

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
Tong, Lun-Tao¹

林蔚¹
Lin, Wayne¹

李柏村²
Lee, Po-Tsun²

李錦發²
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。

本計畫於2012年5月21日完成簽約，並依預定進度完成各項工作，符合合約進度要求。包括順利引進三軸拖鳥磁力及甚低頻電磁探測設備，並自行發展空中磁測專用導航系統，成功地完成了本年度飛行測試工作，更由本年度獲得的高精度空中磁力資料，對於宜蘭平原及其鄰近海域之基盤構造與龜山島火山活動有更進一步的瞭解。

由本計畫磁測資料顯示，龜山島鄰近火山岩分布範圍約達直徑9公里，概略以龜山島之龜首為中心，龜山島火山活動曾順基盤岩既有的東南東方向裂隙帶，發生裂隙噴發活動及岩脈侵入作用，形成東南東方向之磁力高區，而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，故此區之居里深度較周遭地區淺，深度約6公里上下。

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 establish helicopter-borne magnetic and very low frequency electromagnetic (VLF-EM) techniques, and to apply these techniques over Yilan land and maritime area on volcanic and geological aerosurveying to provide distribution information of potential magma chamber as well as regional geological structures.

This project began on May 21, 2012 under contract agreement. All project items have been conducted on schedule, including import and installation of the tri-axial magnetic gradiometer and VLF-EM sensor, navigation device-specified development for helicopter-borne magnetic survey, smoothly and successfully flight testing, and achieving high resolution aeromagnetic data. This accomplishment provides new insight on basement structures of Yilan plain and maritime area, and on Kueishantao (or Kueishan Island) volcanism.

Based on new aeromagnetic data, this study reveals that volcanic rocks distribute ca. 9 km diameter centering by the turtle head of the Kueishantao. In addition, the ESE-orient high magnetic lineaments around the Kueishantao maritime area are interpreted as caused by fissure eruption and dike intrusion of the Kueishantao volcanism along ESE-orient fracture zones. Ring dikes beneath the Kueishantao area might be a subsident crater form (caldera); therefore, the low magnetic field within the ring dikes being a magma chamber at the depths of about 6 km represents a high temperature source lowers magnetic intensity as well as shallower depth to Curie point.

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。

本計畫將以2年為期，完成台灣北部蘭陽平原地區陸、海域空中磁力與甚低頻電磁探測。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

甚低頻電磁法簡稱 VLF-EM 法(very-low frequency EM method)，利用如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。VLF-EM 法以該無線電波作為免費的電磁波源，因此儀器本身只需配置接收線圈，鎖定特定頻率訊號後，就能接收該頻率訊號(圖2)，及因地層電磁感應而引發的次生場強度(secondary field strength)。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。其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數十公尺至約一百公尺。

三、研究成果

3.1 空中磁測設備引進

本計畫引進加拿大 GEM 公司生產的三軸拖鳥設備，組裝完成後照片及各組件名稱如 3 所示，主要功能說明如下：

1. 具有三個高敏感的鉀蒸氣光泵(optical pump)磁力感測器，分別安裝在三個支架尾端，故除可用以量測全磁場強度之外，經過計算亦能獲得水平與垂直的磁力梯度。
2. 具有一組 VLF-EM 接收器，可同時記錄二個波段之 VLF-EM 訊號。
3. 具有一組雷達高度計，可連續記錄拖鳥的離地高度；一組衛星定位記錄器，可連續

記錄拖鳥的空間座標。

4. 與直升機間之聯結簡化成電源線及 RS-232 連接線，RS232 及電源線收納在 30 公尺長的吊索內，降低直升機改裝申請通過的門檻。
5. 資料收集軟體安裝在一部手提電腦內，具有即時控制、量測資料監視、航跡監視及資料異常警示等功能，提高資料收集的效率。

3.2 飛航現調與資料處理

本計畫於 2012 年 9 月 8-10 三日，在龜山島及宜蘭市間之陸海域地帶進行測試飛行，調查面積約 364 平方公里，共進行了 6 個航次之飛行，合計完成 61 條測線，飛行軌跡與整編後的測線如圖 3 及圖 4 所示，各測線的雜訊水平(noise level)小於 0.08 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主要包括：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 5 所示為經前處理後獲得的全磁力異常圖。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 6 所示為經歸極換算處理後之全磁力異常圖。

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 7 及圖 8 分別為頻率 22.3 Hz 之總量紀錄經濾波處理前後之等值圖，顯示經過前述濾波處理後大幅提高解析品質，故更能用以觀察 VLF-EM 中隱含的地質意義。

