

M. J. KEEN

AN INTRODUCTION TO
MARINE GEOLOGY

海洋地質學簡介

周曉原 譯
胡慶渝
黃廷章

海洋地質學簡介

(An Introduction to
Marine Geology)

凱

周
胡
黃

曉
慶
廷

恩

原
渝
章

著

譯

52/51/20



幼獅文化事業公司出版

六十五年八月再版
六十年九月初版

中華民國台北市

幼獅翻譯中心編譯

總經銷：幼獅文化事業公司
臺北市漢中街五十一號
臺北市延平南路七十一號
郵政劃撥帳號二七三七號
定價：新台幣 90 元

原 序

我試著把海洋地質及海洋地球物理學的一般狀況介紹給初學地質的人以及並非專攻地質的科學家們。在實驗室與實驗船上，有許多生物學家、化學家、數學家或物理學家等與地質學者或地球物理學者共事，本書可以幫助他們瞭解同事們的實驗目標。在不會失去精確性的條件下，我儘量減少引用專有名詞。本書絕未企圖包含海洋地質學的每一細節，至少我完全未涉及近岸的作業。書中許多章節是屬於說明的性質，對偶而看到本書的地質學者而言，這些，必然是太淺顯了，那麼，他當然會略過而去看他較不熟悉的部份。

凱 因

目 錄

原 序	1
第 一 章 簡介	1
地球的概略構造	1
構成地球外層的岩石	5
造岩礦物	9
火成岩	14
火成岩的分類	16
第 二 章 海底探勘的地球物理技術	20
導言	20
爆震學	21
反射：回音測探法及震波剖面圖	23
地震學研討：地震	33
海洋中的重力	35
地球磁場之總強度	41
熱流的測量	46
其他的方法及發展	49
第 三 章 海底地形	51
大陸緣	51
海底盆地	62
中洋海脊系	68
第 四 章 遠海沉積物	73
概論及定義	73
動物羣及植物羣	75
絕對年代之測定	85
沉積物的磁化：磁地層學	95
遠海沉積物之礦物學及地球化學	96

	遠海沉積物研究的應用.....	103
第 五 章	深洋平原之沉積物.....	109
	引言.....	109
	過去的濁流岩.....	118
第 六 章	海底運動.....	122
	趣味所在.....	122
	比基尼及愛尼威托克環礁.....	128
	海退及海進.....	134
	橫向位移：東太平洋的磁力異常.....	139
	異常的原因.....	143
第 七 章	海洋盆地的火成岩.....	144
	基性及超基性火成岩.....	145
	海洋盆地的火成岩.....	155
	海洋島嶼.....	156
	中洋海脊的火成岩.....	164
	伊比利深海平原的玄武岩.....	170
	一些伊比利山丘的地質.....	171
	海洋盆地的錳.....	174
	上部地函之非均一性.....	180
	摘要.....	188
第 八 章	海洋盆地的構造.....	190
	大陸邊緣.....	225
第 九 章	兩極移動和大陸漂移.....	244
	大陸漂移：海底擴展.....	251
附 錄		258
附錄一	地質年代表.....	258
附錄二	造岩矽酸鹽類.....	259
附錄三	索引.....	265
附錄四	人名地名索引.....	275
附錄五	原文參考資料.....	285

第一章

簡 介

本書的重點在敘述海底的各類岩石。讀者中如有不是學地質的人，可能對本書中的專有名詞會感到困惑，爲了儘量使所有讀者皆能了解，本章中將敘述一些基本的地質現象。書末附錄中有略表，將造岩礦物有系統的加以描敘，另有一地質年代表。

地球的概略構造

整個地球約爲球形，南北極稍扁，通過兩極的半徑約爲 6,357 公里，而赤道上的地球半徑是 6,378 公里。因而從赤道至兩極，每一緯度間的距離皆不相同。這個現象是牛頓最

