

臺灣東部地區空中磁力探測(3/3)

The Advanced Research for Monitoring Volcanism in Northern Taiwan: The Airborne Magnetic Survey in Eastern Taiwan (3/3)

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
Tong, Lun-Tao¹ Lin, Wayne¹ Lee, Po-Tsun²

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

為了增進對臺灣東部深部地質構造及火山活動特性的瞭解，全程計畫針對花東縱谷南段瑞穗至鹿野間區域進行區域性空中磁力探測，範圍涵蓋臺灣東部四大主要地質區，由西向東依序為脊樑山脈地質區片岩帶、脊樑山脈地質區板岩帶、花東縱谷地質區及海岸山脈地質區，本年度探測範圍介於初來至鹿野之間。

本計畫產出了網格間距 100 m 的高解析度全磁力網格及各種磁力異常網格，並運用三維磁化向量逆推技術，獲得高解析的三維磁化向量模型。藉由分析磁力特徵並與既有地質圖比對，顯示分佈在脊樑山脈東側的淺部塊狀高磁異常體，其厚度約 3 km 上下，對應出露於脊樑山脈東側的超基性岩體，分佈在海岸山脈淺部的高磁岩體呈現明顯的條帶分布，其厚度約介於 2 km 上下，對應都鑾山層；海岸山脈東西兩側零星分布的小範圍高磁岩體，厚度大多約僅 1 km 上下；而海岸山脈條帶高磁岩體間的磁力低區，則對應弧間盆地。深部的高磁基盤呈現北北東方向條帶分布，探測範圍內由西向東共有 3 組高磁條帶，具有兩相鄰條帶間磁化方向近乎相反的海洋地殼特徵。特別是板岩帶與花東縱谷下方的海洋地殼，介於兩磁化方向相反的塊體間，有高角度南北向至東北-西南向的橫移斷層帶，可歸為位於板塊邊界的轉形斷層帶。

海岸山脈岩體由中新世火山岩體與上覆碰撞盆地構成，位於利吉斷層為東界的海洋地殼相關高磁條帶基盤上；與 107 年度所見相同的是，泰源盆地明顯受到利吉斷層截切並疊置成兩層，延伸往南逐漸尖滅。此外，106-107 年測區位於板岩西側，出露於玉里帶的海洋地殼塊體，延伸至本年度測區已位於測區外，但下伏於板岩層下方有巨厚海洋地殼塊體。宏觀而言，條帶狀且具磁極反轉特性的高磁基盤反映海洋地殼分布，自玉里帶往東南傾斜至海岸山脈下方，上界或東界與利吉斷層在深部相會；整體形貌呈現巨型複褶皺與覆瓦狀構造為主，並向東南傾斜延伸至外海下方。地表分布的鹿野斷層、池上斷層與卑南山斷層，往地下垂直延伸至海洋地殼塊體中，呈現縱切上部地殼的橫移構造，因斷層帶兩側分屬不同條帶磁力特性，具有轉形斷層特徵，並提供深層熱體上湧的通道，因此地熱分布與轉形斷層帶息息相關。

關鍵詞：空中磁力探測、火山地質、海岸山脈、花東縱谷、板塊構造

Abstract

The purpose of this three-year project (FY106-108) is to improve understanding of the deep geological structure and volcanic characteristics in eastern Taiwan by conducting an aeromagnetic survey in the southern section of the Longitudinal Valley. The survey area has been conducted covering Ruishui and Luyei areas from west to east across four major geological provinces in East Taiwan, such as the Backbone Range Schist Zone, the Backbone Range Slate Zone, the Longitudinal Valley, and the Coastal Range provinces. The surveying area in this year is between Chulai and Luyei.

The high-resolution total magnetic intensity grid and various magnetic anomaly grids with a grid size of 100 m have been compiled in this project; besides, a high-resolution magnetization vector model is generated by 3D inversion techniques. Comparing aeromagnetic characters and geological maps, it is evident to present the good relationship between magnetic anomalies and geological rock bodies in shallow depth. The block-like high-magnetic anomalies in the Backbone Range are closely related to the ultra-basic rock bodies and can extend to the depth of about 3 km. The high-magnetic belt anomalies in the Coastal Range is well related to the Tulanshan formation with a thickness of about 2 km. The thickness of the local high-magnetic anomalies distributed in the eastern and western side of the Coastal Range is about 1 km. The low-magnetic area between the high-magnetic belts is associated with the intermontane basin. The NNE-trending high magnetic belts can be separated into 3 sets, two adjacent belts with nearly opposite magnetization directions, as geomagnetic reversal of oceanic crust. In particular, the oceanic crust beneath the Slate Zone and the Longitudinal Valley between the blocks with opposite magnetization directions, with high-angle north-south to northeast-southwest-oriented transverse fault zones, can be classified as transform faults at the plate boundary.

The Coastal Range with oceanic basements, located east of the Lichi Fault, is composed of the Miocene volcanic bodies and overlain collisional basins. Similar to the result reported in the FY107 report, the Taiyuan basin cross-cut by the Lichi Fault underground and, therefore, had been stacking into two layers where gradually pinch out southward. On the otherhand, oceanic bodies crop out in the Yuli Belt mentioned in the FY106-107 reports extend off the survey area of the FY108; however, extending oceanic huge bodies underground underlain the slate formations. Within this broad perspective, the oceanic origin crust from the Yuli Belt dipping southeastward extent to underneath of the Coastal Range, upper bound connected to the Lichi fault as well as composed macrostructures of multi-folding and stacking structures, extending to deep offshore seabeds. The Luyei fault, Chishan fault and Peinanshan fault cropping out along surface can be identified in the 3D magnetic model that extent vertically into the oceanic basements. Furthermore, the direction of the magnetization vector of most high-magnetic rocks is slightly different from the present inclination of the geomagnetic field in between the strike-slip, subvertical faults with obvious characters of the transform faults in upper crust. These transform faults truncate shallow crust

to provide pathways for deep upwelling materials. It is likely to become the critical paths for deep geothermal sources to move upward.

Keywords : airborne magnetic survey, volcanic geology, Coastal Range, Longitudinal Valley, plate tectonics

一、前言

臺灣地區位於聚合型的板塊邊界，活躍的板塊活動除了產生許多地震之外，也在部份區域形成火山，其中位於臺灣北部的大屯火山群以及宜蘭龜山島地區至今仍有明顯的火山活動現象。為進一步了解這些地區的火山活動特性並探求相關的岩漿庫或熱液活動行為，經濟部中央地質調查所(以下簡稱：地調所)於2012年至2016年間委託財團法人工業技術研究院(以下簡稱：工研院)，自加拿大引進高精度三軸拖鳥設備，結合探測和資料解析技術，建置能力自主的空中磁力及甚低頻電磁探測技術，並陸續完成臺灣北部陸海域地區空中磁力探測工作，範圍涵蓋基隆、臺北、宜蘭、桃園以及新竹等地區。前期計畫成功探測出龜山島地區的環狀高磁體分布範圍，瞭解大屯火山區的火山與高磁體分布，同時根據調查結果推算各探測區域的居里深度以及地下地質構造，並得到區域磁力異常分布圖。計畫結果不僅獲臺灣中油公司以及經濟部能源局相關研究引用，台灣電力公司執行「核能電廠鄰近地區之陸域火山與海域火山島調查暨評估工作」、科技部能源國家型計畫第二期-地熱主軸中心「宜蘭地區深層地熱資源調查及加強型地熱系統場址的評估—宜蘭地區地熱大地構造及地下地質」以及「宜蘭利澤地區深層地熱發電研究(3/3)」等計畫均多有應用，於學術及經濟面均有高度應用價值。由於空中磁測方法對於地下潛伏火成岩體之探測成果良好，地調所擬將此方法持續應用於臺灣東部的花東縱谷及海岸山脈地區，整合比對臺灣東部與臺灣北部火成岩地區的磁力構造，探討臺灣地區火成岩體及地下地質構造分布情形，探測範圍包括海岸山脈及花東縱谷中段至南段地區。海岸山脈為板塊聚合產生弧-陸碰撞所形成，過往地質調查報告均顯示具有火成岩體出露，磁力調查成果可協助後續現地地質調查，並可協助推估研判板塊聚合邊界地區的地下構造形貌。

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，如圖 1)，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，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。

