

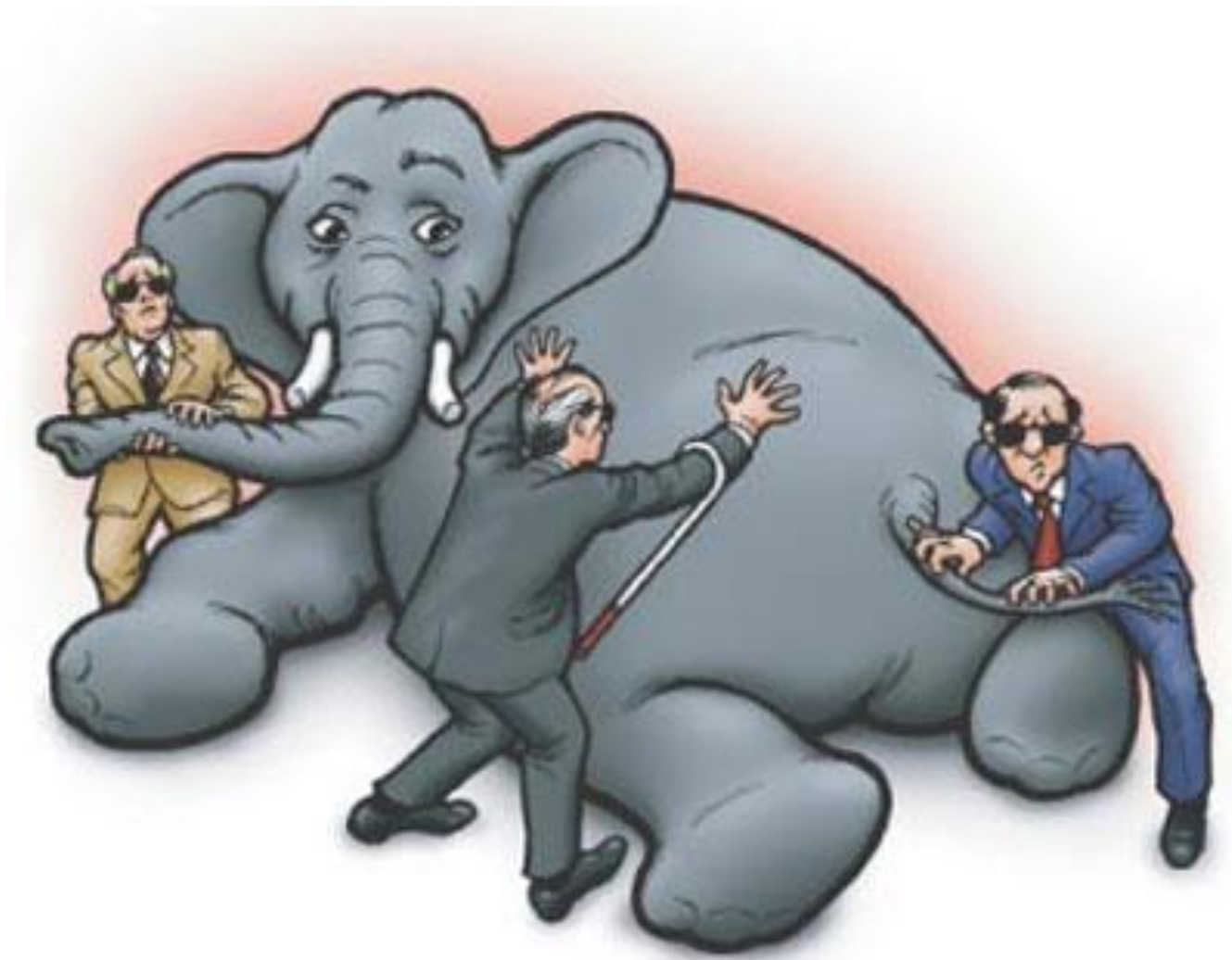
## 新興地質調查技術經驗分享會

# 空中重力磁力聯合探測於地熱探勘之應用

董倫道 / *ITRI-MCL SNFD team*

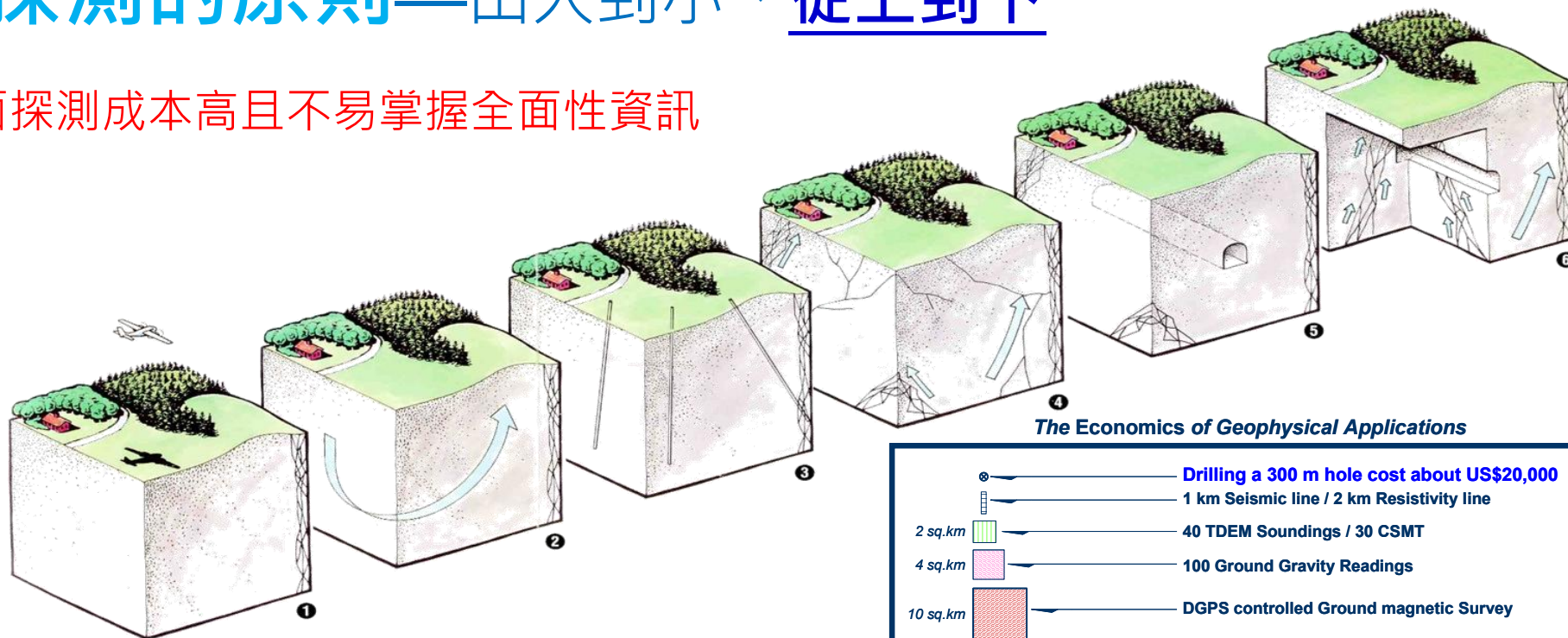
2025/10/31

# 如何避免落入瞎子摸象的窘境？

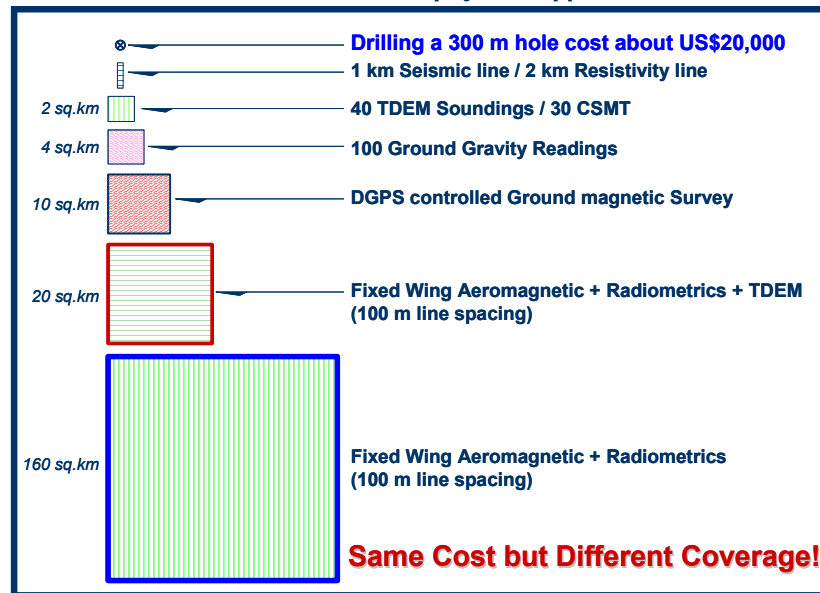


# 地質探測的原則—由大到小、從上到下

地面探測成本高且不易掌握全面性資訊



The Economics of Geophysical Applications



(report from Frank, 2000)

