

シンポジウム『乱流輸送』について

従来の気象学会の月例会は、余りに細分化され、参集する人もその分野が限定される嫌いがあった。そこで、多くの人々に興味のある題目を選んで、広い範囲の人々による検討と意見の交換が要望されていた。「乱流輸送」に関するシンポジウムは、以上のような観点から開かれた。そのプログラムは次のようであった。

日 時： 昭和40年2月11日（木）10:00—17:00

会 場： 気象庁講堂

司会者： 井上栄一（農技研）

提供話題：

1. 藤田敏夫（気象研）： 海面における水蒸気および熱の収支
2. 光田 寧（京大）： 超音波風速計を用いた乱流輸送の観測について
3. 内島善兵衛（農技研）： 耕地における乱流輸送

4. 伊藤昭三（気象庁）： 地面粗度の変化による乱流輸送の変化
5. 島貫 陸（東北大）： 拡散係数の理論における二、三の問題
6. 川野 実（名大）： 空中電気から見た乱流輸送問題
7. 曲田光夫（気象研）： 海陸風の計算における乱流輸送の問題
8. 片山 昭（気象研）： ラージスケールにおける乱流輸送の問題

以上のように広い分野から話題が提供され、活潑な討論が行なわれた。次にその概要を示す。なお、このシンポジウムのコンピーナーには竹内清秀（気象庁）があつた。日本気象学会講演企画委員会

1. 海面における水蒸気および熱の収支

藤田敏夫（気象研）

この二冬の日本海で船による気象観測から海面における水蒸気および熱の収支の推定について、説明がなされた。風速、温度および湿度のプロファイルの観測精度に問題があることが述べられた。（文責：竹内）

討論：

- (a) プロファイル測定に対する船体の影響。測器をいかだに設置すること、へさきに突き出して設置することなどが考えられる。
- (b) プロファイルからでなく拡散を知る方法を考えること。たとえば煙での観測。
- (c) 粗度を表わす長さ Z_0 と海面状況との関係。
- (d) 船体のゆれは計算により補正できる（スペクトルに関して）。

超音波風速計を用いた乱流輸送の観測について

光田 寧（京大防災研）

接地気層における乱流輸送の研究の進展を妨げている要因の一つには風速の垂直変動成分を測定する適当な方法が得られないということがある。しかし、最近開発された超音波風速計によれば特定の方向の風速分値を選れなく正確に測定することが可能であるから、これを乱流

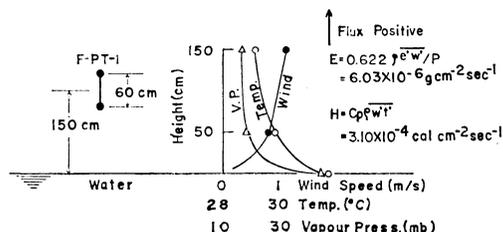
輸送の観測に導入することによって大きな飛躍を期待することができる。著者らは数年前からこの超音波風速計を開発、その利用のための研究を進めて来たが、この機会に、これまでに試みた乱流輸送に関連した観測について説明する。測器の詳細、および得られた結果に関する考察については後日発表される予定である。

現在、著者らのグループの用いている超音波風速計はいつでもパルス時間差法によるもので、スパン 60cm の試作機1台と、50 cm の実用化機2台であり、後者はオシログラフに接続できる出力装置をも持っていて、さらにそのうちの1台は同時に温度の測定もできる超音波風速温度計になっている。

試験観測の着手として最初に超音波風速計と従来からの風速垂直成分の測定方式、すなわち熱線風速計法およびパイプン風速計法との比較が行われた。その結果に

Measurement of Sensible Heat & Vapour Flux

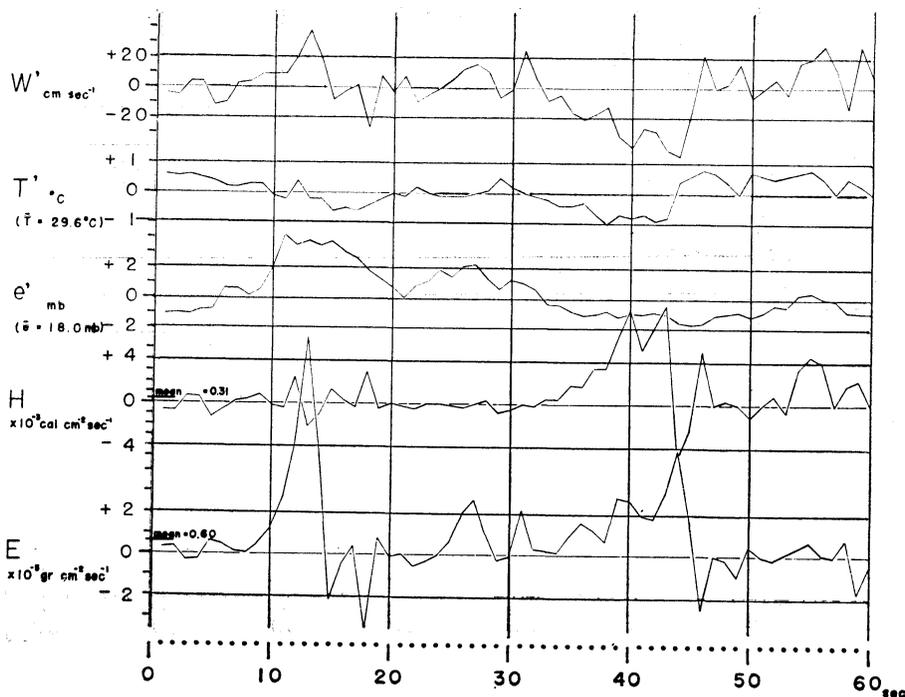
at Furukawa-Bashi 12h55m Sept. 8th '64 Run No.F1