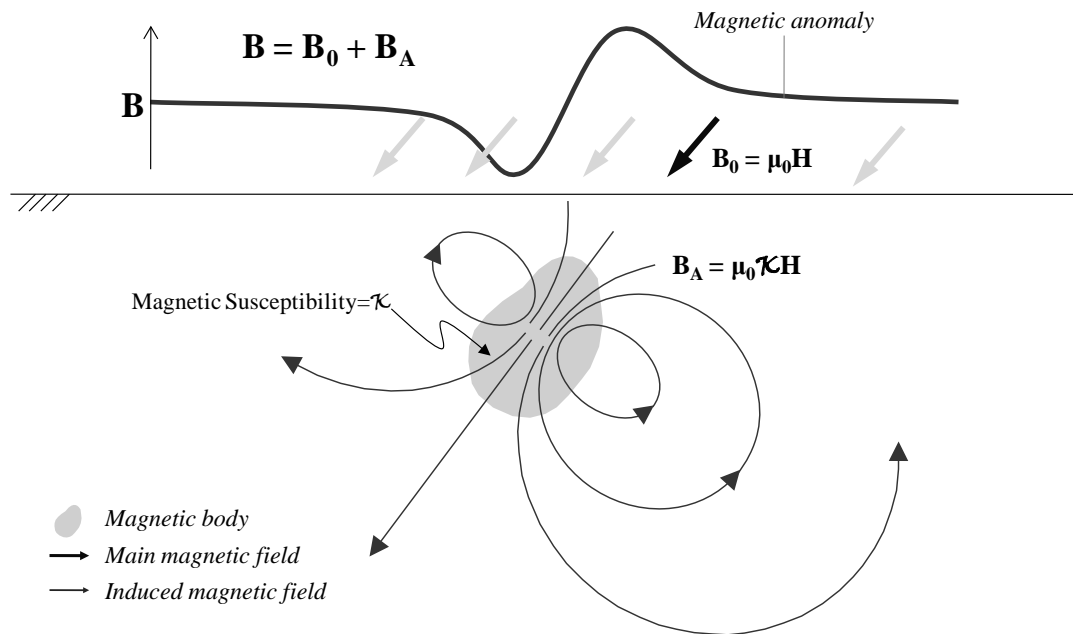


圖 1 磁力法之施測原理

2.2 岩層物性量測

A. 岩層磁感率量測

本計畫使用捷克 ZH instruments 公司製造的 SM-30 手提式磁感率量測儀量測岩層的磁感率，提供磁力資料解釋時之參考。現場作業前，先參考地質圖之岩層分布據以規劃行動路線，挑選具代表性岩層露頭進行量測。

B. 岩層電阻率量測

本計畫使用日本 OYO 公司製造的 miniOhm 露頭電阻量測儀量測岩層電阻率，提供瞭解岩層電性之參考。現場量測時需挑選平順表面，令四根電極探棒均勻接觸岩層表面，若岩層表面乾燥造成無法導電情況時，需小量澆水使岩層表面潮溼，以利量測作業。

三、研究成果

3.1 飛航現調與資料處理

本計畫於 2019/05/20 進駐關山臨時起降場，並完成拖鳥功能測試，2019/05/22 展開飛航作業，為避免受雲霧影響飛行，每日始曉即展開飛航作業，至 2019/05/27 共飛行 7 架次，完成所有測線之飛航現調任務。合計完成 50 條測線及檢核線，測線長度約 1,044 公里(圖 2)。所測得資料品質參考中國國土資源部的航空磁測技術規範，均屬於品質良好的第 1 級資料。

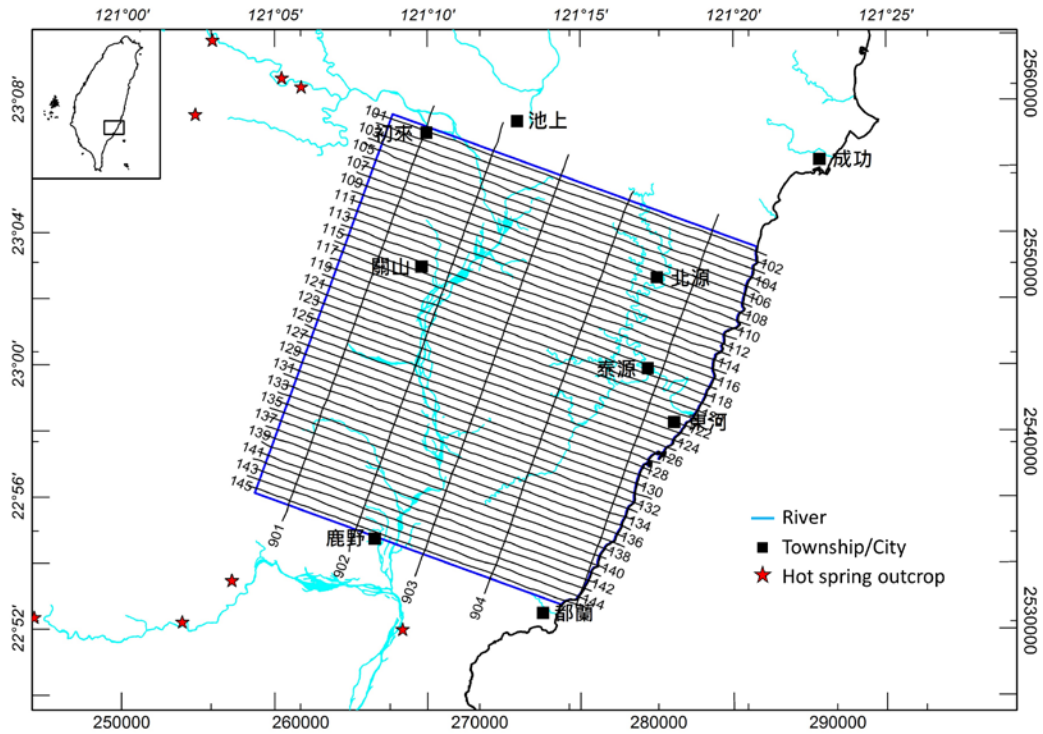


圖 2 經整編過後的測線軌跡圖

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。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 3 所示為經歸極換算處理後之全磁力強度圖。

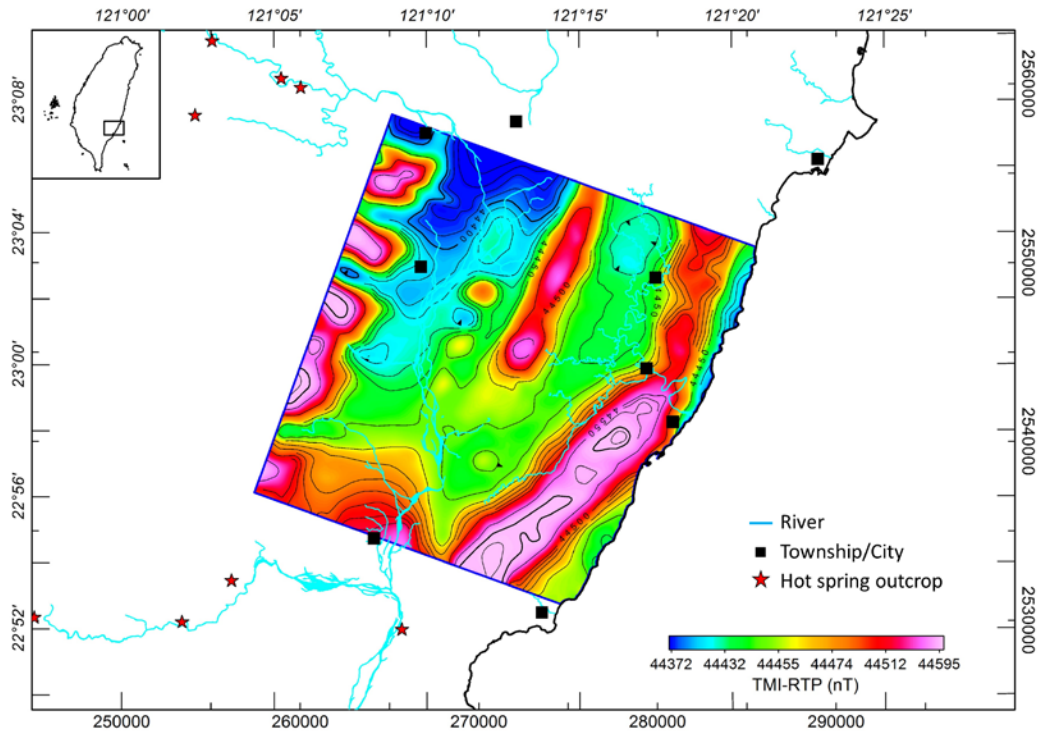


圖 3 經歸極換算後的全磁力強度圖

3.2 岩層物性特徵

為瞭解不同岩層的磁力及導電特性，本計畫搜尋調查範圍內代表性地層露頭，量測其磁感率(magnetic susceptibility)與電阻率(resistivity)，總計完成 46 處露頭磁感率與電阻率量測。各量測點位置基本資訊及量測結果分析如下：

A. 磁感率與地層關係

圖 4 為露頭量測之磁感率與地層關係圖，顯示利吉層內的超基性岩塊具有很高的磁感率，最高達 0.041 SI，利吉層內的泥質及砂岩等材料的磁感率則很低，約低於 0.0001 SI，故造成利吉層整體岩層的磁感率變動範圍較大。都鑾山層含有厚層火成岩，其磁感率平均約 0.00476 SI。蕃薯寮層內因含火山岩礫石，故其磁感率高於海岸山脈的八里灣層及脊樑山脈的板岩及片岩，其磁感率平均約 0.00204 SI。其餘脊樑山脈的初來層板岩及高嶺片岩與海岸山脈的八里灣層，其磁感率相差不大，平均約 0.0000657 SI 至 0.000296 SI 間。

