

台灣北部火成岩體及地質構造空中地球物理探測

The Airborne Geophysical Survey of Igneous Bodies and Geological Structures in Northeast Taiwan

主管單位：經濟部中央地質調查所

董倫道¹、林蔚¹、李柏村²、張碩芳²、李錦發²
Tong, Lun-Tao¹, Lin, Wayne¹, Lee, Po-Tsun², Chang, Shou-Fang², Lee, Jin-Fa²

¹財團法人工業技術研究院

²經濟部中央地質調查所

摘要

為了掌握台灣東北部地區深部地質構造及火山活動特性，本計畫主要任務為建立我國空中磁力及甚低頻電磁探測技術，並應用於宜蘭陸海域之火山及地質探測，提供調查區域內有關潛在岩漿庫分布範圍及區域地質構造資訊。

本計畫首度完成了宜蘭陸海域空中地球物理探測，測線總長度為 5,723 km，涵蓋面積 2,607 km²，產出網格間距為 100 公尺之全磁力強度網格及 VLF 異常網格，供分析龜山島的火山地質，以及中央山脈北端至宜蘭陸海域的基盤地質構造。

VLF 同相位分量訊號強度能反應地層電性特徵，與已知的地層邊界與主要構造線位置吻合，故由 VLF 圖幅能提供進一步有關岩體分布、地質構造及含水破裂帶分布等資訊。由磁力異常圖上辨認出 3 個顯著條帶磁力高區及 6 組主要磁力線形特徵，可對比火山岩、高磁基盤及斷層構造。宜蘭平原中央之東西向高磁力基盤之南北兩側，分別與濁水斷層及坑四斷層有關，本計畫推論該磁力基盤可能不是侵入岩脈，而是在大南澳片岩拼貼回歐亞大陸邊緣時，殘留的海洋地殼殘塊，並有可能往外海延伸至琉球島弧基盤。龜山島火山岩內圓形低磁區解釋為火山口，共有三處，其中一處位於龜山島之龜首，另兩處位於龜山島東北方，暗示龜山島火山活動持續地自東北向西南方向遷移。依三維逆推所獲得的三維磁感率模型，由巨觀角度推測龜山島鄰近地區之居里溫度約 5 km，調查範圍內中間的東西向高磁性岩體，其居里深度約介於 15–20 km 間。若不考慮前述帶狀高磁性岩體及龜山島火山岩漿庫的影響，估計調查範圍的平均居里深度約介於 10–15 公里之間。通過以龜山島火山的環狀及放射狀岩脈群，與環狀陷落構造區的斷層帶，將提供火山源地熱流體的新通道，不僅可能通過宜蘭平原，甚至遠達清水地熱區。

關鍵詞：空中地球物理、空中磁力探測、空中甚低頻電磁探測、火山地質、宜蘭地區、龜山島火山

Abstract

To understand deep geological structure and volcanic characteristics in northeast Taiwan area, the purpose of this project is to apply helicopter-borne magnetic and very low frequency electromagnetic (VLF-EM) techniques over Yilan land and maritime areas for volcanic and geological surveying to obtain distribution information of potential magma chamber as well as hydrothermal pathways along regional geological structures.

An airborne geophysical survey in Yilan area has first been completed in this project. The total length of survey lines is 5723 km covers an area of 2607 km². The total magnetic intensity (TMI) grid and VLF anomaly grid with 100 m spacing had been delivered to provide an new insight into the activity of the Kueishantao volcano as well as distribution of the basement around the northern tip of the Central Range Belt, Yilan plain and maritime areas.

The VLF in-phase strength can be related to the geoelectric property of the ground. The VLF in-phase anomaly map is coincident with the existing formation boundaries and geological structures, which implies that the distribution of rocks, geological structures, and distribution of water-berried fractures can be obtained from the VLF anomaly maps. Three obvious high-magnetic zones and six major magnetic lineations can be observed in the magnetic anomaly maps, which can be associated with the volcanic rocks, high-magnetic basement, and faults. The EW high-magnetic basement in the central of the Yilan plain is coincident with the ZhuoShui and KenSi faults on the southern and northern sides, which implies that the magnetic basement may not be associated with the intrusive dike. It is suggested that the high-magnetic basement may be the remnant oceanic plate occurred when the Tananao silt pushes back to the Eurasian Plate, and it may extent to the basement of the Ryukyu Arc. Three circle-like low-magnetic anomalies in the high-magnetic zone of Kueishantao volcanic rocks are interpreted as the volcanic crater. One of them is located at the Turtle-head of the Kueishantao and another two are located on the NE of the Kueishantao, which implies that the volcanic activities of the Kueishantao are continuously migrated from NE to SW. Based on the 3D magnetic susceptibility model obtained from 3D inversion of the magnetic dataset, from macro point of view, the estimated Curie depth is approximately 5 km around Kueishantao, and is between 15 and 20 km for the EW high-magnetic basement in the central of the Yilan plain. The Curie depth will be between 10 and 15 km in the survey area if the effect of Kueishantao and the EW magnetic basement do not take in account. Nevertheless, the ring and radiating dike swarms, as well as faults associated with formation of the subsident caldera around the Kueishantao volcanic region, cause new pathways for migration of volcanic hydrothermal fluids from the Kueishantao volcano to all over the Yilan plain and the Chinshui geothermal field.

Keywords: airborne geophysics, helicopter-borne magnetic survey, helicopter-borne very low frequency EM survey, volcanic geology, Yilan area, Kueishantao volcanism.

一、前言

臺灣北部火山地區位於山區及海域，一般調查方法成本高且不易獲得全面性的瞭解，由於火成岩中鐵、鎂等金屬礦物含量較高，故具有強烈的磁性反應，有助於應用磁力法(magnetic method)探測火成岩體的分布。空中磁力測勘(airborne magnetic survey)是一項已經發展相當成熟的技術，因施測較不受地形、地物的限制，故能獲得均勻的測點分布，提高資料解析的可靠性，在國外已經廣泛應用在區域地質調查、探礦及火山監測(Ueda, 2007; Okuma et al., 2009)等領域。

本計畫分 2 年執行，第一年計畫主要任務為建立我國自主的空中磁力與甚低頻電磁探測技術能力，主要工作為設備購置、人員訓練與測試飛行。第二年計畫主要任務為完成臺灣北部蘭陽平原及其鄰近陸海域地區之空中磁力與甚低頻電磁探測，並解析潛在火山分布與地質構造。

二、研究方法

2.1 磁力法

岩層因磁性礦物含量差異，而具有不同的磁感率(magnetic susceptibility)，具磁力特性的地層可視為磁體；在地球磁場作用下，不同深度的磁體會各自感應出不同程度的感應磁場(induced magnetic field)，所有地層的感應磁場與地球磁場的向量合，形成複雜但反映地層特性的磁場。透過精密磁力感測器，量測空間中各點的磁場強度(圖 1)，經過資料修正與處理等程序，能藉以解析地下磁體的位置，進一步做為岩性分布與構造解釋的依據

