

由金星與地球地形的比較談板塊構造

(Topography of Venus and Earth: A Test for the
Presence of Plate Tectonics)

赫 得

由 特 著

索來門

中央研究院地球
科學研究所籌備處
蔡義本 譯

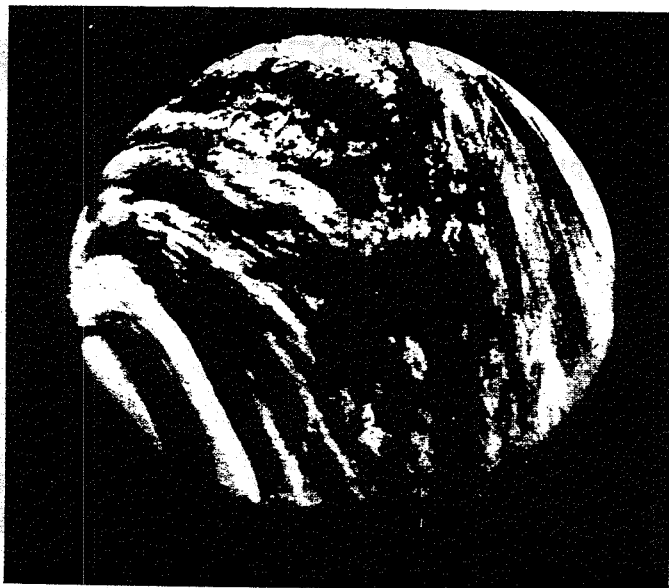
一、引 言

最近二十餘年人類對太陽系，特別是對鄰近地球的行星的探測，成果非凡。一方面人類登陸了月球，另一方面高度自動化的太空船深入探測了水星、金星和火星。另外若干火星、木星和土星的衛星形貌也不再是神秘不可及了。根據現有影像資料，科學家已能繪出行星地形圖，進而研究自太陽系形成初期以來各行星所經歷的地質作用。在同一時期裡人類對地球表面，尤其對廣大海洋所覆蓋海底的地形與地質也有了更詳細完整的了解，終於導致板塊構造學說的誕生及廣被接受。

由於大量探測資料的流通研究，最近出現一門新興科學稱為比較行星學 (Comparative planetary)。從對地球的表面及內部構造的了解，以及對其他行星表面影像資料的分析與比較，科學家已發現各行星之間顯然有若干相同與相異之處。這些知識使我們能進一步了解影響行星演化的重要因素。例如，除地球以外，屬地球型行星或衛星 (包括水星、火星、月球) 均具有相同的地形特徵，即佔其歷史的大部分時間都只有單一板塊構成外殼。此等行星或衛星的半徑均僅及地球半徑的一半或更小。在過去 40 億年裡，這些星球的穩定外殼僅被動的記錄下發生於星球表面的地質作用。相反的，地球外殼分裂成若干板塊，且不停的運動，結果破壞古老岩石並創造新的地殼。現在地球表面約有 60 % 以上面積的生成年代少於 2 億年，即少於地球總年齡的 5 %。

究竟什麼原因使地球與其他小於地球的行星或衛星發生這種基本差異，影響星球演化的主要因素是體積大小？抑或星球初形成時的狀況 (包括早期太陽星雲的溫度和壓力) ？在尋找解答這些基本問題的過程中，科學家一再把注意力投向隱藏在藍白色濃厚雲層裡的金星 (圖一)。金星一向被視作地球的孿生姐妹，其體積和密度皆與地球相近 (表一)，同時它也是最接近地球的一顆行星。因此探測金星應有助於我們了解影響地球型行星 (包括地球) 演化的主要因素。

基於上述考慮，美國太空總署發射一枚名為「金星先鋒號」的太空船，於 1978 年 12 月抵達金星



圖一 在濃厚雲層籠罩下的金星外觀。

表一 地球型行星體基本資料

行 星 體	質量 (地球質量倍數)	平均半徑 (公里)	平均密度 (克 / 公分 ³)
水 星	0.055	2437	5.43
金 星	0.815	6051	5.24
地 球	1.000	6371	5.51
火 星	0.107	3390	3.93
月 球	0.012	1738	3.34