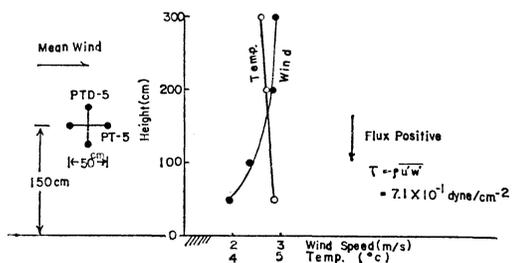
第1図 a)

Symposium on Turbulent Transfer

—1965年4月30日受理—



第1図] (b)

Measurement of Momentum Flux
at Uji 14h45m 2nd Feb. '65 Run No. U-29

第2図 a)

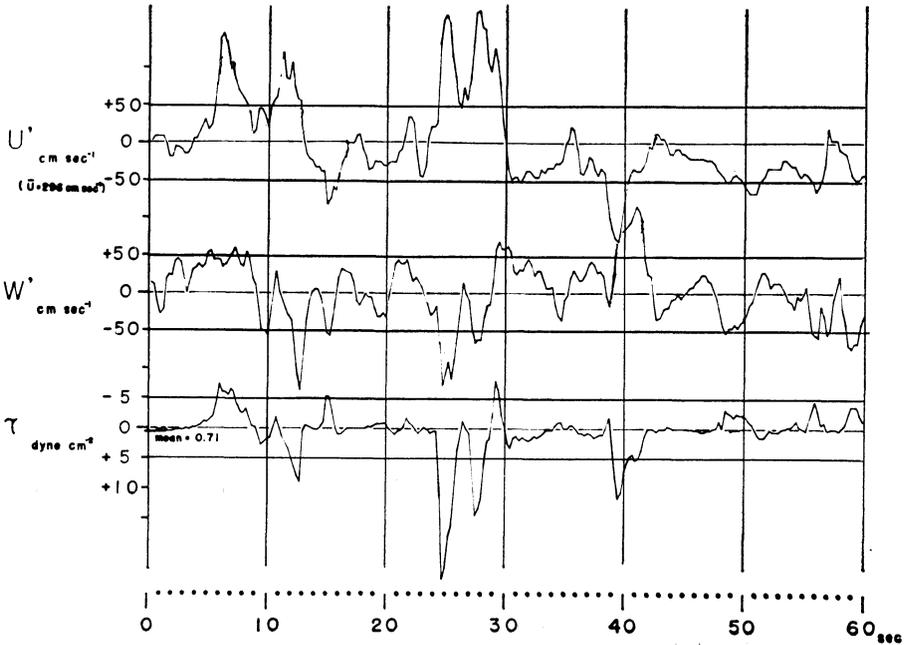
よれば、観測が容易で短周期変動まで追従できる点で超音波風速計は秀れているが、その測定値がスパンの間の平均の値であるということにはいつも注意を要するし、長周期の変動のみを測定するのならば従来の方法でも大きな誤差を伴うことは少ない。

次に顕熱および水蒸気の輸送の観測が試みられ、水面上で18例、陸上で9例の記録が得られた。この際には気温、湿度の測定には熱電対式乾湿球温度計が用いられた。第1図はその結果の1例を示したもので、a)図にはその時の平均の気象条件および5分間平均輸送量が示し

てあり、b)図には各要素の時間変化の様子が示されている。各観測について変動量のスペクトルを作って見ると、不安定時の顕熱輸送の場合にのみ短周期側に山が見られる。またこの間、同時に2高度で顕熱輸送の測定を行なって見たが、その差は予想外に大きい場合があり、その間の気層の昇温のみでは説明がつかない。移流あるいは放射の影響についてもっと詳しい研究が要求される。

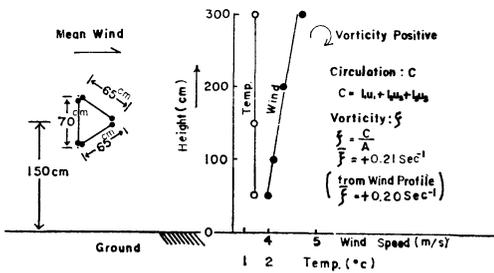
また2台の測器を直角に組合せることによって、水平および垂直の風速変動成分が測定できるから、運動量の垂直輸送の測定を行うことも容易にできる。第2図はそのような観測の一例を示すものである。輸送量の平均値は 0.7 dyne/cm^2 で、従来から他の方法によって求められている値とほぼ一致する。その変動は極めて大きく平均値の数十倍におよぶ巾をもっているのが注意される。

