

水面下に発達する対流境界層における乱流輸送

烏谷, 隆
九州大学応用力学研究所

石井, 幸治
九州大学応用力学研究所

植田, 洋匡
九州大学応用力学研究所

<https://doi.org/10.15017/4743994>

出版情報：応用力学研究所所報. 78, pp. 55-61, 1995-10. 九州大学応用力学研究所
バージョン：
権利関係：



水面下に発達する対流境界層における乱流輸送

鳥 谷 隆 石 井 幸 治
植 田 洋 匡

概 要

気体-液体境界面下に発達する対流層における乱流構造と輸送過程を回流式開水路を用いて実験的に研究した。この装置では対流層は蒸発により境界面が冷却されることにより生じる。温度と速度の揺らぎをレーザードップラー速度計と微小な熱電対を用いて同時に測定した。この結果を加熱された個体壁面上の対流層の時と比較する。

気液界面下の対流層の最も著しい特徴は乱流輸送過程にある。液体側の乱流熱輸送は $Nu = \alpha Ra^{1/3}$ で現される。ここで、 Nu は Nusselt 数、 Ra は Rayleigh 数である。個体壁面上の場合と比較すると、指数 $1/3$ は同じであるが係数 α はおよそ 2 倍になっている。このため、温暖化ガスの海洋中への吸収に対する熱対流の寄与は重要でありこれを無視することは海洋への吸収量をかなり少なく見積もることになる。

浮力速度、対流層の厚さ、重力加速度を用いて規格化された水平方向と鉛直方向の速度揺らぎ分布は、自由表面近傍をのぞいて個体壁面上の分布と同じであることが解った。同様に、規格化された温度揺らぎ分布は自由表面の近くをのぞいて個体壁面上の分布と同じである。

Key words: Convective layer, Turbulence transfer

1. は じ め に

気体-液体境界面下の乱流構造と輸送過程は大気と海洋の相互作用において重要な役割を果たしている。特に、温暖化気体の海洋への吸収においては吸収速度が液体側の物質輸送抵抗により規定されるため液側の乱流構造を解明することは重要である。

水面近傍の乱流は風による剪断力および浮力により引き起こされる。風により引き起こされた乱流については最近多くの研究がなされている^{1,2)}。しかし、浮力により液面直下に誘起された乱流については未だ定量的にはよく解っていない。

海洋の対流境界層中では、海面に衝突する渦によって海面が持ち上げられる、しかし、このために生じる付加的圧力により渦は押し戻される。この結果、水面近くでは鉛直方向の渦運動が抑制され水平方向の運動へとエネルギーの再配分が行われ波動運動へと移行する。このため、自由表面近くの乱流の構造は個体壁面上の乱流の構造とは質的に異なっていると思われる。

本論文では、まず最初に室内実験により気液界面下の熱対流についてその構造と熱輸送過程について詳細に調べ、個体壁面上の熱対流との違いについて研究した。次に、物質の輸送過程と熱の輸送過程との類似性に基づき海洋への二酸化炭素の吸収速度を推定した。そして吸収速度への熱対流による寄与と海上風による剪断力によって引き起こされる対流による寄与との比較を行った。

2. 実験装置と測定方法

実験装置の概略図を図1に示す。上面が開放された水槽を用いて自由表面下に生じる熱対流層を研究した。水槽の大きさは断面が深さ 0.6 m 幅 0.6 m ある。長さが 10 m あり両側面は流れが観察できるようにガラス板でできている。適当な温度に制御された温水がヘッドタンクから一定の流量で水槽内に流れ込む。熱対流層は水面からの蒸発のために水面近傍の水が冷却され密度が大きくなり重力と浮力のバランスが崩れるために生じる。水槽の一部分、下流域の長さ 3 m、の上面を室内に開放して表面からの蒸発のため熱対流層が発達するようにした。この部分をテストセクションとした。ほかの部分については断熱に注意を払った。側面と床は2重にしその外側には厚さ 50 mm のグラスウールを張った。熱対流層を発達させるために開放している部分以外の上面はおよそ 1 cm の薄い空気層を設けグラスウールで断熱した。3枚の50メッシュのスクリーンを設置することによりテストセクション入口で一様な速度分布をした流れを作り出した。このようにして、平均速度が 1 cm/s 以下の安定した対流境界層を水面下に発生させることができた。