## 從空中探測的優勢：

- 施測時較不受地形、植被及人造設施影響
- 測點分布遠較地面調查均勻
- 施測效率遠大於地面調查
- 獲得高解析度圖幅

# OUTLINE

- 發展沿革
- 探測原理
- 調查流程
- 應用案例
- 經驗分享

*Background photo: aerial view of the Kueishantao.*



## 發展沿革 > 國際

- 1920年代：USGS首次嘗試以軍用DC-3定翼飛機進行磁力量測研究在探礦方面的潛力。
- 1940年代：第二次世界大戰期間，當時為軍事用途所開發用來偵測潛水艇的磁異常偵測技術，後來被改造應用於地質勘探。
- 1950年代：空中磁測技術成熟，開始在北美及歐洲進行大規模礦產探測。
- 1960年代：發展空中電磁技術，開始應用在礦產探勘和水資源探測領域。
- 1960年代：發展空中重力技術，主要運用在定翼機。直至約1990年代始有效運用於直升機。

## 發展沿革 > 國內

- 2006–2007：台電高放計畫首度將空中磁力技術引進國內，本國飛機，澳洲設備 / 處理 / 解釋。
- 2012：經濟部地調所引進三軸磁測拖鳥，收集 / 處理 / 解釋。
- 2021：經濟部地調所引進動態重力儀系統，測試 / 收集 / 處理 / 解釋。
- 2025：經濟部地調所試作空中MT。

## 發展沿革 > 幾種地質探測方法單位成本比較表

探測方法	單位成本	平均進度
空中磁測 (平地)	2~5 US\$/Km	2,000 ~ 3,000 Km/day
空中磁測 (山區)	10~40 US\$/Km	1,000 Km/day
陸上震測	800 US\$/Km	100 ~ 200 Km/day
海上震測	10,000 US\$/Km	10 ~ 20 Km/day
地質鑽探	10,000,000 US\$/hole	2 ~ 3 month/hole

(資料來源：澳洲AGSO, 2000)

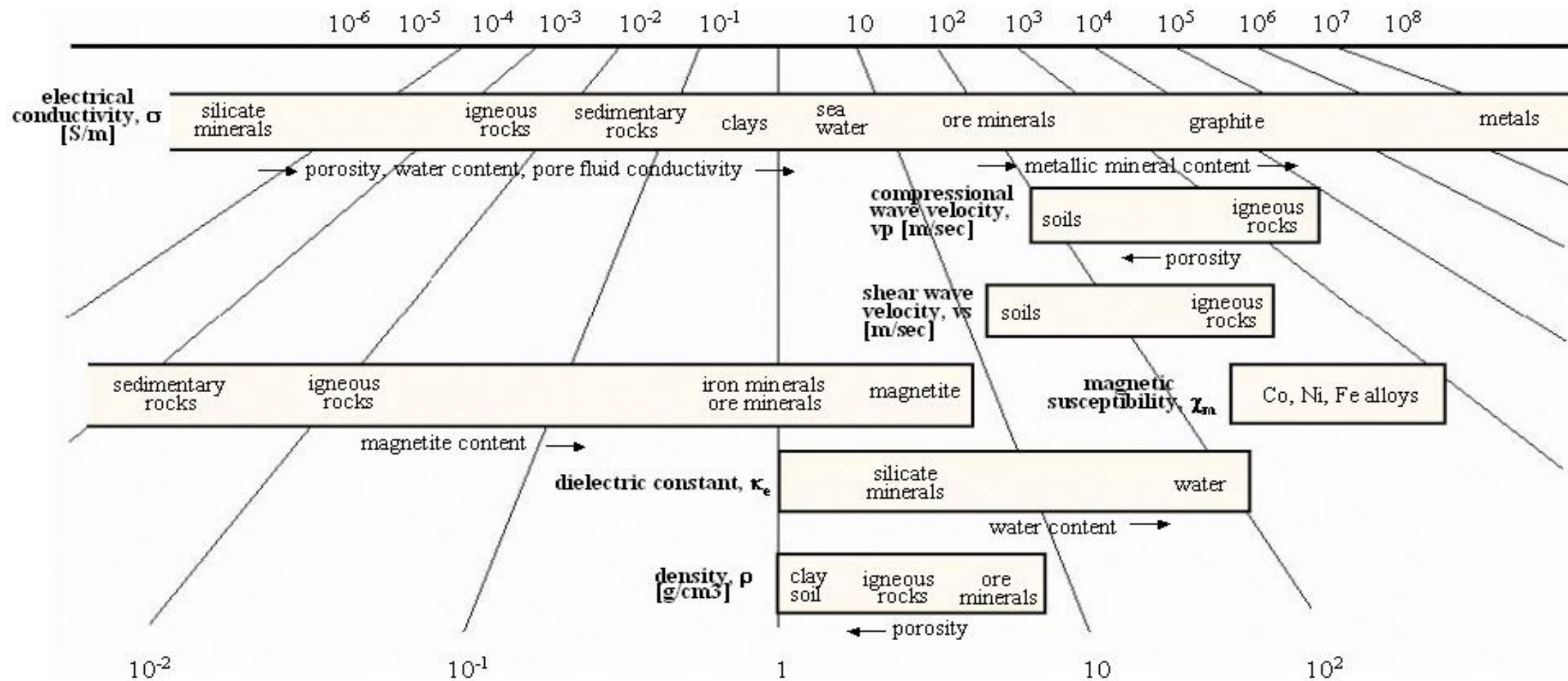
## 發展沿革 > 空中磁測技術的演變

測勘參數	1990年以前	2005	現在
測線間距	1,000 ~ 4,000 m	100~400 m	50-400 m
測點間距	150 ~ 300 m	7~15 m	5-15 m
飛行高度	80 ~ 1,500 m	60~80 m	30(1)-80 m
導航系統	100 m (radio)	5 m in height 2 m in horizontal	3 m in height 1 m in horizontal
磁力量測準確度	0.1 nT	0.01~0.001 nT	0.01~0.001 nT

( 資料來源：澳洲AGSO, 2000 )

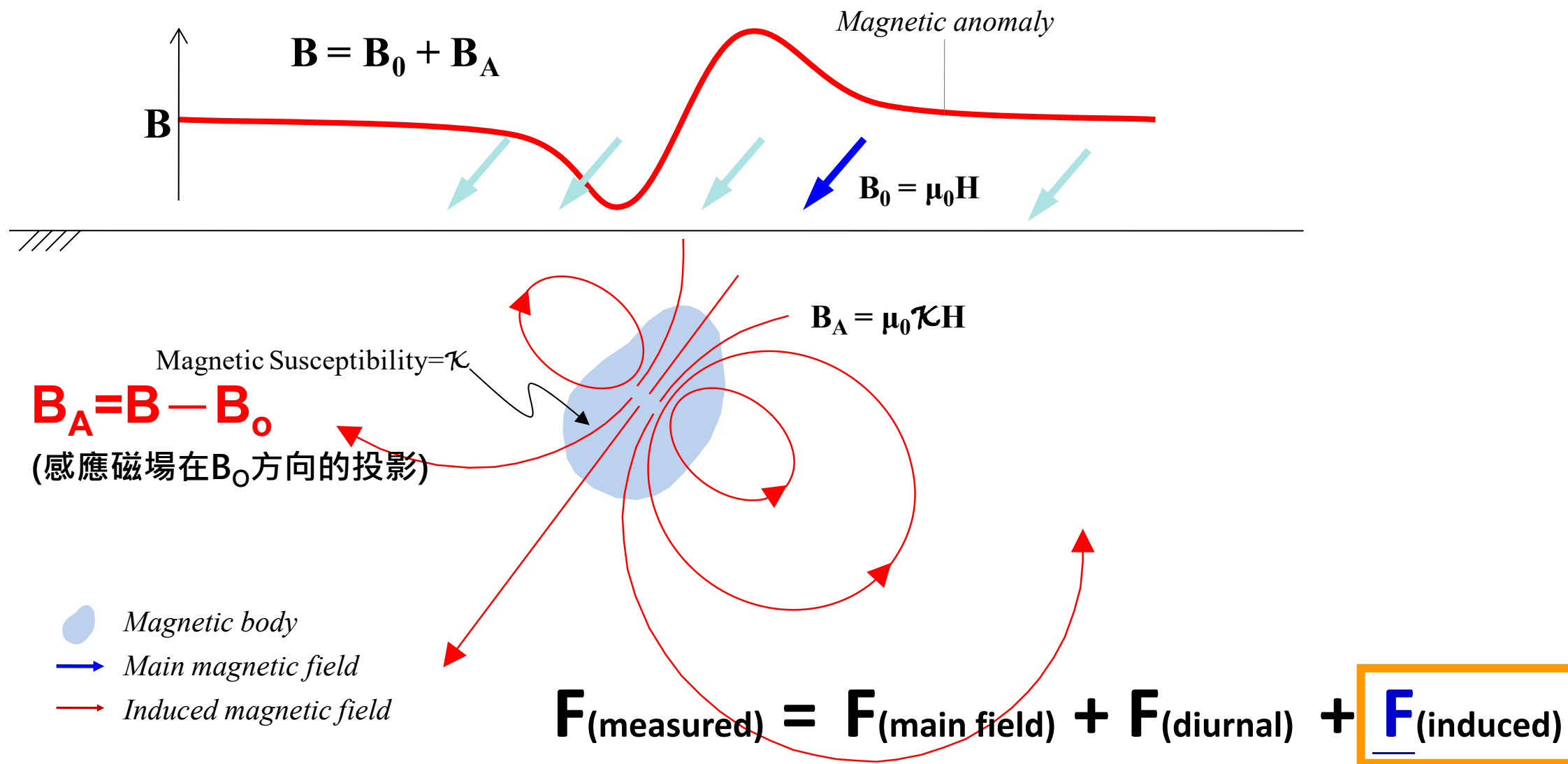


# 探測原理 > 地層的物理特性分布



(from [http://www.zonge.com/physical-property-lab-services/ore-minerals-physical-properties/proper\\_1.htm](http://www.zonge.com/physical-property-lab-services/ore-minerals-physical-properties/proper_1.htm))