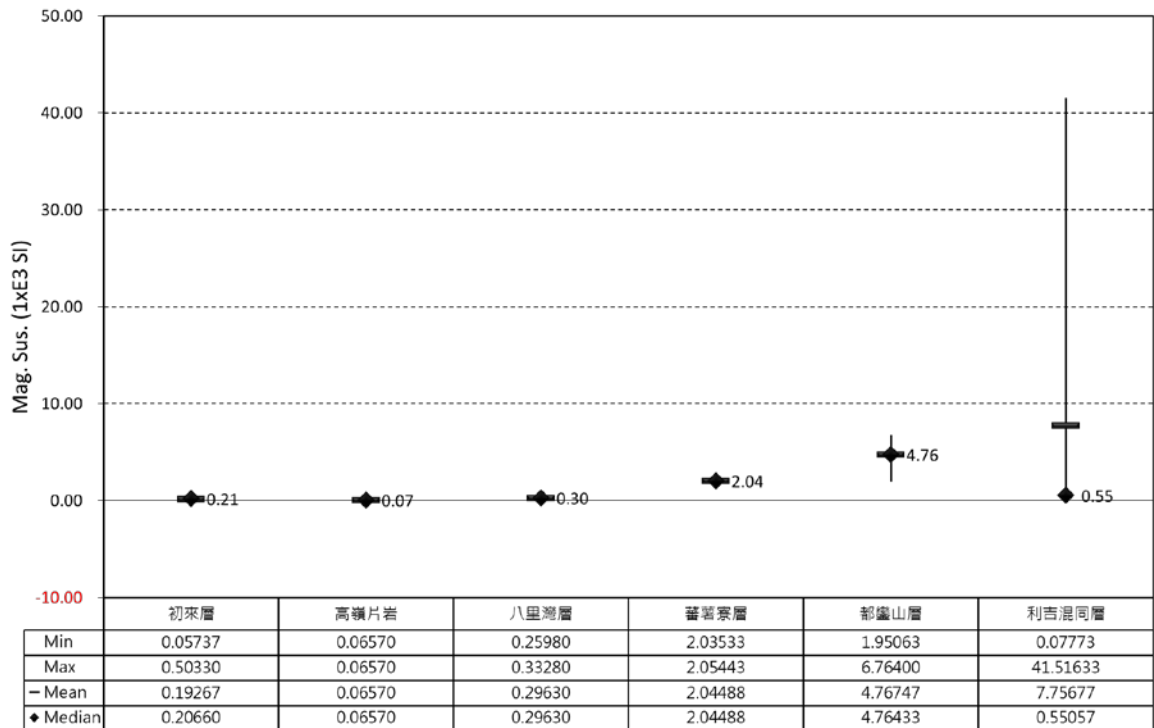


圖 4 研究區域內磁感率與地層的關係圖

B. 電阻率與地層關係

圖 5 為露頭量測之電阻率與地層關係圖，顯示脊樑山脈地層的電阻率平均高於 1000 ohm-m，普遍高於海岸山脈地層的電阻率。海岸山脈地層除利吉層內的超基性岩塊具有較高電阻率(最高達 1112 ohm-m)外，其它地層的平均電阻率約介於 54 ohm-m 至 135 ohm-m 間。

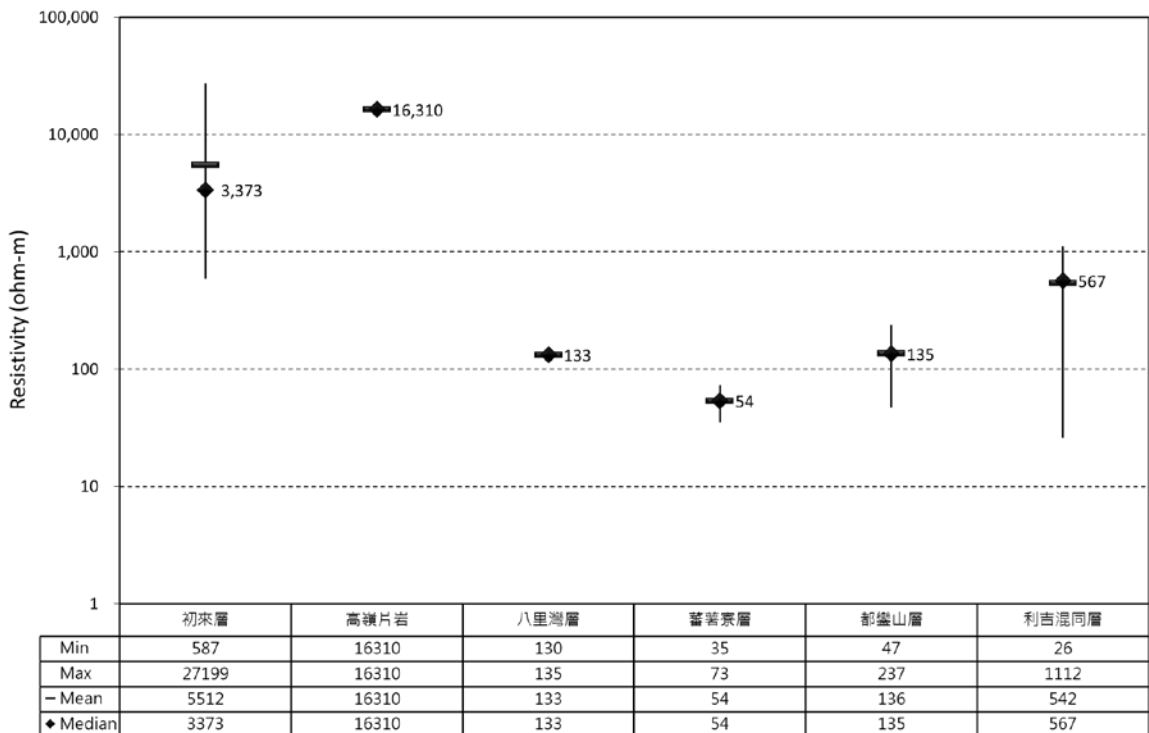


圖 5 研究區域內電阻率與地層的關係圖

3.3 磁力特徵解釋

A. 磁力強度特徵

依據全磁力強度圖上磁力強度相對的高低分布(圖 6)，可將調查區內歸納為 4 類磁力高區($CR_{H9} \sim CR_{H13}$ 、 $C_4 \sim C_6$ 、 $C_{H4} \sim C_{H5}$ 、 LV_H)及 2 類磁力低區(LV_L 、 $C_{L1} \sim C_{L2}$)，說明如下：

(A) $CR_{H9} \sim CR_{H13}$ 磁力高區呈條帶分佈於調查區西側脊樑山脈區域，概略對應脊樑山脈的初來層，條帶內有 5 個較大的磁力異常體，呈現不連續分布，分別以 CR_{H9} 至 CR_{H13} 代號表示，有可能是潛伏在片岩層內的超基性岩體。

(B) $C_4 \sim C_6$ 磁力高區呈連續性高磁條帶狀分布，與海岸山脈都鑾山層位置大略一致， C_4 及 C_5 兩條帶狀磁力高區自調查區北側向南延伸，兩條帶間為寬廣的泰源盆地。 C_5 至東河附近與另一 C_6 條帶高磁岩體相接， C_4 條帶高磁岩體寬度明顯小於 C_5 及 C_6 條帶高磁岩體。 C_6 條帶高磁岩體的磁力強度明顯高於 C_4 及 C_5 條帶高磁岩體。

(C) C_{H4} 、 C_{H5} 為規模相對較小，且似與 C_4 條帶高磁分離的二個小規模磁力高區，分布海岸山脈西緣電光一帶。

(D) LV_L 代表分布在縱谷的磁力低區，涵蓋縱谷平原區堆積層及海岸山脈的沉積層與利吉層，這些地層的磁力強度相差不大，在全磁力強度圖上不易分辨，但藉微分磁力異常圖的磁力特徵分析則能加以辨識。 LV_H 代表調查區南側縱谷內的局部磁力高區，其南側為鹿野高台。

(E) C_{L1} 及 C_{L2} 代表磁力低區，位於海岸山脈區域。 C_{L1} 包括海岸山脈至海岸線間的沉積岩區， C_{L2} 則反映泰源盆地的地層特性。

