地面 FTIR 觀測

地面 FTIR 觀測應用於溫室氣體案例較多，惟目前觀測尺度都較大，以下彙整幾個案例：

- 愛丁堡城市監測網：愛丁堡大學利用多站點 FTIR EM27/SUN 系統，分析太陽光吸收光譜來計算大氣中溫室氣體的柱狀濃度，結合風向差異方法，穩定監測城市尺度的 CO₂和 CH₄淨排放，支援當地2050淨零目標。
- OBS4CLIM 熱帶長期觀測網：法國氣候與環境科學實驗室（LSCE）主導，於多個熱帶地區裝設自動化 EM27/SUN 站點，補足熱帶衛星校準資料缺口，資料納入國際碳觀測系統（ICOS）。儀器具備自動開關罩與太陽追蹤功能，確保高時間分辨率持續監測。
- 希臘塞薩洛尼基中緯度站：該研究亦利用多站點 EM27/SUN FTIR 系統，結合 HYSPLIT 氣團逆追蹤與群聚分析方法，詳細解析該都市溫室氣體濃度的區域與遠距傳輸貢獻，並進行季節性及短期異常變異監控，對環境評估與減排策略制定具重要參考價值。

6. DIAL 與 $\delta^{13}\text{C}$ Lidar 技術

差分吸收雷達（Differential Absorption Lidar，DIAL）利用雙波長激光測量大氣氣體垂直柱濃度， $\delta^{13}\text{C}$ Lidar 則延伸此技術測量 CO₂碳穩定同位素組成，區分天然與人為排放。法國 LMD/IPSL 團隊展示 Coherent DIAL 相干測量方法（CDIAL）基於2微米三波長 DIAL 系統，首次同時測量 $\delta^{13}\text{CO}_2$ 和 $\delta^{13}\text{CO}_2$ 混合比。因斑紋雜訊（speckle noise）限制， $\delta^{13}\text{CO}_2$ 距離解析度1.2 – 1.6公里，濃度精度0.6% – 3.2%。技術尚在研發中，未來將採用直接探測法提升解析度。

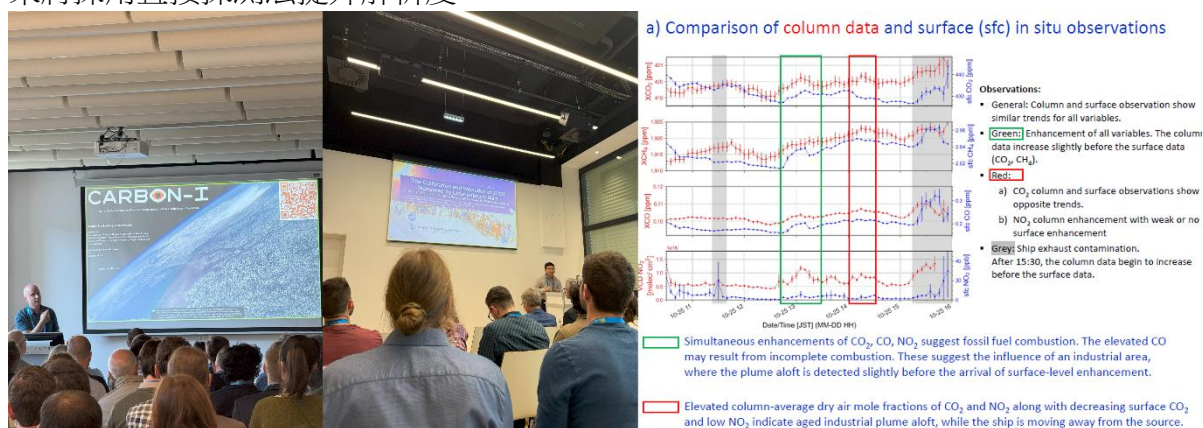


圖 6 CO₂監測相關議程

3.2 礦區安全遙測應用：地表沉陷與儲層穩定監測(圖 7)

