

中華民國第 56 屆中小學科學展覽會

作品說明書

高級中等學校組 地球與行星科學科

佳作

051909

以地殼均衡理論模擬臺灣地殼模型

學校名稱：國立臺南家齊女子高級中學

作者：	指導老師：
高二 蘇芷萱	曾建元
高二 蔡侑樺	楊佳勳
高二 盧淑君	

關鍵詞：地殼均衡理論、臺灣地殼模型

摘要

本研究利用地殼均衡理論研究臺灣地區合理的大陸地殼組成，以討論造山運動進行中的臺灣是否已達地殼均衡。由地殼均衡理論模擬大陸地殼的組成模型中，顯示以花岡岩、安山岩及玄武岩等三種岩石比例組成之模型最為接近現實中的地形高度。研究結果顯示，大陸地殼的組成以安山岩質為主，而花岡岩質與玄武岩質的相對比例之多寡則與當地的初始岩性為何者有關。臺灣玉山因岩性以板岩、片岩等密度較低的變質岩為主，故其大陸地殼組成比例呈現花岡岩質較玄武岩質高。臺灣由於受到弧陸碰撞的斜碰撞、以及碰撞點由北往南遷移的影響，模擬計算的海拔高度減去現實海拔高度所呈現之結果為該值由北向南增加，顯示受弧陸碰撞影響的造山運動之活躍度正由北往南遞增。

壹、研究動機

我們在本研究中主要要問位處在造山帶的臺灣，其地殼模型的型態為何？是否能吻合現今的地表樣貌？

為何地球的地形會有高山、丘陵、平原與海洋的起伏？在 18 世紀時，艾瑞認為不同的地形高度是由地殼厚度變化造成，地殼密度固定；普拉特則認為不同的地形高度是因為側向變化造成，岩石密度會改變（維基百科 1, 2016）。艾瑞與普拉特都曾試圖解釋為何地球表面會存在不同高度的地表特徵。1889 年時，美國地質學家達頓提出地殼均衡的概念。當一個區域達到了地殼均衡的狀態時，位於平衡面之上的岩石柱重量會相等，此時岩石柱會因組成岩石比例不同而造成總長度不均，也就會造成不同的地形起伏。然而，大陸地殼的組成是複雜的。若簡單的考慮大陸地殼的組成是單一岩性，那麼可以計算出合理的地殼模型並可以展現出合理的地形起伏嗎？再者，若把大陸地殼視為雙重岩性組成，那樣的地殼模型合理嗎？若用三種不同岩性組合作為大陸地殼的材料，這種地殼模型會更接近現實嗎？在實際的運用上，若以地球上地形的造山帶、地盾與海溝作為驗證，各以何種地殼模型最為合理？當然，大陸地殼的岩石組合，會隨著深度而密度增加，也就是說大陸地殼的岩性應該是連續變化的可能性最高，若是依照岩

性連續的概念，其建造的地殼模型是不是最合理？

臺灣處於一個造山運動進行中的地區，地表起伏大。我們想問的一個問題：臺灣是否已經達到了地殼均衡的狀態？也就是說造山活動是否已經讓地殼厚度增長而達到合理的地形起伏度？

貳、研究目的

- 一、利用地殼均衡理論建構不同岩性組合的大陸地殼，找出合理的大陸地殼是由何種岩性組合產生。
- 二、以實際運用的概念，將已知的造山帶、地盾、海溝三種地形，作為計算的驗證，探討何種地殼分層的方式最具合理性。
- 三、利用地殼分層的方式，計算臺灣的大陸地殼組成，找出合理的岩性比例。
- 四、依照岩性會隨著深度而密度增加的概念，用岩性密度連續增加的方法。以地殼均衡理論計算臺灣的地殼模型，比較現有已知的地殼模型，判斷臺灣造山活動是否已達到地殼均衡。

參、研究設備及器材

- 一、個人電腦與筆記型電腦
- 二、網際網路
- 三、Excel 軟體
- 四、Word 軟體
- 五、Google Earth 軟體
- 六、臺灣地區地震波速度剖面資料（資料來源：國立成功大學地球科學系地震學研究室）

肆、研究過程或方法

一、文獻探討

(一) 地殼均衡理論模型

1. 艾瑞的地殼均衡模型

艾瑞認為地殼都是由同樣密度、不同厚度的岩石所組成。因此岩石底部會相等，浮出海面的高度不同，造成我們所見的地殼有不同的海拔高度（圖 1 之（1））。

2. 普拉特的地殼均衡模型

普拉特認為地殼都是由不同密度、同樣厚度的岩石所組成。因此岩石底部會不同，浮出海面的高度也不同，造成我們所見的地殼有不同的海拔高度（圖 1 之（2））。

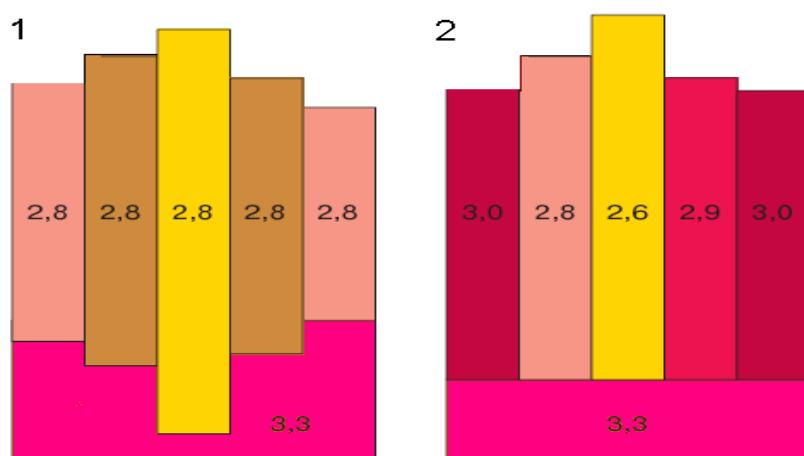


圖1.艾瑞地殼均衡模型（1）與普拉特地殼均衡模型（2）的示意圖。（維基百科 1，2016）

(二) 地震波與地殼組成

Poldervaart (1955) 首次發表大陸地殼的組成化學成分。基於地震波在各種不同類型岩石的速度，可以從地震速度變化估算合理的岩石配置。

Rudnick (1995) 在 *Nature* 期刊發表的文章，整理了地球物理以及地球化學的分析結果，將大陸地殼平均的組成成分加以統計之後，得到「大陸地殼平均組成成分應該比較接近安山岩」的結論。

Rudnick & Fountain (1995) 發表在 *Reviews of Geophysics* 上面的文章，說明若將大陸地殼劃分成四層，第一層用小於 5.7 km/sec 的 P 波速度，主要由沉積岩和火山岩。第二層的 P 波速度範圍從 5.7 至 6.4 km/sec，由花岡岩體或低度變質岩組成。第三層的 P 波速度範圍從 6.4 到 7.1 km/sec，由輝長岩和變質的麻粒岩組成。而第四層的 P 波速度變化，從 7.1 至 7.6 km/sec，在大多數情況下，該層可以是非常薄的或丟失。因此，在後者的情況下，第三層之下就是地函。

王乾盈等人 (2011) 發表有關臺灣莫氏不連續面的文章，說明發現南臺灣莫荷面速度為 7.8 km/sec，地殼厚度一般不超過 45 km。並且指出過去都以地震波到時進行速度構造反演來推測，但因震源位置及測站分佈不均，使得不同研究所獲得的構造有所差異，然而仍然可以得到臺灣島的地殼厚度從 30 km 到 50 km 不等深度的結論。其實，地震波速度構造掃描 (Seismic Tomography) 只是反演出震波在地表下的速度分佈，並無地層的觀念，因此不足以如岩石學般的指出地底下何種深度為哪種岩石的分佈情形。

二、研究步驟與方法

(一) 推導、歸納通式

1. 帕斯卡定律

根據帕斯卡定律，在液壓系統中的一個活塞上施加一定的壓力，必將在另一個活塞上產生相同的壓力增量。故我們可以得出：

$$\frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2}$$

(公式一)

2. 地殼均衡理論的模型計算

(1) 假設大陸地殼為單層之模型：

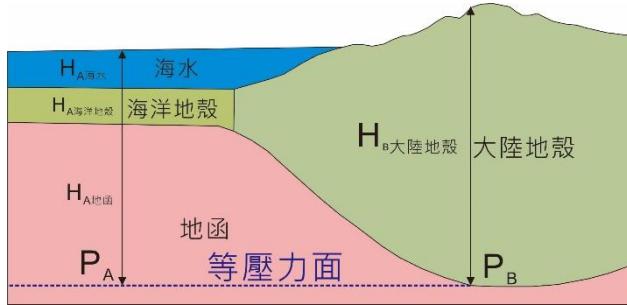


圖2.地殼均衡理論的等壓力面。

依據地殼模型（圖2），等壓力公式 $P_A = P_B$ ，則 $\frac{F_A}{A_A} = \frac{F_B}{A_B}$ 且 $\frac{m_A g}{A_A} = \frac{m_B g}{A_B}$ ，便能夠得知：

$$H_A\text{海水}D_{A\text{海水}} + H_A\text{海洋地殼}D_{A\text{海洋地殼}} + H_A\text{地函}D_{A\text{地函}} = H_B\text{大陸地殼}D_{B\text{大陸地殼}} \quad (\text{公式二})$$

若大陸地殼海平面下的深度（ h ）為已知，欲計算大陸地殼海平面上的海拔高度（ x ），則 $H_B\text{大陸地殼}$ 為 $h + x$ 。故公式二可改寫為：

$$x = \frac{(H_A\text{海水}D_{A\text{海水}} + H_A\text{海洋地殼}D_{A\text{海洋地殼}} + H_A\text{地函}D_{A\text{地函}})}{(D_{B\text{大陸地殼}})} - h \quad (\text{公式三})$$

(2) 假設大陸地殼為雙層組合之模型：

若各層厚度比為 $a : b$ 則公式二可改寫為：

$$x = \frac{(H_A\text{海水}D_{A\text{海水}} + H_A\text{海洋地殼}D_{A\text{海洋地殼}} + H_A\text{地函}D_{A\text{地函}})}{\left(\frac{a}{(a+b)}D_{B\text{大陸地殼}1} + \frac{b}{(a+b)}D_{B\text{大陸地殼}2}\right)} - h \quad (\text{公式四})$$

(3) 假設大陸地殼為三層組合之模型：

若各層厚度比為 $a : b : c$ 則公式二可改寫為：

$$x = \frac{(H_A\text{海水}D_{A\text{海水}} + H_A\text{海洋地殼}D_{A\text{海洋地殼}} + H_A\text{地函}D_{A\text{地函}})}{\left(\frac{a}{(a+b)}D_{B\text{大陸地殼}1} + \frac{b}{(a+b)}D_{B\text{大陸地殼}2} + \frac{c}{(a+b+c)}D_{B\text{大陸地殼}3}\right)} - h \quad (\text{公式五})$$

(4) 假設大陸地殼為連續密度模型:

若大陸地殼為連續密度模型，海平面上的大陸地殼岩質密度 (d) 為已知，欲計算大陸地殼海平面上的海拔高度 (x)，則公式二可改寫為：

$$H_A\text{海水}D_A\text{海水} + H_A\text{海洋地殼}D_A\text{海洋地殼} + H_A\text{地函}D_A\text{地函} = xd + H_B\text{大陸地殼}D_B\text{大陸地殼}$$

(公式六)

其中 $H_B\text{大陸地殼}$ 、 $D_B\text{大陸地殼}$ 為海平面下的大陸地殼厚度及密度，

並且依據震波資料對應到的岩石密度分為 n 層，

$$\text{故 } H_B\text{大陸地殼} = \sum_{i=1}^n H_{B\text{大陸地殼}i} \quad D_B\text{大陸地殼} = \sum_{i=1}^n D_{B\text{大陸地殼}i}$$