3.3 龜山島火山磁力解釋

3.3.1 磁力特徵與磁體三維分布

圖 9 及圖 10 分別為全磁力異常圖及區域磁力異常圖，由磁力強度分布，可分辨出 4 個主要磁力高區，分別以 MH1, MH2, MH3 及 MH4 代號表示，及 1 個主要磁力低區，以 ML1 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；MH2 及 MH4 位於調查區域邊緣，故資料處理時有可能受邊界效應影響準確性，下年度資料覆蓋率相較完整後，應可確認其位置；MH3 位於陸域蘭陽溪出海口一帶，磁力強度較 MH1 及 MH2 為低，故推測其對應岩層之磁感率可能較 MH1 及 MH2 為低。剔除疑似淺層或地表建物之磁力干擾後，圖 11 中白色虛線代表調查範圍內主要之磁體邊界，分別位於前述 MH1, MH2, MH3 及 MH4 等磁力高區之邊界。

觀察圖 12、圖 13 及圖 14 之磁力高低分布特徵，由巨觀角度可概略規納出 6 組磁力線形，分別以 Oa, Ob, Ya, Ka, Kb 及 Kc 代號表之。磁力線形 Oa, Ob 及 Ya 在剩餘磁力異常圖上不顯著，暗示這些磁力線形屬於相對較深的構造；磁力線形 Ya 代表 MH2 磁力高區之北緣，有可能代表地下火成岩體邊界；磁力線形 Ka, Kb 及 Kc 等分布於龜山島周圍，其中 Ka 及 Kb 在全磁力異常圖(圖 9)及剩餘磁力異常圖(圖 10 及圖 11)上均有顯現，暗示其為發育自深部的構造。磁力線形 Kc 概略呈圓弧狀分布於龜山島四週，為一圈狀

高磁力異常帶，由不同截切波長進行高通濾波後獲得的剩餘磁力異常圖，顯示 Kc 隨著深度增加有向外擴大的趨勢，最遠大約達到海岸線附近。Kc 線形則有以龜山島之龜首為中心的現象。而 Kc 內側普遍具有低磁力特徵，暗示 Kc 與龜山島鄰近之火山活動事件有關聯性。

依據三維逆推所獲得之三維磁力模型，圖 15 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及磁力線形特徵解釋，MH1 磁體隨深度增加有向東北方向遷移的現象，暗示其岩漿來自東北方地球深部，MH2 分布於調查區東南側，初步觀察有向西南傾斜的趨勢，MH3 主要分布於高程-4000 公尺至-6000 公尺間，Kc 對應的環狀磁力高區，有隨著深度增加而向外擴大的現象，其分布深度約可達高程-8 公里上下，向西南之分布則約達海岸線處。以巨觀角度觀察圖 15a-h，顯示居里深度在調查範圍之東北側相對較淺，高程約-10 公里上下，向西南方向逐漸加深至高程約-20 公里上下。龜山島及其西南側的無磁性範圍，如圖 15c 中白色箭頭所指處，自高程約-4 公里向下逐漸擴大，顯示此範圍內的居里深度相對極淺，暗示地下蘊藏巨大熱源。

3.3.2 深層基盤地質與構造

由全磁力異常圖中的細部磁力線形分布，顯示蘭陽溪南方區域以東南東方向磁力線形為主；相較之下，宜蘭溪北方具較低磁力的區域，則以東北方向磁力線形為主。對應到地表露頭量測的變形構造特徵，林啟文(1998)於牛鬥斷層附近量測雪山山脈地層的變形特徵時(圖 16)，顯示變形構造特徵(包括：伸張線理及褶皺軸等)以東北方向為主；而蘇澳南側山區中南蘇澳層及大南澳片岩的變形構造特徵(伸張線理、葉理及褶皺軸等)，則一致以東南東方向為主。因此，全磁力異常圖中的細部磁力線形特徵，似能反映構造區塊長期的變形特性，並可作為深層基盤分界的依據，暗示前述蘭陽溪南岸的近東西向高磁性岩體，有可能屬於古老的岩脈，長期受到蓬萊運動變形作用影響，推測與夾於南蘇澳層中的中新世變質輝綠岩脈(林啟文，1998; 林蔚，2001)有關。由於南蘇澳層板岩為低磁性岩層，而變質輝綠岩脈為高磁性岩層，故推測前述高磁性岩體，有可能為中央山脈地層中的變質輝綠岩脈。