1. GoldenRAM 計畫背景與目標

GoldenRAM（Golden Open-Source Remote sensing for Mining Safety）為歐盟資助之研究計畫，旨在提升露天礦場與尾礦壩之地表監控效率。該計畫以 Copernicus 歐洲地表運動服務（European Ground Motion Service, EGMS）所提供之 InSAR 影像為基礎，開發

一套結合自動化後處理、變形分類、視覺化分析的開源平台。主要成果包括：自動化變形趨勢分析模組、區域分級風險熱點圖層輸出、適用於非專業使用者之視覺化介面。該系統預期將協助全球礦業界以低門檻成本接軌衛星監測資源，提升整體場域風險管控水準。

2. 英國 Hatfield Moors 地下天然氣儲存場址地表變形監測成果

利用 Sentinel-1 InSAR 資料，觀測到 Hatfield Moors 場址上方泥炭區呈現明顯季節性地表位移，冬末抬升、夏末沉降，幅度約 ± 10 毫米/年。時間序列分析顯示地表變形與地下水壓高度相關，反映水文過程主導地表動態，而與地下氣體注入操作相關性較低。此結果指出水文因素在儲氣場址地表沉降/抬升中扮演關鍵角色，對儲層安全監測與風險管理具重要參考價值。

3. 美國 Permian 盆地油氣生產誘發地表變形

本研究利用 Sentinel-1 InSAR 的永久散射體干涉合成孔徑雷達技術 PSI (Persistent Scatterer Interferometry) 與多孔彈性模型 (COMSOL® Multiphysics) 結合，分析美國 Permian 盆地 Delaware 子盆地因油氣開採與廢水注入引起的地表下沉，年速率約3 - 4公分。研究發現地下流體壓力與斷層交互影響地層變形，模型結果與 InSAR 觀測高度一致。此方法有助於評估油氣產區地表穩定性，加強風險管理與環境保護。

4. 德國 Epe 地下儲氣窖3D 地表變形模型

德國 Epe 地下儲氣窖包含114個洞穴，逾50個用於天然氣儲存，使用 Sentinel-1衛星多時序 InSAR 影像，結合永久散射體 (PSI) 與分布散射體(Distributed Scatterers, DS)演算法，監測儲氣壓力變化導致地表下陷與季節性變形。研究利用獨立成分分析 (Independent Component Analysis, ICA) 分離多源變形訊號，並建構岩鹽體積變化及地表變形模型，該模型亦經由3個 GNSS 站與年度水準測量資料驗證。最後以 Sroka-Schober Model 將模擬洞穴地下活動，和地表變形解算成果互相連結，初步成果一致性甚高，對安全監控與風險管理具有重要意義。

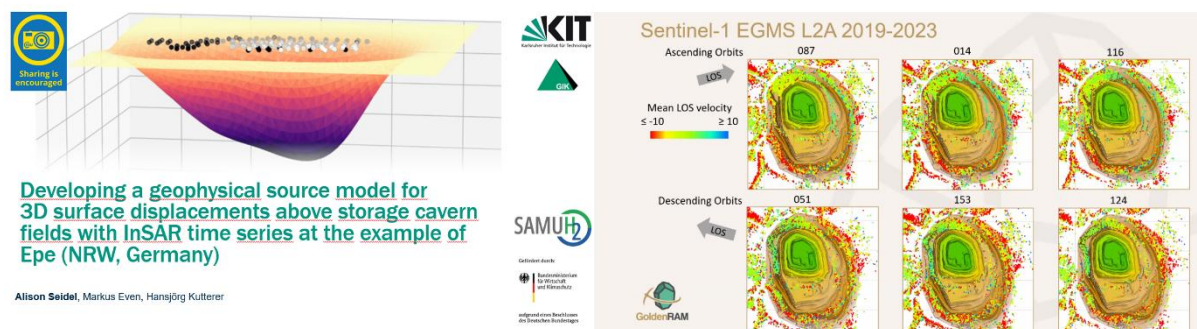


圖 7 礦區安全遙測相關簡報

3.3 遙測技術應用於邊坡監測：結合 InSAR、UAV 與 QGIS 模組(圖 8)