則可得出：

$$x = \frac{(H_A\text{海水}D_A\text{海水} + H_A\text{海洋地殼}D_A\text{海洋地殼} + H_A\text{地函}D_A\text{地函}) - (H_B\text{大陸地殼}D_B\text{大陸地殼})}{d}$$

(公式七)

(二) 收集研究資料

我們由臺灣震波速度剖面資料中（圖 3），從當中找出我們所欲討論的中央山脈南段、海岸山脈、玉山、雪山、大屯火山等測線（分別是編號 14、11、7、5、2 等測線）的資料，再決定各測線當中的 2 至 5 個地點進行計算以及討論等工作。

(三) 計算數據

藉由上述圖 3 當中的 5 條剖面線以及各剖面線上的地點，於 Excel 軟體中由經緯度篩選出地點，再篩選出各地點 P 波速度 7.8 km/sec 以上、深度至海拔 0 公尺以下每 500 公尺一筆分析資料的 P 波速度值分佈。並再利用內插法從圖 4 將 P 波速度轉換成岩質密度。然後再利用等壓力公式（公式三、四、五、七），求出出露於海平面的地殼厚度。最後將研究數據並製成圖表，比對現有的數據，驗證連續模型的合理性。

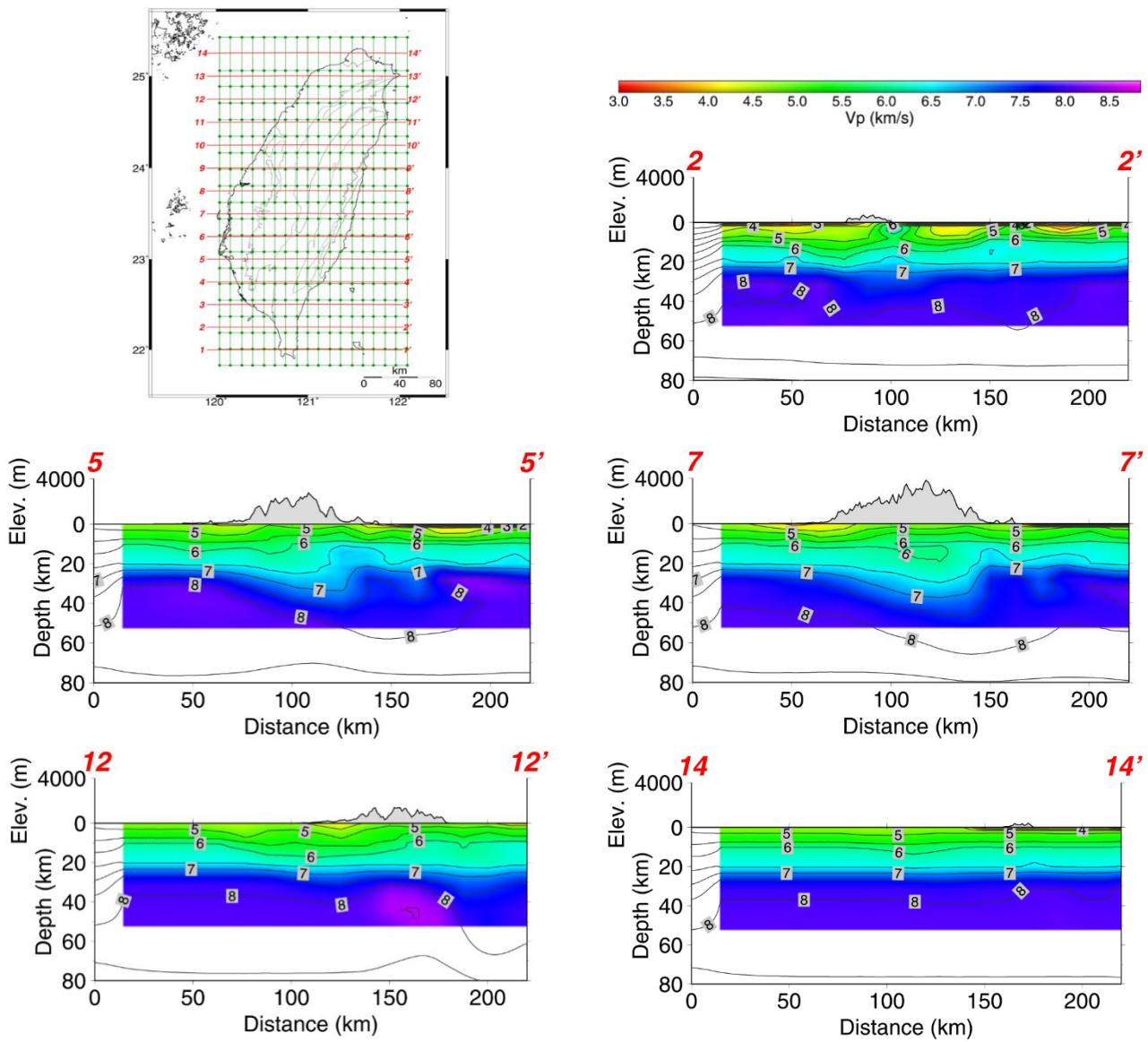


圖3.臺灣震波剖面線。各剖面編號對應左上圖的測線位置；色階反映右上的P波速度值；色階上黑色線為速度等值線。

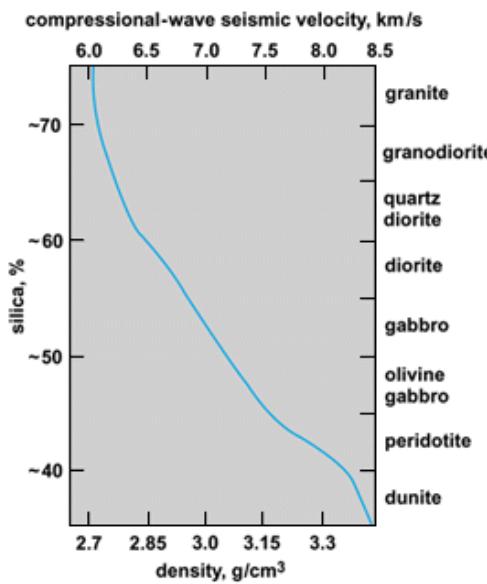


圖4.岩質密度對應之波速圖表。(*eGeoLogy* , 2016)

伍、研究結果

一、合理的地殼模型

(一) 第一種模型—單層模型

1. 假設大陸地殼為花岡岩質的單層模型

套用公式三以及已知參數(海水平均深度及平均密度、海洋地殼平均厚度及平均密度、地函厚度及平均密度)，分別帶入大陸地殼花岡岩質不同的密度，可計算得知大陸地殼海拔高度和深度之數據(圖 5~圖 8)。總而言之，隨著大陸地殼密度的增加，在總厚度不變的條件下，大陸地殼露出海平面的高度越低；相較之下，大陸地殼在海平面以下的厚度越厚。換句話說，當大陸地殼的密度增加，海拔高度反而降低，而山根深度卻隨之越深。以大陸地殼平均厚度 33 公里而言(維基百科 2, 2016)，本研究 30 公里厚度的相近成果論，大陸地殼出露在海平面以上的高度隨密度由 2.70 g/cm^3 增加至 2.76 g/cm^3 ，由 2.20 公里降至 1.66 公里。

2. 假設大陸地殼為安山岩質的單層模型

套用公式三以及同上一節之已知參數，分別帶入安山岩質不同的密度，可計算得知大陸地殼海拔高度和深度之數據(圖 9~圖 12)。即便大陸地殼換為安山岩質，其計算結果仍與花岡岩質的結果一致，差別僅在於大陸地殼出露在海平面以上的高度和海平面以下深度的數值不同而已。以結果而言，大陸地殼出露在海平面以上的高度隨密度由 2.85 g/cm^3 增加至 2.88 g/cm^3 ，由 0.84 公里降至 0.56 公里。

由單層地殼模型看來，我們發現大陸地殼若由均質的單一岩性組成，則以花岡岩密度 2.76 g/cm^3 、山根厚度為 80.00 公里時，其海平面以上的高度為 9.84 公里；若由密度為 2.86 g/cm^3 的安山岩組成，則山根厚度為 81.25 公里，浮出海平面的高度為 8.75 公里與研究預設的聖母峰地區最為接近。

