

中華民國建國六十年紀念

現代科學譯叢

譯權所有人：國立編譯館

原著者：George M. Hidy

譯者：蔡駿康 李根昌

風的起源與運動

正中書局印行



現代科學譯叢

風的起源與運動

原著者：George M. Hidy

譯者：李 駿 康
李 根 昌



00276368



200383753

正中書局印行



版權所有 翻印必究

中華民國六十二年三月臺初版

現代科學
叢書 風的起源與運動

全一册 基本定價一元七角
(外埠的加運費郵費)

原 著 者	George M. Hidy
譯 者	蔡 駿 康
發 行 人	李 根 昌
發 行 印 刷	正 中 書 局

臺灣台北市新園路二十號
暫遷臺北市南昌路一段十二號

海外總經銷 集成圖書公司
(香港九龍旺角洗衣街一五三號地下)

海 風 書 店

(日本東京都千代田區神田神保町一丁目五六番地)

內政部登記證 內販臺美字第一六七八號(6659)大興
(1000)

1990



00276368

風的起源與運動

海 第 (Hidy, George M.) 撰 蔡駿康 李根昌同譯
民國62年 (1973) 台北市 正中書局印行

(4) 171面 有圖 21公分

原書名: The winds, the origins and behavior of atmospheric motion.

I. 海第撰 II. 蔡駿康譯 III. 李根昌譯

3285

828

62-0012

國立中央圖書館

序 言

5907/27

研究地球流體流動的力學，成爲自然科學重要的一部份，稱爲地球物理學。由於對地球科學日益重視，許多學者正轉而對於大氣與其流動發生更濃厚的興趣。因爲地球物理學和流體動力學有密切的關係，因而大氣動力學在現代自然科學中更顯得格外重要了。以前對行星以及大氣力學的討論在物理學的基本教材中常不多見。爲了彌補這種缺憾，此書在未討論正題之前，先給對此有興趣的學者若干有關大氣層運動的重要特徵和輪廓，並顯示這些特徵如何與古典流體力學的一般範則相適應；更希望此書所提供的資料有助於學者和有關人員在研究大氣力學時，對若干基本觀念有所認識。

本書各章節內容已脫出上自古代希臘哲學家，下至近代某些科學家對大氣層研探的窠臼，書中大部份資料係從有關流體力學和氣象學的著作與期刊綜合整理之而得，因爲本書係初階性

質，盡量避免作深入與背景的討論。但須提到四項突出而豐富的資料來源。許多流體力學原理受到勃郎德 (Ludwig Prandtl) 氏所著 (Essentials of Fluid Dynamics) 流體力學精義，以及柯辛 (Stanley Corrsin) 氏所著 (Lecture Notes on Introduction Fluid Mechanics) 流體力學導論演講稿之影響。大氣層運動原理的運用在史考爾氏 (R. S. Scorer) 所著自然空氣力學 (Natural Aerodynamics) 及拜爾氏 (H.R. Byer) 的普通氣象學 (General meteorology) 書中有廣汎的討論。

本書所附圖解說明來源甚多，不能一一詳舉，作者深悉提供者的諸多協助，其中尤應感謝本里活 (A. Bainbridge)，李道夫 (J.W. Deardorff) 費雪爾 (W. Fischer) 威馬杜 (W. Willmarth)，及布萊特 (E. J. Plate) 諸位先生的大力幫助。作者特別歡迎有志之士的指教：以期他日更有所改進。

作者 G. M. H. 謹識

目 錄

序言

第一章 概論

- | | |
|------------------|----|
| 1.1 風的理論演進..... | 2 |
| 1.2 風的發生與持續..... | 13 |
| 1.3 大氣運動的特徵..... | 15 |

第二章 大氣運動的觀測

- | | |
|----------------|----|
| 2.1 測風儀器..... | 21 |
| 2.2 氣流的觀測..... | 30 |

第三章 靜態大氣

- | | |
|---------------------|----|
| 3.1 平衡狀態下的氣體特性..... | 37 |
| 3.2 靜態大氣的垂直運動..... | 43 |