1. QGIS 邊坡不穩定區計算附加元件

本研究由義大利國家研究委員會（CNR）提出，針對邊坡不穩定區域開發了一款基於 QGIS 的 InSAR Product Analysis（IPA）附加元件。該附加元件利用 DInSAR 及多時序 MTInSAR 資料，結合地形、植被與滑坡等輔助圖層，提供區域可見性分析、相干目標覆蓋率評估及降坡方向位移成分計算，提升監測結果的準確度和解釋力。IPA 還具備自動辨識非線性位移點的時間序列分析功能，有助於提早發現潛在危險區域。該工具已在 Sentinel-1 資料中驗證，有效支持礦區、火山與邊坡安全的監測需求。

2. 奧地利 Padauner Berg 深層重力性坡地變形（DSGSD）監測案例

Padauner Berg 山坡的深層重力性坡地變形（Deep-Seated Gravitational Slope Deformations, DSGSD）對當地重要運輸路線構成威脅。該研究利用 UAV 搭載高解析度相機，採用結構光照建模（SfM）技術，生成精細三維地形點雲，結合高精度 GNSS 控制點進行校正，成功識別多種地形結構並量化地表變化。此方法彌補傳統地形分析的不足，有助於動態追蹤坡地不穩定範圍，支持災害風險評估。雖然 UAV 飛行受限於高度與地形複雜性，但仍為高山區域監測提供實用方案。此案例展現無人機遙測在邊坡安全監控及地形演變研究中的應用潛力。

3. 綜合監測塞浦路斯 Pissouri 村活躍快速滑坡案例

塞浦路斯共和國 Limassol 區的 Pissouri 村近年發生活躍且快速滑坡，對居民與基礎建設造成嚴重威脅。為提升災害應對能力，塞浦路斯科技大學地球測量實驗室成立 CyCLOPS 系統，持續監控該滑坡動態。研究利用 Sentinel-1 衛星 InSAR 影像（2022-2024 年），結合地面 10 台高精度 GNSS 接收器，監測滑坡位移，發現滑坡位移速度較以往明顯增加。同時整合氣象局降雨資料並設置場內雨量計，確認降雨與滑坡加速存在顯著相關性。為補足衛星與 GNSS 空間解析度不足，使用雷射掃描技術偵測地表裂縫及地形變化，精確描繪滑坡結構。

該研究成功建立多感測器融合監測架構，提升滑坡變形偵測及風險評估能力，有助於災害預警與減災。該計畫由歐洲區域發展基金及塞浦路斯研究基金會支持，屬於 CyCLOPS 與 CyCLOPS+ 項目。

4. 德國 Mecklenburg-Western Pomerania 沿海懸崖結構監測(圖 9)

該研究由德國聯邦地球科學與自然資源研究所（BGR）與環境保護及地質局合作，針對波羅的海沿岸第四紀冰川沉積物構成的懸崖進行結構分析。該區域地質複雜，包含褶皺、斷層與裂隙系統。研究利用 UAV 高解析三維點雲結合 CloudCompare 軟體中的 FACETS 插件，實現結構面的自動偵測。與 1980 年代人工量測相比，新方法提升了資料獲取效率與解析度，能更全面反映岩體內部裂隙分布特徵。此成果對沿海邊坡穩

定性評估及災害風險預測提供了有力支持，有助於地質災害防治與環境管理。

5. UAV 多時序結合年輪與衛星影像監測滑坡動態案例

本研究針對日本 Kamitokitowa 地區的滑坡活動，結合 UAV 多時序高解析度影像、樹木年輪資料及 Google Earth 衛星影像進行綜合分析。透過 UAV 影像進行精細地表變形監測，能捕捉滑坡區域的空間範圍與變化速率；年輪資料則提供滑坡歷史的時間序列證據，揭示植被生長受滑坡影響的時間節點與頻率。衛星影像補足長期觀測資料，有助於追蹤滑坡的長期演變趨勢。多源數據融合提高了對滑坡空間動態與時間演化的理解，並增強了對滑坡發生機制的解釋能力。此方法為邊坡穩定性評估及災害預警提供更精準的資訊，適合應用於其他具有類似地質及環境條件的滑坡風險管理場域。