3.3.3 火山地區地下地質構造

由剩餘磁力異常圖(圖 13)及三維磁力模型(圖 15)顯示出明顯圈狀磁力異常帶，概略以龜山島所在之磁力高區(MH1; 圖 9)為中心，外圍有低磁力區圍繞(圖 13 及圖 15a-e)。龜山島位於 MH1 磁力高區之西北側，且龜山島東南隅龜首處存在一相對的磁力低區，顯示與龜山島火山活動有關，由龜首處堆積的低磁性火山碎屑流堆積物，以及龜首東側海底湧泉發達，顯示該處熱液活動旺盛，故造成此局部低磁力異常。

由圖 17 顯示圈狀磁力異常帶中，與東南東方向分布的磁力高區(Kb; 圖 12)，組成環狀岩脈(ring dike)與東南東方向岩脈群的特徵，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，故此區之居里深度較周遭地區淺。本研究提出此一基盤岩層磁力特徵與構造磁力特徵，可用火山白陷落的模式解釋。根據磁力線形、岩漿庫與環狀岩脈的組合，顯示龜山島火山活動曾順基盤岩既有的東南東方向裂隙帶，發生裂隙噴發活動及岩脈侵入作用，形成東南東方向之磁力高區(Kb; 圖 12)，而後因火山白陷落作用而形成環狀岩脈(Kc; 圖 13)。最後，龜山島形成後，此區新形成的火山高磁岩體的變形，依然順東南東磁力線形發生，龜山島空載光達影像亦呈現出主要東南東方向的構造線形，顯示此區變形持續受到基盤岩既存東南東方向的構造所影響。

3.3.4 潛伏火山熱液活動區分布

圖 18 為不同高程之磁感率等深度切面圖與微震分布之套疊圖，顯示龜山島鄰近不同深度之微震活動，與前述高磁性環狀岩脈內之低磁力帶吻合，暗示該區深處存在岩漿庫的可能性，將是此區長期熱流的深層來源。推測蘭陽平原外海至龜山島間區域，無論基盤岩及地質構造均長期受到此一火山活動的影響。

四、結論與建議

4.1 結論

1. 本計畫已成功地建立了本土的空中磁測與甚低頻電磁探測技術。
2. 龜山島鄰近火山岩分布範圍約達直徑 9 公里，概略以龜山島之龜首為中心，龜山島火山活動曾順基盤岩既有的東南東方向裂隙帶，發生裂隙噴發活動及岩脈侵入作用，形成東南東方向之帶狀磁力高區，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，故此區之居里深度較周遭地區淺，深度約僅 6 公里上下。
3. 由磁力異常圖上共辨認出 6 組主要磁力線形特徵，與沖繩海槽的北緣邊界及調查區內地下主要火成岩體邊界及構造等有關。陸域的細部磁力線形，則與地表觀察的構造區塊長期變形特徵一致，並可作為深層基盤分界的依據。暗示蘭陽溪南岸的近東西向的高磁性岩體，有可能為中央山脈地層中的變質輝綠岩脈。
4. 以巨觀角度顯示居里深度在調查範圍之東北側相對較淺，高程約-10 公里上下，向西南方向逐漸加深至高程約-20 公里上下。龜山島及其西南側區域內之居里深度，推測自高程約-4 公里向下逐漸擴大，顯示此範圍內的居里深度相對極淺，暗示地下蘊藏巨大熱源。
5. 本年度獲得的空中 VLF-EM 資料雖因調查範圍位於海域及平原區，受 VLF-EM 探測深度限制，調查範圍內海域及蘭陽平原區無顯著電性構造，但由龜山島處的 VLF-EM 異常呈現東北-西南的線形，與磁力解釋的線形一致，顯示空中 VLF-EM 未來在山區之探測，或能收到預期成效。

4.2 建議

隨著我國對於地熱資源探勘之推動，國科會地熱主軸計畫及能源局的地熱開發等計畫，先後針對台灣北部大屯山、蘭陽平原及台灣東部一帶擬定地熱探勘計畫。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. 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。
2. 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。
3. Fraser, D.C. (1969). Contouring of VLF-EM data. *Geophysics*, 34, 958-967.
4. 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.
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.