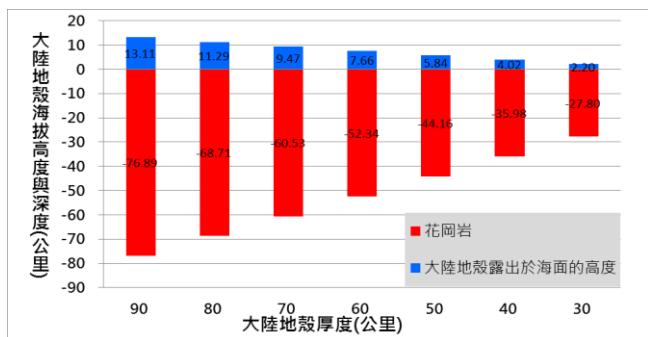


圖5.花岡岩密度 2.70 的單層模型。

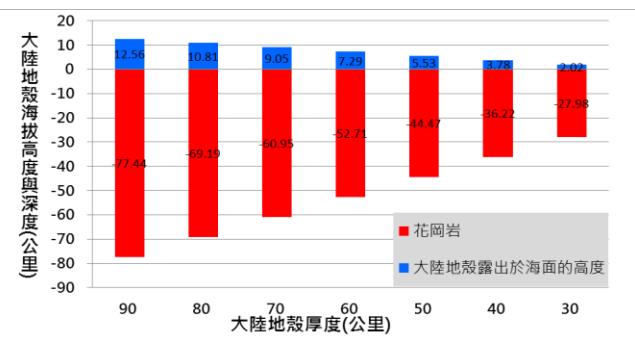


圖6.花岡岩密度 2.72 的單層模型。

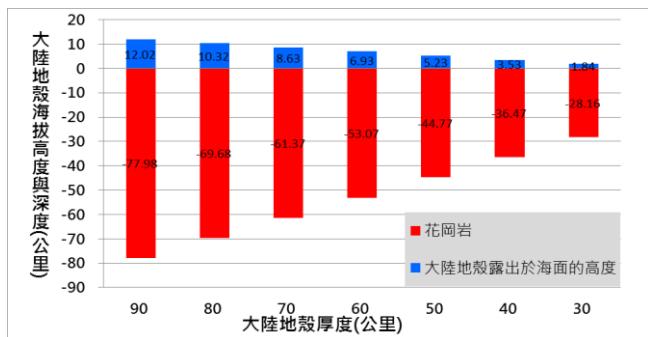


圖7.花岡岩密度 2.74 的單層模型。

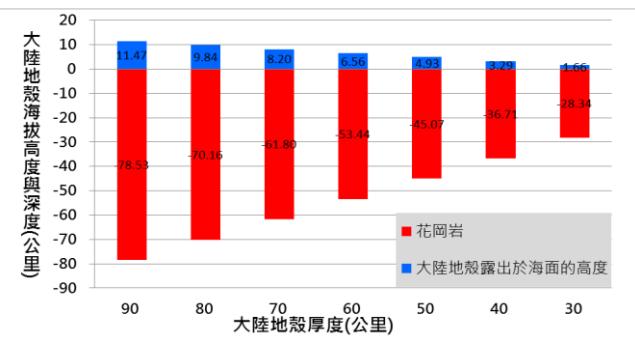


圖8.花岡岩密度 2.76 的單層模型。

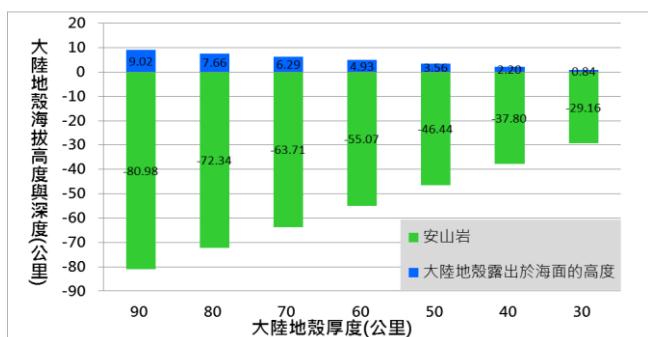


圖9.安山岩密度 2.85 的單層模型。

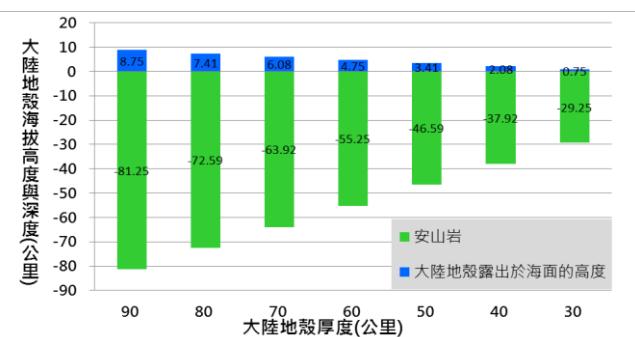


圖10.安山岩密度 2.86 的單層模型。

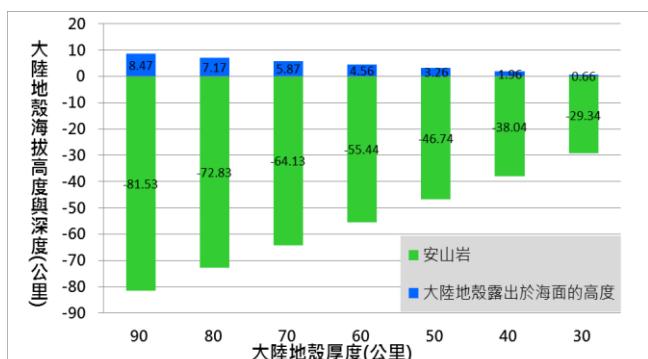


圖11.安山岩密度 2.87 的單層模型。

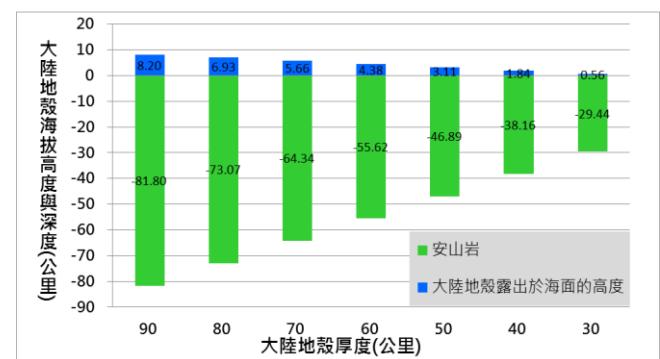


圖12.安山岩密度 2.88 的單層模型。

(二) 第二種模型—雙層模型

1. 上部為大陸地殼花岡岩質 (2.70 g/cm^3)、下部為玄武岩質 (3.00 g/cm^3)

套用公式四以及已知參數（海水平均深度及平均密度、海洋地殼平均厚度及平均密度、地函厚度及平均密度、大陸地殼密度），分別帶入不同的比例，可計算得知大陸地殼海拔高度和深度之數據（圖 13~圖 18）。就計算結果而論，在總厚度不變的條件下，隨著密度較大的玄武岩質比例的增加，大陸地殼露出海平面的高度越低；相較之下，大陸地殼在海平面以下的厚度越厚。換句話說，大陸地殼的平均密度隨著玄武岩質的比例之增加而增加時，海拔高度相對降低，而山根深度則隨之越深。以大陸地殼平均厚度 33 公里而言（維基百科 2, 2016），本研究 30 公里厚度的相近成果論，大陸地殼出露在海平面以上的高度隨玄武岩質的比例增加由 1:1 增加至 1:2.5，由 0.84 公里降至 0.25 公里。

雙層圖形中，上部地殼帶入花岡岩密度、下部帶入玄武岩密度，比例分別帶入 1:1、1:1.5、1:2、1:2.5、1.5:1、2:1。可以得知在上部花岡岩和下部玄武岩的比例為 1:1.5，山根厚度為 81.8 公里時，其海拔高度為 8.20 公里，較接近現今所觀察到的聖母峰海拔高度。

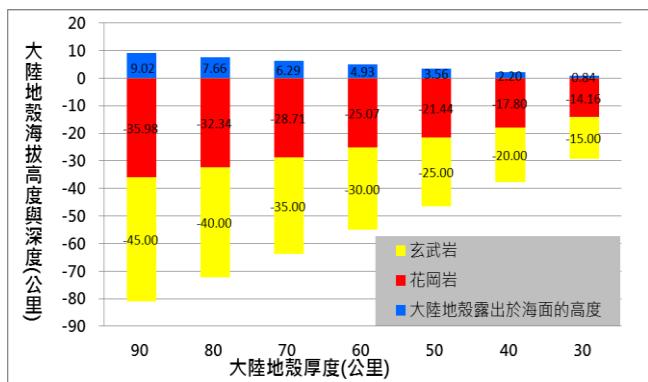


圖13.花岡岩及玄武岩 1:1 的雙層模型。

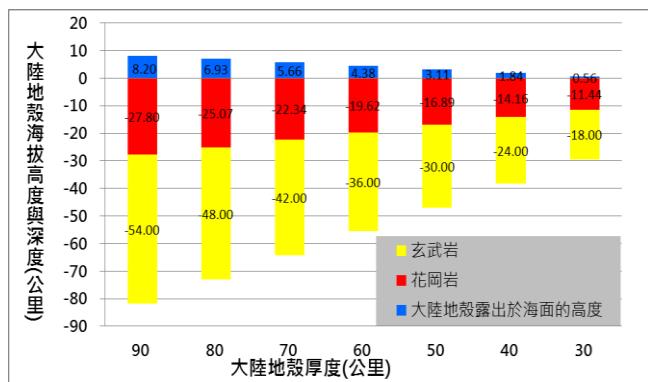


圖14.花岡岩及玄武岩 1:1.5 的雙層模型。

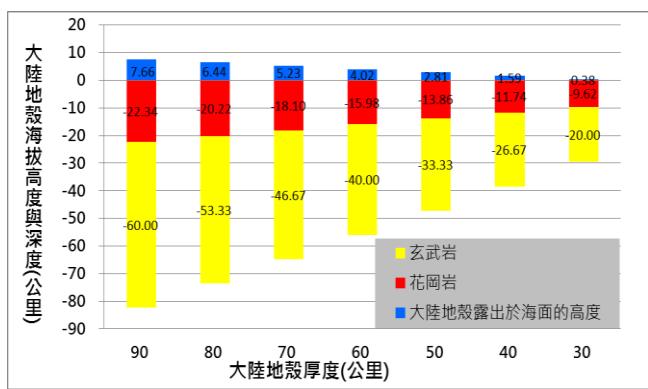


圖15.花岡岩及玄武岩 1:2 的雙層模型。

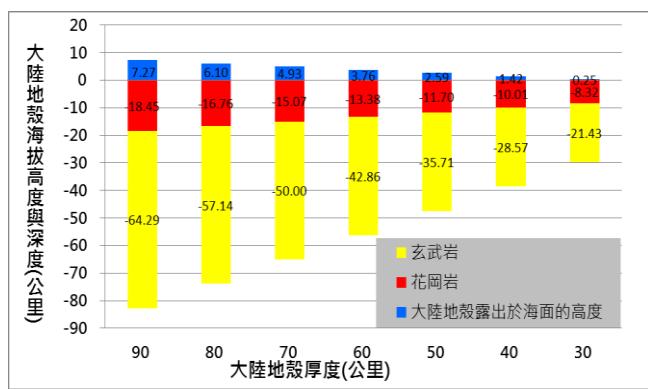


圖16.花岡岩及玄武岩 1:2.5 的雙層模型。

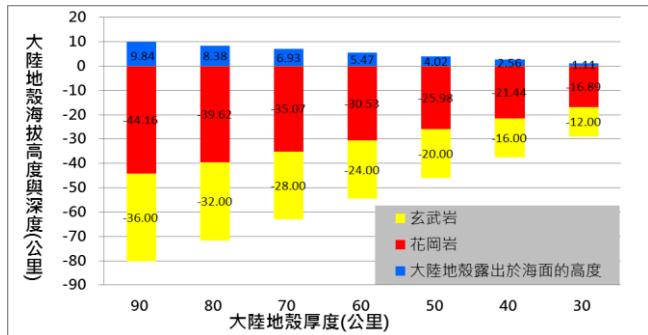


圖17.花岡岩及玄武岩 1.5:1 的雙層模型。

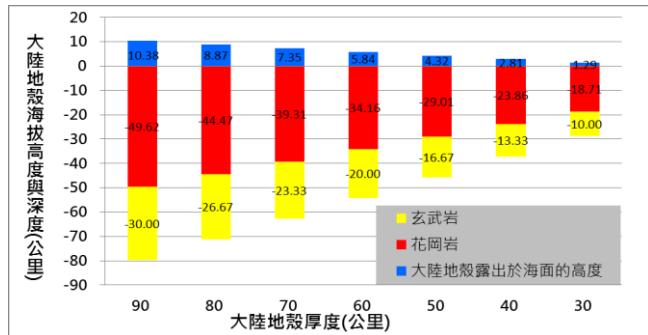


圖18.花岡岩及玄武岩 2:1 的雙層模型。

(三) 第三種模型-三層模型

1. 上部為大陸地殼花岡岩質 (2.70 g/cm^3)、中間為安山岩質 (2.85 g/cm^3)、下部為玄武岩質 (3.00 g/cm^3)

套用公式五以及已知參數（海水平均深度及平均密度、海洋地殼平均厚度及平均密度、地函厚度及平均密度、大陸地殼密度），分別帶入不同的比例（1:1:1、1:1.5:1、1:2:1、1:1:1.5、1:1:2、1.5:2:1、1:2:1.5、1:1.5:1.5、1.5:1:1、1.5:1:1.5、1.5:2:1.5、1.5:2:2、2:1:1、2:1:2），可計算得知大陸地殼海拔高度和深度之數據（圖 19~圖 32）。根據模擬計算的結果而言，隨著密度較大的玄武岩質和安山岩質比例的增加，大陸地殼露出海平面的高度越低；相較之下，大陸地殼在海平面以下的厚度越厚。尤其當玄武岩質比例同時大於或等於花岡岩質與安山岩質所佔的比例時，其大陸地殼厚度之模擬計算結果，如此的比例配置亦是海拔高度最低的組合。以大陸地殼平均厚度 33 公里而言（維基百科 2, 2016），本研究 30 公里厚度的相近成果論，大陸地殼出露在海平面以上的高度隨花岡岩質、安山岩質、玄武岩質的比例增加由 1:1:1 增加至 1.5:2:2，由 0.84 公里降至 0.71 公里。

三層圖形中，上部地殼帶入花岡岩、中間帶入安山岩質、下部帶入玄武岩質的密度進行計算後，當中以其比例 1.5:2:2 時，山根厚度為 81.35 公里，其海拔高度為 8.65 公里，比較接近聖母峰的海拔高度。