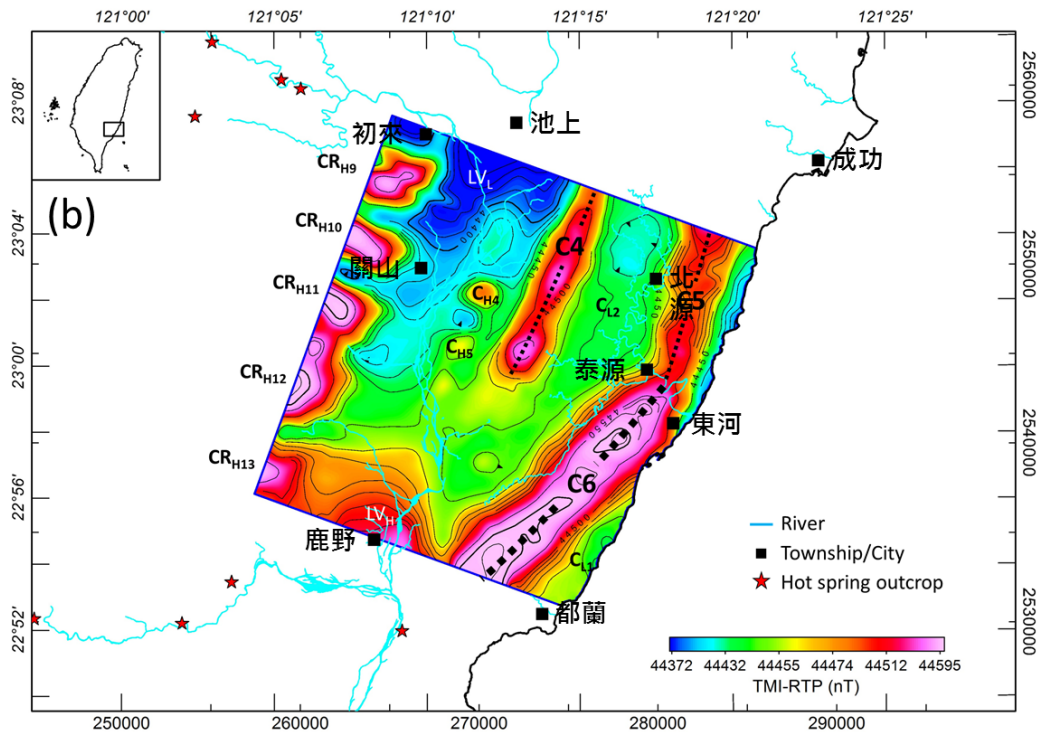
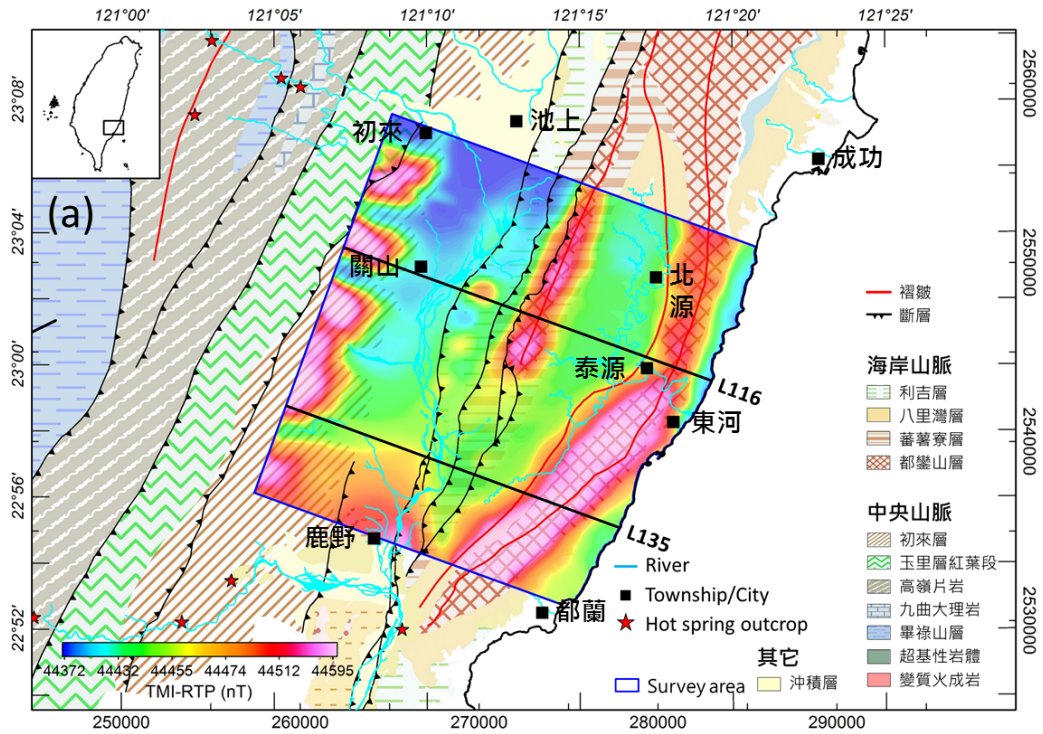


圖 6 (a)經歸極換算處理之全磁力強度圖；(b)經歸極換算及一次垂直微分處理之微分磁力異常圖。

B. 磁力趨勢特徵

磁力趨勢(magnetic trend)可用以輔助構造分析，本報告使用經二次垂直微分的磁力

異常圖作為底圖，以黑色粗線標示磁力高區之磁力趨勢線，如圖 7 所示，圖 8 為各磁力趨勢方位角之統計圖，顯示磁力趨勢線以西北西方向及北北東方向為主。

圖 9 為經歸極換算及二次垂直微分處理後之磁力異常圖套疊已知之斷層線，顯示磁力異常與已知斷層位置大致匹配良好，斷層線兩側之磁力趨勢線及磁力強度確有明顯差異，故由磁力趨勢線與磁力強度等特徵的變化，能作為辨識斷層構造或進一步查證斷層位置的手段。暗示磁力異常圖能彌補地表斷層調查在判定斷層分布時，露頭數量不足的窘境。

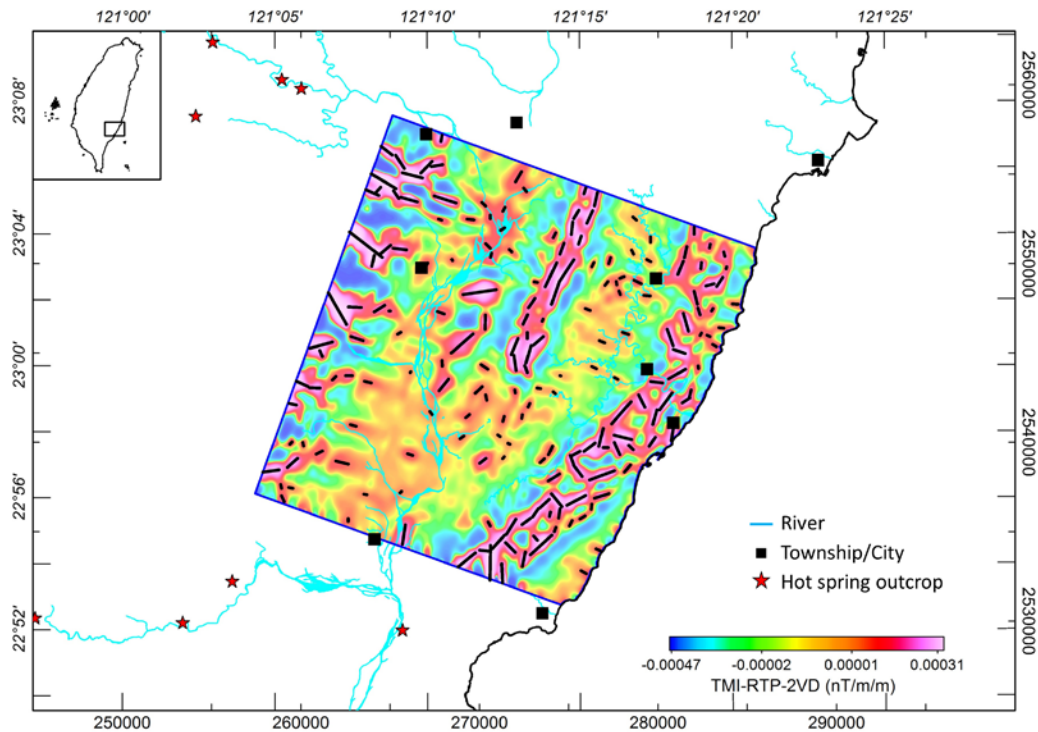


圖8：磁力趨勢分布圖(黑色粗線為磁力趨勢，底圖為經歸極換算及二次垂直微分處理後之磁力異常圖。)