附近開始環繞金星運行。該太空船上特別裝載有一具能透視金星濃厚雲層的雷達高度儀，以探測金星地形。茲將所獲結果簡介如下，並與地球地形作一比較，以探討其意義。

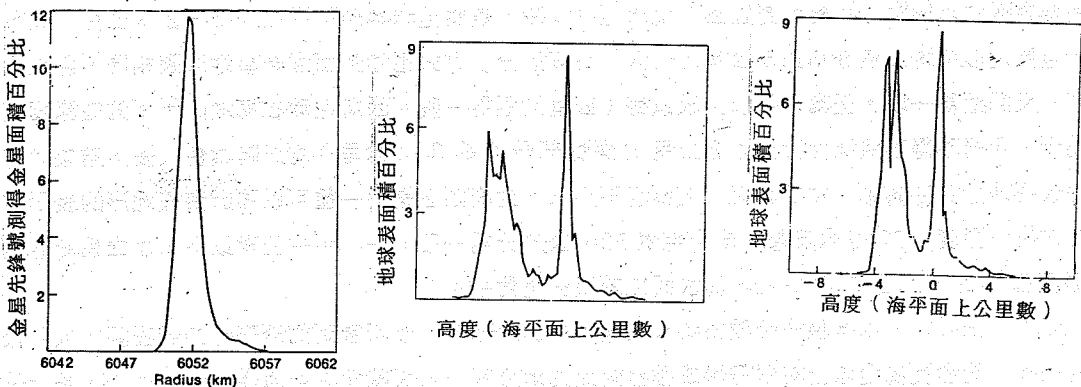
二、金星地形

金星先鋒號雷達高度儀的水平解析度約 100 公里，高度量測誤差平均約為 200 公尺，適合大區域地形普測之用。封面圖表示金星先鋒號雷達高度儀，已探測地區（約佔金星總表面積的 93 %）的金星地形圖。圖中高度以不同顏色代表，依地形高度和形貌，金星表面可分為三種主要地形區。由於金星表面上缺乏一個如地球海水面的共同基準面，因此金星地形高度是以半徑距離來表示。第一種地形為地勢低窪的金星低地（Lowland）區，包括高度在 6049.0 至 6051.0 公里之間的地區（封面圖深紫至淺藍色地區），約佔已探測區域面積的 27 %，其形狀有近乎圓形的大窪地，（如面積約等於墨西哥灣的艾塔蘭達盆地 Atalanta Planitia），有零星小區域，也有面積相當廣大的 Y 型低地（如席得

納盆地和圭尼威爾盆地 Sedna Planitia and Guinevere Planitia)。第二種地形為起伏緩慢的金星平原 (Plains)，包括高度在 6051.0 至 6053.0 公里之間的地區，(封面圖從深藍綠至鮮綠色地區)，約佔已探測區域面積的 65%，其中有數個類似構造谷地的區域，另有數個成因不明的高原，(如艾爾發高原 Alpha Regio)。疑似隕石撞擊遺跡的圓形構造，出現金星平原上的密度大於其他二種地形區。第三種地形為地勢高起伏大的金星高地 (Highland)，包括高度在 6053.0 至 6062.1 公里之間的地區，(封面圖從淺綠至白色區域)，約佔已探測區域面積的 8%。金星高地主要出現於三個地區。其中艾希達爾高地 (Ishtar Terra)，位於北半球高緯度地方，面積約等於澳洲，屬於高原地區，上有一系列山脈，主峯馬克斯威爾山 (Maxwell Montes)，高度達 6062.1 公里，高出金星表面平均高度 6051.5 公里，幾達 11 公里之多。艾福樂德高地 (Aphrodite Terra)，位於金星赤道地方，面積約等於非洲，該區地形複雜，有山地、谷地及一個直徑達 2600 公里的近乎圓形大區域。貝他高原 (Beta Regio) 的高度大於金星平均高度約 4.5 公里，上有得雅山 (Theia Mons) 與利雅山 (Rhea Mons)，似屬大型盾狀火山，為該區主要地形特徵。