超音波風速計はそのスパン上での平均の風速を測定しているという点を利用し、3台を3角形に配列することによってその面内での循環あるいは渦度を直接測定するという試みがなされた。その例は第3図に示されているが、平均の渦度は $+0.21 \text{ sec}^{-1}$ となり風速分布より求めた値とほぼ一致している。渦度の垂直輸送を見ると、運動量のそれと同じくらい変動ははげしいが、下向きの輸送



第2図 b)

Measurement of Vorticity Transport
at Uji. 17h15m 2nd Feb '65 Run No. U 33

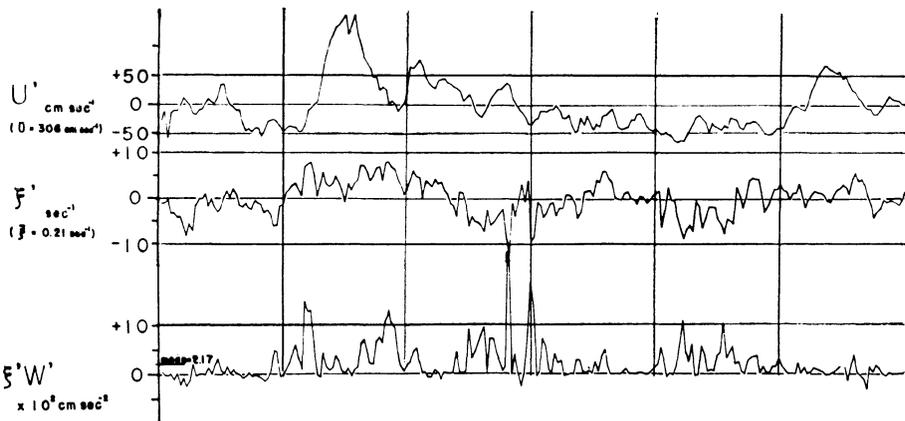


第3図 a)

がほとんど生じていないという点が大きく異っている。

討論:

- (a) 超音波風速計の音の走行距離と測定高度との関係。地面に近づけば変動の周波数が高くなるから。
- (b) 熱のフラックスは高さとともに変化するかどうか。普通には一定と考えられているが。
- (c) 船の観測に使用できないか。
- (d) パルス方式と位相方式との得失。
- (e) 走行距離はどの程度まで短くすることができるか。



第3図 b) (横軸は第2図b)と同じ時間軸による)

耕地上における乱流輸送

内島善兵衛（農業技術研究所）

作物は太陽エネルギーを利用して空気中の炭酸ガスと水から有機物を創り出しているが、気候条件などが適している場合には一日あたりの乾燥重量の増加は300~500 kg/ha におよぶことが知られている。このような場合に、作物によって吸収される炭酸ガス量は150~300kg/ha に達する。これが空気中から補給されるとすると、1 ha 上の30~60mの高さの気柱内の炭酸ガスが吸収されたことになる。

一方、作物は強い太陽光から自己を保護するために莫大な水を気孔を通して空気中に放出している。普通、1gの乾物量を生産するのに数百gの水が必要だといわれている。このように、作物の生育している耕地上では炭酸ガスは空気中から植被面へ向って、また水分は植被面から空気中へと流れている。この農業生産にとって密接な関係をもつ二つの流束が乱流輸送の機構によっていると考えることはごく当然なことである。

しかし、農学分野ではこれらの流束の測定にチャンバ一法・秤量法などが用いられてきた。この場合、主として孤立した植物または群が試験に供され、その結果と野外の完全な群落との間の関係は余り考慮されないのが普通であった。Thorntwaite らがいわゆる空気力学的方法を蒸散の決定に応用して以来、農業気象研究者の注目がこの方法に注がれ、いろいろな研究に応用されるようになってきた。そして、空力法の結果と従来の方法による結果とが比較され、両者の間に差異のあることが指摘されるようになってきた。

簡単な空力法を開発することとならんで、気層の成層度を考慮した方法もいろいろと工夫され、耕地上の蒸散量の決定に利用された。また、もしも空気中の炭酸ガス濃度が手軽に測定できるならば、蒸散の決定と同様な方法で光合成量に相当する炭酸ガス流速を決定できることが指摘された。赤外線ガス分析機の発達はこれを実現させ、いままで困難と考えられてきた完全野外条件下の光合成強度の決定を可能にした。このようにして、耕地上のいろいろな現象の解明に乱流輸送の理論と知識を応用しようという強い気運が広く農学分野のなかに生まれてきた。

他方、耕地上での多くの気象要素観測からいままで微気象研究者が見過していた興味ある現象がみつかった。その一つは耕地上を吹いている風と作物群落との相互作用である。植被面の空気力学的特徴を示す Z_0 や d が

