

大規模大氣環流之動能產生與消散

Ernest C. Kung 著

呂 世 宗 譯

Kinetic Energy Generation and Dissipation in the Large-Scale Atmospheric Circulation

Abstract

The kinetic energy budget and dissipation are studied in their various partitionings, using daily aerological (wind and geopotential) data from the network over North America for six months.

The total kinetic energy dissipation is partitioned into vertical mean flow and shear flow and also into planetary boundary layer and free atmosphere. Furthermore, the dissipations in the vertical mean flow and shear flow are partitioned separately into components contributed by the boundary layer and free atmosphere. Two important terms in the total kinetic energy equation in determining the total dissipation are the generation and outflow. Two important terms in the mean flow kinetic energy equation in determining the mean flow dissipation are the conversion between the vertical shear and mean flows and the outflow. The mean flow and shear flow dissipations seem to have numerical values of the same order of magnitude. The evaluated boundary layer dissipation and free atmosphere dissipation indicate that the latter is at least as important as the former. It is also shown that the mean flow dissipation is mainly contributed from the free atmosphere while the shear flow dissipation is contributed from the boundary layer and free atmosphere in the same order of magnitude. The evaluated dissipation values and related kinetic energy parameters are presented and examined in detail.

Of special interest in this study is the direct evaluation of the kinetic energy generation due to the work done by the horizontal pressure force. Daily variation of the generation at different pressure levels seems to suggest three different modes of the generation cycle in the upper, mid, and lower troposphere. Clear vertical profiles of the generation from the surface to the 100-mb. level are obtained; it is shown that strong generation takes place in the upper and lower troposphere while the generation in the mid troposphere is very weak. It is also suggested that there may be an approximate balance of the kinetic energy generation and dissipation in the boundary layer.



一、摘 要

以北美洲觀測網六個月之高空記錄，對該地各種區域，研究動能的預計及其消散情形。

全動能之消散 (The total kinetic energy dissipation)，可分為垂直標準流 (Vertical mean flow)，切變流 (Shear flow) 行星界層 (Planetary boundary layer) 以及自由大氣層等。而且消散於垂直標準流與切變流者，亦可再合為界層與自由大氣層之兩成分。在全動能方程式中，決定全消散量之兩重要項為產生 (Generation) 與輸出 (Outflow)，又標準流動能方程式中，決定標準流消散量之兩重要項即為垂直切變流，標準流間之轉換與輸出。標準流與切變流之消散量似有同級的數值，而且預計界層消散量與自由大氣消散時，發現兩者均為重要，同時證實標準流消散量，如切變流消散量在界層和大氣層消散等量時，主要為消散於自由大氣。對預計消散量與有關動能因素亦加以提出並詳細的調查。

本研究之特點，為根據氣壓力所作之功，直接預計其動能之產生。據不同氣壓高度所產出之日變化，似暗示在對流層之上、中、下部有三種不同方式之產生循環，而且以地面至 100mb 之垂直剖面情形，證明在對流層中部其產生如微弱時，上、下部却有強烈之產生來代替。此種事實亦暗示在界層動能之產生與消散似在平衡。

二、前 言

大氣動能為有效的位能轉換而成，最後在摩擦過程消散之，因此大氣環流之強度與維持均依靠動能之產生與消散兩者間之平衡。

同時天氣擾動之發展與衰退亦受消散量之比率加以支配。此為大氣基本能量循環的主要過程，因此動能之消散，對大規模大氣動力之瞭解甚為重要。

至今，對大規模大氣環流之動能消散，作有系統的研究者尚少。在稀少研究報告中，我們認為 Brunt⁽³⁾ 之研究較早，不够廣泛的引用，極簡單的大氣模型加以估計。Lettau 和 Kung^(12,8) 等即以 Lettau 之界層理論模型⁽¹¹⁾，研究北半球低大氣層之消散傾勢。Holopainen^(4,5) 即應用不列顛島上之高空資料，由動能方程式之剩餘項下，求出其消散量。同 Ball⁽¹⁾，Jensen⁽⁶⁾，White，Saltzman⁽²⁸⁾ 等亦有提到。

在大規模大氣環流動能消散之研究，首先必須決定各種消散機構與大規模氣象參數之關係。本文即以行星界層為能量之消散對象外，僅限定大規模天氣參數 (Large-scale synoptic parameter) 與地面之空氣動力糙率 (Aerodynamic roughness) 兩個函數，關於能量消散之整個情形，事實上尚未瞭解，故有系統的研究必須從估計消散能量之大小開始，寧可提出有些消散量之分類及有關其他能量因素之意義。

至今對能量的消散機構尚無固定的想法，因此消散量只有由動能方程式之剩餘項下，加入少數的假設估計之，此可由廣泛而稠密之高空觀測網所得到的重力位與長期風信記錄，在詳細的分析計劃下進行。本研究係利用，北美洲 1962 至 1963 年間六個月之每日風信與重力位記錄。

全球性之消散量可從陸地某地區加以討論，雖然這種預選的研究僅限制於陸地，但亦相當的有益，因從稠密的觀測網所得的記錄，便於詳細的分析，而且此種初步的研究結果，對將來的研究非常有益。

本研究即以北美洲上空自由大氣之全動能劃分為垂直標準流與切變流，並對全體與區分的動能加以估計其消散量。全消散量亦分為消散於界層與自由大氣層兩部分 其中界層之消散即使用 Lettau 和 Kung^(12,8) 的方法估計之。這些消散量均加以提出並討論有關動能之各因素。

本研究之特點為使用風信與重力位之實際觀測記錄，由大氣質量的氣壓力所作之功，直接估計其動能之產生，並且詳細調查在各種氣壓高度之產生循環方式與產生量之垂直剖面情形。

三、消散值之劃分及其分析體系

如 Smagorinsky⁽¹⁹⁾，Wiin-Nielsen⁽²⁴⁾ 以及 Drake⁽²⁰⁾ 等，所提倡之方法，將全動能劃分為垂直方向之標準動能與渦流動能，尤其是將動能再劃分為垂直標準流與切變流實為有趣。這種劃分法特別適合於本研究的高空記錄，它雖然對垂直方向有良好的結果 (參考第三章)，但僅限定於陸地界限的水平上。

在下述討論中， V 為水平風之向量 (The vector of the horizontal wind)， V_g 為地轉風速 (The geostrophic wind speed)， u 為東方之風成分 (The eastward wind component)， v 為北方之風成分 (The northward wind component)， t 為時間 (The time)， f 為科氏參數 (The Coriolis parameter)， g 為重力加速度， P 為氣

壓, F 為單位質量摩擦力之向量 (The vector of the frictional force per unit mass), ϕ 為重力位能 (The geopotential), A 為地表面積, n 為垂直於陸界而向外之單位向量 (The outward-directed unit vector normal to the continental boundary), k 為垂直方向之單位向量, S 為陸地界限, Z 為地上高度, Z_0 為地表之空氣動力學糙率參數 (The aerodynamic roughness parameter of the earth's surface), ρ 為空氣密度, T 為空氣之絕對溫度, R 為乾燥空氣之氣體常數, ∇ 為等壓面之水平三角運算記號 (The horizontal del operator along an isobaric surface), 附字 "S," 示地表之變數。

假設垂直平均值 $\bar{X}$ 為

$$\bar{X} = \frac{1}{p_s} \int_0^{p_s} X dp \quad \dots\dots\dots(1)$$

在處, 再設

$$V = \bar{V} + V', u = \bar{u} + u', v = \bar{v} + v' \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$\phi = \bar{\phi} + \phi' \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$F = \bar{F} + F' \quad \dots\dots\dots(4)$$

式中 "—", 表示垂直積分平均值, " ', " 示其偏差。

而且

$$\bar{V}' = \bar{u}' = \bar{v}' = \bar{\phi}' = \bar{F}' = 0, \text{ 時} \quad \dots\dots\dots(5)$$

其運動方程式為

$$\frac{dV}{dt} = -\nabla\phi - k \times fV - F$$

或

$$\frac{\partial V}{\partial t} + (V \cdot \nabla)V + \omega \frac{\partial V}{\partial p} = -\nabla\phi - k \times fV - F \quad \dots\dots\dots(6)$$

式中

$$\omega = \frac{dp}{dt} \quad \dots\dots\dots(7)$$

其連續方程式可寫為

$$\nabla \cdot V + \frac{\partial \omega}{\partial p} = 0 \quad \dots\dots\dots(8)$$

假設 $p = 0$, $p = p_s$ 時 $\omega = 0$, 並使

$$\left. \begin{aligned} k &= \frac{1}{2} V \cdot \nabla V = \frac{1}{2} (u^2 + v^2) \\ \bar{k} &= \frac{1}{2} \bar{V} \cdot \bar{\nabla} \bar{V} = \frac{1}{2} (\bar{u}^2 + \bar{v}^2) \\ k' &= \frac{1}{2} V' \cdot \nabla V' = \frac{1}{2} (\bar{u}'^2 + \bar{v}'^2) \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots(9)$$

然後全動能 K , 垂直標準流動能 $\bar{K}$, 及切變流之動能 K' 可定為

$$\left. \begin{aligned} K &= \frac{1}{Ag} \int_A \int_0^{p_s} k dp dA \\ \bar{K} &= \frac{1}{Ag} \int_A \bar{p}_s \bar{k} dA \\ K' &= \frac{1}{Ag} \int_A \int_0^{p_s} k' dp dA \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots(10)$$

$$\text{而且 } K = \bar{K} + K' \quad \dots\dots\dots(11)$$

求第 (6) 式與水平風向量 V 之無向積, 並對陸界上空全大氣體積加以積分, 然後求摩擦項 E , 即為其全消散能。

$$\begin{aligned} -E &= -\frac{1}{Ag} \int_A \int_0^{p_s} V \cdot F dp dA \\ &= \frac{\partial K}{\partial t} + \frac{1}{Ag} \oint_0^{p_s} \int_0^{p_s} k V dp \cdot nds \\ &\quad + \frac{1}{Ag} \int_A \int_0^{p_s} V \cdot \nabla \phi dp dA \quad \dots\dots\dots(12) \end{aligned}$$

垂直標準流之運動方程式, 可由方程式 (2), (3) 和 (4) 代入方程式 (6), 並利用第 (1) 方程式之定義 (參考 Wiin-Nielsen⁽²⁴⁾)。求該方程式與垂直平均風速向量 $\bar{V}$ 之無向積, 而後對大氣質量加以積分, 即可求得垂直標準流之消散能 $\bar{E}$,

$$\begin{aligned} -\bar{E} &= -\frac{1}{Ag} \int_A \bar{p}_s \bar{V} \cdot \bar{F} dA \\ &= \frac{\partial \bar{K}}{\partial t} + \frac{1}{Ag} \oint_0^{p_s} \bar{p}_s \bar{k} \cdot \bar{V} \cdot nds \\ &\quad + \frac{1}{Ag} \int_A \bar{p}_s (\bar{u} \bar{\nabla} \cdot \bar{V}' \bar{u}' + \bar{v} \bar{\nabla} \cdot \bar{V}' \bar{v}') dA \\ &\quad + \frac{1}{Ag} \int_A \bar{p}_s \bar{V} \cdot \nabla \bar{\phi} dA \quad \dots\dots\dots(13) \end{aligned}$$