第四章 力與運動

- | | |
|--------------------|----|
| 4.1 運動學——運動圖解..... | 53 |
| 4.2 本體力與分層的流體..... | 63 |
-

2 風的起源與運動

4.3 氣壓穩定性流體的壓力梯度	66
4.4 摩擦力	74
4.5 科氏力	76
4.6 牛頓第二定律與風的模式	79

第五章 大規模的大氣流動

5.1 主環流	89
5.2 大規模運動中的擾動現象	106

第六章 垂直對流的類型

6.1 對流環	117
6.2 強迫對流與界限層	122
6.3 本體力引起的大氣波	127

第七章 氣旋

7.1 溫帶氣旋	135
7.2 熱帶氣旋	138
7.3 小範圍氣旋	144

第八章 渦流與擾流

8.1 擾流	153
8.2 平均切應變與樂氏應力	157
8.3 擾流運動引起的物質擴散	167

第一章

概論

星辰與氣象，密切地影響着人類生存的世界。我們常見的風，便是氣象變化的明顯例證。（通常在氣象學中，僅指空氣的水平流動爲風；而本書則將空氣的水平和垂直流動，概括爲風。）雖然有的風是柔和而寒冷地吹過高山草原，有的風是兇猛呼嘯掃過北大西洋，但是這些風的本質皆是相同。無所不在的風，正是大氣氣團成雜亂運動現象的結果。所以，從物理學的觀點來說，所謂風的理論，實卽爲流體動力學所討論問題的一種。當然，像這樣的陳述，自必討論空氣運動特性與大氣物理學中的太陽輻射及雲層形成等等間的複雜關係。

欲徹底了解風的形成，必須廣濶論述天體物理的變化與地球物理現象。雖然有關大氣的運動問題，尚有無數未獲圓滿解答，但是從我們所熟知的地球表面空氣現象，仍可說明許許多多風的特徵。

討論大氣現象的氣象學，實為介紹風的本質的重要資料來源。實際上，氣象學家所討論的主要的對象是天氣。當然風也是屬於天氣的一環。本書將以論述有關空氣運動的動力學為主而不涉及空氣的熱度、溫度、以及風暴等現象。

1.1 風的理論演進

根據神話的傳說，自從北風神“Boreas”首次離開她的洞穴以後，人似就與大氣層的流動發生了關連。古時人類深信一切有關大氣現象的變化，皆歸屬於神力、神靈或是部落祭司，主宰着氣候的變化。約在西元前一千年前，荷馬（Homer）即曾以詩句形容神與氣候的關係。例如在 *Iliad* 中即記載着說：「正當希臘人行將攻擊 Trojans 的時候，Zeus 神召來猛烈的雷電，因而嚇退了希臘船艦。」在聖經中亦可找到許多神力影響天氣的例子。例如，聖經詩篇 107 節中，即有如此的記載：「他們看見神的偉業，祂那無比的力量。由於祂的旨意，造成暴風，把海水掀起大浪。」風與風暴間的相互關連起源於人類對氣候的探究。從事天氣預報的始祖們，用各種不同的小器具去測量風量。例如在人類文明萌芽初期，風車便已盛行於古埃及。古雅典著名氣象臺上的一座風標風塔便是建築於西元前二世紀。事實上，很可能希臘人使用風標尚較此早得多，不過他們這項文化的起源已湮滅而不可考。西元前五世紀，希臘哲學家已認識到氣候的發展有其自然的因素。但是他們缺乏觀測的儀

器和物理學的基本知識，因此他們僅靠推測來解釋大氣現象。其中第一個知名的氣象理論家就是亞里斯多德（Aristotle）。他在西元前 340 年所寫的“氣象學”便已將大氣中的風、雲、雨量及雷電等特性。作了一番歸納的敘述。亞里斯多德所創地球為宇宙中心的哲學理論，深長地影響了整個十六世紀的氣象學。事實上他的理論確為文藝復興時期的科學家，提供了對大氣現象所作解釋的基礎。亞氏理論大部份着重於空氣、水、火和地球等四種“元素”相互間的作用與變化。有趣得很，這些物質卻都成了今日地球物理學的重心。然而他與他的同儕一樣，却未能把握如今日我們所知的許多物理學基本定理。由於他們對自然現象的複雜性了解不足，所以就導致了對大氣變化過程不正確的解釋。舉例來說，亞里斯多德對風與大氣雷電效應間的關係曾解釋如下：