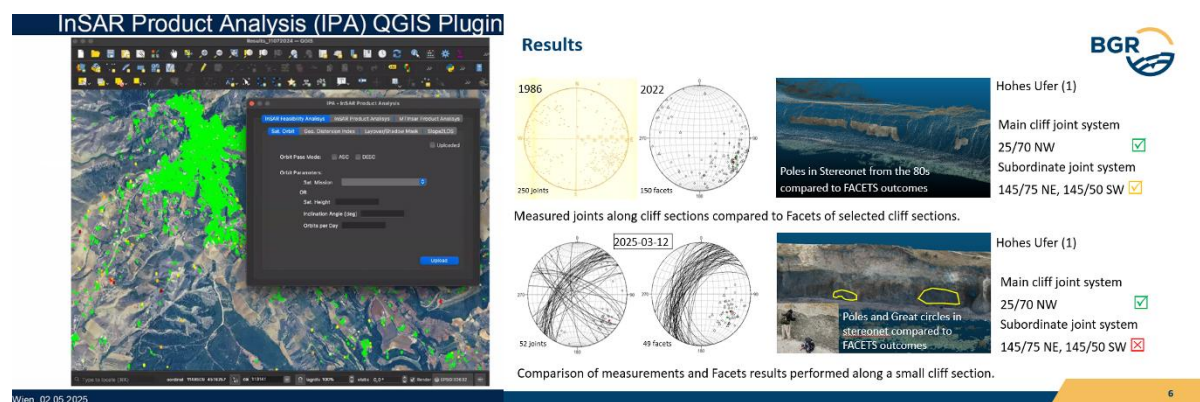


圖 8 遙測應用邊坡監測相簡報

3.4 InSAR 技術進展與應用擴展：三維監測與多波段整合(圖 9)

1. InSAR 三維地表變形監測

本研究利用 Capella Space 衛星中傾角軌道（MIO）多角度多時序 DInSAR 技術，成功實現義大利 Campi Flegrei 火山口 3D 地表變形監測。該技術克服傳統太陽同步軌道 DInSAR 在南北向位移測量上的不足，有效捕捉垂直及東西、南北方向的地表移動。透過 Parallel SBAS 方法，分析多組 MIO 數據，揭示火山區持續的地表膨脹與收縮現象，精確描繪 2005 年以來的潛變活動。成果顯示此方法可作為火山監控與災害預警的重要技術，提升變形偵測的空間解析度與時間連續性。

2. 多波段合成孔徑雷達干涉測量（InSAR）於地質災害風險緩解的應用

該研究強調多波段 InSAR 資料協同應用，整合 X 波段（高解析度）、C 波段（Sentinel-1，免費且適合區域監測）與 L 波段（強植被穿透能力）數據，有效提升災害監測精度與頻率。

多波段融合可降低測量不確定性，精準描繪地質災害動態，尤其適用於快速變化場域。整合 EGMS Sentinel-1 與 TerraSAR-X、COSMO-SkyMed、ALOS-2 等資料，實現多

環境條件下高效監控，並建立決策支援系統，為災害預警與風險管理提供有力支持。此技術對提升地質災害監測能力及應對氣候挑戰具有重要實務價值。

3. 低成本被動角反射器技術

傳統被動角反射器（Corner reflectors, CRs）多使用2mm 厚鋁板製作，雖具有高雷達反射性能，但成本高且重量較重，不利於大範圍及多點布設。為降低成本與重量，該研究團隊嘗試以10mm 厚多層聚碳酸酯板為基材，覆以1mm 厚鋁箔膠帶，或噴塗金屬漆作為反射面，製成輕量且經濟的角反射器。利用掃描電子顯微鏡（SEM）分析材料微結構，並在試驗場地進行安裝測試，通過 Sentinel-1 SAR 影像與滑坡現場監測驗證其雷達散射強度與可視性。結果顯示低成本材料反射器在雷達影像的反射效果與傳統鋁製反射器相當，且重量和成本顯著降低。該技術有望推動 InSAR 監測網絡的高密度布設，提升地表變形監測的解析度與精度。