# 探測原理 > 磁力法



# 探測原理 > 重力法



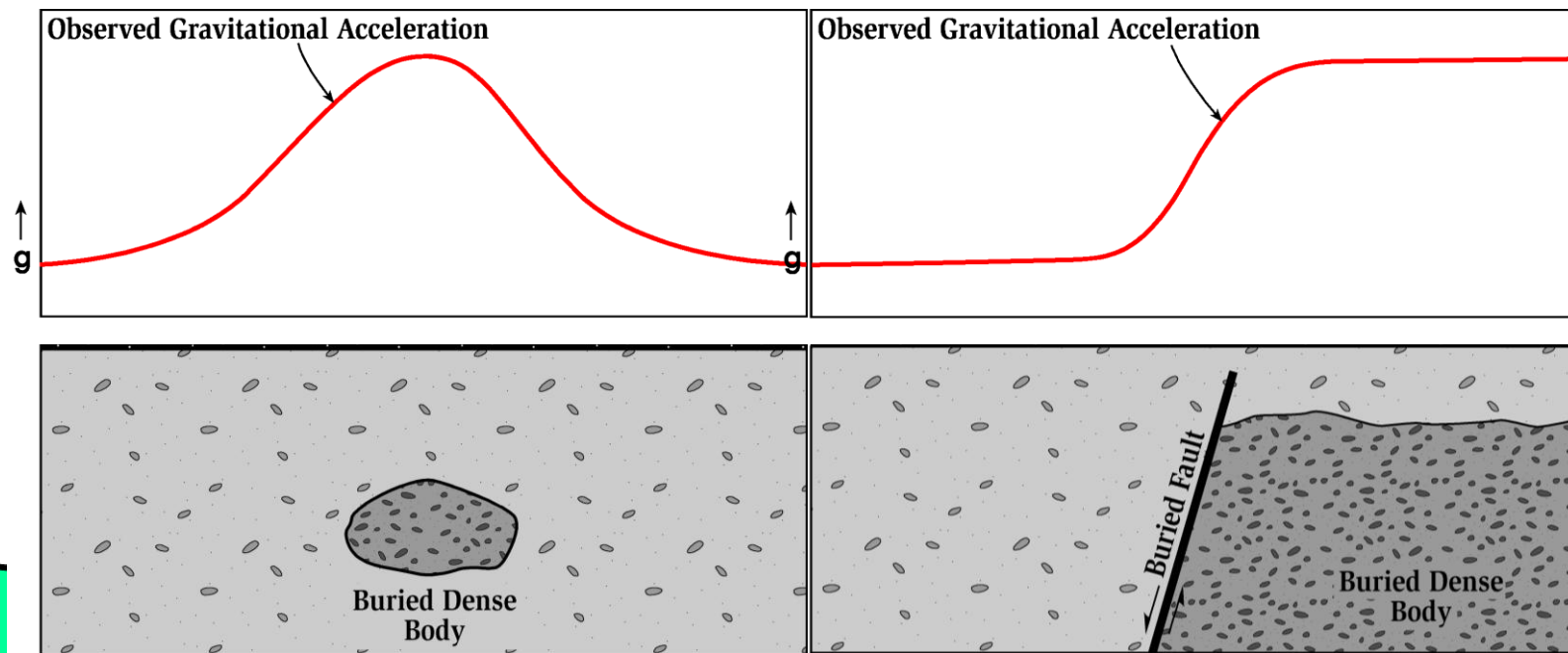
g

$$F = \frac{GMm}{r^2};$$

$$g = \frac{GM}{r^2} = \frac{GM}{R^2}$$



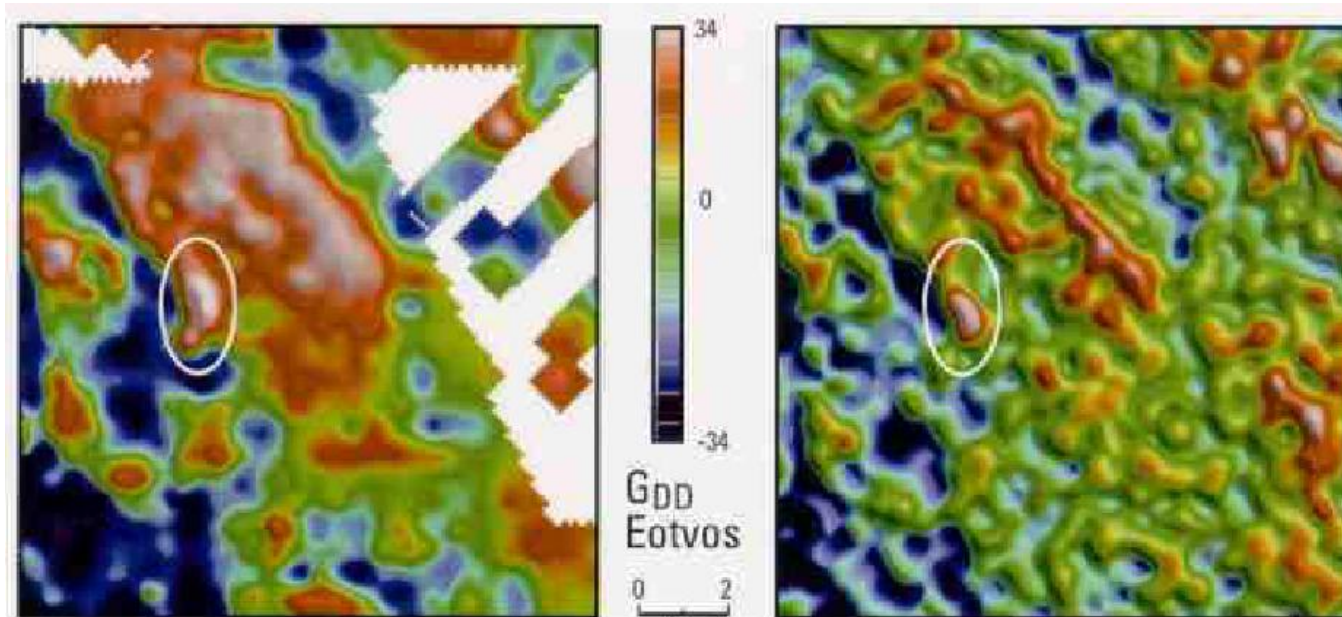
不同地點之重力受地層密度側向變化影響



## 探測原理 > 空中探測的優勢 > 高覆蓋率、高生產率

- 施測時不受地形及植被影響
- 測點分布遠較地面調查均勻
- 較不受人為建物干擾施測
- 施測效率遠大於地面調查
- 獲得高解析度圖幅

### Cannington silver-lead-zinc deposit in Queensland, Australia (Vertical Gravity Gradient Map)



#### Ground Gravity Survey

- took 4 to 5 months to collect
- poor coverage
- rough information

#### Airborne Gravity Survey

- **took 3 days to acquire**
- **well coverage**
- **more detailed information**