表面壓力 p_s 隨時間與水平面而改變, 然而該項必須隨水平壓力之改變而出現, 這些項即包括時間與 p_s 之水平偏差, 而在 (12), (13) 式中均省略之, 其可省略的微量程度, 在計算上已被證實。

切變流之消散能 E' , 可由下式求得,

$$E' = \frac{1}{Ag} \int_A \int_0^{p_s} V' \cdot F' dp dA = E - \bar{E} \quad \dots\dots\dots(14)$$

界層消散能 E_b 之估計, 即可由 Lettau⁽¹²⁾ 與 Kung⁽⁸⁾ 之方法求之, 而且 Lettau 的各種參數分析表, 理論風係數及應力扭轉 (Stress spirals) 均使用地面羅士培數 Ro_s (Surface Rossby number) 之單價函數 (Unique-Valued function), 即為

$$Ro_s = \bar{V}_{gs} / (z_0 f) \quad \dots\dots\dots(15)$$

回歸方程式 (Regression equation), 即由 $\log_{10} Ro_s$, 地轉拉力係數 (The geostrophic drag coefficient) C 及由等壓線所成之面應力偏角 α_0 等決定, 即為

$$C = 0.205 / (\log_{10} Ro_s - 0.556) \pm 0.0004 \quad \dots\dots\dots(16)$$

$$\alpha_0 = -3.03 + 173.58 / \log_{10} Ro_s \pm 0.19 \quad \dots\dots\dots(17)$$

至於面應力 (Surface stress) τ_0 與界層消散值 E_b 即根據

Lettau⁽¹¹⁾ 之方式, 如

$$\tau_0 = \rho_s C^2 V_{gs}^2 \dots\dots\dots (18)$$

$$E_b = V_{gs} \tau_0 \cos \alpha_0 = \rho_s C^2 V_{gs}^3 \cos \alpha_0 \dots\dots\dots (19)$$

地面之大氣密度即以

$$\rho_s = p_s / (RT_s) \dots\dots\dots (20)$$

概算之。

界層消散能 E_b 與大氣層消散能 E_r ，應等於全消散能，因此

$$E_r = E - E_b \dots\dots\dots (21)$$

設 F_b 與 F_r ，各為界層與大氣層之摩擦力，並

$$F_b = \bar{F}_b + F'_b \dots\dots\dots (22)$$

$$F_r = \bar{F}_r + F'_r \dots\dots\dots (23)$$

$$F = F_b + F_r = (\bar{F}_b + \bar{F}_r) + (F'_b + F'_r)$$

$$= \bar{F} + F' \dots\dots\dots (24)$$

然後垂直標準流消散能 $\bar{E}$ ，可分為界層消散能 $\bar{E}_b$ 與大氣層消散能 $\bar{E}_r$ ，因此可寫為

$$\bar{E} = \bar{E}_b + \bar{E}_r \dots\dots\dots (25)$$

$$\text{式中 } \bar{E}_b = \frac{1}{Ag} \int_A p_s \bar{V} \cdot \bar{F}_b dA \dots\dots\dots (26)$$

$$\bar{E}_r = \frac{1}{Ag} \int_A p_s \bar{V} \cdot \bar{F}_r dA \dots\dots\dots (27)$$

由同樣的方法，切變流消散能亦可分為界層消散能 E'_b 與大氣層消散能 E'_r ，

$$\text{而且 } E' = E'_b + E'_r \dots\dots\dots (28)$$

$$\text{式中 } E'_b = \frac{1}{Ag} \int_A \int_0^{p_s} V' \cdot F'_b dp dA \dots\dots\dots (29)$$

$$E'_r = \frac{1}{Ag} \int_A \int_0^{p_s} V' \cdot F'_r dp dA \dots\dots\dots (30)$$

其關係亦可如下之表示，

$$E_b = \bar{E}_b + E'_b \dots\dots\dots (31)$$

$$E_r = \bar{E}_r + E'_r \dots\dots\dots (32)$$

假設在界層摩擦力，可完全以切變應力之垂直變量表示時，

$$F_b = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau}{\partial z} \dots\dots\dots (33)$$

於界層之頂點， $\tau = 0$ ，因此可得

$$\bar{F}_b = \frac{g}{p_s} \tau_0 \dots\dots\dots (34)$$

$$\text{而且 } \bar{E}_b = \frac{1}{A} \int_A \bar{V} \cdot \tau_0 dA \dots\dots\dots (35)$$

式中面應力 τ_0 之方向與 V_s 之方向相同。

由上述綜合起來，方程式 (14)，(21)，(25)，

(31) 及 (32) 間之關係可列為下表，

E	$\bar{E}$	E'
E_b	$\bar{E}_b$	E'_b
E_r	$\bar{E}_r$	E'_r

其中雙線部分表示等號，右邊兩項之和，等於左邊之一項，下面兩項之和亦等於上面之一項，因此，一旦消散值 E ， $\bar{E}$ ， E_b 及 $\bar{E}_b$ 計出時，其餘消散成分即可由此表查得。

四、資料之收集與計算

本研究中之資料為北半球之高空日常觀測記錄，經美國氣象局地球物理流體動力實驗室，附設之美國活動研究中心 (Travelers Research Center, Inc.)，由麻省理工學院 V. P. Starr 教授領導，在國家科學研究基金之協助下所整理的。

該資料即為 1962 年 2 月，3 月，5 月，7 月，8 月及 1963 年 1 月等 6 個月，在北美洲大陸所觀測之記錄。

在計算界層消散時，所使用之季節性面糙率參數 (Seasonal surface roughness parameter)，即在各高空觀測站，以 Lettau⁽¹²⁾ 和 Kung⁽⁸⁾ 等之估計法，加以估計，而且其大部分為植物掩蔽區。

因實測之風資料，均和重力位能等資料，使用在估計特定問題之水平偏導數，故高空觀測站之廣大分布要勝於其均勻 (參考 Fig. 1)，其分布並無一定之規則，而且平常之微分法無法使用之。

Kurihara⁽⁹⁾ 曾以三個靠近之觀測記錄，計劃加以分析，並提出如 (36) 式之基本方程式，該方法之分析系統甚適合本研究。

設 Q 為一無向量變數， x 和 y 各代表向東與向北之距離，附字 A, B, C, 各為氣象觀測站之番號，並且 $\Delta Q_{BA} = Q_B - Q_A$ ，在等壓面上可假設，

$$\Delta Q_{BA} = \frac{\partial Q}{\partial x} \Delta x_{BA} + \frac{\partial Q}{\partial y} \Delta y_{BA}$$

$$\text{和 } \Delta Q_{CA} = \frac{\partial Q}{\partial x} \Delta x_{CA} + \frac{\partial Q}{\partial y} \Delta y_{CA} \dots\dots\dots (36)$$

式中無向量 Q 之水平梯度，可由此兩方程式求 $\frac{\partial Q}{\partial x}$ ， $\frac{\partial Q}{\partial y}$ ，而得，本計劃亦可使用於發散向量場，求各向量之水平向量成分。

在計算 A 站之 $\frac{\partial Q}{\partial x}$ ， $\frac{\partial Q}{\partial y}$ 時，可考慮該站週圍 4 至 6 個站 (至少要三個站)，並應用 (36) 式計算之。

同樣的方法，可由 B, C 等站得到甚多不同之 $\frac{\partial Q}{\partial x}$ 和 $\frac{\partial Q}{\partial y}$ ，如果將 $\frac{\partial Q}{\partial x}$ 與 $\frac{\partial Q}{\partial y}$ 適當的加以聯合，即可得到 A 站及其週圍站之 ΔQ ，然後以最小平方方法求其水平導數 (Horizontal derivatives)。

各站之日常高空記錄均對垂直積分 (Vertical

integration) 與垂直平均作業 (Vertical mean operation) 之適應性加以審查，一個站之觀測高度 (Observation level)，包括地面有二十點，其氣壓面即自 1000mb 至 100mb，每觀測站至少需要十二個觀測點，每點應有風與高度之記錄，這些觀測高度即從地面至 100mb 間，加以平均劃分，並除去

表一：有效測站數與日平均之有效日數

Table 1: Number of daily available stations and days available for monthly averages

Day	Jan. 1963		Feb. 1962		Mar. 1962		May 1962		July 1962		Aug. 1962	
	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)
2.....	84	29	...	...	78	22	86	35	79	34	87	33
3.....	89	32	89	35	83	23	91	38	74	27	81	34
4.....	79	30	81	32	85	28	86	36	84	35	84	31
5.....	80	31	86	32	82	29	85	33	80	33	85	34
6.....	87	36	74	30	89	31	89	40	80	31	89	36
7.....	83	32	87	30	82	28	91	39	79	32	88	34
8.....	78	32	86	33	79	31	83	27	83	34	83	31
9.....	78	25	84	31	89	31	86	32	89	34	88	38
10.....	76	24	86	32	84	31	82	31	88	36	87	38
11.....	83	28	84	33	83	28	85	35	79	32	81	31
12.....	...	...	86	31	...	...	87	34	80	33	85	37
13.....	...	...	84	32	...	...	80	30	90	35	85	35
14.....	...	...	81	34	79	28	83	29	83	33	88	36
15.....	(80)	(23)	85	30	90	30	84	31	...	...	84	32
16.....	(72)	(24)	83	33	89	32	82	29	88	39	89	38
17.....	(81)	(25)	85	31	90	37	89	34	91	34	84	37
18.....	(75)	(28)	81	34	87	34	86	37	86	36	77	32
19.....	(72)	(24)	78	28	85	32	83	32	85	35	87	35
20.....	(77)	(25)	79	23	87	36	85	35	83	34	86	37
21.....	(73)	(20)	78	22	80	37	90	36	89	38	87	39
22.....	(82)	(27)	...	...	84	35	82	33	78	30	89	36
23.....	(71)	(25)	81	21	83	34	85	34	82	33	87	34
24.....	(73)	(24)	78	29	86	31	88	33	88	41	82	37
25.....	...	...	86	26	81	29	85	33	89	35	79	33
26.....	...	...	82	27	...	...	88	36	85	38	...	...
27.....	...	...	79	25	87	33	86	38	84	33	...	...
28.....	...	...	...	...	86	34	90	36	88	33	...	...
29.....	...	...	...	...	88	33	82	35	84	36	...	...
30.....	...	...	...	...	89	34	...	...	87	37	...	...
31.....	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
Average	82	30	83	30	85	31	86	34	84	34	85	35
Total available days	10		24		26		28		28		24	

少於十二點之觀測站，大部分之有效觀測站即選二十點或接近於二十點之觀測點。不過在計算界層消散值 E_b 時，其地轉風速即使用實測值，或在 1000mb 高度之外插值。

