

近畿大学理工学部 正員 江藤剛治
神戸大学工学部 正員 道奥康治
近畿大学理工学部 正員 竹原幸生
三菱重工業 正員○島崎正則

1. はじめに

自然対流における熱・物質輸送システムは各種工業システムをはじめ、自然界に多く見られる。本研究では図-1に示す鉛直一次元の熱対流場に関し、水温構造および乱流変動特性の計測を行う。図-2はマイクロカプセルトレーサ粒子により可視化された熱対流場の流況の一例である($Pe \approx 560$)。底面から供給される熱フラックスによって乱れエネルギーが生成され、平均流は存在しない。時間平均された現象は水平方向に関して均質であり、流れは z 方向のみに依存する鉛直一次元過程である。実験結果は、乱流理論に基づく解析値¹⁾と比較検討される。

2. 実験装置

底面形状25cm×25cmのガラス製矩形水槽を用い、水理実験を行う。底面から一定の熱フラックスが与えられ、上面及び側面は断熱されている。層厚は $h=4\sim9$ (cm)である。鉛直方向20点に熱電対(線径0.0508mm)を設置し、温度時系列を計測する。データは底面よりリレー形式で走査されデータロガーに集録される。A/Dコンバータの周波数を60Hzとした時、サンプリング周波数は20Hzで、同一チャンネルあたり1Hzのサンプリング間隔で計測される。1チャンネル300個のデータから平均温度分布ならびに変動強度分布を算定する。

3. 代表物理量

物理諸量の規準化を行うにあたり、以下に示す2種類の代表物理量を導入する。〈対流層スケール(外部変数)〉; 長さ: $z_0=h$ (全水深), 速度: $w_0=(agH_0z_0)^{1/3}$, 温度: $\theta_0=H_0/w_0$, 無次元座標: $\tilde{x}_i=x_i/z_0$, 〈熱境界層スケール(内部変数)〉; 長さ: $z_0=\kappa_T/w_0$, 速度: $w_0=(agH_0\kappa_T)^{1/4}$, 温度: $\theta_0=H_0/w_0$, 無次元座標: $\hat{x}_i=x_i/z_0$, ここで, a :

熱膨張係数, g : 重力加速度, H_0 : 温度フラックスである。図-2: 熱対流の可視化画像(露光時間1sec)現象を支配する独立な無次元支配パラメータは、ペクレ数 $Pe=w_0z_0/\kappa_T$ およびプラントル数 $Pr=\nu/\kappa_T$ である。 Pe は乱流規模を規定し、 Pr は作業流体の物性値より決まる。ここでは $Pr=6.8$ (水)とする。ここで、 ν : 動粘性係数, κ_T : 熱拡散係数である。外部変数表示(～を冠す)および内部変数表示(^を冠す)された無次元諸量間には、次の関係が成立つ。

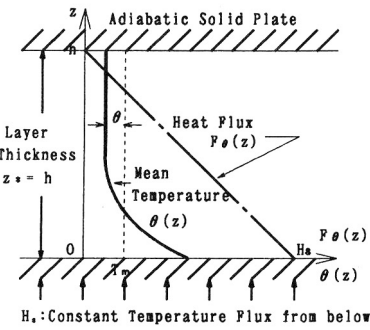


図-1: 対象とする熱対流場

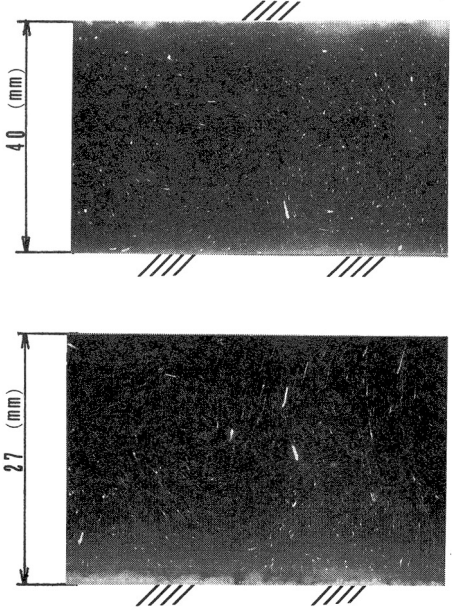


図-2: 熱対流の可視化画像(露光時間1sec)

$$\hat{\theta} = P_e^{-1/4} \tilde{\theta}, \quad \hat{z} = P_e^{3/4} \tilde{z}, \quad \overline{u_i^2} = P_e^{-1/2} \overline{\tilde{u}_i^2}, \quad \overline{u_i \theta} = \overline{\tilde{u}_i \tilde{\theta}}, \quad \hat{t} = P_e^{-1/2} \tilde{t} \quad (1)$$