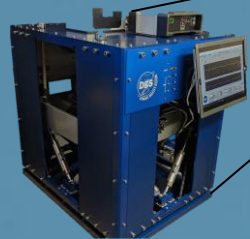
# 調查流程 > Equipment

## Acquisition/Navigation



**BK-117**

Air speed 70–90 Nm/hr



**Dynamic Gravimeter**

30 m cable



*Single sensor*

**Base mag. St.**



**GPS ref. st.**



**Fuel support**

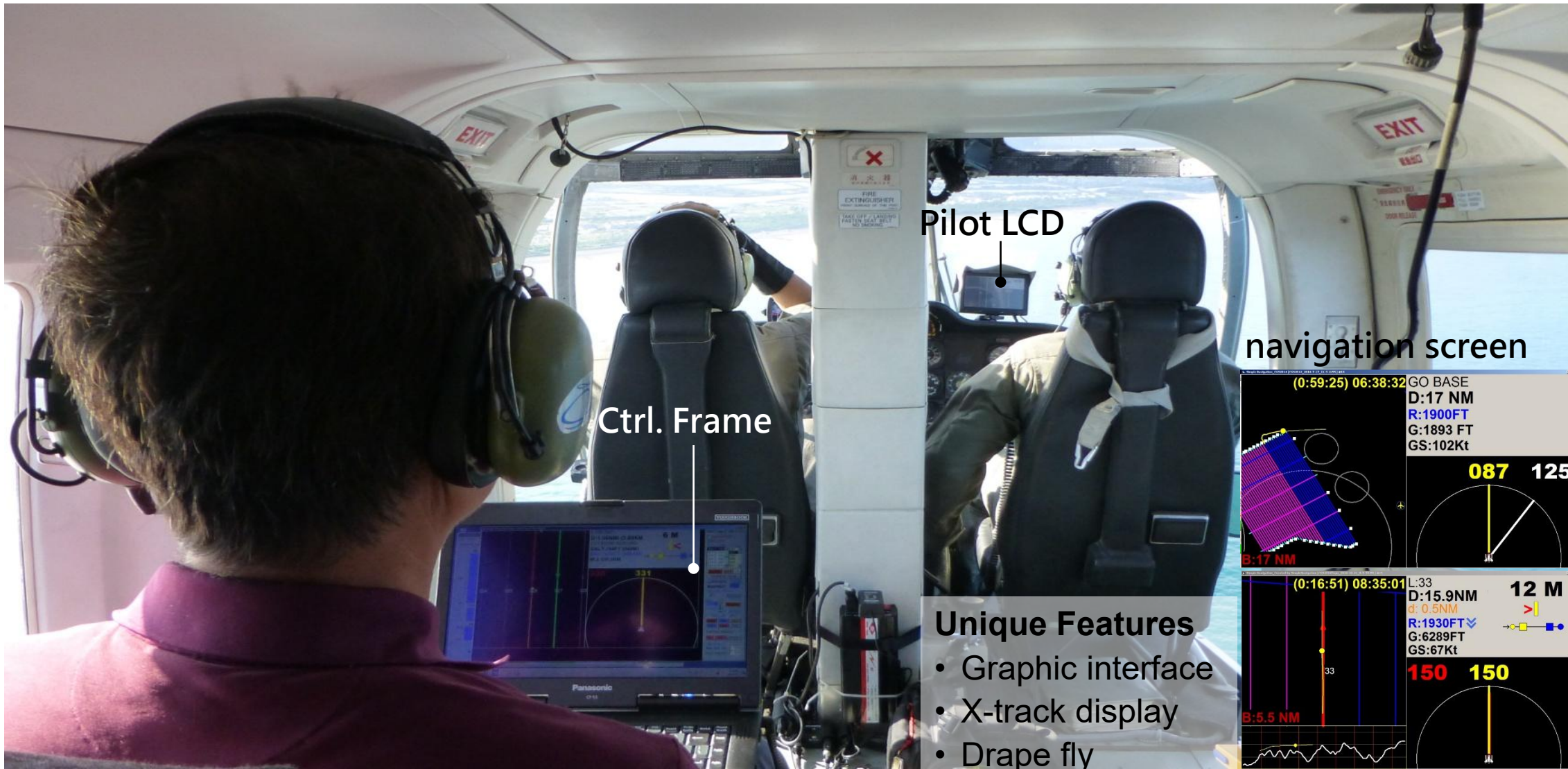


- Mag. Sensor × 3
- VLF-EM × 2
- Radar altimeter
- IMU
- GPS

**Towed Bird**

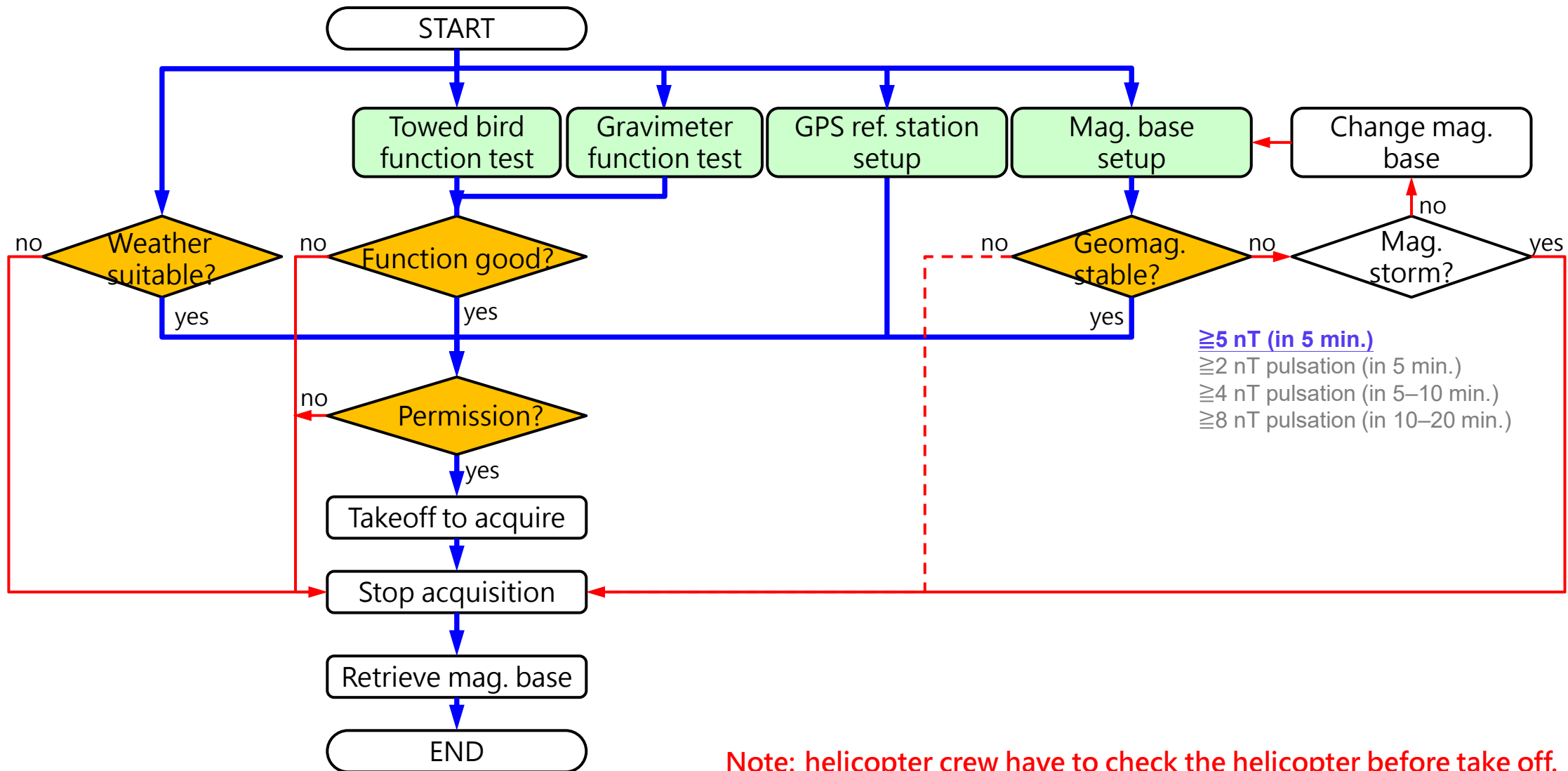


# 調查流程 > Navigation



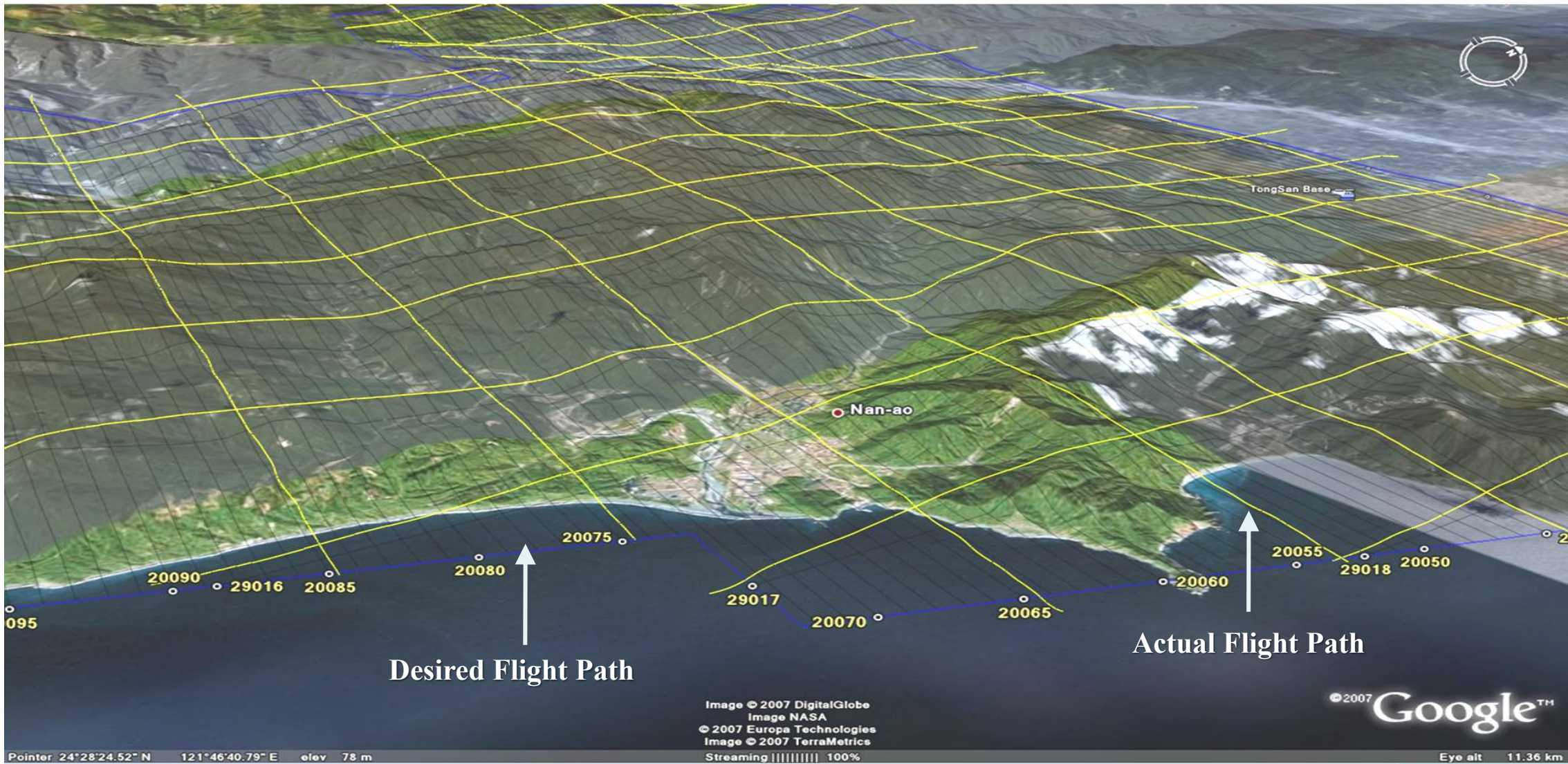


# 調查流程 > Daily Working Flow



**Note: helicopter crew have to check the helicopter before take off.**

# 調查流程 > Drape Fly



Desired Flight Path