4. 結合 InSAR 與 UAV 資料分析海岸懸崖穩定性

本研究針對海岸懸崖的穩定性評估面臨多重挑戰，因地表變動受多種陸域、海洋及內生過程影響。透過衛星影像、航空攝影與 LiDAR 數據的整合，提升對地質現象的理解及監測資料的準確度。

本案結合了 PSI 與 UAV 搭載 LiDAR 及攝影測量技術。UAV 使用 DJI Matrice 350與 Zenmuse L2 LiDAR 系統，生成高解析度數值地形模型（格網約20公分）。PSI 部分則利用 Sentinel-1 Single Look Complex 影像，經 Sarproz 軟體提取持續散射點，監測懸崖表面位移時序。

綜合兩種技術資料建立的3D 坡度模型用於驗證懸崖穩定性數值模擬，確認影響懸崖變形與退化的主要驅動因素。未來，此類模擬將有望預測氣候變遷下的海岸地貌演變。本研究展現 PSI 與 UAV 資料互補的強大功能，不僅提升海岸監測的質與量，更為風險管理與沿岸保護決策提供科學依據。

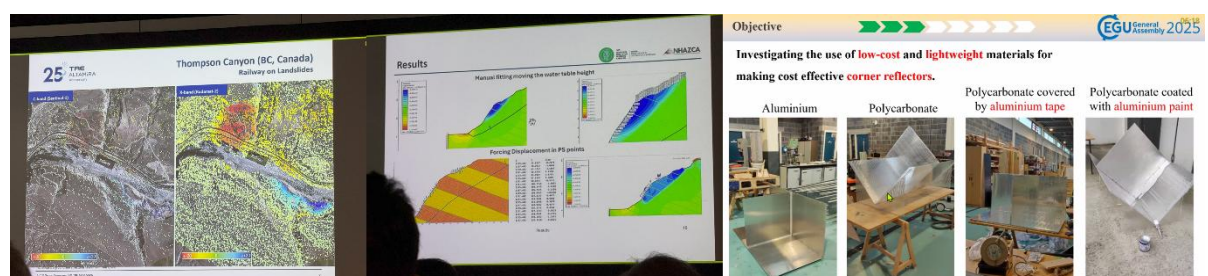


圖 9 InSAR 進階發展相關簡報

3.5 機器學習應用於遙測監測：資料處理自動化與預測建模(圖 10)

1. 機器學習輔助的 UAV 地表溫度建模

本研究由捷克布拉格理工大學利用無人機 UAV 獲取可見光（RGB）與近紅外（NIR）影像，結合機器學習方法建構高精度的地表溫度（Land Surface Temperature, LST）模型。研究中，隨機森林迴歸（Random Forest Regression, RFR）被用來建立 RGB 及 NIR 光譜數據與地面實測溫度之間的非線性關係，提升溫度估算的準確度。該模型在捷克境內多個測試區域驗證，結果顯示 RFR 方法有效捕捉地表溫度空間分佈，誤差明顯低於傳統統計方法。該技術展現了結合 UAV 多光譜資料與機器學習的強大潛力，為城市熱島效應監測、農業管理與環境評估提供了新的高效工具。

2. 機器學習輔助全球火山地表形變監測與預測

本研究由英國利茲大學主導，基於 Sentinel-1 衛星持續提供全球火山 InSAR 資料，建立自動化數據處理系統，結合獨立成分分析（ICA）和深度學習技術，可自動更新火山形變時間序列，並透過網路平台（<https://comet.nerc.ac.uk/comet-volcano-portal>）公開，離台灣最近有日本及菲律賓的成果可即時監測。

深度學習模型能從多獨立成分時間序列中萃取關鍵火山活動指標，並估算形變源類型、位置和體積變化，並優於傳統方法降低大氣干擾影響，進一步進行未來形變的預測。該研究結合大量實測與物理模擬資料訓練模型，提升了對火山活動機制的理解，並為火山監測與風險管理提供了強大技術支持。