三、金星與地球地形之比較

圖二為金星與地球不同地形高度，所佔面積之百分比。該圖顯示金星與地球地形起伏的上下限間之幅度大致相同，但兩者地形高度的分配情形却極不相同。地球因有大陸和海洋兩種不同性質的地殼構造，致使地形高度呈顯著的雙峯式分配。反之，金星地形高度呈顯著的單峯式分配，高度在金星常規高度 (6051.1 公里) 上下 500 公尺以內的區域約佔已探測區域面積的 60%。此種地形上的強烈對比究竟有何意義？是否因為類似地球大陸塊的金星高地，所佔面積比率 (約 8%) 比地球 (約 30%) 小太多之故？地球地形高度的雙峯式分配是否受海水重量的影響 (如使海床沉降)？或是因為這兩顆行星在組成和構造、地質作用 (如造山運動、火山活動、侵蝕和沈積作用)、以及演化上的基本



圖二 金星與地球不同地形高度地區，所佔面積百分比。高度間隔為 200 公尺，圖左金星地形高度分配曲線高峯部分，包括圖二由藍色至綠色間之地區。圖中及圖右地球地形高度取經緯度 $1^\circ \times 1^\circ$ 方塊內之平均高度。圖中高度表示大陸與海洋底實際地形高度。圖右高度為修正海洋重量效應後之大陸與海底地形高度。地球地形高度之雙峯式分配曲線，一部分起因為地殼分化所造成的結果，導致面積廣大的較輕的大陸地殼 (圖五橙色及棕色) 地區與較重的海洋地殼 (圖五綠色及藍色) 地區。

差異所致？

欲解答上列問題，我們需進一步檢視金星地形特徵及分布狀況，嘗試研判發生在金星上的地質作用性質。例如，我們已知地球板塊構造是導致褶皺山脈之形成、大陸之成長、以及海床之誕生、演化和消滅的基本過程。金星上是否也有類似過程存在？最近對金星的地球化學、地球物理和熱力學研究的結果顯示，金星現在不可能有類似地球板塊構造的過程存在。有些科學家認為目前金星表面溫度甚高，因此金星岩圈之密度應低於其下方的金星地函，致使前者缺乏足夠下沉力量，以開始隱沒作用。此外有些科學家指出金星上，並無類似地球海床上的中洋脊地形，因而認為金星現在沒有板塊構造。不過，在金星早期歷史中，即在金星表面水分未消失以及岩圈未形成之前，它可能曾發生過板塊構造的過程。

在此我們擬純粹以地形證據去檢驗「金星現在沒有板塊構造存在」，這句話的真實性。

我們只要再檢視一下金星地形圖（見封面），便可發現金星上找不到可供辨識各種地質作用的地質構造，如熔岩流、斷層崖、隕石坑、及褶皺山脈等，這是因為金星先鋒號雷達高度儀的解析度太低的緣故。辨別各種地質作用所造成的地形特徵，需要小於1公里的水平解析度，需比金星先鋒號精密一百倍以上。雖然如此，我們仍希望能從現有低解析度的金星地形圖，探索其地質意義。為此我們特地繪製一幅解析度與金星地形圖（見封面）相似的地球地形圖，如封底圖1，以為比較。此二圖皆用麥卡脫投影法繪成，且比例尺亦大約相同。兩者最大不同點在於地球的地形高度，是以平均海水面為基準，而金星的地形高度則以金星平均半徑為基準。