Actual Flight Path

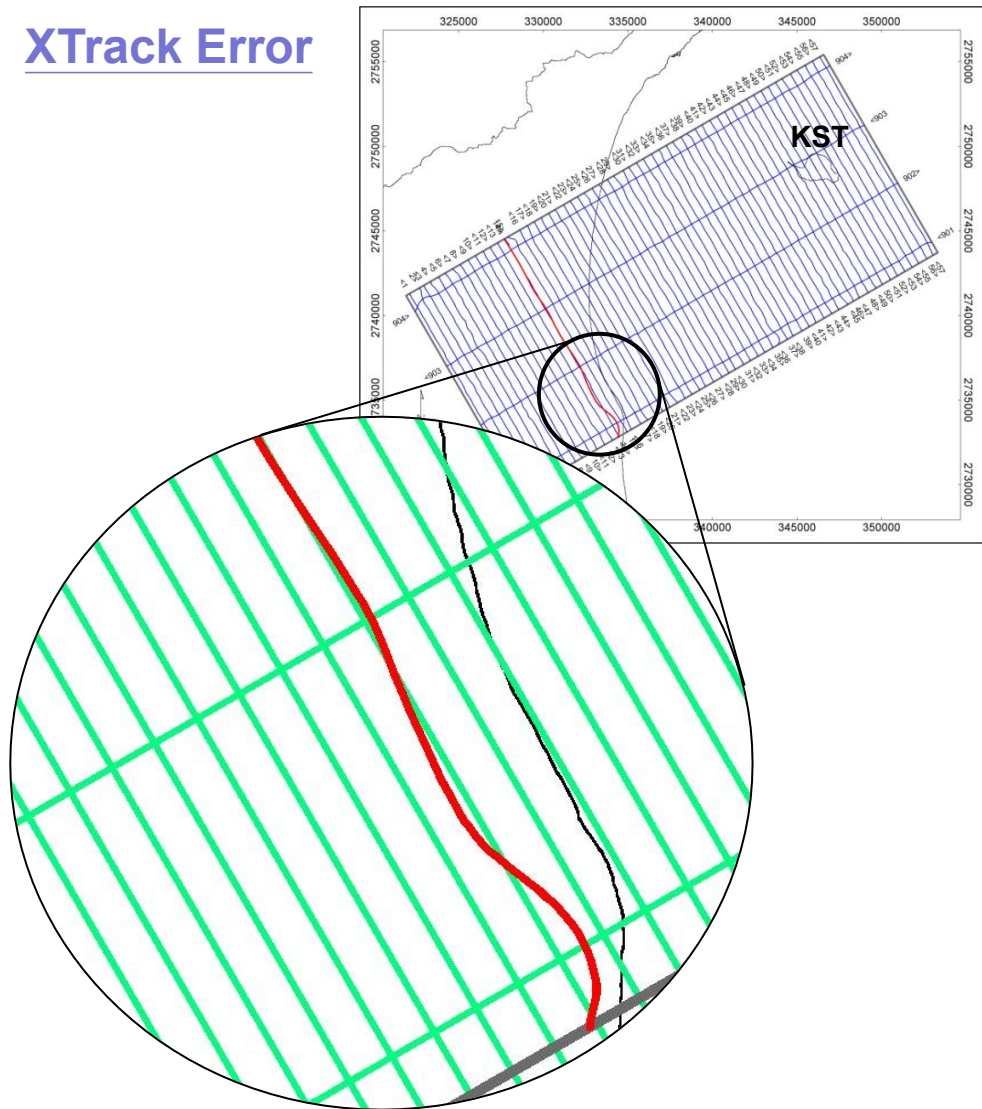
Image © 2007 DigitalGlobe  
Image NASA  
© 2007 Europa Technologies  
Image © 2007 TerraMetrics  
Streaming ||| 100%

©2007 Google™



# 調查流程 > QC

## XTrack Error

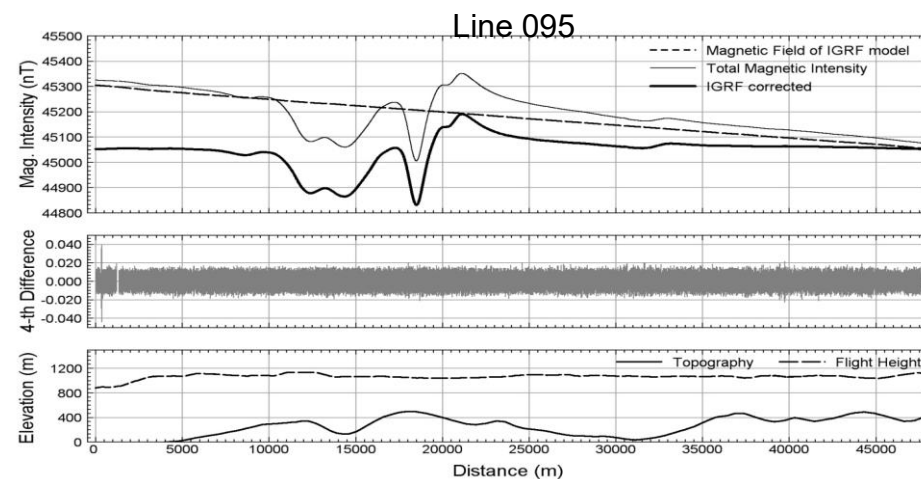


## Noise Level

### Grade of Noise Level for Survey Line

Grade	Criterion
Level 1	$\leq 0.08 \text{ nT}$
Level 2	$0.08 \text{ nT} < \leq 0.14 \text{ nT}$
Level 3	$0.14 \text{ nT} < \leq 0.20 \text{ nT}$
Level 4	$> 0.20 \text{ nT}$

(from DZ/T 0142-2010, 2010)





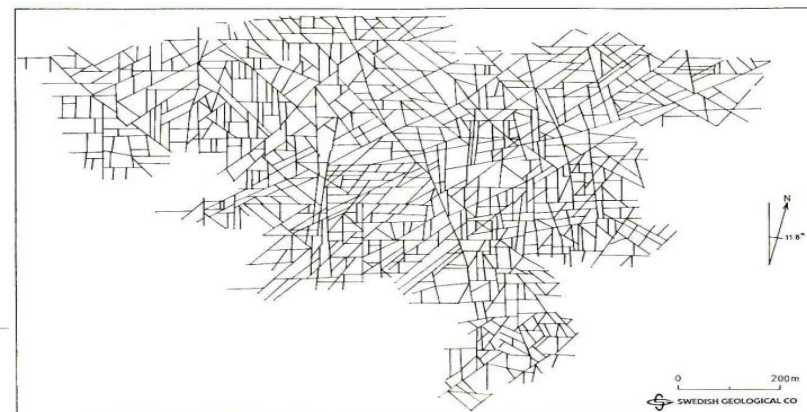
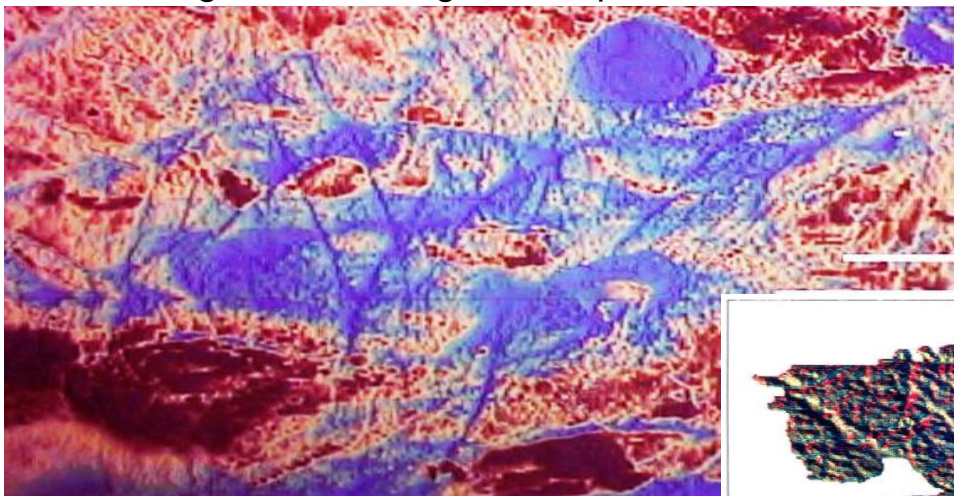
# 調查流程 > 作業影片



