# 第3章 大気および海洋混合層におけるエネルギー輸送の 室内実験

# 物理気象研究部 新野 宏\*

1 はじめに

大気・海洋は統計的にみれば安定な密度成層をした流体である。安定な密度成層をした流体中 で鉛直運動が生ずると、運動と反対方向の浮力が働くため、運動は妨げられる。従って、なんら かの強制力の存在がなければ上下方向の混合やこれに伴うエネルギーや運動量の輸送は抑えられ る傾向にある。

しかしながら、大気と地表・海表面の境界付近では、それぞれの力学的・熱的な特性の違いに より、温度や風速・流速その他の物理量が急激な変化を強いられる。この為、統計的には安定な 密度成層場にもかかわらず、場が力学的・熱的に不安定となり、乱流が発生する。乱流は、物質 の混合やエネルギー・運動量の鉛直輸送を促進する。乱流による大気と地表面・海洋間のエネル ギー交換は大気・海洋の様々なスケールの運動の駆動源となっている。

乱流による大気と地表面・海洋間のエネルギー交換の形態として代表的なものは2つあり、そ れぞれ対流混合、力学的混合と呼ばれる。大気中では冬期中国大陸から吹き出した寒気が相対的 に暖かい日本海で下端から加熱を受ける際などに、熱的に不安定となり対流運動が発生し、混合 とエネルギー輸送が生ずる。海面から対流の及ぶ高さまでを対流混合層と呼ぶ。海洋中でも夜間 や冬期、海洋が表面付近で上から冷やされる際に対流混合層が生じ、下向きに成長する。一方、 夜間などに地表面・海面から冷却を受ける大気では、風が吹くとき、地表面・海面付近の速度勾 配が急となり、乱流が発生して上下の混合が生ずる。海洋の表面で風が吹く際にも、海洋中で同 様の混合が生ずる。このような混合が及んでいる層を力学的混合層と呼ぶ。

本研究の目的は、大気及び海洋に生ずる対流混合層及び力学的混合層を室内実験によって作り 出し、その性質及びエネルギー・運動量輸送の素過程を調べることにある。

\*共同研究者:加藤真規子(物理気象研究部),花房龍男(現応用気象研究部),萩野谷成徳•木下宣幸(物 理気象研究部)

© 1992 by the Meteorological Research Institute

# 2 実験方法

#### 2.1 実験装置

実験装置の概観を図3-1に、鉛直断面を図3-2に示す。実験に用いたのは、深さ24.0 cm、 内径29.1 cm、外径48.6 cmのアクリル製同心円筒水槽である。水槽内に安定な密度成層を作り 出す為に、水槽の底面付近にステンレス製のダクトを、また水槽の上蓋としてアルミ製の水槽を 配置した。この為、作業流体の実水深は16.1 cmとなっている。ダクトとアルミ製水槽にはそれ ぞれ異なった温度の恒温水を循環できるようになっている。上蓋を兼ねたアルミ製の水槽はアク リル製の同心円筒水槽に支え車を介して載っており、力学的混合層を作り出す際にはモータを用 いて円周方向に毎分0.48~1.47回転の速さ(水槽の中心で毎秒1.92 cm~5.98 cmの速度に対 応)で回転できるようになっている。同心円筒水槽の側壁は断熱の為、内側・外側共に厚さ5 cm の発泡スチロールで覆った。実験室の気温は空調設備により23°Cに設定したが、冷房・暖房の同 時運転が不可能なため、1度以内の気温変動は避け得ない。

本実験で測定したのは、水槽の平均半径にあたる半径 38.8 cm の位置における温度と流速の鉛 直分布の時間変化である。温度の計測は、深さ方向に 28 本配置された熱電対によった。このうち 24 本は、上蓋の底面を水深 0 cm とするとき、水深 0.2 cm の位置から 0.5 cm 毎に水深 11.7 cm の位置まで、また残りの 4 本は水深 12.7 cm から 1.0 cm 毎に水深 15.7 cm までに配置した。温度 は、摂氏 0.1 度の単位まで測定可能である。熱電対の測定データは、データ・ロガーを通して、 パーソナル・コンピュータに取り込み、フロッピー・ディスク上に記録した。28 点のデータの取 り込み・記録には 7 秒を要する。

一方,流速の測定は,半径方向と鉛直方向にトラバース機能を持ったレーザ流速計(DANTEC 社製)によった。同流速計のトラバース速度は最大で1mm/sであり,流速の測定には1点につき 0.59 秒要する(以下に示す流速データは各点における 0.59 秒間の平均流速である)。この為,本 実験では現象の時間スケールとトラバース速度の関係を考慮して,鉛直方向のみのトラバースを 行った。1回のトラバースでは,水槽の平均半径において水深 72 mm から測定を始め,2 mm 毎 に水深 2 mm までの 36 点で流速を得た。この方法では 1 つの流速の鉛直分布を得るには 2 分 46 秒かかり,流速分布の変化の大きい混合層発達初期のものは同一時刻の測定と見なすことはでき ないことに注意を要する。測定と測定の間にトラバース装置を元の位置に復帰させることに要す る時間は 10 秒である。