流れ方向と鉛直方向の速度はレーザードップラー流速計を用いて計測した。また、温度の測定には直径 15 μm の細い熱電対を使用した。速度と温度は同時に測定した。計測器からの出力電圧は 100 HZ のサンプリング周波数でデジタル信号に変換し光磁気ディスクに取り込んだ。これらのデータより、平均温度、平均速度、揺らぎの強度（分散）及び確率密度の鉛直分布を求めた。

計測位置はテストセクションの中心線上の入り口からそれぞれ 0.25 m, 0.5 m 下流で行った。実験は水の温度を室温よりそれぞれ 10.0, 20.0, 30.0 K 高く設定して行った。Rayleigh 数はおよそ 5×10^8 から 1.5×10^{10} であるので熱対流層は乱流状態になっている。

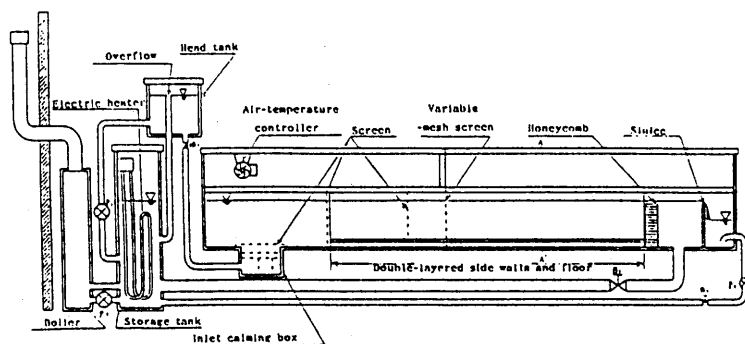


図1 実験装置の概略図

3. 結果と議論

3.1 液体側の熱輸送係数

熱輸送に対する乱流拡散係数は自由表面に近づくにつれて小さくなり表面ではゼロになるので、平均温度の鉛直分布は表面のところで線型になる。我々の実験では、表面からおよそ 0.5 mm まで平均温度分布に線型の領域が見られた。表面での平均温度の傾きから熱流速を求めた。また、温度と鉛直方向の速度の相関 $\overline{w\theta}$ から求めた。この二種類の方法による結果は互いに良く一致していた。

図 2 は規格化された熱流速、即ち Nusselt 数 Nu を Rayleigh 数 Ra の関数として現したものである。Nusselt 数は $h\delta/\lambda$ 、Rayleigh 数は $g\beta\Delta T\delta^3/\nu\kappa$ と定義される。ここで h は液体側の熱伝達率、 δ は対流境界層の厚さ ΔT は表面と境界層の外側との温度差である。また、 β 、 λ 、 κ 、 ν はそれぞれ熱膨張係数、熱伝導率、熱拡散率 ($=\lambda/\rho c_p$ 、 ρ は密度、 c_p は定圧比熱)、動粘性係数である。 g は重力加速度である。

Nusselt 数と Rayleigh 数の関係は

$$Nu = 0.29 Ra^{1/3} \quad (1)$$

で現されることが解った。

指数 1/3 はノンスリップな境界条件をもつ固体壁面上の自由対流の時と同じである。これは熱伝達率 h が長さスケール δ に存在しないことを示している。係数 0.29 はノンスリップ条件の時の結果のおよそ 2 倍である^{3,4)}。熱輸送が固体壁面上の場合より大きいことは自由表面でのスリップのためであると思われる。即ち、固体壁面上の自由対流の場合には壁面上ですべての速度成分がゼロになる、しかし、自由表面下の対流の場合には表面近くで鉛直方向の乱流運動は抑制されるが、エネルギーの再配分が起こ