2.2 甚低頻電磁法

美國等國家為了軍事用途而設立的強大無線電發射電台，這些電台定期發射大功率且固定頻率的無線電波，其頻率範圍約介於 15.1 KHz 至 19.6 KHz 間。甚低頻電磁法(very-low frequency EM method; VLF-EM)以該無線電波作為免費的電磁波源，儀器只需配置接收線圈，鎖定特定頻率訊號後，就能接收該頻率訊號，及因地層電磁感應而引發的次生場強度(secondary field strength)(圖 2)。次生磁場強度與地層導電率有關，故藉分析次生磁場的強弱等特徵，可據以推估代表該頻率探測深度內地層的導電特性。探測深度與岩層的電阻率及電磁場頻率有關，一般情況下探測深度約可達 100 m。

三、研究成果

3.1 飛航現調與資料處理

本計畫於 2013 年 7 月 19 日進駐蘇澳臨時起降場開始作業，但於 2013 年 7 月 22 日發生脫勾意外致使三軸拖鳥墜落毀損，雖緊急進行設備重購，但工作進度仍落後了約 1 個月。本計畫於 2013 年 8 月 31 日重新進駐蘇澳臨時起降場作業，但後續因受天候影響，直到 2013 年 10 月 19 日始完成飛行任務。合計總共進行了 50 個航次之飛行，完成之探測面積與測線總長度分為 2,607 km² 與 5,723 km，飛行軌跡與整編後的測線如圖 3 所示，合計 468 組紀錄中，除了其中 7 組紀錄品質為第 2 級外，其餘紀錄均為品質良好的第 1 級，平均雜訊水平為 0.00526 nT，且均不大於 0.107 nT，顯示資料品質良好。

原始磁力量測數據需經一連串資料修正後，才能獲得全磁力網格(total magnetic intensity grid; TMI grid)，並據以進行後續資料處理與解釋等工作，本計畫之磁力資料

前處理包括：突波移除(spike removal)、基站修正(base correction)、國際地磁參考場移除(IGRF removal)、航向修正(heading correction)、延遲修正(lag correction)及調平(leveling)等項目，圖 4 所示為經前處理後獲得的全磁力強度圖。網格處理係透過二維處理方式，強化磁力異常的影像，本計畫進行以下處理：(1)歸極換算(reduction to the pole; RTP)、(2)濾波(filtering)、(3)向上延伸(upward continuation; UC)、與(4)微分(derivative)等，圖 5 所示為經歸極換算處理後之全磁力強度圖。

濾波處理是 VLF-EM 資料處理中的關鍵步驟，傳統常運用 Fraser 濾波法(Fraser Filtering; Fraser, 1969)來濾除 VLF-EM 資料中的雜訊，考量空中 VLF-EM 係以每秒 10 點的取樣率記錄 VLF-EM 訊號，資料點數遠較地面探勘時密集，故本計畫改良 Fraser 濾波法，採取以下步驟進行濾波處理：(1)進行 15 點移動平均、(2)進行 30 點低通濾波、(3)進行趨勢移除(trend removal)。圖 6 為頻率 22.3 Hz 之同相(in-phase)分量紀錄經濾波處理前後之等值圖，圖中仍可發現與測線同方向(方位角 150 度)的帶狀雜訊，因此採用方向濾波將 150 度方向的雜訊濾除，圖 7 為經方向濾波後的同相分量等值圖，在山地區域訊號有顯著強弱差異，推測與岩性或構造有關。

3.2 岩層物性特徵

本計畫共於 19 個地層露頭點進行岩石物性量測，量測項目包括磁感率與電阻率，結合前年度曾完成的 38 個測點，總計 57 個量測點，位置分布如圖 8 及圖 9 所示。此外，為初步瞭解研究區域內地層的自然殘磁力特性，本計畫額外採取了 22 個定向岩石樣本，量測其自然殘磁率並計算 Q 值(Koenigsberger Ratio)。

(1) 岩性與磁感率及電阻率關係

圖 10 及圖 11 分別為露頭岩性與磁感率及電阻率間關係圖，由圖中不同岩性之磁感率與電阻率分布，顯示以下特徵：

- (A) 調查範圍內大多數岩石磁感率的中位數約介於 $100 \times E-6$ 至 $500 \times E-6$ 之間，以砂岩、石英砂岩、硬頁岩、板岩及片岩等岩類為主，且變質岩類的磁感率似有隨變質度增加而提高的趨勢。
- (B) 角閃岩、安山岩與玄武岩等火成岩之磁感率遠大於調查區內其它沉積岩與變質岩之磁感率，應與該岩石內富含磁性礦物有關。
- (C) 熱水換質的安山岩具有極低的磁感率，與熱換質作用有關；變質砂岩磁感率的中位數低於 $10 \times E-6$ ，推測因其母岩內磁性礦物含量低所致。
- (D) 圖 10 同時標示安山岩等五種岩類的 Q 值，顯示除了硬頁岩與角閃岩的 Q 值相對較低之外，變質砂岩、板岩及安山岩的 Q 值都有偏高的趨勢，尤其安山岩的 Q 值高達 100 以上，暗示進行磁力解釋時，需將此類地層自然殘磁力可能造成的影響納入考量。
- (E) 圖 11 顯示除砂岩與石英砂岩外，其餘岩石的電阻率均非常高，特別是變質砂岩與安山岩，其電阻率高達 5000 Ohm-m 以上。
- (F) 由於岩層的電阻率受孔隙的連通性及孔隙水含量高低影響很大，本計畫施測之露頭大多為乾燥的完整岩塊，故由圖 11 大致提供不同岩性電阻率高低之參考，但不能據以做為判斷岩石的絕對電阻率。

(2) 地層與磁感率及電阻率關係

圖 12 及圖 13 分別為露頭地層與磁感率及電阻率間關係圖，由圖中不同地層之磁感率與電阻率分布，顯示以下特徵：

- (A) 調查範圍內大多數地層磁感率的中位數約介於 $100 \times E-6$ 至 $200 \times E-6$ 之間，主要為巴陵層、大桶山層、乾溝層等沉積岩地層，及廬山層、東澳片岩及南蘇澳層

等變質岩地層，屬於低磁性地層。

- (B) 龜山島上除了受熱水變質的安山岩具有很低的磁感率之外(圖 10)，其餘固結的安山岩具有極高的磁感率與 Q 值。
- (C) 由圖 13 顯示各地層電阻率的變化頗大，但整體而言，四稜砂岩及龜山島的安山岩的電阻率高於其它沉積岩或變質岩類地層。

3.3 磁力特徵解釋

圖 14 及圖 15 分別為全磁力強度圖及區域磁力異常圖，由磁力強度分布，可分辨出 3 個主要磁力高區，分別以 MH1, MH2 及 MH3 代號表示。MH1 位於龜山島四週，故 MH1 磁力高區應可對應火山岩，呈東北-西南方向分布，剩餘磁力異常圖上，龜首及其東北方有三處明顯呈現小且圓形的低磁區域，由露頭磁感率量測結果顯示經熱換質的安山岩呈現極低的磁感率，故前述圓形低磁區解釋為火山口，共有三處，位置分布如圖 16 所示；MH2 位於宜蘭平原中間，概略沿蘭陽溪分布，走向自東北-西南轉東-西方向分布；MH3 位於測區南側，與 MH2 形狀類似，暗示二者可能有類似的形成條件。