圖 1 為高空觀測站之分佈情形。該陸地區內包括界層上共有 101 站，為水平偏導數之計算，再加界外傍邊之 18 站，總共有 119 站。

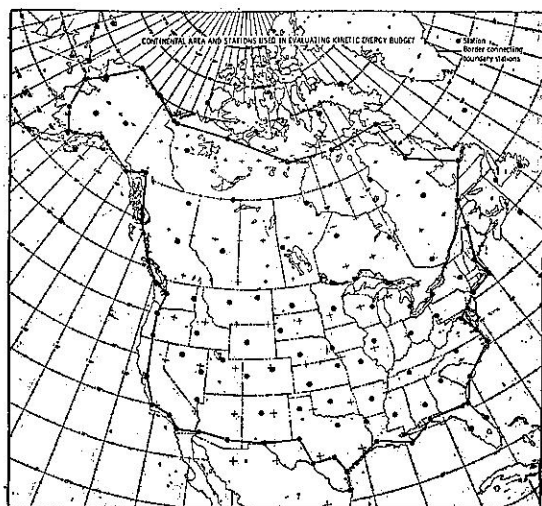


圖 1：預計動能所使用之地區與測站。

Fig. 1: Continental area and stations used in evaluating kinetic energy budget

計算時以每日為根據，逐日實行，每月第一天之資料除了計算第二天之時間微分外不包括在內。這些日之記錄，在下段討論中，有些觀測站即除之。在陸地區和界線上有效觀測站及被討論之日數均示在表一。表中亦明示各月之有效日數，各日之平均即被用為每月數值之計算。

在 1963 年 1 月，因中旬後該地區被強烈颱風侵襲，僅取十天之記錄，即以第 2 天至第 11 天等十天之記錄代表該月，其他月份即至少有 24 天之有效記錄。但是在 1963 年 1 月第 15 天至第 24 天所得之記錄亦對第 2 天至第 11 天之結果，互相對照加以討論。

一般認為以風信資料之計算結果，研究大規模動力較為困難，尤其是使用，有甚大的偶然誤差 (Random error) 之小數觀測站之觀測記錄，(參考 Holopainen^(4,5)) 來研究動能的輸出 (Outflow)。但是由稠密的觀測站所得到之記錄，均經詳細的判別與整理後，始用在本研究之計算上，因此其偶然觀測誤差 (Random observational error) 似被減

去甚多。而且因動能之產生和輸出之比，對分析範圍之大小成反比，所以對廣大地區之分析，須預期該輸出計算值之穩定與微量，不過在本研究中，我們並未發現甚大之波動誤差 (Fluctuating erroneous character)。

五、動能之預計與消散值

動能預計之月平均值，以第 2, 3 節所述之方法加以計算，並綜合於表 2。在 1962 年 1 月與 1962 年 2 月，其全動能各為 18.46×10^5 joules/m²， 24.14×10^5 joules/m²，即與 Saltzman 和 Fleisher^(17,18)，在 1951 年冬季之 18.7×10^5 joules/m²，Tewles⁽²²⁾ 於 1957-58 年冬季之 22.5×10^5 joules/m² 均吻合，這兩者均依據 Oort⁽¹³⁾ 所收集之資料而計出的。在 1962 年 7, 8 月之 K 值，各為 10.10×10^5 joules/m² 與 9.48×10^5 joules/m²。這些結果，與 Saltzman 和 Fleisher，於 1951 年夏季所計出之 9.5×10^5 joules/m² 亦甚吻合。在本研究，六個月中

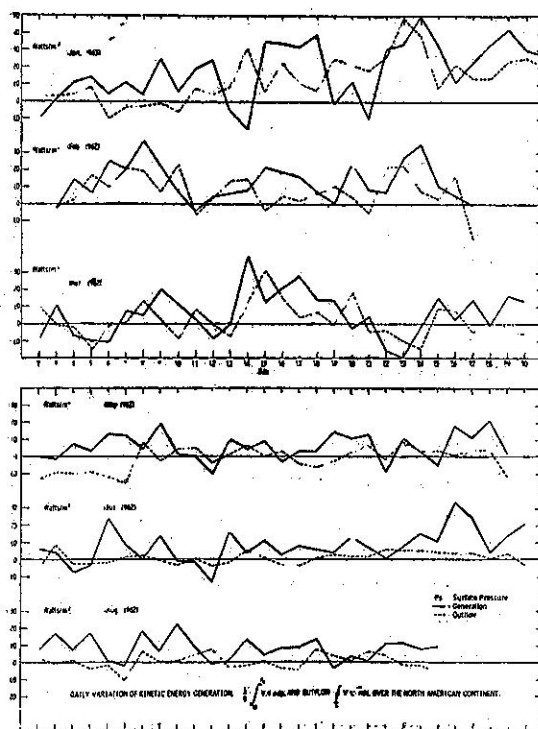


圖 2：北美大陸動能產生之日變化。

Fig. 2: Daily variation of kinetic energy generation $-\frac{1}{g} \int_0^{p_0} \mathbf{V} \cdot \nabla \phi \, dp$ (solid line), and outflow $\oint \mathbf{V}_k \cdot \mathbf{n} \, ds$ (dashed line) over the North American continent

表二：動能預計之月平均， K 、 $\bar{K}$ 與 K' 之單位為 10^5 joules/m^2 ，
其他數值之單位為 watts/m^2 。

Table 2: Monthly mean kinetic energy budget. K , $\bar{K}$ and K' are in units of 10^5 joules/m^2 . Other quantities in watts/m^2

Quantity	January 1963	February 1962	March 1962	May 1962	July 1962	August 1962	Grand Mean
K	18.46	24.14	18.96	13.47	10.10	9.48	15.77
$\bar{K}$	12.01	16.25	11.98	8.75	6.58	6.20	10.30
K'	6.45	7.89	6.98	4.72	3.52	3.28	5.47
$\partial K / \partial t$	0.78	0.58	- 0.20	- 0.01	0.27	- 0.04	0.23
K -outflow	0.25	7.59	1.88	- 1.07	1.58	0.35	1.76
Generation	8.56	12.52	6.55	6.13	8.43	8.02	8.37
E	7.53	4.35	4.87	7.21	6.58	7.71	6.38
$\partial \bar{K} / \partial t$	0.30	0.24	- 0.16	- 0.02	0.22	- 0.06	0.09
$\bar{K}$ -outflow	0.49	3.16	- 0.13	- 0.83	0.89	- 0.29	0.55
$(K' \rightarrow \bar{K})$	4.30	7.89	1.66	5.84	1.30	1.48	3.75
$\bar{E}$	3.51	4.49	1.95	6.69	0.19	1.83	3.11
E'	4.02	- 0.14	2.92	0.52	6.39	5.88	3.27

• K 之全平均值 (Grand mean) 為 $15.77 \times 10^5 \text{ joules/m}^2$ 。該值亦可與 1951 年 Saltzman 和 Fleisher 所計出之年平均值 $14.1 \times 10^5 \text{ joules/m}^2$ 互相對照。標準流動能之全平均值 $\bar{K}$ 與切變流動能 K' ，即各為 $10.30 \times 10^5 \text{ joules/m}^2$ 與 $5.47 \times 10^5 \text{ joules/m}^2$ 。六個月中， $\bar{K}$ 與 K' 之比約為 2:1。

以表 2 之表示法，計出之全動能方程式 (12) 之各項間，應有下列之關係，

$$E = - \left(\frac{\partial K}{\partial t} + K\text{-outflow} - \text{generation} \right)$$

全消散值 E 即可得到，式中主要項為那些由壓力而產出之項，陸區之動能輸出等，全動能之局部變化 $\frac{\partial K}{\partial t}$ 甚小， $\frac{\partial \bar{K}}{\partial t}$ ， K 之輸出，產生等之全平均各為 0.23, 1.76 及 8.37 watts/m^2

圖 2 表示動能之產生與輸出之日常變化，其變化情形甚為一致。

北美洲大陸，通常為動能通量 (Kinetic energy flux) 發散之地區。如果因水平壓力與輸出間，發現產生差 (The difference of generation) 時，該地區即為內產生 (Net generation)，或稱謂內補充 (Net supply)，關於 1963 年 1 月，1962 年 2, 3, 5, 7, 8 月等之內產生各為 8.31, 4.93, 4.67, 7.20, 6.85 及 7.67 watts/m^2 ，其全平均即為 6.61 watts/m^2 。

這些內產生與有效位能對動能之比約為同樣大小，根據 Oort⁽¹⁸⁾ 之調查，約在 0.91~3.37 watts/m^2 之間，其調查即依據 Brown⁽²⁾，Krueger，Winston，Haines⁽⁷⁾，Saltzman⁽¹⁵⁾，Fleisher^(16,17)，Teweles⁽²²⁾，Wiin-Nielsen，Brown，Drake⁽²⁵⁾ 等之高空觀測資料及 Phillip⁽¹⁴⁾ 和 Smagorinsky⁽¹⁹⁾ 之數值實驗結果。本研究之內產生值，通常比該調查值較高，其理由可解釋：第一，本研究僅限定於北美洲大陸，我們可預期該地區之內產生值比北半球之平均值為大，甚至經扣除輸出後尚為大。1953 年 1 月，White 和 Saltzman⁽²³⁾ 即估計，該地區之能量變換約為 5 watts/m^2 ，其結果與本研究之內產生值甚為吻合。該調查為使用各站氣壓變化之大規模變差及 500mb 之溫度，並且限在北緯 35 至 60 度，西經 70 至 120 度之地區。第二，以觀測風與第 20 點氣壓面之高空資料所預計之內產生值比在該地區高低兩對流層之水平壓力所生之動能產生為大 (參考表 5，圖 9 至 12)，關於這點在第 5 節再詳細討論。

ϕ 之水平梯度界 (The horizontal gradient field) 可滿足所有氣壓層，但重力位能 ϕ 之垂直積分即難。

因 ϕ 在高層對流層比低層對流層大 2 級，高層氣壓之輕微觀測誤差對預計 $\bar{\phi}$ 亦有甚大之影響，在基本研究中，曾假設垂直標準流之動能方程式裏含有 $\bar{\phi}$ 的

項，即 $(1/Ag) \int_A p_s \bar{V} \cdot \nabla \bar{\phi} dA$ 可省略，

該項之實際等級可由下式求之 即

$$\bar{V} \cdot \nabla \bar{\phi} = \nabla \cdot \bar{V} \bar{\phi} - \bar{\phi} \nabla \cdot \bar{V}$$

式中 $\nabla \cdot \bar{V} \bar{\phi}$ 約和 K -輸出同級的小，(參考表 2)， $\bar{\phi} \nabla \cdot \bar{V}$ 即由連續方程式 (8) 可知更為微小。

以由標準流動能方程式所計出之各項及表 2 之記錄，方程式 (13) 可寫如

$$E = - \left(\frac{\partial K}{\partial t} + K\text{-outflow} - [K' \rightarrow K] \right)$$