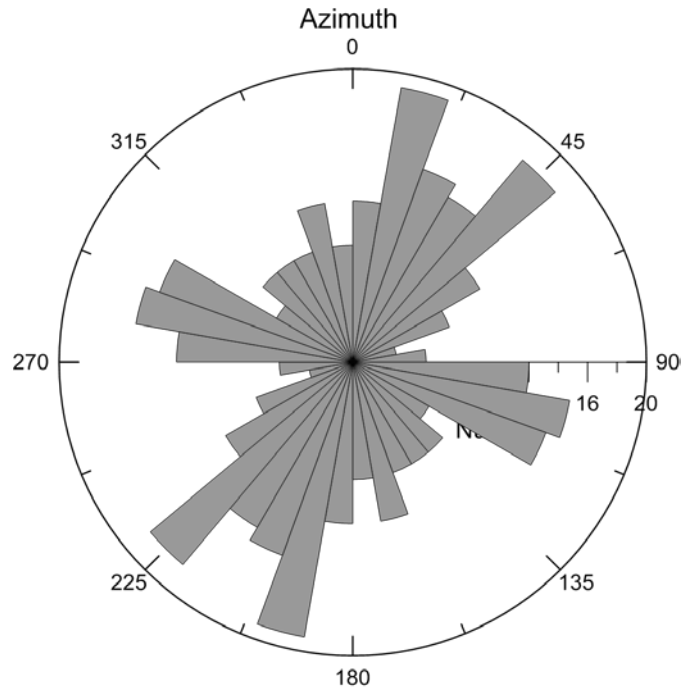


圖8：磁力趨勢線方位角玫瑰圖

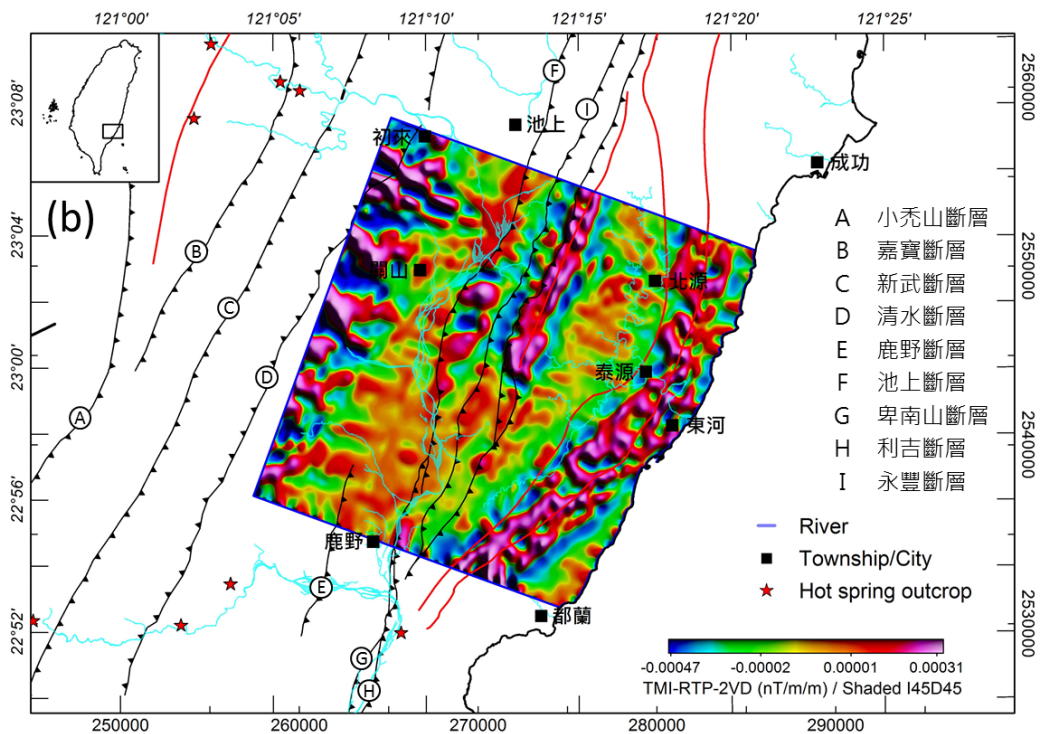
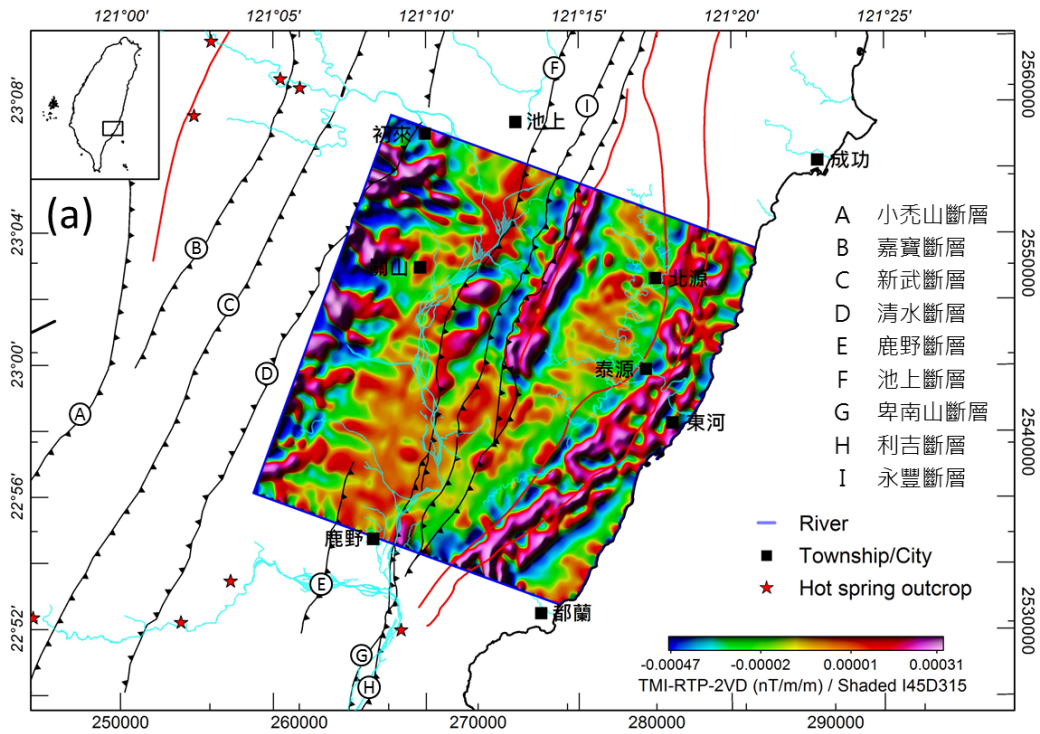


圖9：磁力異常圖套疊斷層分布圖（底圖係經歸極換算及二次垂直微分處理。(a)日照傾角 45° ，方位角 315° ；(b)日照傾角 45° ，方位角 45° 。)

3.4 磁體三維分布

依據三維逆推所獲得之三維磁感率模型(圖10)，地下磁體之空間分布與磁力特徵分析如下：顯示脊樑山脈高磁岩體呈塊狀不規則分布，且大致在高程-1 km以下逐漸消失。這

些塊狀高磁岩體，其磁化向量的方向沒有一致性，多數與現今本區地球磁場的磁偏角(-4.0°)及磁傾角(34.1°)不一致，顯示這些高磁塊體之磁性主要受殘磁力影響，且曾經因受不同程度的翻轉。海岸山脈高磁岩體亦有塊狀特徵，且主要分布在高程約-1 km以上，明顯呈現北北東轉西南方向之條帶狀分布，磁化向量的磁偏角多數呈西北西方向，但角度相差不是很大。暗示海岸山脈的火山岩在板塊推擠的過程中，高磁岩體曾發生一致性以旋轉為主的運動。隨著深度增加，岩體條帶狀分布的現象愈顯著，約高程-4 km以下，探測區域內可約略分為2個顯著的條帶狀基盤，分別位於脊樑山脈與海岸山脈下方。

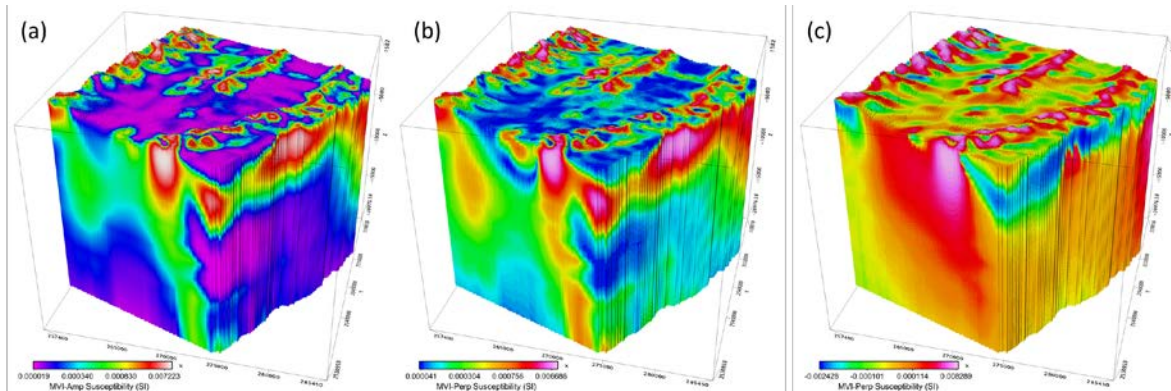


圖10三維磁感率模型立體圖(a)磁化向量磁感率剖面；(b)非感應分量磁感率剖面；(c)感應分量磁感率剖面。

3.5 磁力地質解釋

綜合經歸極換算後的全磁力強度圖、經一次垂直微分的磁力異常圖、磁力強度分析、磁力趨勢分析結果、磁力線形分析結果、磁化向量模型及三維磁感率模型，由西向東各地質區反映的地質特徵綜合說明如下：

A. 脊樑山脈地質區片岩帶

106年度測區出露打馬燕構造地塊，以及107年度測區出露在清水溪構造地塊，均是具有磁力條帶異常特徵的海洋地殼高磁塊體延伸至地表的部份。在108年度測區出露地點僅西北端靠近南橫一小部分的玉里帶。大部分都下伏在脊樑山脈板岩帶，並往花東縱谷與海岸山脈下方延伸，與106至107年度測區所見相同，主要為中新世海洋地殼基盤形成的推覆體構造，塊體間存在條帶磁力異常特徵，可辨認出覆瓦狀構造，玉里帶出露海洋地殼物質處可能為構造窗(如清水溪構造地塊)，而打馬燕構造地塊若下伏為板岩層則可能視為飛來峰；此外，三維磁感率模型上呈現出南北向、近乎垂直的橫移斷層帶發育，兩側海洋地殼磁力特性相異，可鑒別為轉形斷層構造，位於脊樑山脈地質區板岩帶與片岩帶的交界(即清水斷層)。海洋地殼下方低磁性高溫地殼物質，可能穿過轉形斷層帶，以浮力方式上湧至淺部，形成高溫溫泉區的熱源。故地熱區與轉形斷層分布有密切關係。

B. 脊樑山脈地質區板岩帶

脊樑山脈板岩帶在測區出露為初來層(或往南延伸至鹿野溪，對比至紅葉層及馬里層；或往北延伸可對比至106年測區的崙山層)，主要為變質泥岩類的板岩、千枚岩及變質砂岩，亦即大部分地層均不含殘磁礦物，且沈積年代可能為中新世(陳文山等，2016；林

啟文、林偉雄，2005)。在三維磁感率模型中，顯示板岩帶的分布在北東向褶皺構造的淺部，板岩帶在感應分量磁感率分析上，顯示板岩帶仍生長了磁性礦物，其磁場方向與今日相近，往下延伸約2 km即尖滅，其下為高磁力地塊，此觀察與106至107年度測區一致。

C. 花東縱谷

花東縱谷在測區地層為堆積淺海至陸相的卑南山礫岩。顯示花東縱谷地質區，沈積層屬於低磁特性，但池上斷層兩側沈積層明顯磁性特徵有別。另一方面，在感應分量磁感率分析上，高程等於-250 m之高程切面顯示許多東北-西南向高磁力條帶，與106至107年測區所見類似，可能反映池上斷層長期左移活動下，原本在海洋水體中沉降來自東西向河道的磁性礦物堆積層，逐漸在南北向橫移斷層帶(鹿野斷層、池上斷層及卑南山斷層等)長期作用下，在花東縱谷中分布成東北-西南向條帶。