風速によって特異的に変化し、それに応じて接地気層内の乱流構造も変化するという事実が明らかになった。そして、植被表層に卓越する穂波とその上の風の構造との関係が現象論的に明らかにされた。また、 d の物理的意味が研究され、植被層内での運動量流束に密接な関係にあることが指摘されている。いま一つは植被層内における各物理量流束のビルドアップの問題である。植被の立体構造（葉・茎などの垂直分布）と各流束の高度変化との関係は単に ($Z_0 \cdot d$) などの研究のみならず、より高い光合成力をそなえた群落構造の研究にとっても非常に大切である。

このために植被内での拡散係数の高度分布がいろいろな方法で研究され、それは指数分布になることがわかった。葉と周辺空気との間における各輸送係数の値と風速との関係、乱れの強度によるその変化などと興味ある問題が提出されてきた。このようにして、接地気層—植被層を通しての輸送現象を統一的に扱う研究方向が生まれかけ、二・三の研究者によって試みが提出されている。これと関連して、植被層内の乱れの研究が始まりかけている。植被は大きな乱渦を減少させるが、より小さな乱渦が植物体と気流との相互作用によって多くなるなども報告されている。以上の説明から判るように耕地上の輸送現象の研究は単に農業気象の観点からだけでなく微細気象の観点からもきわめて興味のある問題を数多く含んでいる。

討論：

- (a) 穂波の抵抗係数と葉の状態との関係、葉の状態の数学的表現、
- (b) 蒸散の問題と気孔抵抗との関係、
- (c) 穂波について、風の渦と穂の力学的構造による共振現象、

地面相度の変化による乱流輸送

伊藤昭三（気象庁）

接地気層における気温、水蒸気、風速などの鉛直分布と安定度の関係さらには熱、運動量の輸送と安定度の関係については構造的にもかなり分って来た。しかし大部分の理論的取り扱いでは流れの場は水平方向に一様であると仮定している。そのため、その理論の実験的な検証には周囲に障害物のない平原での測定結果が用いられている。

しかしながら測定場所の一様性は詳細にみればなかなか保証されていない。そのため理論の検証も時による測定場所の影響が入ってくるのが普通である。

一般に測定場所の状態をあらわすパラメーターとしては障害物の高さなどがその代表的なものである。たとえば、よく知られた粗度定数 Z_0 はその例である。

一方、接地気層の問題となる地面の状態は千差万別、その形態を単純な幾何学的な長さで表現するには限度がある。そのため農業関係者は耕地上での流れの場を表現するため地面修正量 d と云うような量を考えたが、このような表現に満足せず最近井上 (1964) の研究は草地の中の風速分布をあらわすため植物の状態を空気力学的に表現する問題に進展している。

このような研究過程の中でたづちに粗度の変化による乱流輸送の問題を解決するには多くの未解決な点がある。ここでは風速の鉛直分布を対称としてある粗度から別の粗度に移るときの場に問題をしぼる。

第1図はこの模図である。図に示すように樹冠の上では、その構造(葉の密生度、樹林の間隔などに関係)によって決る粗度をもち、その上の流れの場と調整しながら定常的な物を作る。

この場合普通の樹冠であれば zero-plane は平均の樹

木の高さの80%ぐらの高さにあると云われているが、これは樹冠の構造にも関係する。

この流れが図のような比較的 smooth な開かつな場所に移るとき次の4つの変化がおきる。

- ① Z_0 -plane が地面近くに移る。
- ② 樹木の後方に生じた比較的大きな渦は距離と共に減衰して行く。
- ③ 比較的 scale の小さい摩擦によって作られる eddy が風下に出る。
- ④ 上の流れと調整しながら風速が増して行く。

このように定性的には、かなりはっきりしているが、定量的には非常にむずかしい問題である。

図に示すように、地面粗度のために新しい境界層ができるが、適当な風下距離に行って境界層が充分成長するとほおちいた流れの場にもどる。たとえば風洞実験 (Jacob 1939) の結果によると粗度の400倍くらいの風下距離で落ち着くことが知られている。