「當空氣變冷，雲層凝縮時，任何受到阻礙的乾燥氣流（指風）便加速衝出并衝擊其四周雲層，并因撞出而於火燄中產生響聲，此種響聲有人稱為雷神狂笑威嚇。當氣流以其實體力量猛撞火燄所產生響聲就如乾燥的木頭裂開發聲一樣。原則上射出的氣流以溫文之火在燃燒，當這氣流下降時，對我們看來似着了一層顏色，這就是所謂的閃電。閃電生於衝擊之後，并後於雷聲，但在我們看來“似先於雷，因為我們先看見閃光，後聽到響聲”」當然，我們現在相信，雷雨中的空氣運動，祇是與閃電間接地有關。在整個十六世紀中，希臘與羅馬，有許多論理氣象學家僅致力於證實與推廣亞里斯多德的觀念；而把預報天

氣的工作劃歸迷信星相學的範疇，但是有一個顯著的例外就是從事氣候工作的英國牛津大學學者威廉默耳（William Merle）他從1337年至1344年均有系統的收集英倫每日天氣觀測報告。雖然他的早期努力很重要，但吃虧在於當時缺乏溫度測量器，事實上，再過三百年後才有了溫度計。

新科學工具的誕生：

大約在公元1600年，近代氣象學需要的重要基本工具開始出現。就在剛進入十七世紀時，伽里略發明了溫度計。再經過約50年後，他的弟子托里西利（Evangelista Torricelli）用玻璃管和水銀槽製成了氣壓計。在同一時期內，粗陋但有效的測量溫度器具也已發明。十七世紀時，英國哲學家兼發明家胡克（Robert Hooke）和鄔倫（Christopher Wren）開始把幾件器材組為一套氣象測量儀。胡克最費心血的一項設計是一具氣候鐘，這一組儀器不但可以同時計量時間、溫度、壓力、濕度及雨量，還可測量風速及風向。氣壓計發明後不久，文藝復興時代的科學家們就醉心於尋找氣壓與天氣變化的關係。這種方法仍然是近代氣象預報的一部份。早期的氣象學家並不知悉氣壓變化會影響氣壓計的讀數，因而深信這種儀器所預測的天氣，可以完全無誤。事實上，胡氏設計了一個輪式氣壓計，其中裝有指針及刻度盤，可以指示水銀柱的昇降。刻度盤的標準是以七十六厘米水銀柱附近的“變化”為準，低壓標註為“暴風——雨”，高壓標註為“晴朗——乾燥”。這種預報方式迄今仍沿用於我們一般家庭氣壓計上。在此同時，用來測量大氣層運動的定量工具亦已獲進展，科學家已開始能獲得

更廣泛的風和天氣的記錄。到了十七世紀末期，有規則的區域性及國際性的風型及大氣情況記錄，在中歐、英倫，甚至於南加羅林納州等不同的地區都有保存。氣象學的知識，漸漸地開始由一個人傳到另一個人，由一國家傳至另一國家，使大氣科學取得了全世界性的地位。因氣象學有了詳細的記錄，科學家們便自然地開始從許多觀測記錄中，試行尋求其變化的規則，早在1625年，培根（Francis Bacon）曾設法探索較為特殊的季節性氣候的週期。培根的努力，掀起了人們對大氣層長期變化研究的序幕。這些研究工作現仍繼續進行，但甚少希望獲得確實的結果。