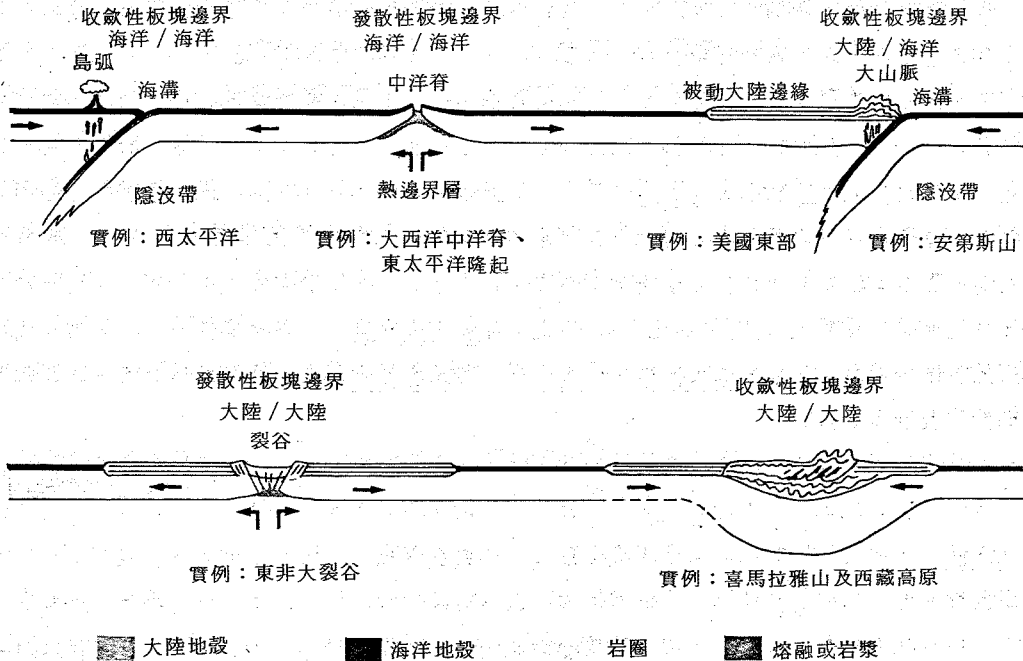
封底圖1所示，地球最高點和最低點間的高度差為15.4公里，比實際高度差19.7公里為小。這是因為封底圖1所代表的高度是以大約100公里×100公里區域的平均高度為高度，因此許多高度突出的小區域，地形特徵如埃佛勒斯峯或馬里亞納海溝，就無法在圖上顯示出來。依此原理推論，金星表面最高點和最低點間的實際高度差，很可能大於封面圖所示之值（13.7公里）達數公里。

由於金星和地球地形最大起伏之差異，（前者為13.7公里，後者為15.4公里），因此無法繪製完全對應的地形圖。在繪製封底圖1地球地形圖時，是將地球地形的平均高度-2.3公里，置於相當於金星地形平均高度6051.5公里的位置，高度的分段方式也和封面圖金星地形圖相同，即以每500公尺間距為一段，至褐色帶以上改以每1公里間距為一段。因為地球在海水面以下的總深度比金星為大，我們不得不將深度大於4.3公里的深海部分（約3.4公里）均以暗紫色代表，結果使許多深海低窪地形如海溝等，在封底圖1上顯現不出來。封底圖2是另一種可以強調海底地形的表示方式，即自最大深度-7700公尺起，向上每隔500公尺分為一段，一直到白色帶以下，而白色涵蓋地球地形高區其餘5公里的高度差，海水面位於淡黃色帶中。

假如一個外星人用金星先鋒號雷達高度儀來探測地球時，他所看到的地形將如封底圖1或封底圖2的模樣。他會發現地球上兩個形成強烈對比的地形區，即大陸地區和海洋地區。前者大體上是平坦的，偶爾在高原上出現若干形狀複雜的山脈地形。相反的，後者有連續性的線狀隆起（即中洋脊），將大小和形狀均不規則的海盆地區分隔開。

四、板塊構造的地形特徵

地球板塊構造所引起的地形特徵主要呈現於板塊邊界上，在此等地帶上，有的是新地殼正在形成，有的則是老板塊正互相撞擠、隱沒和消滅之中。圖三表示出現於不同性質的板塊邊界上的地形特徵。



圖三 與板塊構造相關之主要地形特徵，包括海洋／海洋收斂性板塊邊界（圖上左），海洋／海洋發散性板塊邊界（圖上中），大陸／海洋收斂性板塊邊界（圖上右），大陸／大陸發散性板塊邊界（圖下左），大陸／大陸收斂性板塊邊界（圖下右）。