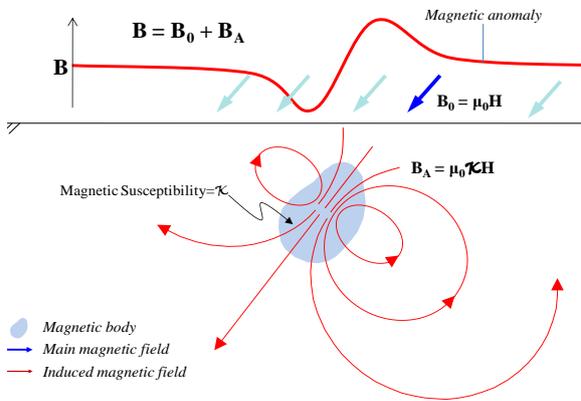


圖 1、磁力法施測原理示意圖

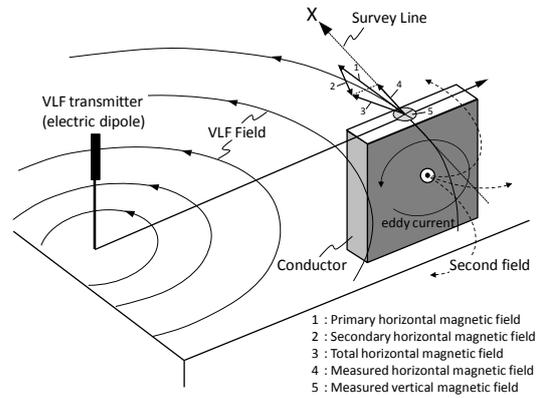


圖 2、甚低頻電磁法施測原理示意圖



圖 3、三軸拖鳥組裝完成後照片及各部組件名稱

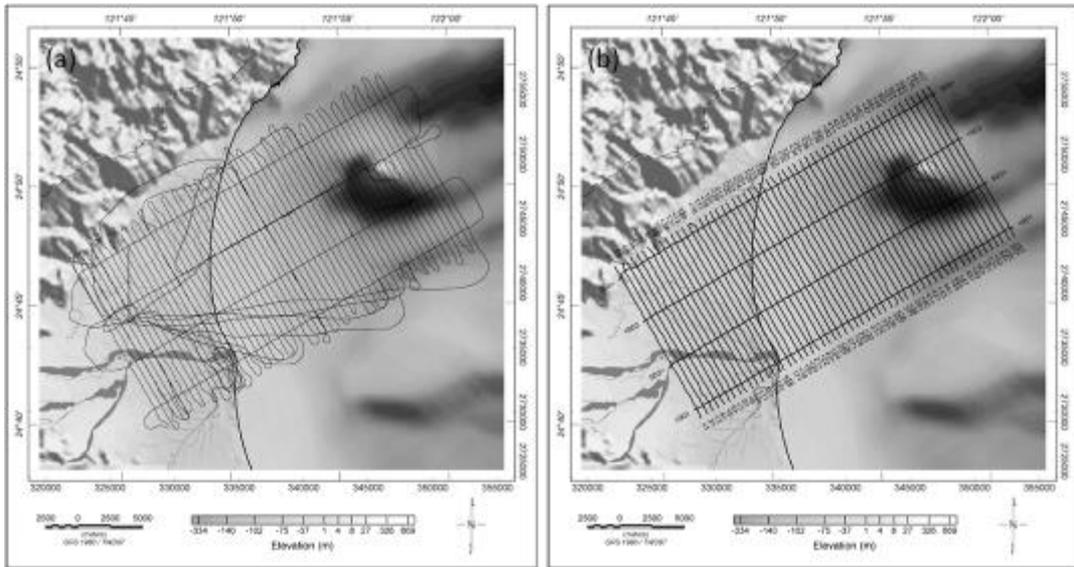


圖 4、(a)航跡圖與(b)整編後測線分布圖

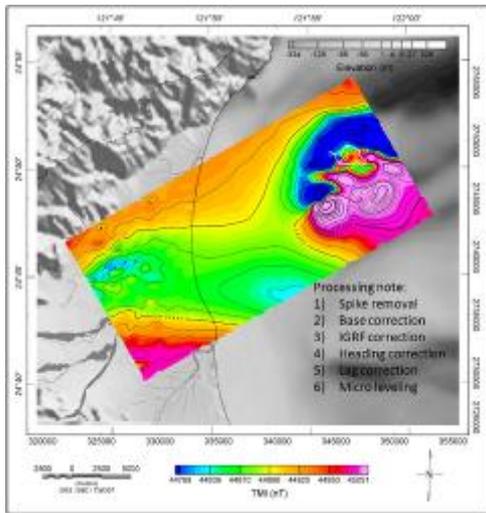