牛頓對動力學的構想：

在十七世紀末葉與一連串實驗科學方面的成就相平行的是古典物理學理論的顯著成就。牛頓爵士受了天文學家伽里略、布拉希及凱勒等對於宇宙自然律研究的影響，於1687年出版了他的不朽著作——自然哲理數學原理（*Philosophiae Naturalis Principia mathematica*）。在這本廣受稱讚的著作中。牛頓推論不論任何物體，大的或小的，均受到明確的重力與運動定律的影響。

所有在該原理中的概念，均已成為我們今日所熟知的物理學的主要部份。而且，自其中誘導出來的兩則重要原理亦成為近代氣象學的基石。這就是質量不減定理與運動第二定理。第一條定理說明質量本身不能創造也不能消滅；僅能從一種狀態轉換成另一種狀態。第二條定理說明一個物體的運動狀況，常隨所受外力而變，且在其運動方向上，產生與所施外力成比例的速度。理論上，這二條簡單敘述的定理包含了大氣動力學的

6 風的起源與運動

重要部份，因為牠說明了質量與力二者間的速度變化關係。就牛頓的自然哲理數學原理的重要性而論，它並沒有具體論述所有的必要解答。雖然第二條定理說明質量、力和加速度間的相互關係，但是它對於外力加于空氣本體時的性質，卻談論得很少。有關空氣的性質，以及其與力學重要原理的關連，仍有待發現。雖然在此後的 150 年內，熱與功間的確實關係仍未問世，但是若干關於氣體本質的其他知識則與牛頓的著作同時出現。舉例來說，1662 年愛爾蘭物理學家波義耳 (Robert Boyle) 即已發現如果溫度不變，則氣體的體積與壓力成反比。大約再過了一百年，法國物理學家查理 (Jacques Charles) 對波義耳定理更尋到了相輔的關係。查理的定理說：「氣體體積與其溫度的變化成正比。」再由這些定理又推導出理想氣體的特性概念，據此，空氣在冷卻或加熱後所產生壓縮或膨脹，是可以用計算推求出來的。牛頓、波義耳、查理等定理是物理學中的基本定律。若干大氣定律是從這些基本定律所推導出來的。在這種意識下，當然大氣物理學、地球物理學與天體物理學等也都是誘導出來的科學。哈萊 (Edmund Halley) 企圖用基本定律來探討風的特性，便是其中最早的一個例子。僅在波義耳發表他的定理後 24 年，大英帝國皇家天文學家哈萊便出版了關於熱帶貿易風與季節的成因的劃時代研究報告。在這篇研究報告中，它的第一張氣象地圖，便是討論在低緯度地區中所盛行的風。這些直接觀察報告，綜合了各項大氣現象的理論。就哈萊的理論來說，他認為盛行的熱帶風是由於太陽照耀赤道地區

的空氣所引起。空氣因受熱而上昇，故自地球南北兩方吸進空氣。這一運動概念與今日我們的理論極為接近。然而哈萊的假說，對於貿易風從北半球的東北及從南半球的東南吹來的理由，解說甚為含糊，他只能暗示熱帶風係隨太陽西走而生，大約50年後倫敦的一位赫德萊（George Hadley）律師，才提出解釋熱帶風特性的學說。赫德萊同意哈萊的說法，就是太陽的蒸晒是貿易風的起源。但是他假設空氣西流是地球由西向東旋轉的結果。赫德萊明瞭地球赤道地區的空氣移動要比兩極地區快得多。因此，向赤道移動的風，應該落後於旋轉的地球，換言之，當它到達赤道時，就必落在它開始的經度線後面。所以，從站在地球上的觀察者來說，風是向西吹的。赫德萊的結論非常接近柯里奧利（Coriolis）力的近代理論。

物理學新觀念的浪潮：

在第十八與十九世紀中發展出來的基本和應用科學中，哈萊與赫德萊的著作，多多少少代表了一種新的研究趨勢。這期間最大的一件事，就是超越了波義耳與查理的研究領域而邁向於氣體特質的了解。英國物理化學家道爾頓（John Dalton）開始探討風、雨以及空氣受熱等相互間的關係。例如在1790年，他發現了分壓定理。這條定理表明了混合氣體與各個組成氣體間的壓力關係。現代氣象學家便是應用這定理來計算空氣中的水蒸氣含量，並用數學方程式來表明大氣層中雲的形成。隨著氣體新知識的獲得，長久以來難解的風的物理性質，最後終於獲得解決。雖然熱與運動間的關係很早就已知道，但是熱能與動能的確切關係卻延至十九世紀中葉才找到了