觀察圖 17 磁力高低分布特徵，由巨觀角度可概略歸納出 6 組磁力線形，分別以 MH1a, MH1b, MH1c, MH2a-MH2b, MH3a-MH3b 及 Fa-Fb 代號表之。磁力線形 MH1a1-MH1a4 呈東南東走向，MH1b1-MH1b2 呈北北東走向，為帶狀高磁力異常，對應構成龜山島的主要火成岩體；由震源機制解可觀察此區的斷層構造分別為東北-西南方向、及西北-東南方向，與 MH1a 及 MH1b 兩組線形構造相近。MH1c 高磁力異常帶概略呈圓弧狀分布於龜山島西側，推測與火山白環狀岩脈構造有關。磁力線形 MH2a 及 MH2b 位於高磁區 MH2 南北兩側，MH3a 及 MH3b 則位於高磁區 MH3 南北兩側，代表岩體邊界。磁力線形 Fa1, Fa2 及 Fb 有切穿高磁區的現象，推測與構造有關。

依據三維逆推所獲得之三維磁力模型，圖 18 為不同高程的磁感率切面圖(magnetic susceptibility elevation slice)，對照前述磁力強度特徵(圖 14、圖 15)及磁力線形特徵解釋(圖 17)。龜山島鄰近之 MH1 磁體在高程 -1.5 km 以上(圖 18b-d)，具有東北東(MH1a1-MH1a4；圖 18)及北北東走向(MH1b1-MH1b2；圖 18)，顯示岩漿順著淺層破碎帶噴發，冷卻後形成前述帶狀特徵，且隨深度有向東北方向增加的現象，暗示其岩漿來源自東北方向。觀察圖 18e-h，顯示龜山島四週有一環狀高磁體，與 MH1c (圖 17)位置一致，其直徑有隨深度增加而擴大的現象，向西擴展達到接近陸地(圖 18h)。MH2 分布於調查區中間地帶，觀察圖 18f，顯示 MH2 南北兩側邊界分別與牛鬥斷層(向東延伸為濁水斷層)及坑四斷層位置一致，有一顯著地震叢集位於南邊界之南側(圖 18b-e)，暗示 MH2 為一重要地質構造。比較圖 18a-f，顯示 MH2 位置有隨深度增加而逐漸南移的現象，代表 MH2 具有向南傾斜的特徵，且其頂部深度有向東方向加深的現象。MH3 主要分布於測區南側，深度相對較淺，推測約 10 km (圖 18h)。

當溫度升高至特定溫度時，地層將喪失其磁感率，此時的溫度稱為居里溫度，若地溫高於岩層內主要礦物的居里溫度時，該深度稱為「居里深度」。以平均地溫梯度(30°C/km)為例，鐵的居里溫度 770°C，則其居里深度約為 25 km。本報告以三維磁感率模型中，深部地層磁性快速減弱的界面，做為推測居里深度之參考。以巨觀角度觀察圖 18，在龜山島四週低磁區出現的深度相對較淺，約自深度 5 km 以下(圖 18f)，該低磁區有逐漸擴大的趨勢(圖 18f-j)，且呈現橢圓形狀，與區域構造及岩層走向不同，故推測該低磁區受溫度影響造成，暗示與龜山島火山下方的岩漿庫有關，初步推測龜山島鄰近地區之居里深度約 5 km。比較圖 18h-j，顯示調查區域中間及南側之東西向高磁性岩體，在深度 10 km 時仍保有其東西向帶狀形貌，但深度 15 km 以下逐漸喪失帶狀形貌，故推測該岩層的居里深度約介於 15-20 km 間，而帶狀岩體向東延伸至海域(圖 18j)時，

其對應的居里深度則可能大於 20 km。若不考慮前述帶狀高磁性岩體及龜山島火山岩漿庫的影響，估計調查範圍的平均居里深度約介於 10–15 km 之間。

3.4 電性特徵解釋

圖 19 及圖 20 分別將同相位分量等值圖及等效電流密度圖與地質構造套疊，圖中並標示調查範圍內主要之斷層構造，比較 VLF 圖幅與已知地質構造，獲得以下結果：

- (1) 牛鬥斷層、宜蘭斷層、三星斷層及翠峰湖斷層的位置與同相位分量圖上的訊號強弱界線或線形具有明顯相關性(圖 19)，與古魯斷層間的對比關係則相對較不顯著，可能與古魯斷層的橫移性質有關。
- (2) 在圖 20 中宜蘭斷層與西側的等效電流密度帶狀高區對比良好，古魯斷層、清水溪斷層則似可對應帶狀高區因錯動產生的線形，可能與此二斷層的橫移特性有關。

同相位分量之訊號強弱與岩層電阻率成反比，由圖 21 中訊號分布，可區分為 3 個區域，分別以 A、B 及 C 代號表示，以及 3 類電性地層邊界與線形；圖 22 則為解釋之含水破裂帶分布，說明如下：

- (1) A 區的同相位分量訊號強度普遍較低(圖 21)，對比雪山山脈地層，B 區的訊號強度則普遍較高(圖 21)，對比中央山脈地層，故推測探測範圍內，中央山脈地層的平均電阻率低於雪山山脈地層。
- (2) 上述 A 區與 B 區的分界為電性地層邊界①(圖 21)，與牛鬥斷層位置一致(圖 19)。
- (3) C 區範圍包括宜蘭平原與海域，其同相位分量訊號雖有些許東北-西南方向線形，但訊號明顯比較混亂(圖 21)，等效電流密度圖(圖 22)上的帶狀高區亦相對減少，與 A 區及 B 區間的交界(電性地層邊界③)略與宜蘭平原西側邊緣一致，推測 C 區可能因平原區堆積的厚沖積層及海域海水，導致在探測範圍內地層無明顯電性差異。
- (4) 電性地層邊界②位於雪山山脈內，與宜蘭斷層向西延伸一致，北側地層具有較低電阻率，其位置亦與圖 22 中標示Ⓐ的含水破裂帶一致。
- (5) 圖 22 中黑色虛線標示為解釋之含水破裂帶，對照地表地質圖，推測標示Ⓐ的含水破裂帶可能與巴陵層的紅紫山背斜有關，標示Ⓑ的含水破裂帶則可能

3.5 深層基盤地質與構造

Yu and Tsai (1979)在宜蘭平原進行陸上磁力調查時，在平原中央位置發線東西向的高力磁常帶，Tong *et al.* (2008)以尤拉解迴旋法分析此高磁異常帶的位置及深度資訊，但受限於既有資料的分布範圍，一直以來對於該高磁異常帶的分布與岩性及構造意義等討論不多。圖 23 為台灣東北部陸海域構造分布套疊本計畫空中磁測磁力異常圖，不僅顯現出該高磁基盤的分布狀況，此高磁基盤與南側中央山脈低磁的蘇澳層板岩之間，以斷層構造分界(即濁水斷層與牛鬥斷層)，與北側的雪山山脈低磁岩層間亦以斷層構造分界，在宜蘭平原下方之雪山山脈地層中，形成坑四斷層(圖 23)。此高磁基盤往測區西南延伸置中嶺背斜下方，可推測雪山山脈南界岩層，曾受高磁基盤從地殼深部至淺部逆衝構造作用的影響，而形成背斜構造。

