

大氣運動的美工者——柯氏效應

洪秀雄



圖一：日本 GOS 地球衛星所攝，民國66年9月8日
台北時間 01:20 所攝。一特颱風在太平洋東方海面，請注意
其螺旋狀雲系，是屬於氣旋。旋風所經過的地區，有明顯的螺旋狀雲系

我們觀看天氣圖和人造衛星拍攝的雲圖，再加上經驗，發現空氣的運動常常是循圓形軌跡的，譬如隨伴鋒面的氣旋和颶風。這些美麗的大旋渦（見封面）使得我們的地球從太空看起來婀娜多姿，而不是亂糟糟的一團。這些旋渦多半是地球自轉所導至的偏折效應引起的。在北半球這種偏折效應使得任何物體在運動時，都或多或少會有向右偏轉的趨勢；在南半球則相反，都有向左偏轉的傾向。空氣和海水的運動都不例外。這種偏折的效應，科學家們稱之為柯氏效應（Coriolis effect），用以紀念物理學家柯里奧里斯在這方面所作的貢獻。

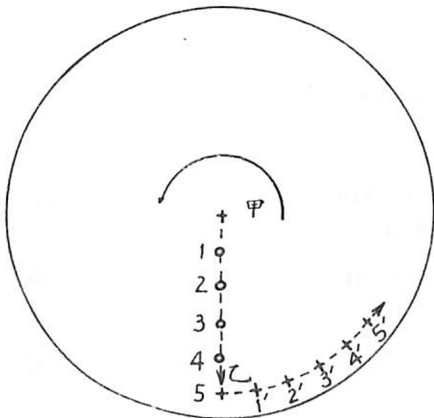
怎麼一回事

最容易說明這種效應的，大概是轉動圓盤的實驗了（譬如兒童樂園的旋轉木馬）。

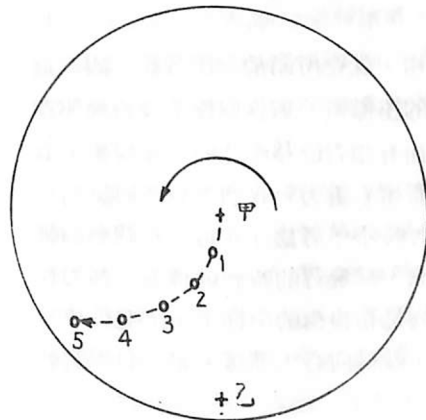
假設我們有一個能旋轉的大圓盤供你做實驗。這個大圓盤繞着軸心順著反時針方向做等速旋轉運動，它旋轉的情形就像我們從地球北極的上空看地球一樣

（見圖一及圖五）。現在你和你的朋友站在圓盤上玩投球接球的遊戲。剛開始的時候你們一定會很不習慣，因為你分明把球對準你的同伴扔過去，球卻老是飛到一邊，而且總是落到你的右前方。這到底為什麼？

為了明瞭原因，讓我們先看看比較單純的情形。讓我稱呼你為甲，你的朋友為乙，你站在圓盤的中央，擔任投球的任務。你的朋友站在圓盤靠近邊緣的地



圖一：旋轉圓盤的實驗之一，圓盤外面的人看到的情形。

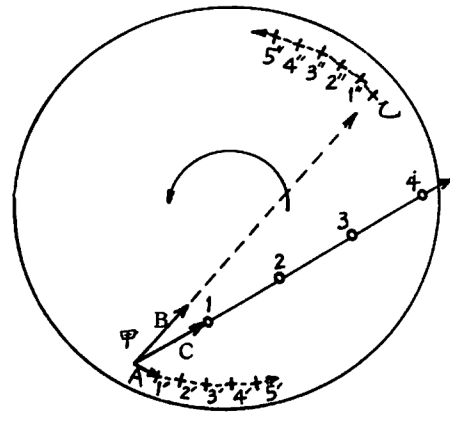


圖二：旋轉圓盤的實驗之二，站在圓盤上面的人看到的情形。

1982.2.

