遙測-災害時的合成孔徑雷達(SAR)散射變化案例解說集

報告者：莊承穎

113年4月2日

前言

- 國土交通省為了迅速且確實因應災害，因而在2017年與國立研究開發法人宇宙航空研究開發機構 (JAXA) 簽訂「協助提供使用人造衛星等災害相關資訊協定」。在發生災害時增加有效運用衛星圖像的機會，掌握受災情況。
- 土砂災害研究室和JAXA攜手實施「陸域觀測衛星2號 (ALOS-2) 開發土砂災害監視手法相關共同研究」，於2020年4月公布國土技術政策總合研究所資料第1110號「依合成孔徑雷達（SAR）圖像判讀土砂災害指引 (以下稱**「判讀指導方針」**)」。
- 判讀指導方針是針對土砂災害使SAR產生散射的變化，並說明調查土砂發生災害情況的方法。以減少因判讀者的經驗差異，而出現錯誤的判讀結果，發揮判讀技術普遍化的效果。

大綱

1. 合成孔徑雷達(SAR)的散射
2. 災害時SAR的散射變化
3. 災害案例(ALOS-2)
4. 判讀SAR散射資料要領
5. 災害案例(Sentinel-1)
6. 判讀注意事項

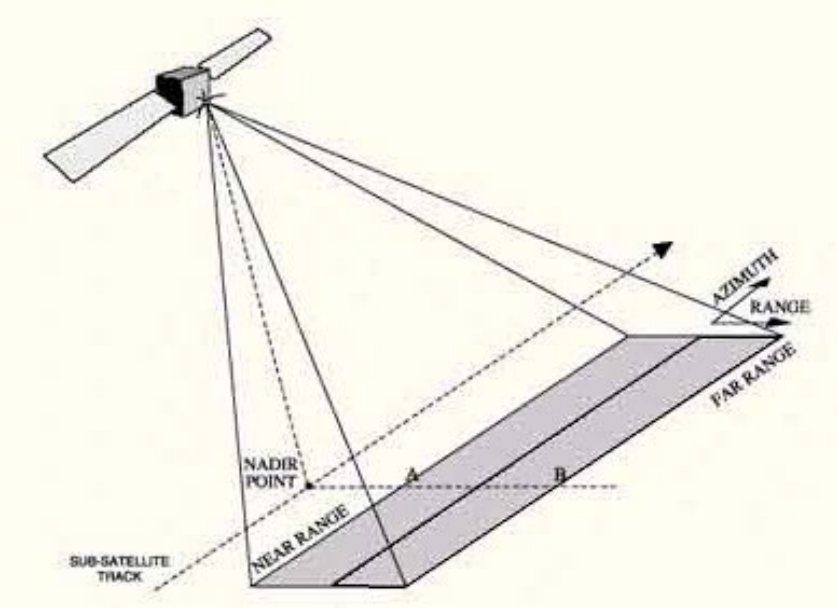
Google Earth Engine

目錄

1. 合成孔徑雷達（SAR）的散射
1.1 背向散射 1
1.2 前向散射 2
1.3 二次散射 3
1.4 體散射 4
1.5 局部入射角之間的關係 5
2. 災害時的SAR散射變化
2.1 發生災害時，對SAR散射變化的概念 6
2.2 災害時的SAR散射變化模型 7
3. 災害時的SAR散射變化案例解說
A) 對農地和道路的土砂堆積 11
B) 漂流木等漂流 16
C) 因河道閉塞而發生積水（堰塞湖） 19
D) 淹水、洪水 22
E) 橋梁流失 27
F) 森林坡面崩塌（馬蹄形） 31
G) 森林坡面崩塌（細長形） 37
H) 裸地坡面的崩塌 40
I) 對住宅區堆積土砂 43
J) 建築物、結構物倒塌 46
K) 降灰 48
L) 火山碎屑流流下 50
4. 根據災害時SAR散射變化的判讀調查要領
4.1 災害時的SAR散射變化傾向 52
4.2 依SAR圖像判讀土砂災害的調查要領 54
4.3 其他注意事項 55
參考文獻 56
強度差分SAR圖像的技術規格 57

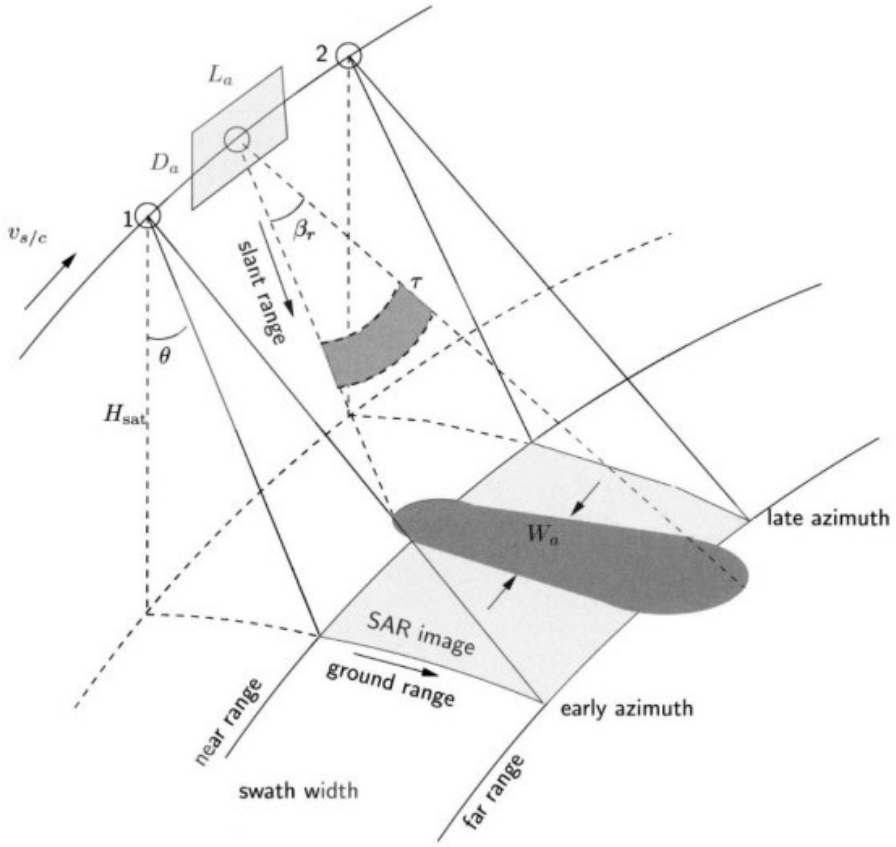
常用的兩種成像雷達

- Real Aperture Radar(RAR) --> 真實孔徑雷達
- Synthetic Aperture Radar(SAR) -->合成孔徑雷達



RAR示意圖 (圖片來源：ESA)

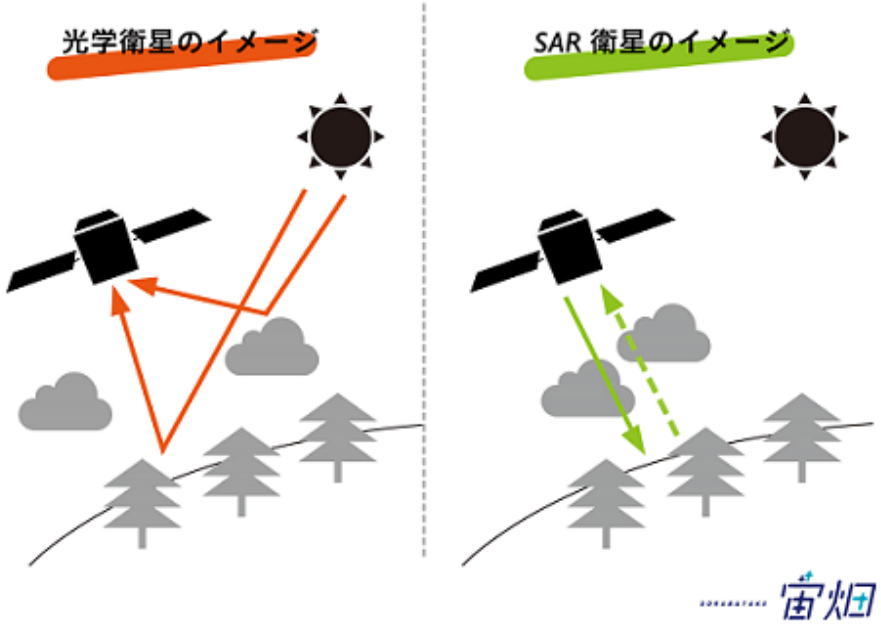
ERS 雷達課程 (esa)



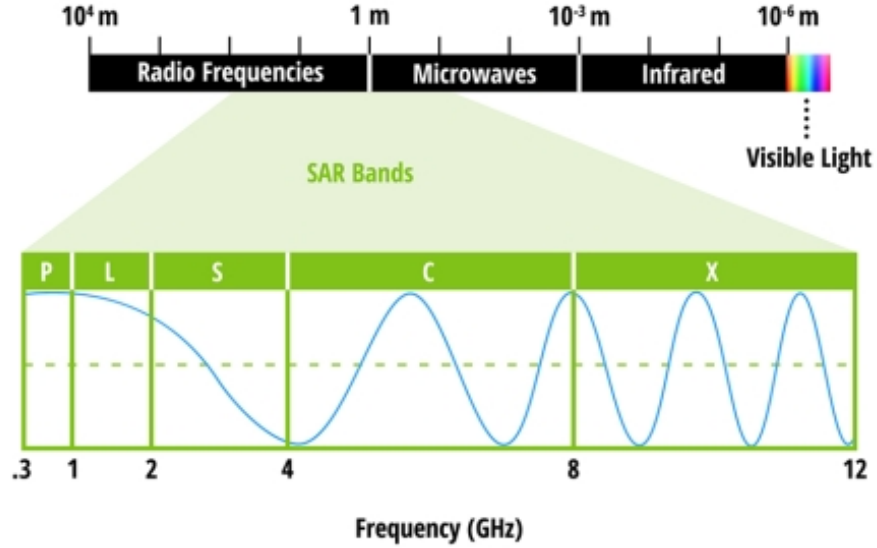
SAR示意圖 (圖片來源：Hanssen, 2001)

合成孔徑雷達(SAR)的散射

- 搭載於巡視高度數百km人造衛星的SAR，以斜下方朝地表照射微波（電波的一種），再以高解析度觀測回射的微波。



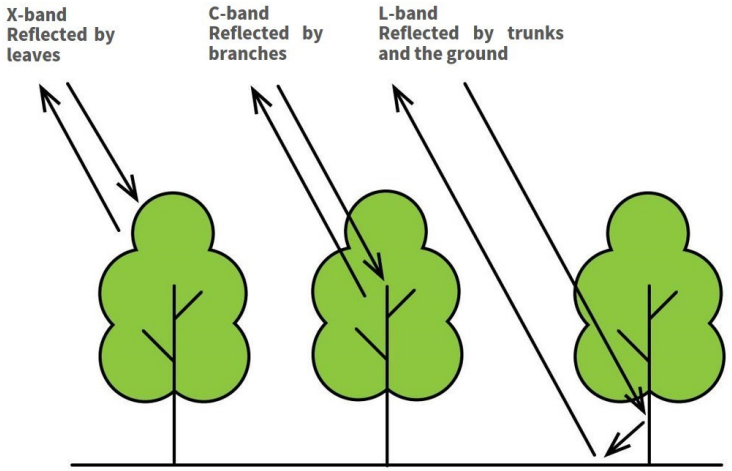
光學成像衛星與SAR衛星的區別 (圖片來源：Sorabatke)



不同波段光譜示意圖 (圖片來源：Nasa)

What is Synthetic Aperture Radar? | Earthdata (nasa.gov)

What can be seen by wavelengths of SAR 宙灶



SAR衛星於不同波段反射示意圖 (圖片來源：Sorabatke)

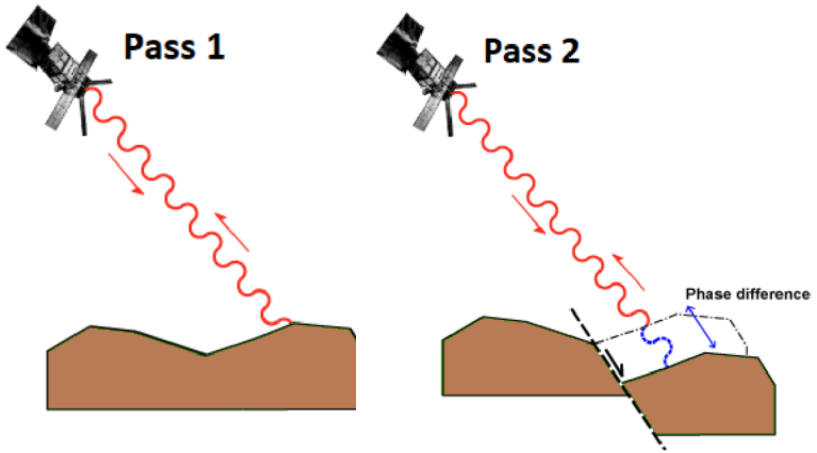
合成孔徑雷達(SAR)的散射

- 透過SAR可分別取得背向散射強度、相位、偏振3種資訊
- 本文將針對**背向散射強度**相關散射進行解說



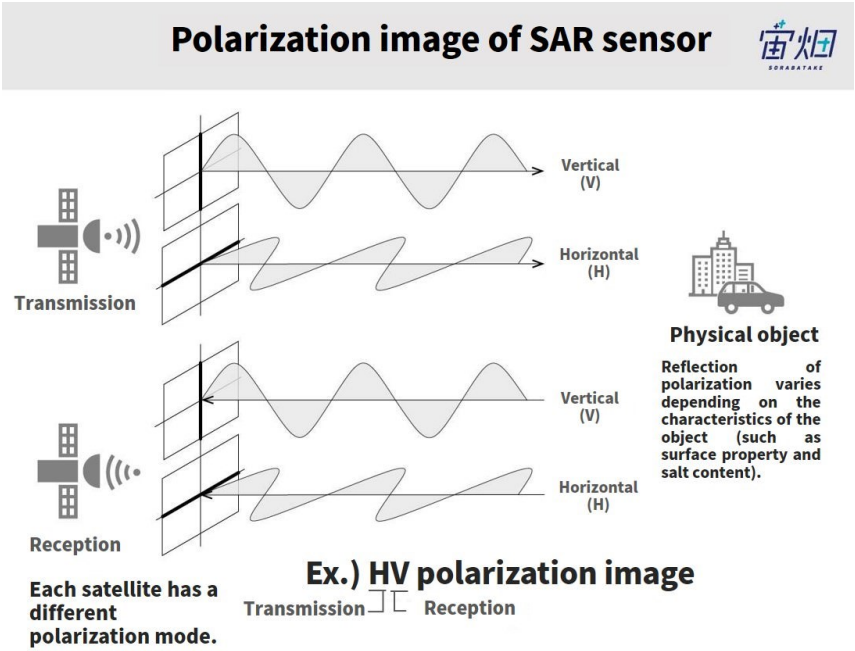
ALOS-2 PALSAR-2
June 19, 2014
(Resolution: about 3 m)