在大陸地殼剛斷裂為新的板塊邊界的初期，主要地形特徵為由擴張性應力造成的大裂谷，同時有普遍的火山活動。但因水平解析度太低，致使東非大裂谷僅以寬廣高地區域呈現於封底圖1，而無法辨認出該線狀裂谷構造，該寬廣高地地形乃是區域性地熱作用和火山作用的混合產物。裂谷的最深部分（東非湖泊之底），是以一串斑點或短線段呈現於圖上。若大陸斷裂作用繼續進行，新海床即會形成，海底擴張隨之開始，到此階段線狀裂谷地形更趨明朗化。例如，東非大裂谷北端的衣索匹亞及艾法爾地區為紅海裂谷和亞丁灣的三叉交會點，同屬海洋地殼。隨海底不斷擴張，新海洋地殼的特徵也變得更顯著。位於擴張中心軸兩側的海底地形具有三大特徵：第一、擴張速率緩慢的中洋脊地區大多數有中央裂谷出現。第二、有一系列和中洋脊軸走向大致垂直的斷裂帶。第三、自擴張中心軸向兩側有高度遞減的寬廣地形高區。其中第三特徵被認為與海洋岩圈之熱邊界層效應有關，即海洋岩圈之冷卻為岩石年齡及其與擴張中心軸間距離的函數。由此可導出中洋脊之地形高度 e ，隨海床年齡 t 的平方根減小，即

$$e = e_0 - \frac{2\alpha\rho_m(T_i - T_0)}{(\rho_m - \rho_w)} \left(\frac{Kt}{\pi} \right)^{1/2}$$

上式中 e_0 為 $t=0$ 時之中洋脊高度(海水面下 2.5 公里), α 為海洋岩圈的熱膨脹係數 ($3.2 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$), ρ_m 為地函密度 (3.3 克/公分^3), ρ_w 為海水密度 (1.0 克/公分^3), T_i 為海洋岩圈底部之溫度 (1350°C), T_0 為海底溫度 (0°C), K 為海洋岩圈之熱擴散係數 ($8 \times 10^{-3} \text{ 公分}^2/\text{秒}$)。從上式可推知中洋脊橫剖面的地形形狀, 主要取決於海底擴張速率: 快速擴張者形成寬廣的高地地形, (如東太平洋隆起, 擴張速率為 $6 \sim 17 \text{ 公分/年}$), 慢速擴張者形成狹窄的高峯地形, (如大西洋中洋脊, 擴張速率為 $2 \sim 4 \text{ 公分/年}$)。在海底擴張過程中由正斷層造成的中央裂谷無法在現有金星先鋒號解析度的地形圖(封底圖 1 或封底圖 2)上辨認出來。相反的, 熱邊界層地形却是非常容易辨認, 尤其是東太平洋隆起和大西洋中洋脊。沿擴張中心軸的線狀地形特徵, 常被轉形斷層切斷錯開, 距離可達數百公里之多。由此可推知在相當於金星先鋒號解析度的地球地形圖上, 辨認中洋脊和它被轉形斷層切斷錯開所造成的顯著地形特徵, 可當做建立板塊構造的重要步驟。困難在於有這種地形特徵的區域, 在數目上比其他由火山熱斑(如夏威夷群島)、無地震洋脊及小板塊所構成的類似地形的區域少得多, 例如, 南大西洋、西太平洋、和印度洋中都有一系列面積不大, 且被隔離的海盆, 顯然與板塊構造無關。