先設想，而被布格及毛泊托斯（Bouguer and de Maupertuis）二位實際測量秘魯（Peru）靠近赤道處及拉布蘭（Lapland）兩個地方每一緯度之長而得到證實。地球的總質量為 $5.977 \times 10^{27} \text{g}$ ，平均密度為 5.517g/cm^3 ；因為在地球表面所能找到的絕大多數岩石，其密度皆在 1.5g/cm^3 到 3.5g/cm^3 之間，所以，在地表下的物質之密度一定是逐漸增加的。地球的轉動慣量可由天文學的方法測知，我們發現如果地球的密度是很均勻的，則其理論上的轉動慣量比實際測量的要大些。這更明白的指出，地球的物質一定是愈向中心密度愈大。進一步的推算，可知無論密度怎樣分佈，其間必然有不連續的界面。(42)

由研究地震及人為的爆震得知，在地球內部有許多的不連續面；這些不連續面最初是由地震或其他能源釋放出的波的速度而確定的。能波的速度與傳遞介質的物理性質有關，再考慮粒度、重量、轉動慣量等性質，我們可以合理的推論出密度的分佈。圖 1.1⁽⁴¹⁾就是一種可能的密度分佈狀況。圖 1.1 及圖 1.2 中表示出了地球內部主要的不連續面的位置，及縱波及橫波穿過各地層時之速度。有各種不同型式的波都能穿過均勻的彈性介質。只在介質表面，或是二種介質間的界面上傳播的叫做表面波。縱波是指介質中質點振動方向與波行進方向相同者，橫波則為介質中質點振動之方向垂直於波

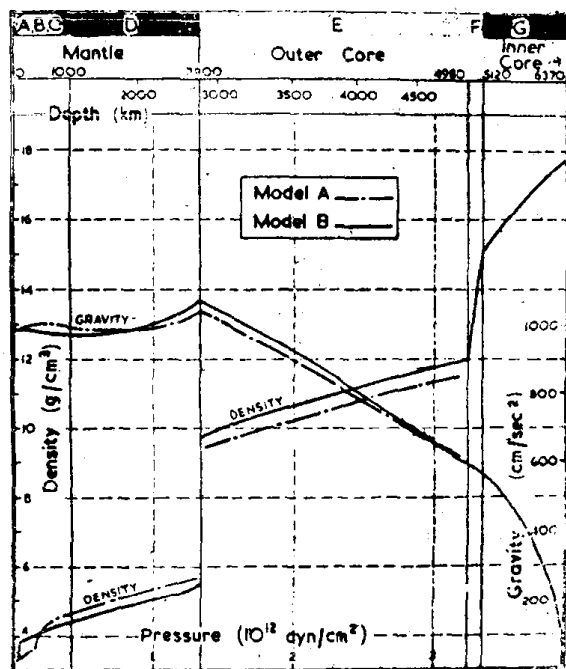


圖 1.1 地球內部壓力、密度、重力的兩種提出的模式。〔取自傑克貝 (140)，(J.A.Jacobs) 數據由 Bullen) 提供〕

之行進方向者；縱波的速度較橫波為大，橫波只能由固體傳遞。

地球內部有兩個最主要的不連續面；其一之深度約在地表下2900公里，另一個的深度則因地而異，約在10公里與70公里之間。第一個不連續面為地函與地心之間的界面，從地函進入地心時縱波的速度陡然急降，這可能是在跨過不連續

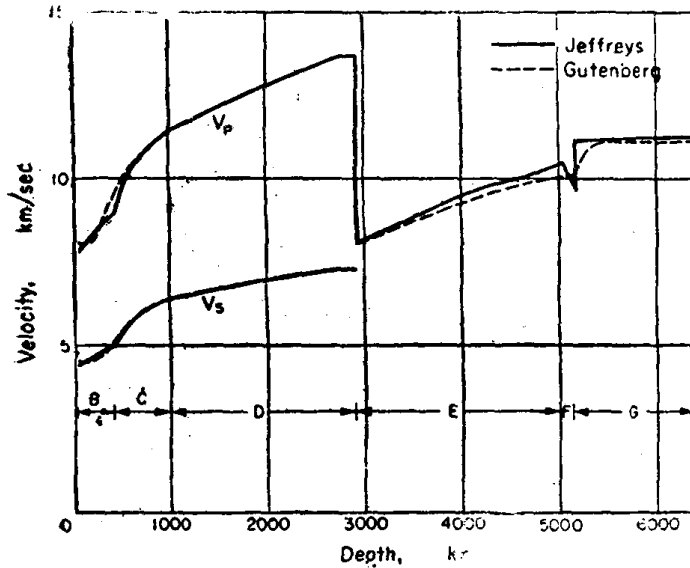


圖 1.2 壓力波 (V_p) 及剪波 (V_s) 的波速為深度之函數，圖示二位科學家提出之模式。(取材自傑克貝⁽¹⁴⁹⁾及布許，J.A.Jacobs, F.Birch)