ALOS-2可視化影像-東京(圖片來源：JAXA)



SAR衛星相位示意圖
(圖片來源：Castellazzi and Schmid, 2020)

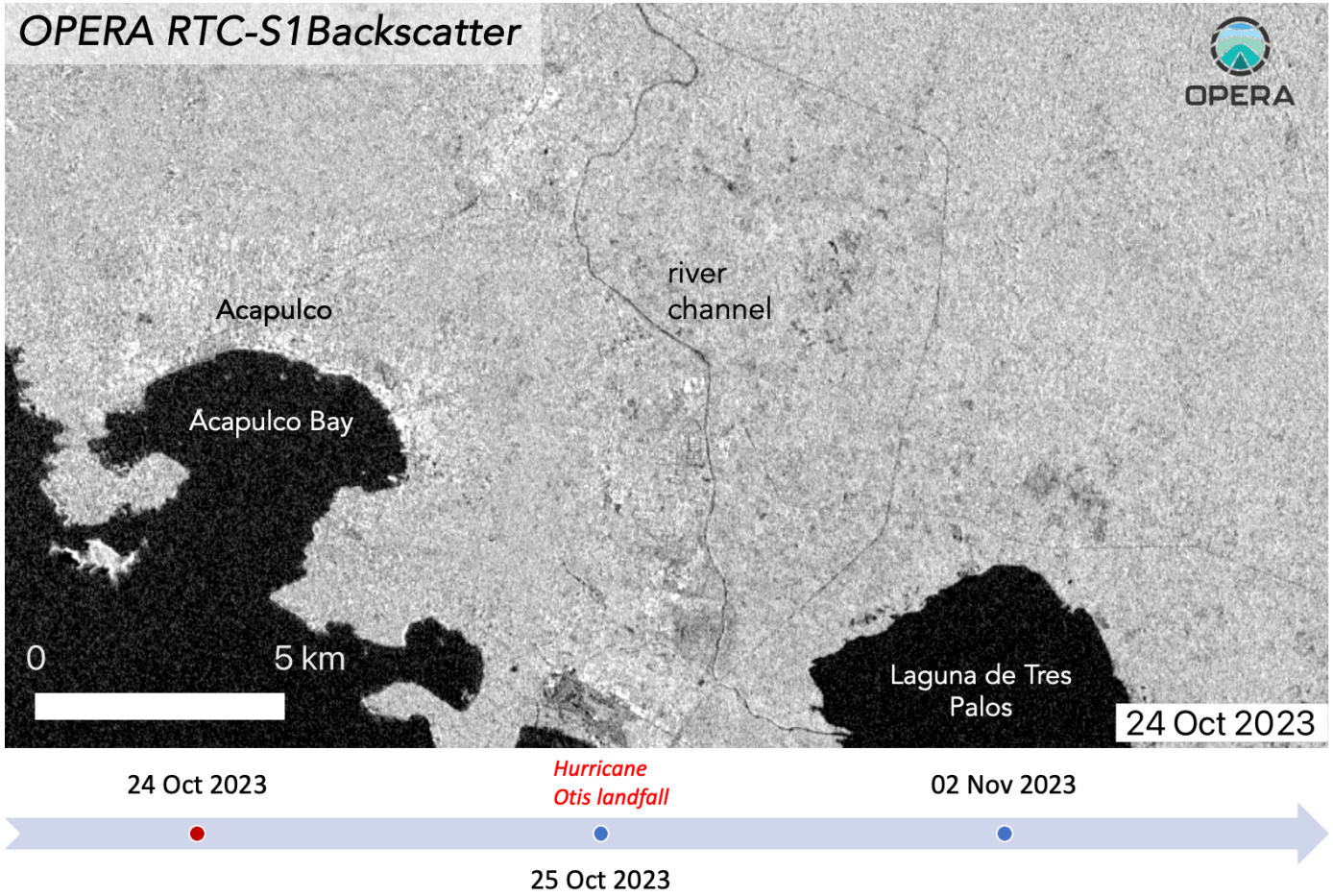
The basics of satellite data — What it tells us, types, observation interval, resolution and use cases | Sorabatake



SAR衛星偏振示意圖 (圖片來源：Sorabatke)

合成孔徑雷達(SAR)的散射

- SAR的微波照射在地表、森林、建造物等地上物後，便朝向各方向散射。
- 唯有朝衛星方向產生的散射，會形成可觀測的反射波(**背向散射(backscatter)**)。
- 再將散射強度以強度越強越明亮、越弱越暗的方式建立可視化之後，形成「SAR強度圖像」。

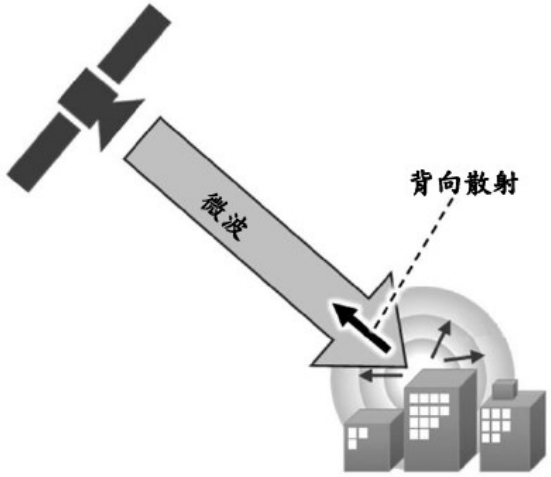


OPERA RTC-S1 在颶風Otis登陸前 (2023/10/24) 和登陸後 (2023/11/2)的背向散射。(圖片來源：OPERA/JPL)

合成孔徑雷達(SAR)的散射

1. 背向散射(backscatter)

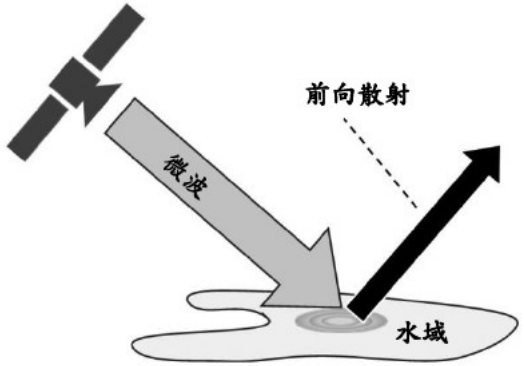
- 在地表面產生的散射當中，相對於照射方向朝後方產生的散射稱為「背向散射」。
- 在形狀凹凸不均的場所會發生背向散射，強度依結構和方向而異。

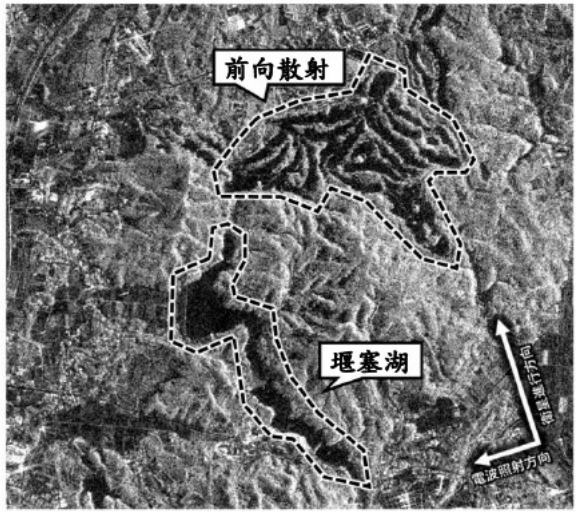




2. 前向散射

- 在地表產生的散射當中，與照射方向相同方向的散射。
- 在無起伏的平地、水面、停車場時，會因為鏡面反射而增強前向散射，形成黑色區塊。

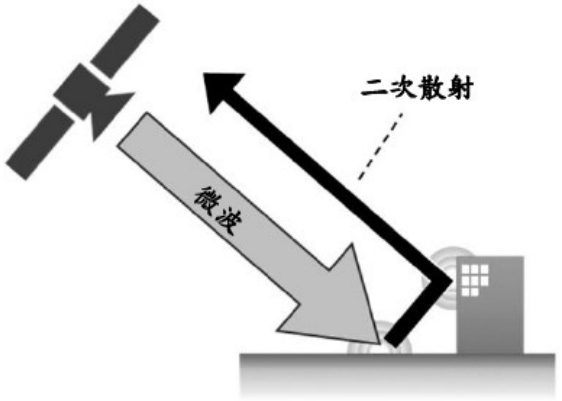




合成孔徑雷達(SAR)的散射

3. 二次散射

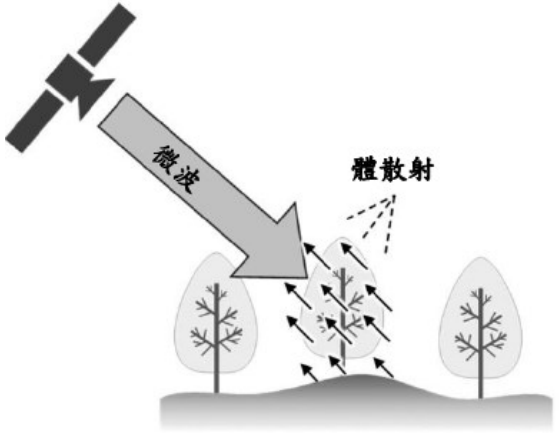
- 有建築物等垂直矗立的地上物時，會在地表面和牆面發生二次反射後，再朝微波照射方向產生折返的強烈反射波





4. 體散射(volume scattering)

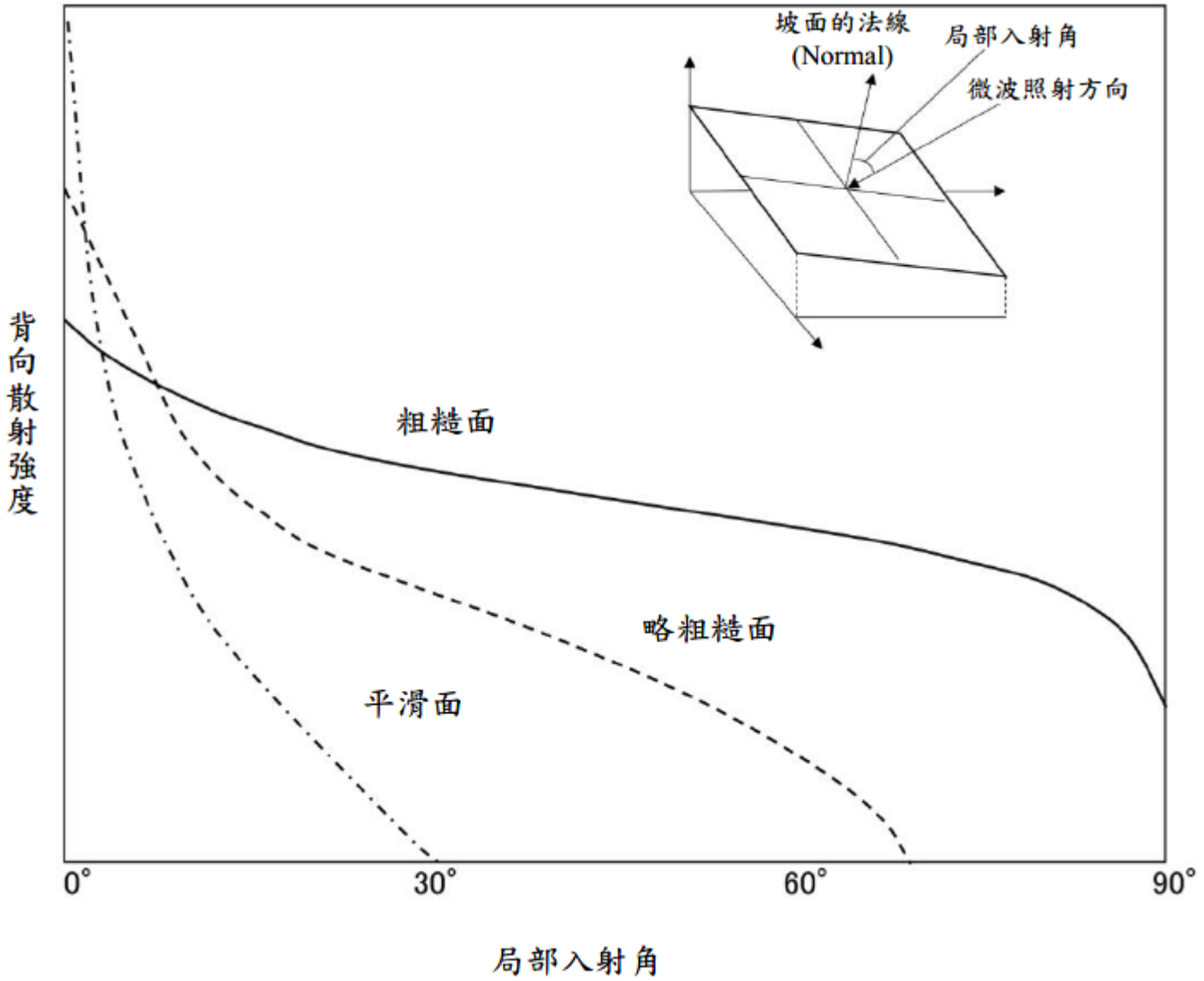
- 微波貫穿樹木、植物等具有複雜立體結構的地上物時，會朝向各種方向產生散射。
- 體散射會降低背向散射強度，圖像較結構物模糊。





合成孔徑雷達(SAR)的散射

- 考慮散射面的平滑度外，背向散射強度亦仰賴入射到地面的**局部入射角 (local incidence angle)**影響。
- 如圖所示，一般而言局部入射角變大時，背向散射強度變小。相較於粗糙散射面，局部入射角對平滑散射面的影響較大。
- 森林具有強烈的體散射，背向散射強度變化較不明顯。