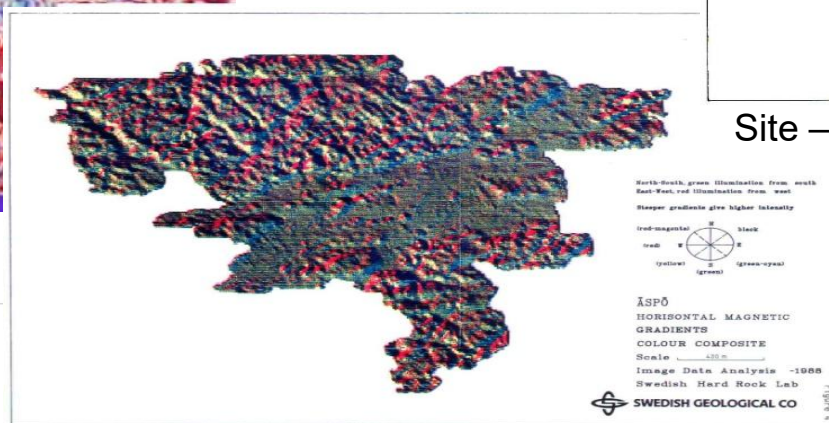


# 應用案例 > 瑞典核廢料場址篩選 (Aspo Underground Research Laboratory, URL)

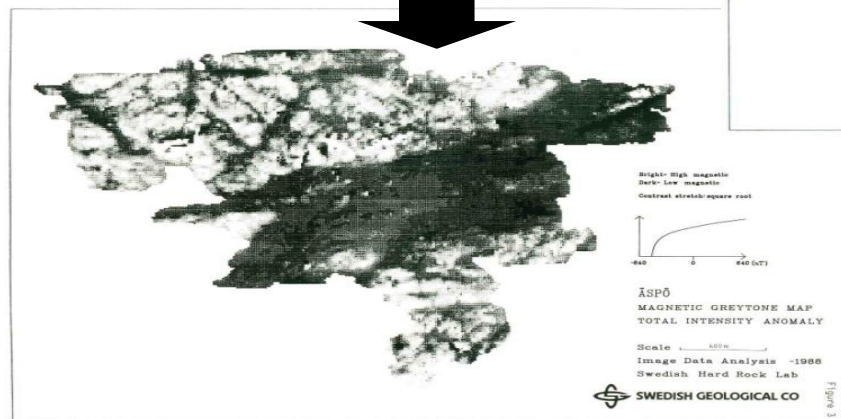
Regional AeroMagnetic Map



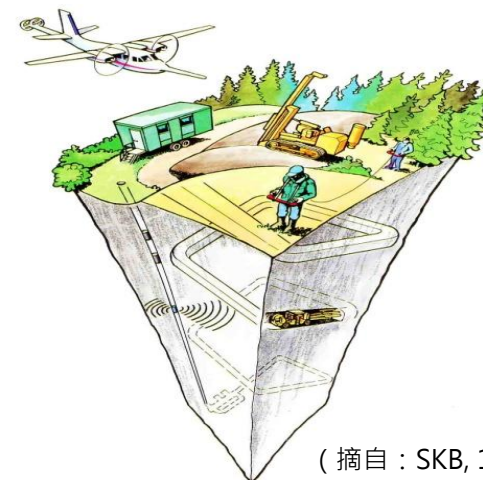
Site - Fracture Distribution from Magnetic Map



Site - Horizontal Magnetic Map



Site - Total Magnetic Intensity Map

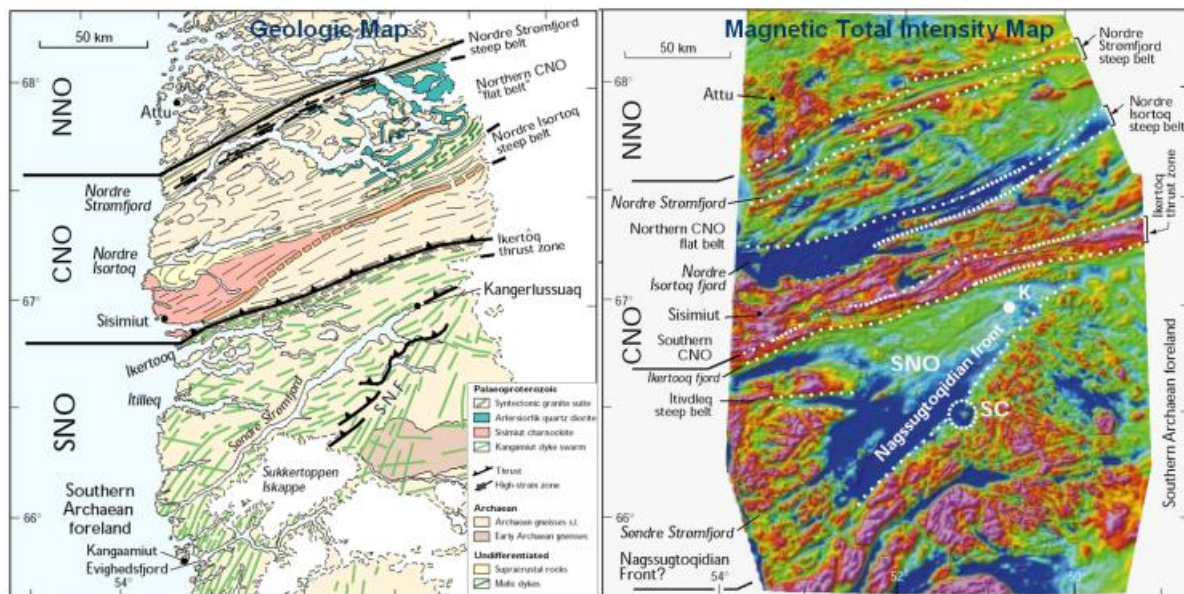


( 摘自 : SKB, 1988 )



# 應用案例 > 地質與礦產探測

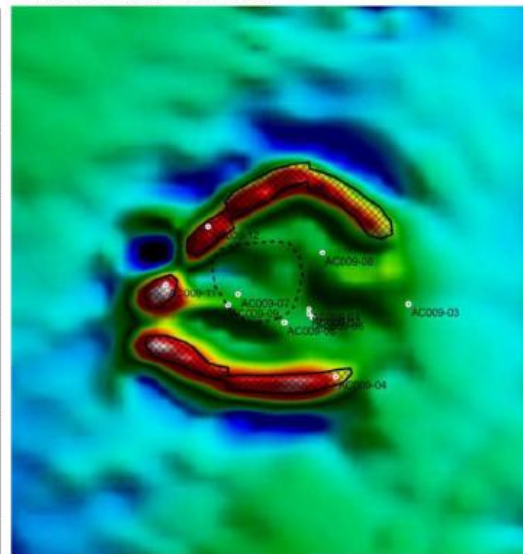
### Aeromagnetic survey in southern West Greenland (1999)