正確的公式；約在這時，物理學家開始明瞭質量不變定理，也可以正確地運用在能量方面。能量是既不可能創造，也不可能毀滅的，其所能變換的，祇不過是它的狀態而已。英國物理學家焦爾（James Joule）在他的實驗中，建立了動能與熱能二者間的相互關係。焦爾的著名實驗之一，就是他設計了一個四週完全絕熱的盛水槽，並藉轉動浸于水中的木槳，來使水的溫度增加。實驗結果證明，施於木槳上的動能與水溫升高幾乎完全成比例。這個實驗結果的本身並不重要，重要的是，不論能量轉變的方式如何皆可獲得同一比例的事實。焦爾實驗結果顯示動能並沒有從木槳上消失，而僅不過是轉變成另一種熱能的形態。焦耳完成他的實驗不久，他的原理就被寫成了定律——第一條熱力學定理，或能量不滅定理。實際上，這個原理說出了熱與氣體內能、及氣體因膨脹而作工等相互間的關係。有了這定理，使得了解氣候與風的最後一個基本概念成爲可能。——俟這新的能量不滅定理出現後，新的流體動力學知識也已開始發展。十九世紀中葉，瑞士數學家歐勒（Leonhard Euler），以及法國數學家拉強治（Joseph Lagrange），拉普拉士（Pierre Laplace）和柏諾衣（Daniel Bernoulli）等先後着手考證牛頓理想（無摩擦）流體運動定理的成就，其中歐勒的工作尤爲重要，以致後世皆推崇他是流體動力學之父。十九世紀，理想流體論與電磁場論相互間的比較研究，係由德國科學家海爾賀茲（Hermann von Helmholtz）、蘇格蘭物理學家馬克威爾（James Maxwell）、英國物理學家雷萊（Lords

Rayleigh) 與凱雲 (Kelvin) 諸爵士加以發展。十九世紀中葉，由於理想流體論與實驗觀察間的相互矛盾，引出了雷諾斯 (Sir Osborn Reynolds)、納維爾 (C. L. Navier) 與史托克 (G. Stokes) 等學者對流體的摩擦特性的新理論。迅速發展的流體物理學知識，對從事大氣研究學者們亦很快地產生了影響。舉例來說，1835 年間的柯里奧利 (Coriolis) 即已寫下有關旋轉參考坐標軸產生視在力的原理。但直到一八五六年，因法國人傅勒 (William Ferrell) 解釋了赫德萊 (Hadley) 關於地球旋轉與大氣風向關係的假說，才使柯里奧利 (Coriolis) 的成果，有了新的生命。在十八與十九世紀時，由於職業與業餘科學家的特別努力，氣象學方面的觀念研究進行得更為熱烈。人們不久就明瞭，如要了解空氣運動，就應該探究上層空氣。因此，氣球就成為十八世紀氣象家的重要探測工具。1783 年法國蒙哥飛爾 (Montgolfier) 兄弟發明了空氣氣球。不久之後，查爾斯 (Jacques Charles) 將氣壓計帶至高空作為高度計用，不到兩年後，哲佛里 (John Jeffries) 製成第一批氣溫計及高度達 9000 呎的氣壓計。十九世紀中葉曾施放了無數的科學實驗氣球。其中最重要的一次，是由英國科學家格雷雪 (James Glaisher) 所主辦的，在 1862 年至 1866 年格雷雪做了二十八次的飛行測試，其中有一次，當他帶着大氣測量儀表，坐氣球升至 29,000 呎時，俟他那冷得半死的飛行員拆開放氣閥降下氣球前，便幾乎因缺氧而窒息到死。對於海洋氣候，海洋學家的航海日記提供了大部份的有系統