方，擔任接球的工作（見圖一）。因為圓盤本身在旋轉，你們當然也隨着轉動。現在甲把球對準乙扔過去，當然飛到1的位置時，乙已經轉到1'的位置了。當球的位置由1飛到5的位置時，乙實際上也已移到5'的位置了。因此對甲來說，他看到的球是向右前方飛的曲球；對乙來說則球是向左偏折的；但無論如何，球都是向前進方向的右側偏折（即順時針方向，見圖二）。

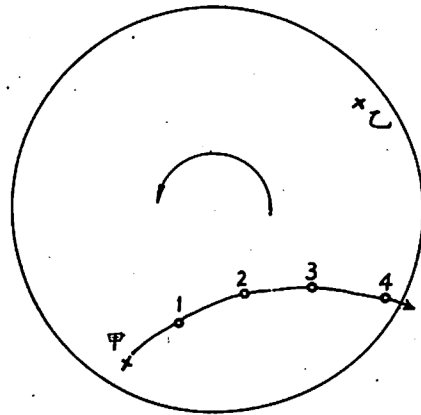
再看看比較複雜的情形。現在甲和乙面對面站在圓盤上的任意位置（見圖三），仍然玩同樣的遊戲。可是因為甲也隨圓盤轉動，本身已帶有沿旋轉方向的速度A，當甲以B的球速朝乙扔過去時，實際上球的去向已向右偏了些，而是以C的球速飛出去的。不要忘了，甲和乙都隨着圓盤轉動，而球自出手以後就延直線進行（牛頓運動第一定律）。當球依續飛到1、2、3、4時，甲和乙也分別依續移到4'及4''的位置。這時球顯然是飛到甲乙連線的右方（相對於球前進的方向）。而甲和乙二人所看到球前進的軌跡卻如圖四所示，是向右偏折的曲線。



圖三：旋轉圓盤的實驗之三，圓盤外面的人看到的情形。

這種偏折的作用，就是所謂的柯氏效應。因此這是兩個作相對運動的座標系（慣性座標系及自轉座標系），因為隨時間而有相對位移產生的一種現象，其中並沒有「力」的產生（重力對我們這兒所討論的現象沒有影響，可以暫時不予考慮）。可是在圓盤的轉動系統裏面的人看來，球飛行的時候就像有一種力作用於球，此力的方向是在自轉的平面上，並且垂直於球原來運動的方向，就像向心力那樣，因此科學家們

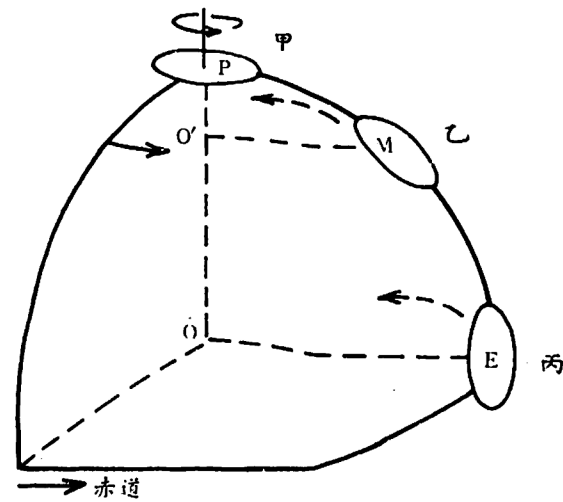
也常常稱這種現象是受了「柯氏力」的作用。不過，我這兒要提醒你一下，柯氏力是一種假力，而不是真力。



圖四：旋轉圓盤的實驗之四，站在圓盤上面的人看到的情形。

什麼樣的運動受的影響較大

若把上面所舉的原理應用到地球上來，則還要複雜些，因為地球是個旋轉的球體，而不是面。不過我們也可以把地球的表面分成好幾個平面（見圖五）。



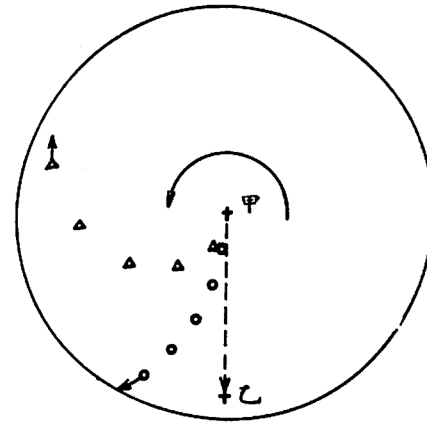
圖五：地球的剖面圖。O為地心，P為北極，E為赤道，M為任意緯度上的一點。

平面甲位於北極，平面丙位於赤道，平面乙則位於其他任何緯度。因為地球繞着連接南北極的軸自西向東自轉，平面甲就和我們前面舉的例子一樣，自轉的方

1982.2.