區域地質探測

### (a) Helicopter Magnetic VD1

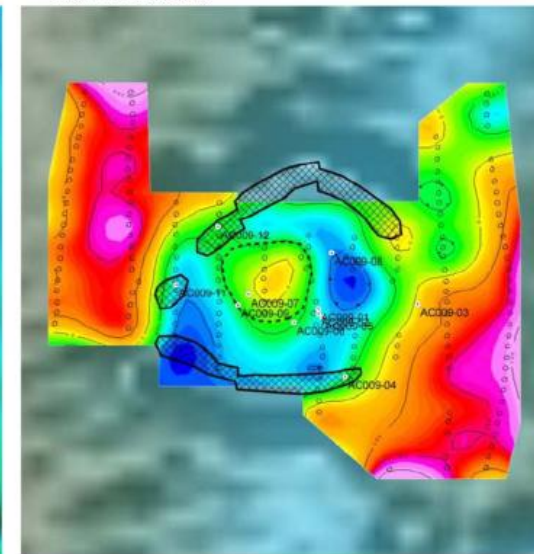
reduced to the pole, 1° trend removed



represents ~10nT magnetic high

### (b) Bouguer Gravity VD1

2.0g/cc reduction density



represents a 0.2mGal gravity low

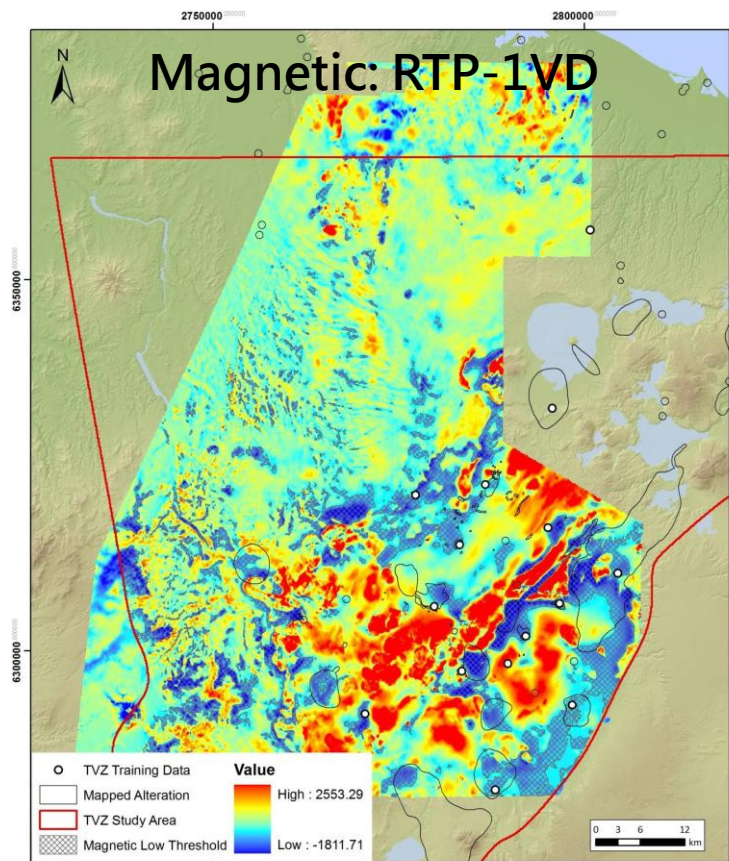
Kimberlite探測



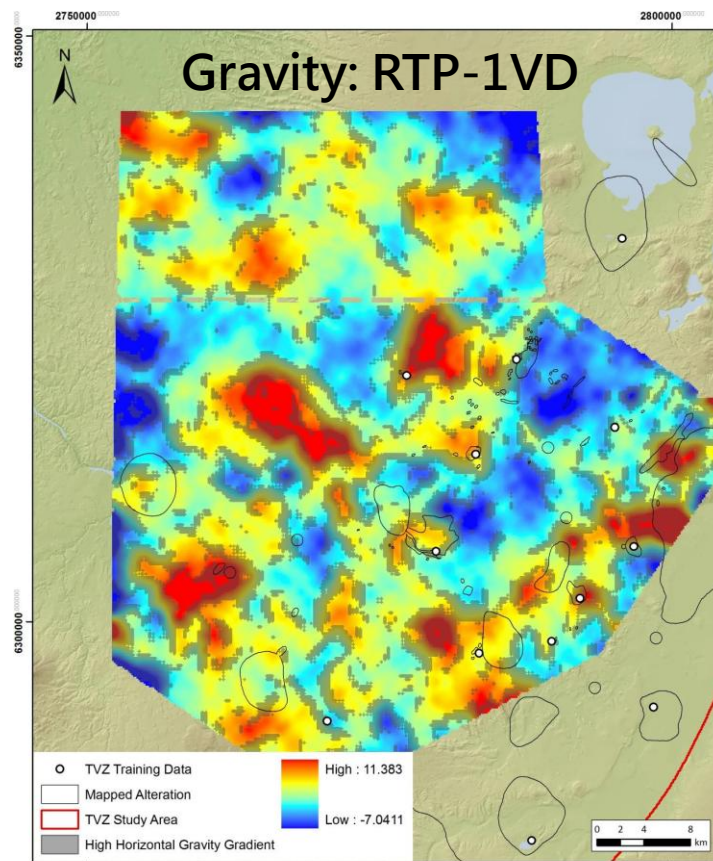
## 應用案例 > 空中磁力/重力探測在地熱探勘方面的貢獻

	空中磁力	空中重力
構造識別	斷層、岩脈、火山環構造	裂谷、陷落構造
岩體性質	磁化率變化 → 岩性分類	密度分佈 → 岩層厚度
熱源判斷	岩漿侵入帶	低密度熱液圈

# 應用案例 > Taupō Volcanic Zone, New Zealand



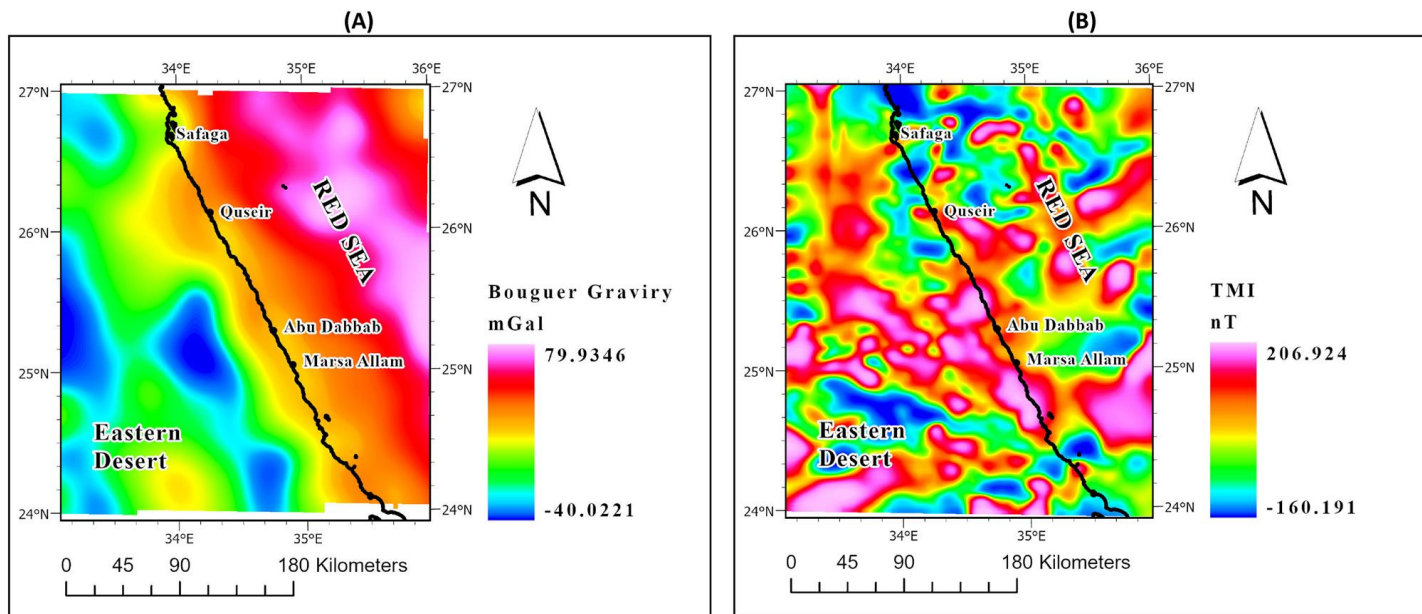
*Areas of mapped surface alteration correspond well to areas of magnetic lows.*



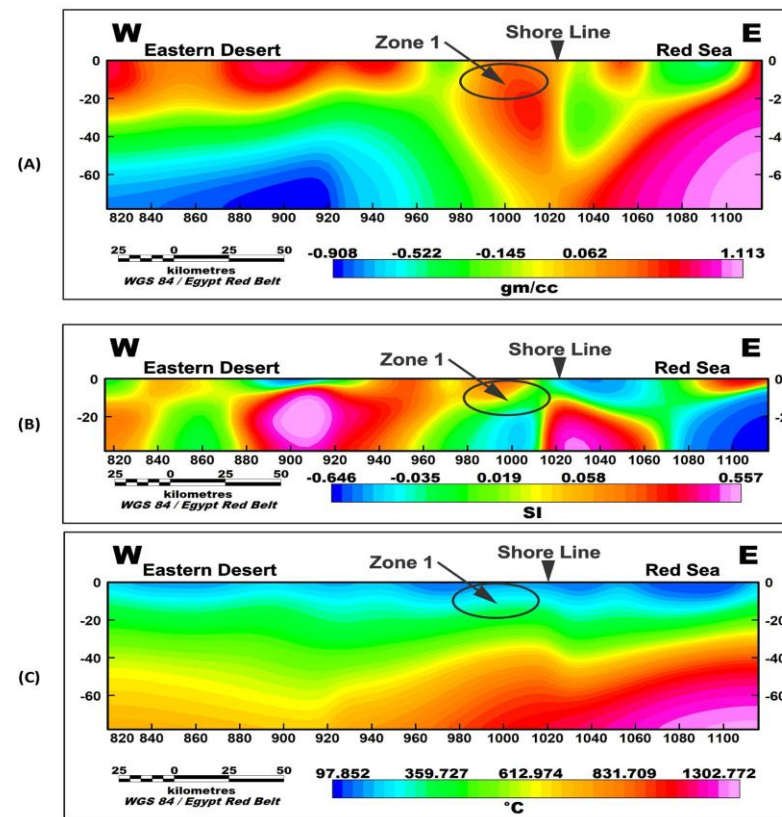
*A number of areas of mapped surface alteration correspond well to high horizontal gravity gradient*

*From: Payne et al. (2014) Taupō Volcanic Zone / New Zealand studies,*

# 應用案例 > Taupō Volcanic Zone, New Zealand



(A) Bouguer gravity map, (B) Total magnetic (TMI) map of the study area.