圖 5、本計畫研究區域全磁力異常圖

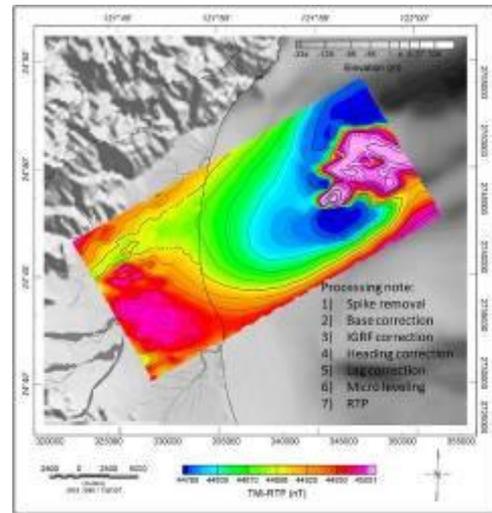


圖 6、本計畫研究區域全磁力異常圖

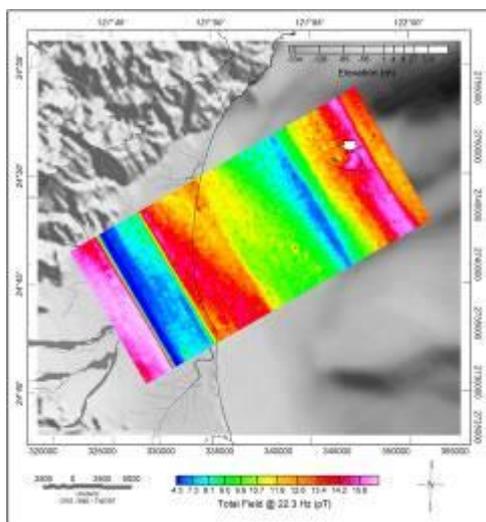


圖 7、頻率 22.3 Hz 之原始總量等值圖

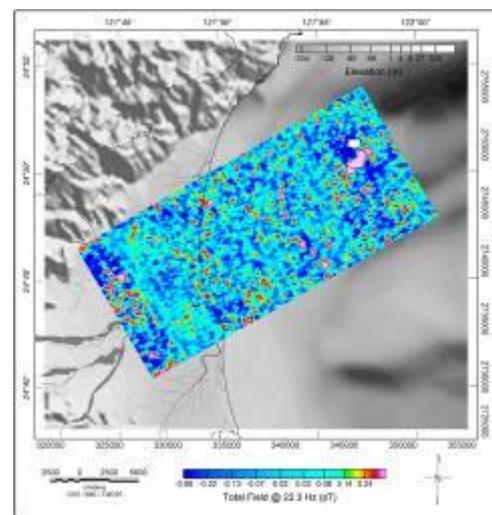


圖 8、經濾波處理後之總量等值圖

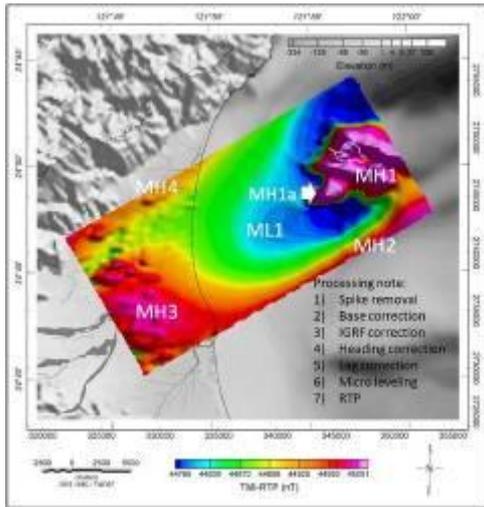