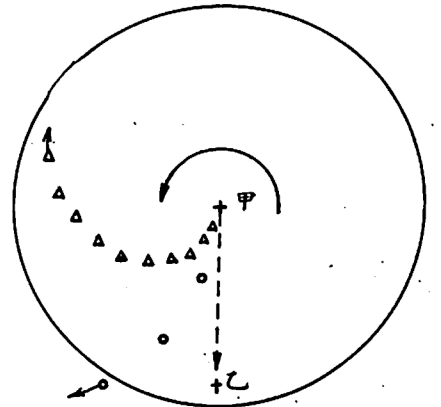
向平行於自己的平面。但平面丙則以OE為半徑繞着OP軸旋轉，旋轉的面和平面本身相垂直。前段我們已經知道柯氏力的方向平行於旋轉的平面，因此我們知道，如果有人平面丙上做投球接球的遊戲，他們不會看到球的去向有偏折的現象。換句話說，在赤道上物體的水平運動不會受柯氏效應的影響。平面乙位於北極與赤道之間，旋轉面與平面乙成一個角度，因此平行於平面乙的旋轉速度就比平面甲的情形小。

為了比較平面甲和平面乙上，物體運動所受柯氏效應有何不同，讓我們看看圖六的例子，還是甲和乙在圓盤上做扔球的遊戲。可是現在他們分別做兩次實驗，一次圓盤的轉速只有圖二那個例子的一半，一次則為一倍。假設在兩次實驗當中球速完全一樣。我們發現當轉速比較快時，球的軌跡被偏折的情形也較厲害。因此我們知道，當轉速較快時，柯氏效應的影響較大。換句話說，在地球上緯度越高，物體運動受柯氏效應的影響越大（參考前段）。



圖六：當運動速度保持一定，而圓盤的轉速有所不同的情形。小圓圈所形成的軌跡為轉速是圖二的一半時的情形。三角形的軌跡則是轉速為圖二的一倍時的情形。

運動速度也會影響柯氏效應的大小，這可由圖七的實驗看出來。現在圓盤轉速維持一樣，但球速則一次為圖二那個例子的一半，另一次為一倍。當球速大時，球的軌跡被偏折的程度越小；而球速越小，球的軌跡被偏折的程度越大。同時，我們比較圖六及圖七球的軌跡後將發現：球速增加一倍時的軌跡與轉速減少一半的情形完全相同；球速減少一半時的軌跡又與轉速增加一倍時的軌跡完全相同。可見柯氏效應是和球速與轉速的相乘積成比例。



圖七：當圓盤轉速保持一定，而運動速度有所不同情形。小圓圈所示的軌跡是當運動速度為圖二的一倍時的情形。三角形軌跡則是當運動速度為圖二的一半時的情形。

另外，即便球速一樣，旋轉速度也一樣，如果甲和乙相距較遠，或圓盤的範圍加大，由圖六及圖七我們也很容易發現球被偏折的情形越厲害（因為球在空中飛的時間加長）。可見物體運動的尺度（即範圍）越大，柯氏效應也越顯著。

一些實際的例子

地球是個自轉的座標系，它一天自轉一周。理論上，地球上無論什麼東西，只要有相對於地面的運動，就會受到柯氏效應的影響。譬如我們以每小時6公里的速度走路，每走1公里就會向右偏22公尺。再如我們以每小時20公里的速度騎着腳踏車依照想像的直線前進，每行1公里就會向右偏7公尺（這兩個例子，都是以北緯30°為參考點）。當然事實上我們不會感覺到這種偏折的傾向，因為我們生來就有一種隨時矯正方向的本能。不過據說迷路的極區探險者有一種在原地打圈圈的強烈趨勢，而且在北極是向右打圈圈，在南極則向左打圈圈。這很可能就是柯氏效應在作怪，因為極區的柯氏效應比我們這兒大了146%之多。