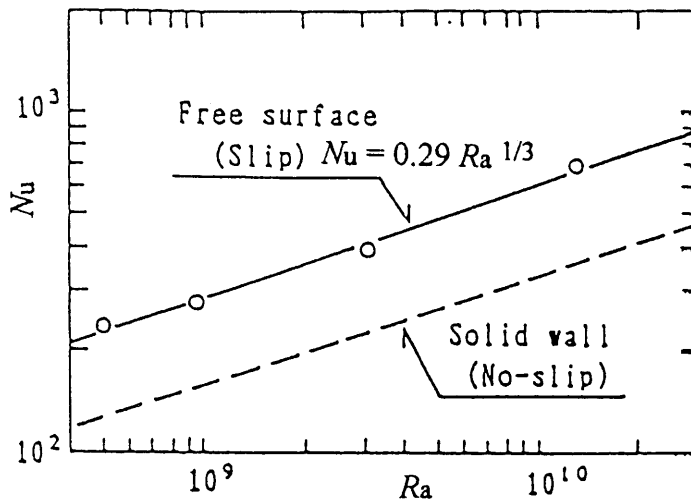


図 2 Nusselt 数と Rayleigh 数の関係
○ 計測値
... 加熱された個体壁面上の結果

り水平方向の速度揺らぎは増強されるので、活発な熱輸送が維持されるものと思われる。

3.2 二酸化炭素の海洋への吸収

熱流束 $q(=h\Delta T)$ を導入して式(1)を変形すると次式になる

$$h=0.395(g\beta\lambda^3 q/\kappa\nu)^{1/4} \quad (2)$$

一方、熱輸送と物質輸送の類似性より、二酸化炭素の液体側の物質移動係数 k_L (吸収速度) は式(2)を次式の代入することにより計算できる。

$$k_L/h=(D/\lambda)(S_c/P_r)^{1/3} \quad (3)$$

S_c , P_r はそれぞれ Schmidt 数 ($=\nu/D$, D : 二酸化炭素の分子拡散係数) Prandtl 数 ($=\nu/\kappa$) である。

一般に、自由表面を通過する物質の流束 F は次のように現される。

$$F=K_G(P_G-P_L)=k_G(P_G-P_{surf})=k_L(C_{surf}-C_L), \quad (4)$$

K_G は総括移動係数 k_G は気体側の物質移動係数である。 P と C は二酸化炭素の分圧と濃度である。添字 G , L , $surf$ はそれぞれ気体側、液体側および境界面上の値であることを表している。気体と液体間の平衡がヘンリーの法則で現される時は、 H をヘンリー一定数とすると次式が成り立つ

$$P_{L,surf}=H C_{L,surf} \quad (5)$$

式(1)と(5)より総括物質移動抵抗 $1/K_G$ は次のようになる

$$1/K_G=1/k_G+H/k_L \quad (6)$$

この式より、溶解度の大きな気体をのぞくとほとんどの気体のヘンリー一定数は非常に大きいので、総括物質移動抵抗は液体側の輸送過程により規定されることが解る。気体側の抵抗 $1/k_G$ は無視することができる。この結果、二酸化炭素の海洋中への吸収流束は

$$F_{CO_2}=(k_L/H)\Delta P_{CO_2} \quad (7)$$

となる。 ΔP_{CO_2} は大気と海洋の二酸化炭素分圧の差である。

海洋への物質流束についての最近の評価においても液側の物質移動係数は海上を吹く風の速さに比例すると仮定されている (例えば IPCC Report 1991)。係数 k_L の風の速さ U あるいは摩擦速度 U^* に対する依存性を図 3 に示す。

式(2), (3)を用いて、東シナ海における熱対流による物質移動係数 k_L を熱流束が最大の時

(100 W/m^2) と平均の時 (35 W/m^2) について評価した。計算結果を図 3 の Liss and Merlivat の値¹と比較すると、熱対流による物質移動係数はおよそ $3 \sim 5 \text{ m/s}$ の風速の風が吹いているときの状況に対応している。このため、海面下に発達した熱対流層は二酸化炭素の海洋への吸収に大きな寄与をしており、これを無視することは海洋への物質流束を過小評価することになる。