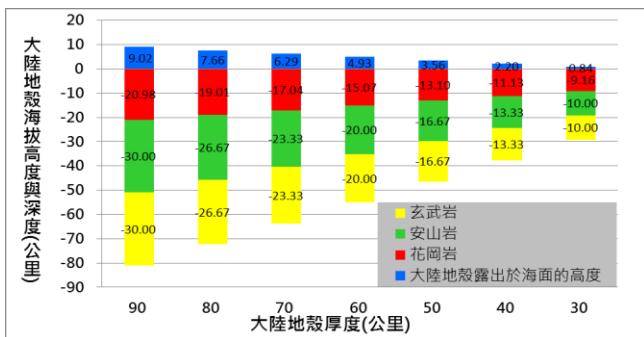


圖19.花岡岩、安山岩及玄武岩 1:1:1 三層模型。

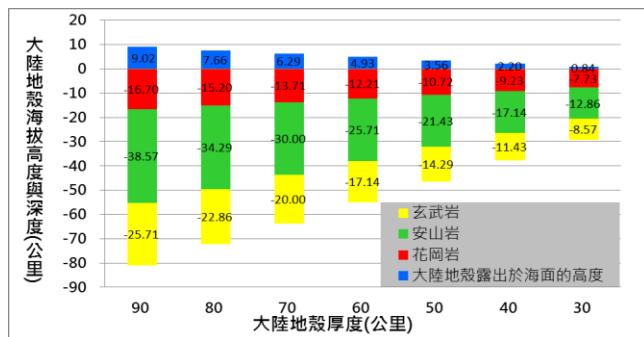


圖20.花岡岩、安山岩及玄武岩 1:1.5:1 三層模型。

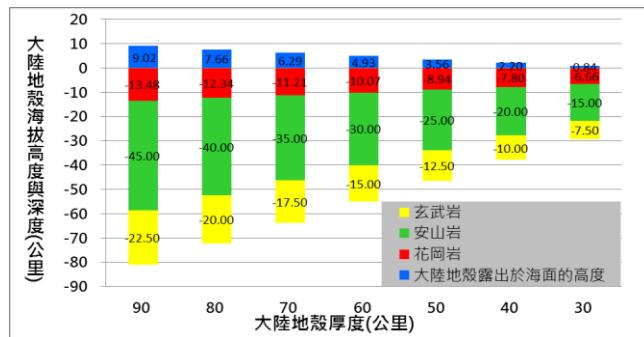


圖21.花岡岩、安山岩及玄武岩 1:2:1 三層模型。

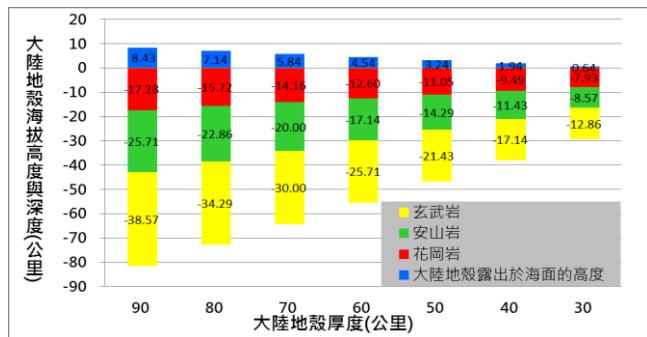


圖22.花岡岩、安山岩及玄武岩 1:1:1.5 三層模型。

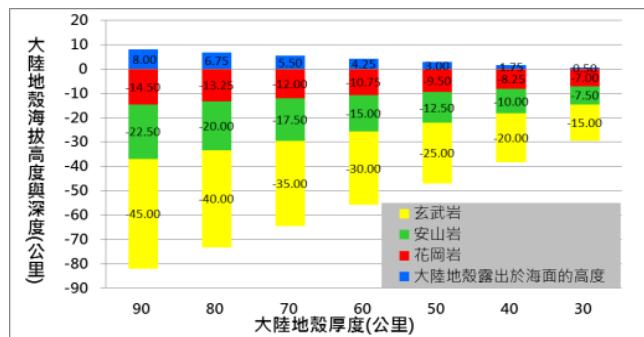


圖23.花岡岩、安山岩及玄武岩 1:1:2 三層模型。

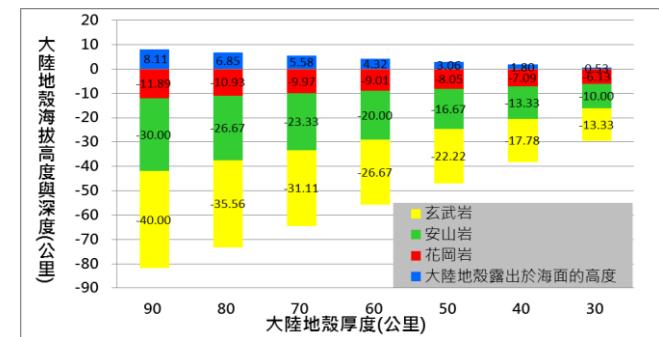


圖24.花岡岩、安山岩及玄武岩 1:1.5:2 三層模型。

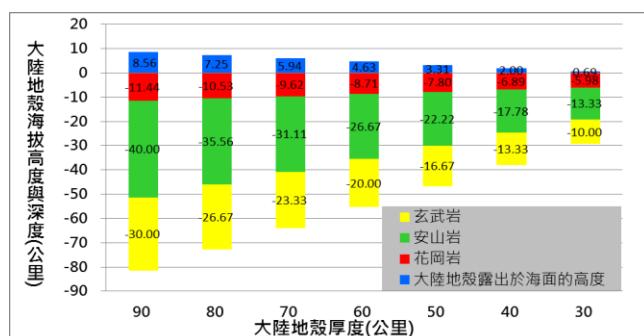


圖25.花岡岩、安山岩及玄武岩 1:2:1.5 三層模型。

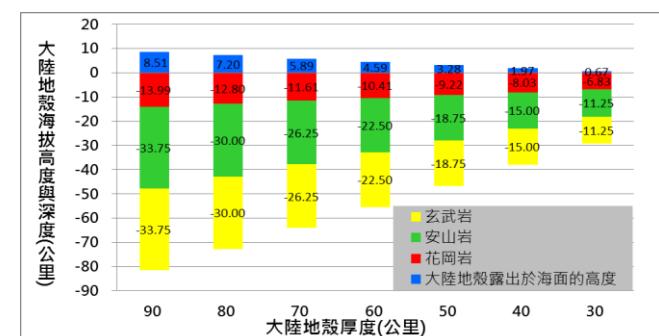


圖26.花岡岩、安山岩及玄武岩 1:1.5:1.5 三層模型。

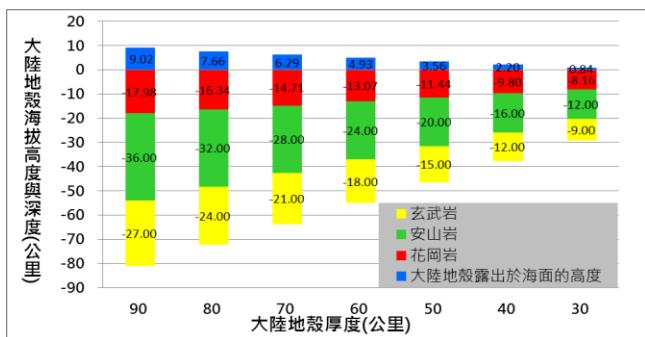


圖27.花岡岩、安山岩及玄武岩 1.5:2:1.5 的三層模型。

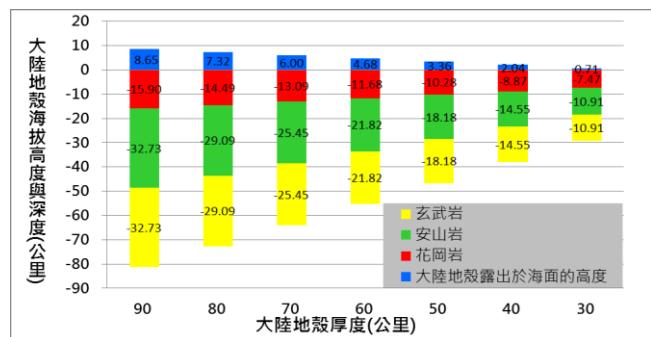


圖28.花岡岩、安山岩及玄武岩 1.5:2:2 的三層模型。

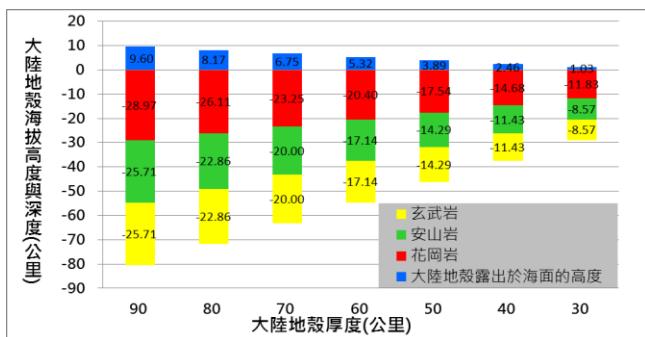


圖29.花岡岩、安山岩及玄武岩 1.5:1:1 的三層模型。

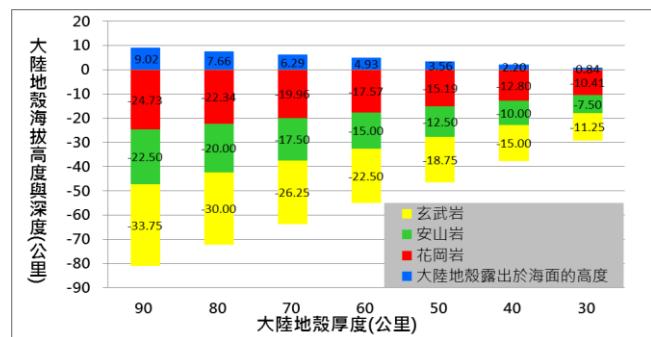


圖30.花岡岩、安山岩及玄武岩 1.5:1:1.5 的三層模型。

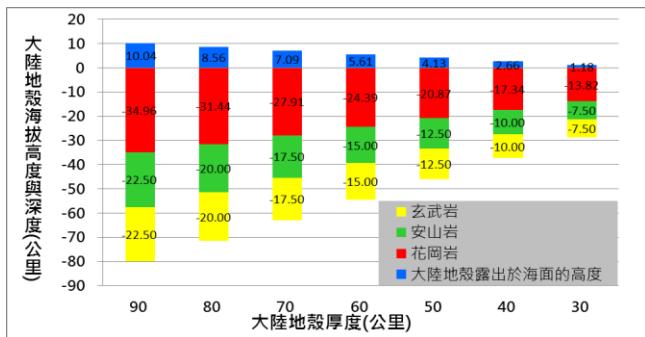


圖31.花岡岩、安山岩及玄武岩 2:1:1 三層模型。

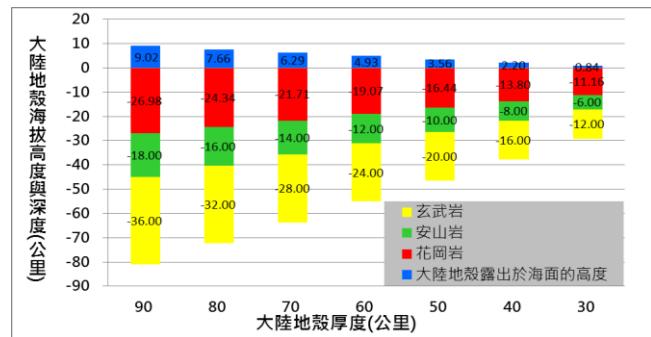


圖32.花岡岩、安山岩及玄武岩 2:1:2 三層模型。

二、由雙層與三層地殼模型模擬造山帶、地盾、海溝等三種構造環境

(一) 造山帶

我們以現今仍持續進行造山運動的高山地形進行模擬計算，並且將結果與海拔高度約為 4 公里的南美安地斯山脈進行比較何為合理的地殼均衡模型。再帶入大陸地殼的雙層模型，發現當大陸地殼總厚度為 49 公里時，以花岡岩比玄武岩的比例為 1.5:1、海拔高度為 3.87 公里最接近。若帶入大陸地殼三層模型，發現在花岡岩比安山岩比玄武岩的比例為 2:1:1、海拔高度為 3.98 公里最接近現今觀測到的高度。