したがって粗度の変化による境界層はある程度成長するとはっきりしたものではなくなる。こゝでおちついた

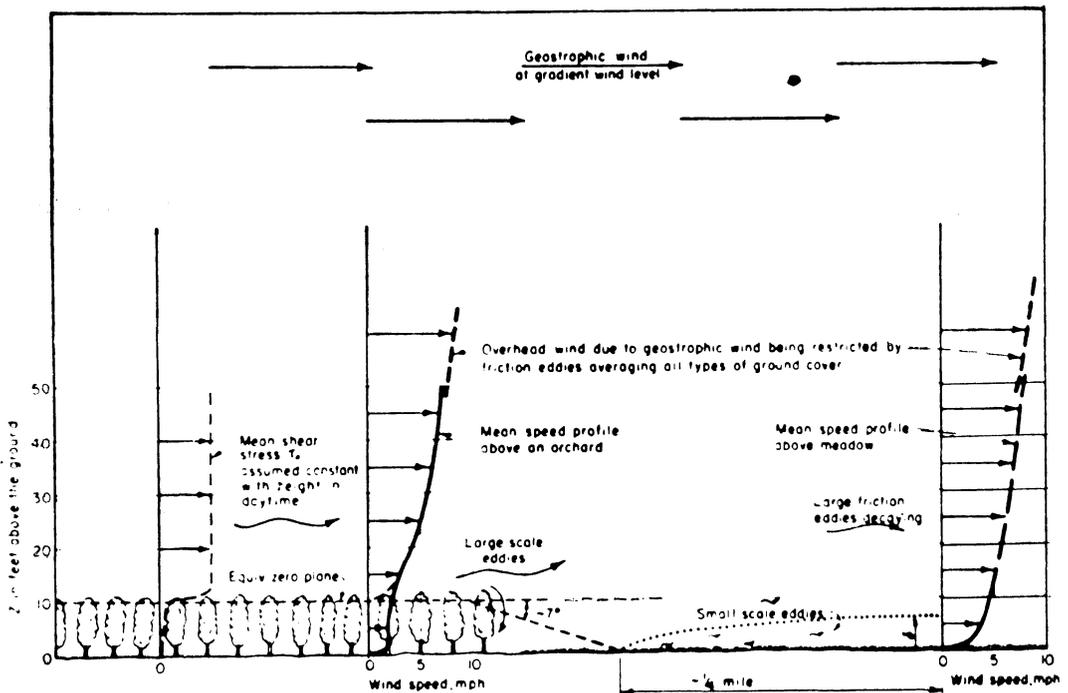


FIG. 1. Diagram of mean winds passing from extensive orchard to open field with increase of speed over the smooth surface.

第1図

流れの場となる。それ故境界層の成長の度合が問題となる。

層流境界層では、境界層中の速度分布は壁面からの距離つまり Z に比例するので、層流境界層の厚さ δ が距離 x の $1/2$ 乗に比例して成長すると云う結果が容易に得られる。

全く同様に乱流境界層では、ある粗度をもった対数分布の風速が粗度の変化により、摩擦速度と粗度が変った別の対数分布をすと考えて運動量の式から求められる。

たとえば Ogura (1950) は海風が陸地に上り下層から加熱されて行く場合の研究として、やはり乱流境界層の成長を論じた。Elliott (1958) もまた地表面粗度の変化による境界層の成長を扱ったが、いずれも境界層の厚さは $\delta \propto x^{0.8}$ であらわされる。

その後 Townsend (1964) らは境界層の上面で摩擦速度の連続を考慮に入れて再びこの問題を扱っているが結果はほとんど同じである。

乱流境界層では層流境界層より当然早く成長するので多少の粗度の変化では早く混合しある落ち着いた流れの場にもどると考えられる。

竹内、伊藤 (1965, 風のシンポジウム) は 2~3 の資料を解析した結果やはり $\delta \propto x^{0.8}$ であらわされることを示した。

今迄の議論では安定度を考えに入れていなかったが、不安定な接地層ではより早く成長し、安定な成層では次第にゆっくり成長し極限としては層流境界層の場合に近づく。

竹内、伊藤 (1965) は運動量収支の式から簡単な巾法則の風速分布を適用し次のような結果を得た。

$$\begin{aligned} \delta/Z_0 &\propto (x/Z_0)^{1.00} && \text{不安定層} \\ \delta/Z_0 &\propto (x/Z_0)^{0.78} && \text{中立} \\ \delta/Z_0 &\propto (x/Z_0)^{0.50} && \text{非常に安定} \end{aligned}$$

不安定層では予想より成長が小さいのは粗度の変化による新しい乱流境界層の中では機械的な乱れが大きいことを考慮したものである。

このような結論を観測資料で検証し、乱流境界層の成長から粗度の変化による運動量の輸送が確認できるのであろう。全く同様に水蒸気や熱の輸送をまた扱うこともできる。

討論:

- (a) Z_0 は地面の粗度を表わす固有のものであるか。
- (b) 粗度の変化する野外での実測の必要なこと。

(c) 同様な条件での風洞での実験の必要なこと。

5. 拡散係数の理論における二、三の問題

島貫 陸 (東北大)

乱流輸送の問題の殆んどすべてが拡散係数を用いることによって取扱われているが、それでは拡散係数なるものは既によくわかっているのかと云うと必ずしもそうでない。むしろ拡散係数の実態がわからないからこそ、いろいろな気象学的試みがなされている現状である。しかしその試みの多くはあまりにも応用的であり、応用する為にはまずその基礎を知らなければならないという当り前のことがともすると忘れられがちである。拡散係数と呼ばれる言葉は普通、熱輸送係数や渦粘性係数を含んで用いられている。従ってここではそれらを含めた広い意味での拡散係数を対象にする。

乱流輸送の機構は次の二つの方法によって研究されている。一つは Monin-Obukhov の相似理論に基づいて、Ellison, 山本, Panofsky et al. 等によって進められた混合距離理論であり、他の一つは速度相関 (或はエネルギースペクトル) を用いた統計理論である。