災害時的SAR散射變化 發生災害時，對SAR散射變化的概念

災害後的背向散射強度上升 強度上升

1. 產生散射面

對於背向散射弱的平滑散射面或森林而言，會因為災害而提高散射面的粗糙度，而在災害後顯現增強背向散射的強烈散射。

2. 產生二次散射

因災害而出現高低差，使出現新的導致二次散射之地形，產生增強背向散射的二次散射。

災害後的背向散射強度下降 強度下降

1. 散射面消失

因災害而提高散射面平滑度時的散射變化(如堰塞湖)，而失去背向散射。

2. 體散射消失

因災害而失去體散射鮮明的散射體，出現平滑地表時，失去背向散射。

3. 二次散射消失

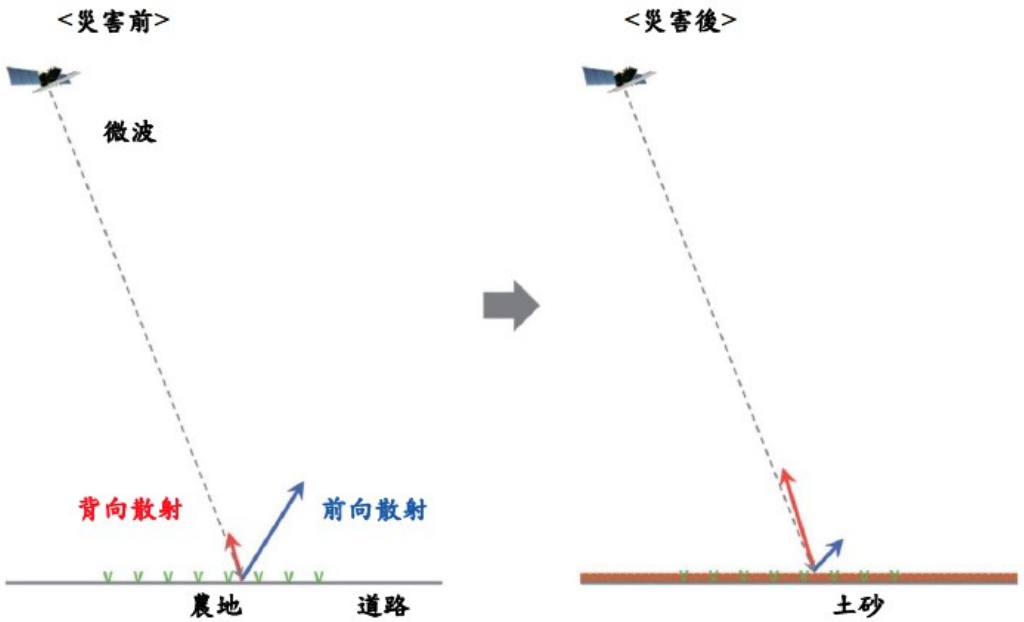
因災害高低差消失，而失去二次散射時即發生散射變化。

災害時的SAR散射變化案例解說 農地和道路的土砂堆積

強度上升

當農地和道路堆積土砂時，災害後的背向散射強度上升。

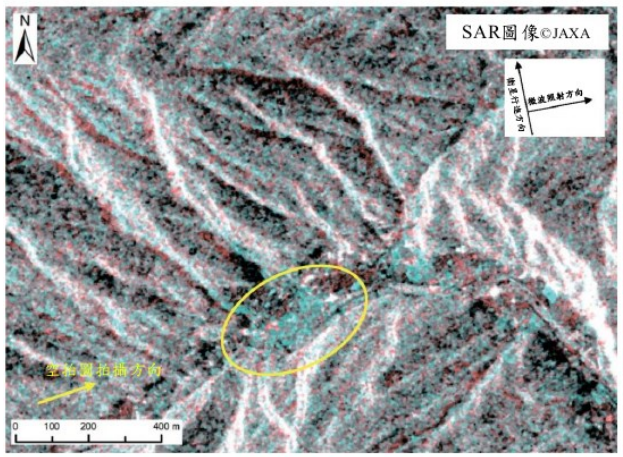
在強度差分SAR圖像上，用藍色做表示。



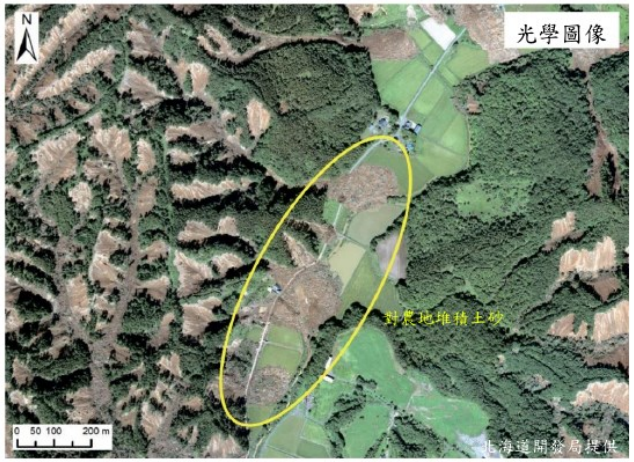
SAR對農地和鋪裝道路等無起伏的平坦地表面，具有較強的前向散射，若因災害造成土砂流入時，堆積的土砂即促成背向散射強度上升，並可透過SAR的散射變化中，辦定堆積土砂的區位

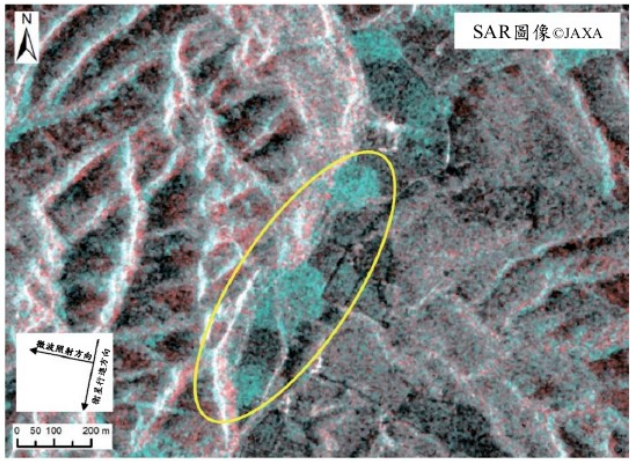
2018年7月豪雨(吳市)





2018年北海道膽振東部地震



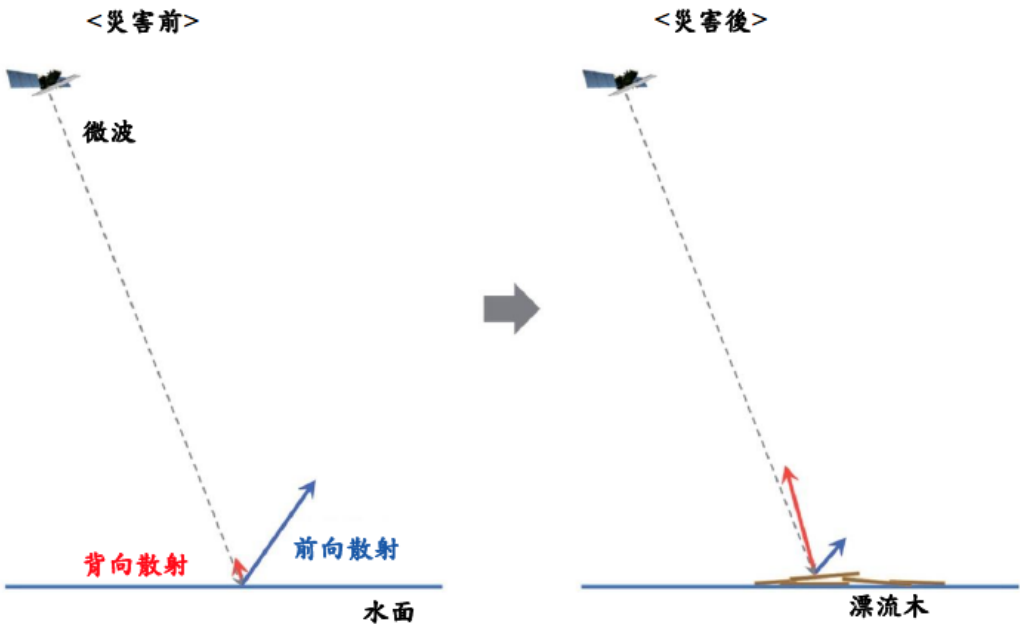


災害時的SAR散射變化案例解說 漂流木堆積

強度上升

如有漂流木等，災害後的背向散射強度會上升。

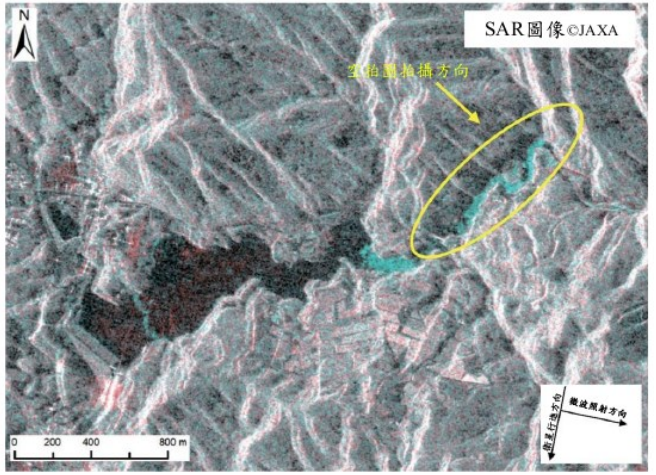
在強度差分SAR圖像上，用藍色做表示。



SAR對水域會產生前向散射鮮明的散射，若因災害而大量流出漂流木覆蓋水面時，使得背向散射強度上升，即可透過SAR散射的變化，圈繪漂流木的大致分布。

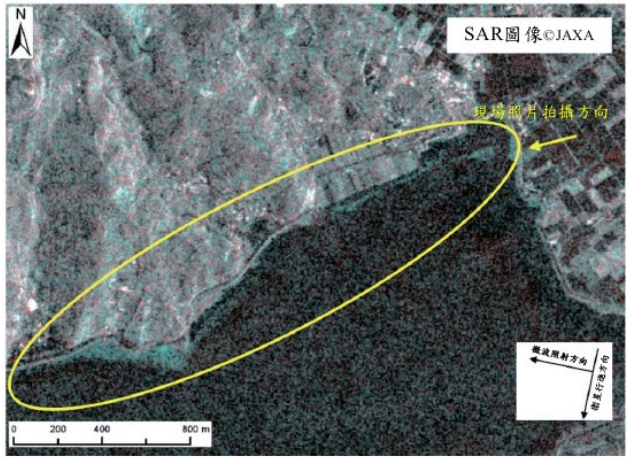
2017年7月九州北部豪雨





2020年7月豪雨 (八代海)



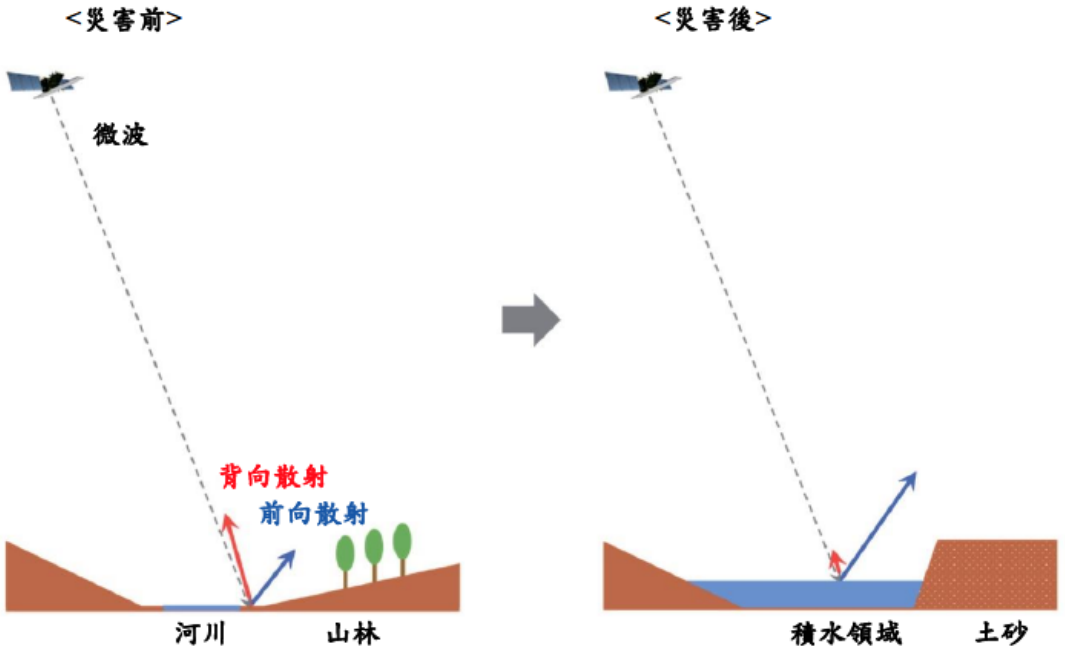


災害時的SAR散射變化案例解說 因河道閉塞而發生積水(堰塞湖)

強度下降

若因河道閉塞而積水時，災害後的背向散射強度下降。

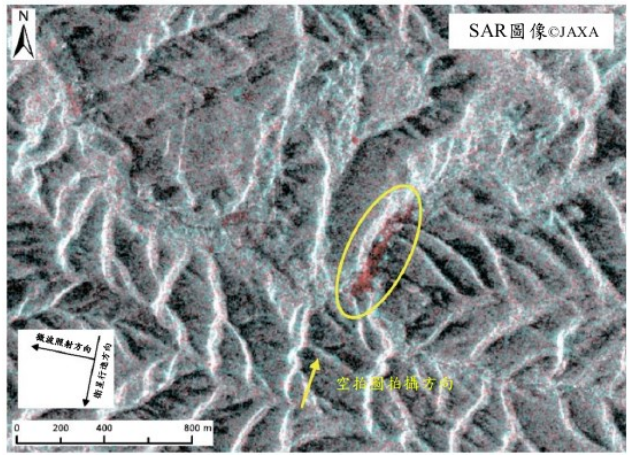
在強度差分SAR圖像上呈現鮮明紅色。



SAR會根據河道周邊等地表面的形狀產生背向散射，若因災害使得土砂等堵塞河道而形成堰塞湖時，水面使得災害後的背向散射明顯下降，可從這種SAR的散射變化，偵測堰塞湖的區位。