面時，密度突然增加的緣故。觀察橫波的結果顯示出部分地心可能是流體狀態，因為橫波無法穿過地心的外圍而行進。

第二個不連續面就是莫氏不連續面 (Mohorovičić discontinuity)，常以符號M表示，莫氏不連續面分開了地球最外部薄層的地殼與地函。這層面可由縱波及橫波穿過時速度的變更而指認；以後在第八章中會更詳盡的討論到。

構成地球外層的岩石

假使有人問「地球是由什麼東西組成的？」恐怕沒有一個答案是完全正確的，我們所有的直接證據都不充分，因為無論是在地表或深僅數里的井中所得到的樣品，都只能代表整個地球質量中的一小部份而已。所以現在雖然有許多關於地球成份的論述，但皆基於間接的證據。地震學的實驗能推斷出地球深處物質的彈性變化。我們可以把在地表收集的物質置於模擬的深層狀況而加以實驗。隕石的成份又給了我們許多關於太陽系組成成份的線索。

地表所能看到的岩石可以歸納成三大類，沉積岩包括一切由水中沉積的無機物或有機物，由風吹集的顆粒，及由鹽水蒸發後的殘餘物。這類岩石的標準型式有砂岩，頁岩，及石灰岩。有時我們能看到火山噴出的岩漿在地表冷卻而硬化，這就是火成岩，凡是經高溫變成液體後再冷卻固結而形成的岩石都叫火成岩。當然，並不是所有的火成岩都是在地表形成的，有許多火成岩就是岩漿在相當深的地下穿入較冷的地層而形成。當岩漿流過地表時，其下的岩石會受到相當高的溫度所侵襲，如果我們仔細的檢驗這些曾受高溫作用的岩石，會發現他們與未經高溫作用的岩石有些不同。凡是岩石

經某種作用而改變其原有型態者，我們都叫做變質岩。由熱岩漿流過冷的地表所引起的改變只是變質作用的一例，稱之為熱力變質作用。這樣把岩石分為三大類是有些兒粗略，因為有些岩石既屬於這一類又屬於那一類。但這種分類在某些方面多少有些用處。同樣的，我們很難嚴密的定義出一種岩石的名字，但名稱是一種互相表達意思時不可或缺的工具。真正重要的是構成岩石的各種礦物的意義。從其中所含之礦物，我們能推斷出這塊岩石生成的環境及經歷過的各種作用。如果我們對於岩石的成份毫無所知，則不但無法將岩石定名，更無從討論其特殊意義，這些成份，或稱礦物，可以歸納成許多族，例如：矽酸鹽、氧化物、碳酸鹽等。

岩石的性質取決於其組成礦物的性質及排列的方式。岩石受到風化作用後會逐漸崩解，而其中不同的礦物在風化過程中會有不同的作用。例如蒙脫石 (Montmorillonite) 是海底火山岩風化後所生成的一種黏土礦物，所以它在海底的分佈狀況與海底火山的分佈有密切的關連。而高嶺石 (Kaolinite) 是大陸上部份火成岩風化後最普通的產物。所以它在海底的分佈可以作為研究洋流的線索。