混合距離理論は、応力と風速傾度の関係式と熱輸送量と温度傾度の関係式とを連立に解いて輸送係数及び風速・温度の分布を求めるもので最初においた二つの式の正否が直接結果を左右する。安定度との関係を示す Richardson 数を含む部分について特に非常に安定な所で不満がある。その関係についてはこれまで地面応力の直接測定から実験的に求められたものがいくつかあるが、それらはかなりまちまちの結果を示している。このような測定に更に信頼のおける結果が得られればそこでこの問題は解決するが、考えられるもう一つの方法は Richardson 数との関係をいろいろな例について考えて、風速分布及び温度分布を求めそれを実測と比較して見ることである。しかしその場合安定度と摩擦速度の二つのパラメーターが決まらず、実験に合うようにそれらを決める関係上、どのような理論によっても同じ位よく実際と一致することが見られる。そこで分布との比較ではあまり多くは得られないことがわかる。しかしそれにも拘らず、どのような理論を考えても一致しない部分が残る。それは輸送量が高さに関係であるという仮定が正しくないことによると思われる。その解決には恐らく放射の理論を取り入れる必要があらう。

統計理論は普通浮遊粒子の拡散に対して行われる。この方法によると混合距離理論では扱いにくい現象のスケールの問題を容易に取り入れることができる。大気乱流

のスペクトルは場所及び気象条件によって決る非常に広い波数領域に亘っており、更に考える現象の方も時間及び空間的な広がりを持っている。そこで乱れのスケールと現象のスケールの両者の関係が拡散係数を変化に富んだものになっている。そのようなことを取扱える点でも統計理論は興味があるが、現在のこの理論は、誰の理論にしても、時刻及び場所が共に異なる2点での速度相関を何らの方法で既知の速度相関に結びつけて考えている。そのような便宜的な方法によらない純粋に流体力学から導かれる理論の出現が望まれるわけで、もしそれが出来れば前記の混合距離理論は不要になるとさえ言うことが出来る。しかしこの問題は世界中の多くの人が考え、なお解決しない難問題であり、今後もそう容易に答は出ないと思われる。しかしそれに向って行くことこそ我々の使命であると考えている。

討論:

- (a) 拡散係数Kの意味について。流束を勾配を除いた量で、スケールの関数であり、ある不確定を表わす量ともみられる。
- (b) プロフィールおよび変動より流束を知ることが出来る。プロフィールは変動に比較して感度がよくない。変動(すなわち構造を調べる)より流束を知る方法の方が精度がよい。

6. 空中電気から見た乱流輸送問題

川野 実(名大)

高度数 km までの空中電気の変動を説明するのに、乱流拡散を考えることによって一応解決できる。

(文責: 竹内)

討論:

- (a) ランダムな現象の拡散だけを考えるとよいが、構造をもっと考えるべきであろう。

7. 海陸風の計算における乱流輸送の問題

曲田光夫(気象研究所)

海陸両面上の大気の熱輸送の差異によって、気圧差を生じ、そこに海陸風を生ずることは古くから知られており、多くの理論的研究がある。古くは、線型理論のみに限られていたが、最近ではPearce(1955), Fisher(1961), Estoque (1961, 1962) 等による非線型方程式の数値積分による研究が行われている。これらの研究において、地表面からの熱の乱流輸送をどのように扱うかが、問題点の一つとなるわけであるが、Estoque が初めて、乱流拡散係数が風速や安定度と共に変動するような仮定の下

に、計算を行った。すなわち、 $0 \leq Z \leq 50\text{m}$ において

$$\frac{\partial}{\partial Z} \left(k \frac{\partial u}{\partial Z} \right) = 0, \quad \frac{\partial}{\partial Z} \left(k \frac{\partial \theta}{\partial Z} \right) = 0$$

$$k = [k_0(Z + Z_0)(1 + \alpha R_i)]^2 \frac{\partial u}{\partial Z}, \quad (R_i \geq -0.03)$$

$$k = \lambda Z^2 \left(\frac{g}{T} \frac{\partial \theta}{\partial Z} \right)^{1/2}, \quad (R_i < -0.03)$$

と仮定した。こゝに u は風速、 θ は温位、 R_i はリチャードソン数である。また、地(海)表面温度は時間の正弦関数として与え、蒸発や凝結、放射の影響は考慮していない。

著者もまた、この問題について、数値実験を行ったが、次の諸点について、実験に組み入れる考慮を払った。

- i) 地表に到達する日射
- ii) 地表面からの放射
- iii) 地中に入る熱伝導
- iv) 大気中への乱流輸送
- v) 蒸発、凝結の効果
- vi) 運動方程式