透過三維磁感率模型來鑒別橫移斷層帶的向下延伸性，顯示鹿野斷層、池上斷層與卑南山斷層向下延伸，在海洋地殼高磁基盤中合為近乎垂直的斷層構造，靠斷層帶兩側同樣高磁性基盤確具有磁極相反特性，此類板塊邊界存在的垂直且橫移構造，屬於轉形斷層特徵，如同106-107年度的發現，池上斷層以近乎垂直向下延伸至15 km處，可能在韌性變形帶中消失。

沈積層東界可能為利吉層，屬於深部剪切帶，沈積層底部或靠近利吉層附近均有海洋地殼物質的磁力特徵，可能反映池上橫移斷層與利吉逆衝斷層交互作用下，海洋地殼物質逆衝到沈積盆地中。利吉層可視為中新世隱沒帶與菲律賓海板塊長期存在的分界(陳文山等，2016)，在三維磁感率模型上確實呈現了海洋地殼基盤的差異，在利吉層西側為中新世曾經隱沒而變形變質的海洋地殼，而東側則可能為未變形變質的白堊紀海洋地殼。

D. 海岸山脈

海岸山脈地質區測區範圍的地層由白堊紀高磁性具條帶磁力異常特徵的海洋地殼、高磁性的火山岩體及低磁性的深海沈積層所組成。在經一次微分處理的磁力異常圖上，較高磁力特徵反映在成廣澳火山岩體及都鑾山火山岩體分布位置，低磁力特徵區域則對應八里灣層及蕃薯寮層；區域性背斜軸部位於火山體位置，反映在三維磁感率模型的東西向剖面，可明顯看出火山岩體與泰源盆地的背斜構造與向斜構造；另外，從三維磁感率模型的-250m水平切面來看，則顯示火山體背斜軸部仍有許多複褶皺構造控制；特別是泰源盆地西側切東北-西南向剖面，可看到泰源盆地向斜軸西側地層反映的複褶皺特徵。此一現象與脊樑山脈板岩帶後期複褶皺特徵類似，暗示本區岩體與沈積盆地的構造，在弧陸碰撞作用之後仍持續受到橫移斷層作用的影響。另一方面，若從三維磁感率模型的-250m水平切面來看泰源盆地沈積層的磁力特性，顯示早期蕃薯寮層磁力特性沈積物層(含火山物質)以東西向堆積並橫跨泰源盆地，且類似花東縱谷一樣，此區也受到橫移構造影響而使此磁力特性沈積物變成東北-西南向分布，暗示泰源盆地沈積早期也有一近乎南北向橫移斷層活動的影響，說明弧陸碰撞前已存在轉型斷層活動的紀錄，影響了泰源盆地早期沈積層的變形作用；而後弧陸碰撞作用形成碰撞盆地後，轉形斷層仍持續活動影響下，仰衝上陸的海岸山脈火山岩體及泰源盆地因而形成了複褶皺構造。

四、結論與建議

本計畫產出網格間距為100 m的高精度全磁力網格，並運用三維磁化向量逆推技術，獲得高解析的三維磁化向量模型。藉由分析磁力特徵並與既有地質圖比對，對研究區域內之岩體分布、礦產資源、基盤結構、火山活動及弧陸碰撞作用等提供了進一步的資訊。總括本計畫獲得的主要結論與建議擇要敘述如下：

A. 磁力特徵

- (1) 脊樑山脈淺層高磁異常體對應超基性岩體，呈塊狀分布，由磁化向量方向不具一致性，推測岩體受到程度不等的轉動所致。板岩帶、縱谷平原及利吉層主要為海洋沈積物形成的岩層，屬於磁力低區。海岸山脈磁力高區對應火山岩體，其帶狀高區間的磁力低區，則對應弧間盆地。
- (2) 依據磁力趨勢線判釋磁力構造線形，主要以近南北、東北向及西北西走向為主，與甚低頻電磁探測獲得的電性走向一致。
- (3) 海岸山脈由三條高磁條帶岩體構成，其寬度與向下延伸的深度均不相同，分別位於泰源盆地東西兩側，東側之高磁條帶向南延伸至東河附近與另一條磁力強度更高的高磁岩體相接。
- (4) 依據海岸山脈岩體的磁化向量分析，顯示淺部岩體有塊狀特徵，主要分布在高程約-1 km以上，多數高磁岩體磁化向量的磁傾角具有一致性，暗示海岸山脈在板塊推擠的過程中，高磁岩體曾發生一致性以旋轉為主的運動。由不同深度磁體分布，顯示海岸山脈在板塊推擠過程中，有可能因西側岩體的阻擋力量強弱不同，故造成海岸山脈岩體沿西北方向產生破裂位移，且部份破裂自深層延伸至淺層，有可能成為深層流體通道的關鍵。
- (5) 研究區域深部的高磁基盤與前年度測得的高磁性基盤特性相近，顯示南北具有延伸性，呈北北東方向條狀分布。在本年度探測範圍內比較顯著的高磁條帶基盤共有2組，分別位於脊樑山脈板岩帶及海岸山脈下方，均具有兩相鄰條帶間磁化方向近乎相反的海洋地殼特徵。

B. 地質解釋

- (1) 海岸山脈基盤為白堊紀海洋地殼，如同106及107年度測區所見，呈現出條帶磁力異常的海洋地殼特徵。
- (2) 分析都鑾山火成岩體的磁化向量特性，顯示多次噴發活動形成的磁力特性具有層狀火山特徵，且後期冷卻形成火山頸形貌。
- (3) 玉里帶向東向下延伸的海洋地殼高磁力地塊，存在板岩層及花東縱谷下方，歷經中新世隱沒作用與仰衝作用，維持覆瓦狀構造形貌。
- (4) 在磁感率模型上，利吉層以西為中新世海洋地殼覆瓦狀基盤，以東為位於中新世火山島弧下方的白堊紀海洋地殼殘存基盤；利吉斷層截切過泰源盆地沈積層的深部，反映弧陸碰撞的影響下泰源盆地沈積層便形成兩層構造。
- (5) 泰源盆地沈積層的磁性紀錄顯示沈積同時受橫移斷層活動，類似花東縱谷碰撞盆地沈積物受池上斷層影響下的磁性沈積紀錄，可能隱示弧陸碰撞作

用前即存在轉形斷層帶。

(6) 測區存在3條高磁性條帶，均以高角度橫移斷層為分界，構造兩側磁力方向相反，據此鑒別出位於中央山脈斷層、池上斷層及海岸山脈火山岩體下方，存在高角度、北北東向、橫移活動的轉形斷層帶。

(7) 轉形斷層帶提供海洋地殼下方高熱大陸地殼物質上湧通道，與地熱分布息息相關。

C. 建議分年完成全國性空中磁力探測，建立完整國土基本資料

本計畫在地調所支持下，將空中磁力探測技術引進國內，並應用在臺灣地區的地質探測、火山探測及地熱資源探勘等領域，獲得豐碩的成果，證實空中磁力探測技術是非常有效的地質探測技術，其不受地形及海域影響，能取得均勻分布的測點，並進而獲致高解析三維磁力模型的優勢，是其它地面或海面探測方法所無法比擬的。台灣地區地勢陡峭且植被茂密，現地調查資料取得不易，導致對地質、地熱及資源蘊藏等資訊仍不夠充足，空中磁力探測能彌補此一空白，成為各項地質資源開發與地質研究的基石。建議以每年規畫完成約6500 km²面積之空中磁力探測，則估計約四至五年可以完成臺灣山地區域的探測。

D. 建議增加地面查核與驗證探測

完整的空中探測需要搭配適量的地面查核，以提高解釋成果的可靠性，故建議依據當年度空中磁力探測成果，規畫進行二維剖面或特定區域之地面大地電磁探測，並進行三維逆推，由不同物性角度，相互驗證物性模型的合理性。

E. 建議自本期探測範圍向四面擴大探測，以提昇對台灣東部地體架構的瞭解

本期計畫已獲得花東縱谷南段重要的地質構造資訊，若能向北延伸至花蓮與既有資料銜接，並請向東延伸約30公里，向西延伸至脊樑山脈稜線、向南延伸至恆春，將更有助於建構完整的臺灣東部地體構造模型。

五、參考文獻

1. 中國國土資源部（2010）。航空磁測技術規範，共 56 頁。
2. 王源、楊昭男、陳文山（1992）。五萬分之一臺灣地質圖及說明書-第 48 號，玉里圖幅。經濟部中央地質調查所。
3. 台灣溫泉探勘服務網（2018），富里溫泉，擷取自：
<http://www.twem.idv.tw/2/a124.htm>，2018/12/14。
4. 石政為（2011）。利用反射震測探討宜蘭平原之基盤深度及構造演化。國立中央大學碩士論文，共 110 頁。
5. 衣德成、陳治宇、林慶偉（2012）。五萬分之一臺灣地質圖及說明書-第 41 號，光復圖幅。經濟部中央地質調查所，共 95 頁。
6. 李清瑞、江道義、陳榮揮（1994）。台灣地熱探勘資料彙編，經濟部能源委員會，共 557 頁。