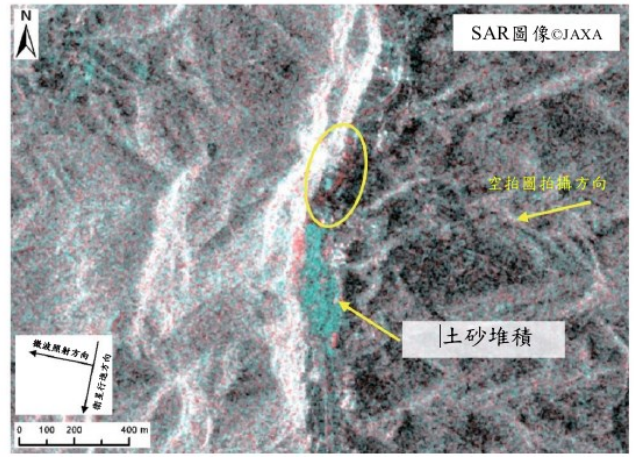
2018年北海道膽振東部地震





2017年7月九州北部豪雨



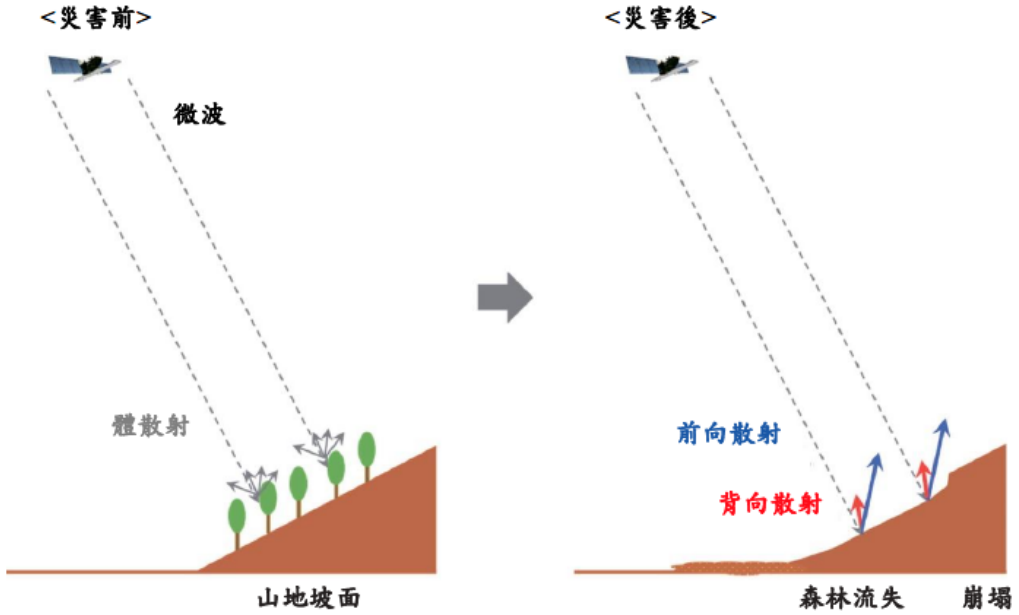


災害時的SAR散射變化案例解說 森林坡面崩塌(馬蹄形)

強度下降

當森林發生崩塌時，災害後的背向散射強度下降。

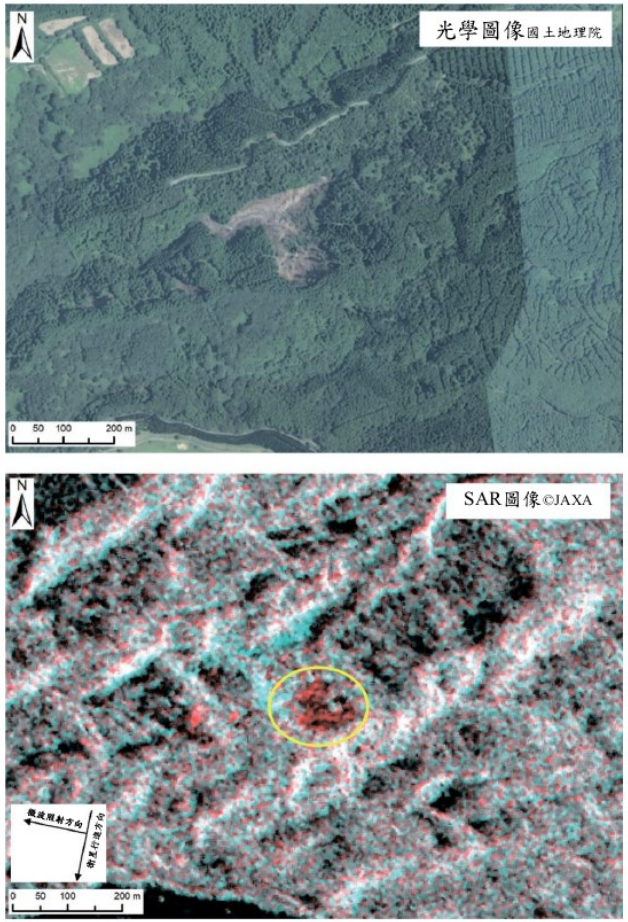
在強度差分SAR圖像上呈現紅色。



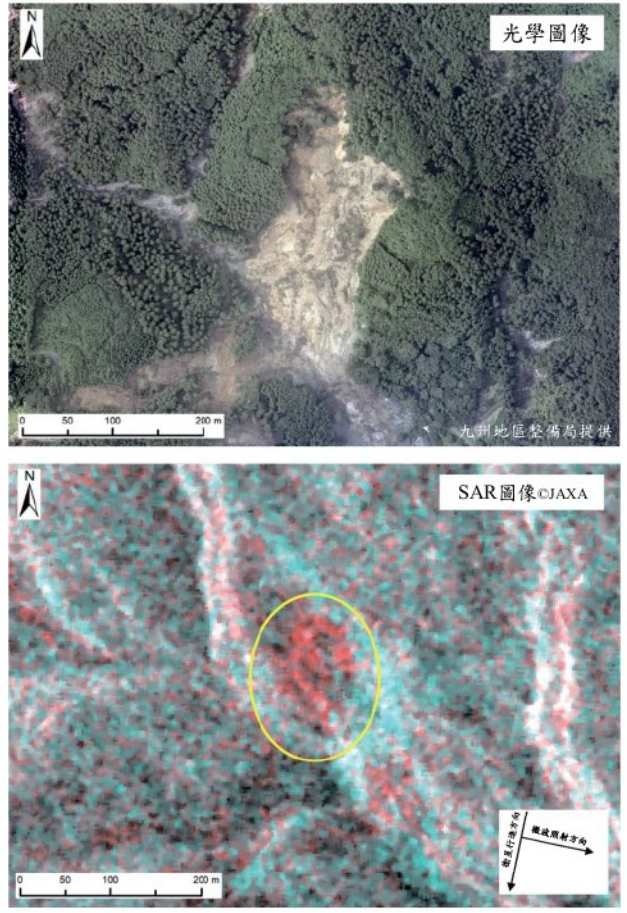
SAR於森林主要為體散射，當坡面因災害而發生崩塌造成森林破壞後，變為前向散射為主，因此災害後的背向散射強度下降。

此外，因地形變化改變局部入射角，災害後的背向散射強度可能些微下降，特定森林坡面發生崩塌的區位。

2016年熊本地震



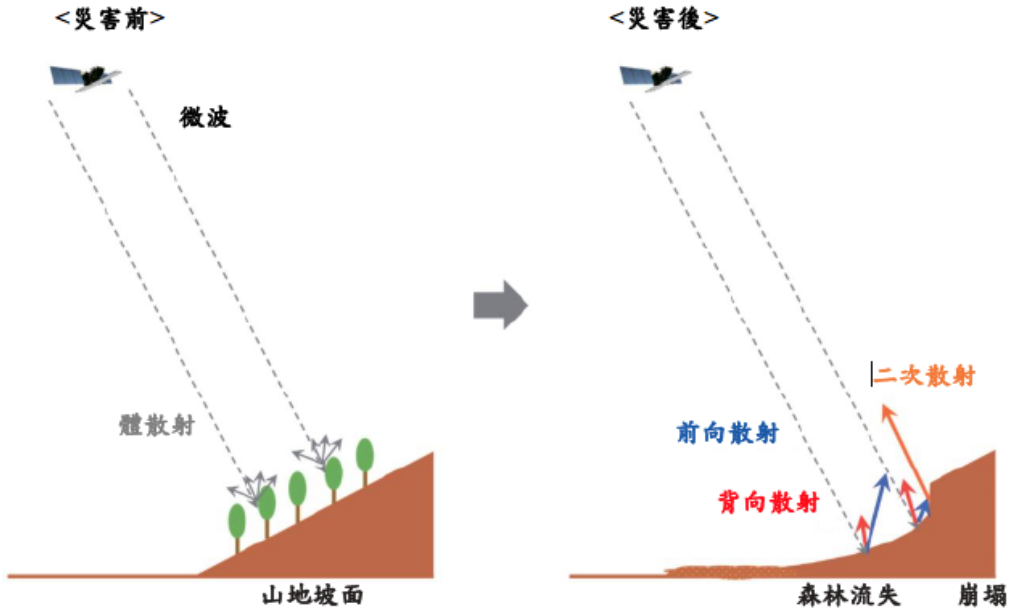
2017年7月九州北部豪雨



災害時的SAR散射變化案例解說 森林坡面崩塌(細長型)