## 2.2 実験手順

#### 2.2.1 安定成層の形成

基本場の安定成層は底面近くのダクトに温度 T<sub>1</sub>の恒温水を,上蓋の水槽に温度 T<sub>2</sub>(T<sub>1</sub>より高



図3-1 実験装置の概観。



図3-2 実験装置の鉛直断面(一点鎖線は同心円筒の中心軸を示す)。



図3-3 等温な状態から一様な温度勾配を持った安定な密度成層が形成される様子。図 中の記号は上蓋の加熱・ダクトの冷却を始めたときから1時間毎に○●△▲□ の順。

温)の恒温水を循環することにより作り出した。図3-3は実験開始前のほぼ等温な温度分布が、 底面から冷やされ上蓋から暖められてほぼ一様な温度勾配を持つ安定な密度成層状態へと落ち着 く様子を示したものである。最終的な密度成層状態への移行は、分子熱伝導による。拡散時間 $\tau = d^2/\kappa$  は水の熱拡散係数  $\kappa = 1.5 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$ ,水深の半分 d = 8.05 cmを用いると約12時間とな る。図3-3を見ると約4時間でほぼ一様な温度勾配が実現されていることがわかる。本実験で は念の為6時間が経過してから混合層を作る実験を開始した。

2.2.2 対流混合層の実験

対流混合層の実験では、安定な密度成層が形成されてから、ある時刻(t=0)に上蓋へ恒温水を 供給する恒温水循環装置の設定温度を $\Delta T$ だけ低くした。恒温水循環装置の冷却能力は130ワッ ト(W)とそれほど大きくないので、上蓋の温度は瞬間的に設定温度に到達するわけではない。 従って、この実験における上蓋での境界条件は熱流束 Q(=130 W)が一定という条件に近く、境 界面上で温度を固定した Deardorff *et al.*(1969)の実験と異なっている。対流混合層の実験に おいては、温度分布は30秒毎、2時間にわたって測定した。

2.2.3 力学的混合層の実験

力学的混合層の実験では、安定な密度成層が形成されてから、ある時刻(t=0)に上蓋の回転を

#### 気象研究所技術報告 第 30 号 1992

始めた。このとき上蓋付近に生ずる流速の強い鉛直勾配の為に乱流が発生し安定な密度勾配が混合され,混合層が下方に発達していく。力学的混合層の実験においては,温度分布は20秒毎,1時間にわたって測定した。

### 3 実験結果と考察

#### 3.1 対流混合層

対流混合層の実験のうち4例を選んで紹介する。各実験に用いた外部変数の値は表3-1に示した。図3-4に実験2で得られた温度分布の時間変化を12分毎に示す。ここで、底面のダクトの温度  $T_1$ =14.3°C、上蓋の温度  $T_2$ =25.4°C、 $\Delta T$ =9.4°Cである。初期のほぼ線形な温度分布が少しずつ上層から冷却され、深さ方向に温度がほぼ一様な混合層が時間と共に深くなっているのが見られる。

それぞれの時間において,混合層の大半を占める一様な温度の領域の温度を  $T_M$  と書くことに しよう。混合層の厚さ D を,基本場の温度分布 (t=0の一様な温度勾配の分布) において  $T_M$  が 実現する深さで定義して,4例の実験についてその時間変化を示したのが図 3 - 5 である。いず れの場合の時間変化もよく似た傾向を示すが,混合層の厚さは基本場の温度勾配が大きいほど小 さいことがわかる。

熱流束 Q が一定の場合の混合層の厚さ D の時間変化は、熱量の保存から

実験番号	Τ₁(℃)	Τ₂(℃)	ΔT (K)	水深12cm以上の平均的 温度勾配Γ(K/cm)
1	14.8	22.7	6.7	0.44
2	14.3	25.4	9.4	0.69
3	14.7	22.9	6.9	0.51
4	14.5	24.3	8.3	0.61

表3-1 対流混合層の実験に用いたパラメーターの値。

- 79 -



図3-4 対流混合層の発達に伴う温度分布の時間変化。図中の記号は上蓋の冷却を始め てから12分毎に○●△▲□■◇◆×+▽の順。



図3-5 混合層の厚さの時間変化。○●△▲はそれぞれ実験1,2,3,4に対応。破
 線は(1)式,実線は(2)式を示す。

$$D = (2Qt/C_{p0}S\Gamma)^{1/2}$$
(1)