実際には雲が形成された場合には、日射、放射に変動を生じる筈であるが、この効果まで、計算に組み入れることには成功していない。当舎(1953)は川口の無線塔における観測を用いて、接地逆転層の生成、消滅の典型的解析を行った。この場合には、運動方程式を使用せず、地表に到達した日射が、地表面で放射、熱伝導、乱流輸送のバランスすることを仮定して、接地逆転層の生成、消滅過程を拡散方程式の数値積分によって再現した。これによって、実況値の大局的な模様は説明できたが、逆転層の高さが24時頃まででおさえられ、その後は、強さが深まるだけであると云う特徴的性質、また風速が上層(300m位)と下層ではほぼ逆位相になっていると云う特性等、数値計算で説明できない若干の事項があった。拡散係数については

$$K = (k_1 Z)^2 \frac{\partial u}{\partial Z} \sqrt{1 - \frac{g}{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial Z} \left(\frac{\partial u}{\partial Z} \right)^2}$$

と仮定してみたが、成功しなかったもので、実況に合うように、Kの分布を与えた。

海陸がある場合には、気圧差による運動を生ずるので運動方程式を考慮することがどうしても必要になる。また、凝結、蒸発の効果を入れるためには水蒸気の輸送も重要になる。また海面並びに地面からの蒸発を特徴づけ

る関係式を数値実験に適するような形に表現することは容易でない。数十米の高さの接地気層から数百米の高さの層までの運動の代表的な例の一つが、海陸風と考えられるが、乱流輸送を運動方程式と結びつけて論ずる問題になる。一般流が海陸風と重なる場合には局地的な不連続線を形成しやすいが、一般流の shear が、擾乱の発達に及ぼす影響については、場合によって異なる模様である。擾乱のスケールを決めるには拡散係数の大きさが重要になる。また、成層の安定性の如何によっては、背の高い対流（積乱雲）に発達する可能性もある。現段階では、極めて単純化した仮定の下でしか、数値実験を行うことができない。

References

- Estoque, M. A., 1961; A theoretical investigation of the sea breeze. *Quart. J. R. Met. Soc.*, **87**, p. 136.
- Estoque, M.A., 1962; The sea breeze as a function of the prevailing synoptic situation. *J. Meteor.*, **19**, p. 244.
- Fisher, E. L., 1961; A theoretical study of the sea breeze. *J. Meteor.*, **18**, p. 216.
- Pearce, R. P., 1955; The calculation of a sea-breeze circulation in terms of the differential heating across the coastline. *Quart. J. R. Met. Soc.* **81**, p. 353.
- 当舎万寿夫, 1953; 気温逆転層の生成と消滅, 研究時報, **5**, p. 649.

討論:

- (a) この程度のスケールにおいて、拡散係数と安定度との関係（特に数学的表現）の研究が残されている。

8. ラージスケールにおける乱流輸送の問題

片山 昭 (気象研)

大気—地球系は年平均において、大気の上限に到達する日射の63%を吸収するが、そのうちの45%はいったん地球表面で吸収される。一部は赤外放射で大気に帰されるが、残りは潜熱と顕熱に変形され、境界層を通じて大気に輸送され、大気の加熱場の形成に重要な役割を演ずる。それゆえ、大気大循環の問題を論ずる上で、境界層の乱流輸送の問題は非常に重要な因子となってくる。とくに、大陸上において蒸発をどのように計算したらよいか、複雑な自然表面をどのように計算したらよいか、複雑な自然表面をどのように取扱ったらよいかなどの問題は、大循環の数値実験の発展のための障害となることは明らかである。

つぎに、大規模現象における自由大気中での乱流輸送の問題について考えて見よう。大規模な気象現象を取扱う場合、平均場と擾乱場に分けてみるが多いが、そのさい運動や熱力学の方程式に含まれている非線型項の移流項は、平均流で流される部分と擾乱で流される部分に分れる。たとえば、顕熱の水平輸送は

$$C_p \bar{v} T = C_p \bar{v} \cdot T + C_p \bar{v}' T'$$

となる。すなわち、右辺第二項のようなものを乱流輸送項と称するわけで、平均方程式系を用いる際、つねにその取扱に問題を生ずる量である。この乱流輸送項が平均量の関数として表現できるか、とくにそれが拡散形式（たとえば $\bar{v}' T' = -K \partial T / \partial y$ のように）で示し得るかどうかは非常に興味がある。古く Defant (1921) は、熱輸送を拡散形成で表現することにより、気温の平年の南北分布を一応説明することに成功している。さらに Blinova (1946) は南北垂直断面の気温分布、Krubatkin (1957) は気温の東西分布を、熱拡散を導入して上手く説明している。このように、熱拡散理論が巨視的な乱流輸送場につねに適用できるならば、時間平均天気図が意味あるものとなり、長期予報にとってこれほど便利なことはない。そのため、平年値でなく、年毎とか月毎とかいったや、短い平均に対して、この種の研究が多く企てられたが、常にゆきづまり成功した例を見ない。その理由について考えてみよう。加熱域と冷却域が空間に準定常的に分布している流体の場において、巨視的な熱輸送の方向は、加熱域から冷却域に向うものであって、温度分布との関係は二次的であると考えるのが自然であろう。普通、温度は加熱域で高く冷却域で低いので、拡散理論でも一応説明できる。しかし、たまたま温度が加熱域で低く冷却域で高ければ、熱は温度傾度と逆行して輸送されることになる。その良い例は、下部成層圏の冬季の中緯度以南で見出される。この領域では、北ほど気温が高いが、熱は南から北に運ばれている。また対流圏において平均的にみれば、下層は凝結熱や地球表面からの顕熱輸送により熱源であり、上層は赤外放射により冷源となっている。その平衡を保つためには熱は下層から上層に温位の傾度と逆って運ばれることが要求される。偏西風帯の高低気圧に付随した擾乱系はこの要求を充たす性格を具えている。すなわち、トラフの前面は暖く上昇流が、後面は冷く下降流が卓越しており、 $\bar{w}' \theta' > 0$ で熱は上方に輸送される。いままで、境界層で発達した乱流理論は個々の渦の性格がないものを取扱ってきた。それゆえ、自由対流のごとく、暖い渦は上昇傾向をもつとい