本畫在前年度工作成果中，首度將此高磁基盤與南蘇澳層中變質輝綠岩脈進行對比，建議此一分布於蘭陽溪下方的巨大高磁基盤(董倫道、林蔚，2012)，可能不是侵入岩脈。根據其具變質與變形的磁力特徵，建議為漸新世至中新世形成於雪山山脈及中央山脈間的海洋地殼，可能為南中國海板塊(South China Sea Plate)的延伸(Tong *et al.*, 2013)。本年度計畫進一步證實分布於蘇澳山區，磁性屬於低磁特徵的蘇澳層板岩及南蘇澳層板岩下方，有大範圍的高磁基盤存在，並往外海延伸，可能與所謂琉球島弧的基盤相連。夾於南蘇澳層的變質輝綠岩脈(林啟文，1998；林蔚，2001；林啟文、高銘

健，2009)，可能為此一與海洋地殼有關的高磁基盤形成後期，於中洋脊侵入沈積層(南蘇澳層)的岩脈，因此在蓬萊運動發生過程中，大南澳片岩逆衝到南蘇澳層上(林啟文、高銘健，2009)，夾於南蘇澳層具有洋脊玄武岩特徵的變質輝綠岩脈，可以作為支持大南澳片岩與雪山山脈間存在一海洋地殼的證據(林蔚，2001)。此一海洋地殼可能分成數個殘塊，由空中磁測本年度的測勘結果顯示，在大南澳片岩拼貼回歐亞大陸邊緣時，介於兩陸塊之間(如宜蘭平原下方之高磁基盤)；可能有一殘塊位於蘇澳層、南蘇澳層及大南澳片岩下方，並往外海延伸至琉球島弧基盤。

3.6 火山地區地下地質構造

龜山島位於沖繩海槽的最西南端，即在菲律賓海板塊及歐亞板塊交界上方，由三維磁力模型(圖 24)顯示龜山島火成岩體有往東北方延伸分布的現象，火成岩體中可能存在數個火山口，下方均有低磁的岩漿庫。火成岩體南北兩側基盤存在的東北-西南向磁力線形，與鄰近海域正斷層構造分布方向一致，也與大屯火山群的山腳斷層等北部張裂構造的分布方向一致。

由三維逆推結果(圖 18、圖 24)，發現以龜山島火山白及低磁的岩漿庫為中心，呈現出環狀及放射狀高磁磁力線形特徵，可能反映龜山島火山活動形成的環狀岩脈與環狀構造，以及其同時共生的放射狀岩脈與放射狀構造。此環狀構造及放射狀構造，從磁力線形來看，甚至分布到宜蘭平原南側，可能是火山活動同時伴生火山白陷落作用所致。這些火山構造形成年代不過 7000 年，不僅呈現了 2-6 公里深不具磁性的岩漿庫，微震群聚在岩漿庫附近；而且分布在宜蘭平原南方濱海區域，受到放射狀構造及環狀構造影響範圍，亦為地震較為集中的區域。

3.7 潛伏火山熱液活動區分布

依磁力異常圖及構造分布研判(圖 18)，宜蘭平原鄰近地區有兩大地熱來源，分別是龜山島的火山地熱，及西南方的中央山脈地熱。以龜山島火山活動區為中心，則東北-西南方向的構造(如坑四斷層、濁水斷層等)及環繞火山活動區的環狀沉陷構造(主要在濱海地區，但鴿子斷層、清水溪斷層、三星的古魯斷層分支等，呈現西北-東南向的構造，也可能是此類環狀構造)，可能是熱流重要的通道，距離最遠的清水地熱仍能採集到具火山源特性的氬同位素氣體。相較之下，西南方的中央山脈地熱則可能分布於南澳北溪中上游，數條斷層交會區顯示出原本高磁基盤特徵，有轉為低磁的特徵，可能反映出深層地溫降低磁性使然，可提供後續進行溫泉與地熱資源的調查參考。

四、結論與建議

4.1 結論

1. 本計畫首度完成了宜蘭陸海域空中地球物理探測，測線總長度為 5,723 km，涵蓋面積 2,607 km²，完成全磁力強度網格圖及甚低頻電磁異常圖等，據以分析大區域火成岩與構造分布的關係，並提供後續進一步討論地體演化與成因機制之重要資料。
2. 由磁力異常圖上辨認出 3 個顯著條帶磁力高區及 6 組主要磁力線形特徵，可對比火山岩、高磁基盤及斷層構造。
3. 宜蘭平原中央之東西向高磁力基盤之南北兩側，分別與濁水斷層及坑四斷層有關，本計畫推論該磁力基盤不是侵入岩脈，而是在大南澳片岩拼貼回歐亞大陸邊緣時，殘留的海洋地殼殘塊，並有可能往外海延伸至琉球島弧基盤。夾於南蘇澳層具有洋脊玄武岩特徵的變質輝綠岩脈，可以作為支持上述論述的證據。

4. 本計畫依三維逆推所獲得的三維磁感率模型，由巨觀角度推測龜山島鄰近地區之居里溫度約 5 km，調查範圍內中間的東西向高磁性岩體，其居里深度約介於 15 - 20 km 間。若不考慮前述帶狀高磁性岩體及龜山島火山岩漿庫的影響，估計調查範圍的平均居里深度約介於 10 - 15 公里之間。
5. 龜山島火山岩內圓形低磁區解釋為火山口，共有三處，其中一處位於龜山島之龜首，另兩處位於龜山島東北方，解釋為舊火山口，暗示龜山島火山活動持續地自東北向西南方向遷移。
6. 由龜山島鄰近之地下磁體邊界分布，推測龜山島鄰近之地下火山岩分布呈現東北向之帶狀分布，龜山島鄰近火山岩範圍直徑約 9 公里，遠較龜山島出露的範圍大。
7. 龜山島東北-西南向分布的火成岩體，不僅與鄰近海域正斷層構造分布方向一致，也與大屯火山群的山腳斷層等北部張裂構造的分布方向一致，暗示二者可能具有類似的機制。
8. 由龜山島鄰近火山岩分布呈現東北-西南帶狀分布，暗示龜山島火山活動曾順基盤岩既有的東北東及北北東方向裂隙帶，發生裂隙噴發活動及岩脈侵入作用，後因火山白陷落作用而形成環狀岩脈。環狀岩脈內的低磁力區域推測對應岩漿庫位置，因受高溫影響導致磁力強度相對減小，暗示地下蘊藏巨大熱源。
9. VLF 同相位分量訊號強度能反應地層電性特徵，與已知的地層邊界與主要構造線位置吻合。
10. 綜整磁力與 VLF 探測結果，本計畫解釋之構造分布如圖 25 所示

4.2 建議

本計畫所建立的空中地球物理探測技術能在最短時間內，獲得對整體區域地下地質構造之瞭解，提高後續探勘工作的效率。未來應大幅推廣應用重要潛在地熱區，甚而應用至台灣全區，以建立基本地質資料庫，提高國土利用的效率。