圖 9、全磁力異常圖之磁力強度特徵

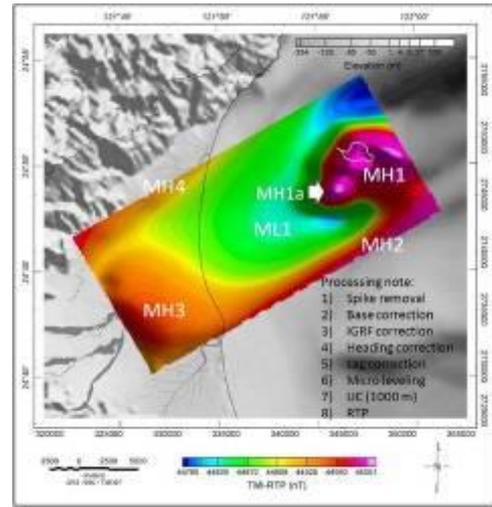


圖 10、區域磁力異常圖之磁力強度特徵

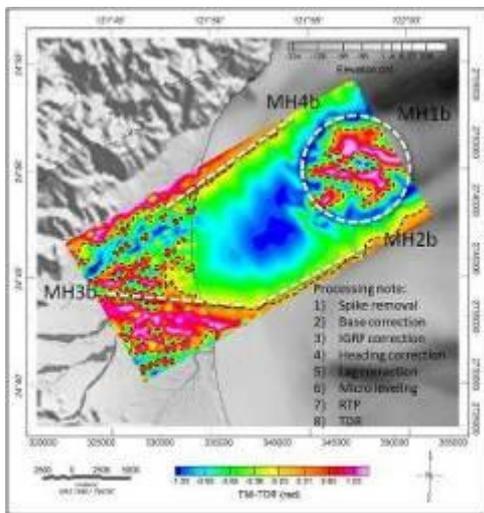


圖 11、全磁力異常圖之磁體邊界解釋圖

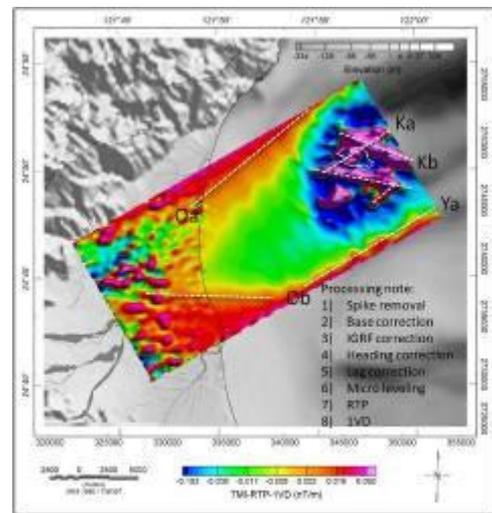


圖 12、全磁力異常圖之磁力線形解釋圖