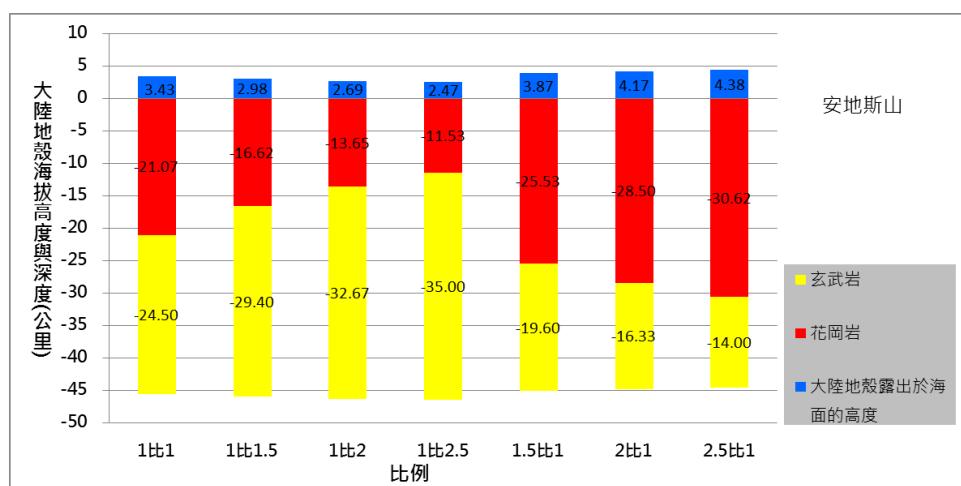


圖33.安地斯山各比例雙層模型。

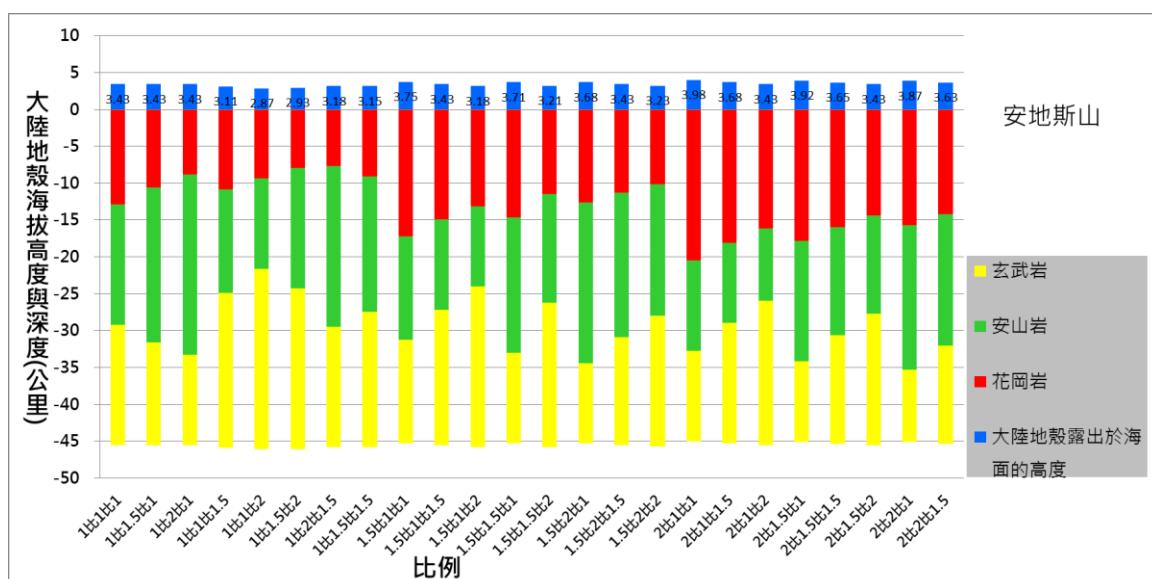


圖34.安地斯山各比例三層模型。

(二) 地盾

以非洲平原、北美陸塊等不會再進行造山運動的板塊為觀察目標，依據全球地盾的平均厚度約為 40 公里（維基百科 3, 2016），若帶入大陸地殼的雙層模型，並以非洲的東非高原進行比較，我們發現在大陸地殼為 40 公里的時候，以花岡岩比玄武岩比例為 1:2、1:2.5、海拔高度 1.59 公里、1.42 公里（圖 35），最接近東非高原海拔高度 1~1.5 公里的實際數據。帶入三層模型時，發現在花岡岩比玄武岩比例為 1:1:2 時，海拔高度為 1.75 公里（圖 36），較接近實測數據。

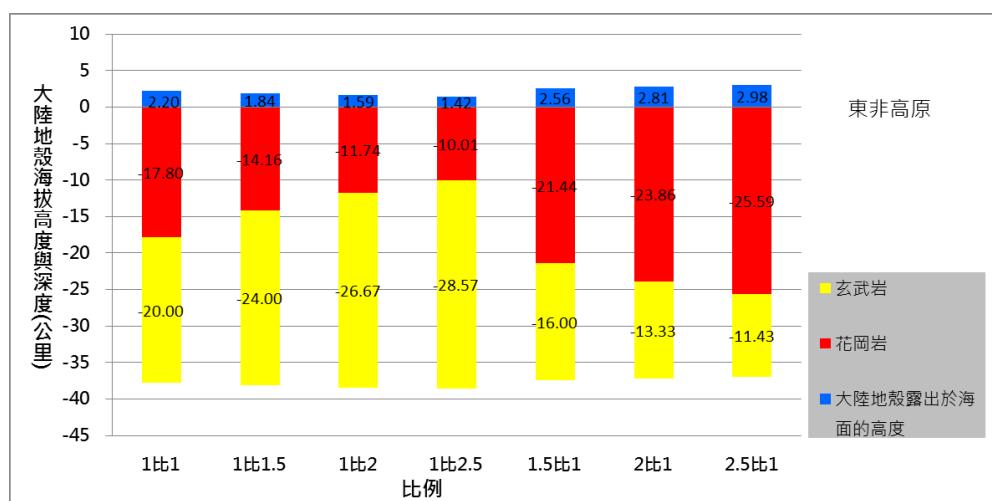


圖35.東非高原各比例雙層模型。

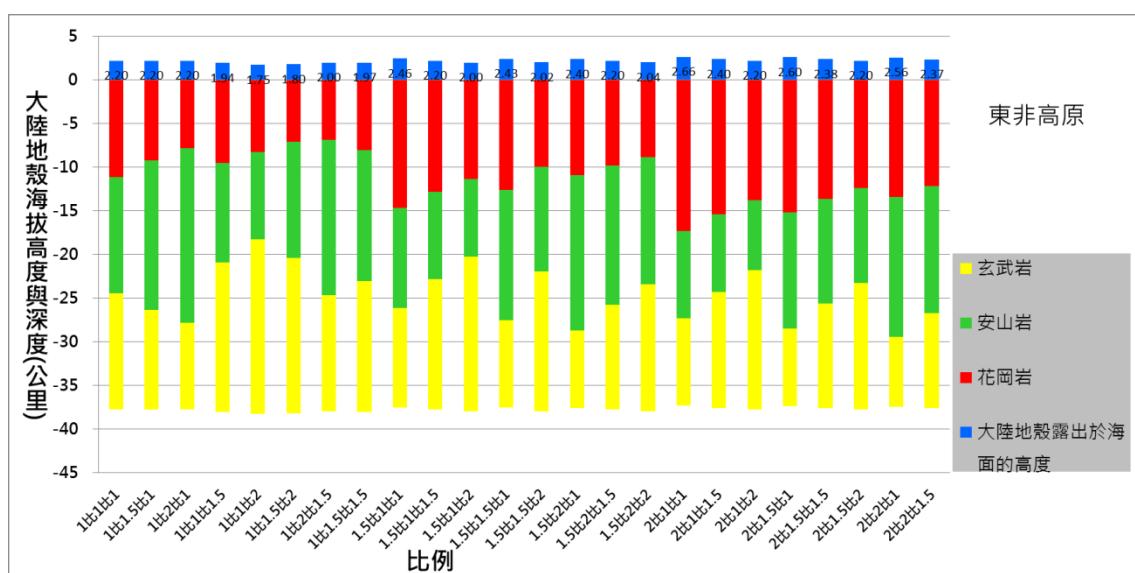


圖36.東非高原各比例三層模型。

(三) 海溝

以板塊碰撞，擠壓後形成的海溝地形進行討論。在計算過後，發現海溝的地殼厚度較厚，約為 23.27 公里，數據較平均厚度為 7 公里的海洋地殼厚出許多。

(圖 37)

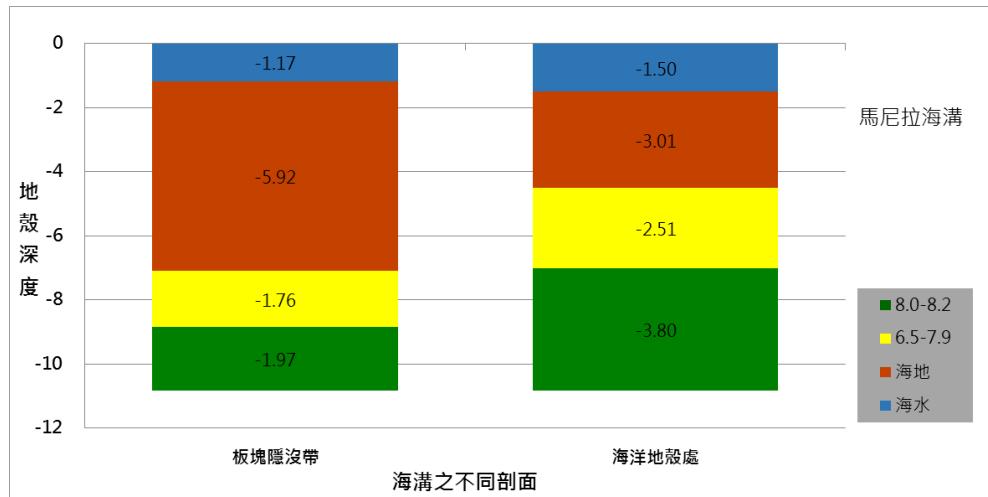


圖37.馬尼拉海溝分層圖。

三、將臺灣帶入雙層和三層模型進行探討

我們以臺灣玉山主峰地區進行模擬雙層和三層模型（圖 38、39），並由網路資料得知其地殼厚度為 45 公里（人間福報，2016）、海拔高為 3.95 公里，便能夠得知地殼厚度為 48.95 公里。在雙層模型中，以花岡岩和玄武岩比例為 1.5:1 時，玉山主峰海拔高度為 3.87 公里。而在三層模型中，當地殼厚度為 48.95 公里時，以花岡岩、安山岩和玄武岩的比例為 2:1:1 時，海拔高度為 3.98 公里。將帶入兩層、三層的不同比例進行比較，並找出最合理的數值，發現以三層模型、比例 2:1:1 進行計算，得出的海拔高度較接近現今玉山的海拔高度 3.952 公里（維基百科 4，2016）。