參考文獻

1. Fraser, D.C. (1969). Contouring of VLF-EM data. *Geophysics*, 34, 958-967.
2. Okuma, S., Stotter, C., Supper, R., Nakatsuka, T., Furukawa, R., and Motschka, K. (2009). Aeromagnetic constraints on the subsurface structure of Stromboli Volcano, Aeolian Islands, Italy. *Tectonophysics*, 478, 19-33.
3. Tong, L.T., Lin, W., Lee, P.T., Lee, J.F., Lin, C.W., Liu, C.Y., Chien, J.M., and Huang, Y.T. (2013), Airborne Magnetic Survey in the Kueishantao Volcano area, Taiwan. *Western Pacific Sedimentology Meeting*.
4. Tong, L.T., Ouyang, S., Guo, T.R., Lee, C.R., Hu, K.H., Lee, J.L., and Wang, C.J. (2008). Insight into the Geothermal Structure in Chingshui, Ilan, Taiwan. *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, 19, No.4, 413-424.
5. Ueda, Y. (2007). A 3D magnetic structure of Izu-Oshima Volcano and their changes after the eruption in 1986 as estimated from repeated airborne magnetic surveys. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 164, 176-192.
6. Yu, S.B., and Tsai, Y.B. (1979). Geomagnetic anomalies of the Ilan plain, Taiwan. *Petroleum Geology of Taiwan*, 16, 19-27.
7. 林啟文 (1998)。台灣東北部板岩帶與片岩帶之構造特性與構造演化。國立台灣大學地質學研究所博士論文，共 173 頁。
8. 林啟文、高銘健 (2009)。五萬分之一臺灣地質圖及說明書-第 16 號，蘇澳圖幅，第二版。經濟部中央地質調查所，共 59 頁。
9. 林殿順、許樹坤、劉家瑄、李昭興、林靜怡、蘇志杰、許嘉峻、陳冠宇、張筱

(2011)。大台北地區特殊地質災害調查與監測第二期-台灣東北海域地質及地球物理資料彙編與分析(4/4)，經濟部中央地質調查所報告第 100-04 號。

10. 林蔚 (2001)。華南沿海地區晚燕山期侵入岩漿活動及大地構造意義。國立台灣大學，地質科學研究所，博士論文，共 236 頁。
11. 董倫道、林蔚 (2012)。台灣北部火山活動觀測研究—台灣北部火山活動地區密集陣列觀測研究(1/2)。經濟部中央地質調查所報告。