で与えられる。ここで、 $C_p$  は水の比熱、 $\rho$  は水の密度、S は水槽の断面積、 $\Gamma$  は水深12cm以上 の基本場の温度勾配である。図 3 — 5 に Q=130 W、 $C_p$ =1 cal/K/g、 $\rho$ =1 g/cm<sup>3</sup>、S=4760 cm<sup>2</sup>、  $\Gamma$ =0.50K/cm として(1)式を破線で示した。実験で得られた混合層の厚さは(1)式で得られる よりも小さくなっている。本実験においては、恒温水循環装置によって、作業流体のみではなく、 上蓋水槽や上蓋水槽内の水も冷却されるので、これらの熱容量も考慮してやる必要がある。作業 流体以外の物体の熱容量を作業流体の等価な水深 h で表現することにすると、混合層の厚さの時 間変化は

$$D = -h + [h^{2} + (2Qt/C_{p} S\Gamma)]^{1/2}$$
(2)

で与えられる。図3-5に実線で示したのは h=2 cm として(2)式から計算される混合層の厚さ である。実験データとほぼ良い一致が見られる。また,基本場の温度勾配が大きいほど混合層の 成長が遅い特徴も(2)式から説明される。

# 3.2 力学的混合層

図 3 — 6 は安定な密度成層が形成された後に、上蓋を急に回転したときに生ずる力学的混合層 の発達の様子を、温度の鉛直分布の時間的変化で見たものである。この実験では、 $T_1$ =14.0°C、  $T_2$ =23.0°Cで、上蓋の流速 V は水槽の平均半径で4.8 cm/sec である。図 3 — 6 より時間と共に



図 3 - 6 力学的混合層の発達に伴う温度分布の時間変化。図中の記号は上蓋の回転を始 めてから 6 分40秒毎に○●△▲□■◇◆×+の順。

温度の一様な混合層が厚さを増して行くのが見られる。初期には力学的な混合のため、上蓋付近の暖い水と下層の冷い水が混ざり、上蓋付近では降温、下層では昇温が見られる。上蓋の回転が始まる前の線形の温度分布と比較してみると、混合層が形成された時の流体層の持つ熱量は初期よりも増加している。これは恒温水の循環によって上蓋の温度を $T_2$ に維持しようとする加熱が常に与えられている為である。過去に行われたいくつかの実験においては塩水で成層を作ったものが多いが(Kato and Phillips, 1969; Linden, 1975)、その場合には上端で密度流束がなく、本実験で熱量に対応する量が系全体で保存する。本実験においても、混合層の発達初期には力学的な混合による熱の鉛直輸送が上端からの熱輸送を上まわる為、上端で断熱条件が与えられたときに生成する力学的混合層に似た振舞が見られる。しかしながら、上端からの熱流束のため時間と共に混合層内の温度は少しずつ上昇し、最終的には混合層全体の温度が $T_2$ に達してほぼ定常になるという振舞は、従来の実験と異なる点である。

最終状態では上層で温度一様な混合層,その下に温度勾配が基本場より急な強安定層,その下 に基本場から変形を受けない層が存在する。t=0から最終状態に到るまでに作業流体中に運ばれ た熱量を図3-6のデータから見積ると約130kcalとなり,単位時間当りのエネルギー輸送に換 算すると約130Wとなる。これは3.1節の対流混合層の実験において,対流混合層が運ぶエネル ギーと同じオーダーとなっており,力学的混合層においても密度成層を強めるような加熱冷却が



図3-7 力学的混合層の発達に伴う速度分布の時間変化。図中の記号は○●△▲□の順 に上蓋の回転を始めてから1分18秒-4分4秒,4分14秒-7分0秒,13分2 秒-16分48秒,24分46秒-27分32秒,57分17秒-60分3秒の間に測定したもの。

-82 -

境界で与えられるならば、境界から流体内へ運動量に加えてかなりのエネルギーが輸送されることを示している。ちなみに、上蓋に恒温水を供給する恒温水循環装置の加熱能力は 1300 W である。

図 3 - 7 にレーザ流速計で測定した流速の鉛直分布の時間変化を示す。図中の5つの流速分布 は上蓋の回転を始めてからそれぞれ1分18秒-4分4秒,4分14秒-7分0秒,13分2秒-16 分48秒,24分46秒-27分32秒,57分17秒-60分3秒の間に測定したもので,測定時間は深 い所ほど早い。図 3 - 7を見ると,いずれの時間にも上蓋から約8mmの範囲に強い流速の鉛直 勾配の領域があることがわかる。上蓋の回転速度 V は 4.8 cm/sec であるから,流速の鉛直勾配 は上蓋の近傍で最も大きく,この強い流速の勾配が乱流を作り出し,混合層の発達に貢献してい ると考えられる。