4. 平均温度分布

実験条件を表-1に示す。今、平均温度分布 $\bar{T}(z, t)$ を次式のような相似関数 $\tilde{\theta}(\tilde{z})$ によって表示する。

$$\bar{T}(z, t) = \bar{T}_m(t) + \theta_0 \tilde{\theta}(\tilde{z}), \quad \text{ここで, } \bar{T}_m(t) = \frac{1}{h} \int_0^h \bar{T}(z, t) dz : \text{断面平均温度} \quad (2)$$

$$\text{熱フラックスは系内の保存式} \quad H_0 = \frac{d}{dt} \int_0^h T(z, t) dz = \frac{d}{dt} (h \bar{T}_m) = h \frac{d\bar{T}_m}{dt} \quad (3)$$

より算定される。 $\tilde{\theta}$ の鉛直分布をそれぞれのペクレ数に対応させ、理論値と共に図-3に示す。計測された平均温度分布は理論値にほぼ適合しており、乱流強度には依存せず相似な分布形が認められる。図-4は内部変数表示による底面熱境界層付近の平均温度

$\hat{\theta}$ に関し、理論値との比較を示す。この場合、熱境界層内に位置する計測点は1~2点である。熱電対の大きさは約0.5mm程度である。これに対し、無次元熱境界層厚を $\hat{z} = 15$ と仮定した場合、その実スケールはおおよそ4mm程度となるため、本実験条件の範囲ではこれ以上の空間分解能を確保することは困難である。内部領域の水温構造を議論するには鉛直方向に対し空間分解能をより向上させる必要がある。

5. 水温の変動強度分布

水温の変動強度は、観測された水温時系列に30秒間の移動平均を施すことによって求められる。水温変動強度の r. m. s. の無次元値 $\tilde{\sigma}_\theta = \sigma_\theta / \theta_0$ を図-5に示す。図から判断できるように $\tilde{\sigma}_\theta$ は、自己相似的な分布形を有することが認められる。底面のごく近傍では、水温変動強度が低減している。理論値は実験値を良好に再現しており、熱境界層内の熱輸送に占める熱拡散輸送の割合が大きいことを実証している。図-6は底面境界付近の変動強度の r. m. s. を内部変数により示したものである。熱境界層内のデータ個数は不足しているが、変動強度のオーダーはほぼ理論値と一致している。

6. おわりに

熱境界層スケールでの熱輸送過程を議論するためには、より高度な計測技術が要求される。現在、マイクロカプセルトレーサ粒子の追跡による流速計測手法を開発している。さらに、温度についても画像データより計測することを目標としている。

参考文献：1)道奥・島崎：熱対流乱流場の自己相似解，第37回水理講演会論文集，1993。

表-1: 実験条件

	Theory	symbol	z_0 (cm)	W_0 (cm/s)	θ_0 (°C)	H_0 (°C cm/s)	P_e
case 1	—	▲	9	0.54	0.109	0.0589	3272
case 2	---	●	4	0.30	0.076	0.0229	809
case 3	---	■	4	0.182	0.028	0.005	490

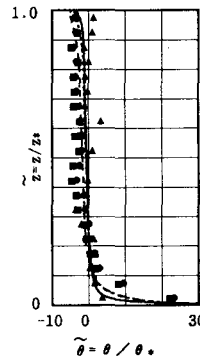


図-3: 平均温度分布
対流層スケール

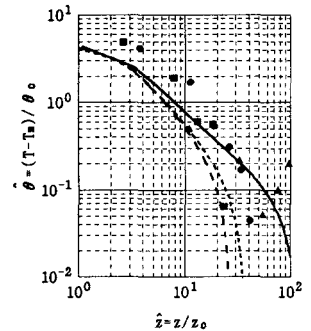


図-4: 平均温度分布
熱境界層スケール

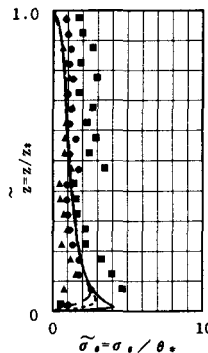


図-5: 変動強度分布
対流層スケール

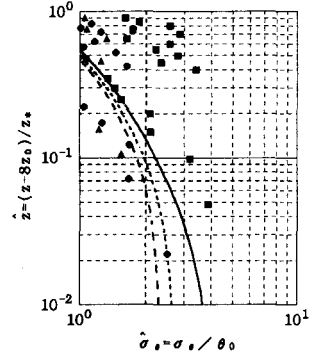


図-6: 変動強度分布
熱境界層スケール