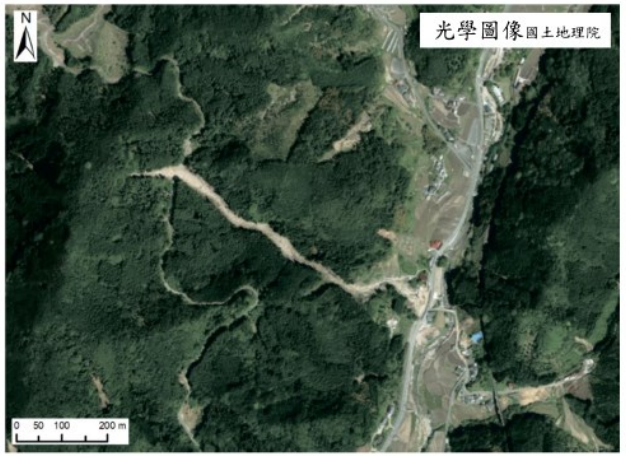
強度下降　強度上升

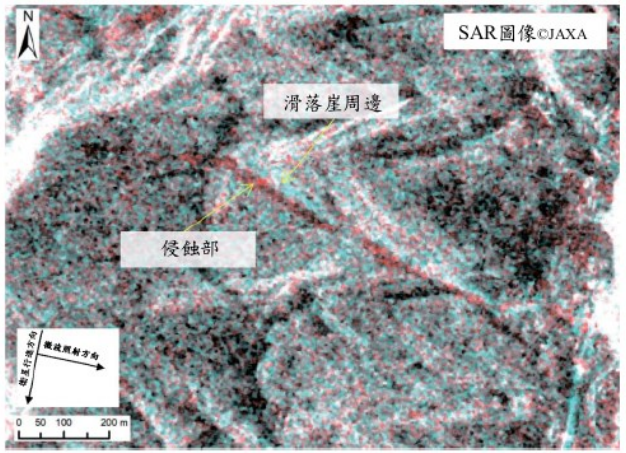
當森林坡面發生細長形崩塌時，侵蝕部位呈現清晰紅、滑落崖周邊呈現藍色。



森林流失後，在侵蝕部位上因呈現前向散射鮮明情況，因此災害後的背向散射強度下降；滑落崖周邊則產生二次散射，因此災害後的背向散射強度上升。

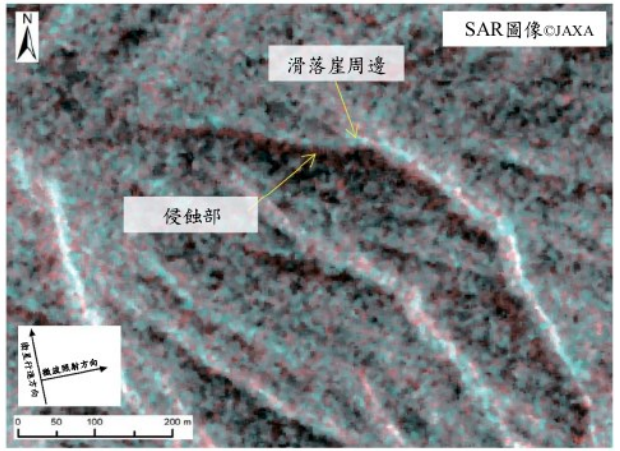
2017年7月九州北部豪雨





2018年7月吳市豪雨

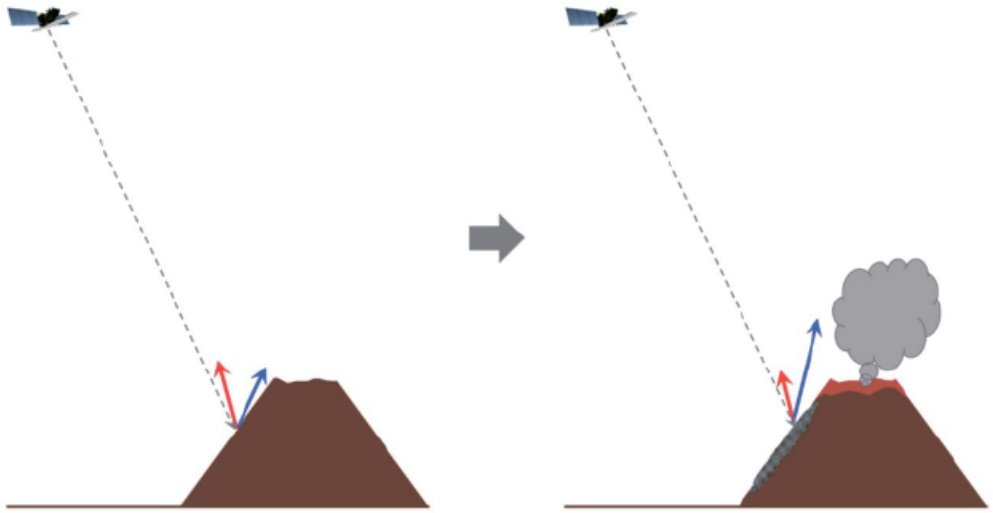




災害時的SAR散射變化案例解說 火山降灰及火山碎屑流

強度下降

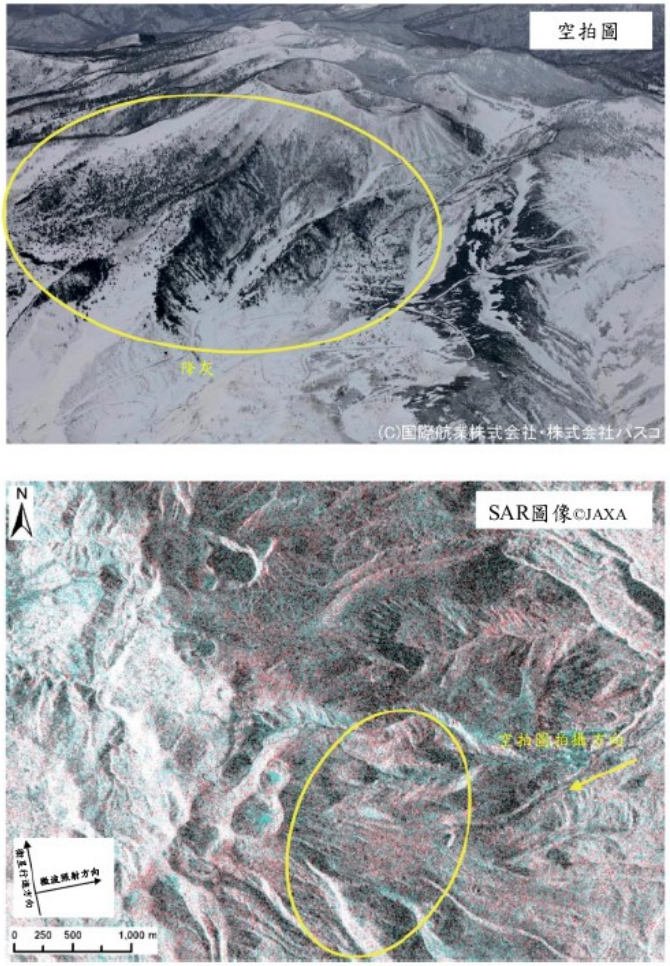
降灰範圍及火山碎屑流的範圍，即呈現災害後的背向散射強度下降，在強度差分SAR圖像上呈現紅色。



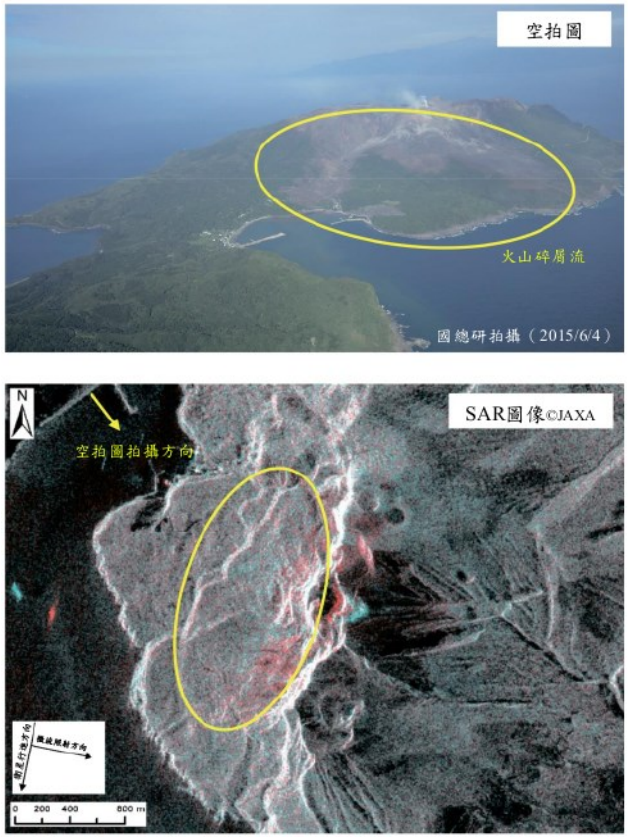
從SAR照射的微波是根據火口周邊地表面的形狀和形狀凹凸不均的情況，產生背向散射。堆積火山灰後，相較於噴發前仍形成無起伏的平坦地表面，災後的背向散射強度下降。

但火山案例少，因此散射變化的傾向較不明確。

2018年草津白根山



2015年口永良部山噴發

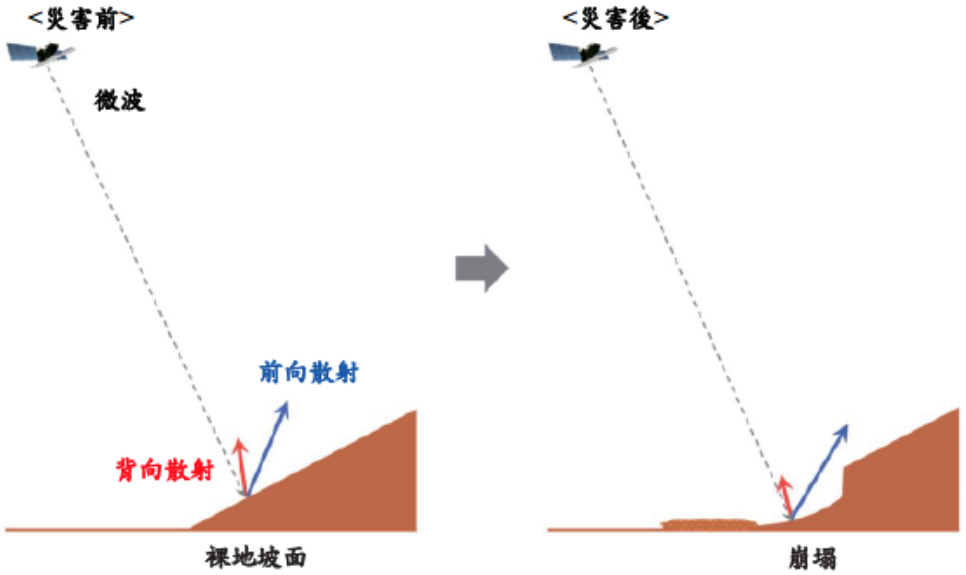


災害時的SAR散射變化案例解說 裸地坡面的崩塌

強度下降

當裸地坡面發生崩塌後，背向散射強度僅些微下降。

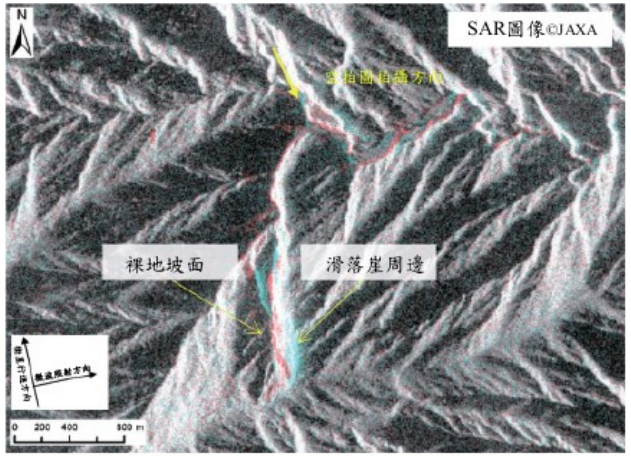
在強度差分SAR圖像上呈現淡紅色。



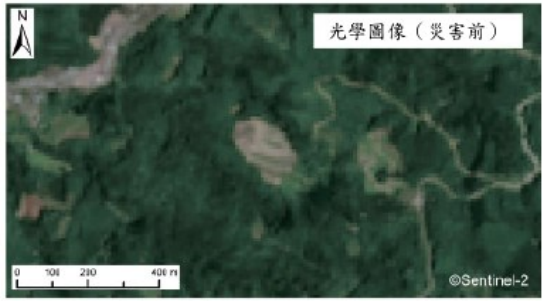
裸地坡面具有較鮮明的前向散射。當發生崩塌後，因地形變化而改變局部入射角，災害後的背向散射強度些微下降。可從這種SAR的散射變化，偵測裸地坡面發生崩塌的區位。

2020年7月山梨縣豪雨

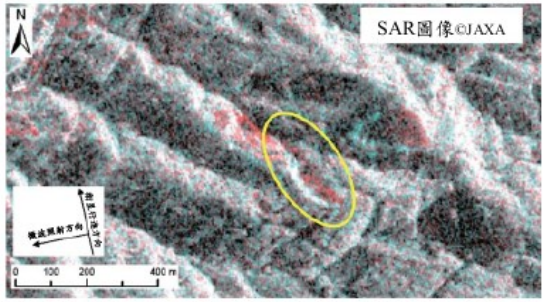




2020年7月熊本縣豪雨



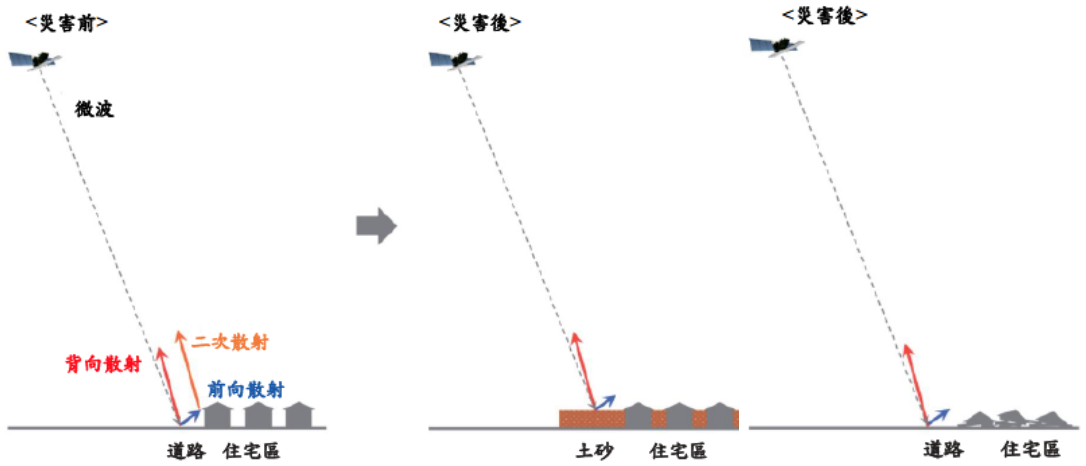




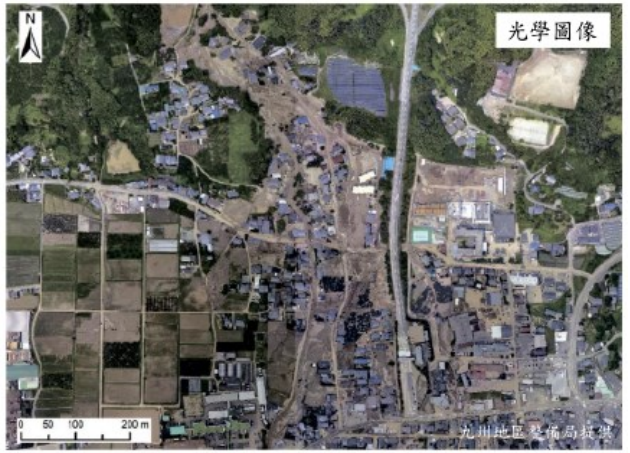
災害時的SAR散射變化案例解說 住宅區堆積土砂、建築物倒塌

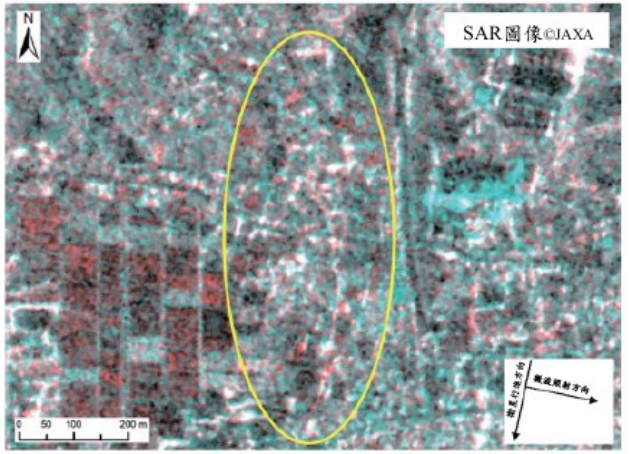
強度下降

當住宅區堆積土砂或倒塌後，災害後的背向散射強度些微下降。在強度差分SAR圖像上呈現淡紅色。



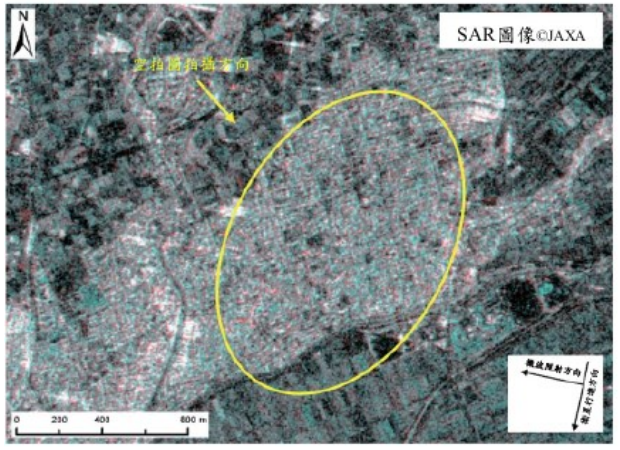
2017年7月九州北部豪雨





2016年熊本地震





對住宅區的建物有較強的二次散射，當住宅區因災害而堆積土砂或倒塌後，二次散射減弱，因此災害後的背向散射強度些微下降。可從這種SAR的散射變化，特定住宅區堆積土砂或倒塌的區位。

根據災害時SAR散射變化的判讀調查要領 災害時的SAR散射變化傾向

新增散射面 強度上升

(A)堆積土砂、(B)漂流木會提高災後的背向散射強度，因此強度差分SAR圖像上的辨識性高。兩種發生地點不同，因此SAR散射變化的誤判的可能性低，於災害時容易被檢測。

散射面消失 強度下降

(C)堰塞湖、 (D)淹水與洪水、 (E)橋梁流失會明顯降低災害後的背向散射強度，於強度差分SAR圖像上的辨識性高。但因這些現象皆發生在河道周邊，因此有可能形成難以判別之情形。