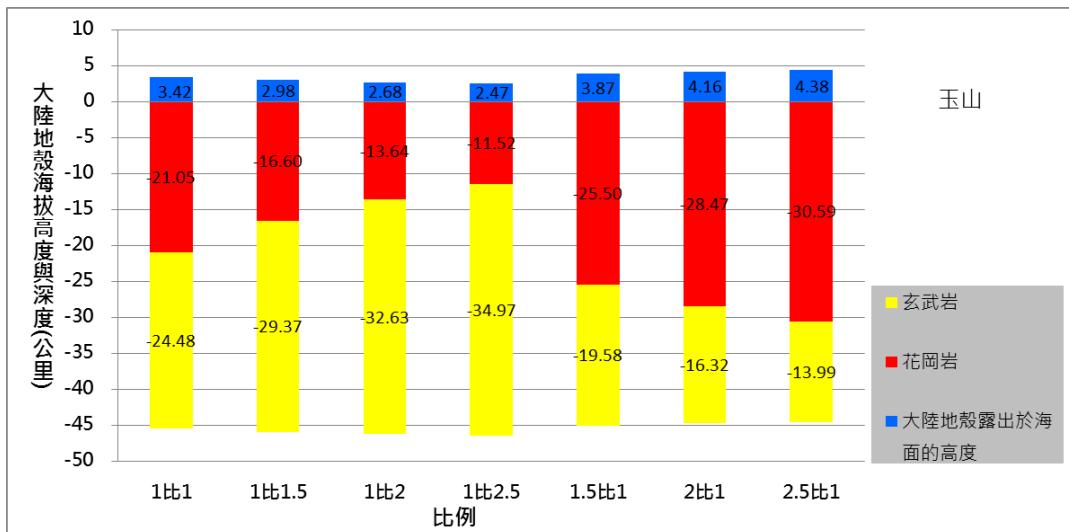


圖38.玉山雙層各比例模型

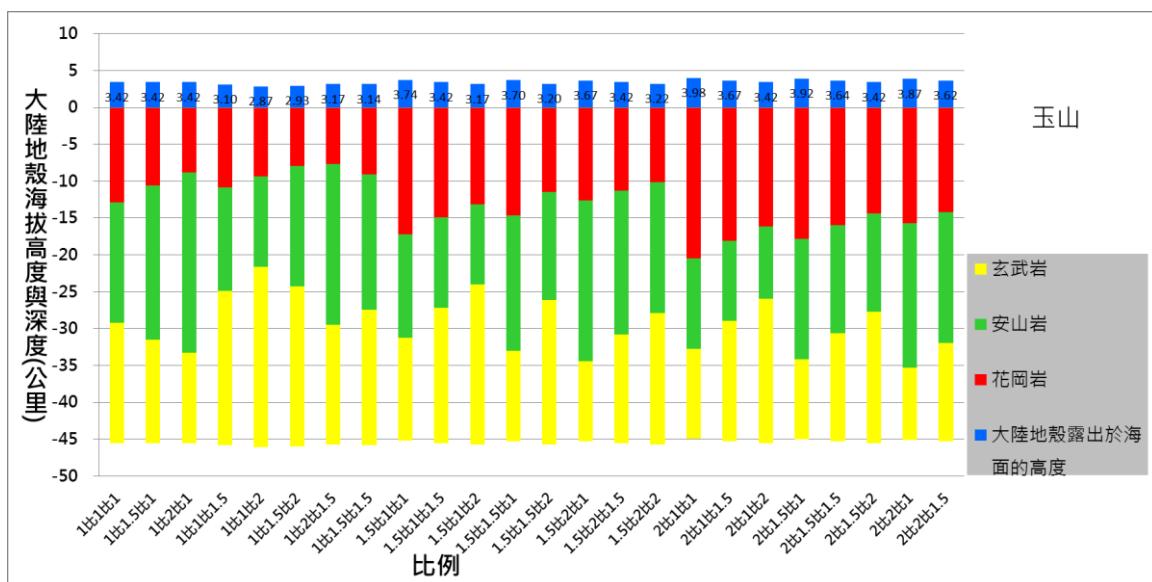


圖39.玉山各比例三層模型

四、以連續分層模型探討臺灣大陸地殼均衡情形

以真實情況而言，大陸地殼的密度即便有分層的情形，亦應隨深度而有礦物相轉變、以及礦物晶體空間逐漸因壓力增加而壓縮的漸變方式產生變化。故此分別將臺灣的大屯火山、雪山、玉山、海岸山脈及中央山脈南段等五個測線（圖 3），每條測線各取 2 至 5 個地點（圖 40），利用 P 波震波波速所對應的岩石密度之剖面資料帶入連續模型進行模擬計算，我們則可以得到五條剖面線的地殼均衡情形。

帶入公式七可發現所計算出的中央山脈南段剖面線中的兩點數據，計算出的海拔高度和現今的海拔高度落差分別為，3.504 公里、1.758 公里（如圖 42）；海岸山脈剖面線中的五點數據，所算得的海拔高度則分別跟現今海拔實高落差 1.748 公里、2.172 公里、1.393 公里、2.969 公里、2.718 公里。（如圖 43）。

在玉山山脈剖面線的五點數據中，計算所得海拔高分別與現今海拔實高落差約 2.594 公里、2.405 公里、1.699 公里、2.760 公里、2.309 公里（如圖 44）；雪山剖面線的三點數據中，計算所得海拔高分別與現今海拔實高落差 3.0303 公里、1.298 公里、3.640 公里（如圖 45）。

在大屯火山剖面線的兩點數據中，所計算出的海拔高度分別和現今海拔高度落差了 2.024 公里、1.459 公里（如圖 46）。並且，我們發現由南而北將五條剖面線進行排列，其計算出的海拔高度和現今海拔高度落差則呈現由大漸小。