大陸上的岩石種類混雜，沉積岩、火成岩、變質岩都有。但每一塊大陸最主要的組成份子還是地盾。地盾一般說來都比較安定，很少地震，多成平台狀而生成的年代也很久遠

了。在地盾上面及旁邊是些比較年輕的岩石覆蓋著，圍繞着。所有的地盾年紀都已超過八億年或十億年了；有的甚至有二、三十億年的歷史。地盾也是由許多不同型態的岩石所組成的。一般說來，這些岩石大都經過相當強烈的變質作用。它們的年紀都是以放射性元素衰變的速率來估測的。我們發現加拿大地盾是越靠近中心年代越老，靠邊上的都比較年輕。也許這表示大陸是由一個古老的中心逐漸在其周圍添加年輕的岩石而造成的。也有人認為這種現象不過是表示一連串的變動期而已，這裡所謂的變動是指強烈的變質作用及熔岩的侵入等。這些變動使得同樣的物質一再的曝露於地表後又被埋入地壳深處，循環不已，有如動物的反芻作用。加拿大地盾的修皮爾區（Superior Province of the Canadian Shield）近代噴出的熔岩經過變質作用後，與古代的熔岩極為相似。似乎為這種論點提出了不少證據。但若真是如此，則問題又來了；古代的熔岩是從那裏來的？是從地函中冒上來的嗎？我們都知道火山噴出的岩石主要都在海洋底下，那麼古代的熔岩究竟是與現代陸上的熔岩相似？還是與現代海洋中的熔岩相似。

一般人對山區中的岩層都比較熟悉——落磯山脈、阿帕拉契山脈、安廸斯山脈、阿爾卑斯山脈等。它們變質的程度較地盾所受者為輕，構造也較易於分辨。但並非所有的山

區都相同，譬如喜馬拉雅山現在的位置正好在兩塊大陸之間，而落磯山與安廸斯山位於北美洲的西緣。有人認為喜馬拉雅山是兩塊大陸互相結合時推擠而形成的。果真如是，則至少有一塊大陸曾漂浮而跨過海底的地層，造成海底許多大的裂隙及斷層。更進一步討論，如大陸塊確曾漂移，則因緯度的改變而使氣候迥異，氣候的改變則不僅可能造成洪水，且能在一相當的期間內將生存其間的生物羣落完全改觀，這種植物或動物羣落的改變可測知是受環境的影響而非因進化所促成的。這些生物羣落在地層中成為化石，則可為我們推斷當時的環境之依據。對於現在生存於海洋中的生物羣落與環境關係的研究，更有助於此一推斷。同樣的，我們可以用現在正在沉積的沉積物的許多特性，來推斷古老的沉積岩的生成環境及所代表之意義。例如某些特定的礦物，其在洋底分佈的情況，將視附近之大陸塊的岩性、洋流等之影響而定。當然，對化石及沉積物之推斷要考慮很多因素，並不是很簡單的事。譬如以往我們都認為，如果沉積物向某一方向逐漸變粗，則此方向指向沉積物的來源。但現在我們知道，洋流才是決定沉積物粒度分佈的主要原因。

海洋底部的地形與大陸上的地形不同，洋底地殼的構造也與大陸上的構造不同。而我們目前對地殼內部的構造，除了極少數的地方以外，所有的知識都是依據物理探測法所得

之間接資料而建立。同樣我們對海盆的了解亦是由物理方法探出。所以在下章中我們將討論一些用於探測洋底的物理方法及其推斷。本章剩餘的部份將複習一些造岩礦物及部份火成岩。這些東西對地質學家來說，當然都是熟悉的很了。

造 岩 礦 物

矽酸鹽類

矽酸鹽類主要是由矽、氧、及金屬原子所構成。矽與氧的排列方式是由四個氧原子構成一正四面體，矽原子恰居於其中。有些其他的金屬離子如果够小的話，也能取代矽在正四方體中的位置，例如鋁及鎵（Ga）。這些正四面體如果互相沒有氧原子共用，亦能單獨造成礦物。如果有一個以上的氧原子為各正四方體共用，則構成各種不同連接的型式。不同的排列型式使得礦物有不同的物質。依照其排列的結構可將矽酸鹽類分為：(1)單正四面體，(2)雙正四面體，(3)環狀結構，(4)單鏈狀結構，(5)雙鏈狀結構，(6)頁狀結構，(7)三向架結構。