讓我們再看看一些無生命的東西在飛行時會受到多少影響。拿200公尺打靶來說，假設子彈的初速為每秒250公尺，當它到達靶標時，會向右偏6毫米。這個偏差當然微不足道。可是長程砲的射擊，就得對柯氏效應留點心了。譬如某戰艦瞄準32公里（8英吋加農砲的射程）外的一座橋梁，它打出去的砲彈將

1982.2.

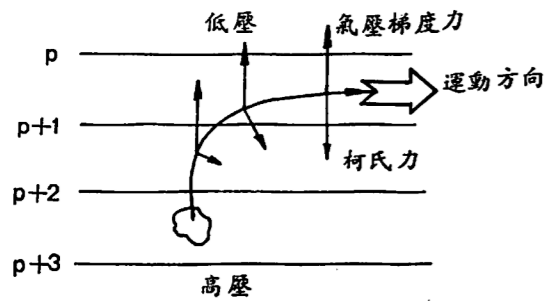
完全錯過目標，因為柯氏效應就會使砲彈偏離目標達 60 公尺。再拿第一次世界大戰時，德國一座射程達 112 公里的大砲為例，砲彈由砲口出來就得花三分鐘才到達目標，柯氏效應造成的偏差更是大得驚人，竟達 1.6 公里！

更長程的國際航線飛行，柯氏效應的問題就更嚴重了。例如自北極朝紐約飛行的飛機，假設飛行時速是 960 公里，如果中途不隨時修正方向，當它降陸時將會發現是在芝加哥附近，兩地相距達 1200 公里！

大氣運動會受什麼樣的影響

在所有受柯氏效應影響的現象當中，大氣運動大概是最有趣而且最複雜的了。

我們都知道空氣的流動就成風。可是什麼能使空氣流動呢？舉個最簡單的例子：一個吹脹的氣球，球內氣壓比外邊高，當我們把氣球的口打開時，空氣就會從裏面跑出來而造成風。因此有氣壓差存在時，風就會從高壓區吹向低壓區（如果沒有柯氏效應的話）。可是在一個旋轉系統裏面，情形就不一樣了。



圖八：地轉風平衡。

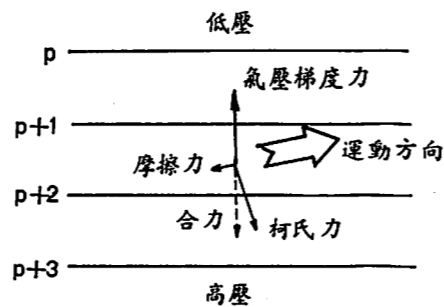
讓我們想像一團空氣自高氣壓區流向低氣壓區（為了簡單起見，假設這一團空氣在移動的過程中不會與周圍的空氣相混合）。但是當它移動時，因受柯氏效應的影響而向右偏折（見圖八）。開始的時候，由於空氣的移動速度慢，柯氏力小（如上面所說的，柯氏力的大小與速度成正比），而且與壓力梯度力（由於壓力差引發的力由高壓區指向低壓區）不同在一直線上，二者無法平衡，於是空氣團繼續向低壓區加速，而柯氏力也使它繼續向右偏折。一直到運動方向與等壓線（沿着這些線的各處氣壓都相同）平行時，柯氏力指向高壓區，正好與指向低壓區的壓力梯度力相平衡。此時空氣團不再向低壓區加速，而沿着等壓線

氣象預報與分析第九十期

運動。因此對於大尺度的大氣運動，風通常是沿着等壓線吹的，而不是由高壓區直接吹向低壓區的。這種平衡狀態，氣象學家稱之為地轉風平衡。

不過，以上的敘述是基於沒有摩擦力影響的假設。但在靠近地面的地方，因為有許多障礙物（如樹、草、房子等），摩擦力是很重要的。那麼有摩擦力的影響之下，平衡狀態會受到怎樣的改變呢？