體散射消失 強度下降

(F)森林坡面崩塌、 (G)火山碎屑會降低災害後的背向散射強度，因此強度差分SAR圖像上的辨識性高。特別是細長形的森林坡面崩塌具有一併發生二次散射的特徵，災害時容易被檢測。

二次散射消失 強度下降

(H)住宅堆積土砂、 (I)結構物倒塌及變形於強度差分SAR圖像上的散射變化並不明確。

根據災害時SAR散射變化的判讀調查要領 災害時的SAR散射變化傾向

災害時的SAR散射變化一覽表

現象	散射變化模式						災害後的背向散射強度	強度差分SAR圖像
	(a) 產生散射面	(b) 產生二次散射	(c) 散射面消失	(d) 體散射消失	(e) 二次散射消失	(f) 散射面的變形		
A) 對農地和道路的土砂堆積	○						上升	藍色
B) 漂流木等漂流	○						上升	藍色
C) 因河道閉塞而發生積水（堰塞湖）			○				明顯下降	清晰紅
D) 淹水、洪水			○				明顯下降	清晰紅
E) 橋梁流失			○				明顯下降	清晰紅
F) 森林坡面崩塌（馬蹄形）				○		○	下降	紅色
G) 森林坡面崩塌（細長形）		○		○		○	上升、下降	藍色、紅色
H) 裸地坡面的崩塌						○	些微下降	淺紅色
I) 對住宅區堆積土砂					○		些微下降	淺紅色
J) 建築物、結構物倒塌					○		些微下降	淺紅色
K) 降灰						○	些微下降	淺紅色
L) 火山碎屑流流下				○			下降	紅色

強度上升

強度下降

根據災害時SAR散射變化的判讀調查要領 依SAR圖像判讀土砂災害的調查要領

土砂災害相關SAR的散射變化萬千，根據各現象特性的SAR散射變化判讀土砂災害的調查注意事項。

災害時的SAR散射變化一覽表

現象	SAR散射變化辨識性高的位置	欠缺SAR散射變化辨識性的場所	容易誤判的現象	SAR散射變化的例外現象
坡面崩塌	森林坡面	裸地坡面	採伐地等人為改變地	草地坡面的崩塌
土砂堆積	農地、道路、河道等	住宅區	-	堆積細粒土砂
堰塞湖	-	流量少的河川	淹水、洪水、水田積水	-

根據災害時SAR散射變化的判讀調查要領 其他注意事項

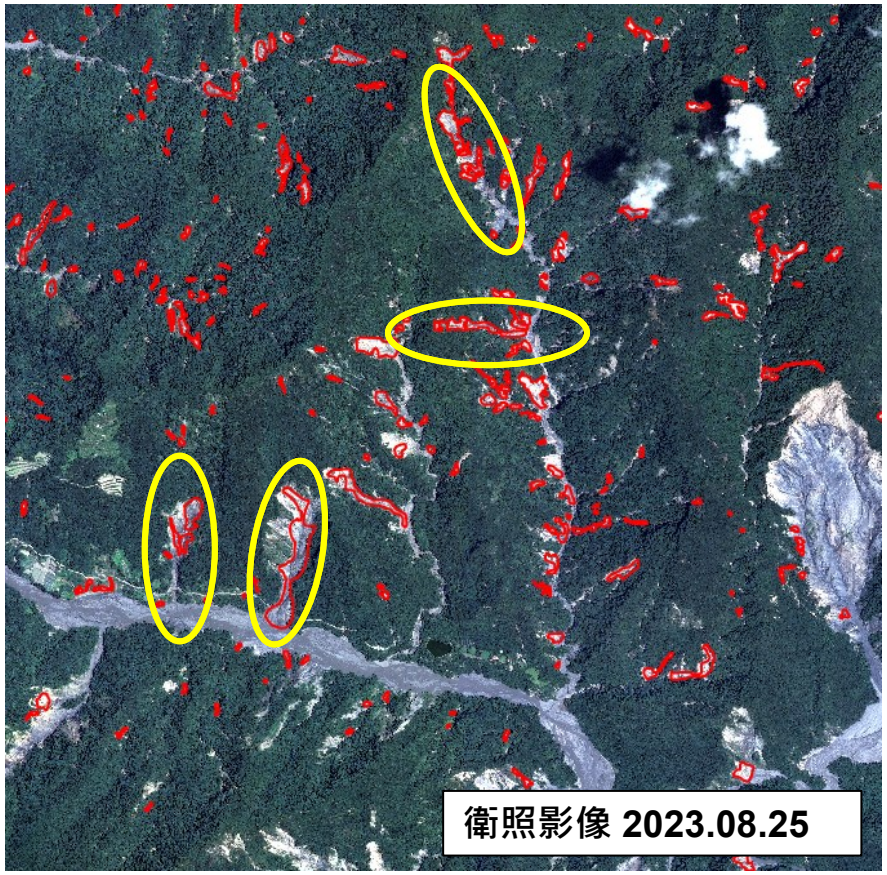
1. 由SAR觀測原理導致，有時SAR的散射可能會在不可見區域內，無法被觀察到。
2. 為了正確解釋SAR的散射變化，需考慮各種複雜因素。
3. 此方針僅使用散射變化案例來解釋，進行簡化的解釋，以滿足緊急性的調查需求。
4. 因此方針是根據ALOS-2的事件類型和案例編寫的，故隨著未來觀測的累積，可能會出現與此方針案例不同的例外散射變化。
5. 需考慮到在災害期間SAR的散射可能會不規則變化，才能靈活運用這些資料。

台灣2023卡努颱風崩塌案例

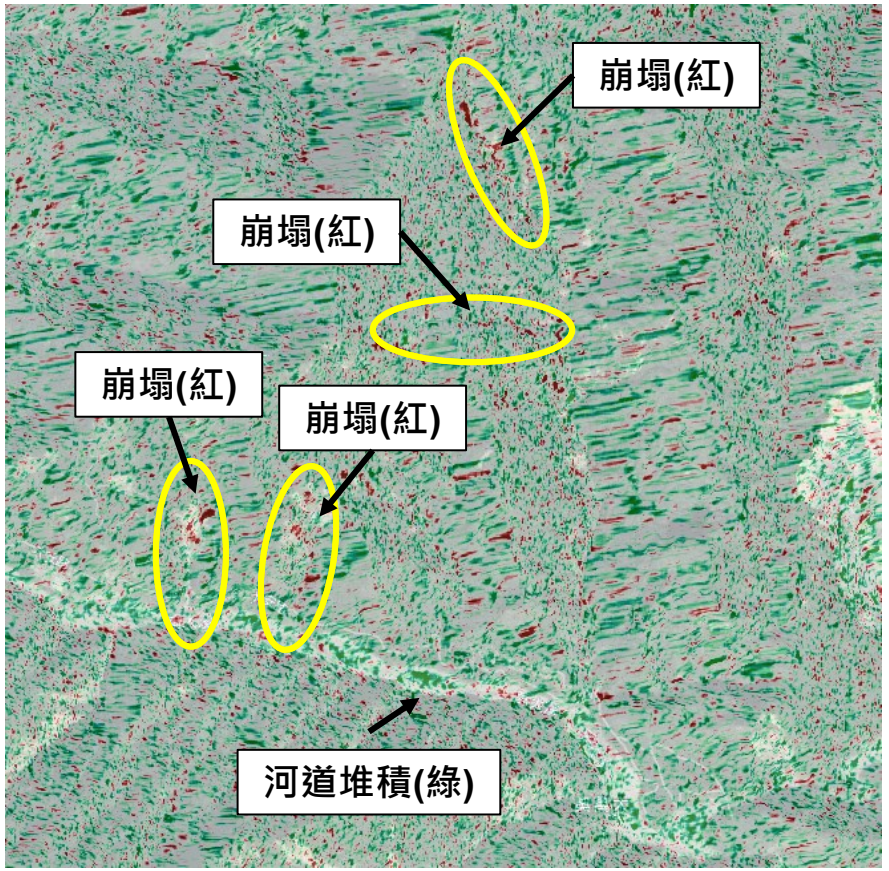
[災前] 2023/07/07_Sentinel-1升軌影像

[災後] 2023/08/24_Sentinel-1升軌影像

- 卡努颱風於2023年8月4日集中降水於南投縣仁愛鄉，造成多處崩塌及土石流。
- 農村水保署於災後利用Pleiades衛星影像判釋新生崩塌地。
- 若以Sentinel-1進行比對，大部分受坡向及植被影響，少數裸露地看出散射下降情形。



前後期影像比對(BigGIS)



兩期影像相減結果(GRD-VV)

台灣2023卡努颱風漂流木案例

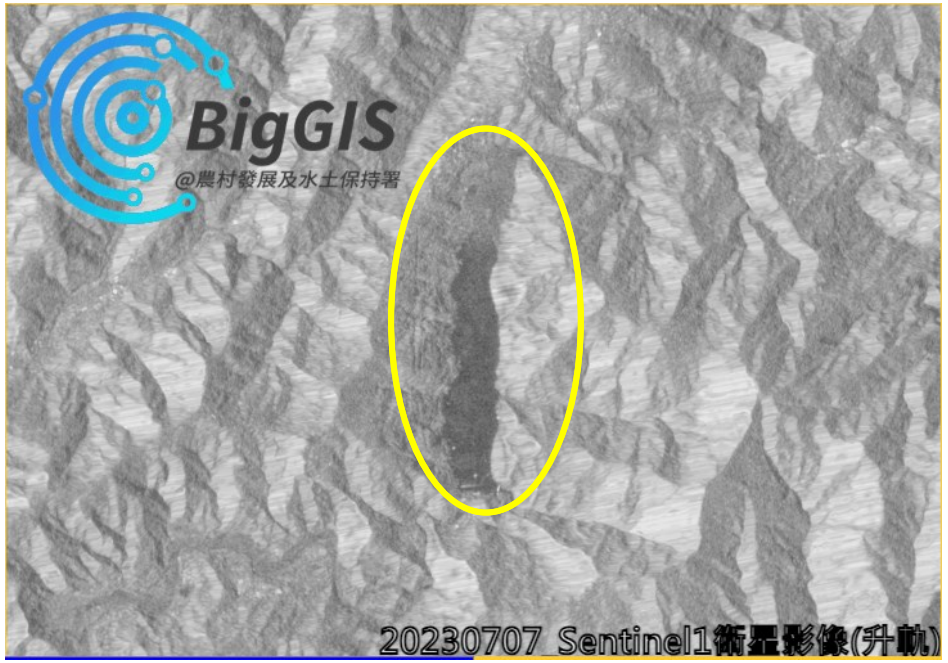
[災前] 2023/07/07_Sentinel-1升軌影像

[災後] 2023/08/24_Sentinel-1升軌影像

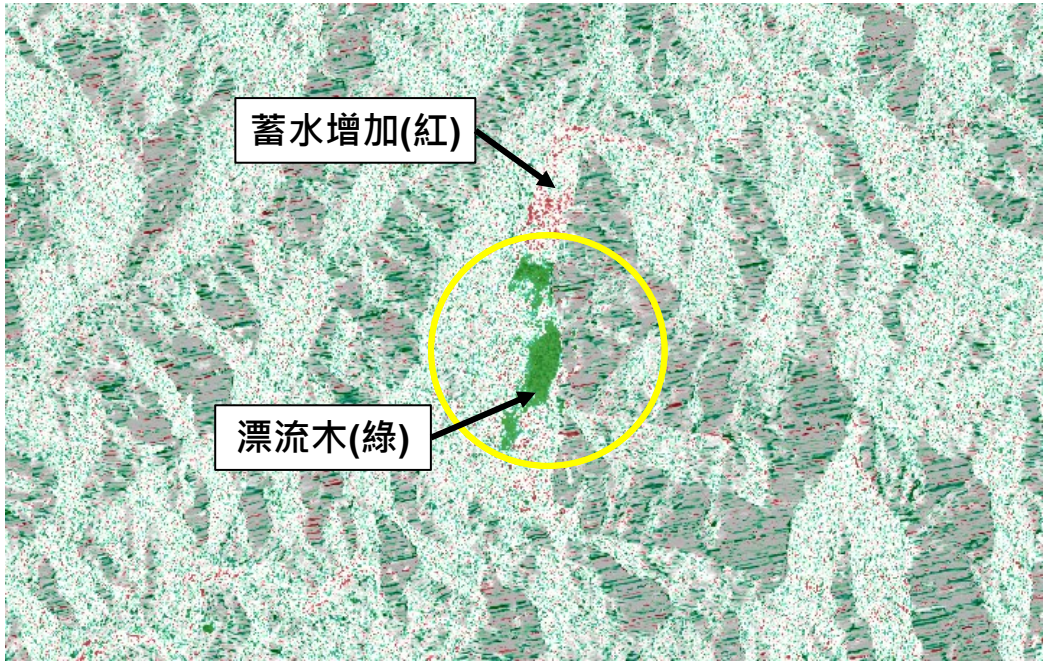
- 卡努颱風於2023年8月影響後，使大量漂流木被沖入霧社水庫中，使散射強度大幅上升(綠色)。
- 霧社水庫北端也因蓄水面積增加，水面使背向散射強度下降，呈現紅色。



衛照影像2023.08.25



前後期影像比對



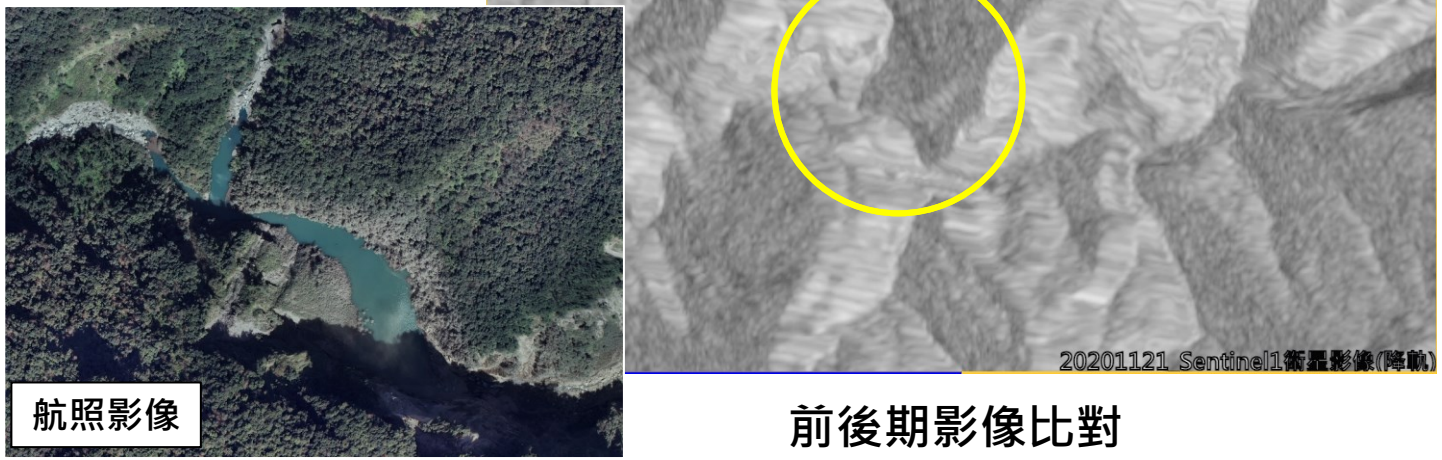
兩期影像相減結果(GRD-VV)