單正四面體為最基本的矽酸鹽型式，由四氧原子及一矽原子組成 $(\text{SiO}_4)^{4-}$ 。因其帶有四個價電子，所以很容易與大

小合適的金屬離子作用。最常見的就是 Mg^{2+} 和 Fe^{2+} 與之作用而生成了橄欖石族的一系列礦物。其通式可寫作 $(Mg, Fe)_2SiO_4$ 。因為 Mg^{2+} 與 Fe^{2+} 的帶電相同，大小又極為相似，所以能完全互相取代，而於 Mg_2SiO_4 至 Fe_2SiO_4 之間，造成了一串連續性的中間礦物，但 Ca^{2+} 因此 Mg^{2+} 及 Fe^{2+} 要大些，故 Ca_2SiO_4 就自成礦物而不能加入此一系列。在橄欖石中的單正四面體排列的很緊密，使其密度相當大 (Mg_2SiO_4 , $3.22g/cm^3$)，橄欖石造成的結晶亦因而是各方向相等的，不會像雲母成片狀，亦不會像角閃石族成纖維狀產出。單四面體另外有一種互相連接的方法，造成了通式為 $R_1^{2+}R_2^{3+}Si_2O_7$ 的柘榴子石族。在這裡 R_1^{2+} 與 R_2^{3+} 代表的是某些金屬離子，如 Ca^{2+} ， Fe^{2+} ， Mg^{2+} 及 Mn^{2+} ，及 Al^{3+} ， Fe^{3+} ， Cr^{3+} 。

正四面體與其他正四面體連接時，以共用氧原子而造成的鍵最強。橄欖石族的連接方式是以共用金屬離子而連接，其力甚弱，故受到風化時，橄欖石就遠比石英易於分解。石英是三向架構的矽酸鹽，其中所有的正四面體都是以共用氧原子而結合的。同為三向架構的長石族，亦較石英易於風化，因為其結構中有金屬離子參與，而造成了格子中有些被歪曲減弱的地方。結合鍵的不同亦造成了礦物解理性質互異。輝石中的四面體以共用氧原子而結合成鏈狀（見下段），鏈

與鏈間以金屬離子連接。所以輝石族的礦物易解理成柱狀或絲狀。

每一正四面體可以用兩個氧原子一前一後的與另外兩個正四面共用，一直連續下去造成一條長的單鏈結構，其基本單位是 $(\text{Si}_2\text{O}_6)^{4-}$ 。鈣，鎂，及低價鐵離子都很適於這種結構中陽離子的位置。所造成的礦物就是輝石族，其通式為 $(\text{Ca}, \text{Mg}, \text{Fe})_2 \text{Si}_2 \text{O}_6$ 。這種鏈條也可能是成對併生，則其結構式成為 $(\text{Si}_4\text{O}_{11})^{8-}$ ，其餘的離子包括 Ca^{2+} ， Mg^{2+} ， Fe^{2+} ，及羥根 $(\text{OH})^-$ 等。所造成的雙鏈礦物常有成纖維狀產出的現象，以閃石族為其代表。這一族中最常見的礦物就是角閃石，但角閃石的構造太複雜了，所以我們用比較少見的透閃石來舉例，它的分子式為 $(\text{OH})_2\text{Ca}_2\text{Mg}_6(\text{Si}_4\text{O}_{11})_2$ 。

既然有雙鏈的化合物，依常理推論，必然有更多的鏈可以互相連接，而使四方體構成一個可以無限延伸的面。事實上確實有，這種結構就叫做頁狀結構。頁狀結構中的四面體只有一個氧原子未與其他共用。其構造的基本單位是 $(\text{Si}_4\text{O}_{10})^{8-}$ 。每一四面體未被共用的一角，皆為一羥根 $(\text{OH})^-$ ，這些 $(\text{OH})^-$ 亦是每一單元的一部份，故其基本單位成為 $[(\text{Si}_4\text{O}_{10})_2(\text{OH})_4]^{12-}$ 。然而自然界中鋁取代矽的現象太普遍了，所以我們只得再修正我們的基本單位成為 $[(\text{Al}_2\text{Si}_6)\text{O}_{20}(\text{OH})_4]^{14-}$ 。頁狀結構中常見的金屬離子有 Mg^{2+} ， Fe^{2+} 。