我們現在在圖八的例子裏加上摩擦力（見圖九），摩擦力永遠是指向和運動速度相反的方向。現在我們有了三種力，要使它們達成平衡必須三種力都指向不同的方向，而且彼此的夾角必然大於 90° ，於是成了圖九那種安排法。柯氏力在平衡狀態時不再與等壓線成直角。但柯氏力和運動方向垂直，所以運動方向不再平行於等壓線，而是略有跨越等壓線的分量。（按：摩擦力在靠近地面的地方才顯得重要。）

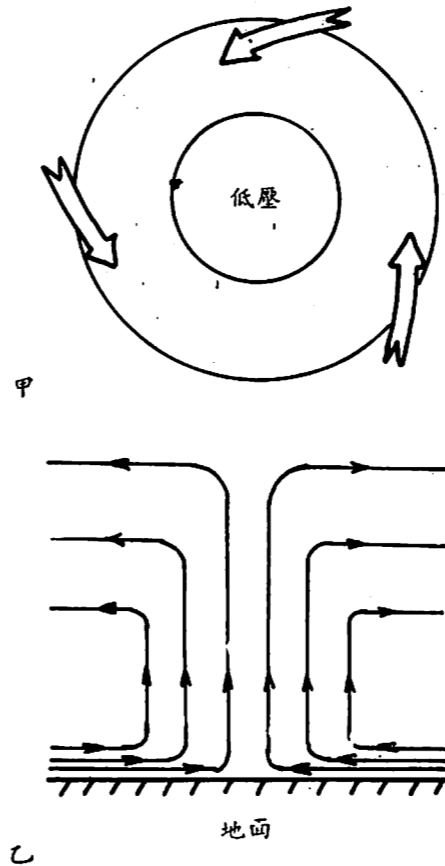


圖九：有摩擦力影響時，風有跨越等壓線的分量。

這個跨越等壓線的分量對於像圖九那樣的氣壓系統，除了使高壓區與低壓區的空氣有混合的作用外，似乎並沒有什麼重要性。可是對於封閉的低氣壓系統或高氣壓系統，這種跨越等壓線的行為就相當重要了。在沒有柯氏效應的情形下，風會從四面八方吹向低氣壓中心。但在柯氏效應的影響之下，風主要是繞着低氣壓中心打轉兒（地轉風平衡，註一）。在靠近地面的地方，摩擦力的效應使風有吹向低氣壓中心分量——亦即風一面繞着低氣壓中心打轉兒，一面吹向中心（見圖十甲）。向中心輻合的空氣到了中心無處可去，只有向上移動，因此就像有個幫浦把空氣自低處抽到高處去一樣（見圖十乙）。高處的氣壓較低，上升的空氣體積會膨脹，溫度會下降，所含的水汽比較容易凝結成雲。因此，低氣壓上空經常有螺旋形的雲籠罩（見封面照片），天氣較壞（註二）。高氣壓

1982.2.

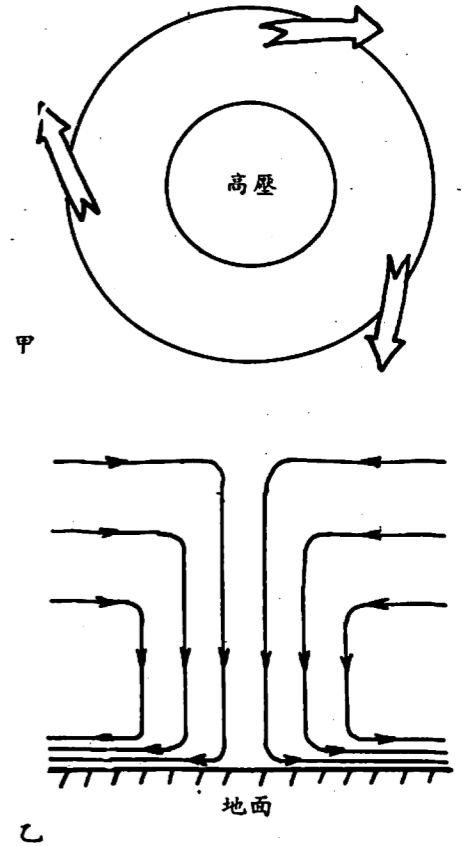
中心的情形剛好相反，風一面繞着中心打轉兒，一面向四面吹出去（見圖十一甲）。靠近地面的地方因為中心的空氣流出去，只有上空的空氣來補充（見圖十一乙）。下降的空氣受到擠壓，體積縮小，溫度升高，雲氣被蒸發，因此高氣壓中心的上空通常是晴朗。