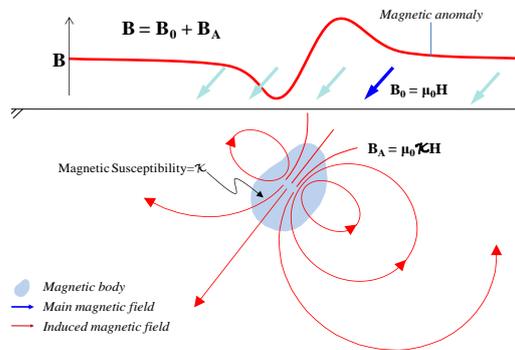


圖 1、磁力法施測原理示意圖

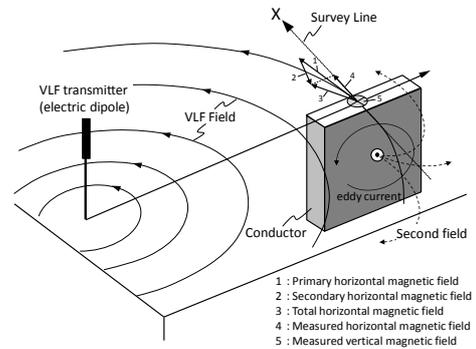


圖 2、甚低頻電磁法施測原理示意圖

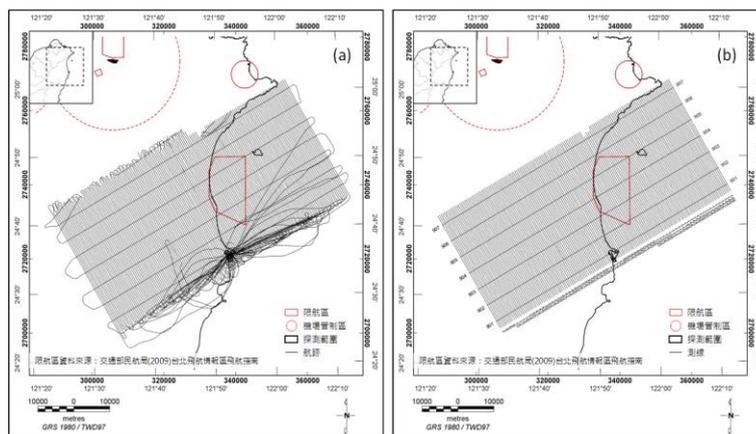


圖 3、(a)航跡圖與(b)整編後測線分布圖

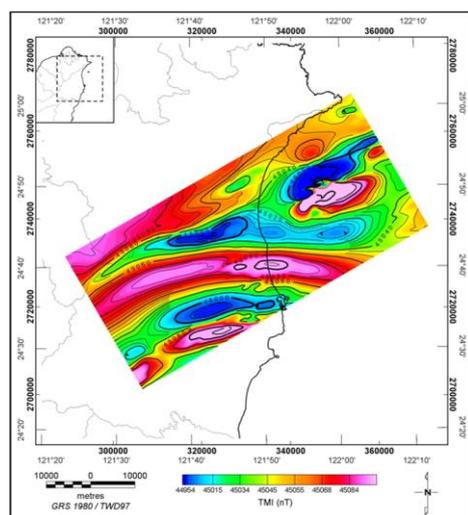


圖 4、本計畫研究區域全磁力異常圖

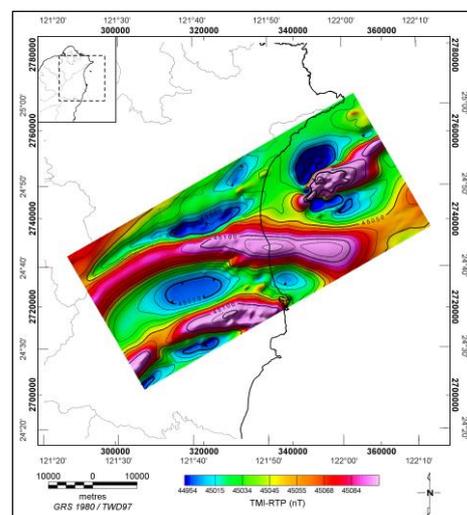


圖 5、本計畫研究區域全磁力異常圖

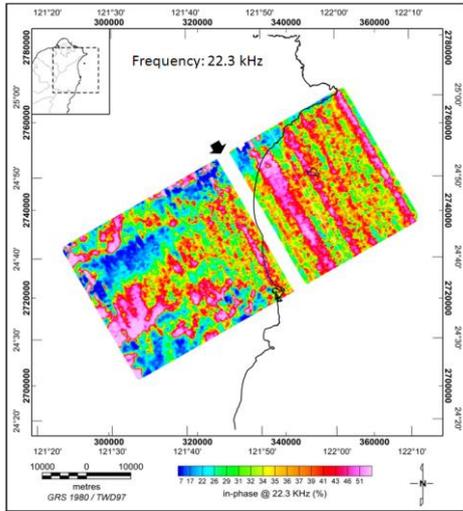


圖 6、原始同相位分量等值圖

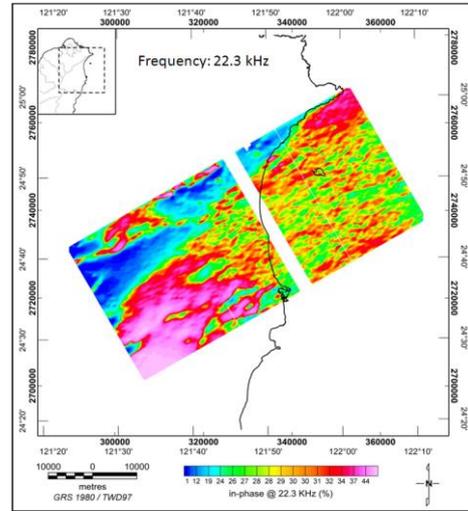


圖 7、經濾波處理後之同相位分量等值圖

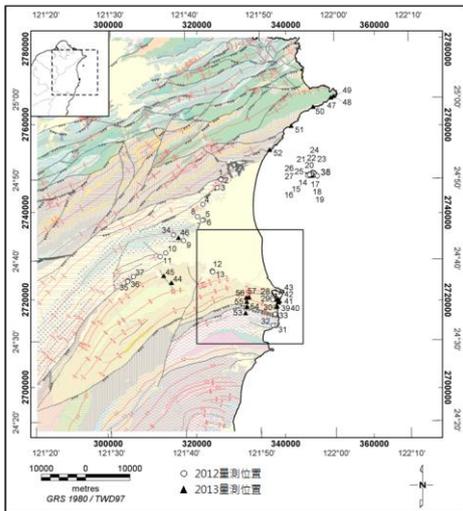


圖 8、岩層物性量測點位置圖

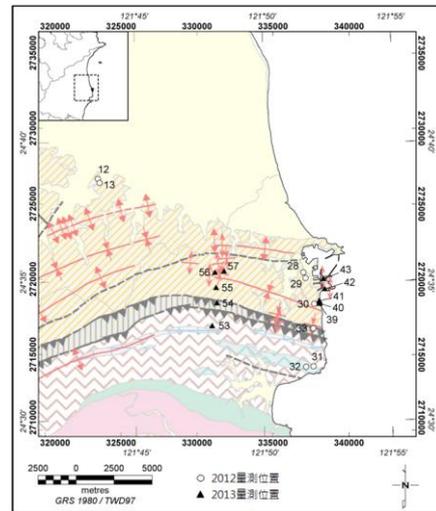