方程式中，最重要項為

$$[K' \rightarrow K] = - \frac{1}{Ag} \int_A p_s (\bar{u} \nabla \cdot \bar{V}' \bar{u}' + \bar{v} \nabla \cdot \bar{V}' \bar{v}') dA$$

該項如 Wiin-Nielsen⁽²⁴⁾ 所述，須完全為垂直切變流與標準流間之動能轉變，正值者表示切變流轉為標準流。轉變項 $[K' \rightarrow K]$ 之全平均為 3.75 watts/m²

，相對之 $\frac{\partial K}{\partial t}$ 與 K -outflow 之全平均即各為 0.09 與 0.55 watts/m²。至於 $[K' \rightarrow K]$ 之月值即如表 2 所列，在 1.30 至 7.89 watts/m² 之間。Smagorinsky⁽¹⁹⁾ 在數值實驗中，得到 1.61 watts/m² 之轉變值。Wiin-Nielsen 與 Drake⁽²⁶⁾ 即以 850, 700, 500, 300, 200mb 等五個氣壓面之五個月觀測記錄，計出 2.1 watts/m² 之轉變值。在修正前，1962 年 1 月，4 月，7 月，10 月及 1963 年 1 月之原轉變值即各為 4.65, 2.88, 1.24, 2.96, 和 4.16 watts/m²。這些數值與本研究，在表 2 所列的甚為吻合。總而言之，本研究中之轉變值均高於 Smagorinsky⁽¹⁹⁾，Wiin-Nielsen 和 Drake⁽²⁶⁾ 等之研究結果。但這點似應考慮為研究地區，垂直分析，計算方法，資料型式等之相差。

我們認為從有效位能轉為動能時，首先變為垂直切變流動能，然後轉為垂直標準流 (參考 Smagorinsky⁽⁹⁾，Wiin-Nielsen⁽²⁴⁾)。 $[K' \rightarrow K]$ 轉變值 3.75 watts/m² 對內產生值 6.61 watts/m² 之比，在本研究地區即為 0.57，該結果即表示約有 57% 之動能，最後將成為垂直標準流，這種比值，在 Smagorinsky⁽¹⁹⁾ 的數值實驗中，約為 0.68，在 Wiin-Nielsen⁽²⁴⁾ 初期的估計即約為 0.27，在 Wiin-Nielsen 和 Drake⁽²⁶⁾，最近關於切變流與標準流間之最低轉變值即為 1.00，此「比率」包括兩種量，尤其是對動能之產生，因各研究者，以各種不同的資料與方法加以預計，所以其結果之數值範圍很廣泛，相差

甚大，為避免這點，筆者即僅使用本研究中，一組數值。

全消散值 E ，在全動能方程式 (12) 中，以剩餘項加以計算，在 1963 年 1 月，1962 年 2 月，3 月，5 月，7 月，8 月 (參考表 2，表 3)，即各為 7.53, 4.35, 4.87, 7.21, 6.58 和 7.71 watts/m²，其全平均為 6.38 watts/m²，關於這些月份之標準流消散值 E ，即可在垂直標準流動能方程式 (13) 中，以剩餘項計算之，並且如前述之假設，略去 $\frac{1}{Ag} \int_A p_s \bar{V} \cdot \nabla \bar{\phi} dA$ 項時，各為 3.51, 4.49, 1.95, 6.69, 0.19 和 1.83 watts/m²，其全平均即為 3.11 watts/m²。垂直切變流消散值 E' ，得取各月份 E 和 E 之差，即各為 4.02, -0.14, 2.92, 0.52, 6.39, 和 5.88 watts/m²。其全平均值為 3.27 watts/m²。

很顯然的，在 1962 年 7 月，8 月，其全消散值 E ，稍微大一點，這種現象即由於夏季期間，上部對流層之大量產生值。(參考圖 9, 10, 11, 表 5)。

這裡可指出兩件事實與垂直標準流消散值 E 有關。第一，雖然 E 主要受方程式 (13) 中，轉變值 $[K' \rightarrow K]$ 項之支配，但 K -outflow 亦不能忽視。第二，通常可想垂直平均風速 $\bar{V}$ 與摩擦力 F ，互相相交而為正消散值，這種情形在陸區負消散值時即不必表示。

當標準流與切變流之動能 K 和 K' ，各為全能量之 65% 和 85% 時，其標準流與切變流之消散值 E ，和 E' 即各為全消散值之 49% 和 51%。換句話， E/E' 即為 0.95，這「比率」在 Wiin-Nielsen 之初步預計為 0.38，在 Smagorinsky⁽¹⁹⁾ 之數值實驗即得到 2.24。

在界層之消散值 E_b (參考表 3)，可用方程式 (15) 至 (20) 之過程計算之。關於 1963 年 1 月及 1962 年 2 月，3 月，5 月，7 月和 8 月，其消散值各為 2.41, 1.90, 1.90, 2.07, 1.50, 及 1.41 watts/m²。其全平均值即為 1.87 watts/m²。Kung⁽⁸⁾，用同樣方法，以 1000mb 之地轉風率，在北緯 25 度至 70 度，取 360 站 (360 diamond grid point)，加以計算北美洲冬季，春季，夏季及秋季之消散值 E_b ，在 1945 年至 1955 年之十年間，其數值即各為 2.43, 2.09, 1.22, 及 2.03 watts/m²。其年平均為 1.94 watts/m²。在同研究中相對時季之消散值 E_b ，各為 1.94, 1.33, 0.70 和 1.40 watts/m²。年平均即為 1.34 watts/m²。Lettau⁽¹⁰⁾ 以 700mb 高度之風率與地面拉力之緯向平均值 (Zonal means)，預計在

700mb 以下之摩擦消散值為 1.4 watts/m^2 。

E_b/E 之比，甚為重要，因它表示全消散能之一部份，而無論其在界層或自由大氣均為重要。該比之百分比，列如表 3，在 1963 年 1 月，1962 年 2 月，3 月，5 月，7 月，8 月，各為 32，44，39，29，23 及 18%，其全平均即為 29%。界層消散對全消散之比，在夏季比冬季為小，其理由有二，第一動能產生在上部對流層較大，結果在下部對流層雖然夏季其地面糙率在頂峯時，地轉風與消散亦均較為微弱。 E 與 E_b 之

差，須預計在自由大氣之消散 E_r ，如表 3 所示，上述 6 個月之 E_r 值為 5.12，2.45，2.97，5.14，5.08 及 6.30 watts/m^2 。其年平均為 4.51 watts/m^2 。換算為對全消散之百分比時，各月為 68，56，61，71，77 及 82%，平均即為 71%。然而行星界層僅為 100mb 之厚度，因此在界層之消散一定比自由大氣為強。如果界層與自由大氣之厚度，各為 100mb 與 900mb 時，其消散值即各為 $18.7 \text{ erg sec}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ mb}^{-1}$ ，與 $5.0 \text{ erg sec}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ mb}^{-1}$ ，約相當於年平均值。

表三：全部與部分動能消散值

Table 3: Total and partitioned kinetic energy dissipation (watts/m^2)

Quantity	January 1963	February 1962	March 1962	May 1962	July 1962	August 1962	Grand Mean
E	7.53	4.35	4.87	7.21	6.58	7.71	6.38
E_b	2.41	1.90	1.90	2.07	1.50	1.41	1.87
E_r	5.12	2.45	2.97	5.14	5.08	6.30	4.51
$\bar{E}$	3.51	4.49	1.95	6.69	0.19	1.83	3.11
E'	4.02	-0.14	2.92	0.52	6.39	5.88	3.27
$\bar{E}_b$	0.64	0.05	-0.41	0.23	0.29	0.01	0.14
$\bar{E}_r$	2.87	4.44	2.36	6.46	-0.10	1.82	2.97
E'_b	1.77	1.85	2.31	1.84	1.21	1.40	1.73
E'_r	2.25	-1.99	0.61	-1.32	5.18	4.48	1.54
$E_b/E(\%)$	32.0	43.7	39.0	28.7	22.8	18.3	29.3

關於 1km 以下之消散能，經 Brunt⁽³⁾ 的初步估計，約為 3 watts/m^2 ，即為他所估計之全消散能 5 watts/m^2 之 60%。Jensen⁽⁶⁾ 在 1958 年 1 月，沿北緯 20 度之北半球上空，估計自 1000 至 925mb 間氣層之消散能為 3.36 watts/m^2 ，而自 1000 至 500mb 間即為 4.28 watts/m^2 ，前者為後者之 78%。Holopainen⁽⁴⁾ 1954 年 1 月，在 British Isles，自地面至 900mb 間之氣層預計其消散值為 4.2 watts/m^2 ，地面至 200mb 間為 10.4 watts/m^2 ，900mb 以下即僅佔全消散能之 40%。Holopainen⁽⁶⁾ 後來預計，British Isles，1954 年 9 月，10 月，11 月，在 800mb 以下之消散值為 5.2 watts/m^2 。而在 1000mb 至 200mb 間即僅為 1.9 watts/m^2 。Holopainen 前後研究之相差，可能如他本身所指，關於預計上部對流層的動能方程式有關，或如第三節所論受研究地區大小之限制。但可能包括局部性，季節性等之自然因素甚多，甚難確定。

其他消散值 $\bar{E}_b$ ， $\bar{E}_r$ ， E'_b 和 E'_r 等即可如第 2 節

所論加以求出，並列在表 3。小部份的標準流消散即由界層消散 E_b 構成，除非標準流消散 $\bar{E}$ 本身甚微外，大部份的 $\bar{E}$ 均由自由大氣 $\bar{E}_r$ 構成。至於切變流消散即由界層和自由大氣兩者構成，而且 E'_b 和 E'_r 之平均約為同級。但如 1962 年 2 月，5 月， $\bar{E}$ 比 E' 較大時，大部份的 E' 即由界層消散 E'_b 構成，而且大體上在自由大氣消散 E_r ，分給標準流與切變流之消散時，大部份的界層消散 E_b 即資給切變流之消散。

上述各種消散值之平均，可列如下表：

$\bar{E}$ 6.38	$\bar{E}$ 3.11	E' 3.27
E_b 1.87	$\bar{E}_b$ 0.14	E'_b 1.73
E_r 4.51	$\bar{E}_r$ 2.97	E'_r 1.54

如第 3 節所述，僅以 1963 年 1 月 2 至 11 日，10 日間代表正常冬季月份，並將此結果與強烈颱風停留在北美

大陸期間，即15至24日，10日間之結果互相比較實有重大的意義。如表4所示，在強烈颱風侵襲時，其全動能約增加為兩倍，其標準流能量 $\bar{K}$ ，切變流能量 K' 亦似有增加。在颱風期間其能量預計上最特色的為該地區的內產生減少時，動能產生與輸出却有極大的增加。很顯然的，該地區，在這期間，對大西洋之

動能為重要的供應處，並且應注意，在這期間，受強風之影響，界層消散 E_b 雖稍有增加，但因自由大氣消散銳減，其全消散却減少。由這些結果加以推測時，在該地區所產生之動能，移流至海洋而消散是有理由的。

表四：1963年1月上旬與下旬之動能預計與消散， K ， $\bar{K}$ 及 K' 之單位為 10^5 joules/m²。

其他數值之單位為 watts/m²，記號即如第2節及2表相同

Table 4: Kinetic energy budget and dissipation in early and late periods of January 1963. K , $\bar{K}$ and K' are in units of 10^5 joules/m², other quantities in watts/m². Notation is as defined in section 2 and table 2.