3. 基於深度學習的 SAR 影像地表位移測量

本研究由 Jinwoo Kim 等人提出一種利用深度學習從 Sentinel-1 SAR 振幅影像直接預測地表位移的方法。採用改良的 Siamese ResNet 架構（CC-ResSiamNet），有效提升了特徵擷取與預測精度。與傳統的 offset tracking 方法相比，該模型在保持高準確度的同時，運算效率顯著提升，能快速處理大規模影像數據。

該方法在多種環境場景中驗證，包括冰川移動、地震與火山活動，展現良好的識別能力。雖然對複雜地形和雜訊區域仍有挑戰，但結合多源資料和擴充訓練數據，將有助未來性能提升。隨著新一代衛星任務（如 NISAR、Sentinel-1C/D）啟用，深度學習在 SAR 位移監測中展現出廣闊應用前景。

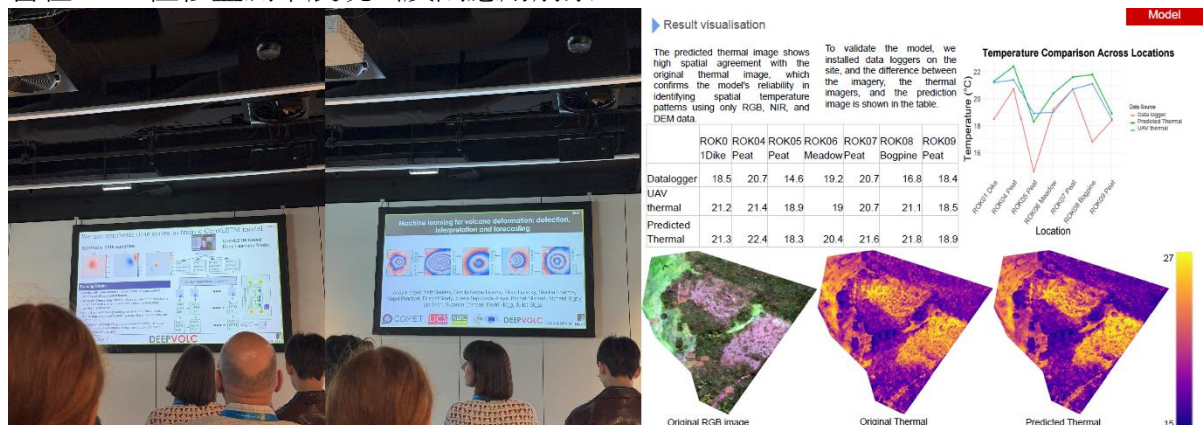


圖 10 機器學習遙測應用相關簡報及海報

四、心得及建議

本次參加 EGU 2025會議的主要目標聚焦於遙測技術在能源轉型與地表安全監測的應用，於本報告分類為 CO₂監測、礦區安全、邊坡穩定、InSAR 技術進展，以及機器學習應用等五大主題。然而，會議本身的主題多元且廣泛，即便有些議題並非此次派遣的重點，仍有許多值得關注與借鑑之處，例如（1）LiDAR 不僅可監測氣體濃度與地表變形，亦能高精度觀測大氣風場，空載都普勒 LiDAR 風速誤差低於2 m/s，技術具多功能，未來可用於氣候研究、污染擴散及災害預警；而（2）智慧型手機或平板 LiDAR 亦結合 UAV 航拍，提供低成本、高效率的三維建模方案，精度已足以應用於災害評估及環境監測，部署快速且成本效益高，適合推廣於高風險地區的即時現場調查與輔助決策，也是現場作業可以即時做為參考的選項之一。另外也看到有關（3）結合 UAV 與水下多角度攝影，突破了傳統技術限制於淺水區高精度重建三維地形，成本低且靈活，適用於海岸線與生態環境監測及災害潛勢評估的研究。最後，CCUS 議題在 EGU 固然為主軸之一，許多岩石物理研究結合實驗與模擬，對 CCUS 與地下儲存長期安全性分析甚是重要。