密度成層流においては、乱流の発生に関して 2 つの安定化要因がある。密度成層と粘性の効果 である。最初に密度成層の効果を考えてみよう。基本場の温度勾配  $\Delta T/d = 9 \text{ K}/16.1 \text{ cm} = 5.6 \times$  $10^{-1}\text{K/cm}$ ,水の体膨張係数  $\alpha = 2 \times 10^{-4}$ ,重力加速度  $g = 9.8 \times 10^2 \text{ cm/s}^2$ ,シアの強さ dU/dz =3 (cm/s)/6 (mm)を用いて、リチャードソン数  $Ri = (g\alpha\Delta T)/(dU/dz)^2$ を評価すると、Ri~5×10<sup>-3</sup>となる。成層流が不安定であるためには Ri < 0.25であるので、上蓋付近の流れは密度 成層の効果を考慮しても十分不安定であると考えられる。次に、粘性の効果を考えよう。上蓋の 付近には、エクマン境界層に似た構造の境界層が生ずると考えられる (ただし、この場合はコリ オリカの代わりに遠心力が重要である)。上蓋の回転に伴う渦度  $\varsigma$ を見積ると、 $\varsigma = 4.8$  (cm/s)/ 38.9 (cm) =  $1.2 \times 10^{-1} \text{s}^{-1}$ であるので、境界層の厚さ  $\delta$  は水の分子動粘性を  $\nu = 1 \times 10^{-2} \text{cm}^2$ /s と して、 $\delta \sim (\nu/\varsigma)^{1/2} = 2.8 \text{ mm}$  と見積れる。これから境界層の流れに対するレイノルズ数  $Re = U\delta/$  $\nu$ は、84 となり Lilly (1966)が理論的に求めたエクマン層の不安定の為の臨界レイノルズ数 56 よりも大きい。

上蓋付近の鉛直勾配の大きな領域の下には、流速がほとんど深さによらない層が見られる。上 蓋から約3cmの範囲の流速分布は、上蓋の回転を始めてから3分以内にほぼ定常になっている ことがわかる。流速が一定の層の下には再び流速の勾配が大きな遷移層が存在し、この層の下に は混合の及んでいないゼロ流速の層が存在する。最終の定常状態の温度分布と比較すると、流速 が一様な層の厚さは温度が一様な層の厚さにほぼ等しい。また流速勾配のの大きな層は温度の勾 配の大きな安定層にほぼ対応している。この最終的な定常状態においては、上蓋の回転で注入さ れた力学的エネルギーが安定成層に逆らって仕事をすることによるエネルギー損失および粘性に よる散逸につりあっていると考えられる。

- 83 -

#### 4 まとめ

大気および海洋で見られる対流混合層および力学的混合層を窒内実験で作り出し,これらの混 合層の構造と混合層によるエネルギー輸送を調べた。対流混合層の発達は,境界で与えられる熱 エネルギー流束によって規定されており,熱収支を考慮した簡単なモデルで比較的良く記述でき る。境界から負の浮力流束のある力学的混合層は,混合層の発達初期には断熱条件のものとよく 似た振舞を示すが,時間と共に流体内に熱エネルギーが蓄積され,このことによる位置エネルギー の増加率と粘性による散逸率が上蓋の回転による運動エネルギーの生成率とほぼつり合う準定常 状態に達する。

現実の大気・海洋中の混合層は,移流などの効果の存在のため,室内実験で調べた1次元的な 混合層の性質は変形を受ける場合が多い(遠藤(1992)による第2章参照)。これらの効果につい ては,今後観測例に照らして検討していくことが必要であろう。

本稿で紹介した5例の実験は,様々な外部パラメーター値に対して行った50例近くに及ぶ実験の一部に過ぎない。1つ1つの実験における多量の時系列データはフロッピー・ディスク上に収納されており,要望に応じて提供可能である。

# 参考文献

遠藤昌宏, 1992:大気と海洋とのエネルギー交換過程の基本的観測. 気象研究所技術報告第 30 号, 63-73. Deardorff, J. W., G. E. Willis and D. K. Lilly, 1969: Laboratory investigation of non-steady penetrative convection. *J. Fluid Mech.*, **35**, 7-31.

Kato, H. and O. M. Phillips, 1969: On the penetration of a turbulent layer into a stratified fluid. J. Fluid Mech., 37, 643-655.

Lilly, D. K., 1966 : On the instability of Ekman boundary flow. *J. Atmos. Sci.*, **23**, 481-494. Linden, P. F., 1975 : The deepening of a mixed layer in a stratified fluid. *J. Fluid Mech.*, **71**, 385-405.

- 84 -