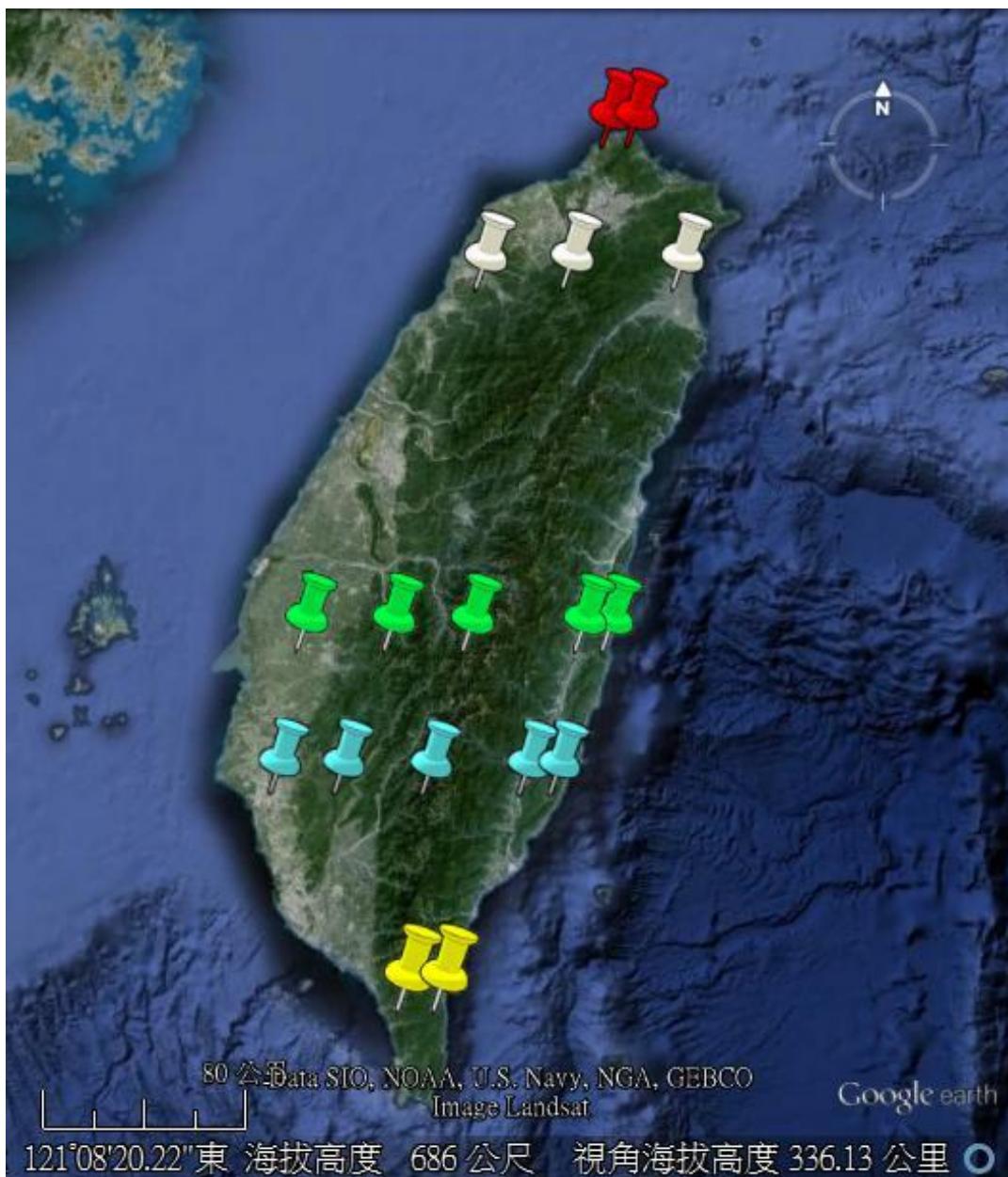


圖40.臺灣震波剖面數據點。由北而南分別為大屯火山剖面、雪山剖面、玉山剖面、海岸山脈剖面、中央山脈南段剖面。

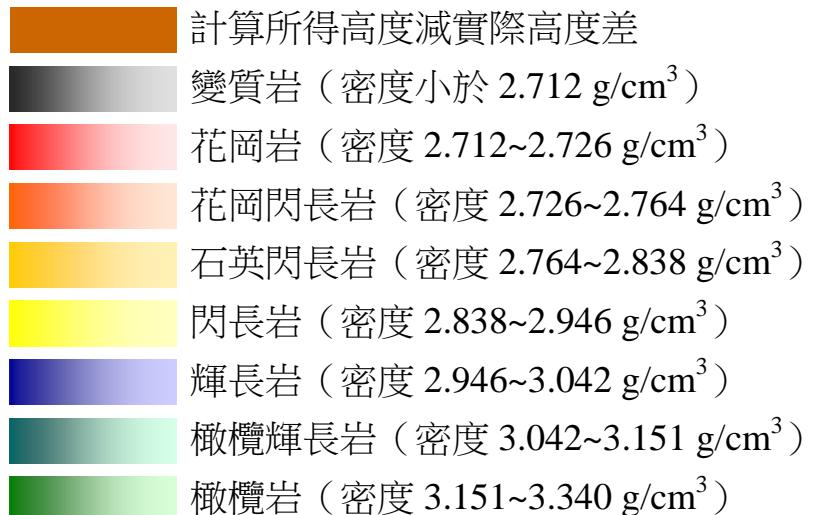


圖 41.連續模型之圖例。

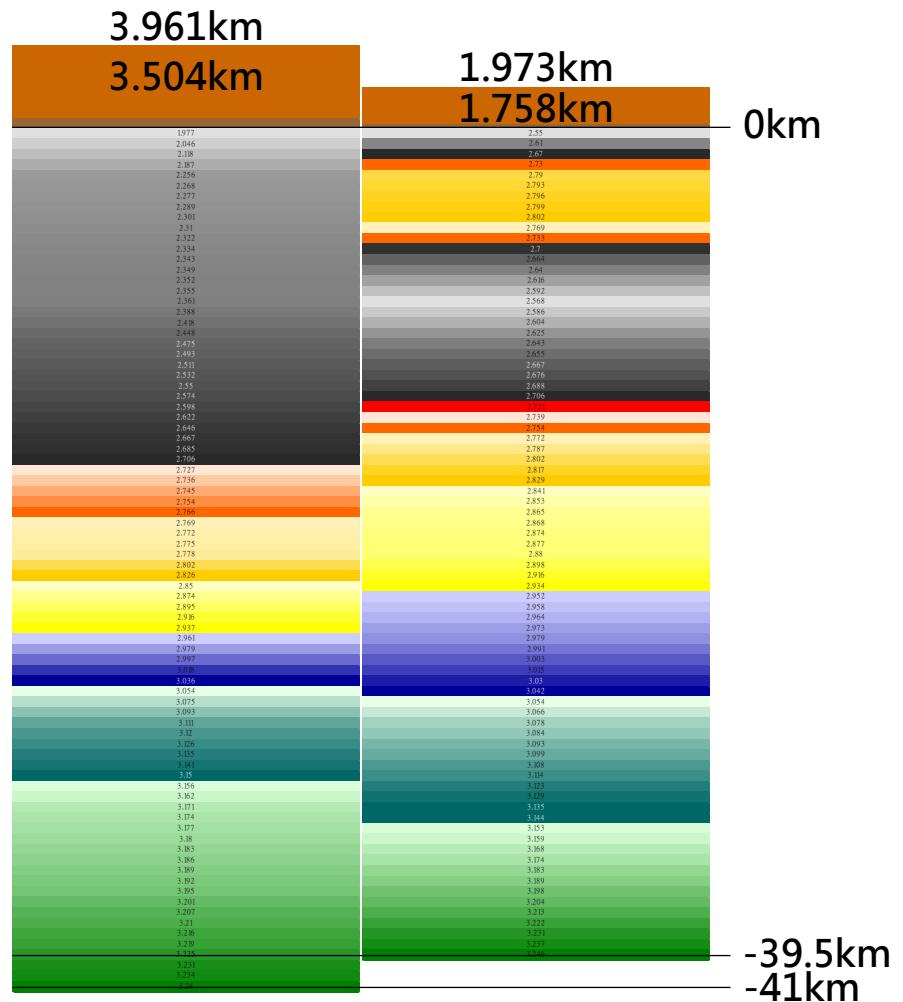


圖 42.中央山脈南段剖面圖。

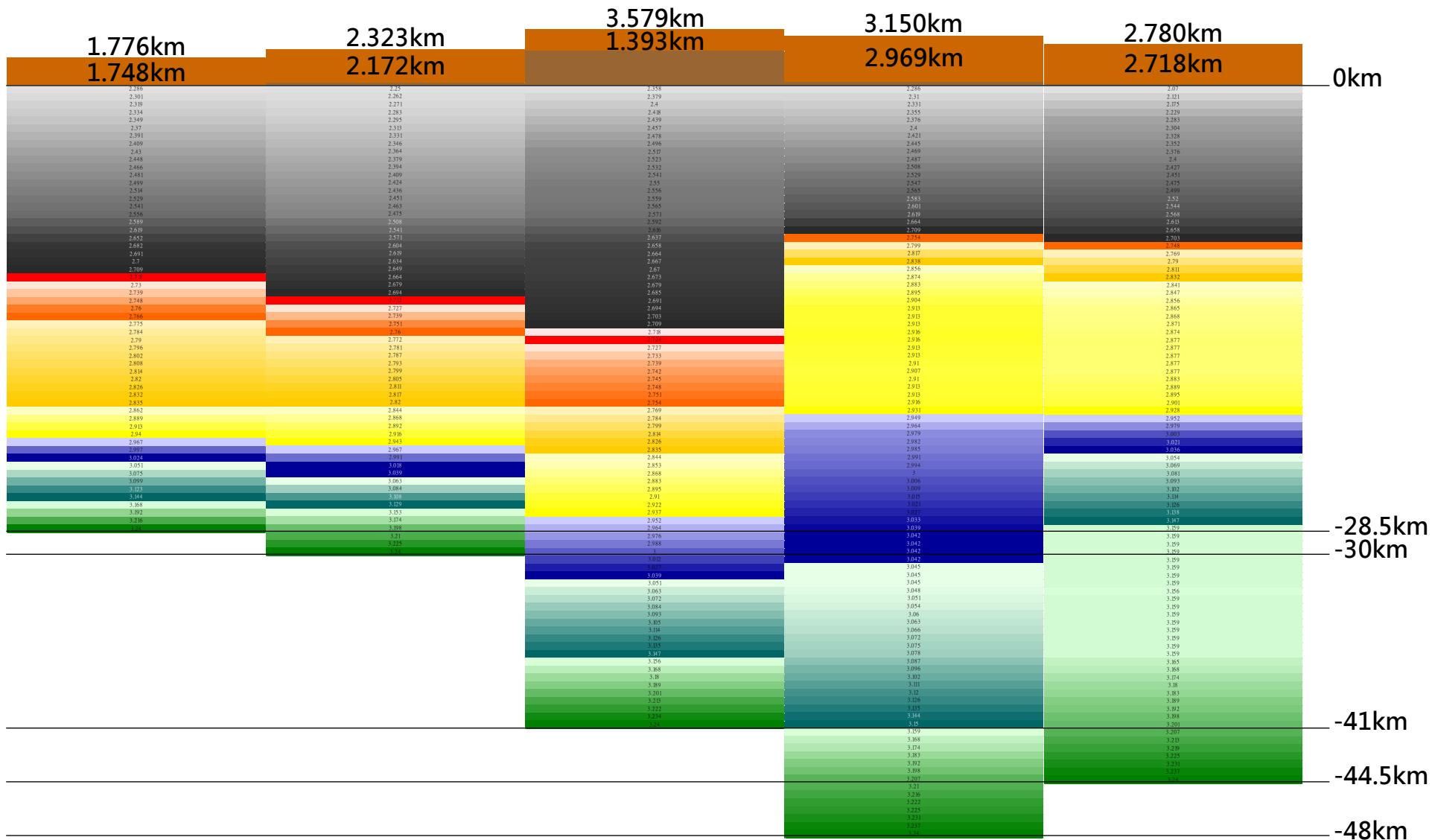
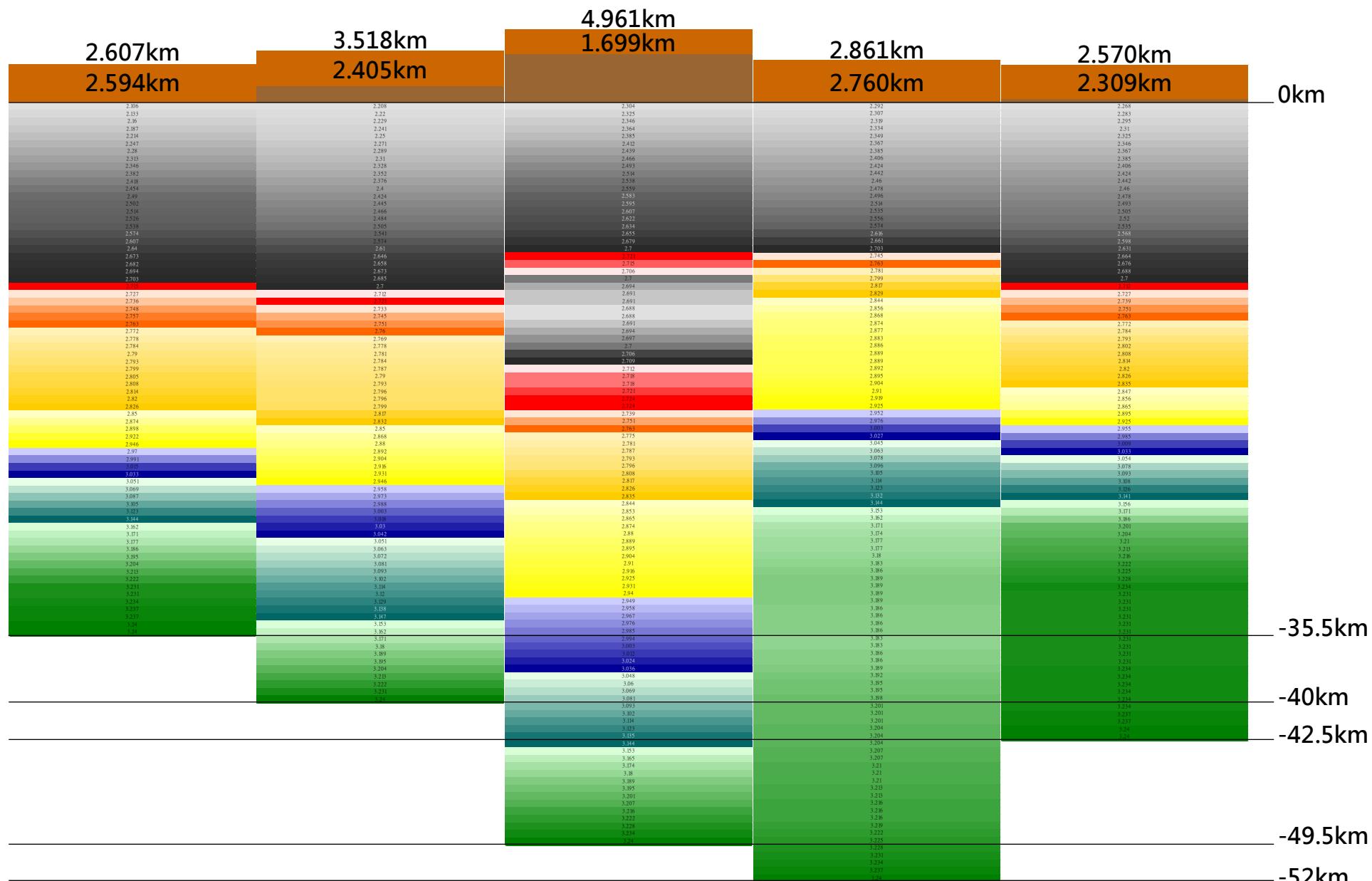


圖 43.海岸山脈剖面圖。



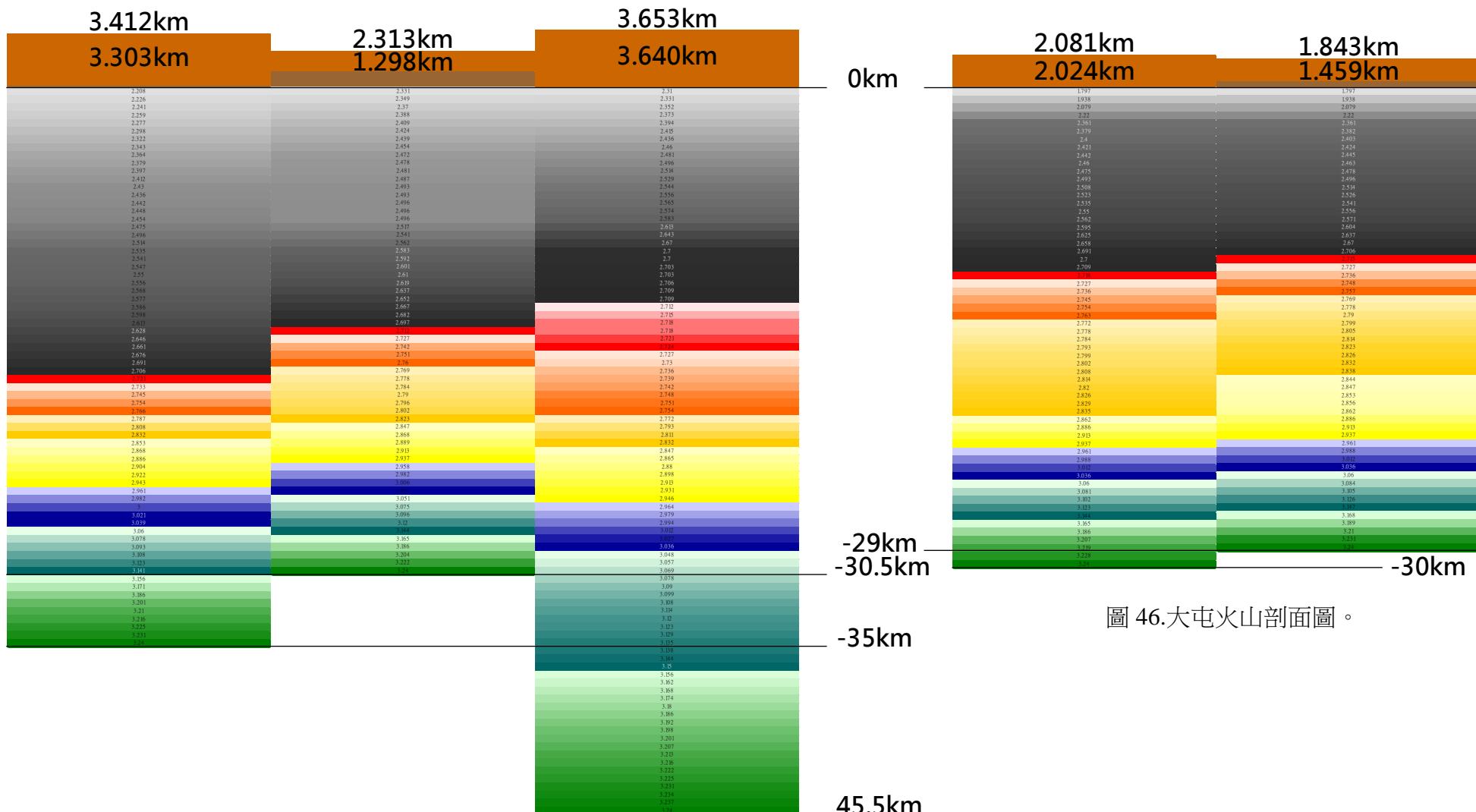


圖 45.雪山剖面圖。

圖 46.大屯火山剖面圖。

陸、討論

一、合理的地殼模型

在分層模型中，我們將大陸地殼帶入單層模型、雙層模型、三層模型，並且以地殼厚度約為 80 公里的聖母峰作為比較範本，我們將花岡岩質和安山岩質的密度設定範圍，並且計算不同密度所得出的海拔高度，發現在單層安山岩質 (2.86 g/cm^3) 模型時所計算出的海拔高度為 9.29 公里，此結果符合 Rudnick (1955) 在文獻資料中提到「大陸地殼平均組成成分應該比較接近安山岩」的結論。帶入雙層模型，且上部地殼帶入花岡岩質 (2.70 g/cm^3)、下部帶入玄武岩質 (3.00 g/cm^3)、比例為 1:1.5 時，其海拔高度為 8.20 公里；再帶入三層模型時，上部地殼帶入花岡岩 (2.70 g/cm^3)、中部帶入安山岩質 (2.85 g/cm^3)、下部帶入玄武岩質 (3.00 g/cm^3)、比例為 1.5:2:2 時，浮出海平面的海拔高度為 8.65 公里。比較三種分層模型，我們發現在三層模型、比例 1.5:2:2 時，其計算出的數據較接近聖母峰的海拔高度 8.848 公里。我們發現模型當中的岩質比例，呈現密度較小的岩質所占比例較少（如花岡岩質）、密度較大的岩質所佔的比例較大（如安山岩質或玄武岩質）。並且我們得知在地殼均衡理論中，所假設單層模型、雙層模型、三層模型，其中以三層模型最為合理。