圖十：封閉低氣壓系統風系。

颶風是一個很強烈的低氣壓中心，空氣的運動情形很像圖十那樣，只是要強烈得多（見圖十二）。對於颶風來說，上面所提到的把低處空氣自中心處向上「抽」的現象有兩層非常重要的作用。颶風誕生並生存於溫暖的海面，那兒水汽的供應很充分。這種抽的作用把低處的水汽抽了上雲，一方面上升的水汽凝結成雲和雨水，放出潛熱，供應颶風運動的能量。一方面把水汽帶走，使得海面水汽的蒸發更容易，而達到源源供應颶風能量的目的。因此颶風發展、維持或衰敗要看能量供應的大小和能量消耗的快慢而定，這些都和這種「抽」的作用有關。而抽的作用就是由跨越等壓線的風造成的。

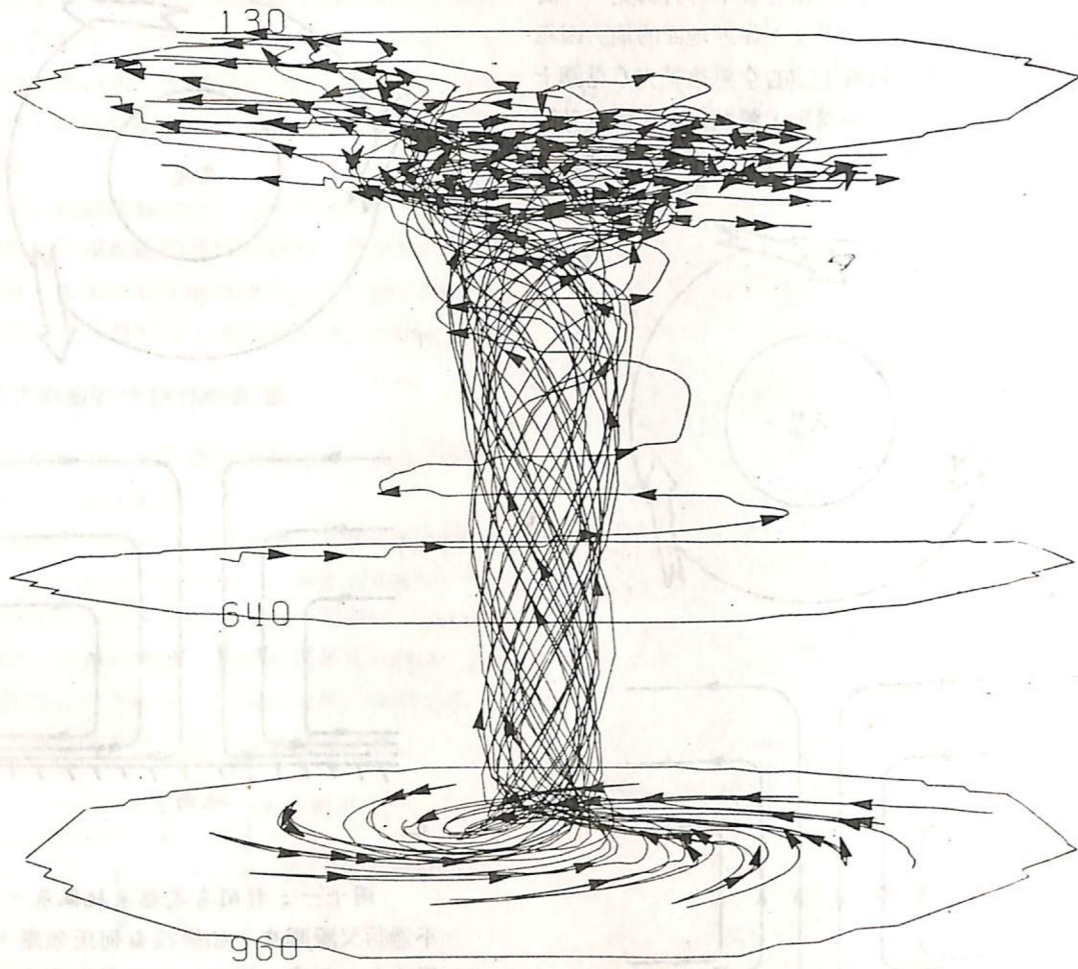
氣象預報與分析第九十期



圖十一：封閉高氣壓系統風系。

不過話又說回來。如果沒有柯氏效應，風直接自高氣壓吹向低氣壓，兩者的空氣很容易混合，而減弱或破壞氣壓梯度力，因此風不會太強烈。而柯氏效應使得風主要平行於等壓線吹，阻止了空氣直線的混合，才有那麼強烈的天氣現象，真是亦功亦過。

是不是所有的大氣運動都受到柯氏效應的控制呢？並不盡然。由前面的圓盤實驗我們已經知道，柯氏效應的影響程度要看運動物體的速度、運動的尺度（範圍）以及座標系統旋轉的快慢而定。大氣的運動也是一樣。