った性格が無視できなくなると拡散理論からはずれてくる。大気の巨視的場で乱流的役割を演じる高低気圧系も、熱源域から冷却域に熱をはこぶような性格をもたされているから、拡散理論で完全に記述できないのは当然であろう。

ところで、今後大循環の解明や長期予報の発展のための有力な手段として、大循環の数値実験はますます盛んになるであろうが、自由大気中で乱流項を導入する上で、最も大きな問題になりそうな事柄にかんたんにふれておこう。全地球をおよぶ数値実験において、格子間隔を100km以下にとることは当分不可能である。この場合、すでにのべた高低気圧程度の規模の輸送効果は問題なく記述できるが、100km以下の中小規模の現象は乱流項として取扱わざるを得ない。この効果が無視しうるほど小さければよいが、実は大循環に対して最も重要な役割の一つを演じている。赤道地帯には強大な熱源が

存在し、そのほとんど大部分は大気中で放出される凝結熱に原因している。さらに、多量の熱が下層から上層に輸送されることが要求されるが、赤道領域には中緯度におけるような高低気圧系は存在しない。Riehl-Malkus (1958)によれば、5km程度の規模の塔状積乱雲が凝結熱を放出し、その熱を効果的に上部対流圏にはこんでいる。この現象は明らかに格子間隔以下の現象であり、一種の乱流現象として取扱わねばならない。最近、境界層における自由対流現象を解明すべく多くの努力がはらわれているが、自由大気中における積雲対流(湿潤型対流)の基礎的研究は、大気大循環機構の解明のため不可欠であるといっても過言ではない。

討論:

- (a) 拡散を考えるのに、その内部的構造を考えないで、単なる平均値の勾配に、もっともらしい拡散係数を乗じて流束を出すことの危険なこと。

〔書評〕

山本三郎著、登山者のための気象学

(山と溪谷社、昭和40年初版、B6版222頁、定価380円)

天気予報というと、毎朝のテレビの解説を思いですが、正直にいってもっとなにかならないものだろうか。同じ解説者の顔を何年も見ているところから考えると、もうりっぱなプロのはずである。ところが皮肉な表現を使うと、プロというものは、その道のエキスパートではなくて、ただその道で食っている連中を指すものだということになりかねない。

なにが足りないかと考えると、張りあいが無い、オーバーにいうと、感激がないのである。毎朝のルーチン作業に感激などを投入していたら、とても続きませんと答えるかもしれない。しかし、しがたないレビューの踊り子でも、気分の悪い日はあろうが、微笑を忘れない。それと同じことだ。激しい言葉でいえば、職業のきびしさを考えているかということにもなる。いいまわしをトチったり、アーだのウーだの耳ざわりな音声を除ききれないことなどは論外である。

山本さんの本は全く反対のものだ。まず、緒論の『大

空をぐるっと見わたそう』を読んでみよう。気象関係の人でこんな新鮮な魅力のある文章を書ける人がいたことは驚異であった。テレビの解説者は気象技術者の代表ではなかった。山本さんは癖のある方だという批評を聞いたことがある。しかし、会社の庶務課長的な常識と人ざわりのよさをだれにでも期待したら、世の中はさだめし退屈なものにちがいない。

この本の特徴は、すでに体験によって気象に親近感を抱いている登山者にその感情を固める効果が第一、これから山と気象にふれようとする初心者に魔術をかけることが第二である。そのためにずいぶん努力している。無数の写真と効果的な説明の現われであるが、とくに巻末の『実例表』という、美しい写真と天気図と解説のマッチングのすばらしさは、ちょっと例を知らない。

ただ、すべての読者を気象技術者と期待してはなるまい。そこにほんとうにプロとアマの差がある。美しい写真となだらかな文章に釣られて読んでゆくうちに、いつの間にか気象の知識をたたきこまれてしまったということでもよからう。機械技術者が組立図を、電気技術者が配線図を、気象技術者が天気図を持ち出しすぎることは共通のうとうしさである。(佐貫亦男、東大教授)

正誤表

天気12巻3号 荒井康：天気図型と太陽活動の関係。

p18. 下から3行目の式を右のように訂正

$$E = \frac{\Delta ZA - \Delta ZP}{1 + \alpha |\Delta ZA / \sigma A + \Delta ZP / \sigma P|^2}$$