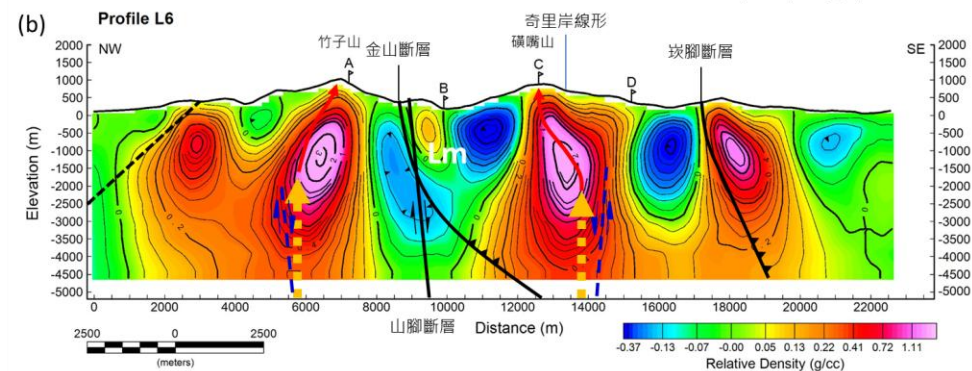
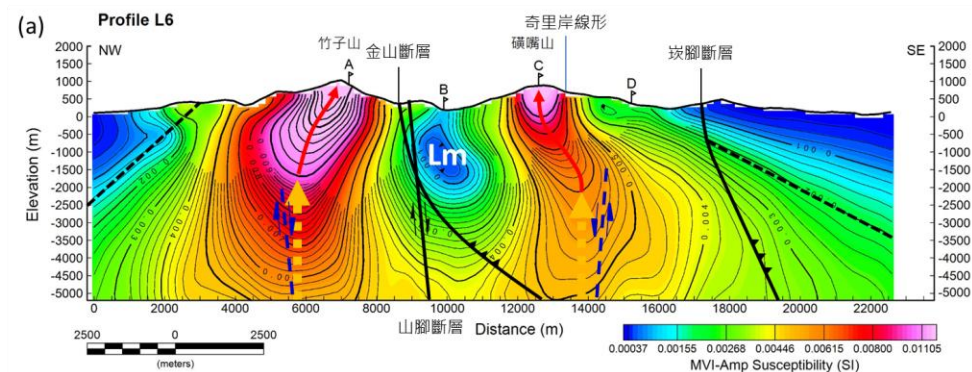
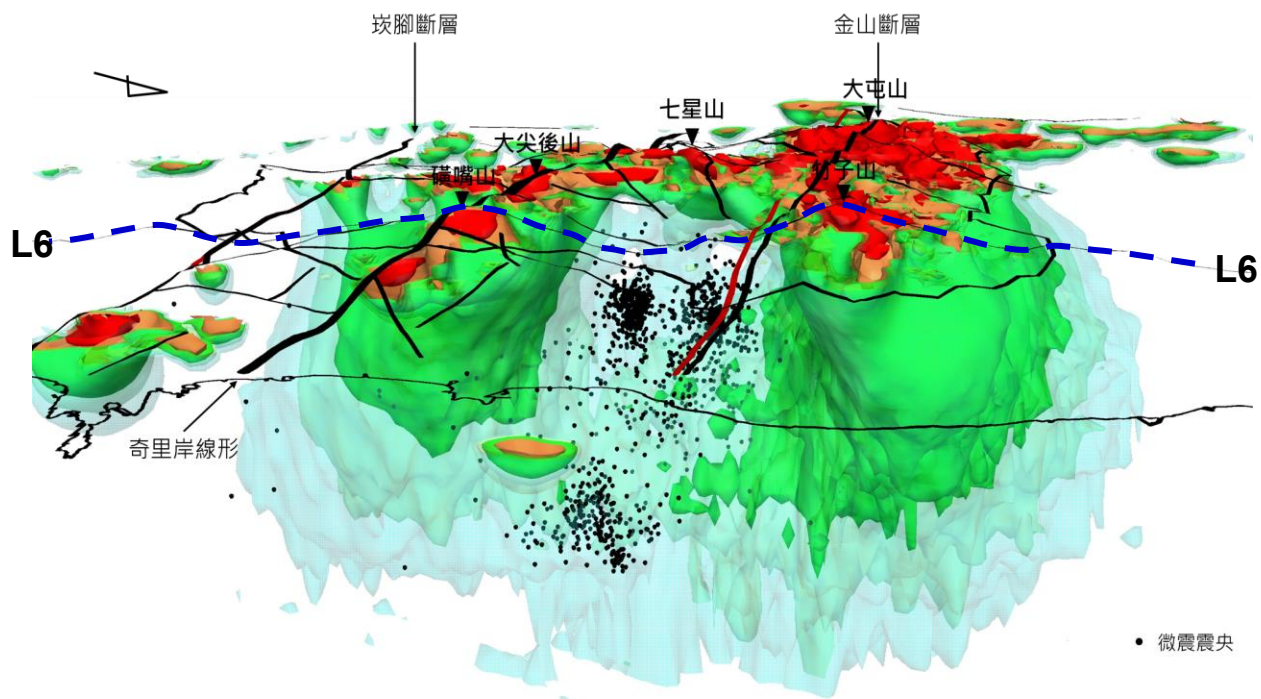


(A) Gravity inversion profile; (B) magnetic inversion profile, and (C) temperature profile.

From: Gaber et al. (2024), 3D Gravity and magnetic inversion modelling for geothermal assessment and temperature modelling in the central eastern desert and Red Sea, Egypt



# 應用案例 > 大屯火山區



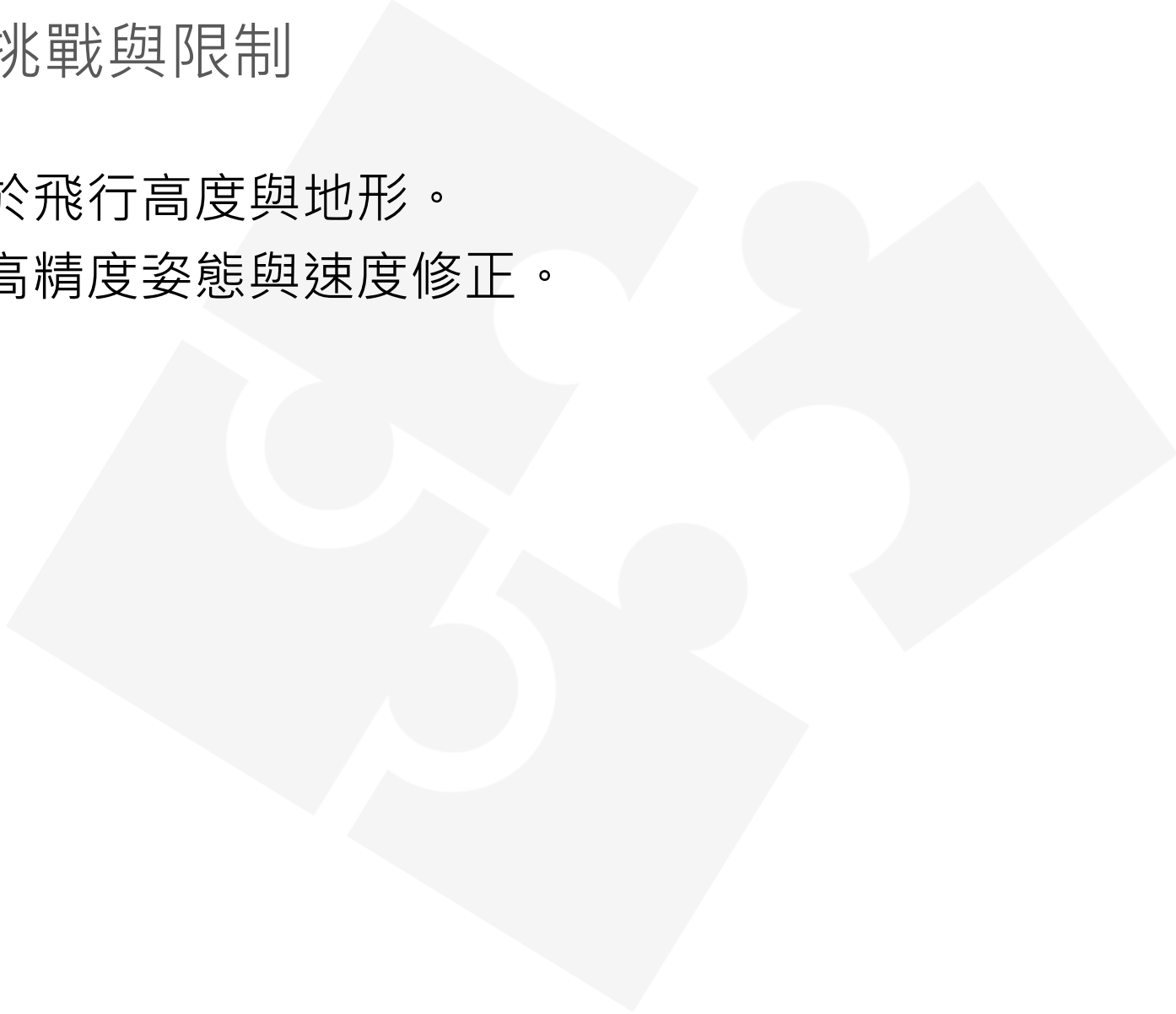
## 經驗分享 > 結論

- 聯合空中磁力與重力調查地熱探勘早期階段的有效工具之一。
- 可提供構造界定、熱水儲集層與潛在熱源位置等資訊，降低地熱開發風險。
- 實證案例顯示，聯合多種方法能顯著提升鑽井命中率與地熱概念模型理解度。



## 經驗分享 > 挑戰與限制

- 解析度受限於飛行高度與地形。
- 重力資料需高精度姿態與速度修正。





## 經驗分享 > 未來發展趨勢

- 使用無人機降低飛行高度與測線間距。
- 使用更高解析度的感測器 (例：量子重力儀)。
- 結合 AI 進行自動解釋與異常分類。
- 地電阻 (MT) / 地震 / 重力 / 磁力 併合逆推。

定翼機



單軸、多軸旋翼機



# *Sustainable - Renewable - Clean*

## *Thank you for your attention.*

*Background photo: Good morning, Chishang Taitung*