因此，十分鼓勵不同研究領域的同仁皆能參與這種地球科學大型研討會，其涵蓋主題相當多元且富含跨領域應用研究，且能於短時間內大量獲取各項技術最新發展。以下為彙整內容及心得：

技術整體發展趨勢與優勢

遙測技術正持續朝向高解析度、多氣體同步觀測與多平台融合的方向發展。以既有的 OCO-2、GOSAT 與地面 FTIR 觀測為例，若能再應用未來 NASA 的 Carbon-I 任務，以及商業化衛星 GHGSat，不同尺度與波段的觀測技術彼此互補，將強化觀測視角與資料時間頻率；InSAR 技術在觀測地表變形時，也透過自製低成本角反射器、大氣修正技術模組等方式持續提升精度。這些發展顯示遙測技術不再侷限於學術研究，更逐漸成為風險管理、政策評估與能源轉型實務作業的重要工具。

技術限制與挑戰

無人機與智慧型裝置內建 LiDAR 雖能大幅降低巡檢與三維建模成本，但在植被密集、惡劣天氣或續航力有限等情境下，資料品質仍受影響。InSAR 在多植被與高降雨地區的相干性降低，也需結合地面角反射器或 GNSS 補強。水下攝影測量則仍受限於水中光線、波浪等干擾。而機器學習與數值模型雖可提升自動化資料分析能力，但須仰賴大量高品質訓練資料，且跨領域專業合作需求高。

未來應用潛力

綜合以上各項技術，若應用於碳封存場址之監測，UAV 熱像儀、光譜儀與行動裝置 LiDAR 應適合初期進行基礎場區建模；接著可嘗試以衛星背景濃度建立長期變形與

洩漏可能性之資料庫；後期可配合資料分析模型，自動辨識高風險區域，針對潛勢熱點加密布設角反射器與地面 FTIR 站點，進行重點持續監控與交叉驗證。

本次會議亦有展示 UAV 結合多光譜（RGB、NIR）與機器學習建模，能高效率推估地表溫度分布，成果驗證在不同地表類型下均具良好準確度。或許有機會應用於地熱潛力區快速篩選與異常熱點普查，尤其適合廣域地熱資源初步調查及定期監控。相比傳統熱像儀，UAV 多光譜方案具備低成本、高彈性、適合大範圍作業等優勢。

礦區安全方面則可透過結合衛星、UAV 近場掃描及地面感測器，即時比對異常變形，強化礦區結構健康評估、快速定位風險熱點，GoldenRAM 即為一個很好的案例。

邊坡安全方面還是以 UAV 結合 Lidar 技術應用最為熱門，可快速獲取高解析地形點雲，精準描繪裂縫、滑動帶與不穩定區域，可嘗試搭配 QGIS 的邊坡附加元件，結合 InSAR、UAV、降雨與地質資料，能進行滑動區自動辨識與長期位移分析。

總結而言，遙測技術的多元應用，不僅能提升 CCUS、礦區與邊坡監測的精度，也能為公司在能源轉型與探勘領域帶來有效利益。透過高解析度與多平台資料融合，企業能更有效掌握場域環境變化，及早預警風險，優化資源管理與操作安全。未來持續整合遙測技術，將是推動企業永續發展與競爭力提升的重要利器。

而 EGU 2025會議不僅在遙測技術於能源轉型與礦區安全監控領域提供豐富且前沿的資訊，未來建議公司持續關注並積極導入這些國際發展成果，順利執行能源轉型與地表安全監控。

惟本次出差因核定天數僅有8天，而國際交通多為跨日，加上會議正式議程為期5天，因此實際參與議程時勢必需要取捨部分內容。權衡評估後安排此次於第一天清晨抵達維也納機場，抵達會場時已近10點，受到長途飛行與時差影響，當日的參與效率確實較為有限，也有遺憾錯過部分議程內容。建議未來國際出差行程規劃能適度保留緩衝與調整時差的空間，以利提升整體參與效益及議程完整性，確保國際交流成果的最大化。