氣象學家用所謂羅士培數（Rossby number——紀念瑞典學者羅士培對氣象學與海洋學所作的卓越貢獻。請參閱本期羅士培小傳一文）做為衡量標準。羅士培數就是地球自轉的特性時間與運動的特性時間之比。如果 Ω 表示單位時間地球自轉的頻率，則其倒數代表自轉的特性時間。又假設運動的速度用 U 代表，運動的尺度用 L 代表，則運動的特性時間為 L/U （即物體以 U 的速度走完 L 的距離所需要的時



圖十二：颱風裏面空氣運動的情形。本圖是以電子計算機算出來的（圖摘自 Weather-wise 1971 年 8 月號，作者為 Anthes 等三人）。

間)。因此羅士培數可以表示成：

$$\frac{1}{\Omega} \cdot \frac{L}{U} = \frac{U}{\Omega L}$$

我們前面已經說過，運動物體的速度越大，柯氏效應越小；地球自轉越慢，柯氏效應也越小；運動的尺度越小，柯氏效應越小。這些結果都指向同一結論：羅士培數越大，柯氏效應越小。反之，羅士培數越小，柯氏效應越大。通常當羅士培數小於 1 時，我們說柯氏效應是很重要的；而當它大於 1 時，柯氏效應就不重要了。例如大氣中的氣旋，其水平尺度約為 10⁶ 公尺，風速約為每秒 10 公尺，則羅士培數約為 0.1，因此柯氏效應是很重要的。