Period	K	$\bar{K}$	K'	K-out-flow	Generation	$(K' \rightarrow \bar{K})$	E	E_b	E_t
Jan. 2-11	18.46	12.01	6.45	0.25	8.56	4.30	7.53	2.41	5.12
Jan. 15-24.....	35.48	25.14	10.34	20.50	25.84	2.42	4.96	2.55	2.41

六、動能產生之垂直剖面圖

在動能方程式 (12) 中，

$$-\frac{1}{Ag} \int_A \int_0^{p_s} V \cdot \nabla \phi dp dA$$

表示該地區之大氣質量，由水平氣壓梯度 (The horizontal pressure gradient) 所作的功而產生之動能。這項屬於動能方程式中之動能來源項，其相對的單位空氣量可寫如下：

$$-V \cdot \nabla \phi = -\nabla \cdot V \phi - \frac{\partial \omega \phi}{\partial p} - \omega \alpha \quad (37)$$

式中 α 為容度 (Specific volume)，如將 (37) 式，對大氣全質量 M 積分時，可得

$$-\int_M V \cdot \nabla \phi dM = -\int_M \omega \alpha dM \quad (38)$$

這項將表示全位能 (即位能和內能) 轉換為動能之計算，(參考 White 和 Saltzman⁽²³⁾)，如此，關於半球或全球之動能產生，通常可以 $\omega \alpha$ 之積分測之。不過事實上，對垂直的 p -速度， ω 之預計，尚有甚多之論議。而且如果動能之產生可由大氣層之劃分計算可得，即以 (38) 式計算不如積分 (37) 式右邊，因右邊三項在計算上較為容易。

以 $-V \cdot \nabla \phi$ 和實測風，重力位等資料，直接預計動能產生，不是容易之工作，因對各站必須決定重

力位梯度，而且甚難計算。但在物理意義和實測風資料上，直接求 $-V \cdot \nabla \phi$ 實可注意的。動能如空氣量之水平壓力，經過工作由位能所造成的。即為重力位梯度相反之氣流成分。

關於直接以 $-V \cdot \nabla \phi$ ，預計動能產生之研究，雖然在十年前，曾經 Smith⁽²¹⁾ 試過，但有關這種報告，除了 Holopainen^(4,5) 的報告外，甚少被人注意。

在本研究所應用之方法，已在第3節討論，即以稠密的觀測網在各站求出重力位梯度，隨之求得產生項 $-V \cdot \nabla \phi$ 之垂直分布。對各 50mb 氣層厚度之動能產生可由：

$$-\frac{1}{g} \int_{p_1}^{p_2} V \cdot \nabla \phi dp$$

計算之。式中 $p_2 - p_1 = 50\text{mb}$ ，這結果就陸區加以平均並表示之。

圖3至圖8即示，1962年2月，3月，5月，7月，8月，1963年1月，在下部界層即 150mb，300mb，450mb，550mb，700mb，850mb，950mb 及地面等八個氣壓層

其動能產生之日變化情形。至今大家公認，動能產生與水平壓力有密切之關係，而且對流層之垂直方向似有三種循環方式。在上部對流層，其產生之濕

落幅無論為正或負均相當的大，而且最大或最小之出現，約有10天週期。很顯然的，關於全大氣層之時間序（Time sequence）有特色的情形，這些均在圖2。這些特色主要為上部對流層之漲落所形成的。中部對流層之產生值比上部者為小，其產生雖然亦有正負的漲落，但其振幅甚小，在其上部，最大或最小

之長週期變化尚可看出，但受短週期循環之干擾，已變模糊。在下部對流層，其產生甚大，約與上部對流層有同級的大小，其漲落在三層中却為最小，但我們應注意，其產生時常為正，其原因為在下部對流層，其截等壓線（The cross-isobar）氣流成分與氣壓梯度相反，受摩擦之作用，在 $-V \cdot \nabla \phi$ 項中取正值。

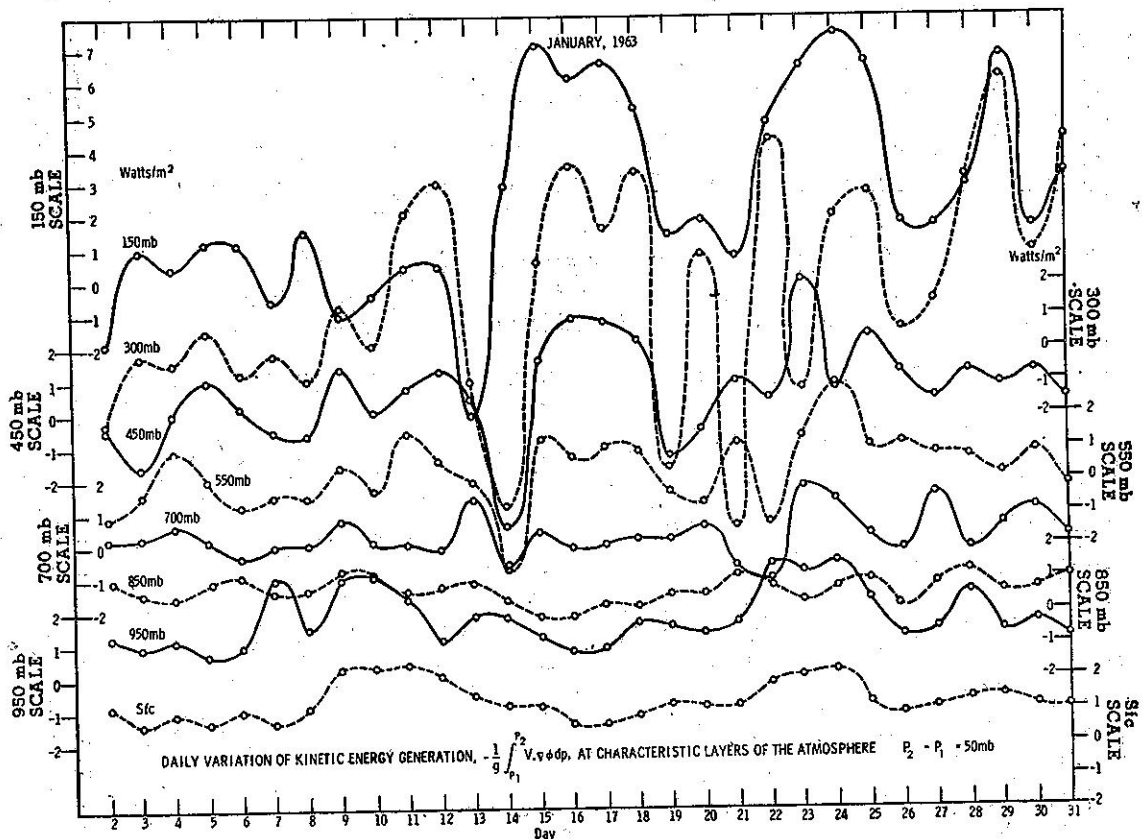


圖 3：在大氣特定高度之動能產生日變化。(1963年1月)

Fig. 3: Daily variation of kinetic energy generation $-\frac{1}{g} \int_{p_1}^{p_2} V \cdot \nabla \phi dp$ at characteristic layers of the atmosphere. (January 1963)

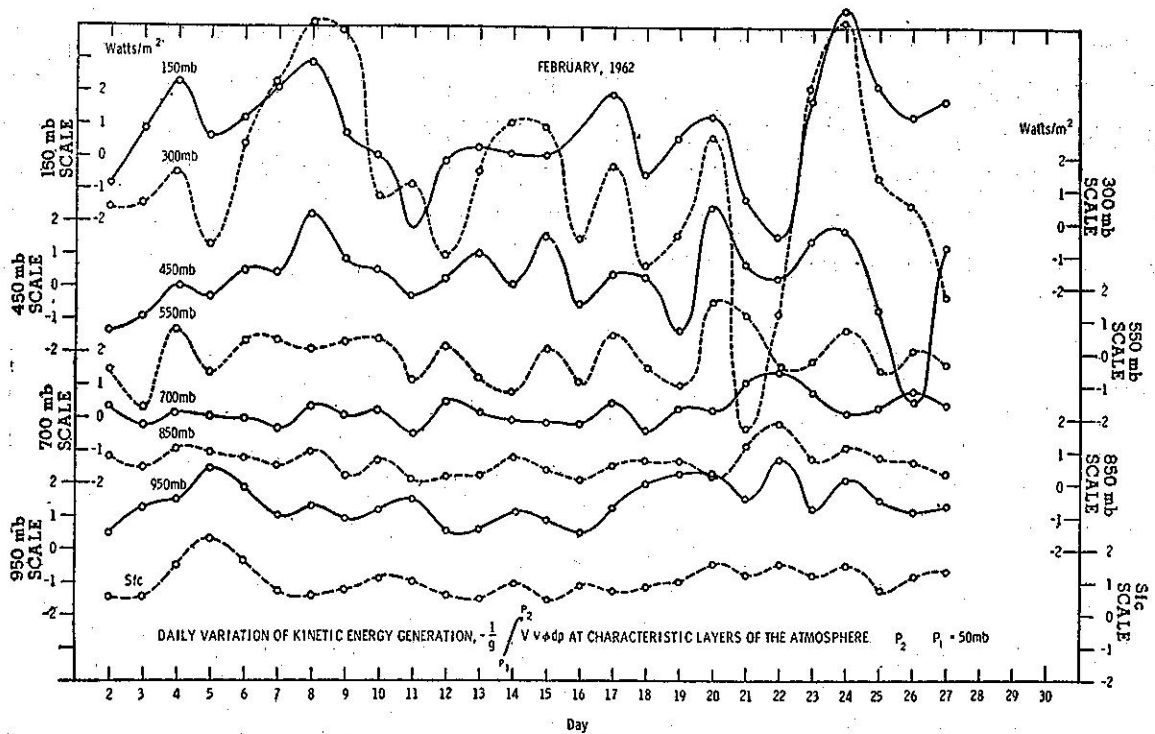


圖 4：在大氣特定高度之動能產生日變化。(1962年2月)
Fig. 4: Daily variation of kinetic energy generation at characteristic layers of the atmosphere (February 1962).