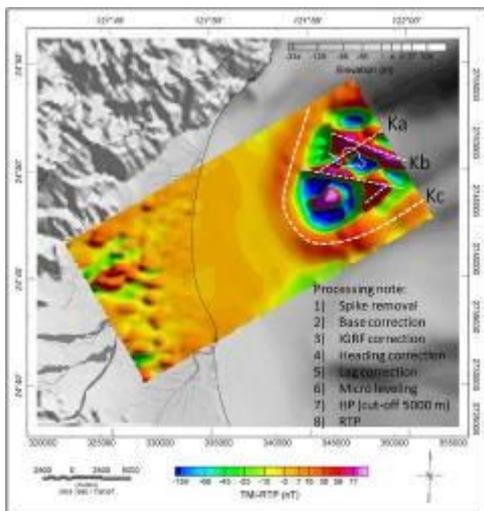


圖 13、：磁力線形解釋圖-1

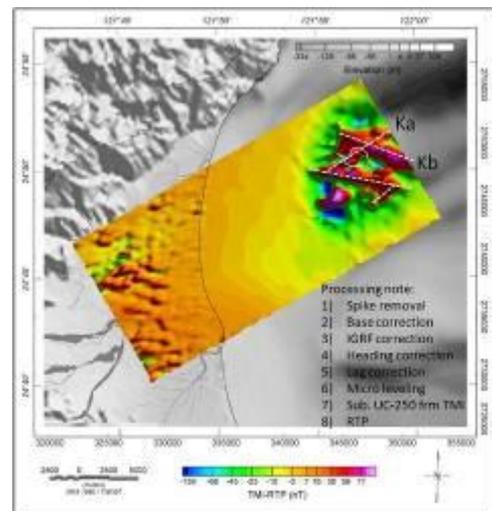


圖 14、磁力線形解釋圖-2

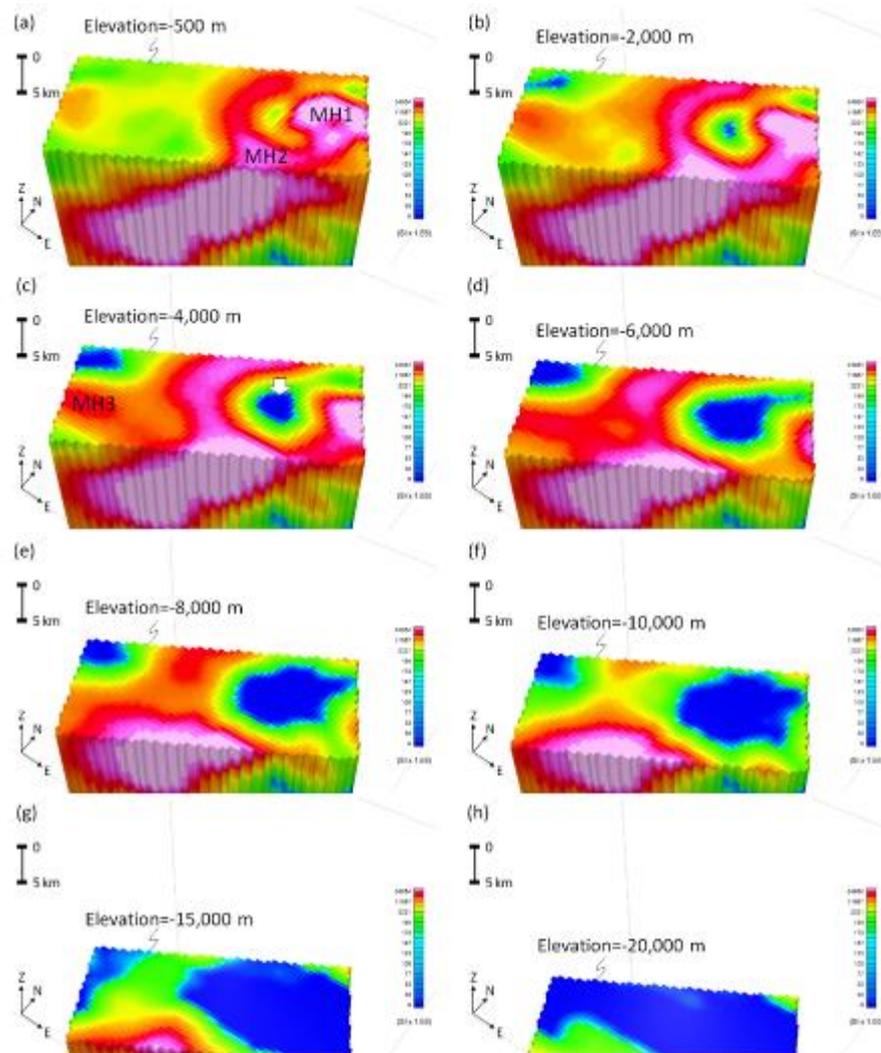


圖 15、三維磁力模型之方塊圖

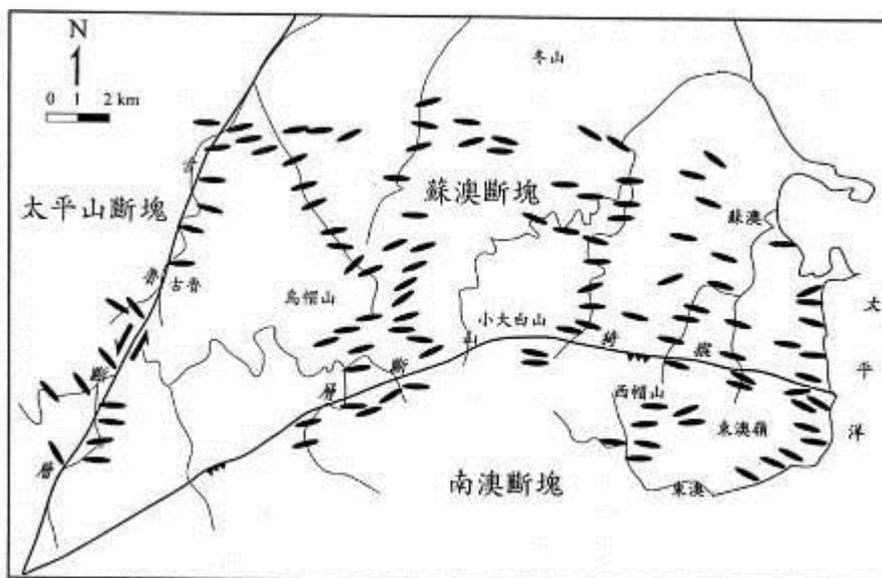


圖 16、中央山脈蘇澳斷塊與南澳斷塊應變橢圓長軸投影軌跡圖