7. 林偉雄、林啟文、劉彥求、陳柏村 (2008)。五萬分之一臺灣地質圖及說明書-第 59、64 號，台東、知本圖幅。經濟部中央地質調查所，共 58 頁。
8. 林啟文、林偉雄 (2005)。臺灣東部鹿野地區之地質構造研究。經濟部中央地質調查所彙刊，第 18 號，第 29 - 52 頁。
9. 林啟文、陳文山、劉彥求、陳柏村 (2009)。臺灣東部與南部的活動斷層。經濟部中央地質調查所特刊，第 23 號，共 178 頁。
10. 林啟文、盧詩丁、陳文山 (2012)。臺灣活動斷層分布圖 2012 年版說明書，經濟部中央地質調查所特刊，第 26 號，第 1 - 30 頁。
11. 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。
12. 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，國立臺灣大學，地質科學研究所，博士論文，共 236 頁。
13. 洪崇勝、謝凱旋 (2007)。臺灣第四紀磁生物地層及蓬萊造山運動事件。經濟部中央地質調查所特刊，第十八號，第 51 - 83 頁。
14. 徐鐵良 (1956)。臺灣東部海岸山脈地質。臺灣省地質調查所彙刊，第 8 號，15 - 41 頁。
15. 陳文山 (1998)。臺灣海岸山脈沈積盆地之演化及其在地體構造上之意義。國立臺灣大學地質研究所博士論文，共 304 頁。
16. 陳文山、王源 (1996)。臺灣東部海岸山脈地質。經濟部中央地質調查所，臺灣地質之七，共 101 頁。
17. 陳文山、王源 (1997)。五萬分之一臺灣地質圖及說明書-第 42 號，豐濱圖幅。經濟部中央地質調查所。
18. 陳文山、俞何興、俞震甫、鍾孫霖、林正洪、林啟文、游能悌、吳逸民、王國龍 (2016)。臺灣地質概論。中華民國地質學會。共 204 頁。
19. 游明芳 (2013)。宜蘭南側地區地質構造調查與地熱地質分析。能源國家型科技計畫 - 102 年地熱發電主軸計畫成果發表會論文集，第 15 頁。
20. 經濟部中央地質調查所 (2012)。臺灣北部火成岩體及地質構造空中地球物理探測 (1/2)，經濟部中央地質調查所委託研究報告，共 226 頁。
21. 經濟部中央地質調查所 (2013a)。臺灣北部火成岩體及地質構造空中地球物理探測 (2/2)，經濟部中央地質調查所委託研究報告，共 170 頁。
22. 經濟部中央地質調查所 (2013b)。易淹水地區上游集水區地質調查與資料庫建置，共 192 頁。
23. 經濟部中央地質調查所 (2014)。臺灣北部陸海域地區空中磁力探測 (1/2)。經濟部中央地質調查所委辦計畫報告，共 275 頁。
24. 經濟部中央地質調查所 (2016)。臺灣北部陸海域地區空中磁力探測 (2/2)。經濟部中央地質調查所委辦計畫報告，共 193 頁。

25. 經濟部中央地質調查所 (2017a)。臺灣南段山區流域水文地質調查及圖幅繪編 (4/4)。經濟部中央地質調查所委辦計畫報告，共 226 頁
26. 經濟部中央地質調查所 (2017b)。臺灣東部地區空中磁力探測(1/3)。經濟部中央地質調查所委辦計畫報告，共 183 頁。
27. 經濟部中央地質調查所 (2018)。臺灣東部地區空中磁力探測(2/3)。經濟部中央地質調查所委辦計畫報告，共 218 頁。
28. 賴序衡、鄧屬予 (2016)。海岸山脈南段泰源盆地的地層與構造。經濟部中央地質調查所彙刊，第 29 號，第 45 - 76 頁。
29. 賴昱銘 (2012)。北呂宋島弧的火山與岩漿演化。臺灣大學地質科學研究所博士論文。共 216 頁。
30. 羅煥記、陳文山、宋聖榮 (1993)。五萬分之一臺灣地質圖及說明書-第 54、60 號，成功、東河圖幅。經濟部中央地質調查所。
- 31.
32. Beamish, D. (1994). Two-dimensional, regularised inversion of VLF data. *Journal of Applied Geophysics* 32, 357–374.
33. Beyssac, O., Simoes, M., Avouac, J.P., Farley, K.A., Chen, Y.G., Chan, Y.C., and Goffe, B. (2007). Late Cenozoic metamorphic evolution and exhumation of Taiwan. *Tectonics*, 26, TC6001, doi:10.1029/2006TC002064.
34. Brown, D., Wu, Y.M., Feng, K.F., Chao, W.A. and Huang, H.H. (2015). Imaging high-pressure rock exhumation in eastern Taiwan. *Geology*, v. 43, 651–654.
35. Chai, H.T.B. (1972). Structure and tectonic evolution of Taiwan. *American Journal of Science*, 272, 389–422.
36. Chen, W.-S., Chung, S.L., Chou, H.Y., Zugerbai, Z., Shao, W.Y. and Lee, Y.H. (2017). A reinterpretation of the metamorphic Yuli belt: Evidence for a middle-late Miocene accretionary prism in eastern Taiwan, *Tectonics*, 36, doi:10.1002/2016TC004383.
37. Chi, W.C., Chen, L.W., Liu, C.S. and Rookfield, M. (2014). Development of arc-continent collision mélange: linking onshore geological and offshore geophysical observations of the Pliocene Lichi Melange, southern Taiwan and northern Luzon arc, western Pacific. *Tectonophysics*, 636, 70–82.
38. Chim, L.K., Yen, J.Y., Huang, S.Y., Liou, Y.S. and Tsai, L.L. (2018). Using Raman spectroscopy of carbonaceous materials to track exhumation of an active orogenic belt: an example from Eastern Taiwan. *Journal of Asian Earth Sciences*, 164, 248–249.
39. Chung, S.L. and Sun, S.-s. (1992). A new genetic model for the East Taiwan ophiolite and its implications for Dupal domains in the Northern Hemisphere. *Earth and Planetary Science Letters*, v. 109, 133–145.
40. Constable, S.C., Parker, K.L., and Constable, C.G. (1987). Occam's inversion: A practical algorithm for generating smooth models from EM sounding data. *Geophysics*, 52, 289–300.

41. Denisse, L.A., Tejero, A, Chavez, R.E., Lopez, P.A. and Bravo, R. (2009). 3D modeling of magnetic data from an archaeological site in north-western Tlaxcala state, Mexico. *Journal of Archaeological Science*, 36. 1661–1671.
42. Deschamps, A., Monie, P., Lallemand, S., Hsu, S.K., and Yeh, K.Y. (2000). Evidence for Early Cretaceous oceanic crust trapped in the Philippine Sea Plate. *Earth and Planetary Science Letters*, 179, 503–516.
43. Donald, S. (1968). A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data. *Proceedings of the 1968 ACM National Conference*. 517–524.
doi:10.1145/800186.810616
44. Doo, W.B., Kuo-Chen, H., Brown, D., Lo, C.L., Hsu, S.K. and Huang, Y.S. (2016). Serpentinization of the fore-arc mantle along the Taiwan arc-continent collision of the northern Manila subduction zone inferred from gravity modeling. *Tectonophysics*, 691, 282 – 289.
45. Dutra, A.C. and Marangoni, Y.R. (2009). Gravity and magnetic 3D inversion of Morro do Engenho complex, Central Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 28, 193–203.
46. Ellis, R.G. , de Wet, B. and MacLeod, I.N. (2012). Inversion of magnetic data for remanent and induced sources. *ASEG Extended Abstracts 2012*, 1–4.
47. Figgis, B.N. and Lewis, J. (1960). The magnetochemistry of complex compounds. In Lewis J. and Wilkins, R.G. (ed.). *Modern Coordination Chemistry*. New York, Wiley.
48. Fraser, D.C. (1969). Contouring of VLF-EM data. *Geophysics*, 34, 958–967.
49. Fraser, D.C. (1981). A review of some useful algorithms in geophysics. *CIM Bulletin* 74, No. 828, 7–79.
50. Grant, F.S., and West, G.F. (1965). *Interpretation theory in applied geophysics*.
51. Grauch, V.J.S., Hudson, M.R. and Minor S.A. (2001). Aeromagnetic expression of faults that offset basin fill, Albuquerque basin, New Mexico. *Geophysics*, 66, No. 3, 707–720.
52. Hall, R. (2002). Cenozoic geologic and plate tectonic evolution of SE Asia and the SW Pacific: Computer-based reconstructions, model and animations: *Journal of Asian Earth Sciences*, v. 20, 353–431, doi:10.1016/S1367-9120(01) 00069-4.
53. Hsieh, H.H., Chen, C.H., Lin, P.Y. and Yen, H.Y. (2014). Curie point depth from spectral analysis of magnetic data in Taiwan. *Journal of Asian Earth Sciences*, 90, 26–33.
54. Jaques, A.L., Wellman, P., Whitaker, A. and Wyborn, D. (1997). High-resolution geophysics in modern geological mapping. *AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics*, 17, No. 2, 159–173.
55. Jeng, Y., Lin, M.J. and Chen, C.S. (2004). A very low frequency-electromagnetic study of the geo-environmental hazardous areas in Taiwan. *Environmental Geology*, 46, 784–795.