圖 9、蘇澳地區岩層物性量測點位置圖

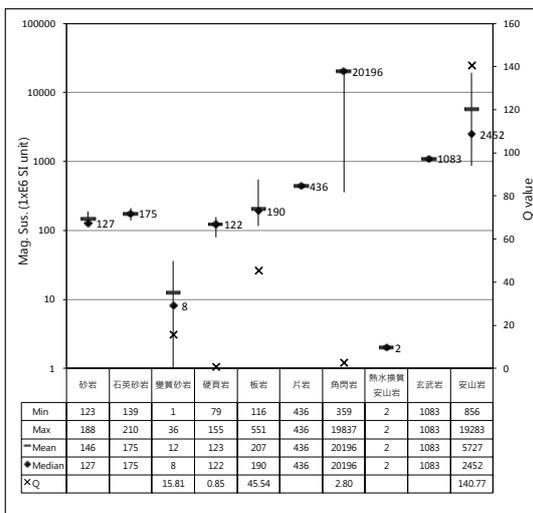


圖 10、地層露頭岩性與磁感率關係圖

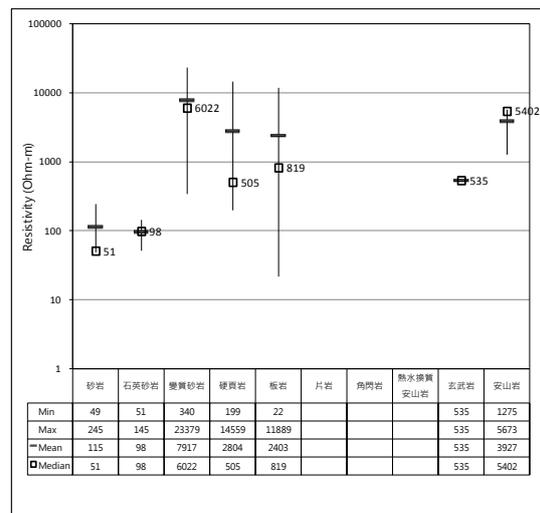


圖 11、地層露頭岩性與電阻率關係圖

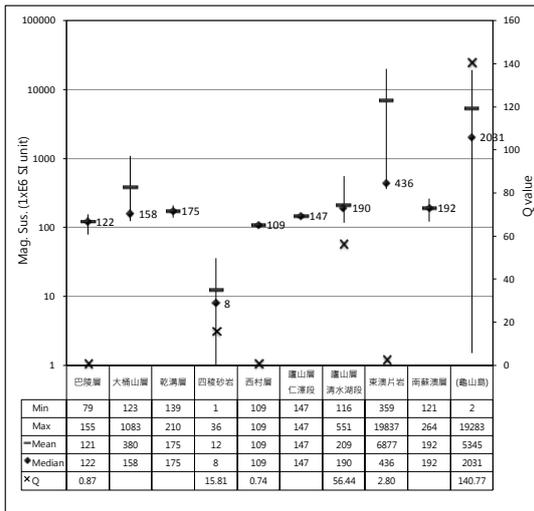


圖 12、地層與磁感率關係圖

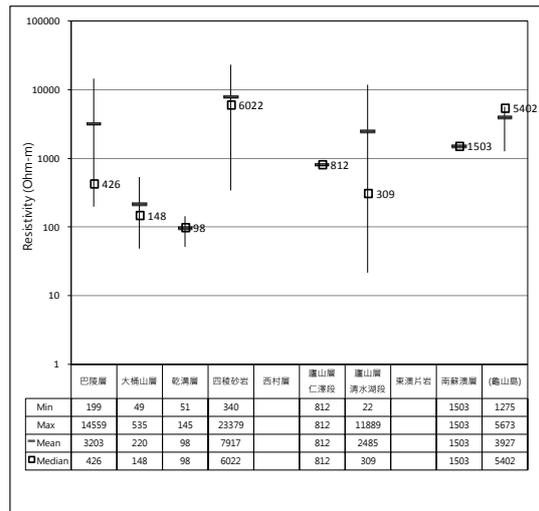


圖 13、地層與電阻率關係圖

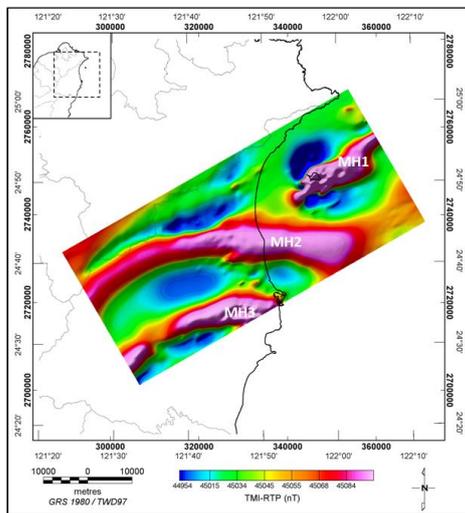


圖 14、全磁力強度圖之磁力強度特徵

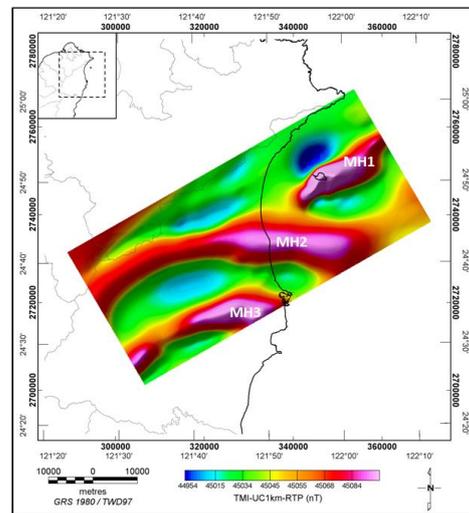


圖 15、區域磁力異常圖之磁力強度特徵

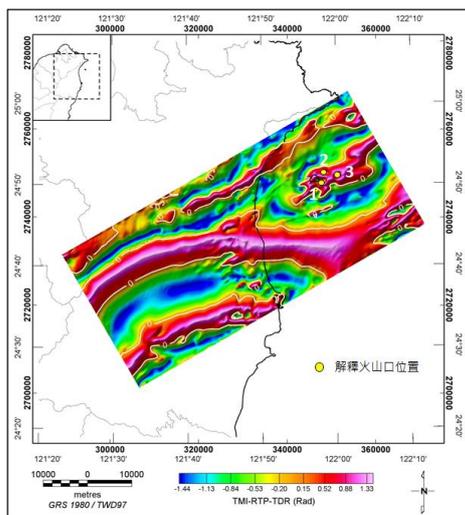


圖 16、解釋火山口位置圖

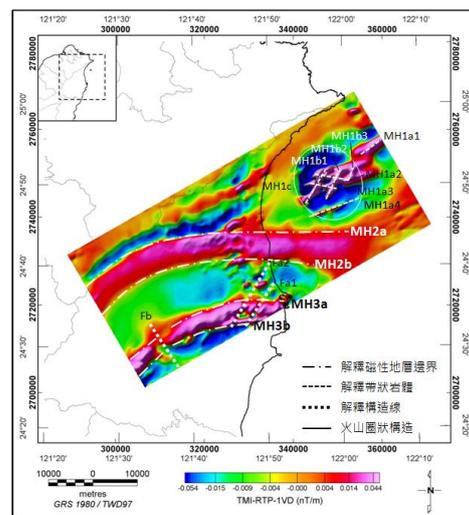


圖 17、磁力異常圖之磁力線形解釋圖