二、由雙層與三層地殼模型模擬造山帶、地盾、海溝等三種構造環境

沿用上段的做法，對造山帶、地盾、海溝三種地形進行探討，我們發現在造山運動的地形中，若將數據帶入三層模型，則在地殼厚度為 49 公里、比例為 2:1:1 時，其出露的海拔高度為 3.98 公里。較帶入雙層模型的數據結果正確；探討地盾地形時，帶入三層模型，在地殼厚度為 40 公里、比例為 1:1:2 時，其出露海拔高為 1.75 公里，同樣發現也較雙層模型所得到的結果正確。因此我們得知上段當中所得出的，三層模型最為合理的結論，同樣適用於造山帶和地盾的地形。而探討海溝地形時，發現計算出的海溝厚度較一般海洋地殼厚出許多，其原因為板塊碰撞、擠壓後，造成板塊撓曲，上層板塊壓住隱沒的板塊，導致山根雖厚但卻無高山的情形。

其次，在將分層模型帶入同處於造山帶的聖母峰和安地斯山脈的兩個案例中，我

們發現兩者雖在地殼均衡理論中最合理的模型為三層模型，但計算得出的合理比例有所差異。其原因為雖然兩者皆持續進行造山運動、大陸地殼本身尚未達到平衡，因此導致目前的岩性比例有所不同。再從兩者岩石比例的差異來探討，聖母峰最接近實際海拔高度的比例為 1.5:2:2，安地斯山最接近實際海拔高度的比例為 2:1:1。查閱資料後（新石頭城，2016），我們得知大陸地殼的平均組成成分中，二氧化矽含量較花岡岩、玄武岩接近安山岩，因此安山岩質在三層模型中佔的比例較大。而聖母峰位處印澳板塊的北緣，其山根地質組成主要與德干高原相近是白堊紀的玄武岩（維基百科 5, 2016）；安地斯山脈的山根地質成分則屬於白堊紀的花岡岩（維基百科 6, 2016）。比較兩種造山帶中，花岡岩、安山岩、玄武岩的比例，聖母峰的玄武岩所佔比例為其次，安地斯山的花岡岩所占比例也同為其次。因此說明同為較合理的三層模型，安山岩質的比例應為花岡岩、安山岩、玄武岩三者中最大；其次的影響則為造山帶初始的岩石組成決定了岩石的組成比例。

而在大陸地殼已達平衡的地盾地形中，較合理的岩質比例和聖母峰的合理比例有所差異，原因為比較的兩者其大陸地殼達到地殼均衡的與否。

三、將臺灣帶入雙層和三層模型進行探討

將臺灣的玉山數值帶入地殼均衡理論中的雙層、三層模型，發現帶入三層模型，且花岡岩、安山岩、玄武岩的比例為 2:1:1 時，其海拔高度為 3.98 公里，最接近現今海拔高度 3.952 公里。接續上段，我們得知安山岩質仍佔較大比例，而查閱玉山的岩性組成後（玉山國家公園，2016），發現早期沉積了密度較小的砂岩、頁岩，後經變質作用變質為板岩和片岩，但在三層模型中我們只假設了花岡岩、安山岩、玄武岩三種岩質，因此計算中變質岩會併入密度最小的花岡岩中，導致花岡岩占較大比例。

四、以連續分層模型探討臺灣大陸地殼均衡情形

從臺灣分別選擇五條剖面線，由南往北分別為中央山脈南段、海岸山脈、玉山、雪山、大屯火山，各剖面線選取 2 至 5 個地點並計算出其海拔高度。我們發現若將剖面線由北而南進行排列，則可發現在較北部的地區，以中性、酸性岩質所占比例較大；

而較南部的地區，以基性、超基性的岩質，所占比例較大。則計算所得的海拔高度與現今海拔高度的高度落差，即呈現出差異由小至大。若由弧陸碰撞理論的斜碰撞說來解釋（科學人，2016），則菲律賓海板塊由東南向西北擠壓，並隨時間的推移、以及因沖繩海槽的弧後張裂引發的板塊碰撞位置的旋轉（黃奇瑜，2010），弧陸碰撞點已經由北往南偏移。再比對計算得知的結果，可以得知臺灣北部的造山運動目前已稍緩，而愈南部可能還需時間進行造山運動。因此，愈北部的計算所得的海拔高度與現今海拔高度的高度落差愈小，而愈南部，落差值愈大。

若將五條剖面線的落差高度進行比較，發現在雪山剖面線的第一、三點數據其落差高度都較二點的落差高度高出許多；玉山剖面線的落差高度在第二點數據中相對偏小，。而中央山脈和海岸山脈的計算海拔高度和實際海拔高度，都落差甚大，同一剖面線中的不同數據點，其落差高度值有極端的變化。再將剖面線依岩性做比較，我們發現在中央山脈剖面線的兩點數據中，皆以密度 2.942 g/cm^3 以上、密度較大的岩質所占比例較多。而海岸山脈山脈剖面線的五點數據中，除第三點密度 2.942 g/cm^3 以上、密度較大的岩質所佔較比例小，其餘皆佔大部分比例，而第三點數據中的密度 2.712 g/cm^3 以下、密度較小的岩質，所占比例相對多。玉山山脈剖面線的五點數據中，密度範圍在 $2.712\text{--}2.946 \text{ g/cm}^3$ 的岩質，所占比例由小至大又至小，且其密度 2.942 g/cm^3 以上、密度較大的岩質在第三點數據中所佔比例較小。雪山山脈剖面線的三點數據中，二、三點的密度 2.942 g/cm^3 以上、密度較大的岩質皆占大部分，而第一點的小密度物質則占多數。大屯火山剖面線的兩點數據中，皆以密度 2.942 g/cm^3 以上、密度較大的岩質所占比例較多。

此外，在中央山脈南段（圖 42）以及玉山（圖 44）兩剖面的連續模型上均各有一個地點的地下岩性分佈，低密度的岩石中有一段高密度的岩石在其中，其最有可能為構造侵位（Tectonic Emplacement）的發生，導致高密度的岩石—或許為蛇綠岩—在板塊縫合過程中進入到低密度的變質岩裡面。

柒、結論

一、利用地殼均衡理論與帕斯卡原理模擬大陸地殼的單層、雙層、三層模型，當中以花岡岩質、安山岩質及玄武岩質的平均密度加以計算，其結果大陸地殼以花岡岩、安山岩及玄武岩等三種岩石組成比例 1:2:1.5 的三層模型所得到之海拔高度最為接近現實中的地形高度。

二、同樣的模擬過程中，造山帶、地盾與海溝帶入三層模型計算所得的結果最為合理。承襲第一點結論之成果，大陸地殼的組成中以安山岩為主體，而花岡岩與玄武岩的相對比例之多寡則與該地的原始岩石組成有關。

三、利用地殼均衡理論模擬計算臺灣玉山主峰的地殼厚度，仍以三層模型最為合理。並承接第二點之結論，由於玉山主峰之岩性以板岩、片岩等變質岩為主，密度較安山岩及玄武岩低，故其比例呈現花岡岩較玄武岩高的情形。

四、由臺灣多處的地殼均衡模型計算後得知，臺灣的大陸地殼尚未達到平衡，並且由於受到弧陸碰撞的斜碰撞、以及碰撞點由北往南遷移的影響，模擬計算的海拔高度減去現實海拔高度所呈現之結果為該值由北向南增加，顯示受弧陸碰撞影響的造山運動活躍度正由北往南遞增。

捌、參考資料及其他

人間福報:中央山脈地殼厚 45 公里地震機率高。擷取日期：2016/3/26。網址：

<http://www.merit-times.com.tw/NewsPage.aspx?Unid=303778>

王乾盈、顏宏元、呂佩玲、張建興（2011），探測臺灣莫荷面，建國百年天氣分析預報與地震測報研討會－地震測報論文集，第 11-16 頁。

黃奇瑜、任海玲、林彥均、林秋婷、簡至暉（2010），臺灣海岸山脈及東南海域反應活躍弧陸碰撞構造的弧前盆地及弧上盆地動態沈積研究研究成果報告，行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告，共 34 頁。

新石頭城:大陸地殼的成分應該比較接近花岡岩還是安山岩？。擷取日期：2016/3/18。

網址：<http://mynotes.org/earth/?p=4498>

維基百科 1:地殼均衡。擷取日期：2016/3/24。網址：

<https://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%9C%B0%E6%AE%BC%E5%9D%87%E8%A1%A1>

維基百科 2:地殼。擷取日期：2016/3/22。網址：

<https://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%9C%B0%E5%A3%B3>

維基百科 3:地盾。擷取日期：2016/3/28。網址：

<https://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%9C%B0%E7%9B%BE>

維基百科 4:玉山。擷取日期：2016/3/15。網址：

<https://zh.wikipedia.org/wiki/%E7%8E%89%E5%B1%B1>

維基百科 5:德干高原。擷取日期：2016/3/19。網址：

<https://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%BE%B7%E5%B9%B2%E9%AB%98%E5%8E%9F>

維基百科 6:安地斯山脈。擷取日期：2016/3/19。網址：

<https://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%AE%89%E5%9C%B0%E6%96%AF%E5%B1%B1%E8>

%84%88#.E7.B5.84.E6.88.90

玉山國家公園:資源概況（地質）。擷取日期：2016/3/15。網址：

<http://www.ysnp.gov.tw/resourcesoverview.aspx?id=2>

科學人:臺灣島隆起的爭議。擷取日期：2016/4/1。網址：

<http://sa.ylib.com/MagCont.aspx?Unit=featurearticles&id=1351>

eGeoLogy: Earth crust。擷取日期：2016/3/13。網址：

<http://egeology.blogfa.com/post-119.aspx>

Poldervaart, A. (1955) Chemistry of the Earth's Crust. GSA Special Papers, 62, 119-144.

Rudnick, R. L. (1995) Making continental crust. *Nature*, 378, 571 - 578.

Rudnick, R. L. and D. M. Fountain (1995) Nature and composition of the continental crust: a lower crustal perspective. *Reviews of Geophysics*, 33, 267–309.

【評語】051909

本作品運用地殼均勻理論及分層地殼震波速度模型，建立台灣地區地殼密度模型，以推估台灣地區板塊碰撞現況，本作品的分析嚴謹，對於了解台灣地區的深部地殼形貌及板塊作用具參考價值。利用密度推估地殼構造具非唯一性，未來應可增加對重力資料的分析，以增加結果的嚴謹性。