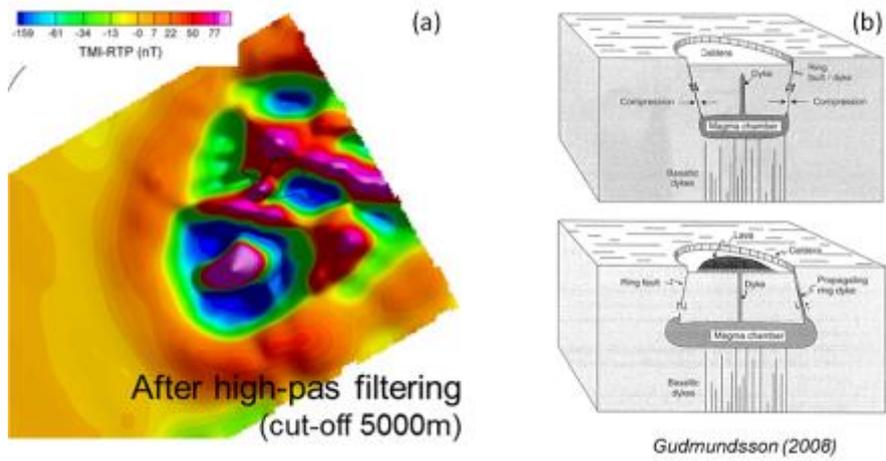


圖 17、龜山島鄰近區域之環狀磁力高區及其成因模型示意圖
 (a)龜山島鄰近區域之剩餘磁力異常圖；(b)環狀岩脈成因模型示意圖。

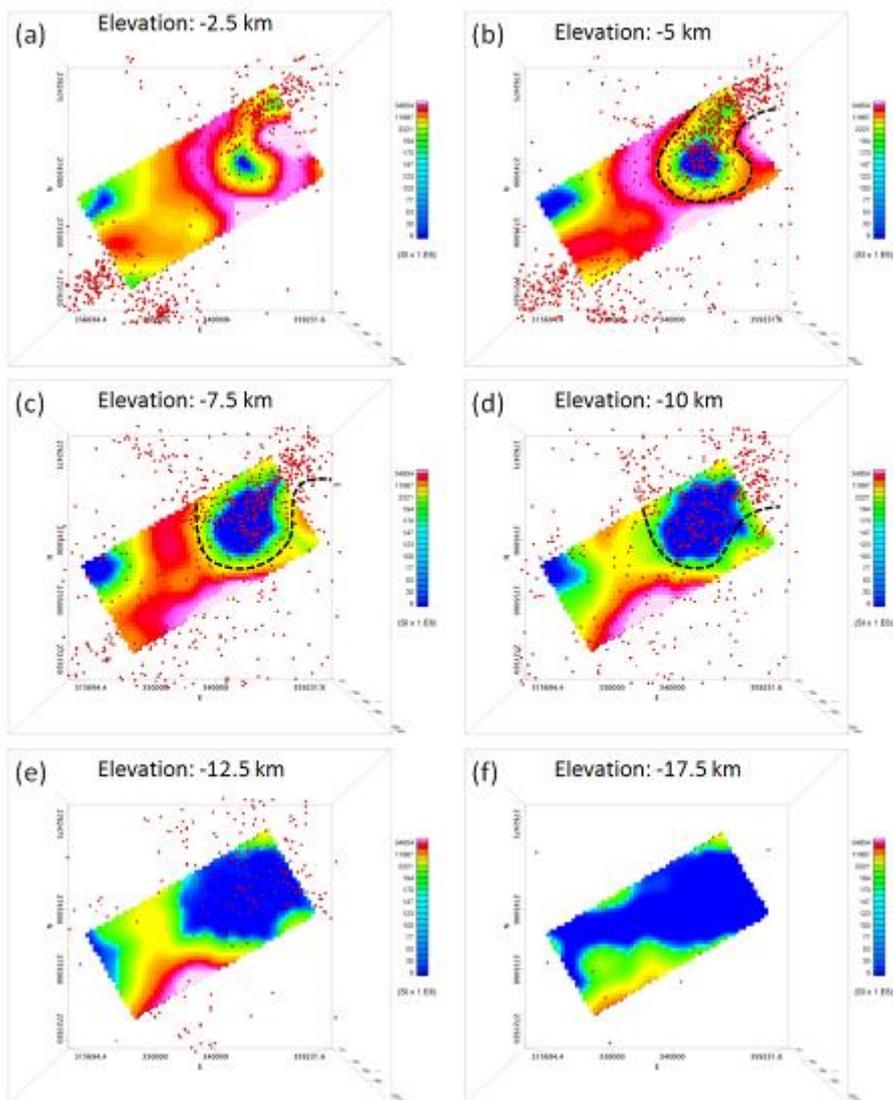


圖 18、磁感率等高程切面圖套疊微震分布圖
 (微震紀錄由林正宏提供未發表資料，紀錄期間 2009 - 2010；各等深度切面圖上所套疊之微震，係篩選該高程以上 2.5 km 範圍內之微震紀錄)