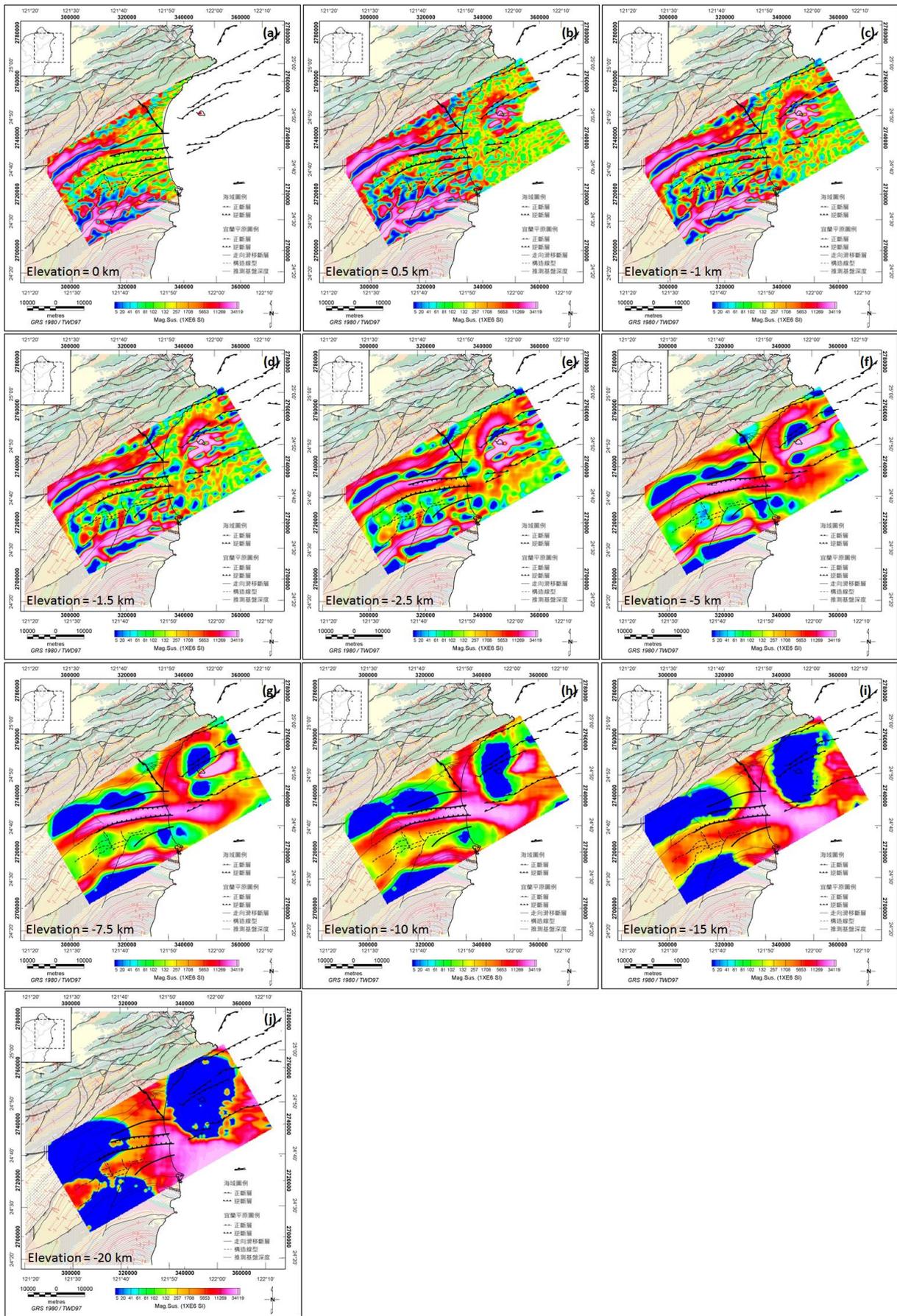


圖 18、三維磁感率模型等高程切面圖

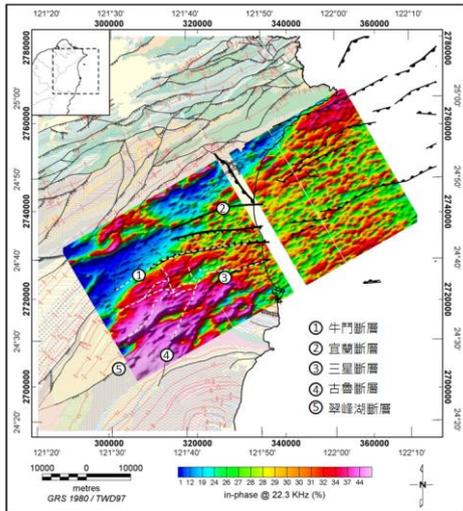


圖 19、VLF 同相位分量圖

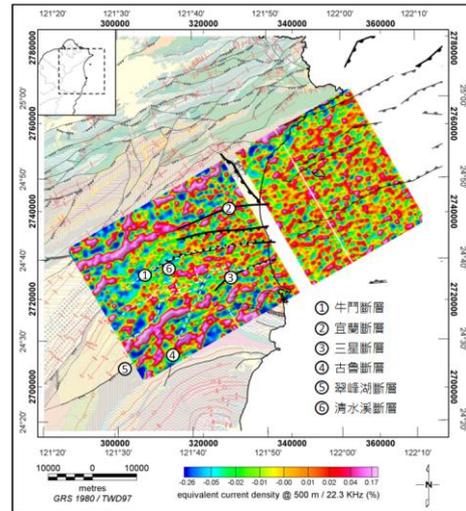


圖 20、VLF 等效電流密度圖

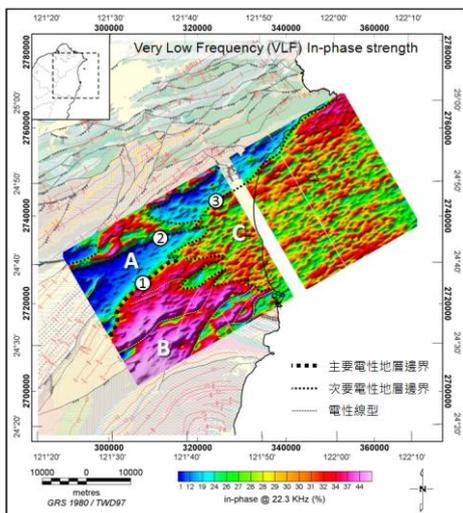


圖 21、VLF 解釋電性及電性線形分布圖

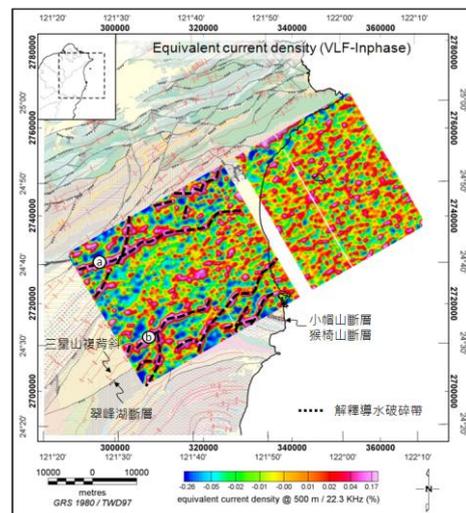


圖 22、VLF 解釋含水破裂帶分布圖

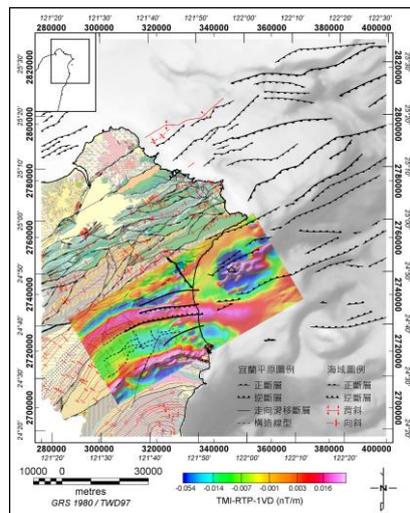


圖 23、台灣東北部陸海域構造分布套疊空中磁測磁力異常圖

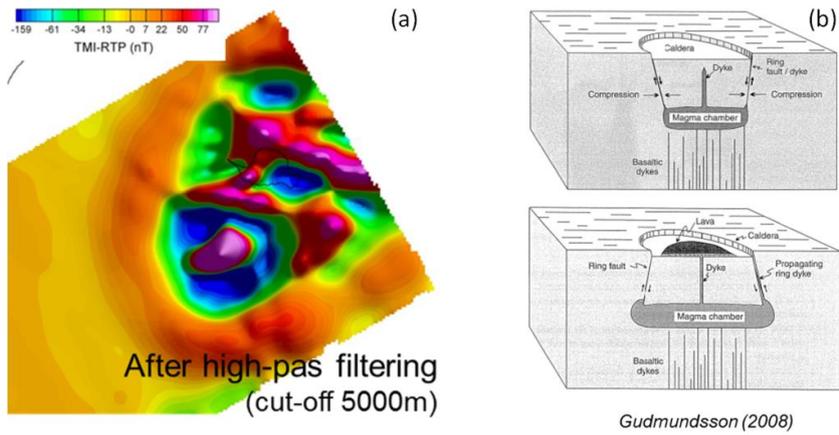


圖 24、龜山島鄰近區域之環狀磁力高區及其成因模型示意圖

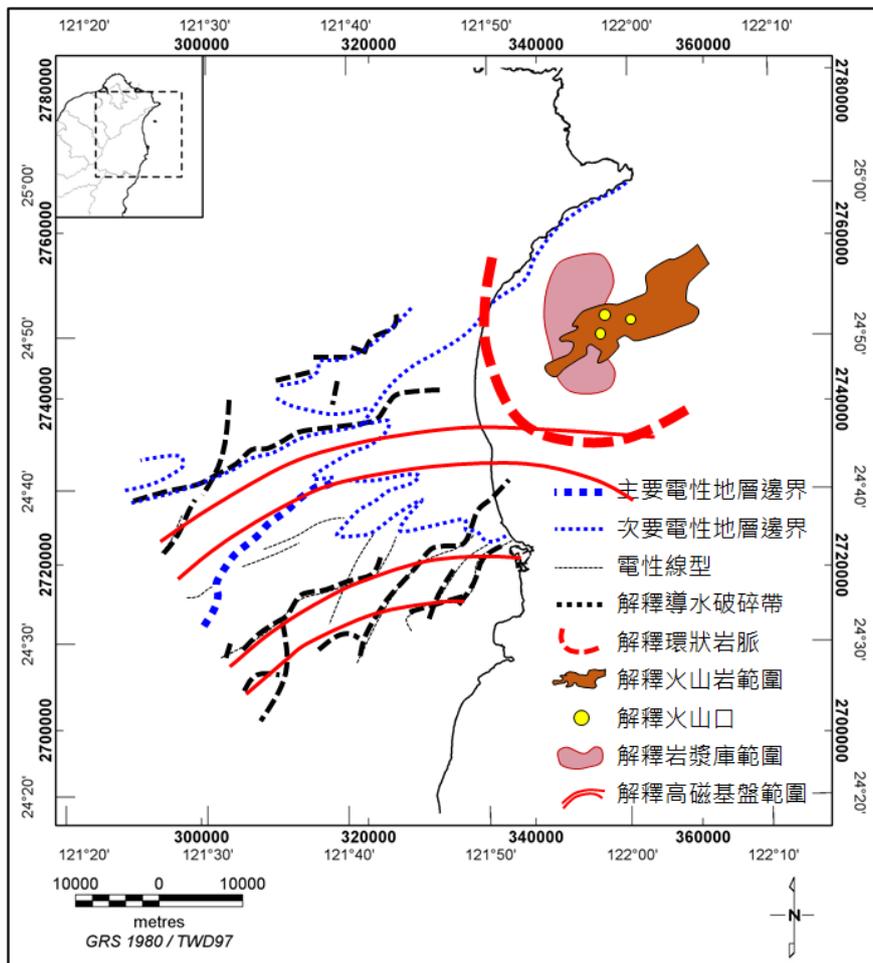


圖 25、依據磁力與 VLF 資料解釋之岩體與構造分布圖