圖三中亦表示收斂性板塊邊界上的主要地形特徵, 主要視互相撞擠的兩個板塊之地殼性質而定。海洋/海洋型板塊邊界(如西太平洋), 通常有一板塊隱沒於他一板塊之下, 在地表則形成海溝(如東加海溝), 並在上盤板塊上面出現火山島弧(如東加群島), 兩者走向大致互相平行。在海洋/大陸型板塊邊界(如南美洲西岸), 通常是海洋板塊隱沒於大陸板塊之下, 形成海溝(如秘魯、智利海溝), 以及在大陸板塊上形成有火山活動的褶皺山脈(如安第斯山)。在大陸/大陸型板塊邊界上, 兩者皆不隱沒, 而是由互相推擠造成一系列大規模逆衝斷層, 最後形成鉅大褶皺山脈(如喜馬拉雅山), 以及廣大大陸內部區域之地殼增厚(如西藏高原)。隱沒帶通常具有海溝地形, 但因海溝寬度大多小於 100 公里, 因此在解析度低的地形圖上呈現不出來, 僅有少數例外。在封底圖 1 或封底圖 2 上, 島弧系統(如日本、阿留申群島)雖可辨認, 但因與其平行之海溝無法辨識, 故仍難將島弧地形與板塊構造連結起來。它們看來與熱斑列島和古老的褶皺山脈地形, 並無太大不同。年代新的褶皺山脈則呈現十分顯著之地形高區, 尤其是喜馬拉雅山和安第斯山。可惜因缺乏更詳細之地形特徵(如海溝地形), 可資估證。此等地形高區亦甚難被明確認定為板塊構造的產物。例如圖上安第斯山和東非大裂谷兩側的地形, 即頗相似。喜馬拉雅山和美國西部的洛磯山看來亦不易區別。然而它們各自的成因却互不相同。至於較古老的褶皺山脈如阿爾卑斯山、阿帕拉契山、和烏拉山則更不顯著, 不論從其位置或外形皆難以使人能明確認定, 它們是板塊構造的產物。

五、金星是否有板塊構造存在

由前述分析我們可得到如下結論: 在相當於金星先鋒號解析度的地球地形圖上, 我們很難根據地形資料認定地球上板塊構造存在, 唯一可能例外是熱邊界層地帶。依現有板塊構造知識, 我們可將

某些地形如東太平洋隆起的雁行狀地形，視為正在擴張的中洋脊被轉形斷層切斷錯開的結果。既然熱邊界層地形是在相當於金星先鋒號解析度的地球地形圖上最有希望被辨認出來作為板塊構造的支持證據，那麼我們或可在金星先鋒號地形圖上尋找類似地形，以確定金星是否也有板塊構造存在？在進行此事之前，我們需注意兩個因素。首先，地球海洋裡的水為加諸海洋板塊上的負荷，它使海床沉降。海水厚度愈大，沈降量也愈大。但是金星無海洋，故應先將海洋的影響，從地球地形圖上除去，然後兩者再比較更為直接。在上式中，令 $\rho_w = 0$ ，便可除去海水的影響，結果使中洋脊的地形高區面積擴大，起伏減小。封底圖 3 及圖二 C 表示修正海水影響後的地形圖及地形高度分配圖。比較封底圖 3 與封底圖 2 以及圖二 B 與圖二 C，便可發覺海水對地形之影響確如上述預期情形。其次，地球表面溫度（ 270°K ）與金星表面溫度（ 740°K ）相差甚多，從前式中我們可推知金星表面較高溫度，將使其山脊高度減低（ $1 - 470^\circ\text{C}/T_1$ ）倍，結果將使金星擴張中心兩側的地形愈不明顯。總之，將金星先鋒號解析度之金星地形圖和相當之地球地形圖互相比較，以探索金星的地質作用，本已不易。今又加上金星無海洋而且表面溫度又高的兩項不利影響，可謂難上加難。在這些已知困難下，我們是否還能從金星地形圖獲得若干啓示。