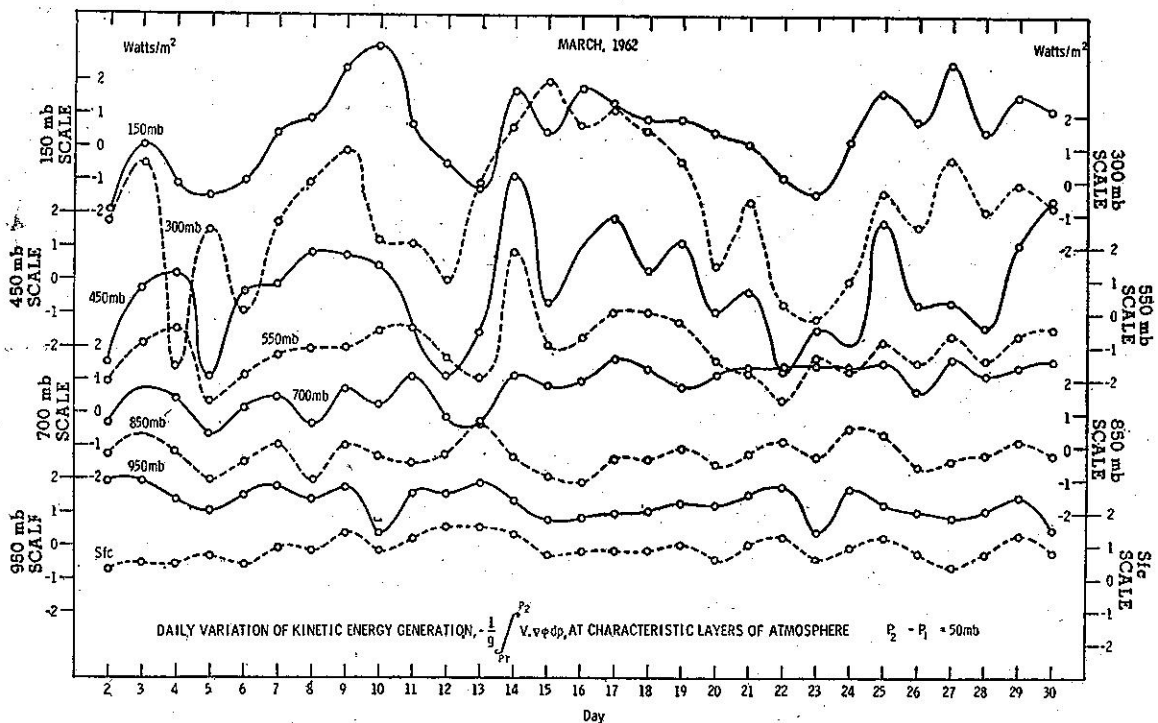


圖 5：在大氣特定高度之動能產生日變化。(1962年3月)
Fig. 5: Daily variation of kinetic energy generation at characteristic layers of the atmosphere (March 1962)

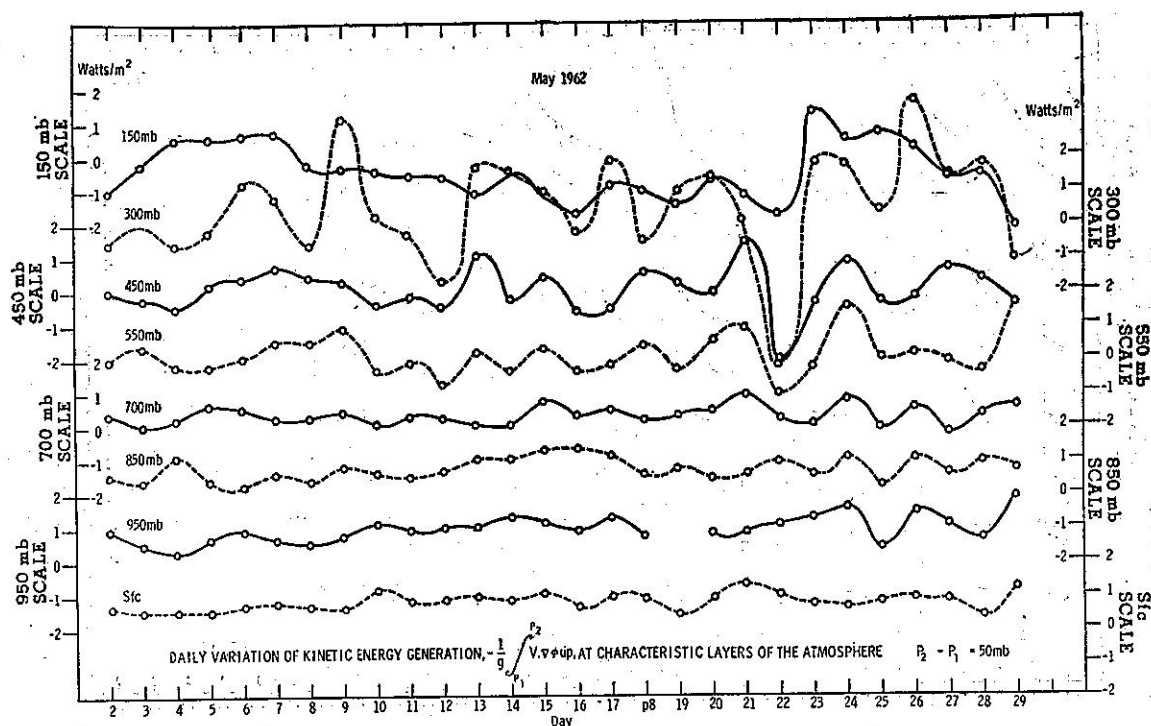


圖 6：在大氣特定高度之動能產生日變化 (1962年 5 月)
Fig. 6: Daily variation of kinetic energy generation at characteristic layers of the atmosphere (May 1962)

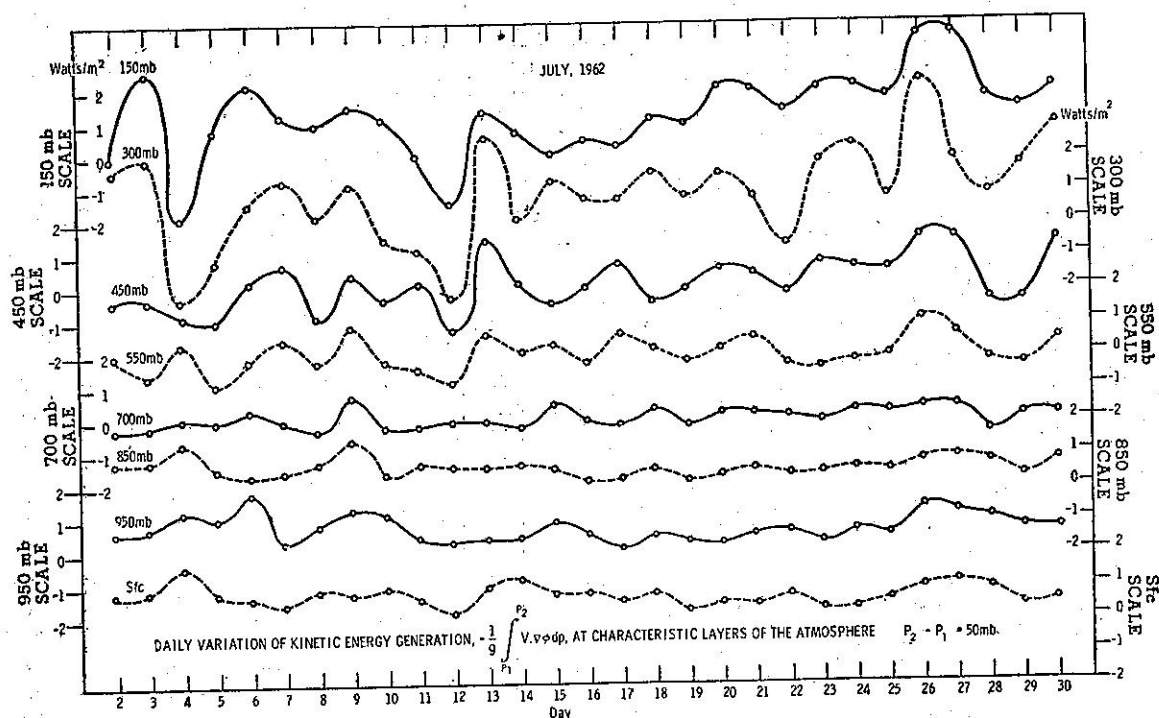


圖 7：在大氣特定高度之動能產生日變化。(1962年 7 月)
Fig. 7: Daily variation of kinetic energy generation at characteristic layers of the atmosphere (July 1962)

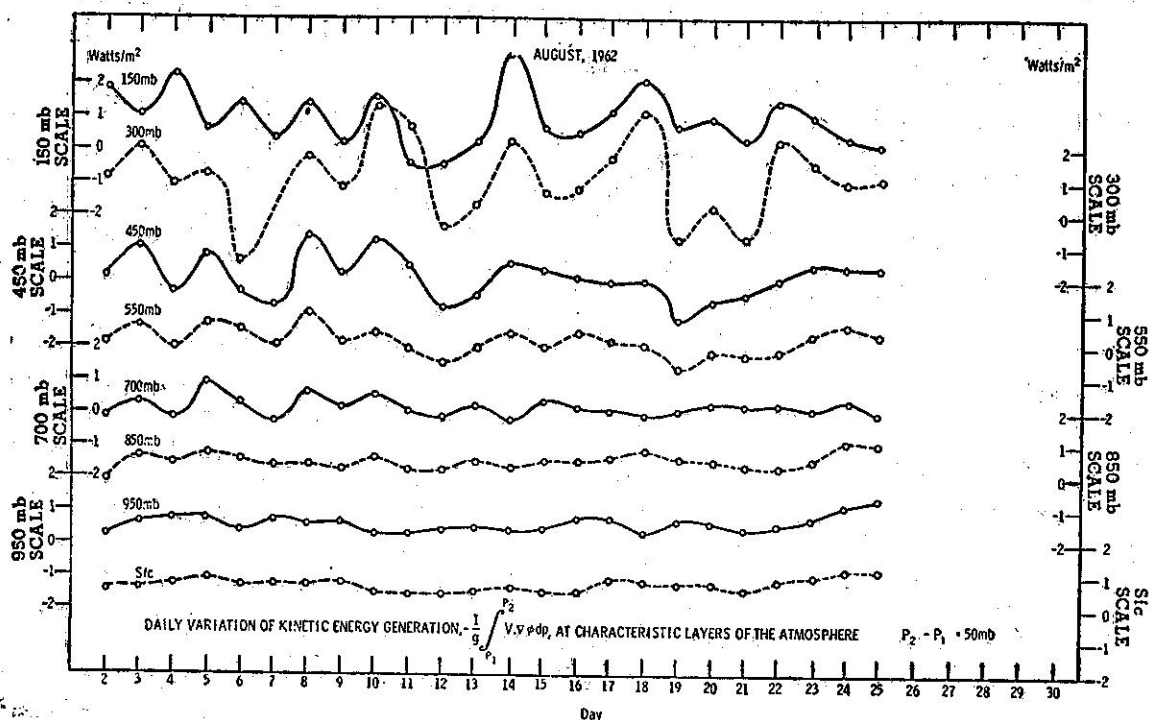


圖 8：在大氣特定高度之動能產生日變化（1962年 8 月）。
Fig. 8: Daily variation of kinetic energy generation at characteristic layers of the atmosphere (August 1962)