3.3 対流境界層の乱流構造

図 4 は温度揺らぎの鉛直分布を固体壁面上の結果と比較したものである³⁾。図の縦軸は温度揺らぎの標準偏差を $\theta^* \equiv \sqrt{\theta^2}/(Q^3/\kappa g)^{1/4}$, $Q \equiv \beta q/\rho c_p$ と規格化したものである。また横軸は $z^* \equiv z/(\kappa^3/gQ)^{1/4}$ と規格化している^{6,7)}。表面近く (z^* が 10 よりも小さな領域) を除くと分布の様子は互いによく一致している。

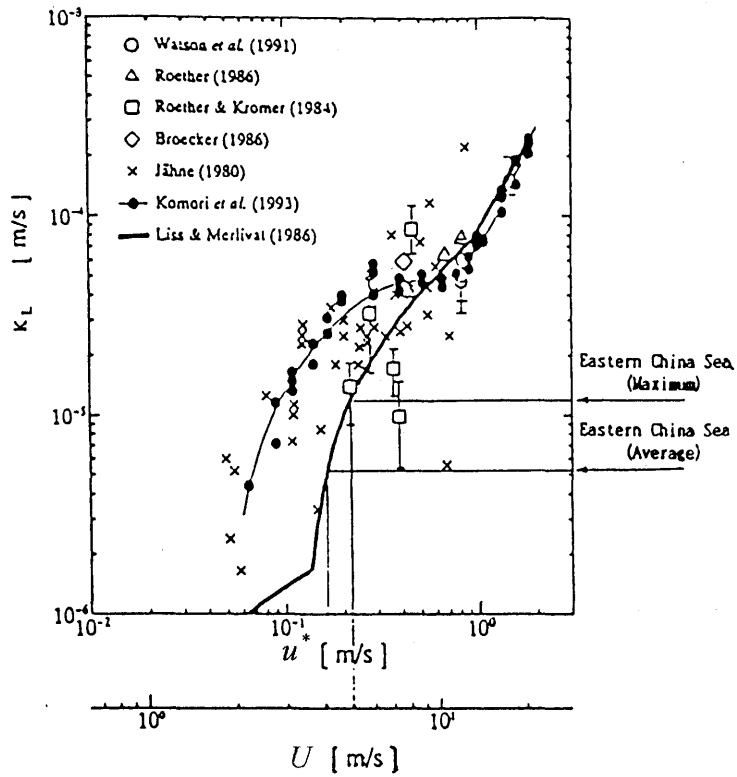


図3 大気と海洋間の二酸化炭素に対する物質移動係数

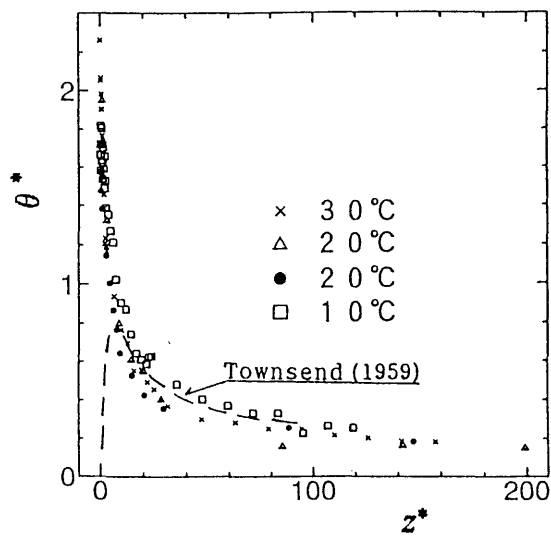


図4 温度揺らぎの鉛直分布

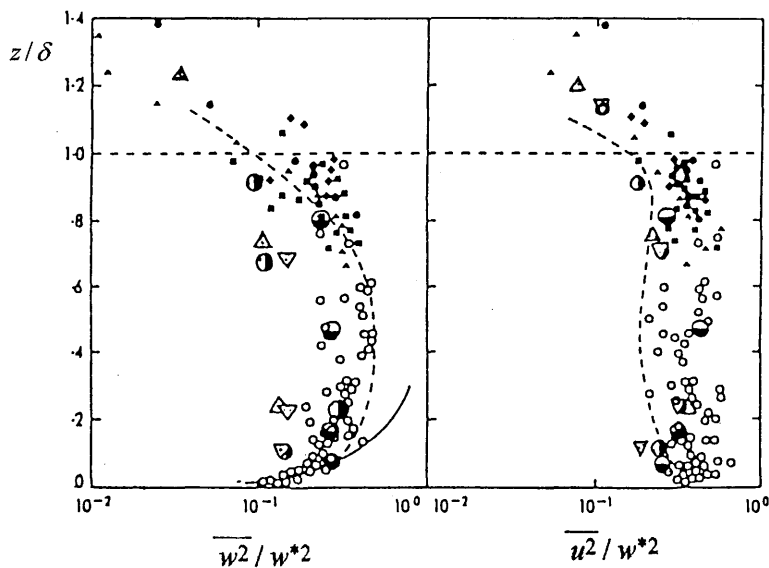


図5 鉛直方向と水平方向の速度成分の分散の鉛直分布
 大きな記号は実験結果である。
 小さい記号はCaughey and Palmerの観測結果。

速度揺らぎの鉛直分布を図5に示す。この図では、縦軸は対流層の厚さで規格化されている、また横軸は鉛直方向と水平方向の速度成分の分散を $(g\delta Q)^{2/3}$ で規格化した。この結果をCaugheyとPalmerの大気対流層での観測結果と比較するとよい一致が見られる⁵⁾。このため、自由表面下の熱対流層の乱流構造は固体壁面上の熱対流層の乱流構造と表面近く以外では同じであるといえる。

4. 結 論

気液界面下に発達する熱対流層における乱流構造や輸送過程を調べるために実内実験を行い以下の結果を得た。

1. 熱輸送係数は固体壁面上の熱対流の時のおよそ2倍になる。
2. 乱流構造は表面近くを除くと固体壁面上の場合と同じである。
3. 東シナ海における熱対流の寄与は3～5 m/sの風速の風の効果に匹敵する。
4. 二酸化炭素やほかの温暖化気体や汚染物質の海洋への吸収を評価する時に熱対流の寄与を無視することはかなり小さく評価していることになる。

参 考 文 献

- 1) Liss P. S. and Merlivat, L. 1986: 'the role of air-sea exchange in geochemical cycling', Ed. by P. Buat-Menard, 113-127.

- 2) Komori, S., Nagaosa, R. and Murakami, Y. 1993: Turbulence structure and mass transfer across a sheared air-water interface in wind-driven turbulence. *J. Fluid Mech.*, 249, 161-183.
- 3) Townsend, A. A. 1959: Temperature fluctuations over a heated horizontal surface, *J. Fluid Mech.*, 5, 209-241.
- 4) Townsend, A. A. 1972: Mixed convection over a heated horizontal plane, *J. Fluid Mech.*, 55, 209-227.
- 5) Caughey, S. J. and S. G. Palmer 1979: Some aspects of turbulence structure through the depth of the convective boundary layer, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 105, 811-827. Caughey, S. J. 1981: 'Observed characteristics of the atmospheric boundary layer in Atmospheric Turbulence and Air Pollution Modeling', Ed. by Nieuwstadt and H. van Dop, pp. 107-158, Reidel Pub., Dordrecht.
- 6) Deardorff, J. W. and G. E. Willis 1974: Computer and laboratory modeling of non buoyant particles in the mixed layer. In 'Advances in Geophysics', vol. 18, Academic Press, New York.
- 7) Willis, G. E. and J. W. Deardorff 1976: A laboratory model of diffusion into the convective planetary layer. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 102, 427-445.