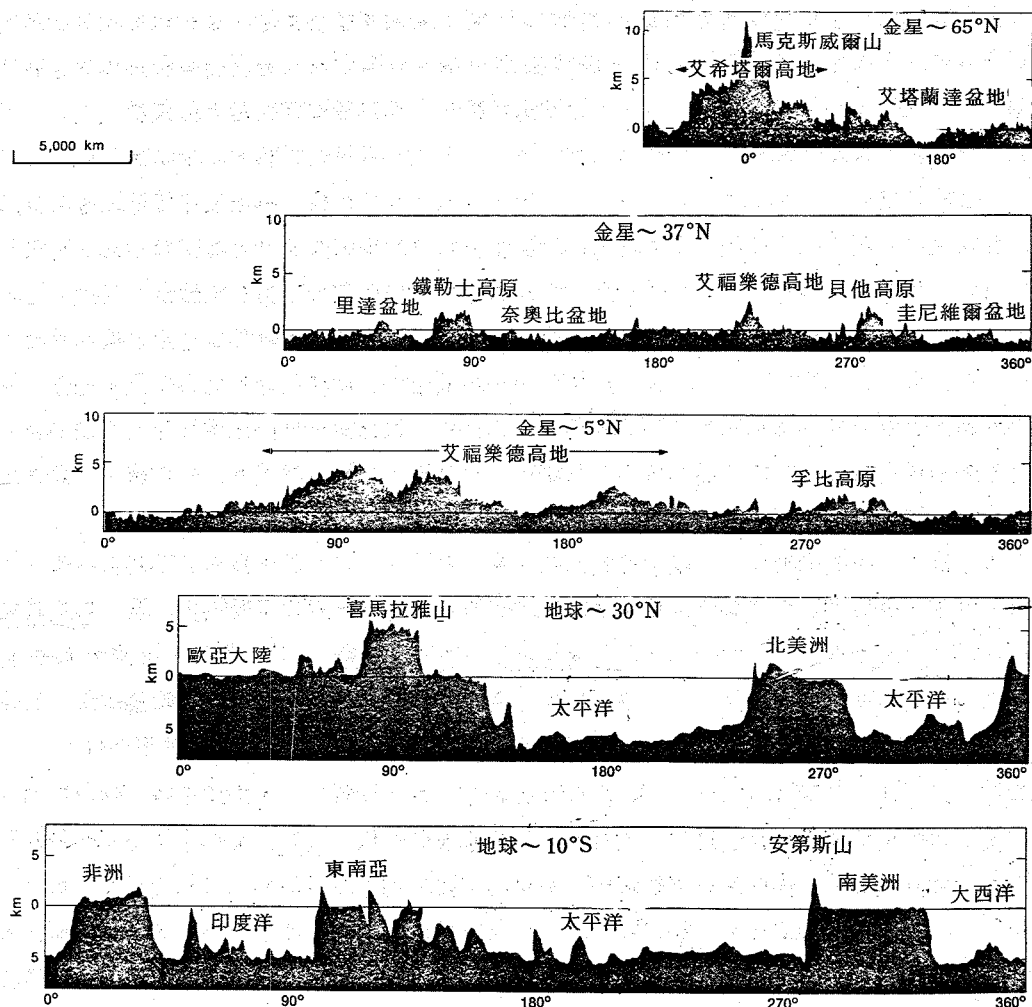
圖四表示沿不同緯度的地球與金星地形剖面圖，圖中顯示此二行星之地形有若干相似特徵，亦有相異之處。例如，金星上艾希達爾高地為兩側陡峻的高原，其上還有異峯突起的大山脈（馬克斯威爾山），與非洲和南美洲之地形面頗相似。艾西達爾高地在馬克斯威爾山以西部分之地形外觀與喜馬拉雅山相似。兩者都突出週圍地區，並有側面陡峻之高山出現於高原上。兩者不僅輪廓相似，且高度也極相近，此二例顯與月球地形及火星上比較平緩的泰力士隆起（Tharis rise）地形不同。

印度洋、太平洋、和東南亞有成因複雜的海底地形（包括擴張中心、熱斑遺跡、轉形斷層），和一系列島弧與弧後盆地之複合地形，大部分與金星平原地形相似。太平洋地形也和金星地形相似，東太平洋隆起與其他成因之海底地形甚難區別，金星的短波長和中波長地形起伏和火星及月球上的圓坑地形相似，例如金星上的艾塔蘭達低地和月球上的寧靜海地形相似。地球和金星若干大區域的地形亦無很大差異，例如非洲和金星艾希達爾高地皆為面積大且高度高的高原地形，週圍各有低窪地區，將它們與其他高地分隔開：在地球上，地中海分隔非洲與歐洲，在金星上馬克斯威爾山以東的南北走向低地則把艾希達爾高地分成東西兩部分。兩者又都有邊緣高地，如艾希達爾高地西南部分的維斯達魯比斯（Vesta Rupes）高地和非洲南部山脈。