台灣大南堰塞湖案例

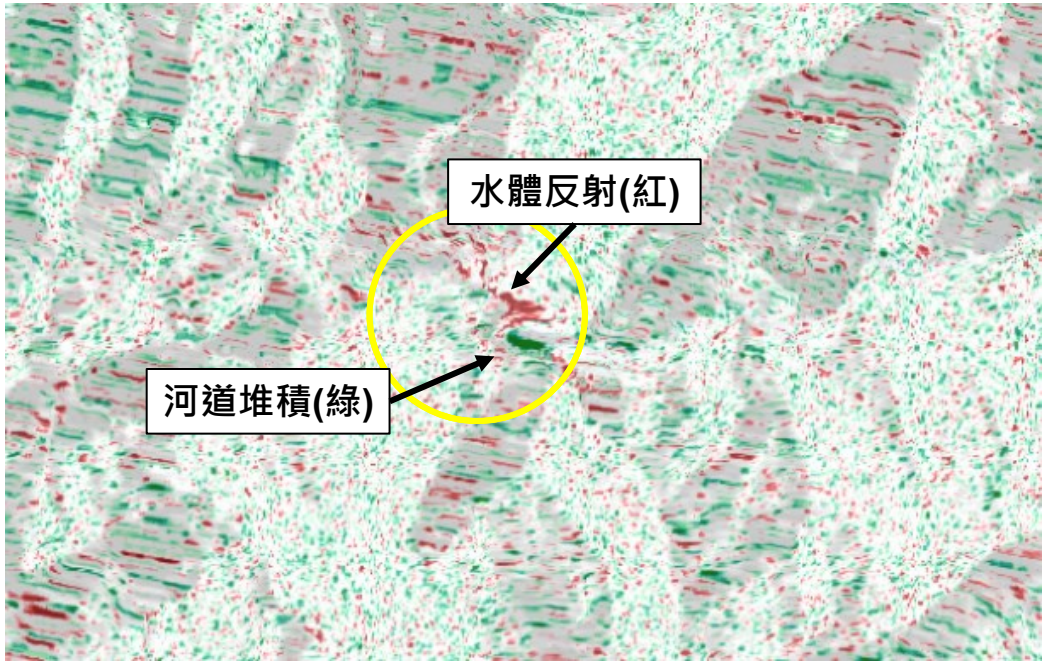
[災前] 2020/11/21_Sentinel-1降軌影像

[災後] 2021/04/14_Sentinel-1降軌影像

- 大南溪於2021年4月航拍影像中發現河道受其右岸崩塌影響堵塞，形成堰塞湖，河道的蓄水，使散射強度下降，水體處呈現紅色。



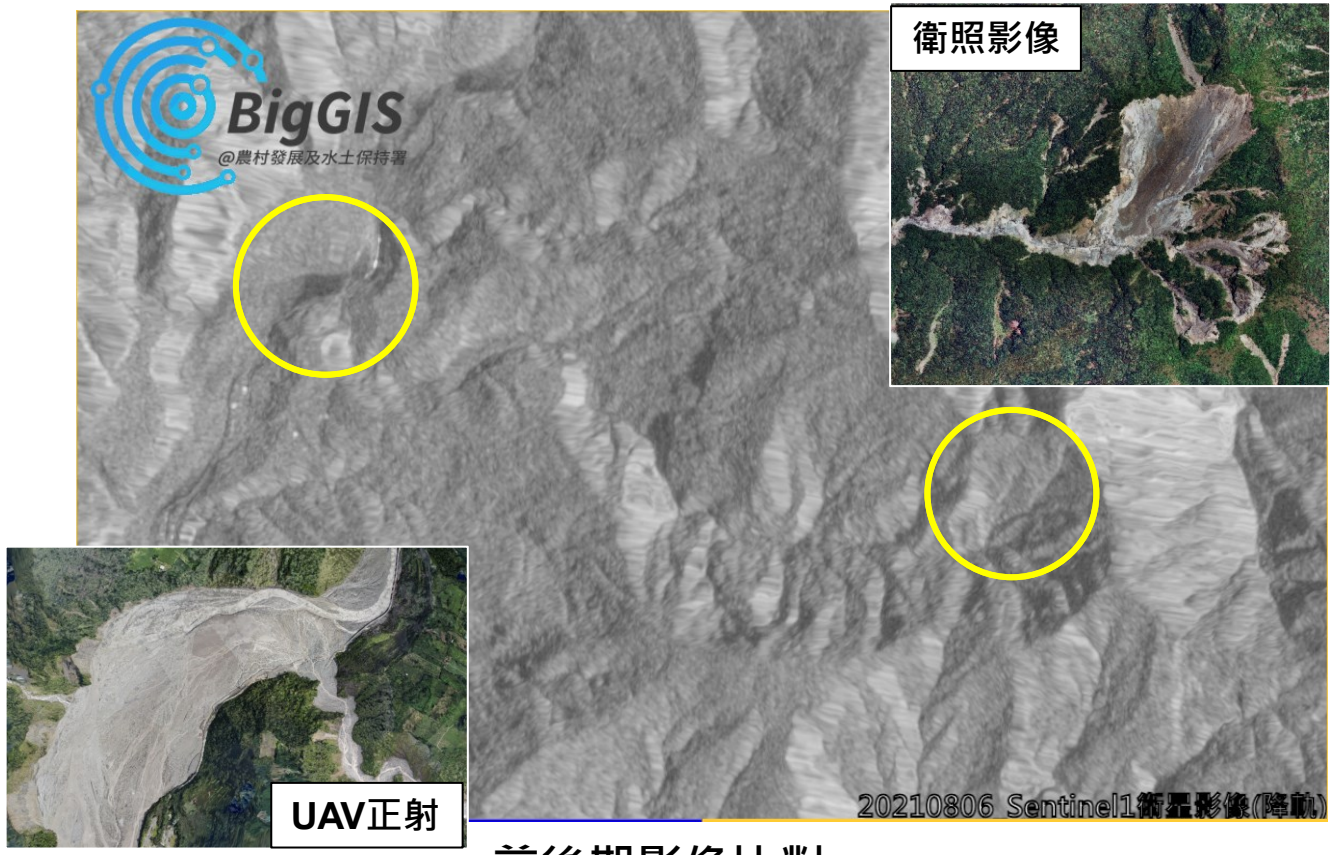
前後期影像比對



兩期影像相減結果(GRD-VV)

台灣玉穗溪盧碧颱風崩塌案例

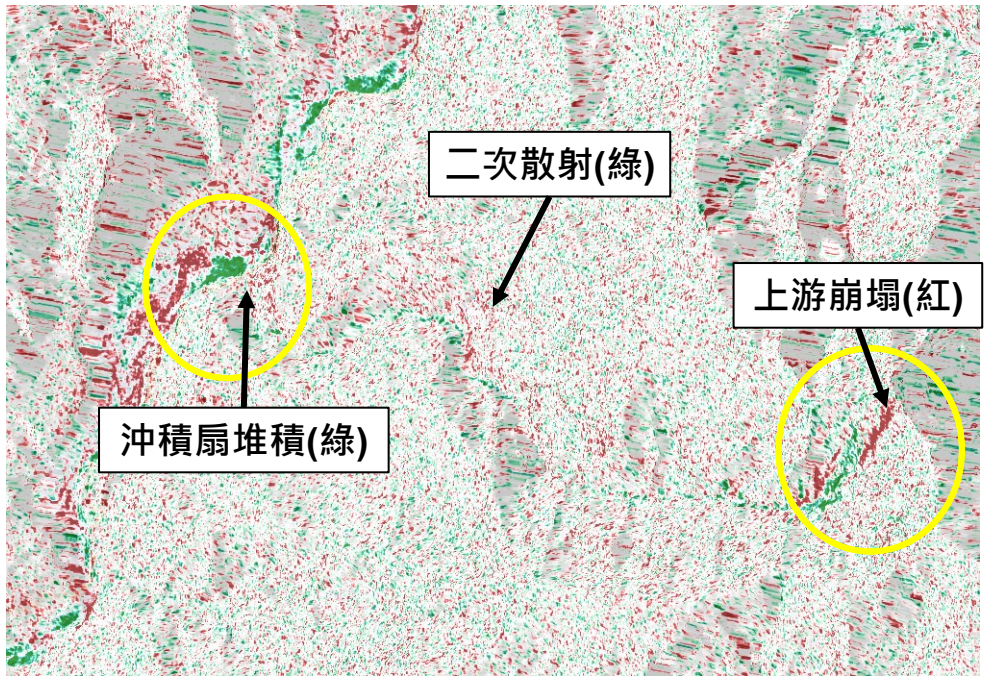
■ 玉穗溪於2021年8月盧碧颱風時，上游處出現大規模崩塌形成土石流，沖毀下游明霸克露橋，兩處皆可在強度差異圖上清楚看到散射變化情形。



前後期影像比對

[災前] 2021/08/06_Sentinel-1降軌影像

[災後] 2021/08/12_Sentinel-1降軌影像



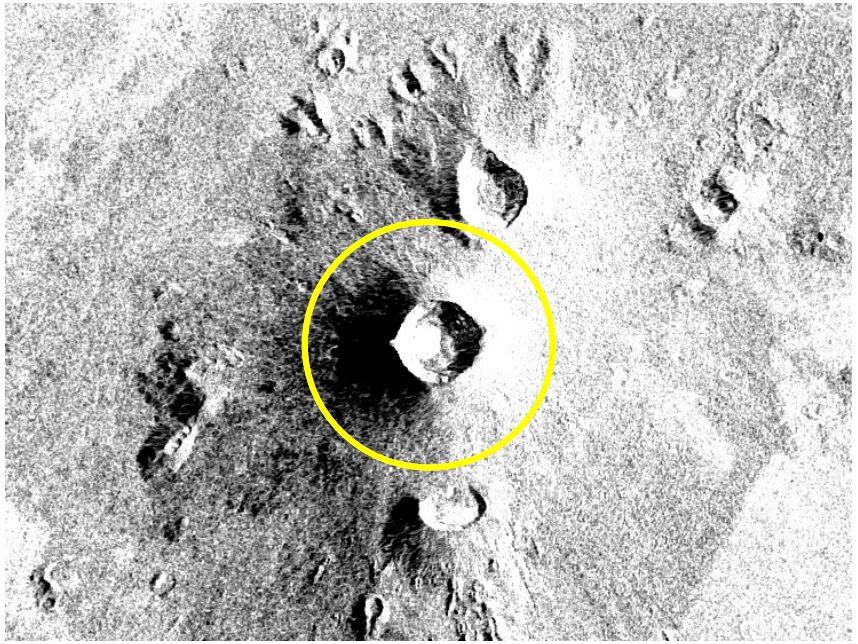
兩期影像相減結果(GRD-VV)

剛果尼拉貢戈火山案例

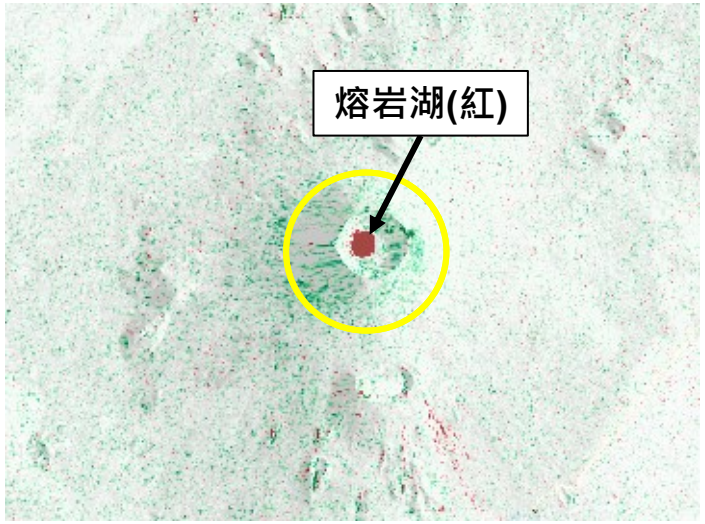
- 尼拉貢戈火山（Nyiragongo）是非洲最危險的火山。火山口深250米，擁有世界上少見的熔岩湖，其自1882年起已噴發至少35次。
- 2021年5月22日夜間，熔岩從山腰上的裂縫湧出。據美聯社報導，截至5月23日，造成15人遇難、逾170童失蹤。



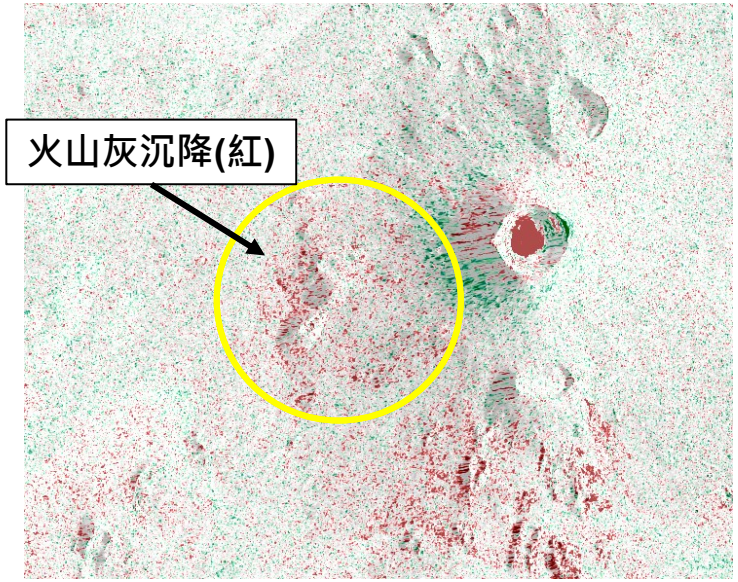
[災前] 2021/05/19_Sentinel-1降軌影像



[災後] 2021/05/25_Sentinel-1降軌影像



[災後] 2021/08/29_Sentinel-1降軌影像



兩期影像相減結果(GRD-VV)