表五：各氣壓高度動能產生之月平均值
Table 5: Monthly mean kinetic energy generation (watts m^{-2} (50mb) $^{-1}$ (watts m^{-2} (50mb) $^{-1}$) within each pressure layer

Pressure layer (mb)	January 1963	February 1962	March 1962	May 1962	July 1962	August 1962	Grand Mean
Surface layer	1.33	1.08	1.05	0.81	0.70	0.77	0.95
1025-975	2.79	1.19	1.19	0.74	0.73	0.82	1.24
975-925	1.82	1.42	1.26	1.34	0.74	0.62	1.20
925-875	1.48	1.02	0.99	0.90	0.73	0.63	0.96
875-825	0.80	0.65	0.72	0.74	0.59	0.53	0.67
825-775	0.48	0.40	0.49	0.51	0.44	0.35	0.44
775-725	0.30	0.43	0.39	0.44	0.24	0.23	0.34
725-675	0.21	0.20	0.32	0.32	0.06	0.16	0.21
675-625	0.11	0.19	0.05	0.31	- 0.02	0.15	0.13
625-575	0.01	0.14	0.08	0.22	- 0.07	0.19	0.09
575-525	0.09	0.07	0.03	0.13	0.03	0.17	0.09
525-475	0.13	0.13	0.08	0.07	0.06	0.12	0.10
475-425	0.02	0.35	- 0.12	0.04	0.18	0.11	0.10
425-375	0.67	0.59	0.13	- 0.08	0.26	0.37	0.32
375-325	0.71	0.75	0.07	0.39	0.43	0.53	0.48
325-275	0.31	1.41	0.18	0.51	0.84	1.07	0.72
275-225	0.66	1.59	0.24	0.13	0.93	1.00	0.77
225-175	0.47	1.11	0.39	0.19	1.20	0.74	0.68
175-125	0.18	0.93	0.56	0.47	1.29	0.90	0.72
125- 75	0.09	1.24	0.57	- 0.04	0.37	0.26	0.41

表5 爲上述六個月，各 50mb 氣層厚度之動能之月平均及其全平均，這些數值均填在圖 9 至圖12。因該地區在 1000mb 氣壓面之實測風資料僅有半數，所以自 1025mb 至 975mb 間之資料均一起填在該層。圖 9 表示 1963 年 1 月（即爲 1 月 2 ~ 11 日，1 月 15 ~ 24 日），1962 年 2 月，其動能產生之剖面，屬於冬季剖面圖，圖10爲1962年 3 月，5 月之剖面，即屬於春季剖面圖，圖11表示1962年 7 月，8 月之剖面，屬於夏季剖面圖，圖12爲四季平均之剖面亦爲年剖面圖。

由這些剖面圖，顯然的，可看出當於中部對流層之產生甚弱時，上、下部對流層却有強產生代替之。

根據年平均剖面圖，可預計在全產生中，約有 46 % 在 75mb 至 425mb，8 % 在 425mb 至 725mb，46% 在 725mb 至地面間所產生的。圖上並顯出產生與高度之變化情形，其一般形狀與 Smagorinsky，Manabe，Holloway⁽²⁰⁾ 等以九個氣壓面所預計的甚爲吻合。

將產生之垂直剖面示於圖 9, 10, 11，這些圖似可顯出產生之季節變化。在冬季剖面上，可看出在上下部對流層均有強產生，尤其是強烈颱風經過期間，即 1963 年 1 月 15 ~ 24 日，在對流層頂面上出現極強的產生。春季剖面圖表示，當下部對流層之產生尚強時，上部對流層之產生已變微弱。在夏季剖面圖却相反的，當下部對流層之產生變弱時，上部對流層即再度增

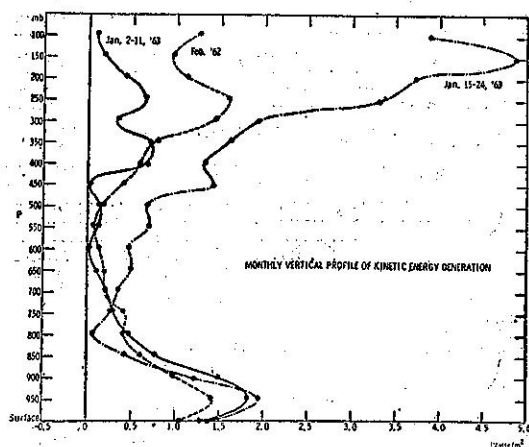


圖 9：動能產生之月垂直剖面圖
(1963 年 1 月和 1962 年 2 月)

Fig. 9: Monthly vertical profile of kinetic energy generation (January 1963 and February 1962)

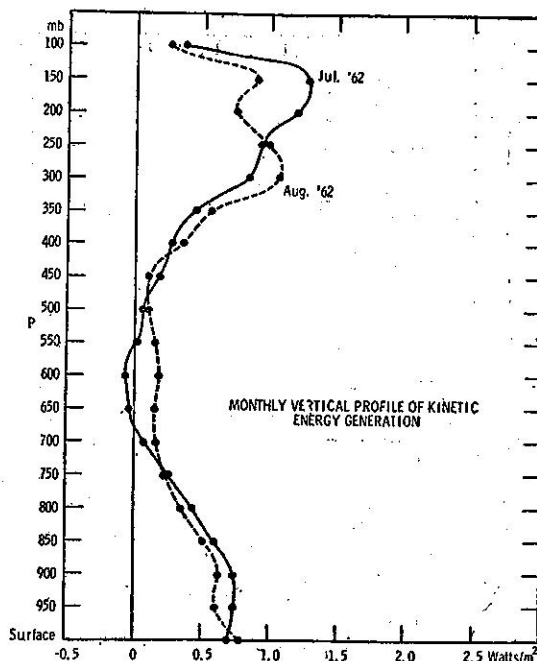


圖10：動能產生之月垂直剖面圖
(1962 年 3 月和 5 月)

Fig. 10: Monthly vertical profile of kinetic energy generation (March and May 1962)

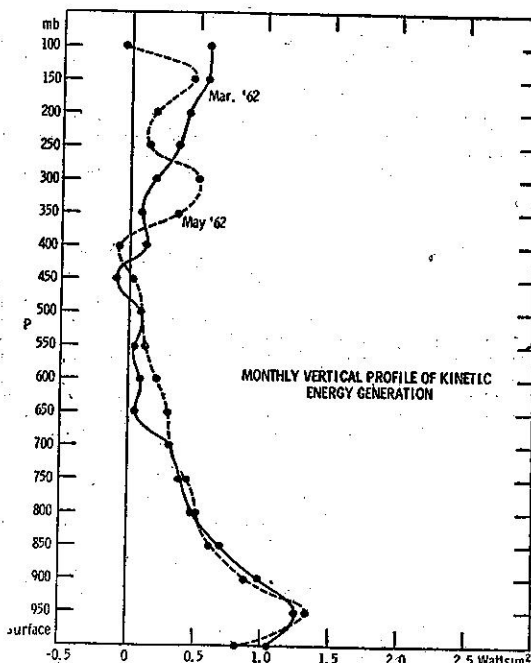


圖11：動能產生之月垂直剖面圖
(1962 年 7 月和 8 月)

Fig. 11: Monthly vertical profile of kinetic energy generation (July and August 1962)

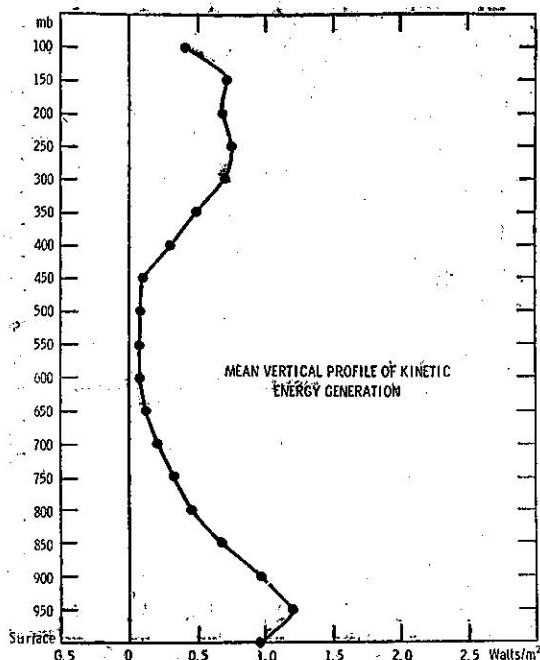


圖12：動能產生之平均垂直剖面圖
Fig. 12: Mean vertical profile of kinetic energy generation

強。

但以這些六個月之剖面資料，尚難議定其季節變化。

因消散動能 E 與產生項之長期平均約成平衡，所以消散之年平均剖面概況可由圖12之產生情形加以推出。

七、大氣界層之動能產生與消散

我們可推測在界層之動能消散與由水平壓力所引起的界層產生約成平衡。第一，如果我們認為在界層，其水平壓力，科氏力 (Coriolis force) 與摩擦力近於平衡時，即暗示動能產生與消散間有同樣的平衡

。第二，依據實測研究 (參考 Holopainen^(4,5), Jensen⁽⁶⁾) 與數值實驗結果 (參考 Smagorinsky, Manabe, Holloway⁽²⁰⁾)，證實在界層頂或近於界層頂，其動能之垂直移流比在界層之產生甚小。

在本研究，對產生項 $-V \cdot \nabla \phi$ ，即沿該區界層之空氣量加以積分，並與在第四節所討論的界層消散 E_b ，相比於表 6。在預計界層產生時，對行星界層頂之高度，有些假設，即在 1 月中設為 925mb，2 月為 900mb，3, 5, 7, 8 月即以該地區通常所測的地轉風高度代表之。由表 6 亦可看出在界層之產生與消散有良好之對照。雖然對地轉風高度之假設，觀測高度之層數，及計算 E_b 之假設等，在各專家間尚有論議，但這些假設之影響似為微小，尤其是，對有關地區加以積分而且已以時間平均後，即更為渺小。

在本研究，雖然以獨立的方式，進行計算，求出界層之動能產生與消散，但我們可斷定兩者間之數值非常接近。

如上述在界層之產生與消散甚為接近，同時如 Holopainen^(4,5), Jensen⁽⁶⁾ 及 Smagorinsky, Manabe, Holloway⁽²⁰⁾ 等研究所示，在界層頂之動能垂直移流比產生，消散均微小而可省略不計，而且預計由該區界層之動能輸出亦為微弱 (參考 Holopainen^(4,5))，

因此我們可預計在界層之產生與消散約成平衡，其動能之大部分即在自由大氣裏產生而消散的。

從前 Kung⁽⁸⁾ 亦利用 Lettau 之消散方程式，以 1000mb 地轉風速，預計界層消散之季節變化與地理分佈，在他的研究指出，1945年至1955年，冬季，春季，夏季，秋季在北大西洋與北美洲大陸之界層消散各為 2.30, 1.49, 0.66, 1.48 watts/m² 及 2.53, 2.07, 1.22, 2.11 watts/m² (8)。其結果顯出陸地消散比海洋消散為大，假如將地面糙率比海洋糙率為小之事實，導入加以計算消散時，這個因素約可補充兩