儘管目前仍難明確指出金星主要地形特徵的成因，金星確有一系列十分突出的地形，顯與其他體積較小的地球型星球的地形不同。金星地形具有地球板塊構造的若干性質。

六、金星探測之未來展望

經過金星先鋒號的探測，無疑的已使我們對金星的了解向前邁進了一大步。雷達高度儀所取得的資料已足以使我們能將金星地形加以大略分類。目前我們對金星了解的程度，可以美國西部的探測歷史做比喻。在十八世紀及十九世紀初期，探險家們以百餘年的時間，對美國西部各地的高山、河流、峽谷、平原等進行探險觀察，並留下生動的描述。直到十九世紀中期，這些知識才被彙集起來編繪出



圖四 金星地形剖面(分別平行於北緯 65°、北緯 37°、南緯 5°),及地球地形剖面(分別平行於北緯 30°、南緯 10°)兩者相比較可見頗多相同之處。

第一幅美國西部概略地形圖。儘管累積了百餘年許多觀察和研究的結果完成了該圖，但以所用的比例尺及當時了解的程度，仍不足以獲知有關各種地形成因及演化的地質作用真象。一幅美國西部地質圖是又經過一百年的精密調查及研究才完成的。

以金星探測而言，目前我們所處階段大約相當於美國西部探測史上的十九世紀中期。我們已完成初步探測，今後仍需更進一步努力，才能將我們對這一顆遙遠，並且經常隱藏在濃厚雲層裡的金星了解，推進到相當於今日我們對地球了解的地步。以美國西部的探測而言，這一階段耗時約一百年，那麼以金星的探測而言，達成這個目標將需時若干呢？

美國太空總署正研訂下一次金星探測計畫，其基本目標即希望能一舉取得足以決定造成金星地形特徵之地質作用所需的數據資料。該計畫稱為「環繞金星影像雷達探測計畫」，其主要內容為發射一枚環繞金星飛行之太空船，其上將裝載能透視金星週圍濃厚雲層之高解析度雷達高度儀，其性能足

以測出金星表面上因火山、隕石坑、斷層、褶皺山脈等地質構造所造成的地形。這個計畫一旦實現，我們對金星了解的程度，當可在數年之間推進到相當於目前我們對地球了解的地步。對地球學生姐妹金星之進一步了解，以及對解決地球是否為太陽系中性質獨一無二之行星等基本問題，獲致解答的時日，應非遙不可及。 □

(原文：J. W. Head, S. E. Yuter, and S. C. Solomon: Topography of Venus and Earth-A test for presence of plate tectonics, American Scientist, 69, pp 614~623.)

封面說明

這幅金星地形圖是根據金星先鋒號，太空船雷達高度儀資料由電腦繪製而成。高度解析度約 200 公尺，平面解析度約 100 公里，受太空船軌道特性之限制，此次地形測繪地區涵蓋北緯 74° 與南緯 63° 間，約佔金星表面積 9.3%。金星平均半徑為 6051.5 公里，介於中藍色帶與深藍綠色帶之界面（見圖右色柱）。深紫色代表最低地形，由此向上至棕色帶高度，以 0.5 公里間隔分段。棕色帶以上則以 1.0 公里間隔分段，白色代表最高地形包括高度大於半徑距離 6062 公里之所有地區。

封底說明

封底圖 1，以麥卡脫投影法繪成之地球地形圖，其平面解析度與本文圖二金星地形圖相近。為便於兩者互相比較，特將地球平均地形高度 -2.3 公里，放置於與本文圖二金星平均地形高度 6051.5 公里相同之位置（即深藍綠色），高度分段間隔亦比照本文圖二方式。

封底圖 2，本圖強調地球海底地形之起伏，高度分段方式係從最低地形（-7.7 公里）起以 0.5 公里間隔分段至 2.3 公里，而以白色涵蓋高度大於 2.3 公里所有地區。

封底圖 3，本圖為修正海洋重量效應後之地球地形圖。海水面下之高度均為圖 2 之 2.3/3.3 倍，本圖全部地形高度範圍相當於圖 2，由上而下十六個色帶所代表者。