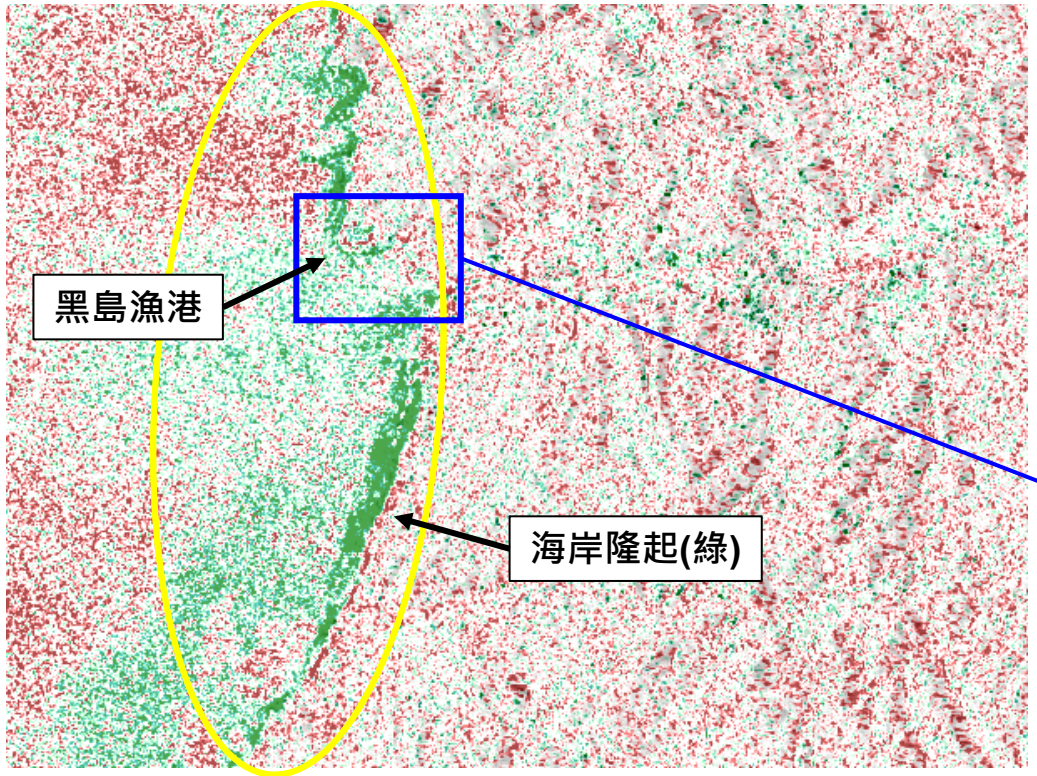
2024能登半島地震案例

[災前] 2023/07/03_Sentinel-1升軌影像

[災後] 2024/02/04_Sentinel-1升軌影像



- 2024年令和6年能登半島地震，是指2024年1月1日下午4時10分發生於日本石川縣能登半島的地震，其規模為7.6，最大震度7。
- 輪島市皆月灣一帶隆起約4m，海岸線向海中推進約200m。

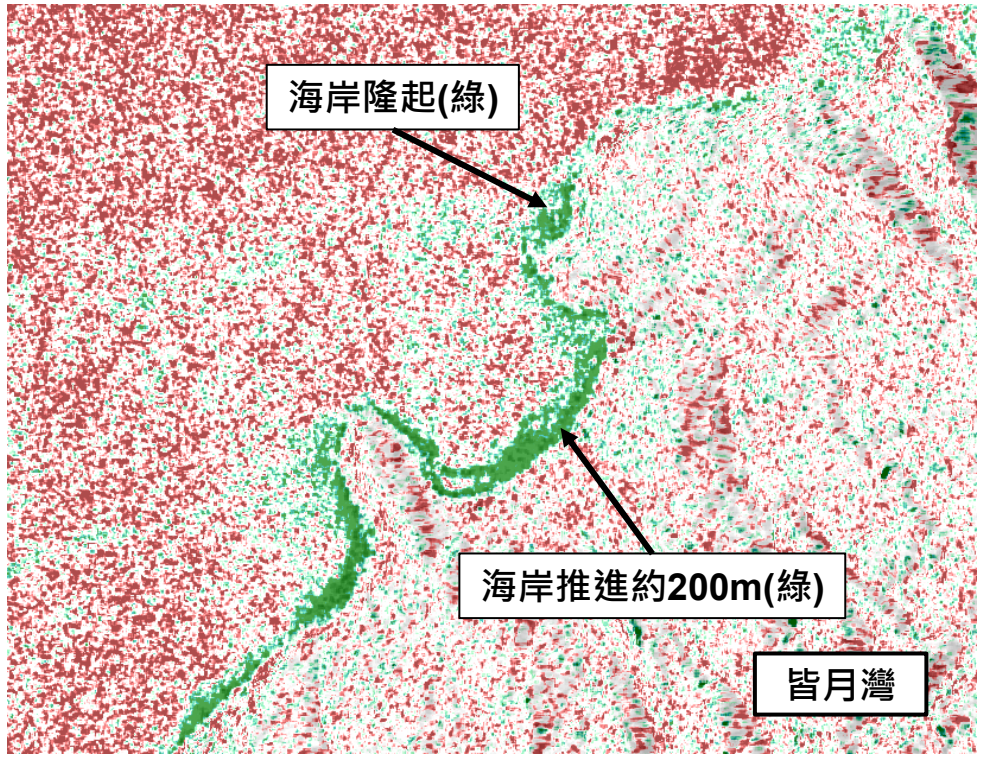


兩期影像相減結果(GRD-VV)





地震後海岸線隆起(國土地理院)

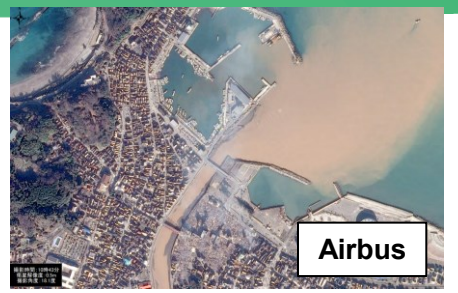


兩期影像相減結果(GRD-VV)

2024能登半島地震案例

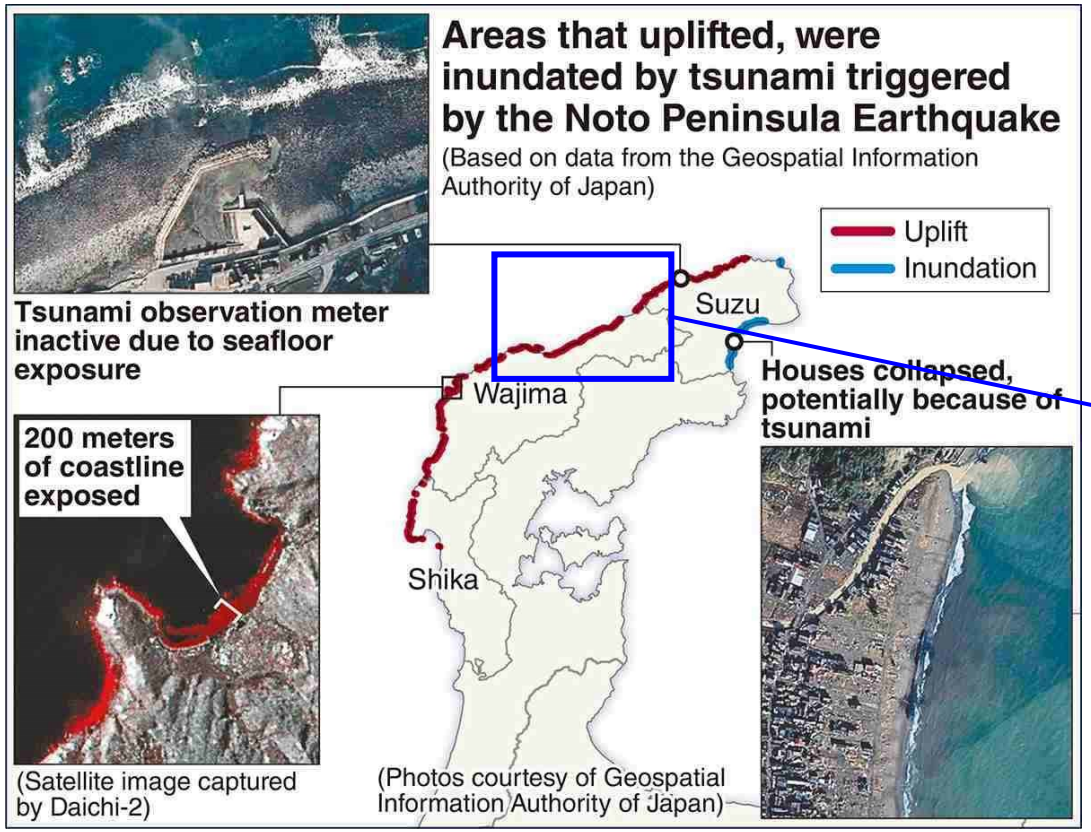
[災前] 2023/07/03_Sentinel-1升軌影像

[災後] 2024/02/04_Sentinel-1升軌影像

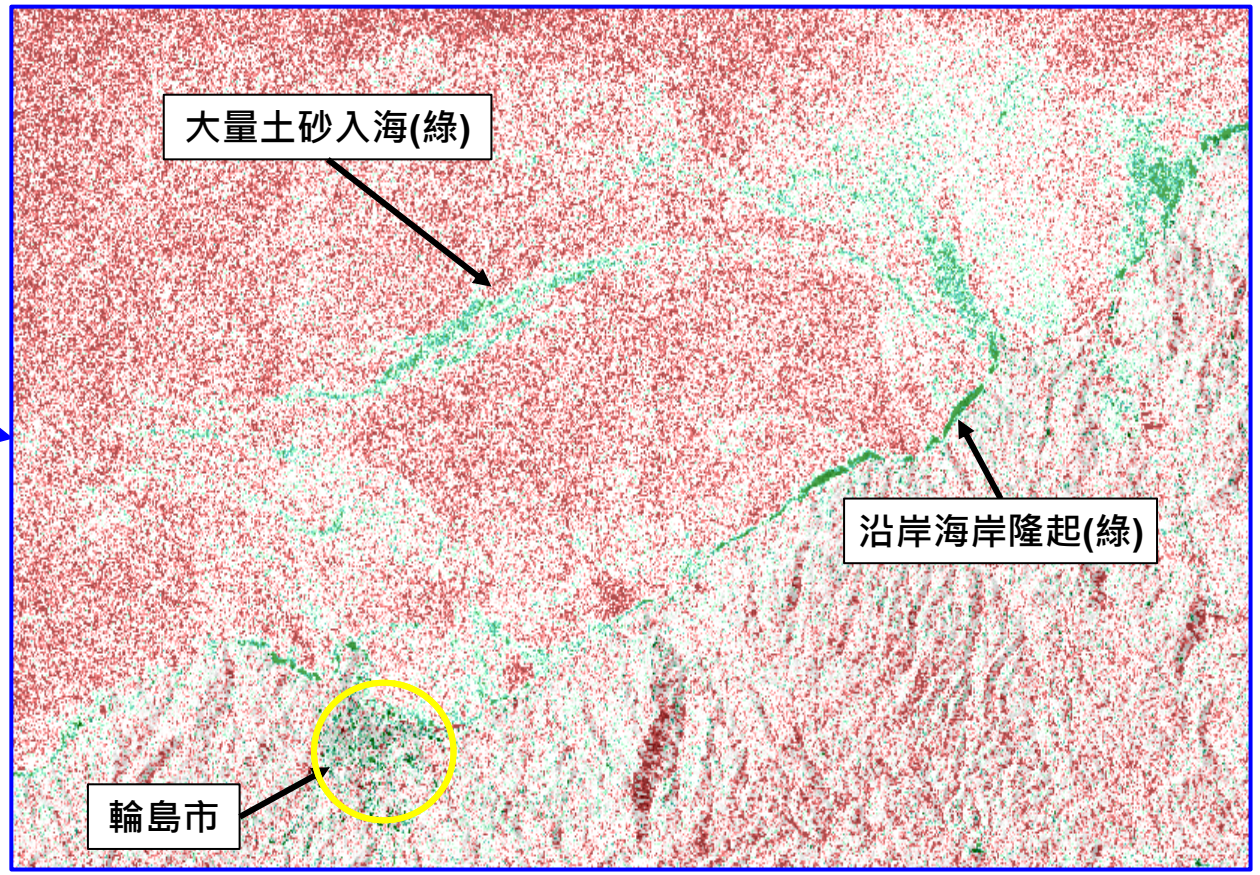


土砂入海提高海面背向散射

- 並且此次地震的位移主要集中在半島下方。最大的位移發生在石川縣輪島市，位移了約6m。
- 國土地理院分析衛星觀測數據，發現從珠洲市至志賀町的沿岸隆起露出水面，總長度約85km。



沿岸隆起情形(國土地理院)



兩期影像相減結果(GRD-VV)

結論

- 土砂災害發生後，使保全住戶或基礎設施受災等情況，與災前情形大幅改變，所伴隨的情況各有不同， SAR的散射會呈現不規則變化。
- 此方針是基於SAR的散射變化，蒐集近年來的災害案例，整理災害時的SAR散射變化的特徵，並歸納判讀土砂災害的調查要領及注意事項。
- 此方針希望推廣使用SAR圖像的土砂災害判讀技術，帶動發展在災害時利用SAR的相關技術。

參考文獻&相關連結

- 20180109 InSAR 在水土保持與坡地防災上之應用 (陳柔妃)
- 20181106應用合成孔徑雷達影像進行事件型崩塌地偵測(姜壽浩)
- The basics of satellite data — What it tells us, types, observation interval, resolution and use cases | Sorabatake
- ERS 雷達課程 (esa)
- What is Synthetic Aperture Radar? | Earthdata (nasa.gov)
- Hanssen, R. F. (2001). *Radar interferometry: data interpretation and error analysis* (Vol. 2). Springer Science & Business Media.

報告完畢
敬請指教

農業部農村發展及水土保持署
與您一起打拼