56. Jeng, Y., Lin, M.J., Chen, C.S. and Wang, Y.H. (2007). Noise reduction and data recovery for a very low frequency electromagnetic survey using the nonlinear decomposition method. *Geophysics*, 72, F223–F235.
57. Kao, R., Hwang, C.W., Kim, J.W., Ching, K.E., Masson, F., Hsieh, W.C., Le Moigne, N. and Cheng, C.C. (2017). Absolute gravity change in Taiwan: Present result of geodynamic process investigation. *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, 28, 855–875.
58. Karous, M. and Hjelt, S.E. (1983). Linear filtering of VLF dip-angle measurements. *Geophysical Prospecting*, 31, 782–794.
59. Keating, P. (1995). A simple technique to identify magnetic anomalies due to kimberlite pipes, *Exploration & Mining Geology*, 4, No. 2, 121–125.
60. Keyser, W.M. (2015). 玉里帶清水溪地區變質岩的岩石學與相平衡模擬。國立東華大學自然資源與環境學系碩士論文，共 216 頁。
61. Kim, K.H., Chen, K.C., Chiu, J.M. and Yen, H.Y. (2012). Crustal-Scale weak zone along a collisional suture revealed by spatial variations in velocity structures and seismicity. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 102, 436–444, doi: 10.1785/0120110025.
62. Kuo-Chen, H., Wu, F. T., Jenkins, D. M., Mechie, J., Roecker, S. W., Wang, C.Y. and Huang, B.S. (2012). Seismic evidence for the alpha-beta quartz transition beneath Taiwan from Vp/Vs tomography. *Geophysical Research Letters*, 39, L22302.
63. Lai, Y.M., Song, S.R., Lo, C.H., Lin, T.H., Chu, M.F. and Chung, S.L. (2017). Age, geochemical and isotopic variations in volcanic rocks from the Coastal Range of Taiwan: Implications for magma generation in the Northern Luzon Arc. *Lithos*, 272-273, 121–125.
64. Lallemand, S., Theunissen, T., Schnürle, P., Lee, C.S. Liu, C.S. and Font, Y. (2013). Indentation of the Philippine Sea plate by the Eurasia plate in Taiwan: Details from recent marine seismological experiments. *Tectonophysics*, 594, 60–79.
65. Lee, C.P., Hirata, N., Huang, B.S., Huang, W.G. and Tsai, Y.B. (2010). Evidence of a highly attenuative aseismic zone in the active collision orogeny of Taiwan. *Tectonophysics*, 489, 128–138.
66. Lee, C.R. and Cheng, W.T. (1986). Preliminary heat flow measurements in Taiwan. Fourth Circum-Pacific Energy and Mineral Resources Conference: August 17–22, 1986, Singapore.
67. Lin, A, Watts, A and Hesselbo, P., (2003). Cenozoic stratigraphy and subsidence history of the South China Sea margin in the Taiwan region. *Basin Res* 15:453–478. doi:10.1046/j.1365-2117.2003.00215.x
68. Lin, C.H. (2002). Active continental subduction and crustal exhumation: the Taiwan orogeny. *Terra Nova*, 14, 281–287.

69. Lin, M.L. (1999). Existence of the Chuochi Transverse Fault reconfirmed in Southeastern Taiwan and its tectonic implication. *Journal of the Geological Society of China*, 42, 69–84.
70. Lin, C.T., Harris, R., Sun, W.D. and Zhang, G.L. (2019). Geochemical and geochronological constraints on the origin and emplacement of the East Taiwan Ophiolite. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, v.20, <https://doi.org/10.1029/2018GC007902>.
71. Lu, C.Y. and Hsu, K.J. (1992). Tectonic Evolution of the Taiwan Mountain Belt, *Petroleum Geology of Taiwan*, No. 27, 21–46.
72. Luyendyk, A.P.J. (1997). Processing of airborne magnetic data. *AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics*, 17, No. 2, 31–38.
73. MacLeod, I.N. and Ellis, R.G. (2013). Magnetic vector inversion, a simple approach to the challenge of varying direction of rock magnetization. *ASEG Extended Abstracts 2013*, 1–6.
74. McEnroe, S. A., Brown, L. L. and Robison, P. (2004). Earth analog for Martin magnetic anomalies: remanence properties of hemo-ilmenite norites in the Bjerkreim-Sokndal intrusion, Rogaland, Norway. *Journal of Applied Geophysics*, 56, 195–212.
75. Mesalles, L., Mouthereau, F., Bernet, M., Chang, C.P., Lin, A. T., Fillon, C. and Sengelen, X. (2014). From submarine continental accretion to arc-continent orogenic evolution: The thermal record in southern Taiwan. *Geology*, Vol. 42(10), pp.907-910.
76. Mouyen, M., Masson, F., Hwang, C., Cheng, C.C., Le Moigne, N., Lee, C.W., Kao, R. and Hsieh, W.C. (2013). Erosion effects assessed by repeated gravity measurements in southern Taiwan. *Geophysical Journal International*, doi: 10.1093/gji/ggs019.
77. Mouyen, M., Simoes, M., Mouthereau, F., Masson, F., Hwang, C. and Cheng, C.C. (2014). Investigating possible gravity change rates expected from long-term deep crustal processes in Taiwan. *Geophysical Journal International*, Doi: 10.1093/gji/ggu133.
78. 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.
79. Pettit, W. (2009). Geophysical signatures of some recently discovered large kimberlite pipes on the Alto Cuilo concession in northeastern Angola, *Proceedings of the Ninth International Kimberlite Conference*, 106–115.
80. Shao, W.Y., Chung, S.L., Chen, W.S., Lee, H.Y. and Xie, L.W. (2015). Old continental zircons from a young oceanic arc, eastern Taiwan: Implications for Luzon subduction initiation and Asian accretionary orogeny. *Geology*, Vol. 43, pp. 479–482.
81. Shyu, J.B.H., Sieh, K. and Chen, Y.G. (2005). Tandem Suturing and Disarticulation of the Taiwan Orogen Revealed by its Neotectonic Elements, *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. 233, 167–177.

82. Spector, A. and Grant, F.S. (1970). Statistical models for interpreting aeromagnetic data. *Geophysics* 35, 293–302.
83. Swain, C.J. (1976). A FOTRAN IV program for interpolating irregularly spaced data using the difference equations for minimum curvature. *Computers & Geosciences*, 1, 231–240.
84. Thomas, M.Y., Avouac, J.P., Champenois, J., Lee, J.C. and Kuo, L.C. (2014). Spatiotemporal evolution of seismic and aseismic slip on the Longitudinal Valley Fault, Taiwan, *Journal of Geophysical Research, Solid Earth*, 119, 5114–5139, doi:10.1002/2013JB010603.
85. Tong, L.T. and Guo, T.R. (2007). Gravity Terrain Effect of the Seafloor Topography in Taiwan. *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, 18, 699–713.
86. 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.
87. Upton, P., Craw, D., Yu, B. and Chen, Y. G. (2012). Controls on fluid flow in transpressive orogens, Taiwan and New Zealand. In: Fagereng, A., Toy, V.G. and Rowland, J.V. (ed.) *Geology of Earthquake SourceL A Volume in Honour of Rick Sibson*. Geological Society, London, Special Publications, 359, pp.249-265.
88. Ustaszewski, K., Wu, Y.M., Suppe, J., Huang, H.H., Chang, C.H. and Carena, S. (2012). Crust–mantle boundaries in the Taiwan–Luzon arc-continent collision system determined from local earthquake tomography and 1D models: Implications for the mode of subduction polarity reversal. *Tectonophysics*, 578, 31-49.
89. Van Avendonk, H.J.A., McIntosh, K.D., Kuo-Chen, H., Lavier, L.L., Okaya, D.A., Wu, F.T., Wang, C.Y., Lee, C.S. and Liu, C.S. (2016). A lithospheric profile across northern Taiwan: from arc-continent collision to extension. *Geophysical Journal International*, 204, 331–346.
90. Verduzco, B., Fairhead, J.D., Green, C.M. and MacKenzie, C. (2004). New insights into magnetic derivatives for structural mapping. *The Leading Edge*, v.23(2), 116–119.
91. Wang, K.L., Chung, S.L., O'Reilly, S.Y., Sun, S.S., Shinjo, R. and Chen, C.H. (2004). Geochemical constraints for the genesis of post-collisional magmatism and the geodynamic evolution in the northern Taiwan region. *Journal of Petrology*, 45, 975–1011.
92. Wu, F.T., Kuo-Chen H. and McIntosh K. (2014). Subsurface imaging, TAIGER experiments and tectonic models of Taiwan, *J. Asian Earth Sci.*, doi:10.1016/j.jseaes.2014.03.024.
93. Wu, S.K., Chi, W.C., Hsu, S.M., Ke, C.C. and Wang, Y. (2013). Shallow crustal thermal structures of central Taiwan foothills region. *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, 24, 695-707, doi: 10.3319/TAO.2013.03.13.01(T).

94. Yeh, E.C. (2004). Structural evolution of slate belts: Examples from Taiwan and Eastern Pennsylvania. Ph. D. Thesis. The Pennsylvania State University, 207pp.
95. Yen, H.Y., Chen, C.H., Hsieh, H.H., Lin, C.R., Yeh, Y.H., Tsai, Y.B., Liu, J.Y., Yu, G.K. and Chen, Y.R. (2009). Magnetic survey of Taiwan and its preliminary interpretations. *Terr. Atmo. Ocean. Sci.*, Vol. 20, pp.309–314.
96. Yen, H.Y., Yeh, Y.H., Lin, C.H., Chen, K.J. and Tsai, Y.B. (1995). Gravity survey of Taiwan. *Journal of Physical Earth*, 43, 683–696.
97. Yu, S.B. and Tsai, Y.B. (1979). Geomagnetic anomalies of the Ilan plain, Taiwan. *Petroleum Geology of Taiwan*, 16, 19–27.