如果你想對柯氏效應在大氣與海洋運動中所扮演

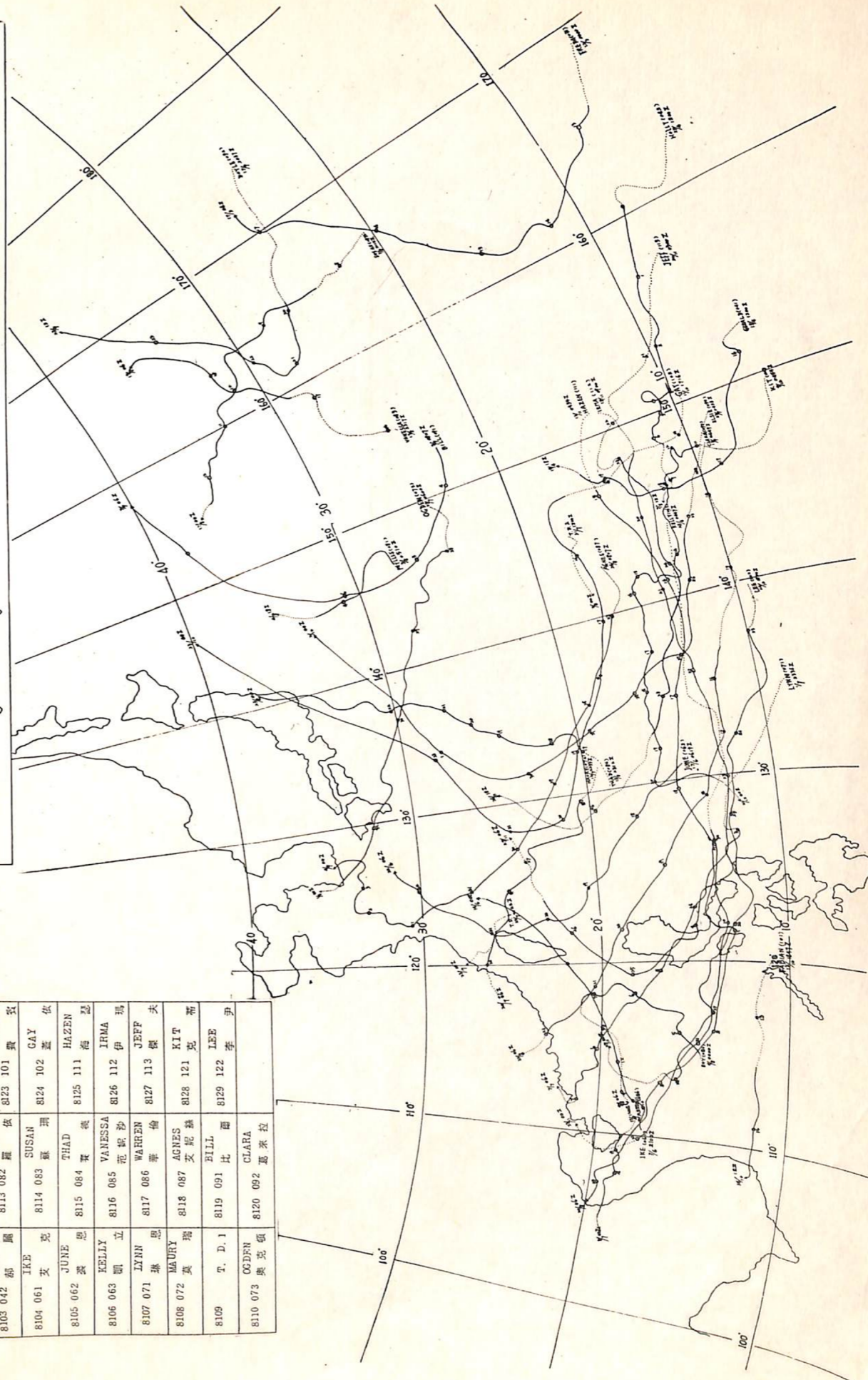
的角色有更深入的了解，我建議你看科月第一卷第十二期的「人類可能駕馭颱風嗎？」一文。本刊在下期也將有專文介紹洋流發生的物理。

註一：圓周運動還會導至離心力的發生，此時應該是氣壓梯度力、離心力及柯氏力互相平衡，這叫梯度風。不過原理和地轉風相似。為了避免引起不必要的複雜性，我這兒仍引用地轉風的觀念。

註二：因為低氣壓的風系是順著反時鐘方向旋轉，故又稱氣旋。不過實際上的氣旋比這兒描述的要複雜得多。

洪秀雄現任教於中央大學地球物理研究所，本刊編輯委員。

七十年來風路徑總圖



8101 031	FREDA	8111	T. P. 2	8121 093	DOYLE	田
8102 041	GERALD	8112 081	PHYLIS	8122 094	ELSIE	艾
8103 042	HOLLY	8113 082	ROY	8123 101	FABIAN	費
8104 061	IKE	8114 083	SUSAN	8124 102	GAY	蓋
8105 062	JUNE	8115 084	THAD	8125 111	HAZEN	海
8106 063	KELLY	8116 085	VANESSA	8126 112	IRMA	伊
8107 071	LYNN	8117 086	WARREN	8127 113	JEFF	傑
8108 072	MAURY	8118 087	AGNES	8128 121	KIT	克
8109	T. D. 1	8119 091	HILL	8129 122	LEE	李
8110 073	CCDFN	8120 092	CLARA			