表六：界層動能產生與消散之比較

Table 6: Comparison of kinetic energy generation and dissipation (watts/m²) in the boundary layer

Quantity	January 1963	February 1962	March 1962	May 1962	July 1962	August 1962	Grand Mean
H.....	925	925	900	900	900	900	
Generation.....	2.32	1.86	2.12	1.94	1.42	1.25	1.82
Dissipation.....	2.41	1.90	1.90	2.07	1.50	1.41	1.86

者之差額，而使海洋界層消散與陸地界層消散，約為同級之大小。因地面糙率之微小，海洋界層之動能垂直轉移比陸地界層頂同樣的動能垂直轉移為小，所以在前次研究⁽⁶⁾，計算海洋界層消散時，其數值約與產生相等。

八、結 論

使用北美洲大陸各觀測站，六個月之日常實測風與重力位資料，以各種劃分法對大規模大氣環流之動能預計與消散，作初步有系統的研究。

大氣之全動能消散，可分為標準流與切變流。而且亦可分為消散於界層與自由大氣之兩部分。全動能消散 E 與標準流動能消散 $\bar{E}$ ，各可由全動能方程式，標準流動能方程式中之剩餘項求出。垂直切變流消散 E' 亦可由 E 與 $\bar{E}$ 之差額獲得。在界層之動能消散 E_b 即使用 Lettau 的一般風扭轉分解與糙率參數，由 Lettau, Kung^(12,6) 等計出，而在自由大氣之消散 E_r ，即取 E 與 E_b 之差。 $\bar{E}$ 更可劃分為在界層之消散 $\bar{E}_b$ 與自由大氣之消散 $\bar{E}_r$ 。以同樣方法， E' 亦可分為界層消散 E'_b 與自由大氣消散 E'_r 。

實測風資料與重力位等資料一齊被使用，同時各種偏微分數值須在各站加以預計，因此設計特種的方法，以資計出無向量之水平傾度與向量場之發散，並應用在動能方程式中各種數值之預計。

所計出的全動能平均 K ，標準流動能 $\bar{K}$ ，切變流動能 K' ，即各為 15.77×10^5 ， 10.30×10^5 和 5.47×10^5 joules/m²，而且 $\bar{K}$ 與 K' 之比，大約為 2:1。

在全動能方程式中之局部變化，輸出，產生等之各平均即為 0.23，1.76，和 8.37 watts/m²，而且在產生與輸出之日變化亦似有類似的傾向。

通常，北美大陸為動能之水平發散地區，尤其是在強烈颱風期間，對北大西洋實為重要之動能供應處。

產生與輸出之相差，可視為動能在該地區之內產生，可和其他研究者所得之能量轉換率互相比較。有些內產生值比其他研究結果為大，這種現象可說明，受研究地區之限制與使用實測風，高度之大垂直分解有密切之關係（即由地面至 100mb 高度，以 20mb 之間隔劃分）。垂直切變與標準流間之動能轉換，其平均值約為 3.75 watts/m²，以六個月之資料加以分析證實該地區內產生之 57% 首先變為垂直

切變動能，最後即成為垂直標準流，這個數量為標準流動能方程式中之最重要項。

六個月間該地區之全消散 E ，標準流消散 $\bar{E}$ 及切變流消散 E' 等各平均為 6.38，3.11，3.27 watts/m²，因夏季上部對流層有大產生，關於 1962 年 7 月，8 月，其 E 值不必小。應注意的，即當能量成分 K 與 K' 各為全動能之 65% 與 35% 時，其消散 $\bar{E}$ 與 E' 即為全消散之 49% 與 51%。在六個月間，界層消散 E_b ，自由大氣消散 E_r 平均值即各為 1.87 與 4.51 watts/m²，即全消散之 29% 消散於界層。

因在夏季較強的產生發生於上部對流層，界層之風訊較弱，致使轉入界層之消散比冬季為小，但地面糙率却為極大。

所劃分的消散成分， $\bar{E}_b$ ， $\bar{E}_r$ ， E'_b ， E'_r ，在六個月間，其平均各為 0.14，2.97，1.73，及 1.54 watts/m²。通常大部分之標準流消散為自由大氣消散，而且切變流消散即由界層，自由大氣兩同樣大小的消散組成。

本研究對動能之產生，直接求 $-V \cdot \nabla \phi$ 之數值，即為水平氣壓所作之功。同時提出大氣各層高度動能產生之日變化，由這些變化顯出在對流層上、中、下部有三種型式的產生循環。在上部其振幅漲落正負均大，而且其長期振動甚為明顯，中部對流層其振幅，週期比上部對流層均小，但其漲落尚有正負兩方向，下部對流層，其產生甚大，但其漲落却為三層中最小，而且其產生亦受摩擦之影響，僅保存正值。將產生值，以 50mb 高度之間隔，從地面至 100mb 高度，逐次加以填上圖表時，可得到甚有意義之動能產生垂直剖面圖，由該圖可知，當中部對流層之產生甚微弱時，上、下部對流層却有強烈的產生，而且在上部對流層之極大點似延向平流層銳減，甚明顯的，產生與高度有密切的關係，其情形與 Smagorinsky, Manabe 及 Holloway⁽²⁰⁾ 等數值實驗所得之結果甚一致。由這些亦可看出產生垂直剖面之季節變化，而且消散之年垂直剖面情形與其產生平均值甚為相似。

在本研究，關於界層之動能消散與產生，均獨立的加以計算，其結果和其他研究結果，暗示界層產生與消散，大約在平衡。

在本研究所提供的，1962 年 2 月，3 月，5 月，7 月，8 月，1963 年 1 月等 6 個月之平均值即可代表年平均。本研究雖然僅以六個月之資料做初步報告

• 除了產生項外，其他垂直分佈之能量參數均未加以計算，而且對局部，季節性亦未得詳細報告，這些點將待有系統的繼續研究。

原文參考文獻

1. F. K. Ball, (1961): Viscous dissipation in the atmosphere, *Journal of Meteorology*, Vol. 18, No. 4, Aug. pp. 553-557.
2. J. A. Brown (1964): A diagnostic study of tropospheric diabatic heating and the generation of available potential energy, *Tellus*, Vol. 16, No. 3, Aug. pp. 371-388.
3. D. Brunt, (1939): Physical and dynamical meteorology, Cambridge University Press, p. 428
4. E. O. Holopainen, (1963): On the dissipation of kinetic energy in the atmosphere, *Tellus*, Vol. 15, No. 1, Feb. pp. 26-32.
5. E. O. Holopainen, (1964): Investigation of friction and diabatic processes in the atmosphere, Paper No. 101, Dept. of Meteorology, University of Helsinki, p. 47
6. C.E. Jenson, (1961): Energy transformation and vertical flux process over the northern hemisphere, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 66, No. 4, Apr. pp. 1145-1156.
7. A. F. Krueger, Jay S. Winston, and D. A. Haines, (1965): Computation of atmospheric energy and its transformation for the northern hemisphere for a recent five-year period, *Monthly Weather Review*, Vol. 93, No. 4, Apr. pp. 227-238.
8. E. C. Kung, (1963): Climatology of the mechanical energy dissipation in the lower atmosphere over the northern hemisphere, Ph. D. Thesis, University of Wisconsin p. 92
9. Y. Kurihara, (1960): "Numerical analysis of atmospheric motions, *Journal of Meteorological Society of Japan*, Series II, Vol. 6, Dec. pp. 288-304.
10. H. H. Lettau, (1954): A study of the mass, momentum, and energy budget of the atmosphere, *Archiv für Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie*, Series A, Vol. 7, pp. 133-157.
11. H. H. Lettau, (1962): Theoretical wind spirals in the boundary layer of a barotropic atmosphere, *Beiträge zur Physik der Atmosphäre*, Vol. 35, No. 314, pp. 195-212.
12. H. H. Lettau and E. C. Kung, (1965): Aerodynamic roughness of the earth's surface: A parameterization for use in general circulation studies, (Paper in preparation).
13. A. H. Oort, (1964): On estimates of the atmospheric energy cycle, *Monthly Weather Review*, Vol. 92, No. 11, Nov. pp. 483-493.
14. N. A. Phillips, (1956): The general circulation of the atmosphere: A numerical experiment, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Vol. 82, No. 352, Apr. pp. 123-164.
15. B. Saltzman, (1961): The zonal harmonic representation of the atmospheric energy cycle—A review of measurements, *The Travelers Research Center, Report TRC-9*, Sept. p. 19
16. B. Saltzman and A. Fleisher, (1960): Spectrum of kinetic energy transfer due to large-scale horizontal Reynolds stress, *Tellus*, Vol. 12, No. 1, Feb. pp. 110-111.
17. B. Saltzman and A. Fleisher, (1961): Further statistics on the modes of release of available potential energy, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 66, No. 7, July pp. 2271-2273.
18. B. Saltzman and A. Fleisher,

(1962): Spectral statistics of the wind at 500 mb, *Journal of the Atmospheric Sciences*, Vol. 19, No. 2, Mar. pp. 195-204.

19. J. Smagorinsky, (1963): General circulation experiments with the primitive equations, 1. The basic experiment, *Monthly Weather Review*, Vol. 91, No. 3, Mar. pp. 99-164.

20. J. Smagorinsky, S. Manabe, and J. L. Holloway, Jr., (1965): Numerical results from a nine-level general circulation model of the atmosphere, *Monthly Weather Review*, Vol. 93, No. 12, Dec. pp. 727-768.

21. F. B. Smith, (1955): Geostrophic and a geostrophic wind analysis, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Vol. 81, No. 349, July pp. 403-413.

22. S. Teweles, (1963): Spectral aspects of the stratospheric circulation during the IGY, Report No. 8, Dept. of Meteorology, Massachusetts Institute of

Technology, Jan. p. 191

23. R. M. White and B. Saltzman, (1956): On the conversion between potential and kinetic energy in the atmosphere, *Tellus*, Vol. 8, No. 3, Aug. pp. 357-363.

24. A. Wiin-Nielsen, (1962): On transformation of kinetic energy between the vertical shear flow and vertical mean flow, *Monthly Weather Review*, Vol. 90, No. 8, Aug. pp. 311-323.

25. A. Wiin-Nielsen, J. A. Brown, and M. Drake, (1963): On atmospheric energy conversion between the zonal flow and the eddies, *Tellus*, Vol. 15, No. 3, Aug. pp. 261-279.

26. A. Wiin-Nielsen and M. Drake, (1965): On the energy exchange between the baroclinic and barotropic components of atmospheric flow, *Monthly Weather Review*, Vol. 93, No. 2, Feb. pp. 79-92.

(本文譯自 *Monthly Weather Review* vol. 94, No. 2 Feb., 1969)