

複合因擾乱によって生ずる水温・流速変動の特性
 Characteristics of Velocity and Temperature Fluctuation
 Generated by Composite Stirring

大阪大学工学部 室 田 明 Akira MUROTA
 神戸大学工学部 道 奥 康 治 Kohji MICHIOKU
 建設省関東地建 阪 口 進 Shin-ichi SAKAGUCHI

Turbulent field induced by combined action of mechanical and thermal stirring is experimentally investigated. Turbulence is generated by means of an oscillating grid and plate heater both of which are installed at the bottom of a one-dimensional test tank. Dynamic effect of mechanical and thermal stirring on turbulent structure is examined by measuring fluctuating components of temperature and velocity. Temperature fluctuation decreases with increasing the relative intensity of mechanical stirring to thermal stirring. However, turbulent velocity is scarcely affected by the thermal stirring, in other words, the mechanical stirring dominates the fluctuating velocity field.

Keywords : turbulent structure, forced convection,

1. はしがき

著者らはこれまで機械的擾乱と熱的擾乱の複合作用により誘起される水温成層場での混合現象について実験的・理論的検討を行い¹⁾, 躍層界面での連行特性ならびに内部変動特性を明らかにしてきた。一般に大気から複合因擾乱を受ける成層期の表水混合層はほぼ一様に混合していると考えられるので鉛直混合量は躍層面での連行量によって代表されるとみなせる。平均水温構造のみを対象とする限りにおいては連行量の概念のように混合層の内部構造にまで立ち入らず混合層全体を一体化した積分模型が簡便かつ有効である。しかし、表水層内の水質挙動にまで議論を発展させるためには混合層内部の乱流構造と水質輸送過程との関連性を把握しこれに基づいて水質予測手法を確立しなければならない。本研究は複合因擾乱によって誘起された乱流場の水温・流速変動特性を実験的に明らかにし、混合層内の水質輸送機構に関する考察を行うものである。

2. 実験方法

図-1に示すような縦88cm×横88cm×高さ40cmのアクリル製鉛直一次元水槽に一樣水温の水を満す。機械的擾乱は底面近傍(底面より $d=3.9\text{cm}$ だけ上方)に設置された $5\text{cm}\times 5\text{cm}$ メッシュの格子を鉛直に振動させることによって、熱的擾乱は底面に設置されたラバーヒーターによって、各々供給される。平均水温分布は鉛直方向20点に配置されたサーミスター水温計を用いて計測・記録される。一方、水温変動量は鉛直方向6点に設置された時定数の低い高感度サーミスターを水平方向約40cmにわたり約 $0.8(\text{cm/s})$ の速度で数往復走査させこれより水平方向に平均化された統計量として得られる。流速は密度調整されたモノクロルベンゼンとヘキサンをトレーサーとして流れを可視化することによって求められる。実験は、格子の振動周波数: $f=0\sim 3.2(\text{Hz})$, 振幅: $S=1(\text{cm})$, 底面からの熱フラックス: $H_s=0\sim 0.07(\text{cm}^2\text{C/sec})$, 全水深: $h_a=20\sim 35(\text{cm})$ の範囲で行われた。

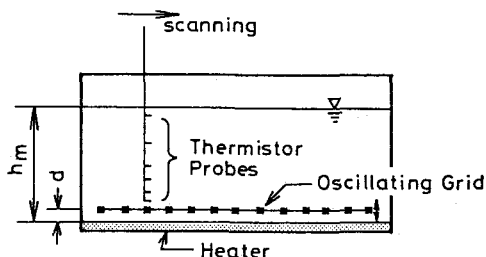
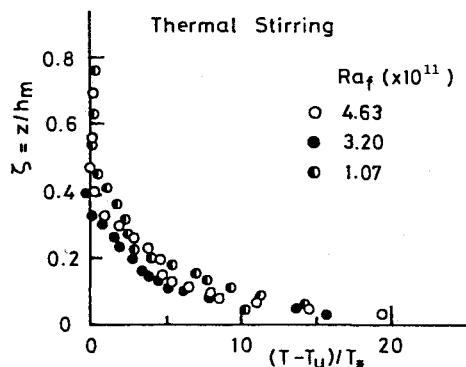
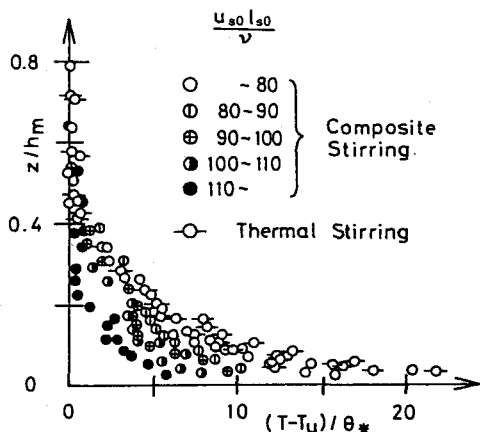


図-1 実験装置



(a) 熱的擾乱のみが作用した場合



(b) 複合因擾乱が作用した場合

図-2 平均水温分布

3. 平均水温分布 (図-2)

図-2(a)は熱的擾乱のみが作用する場合の平均水温分布をあらわす。縦軸は全水深 h_m で無次元化された鉛直座標 $z = z/h_m$ 、横軸は上端の水温 T_u からの水温偏差を熱対流場での代表水温 $T_* = H_s/u_r$ ($u_r = (\alpha g H_s h_m)^{1/3}$:熱対流の代表速度)によって除した無次元化水温 $\theta = \{T(z) - T_u\} / T_*$ である。なお同図において各データポイントは一つのケース内での複数回の計測値の平均値である。

フラックス型のRayleigh数 $^{2)} R_{s,r} = \alpha g H_s h_m^4 / \nu \kappa T_*^2$ の値に関わらずほぼ相似な分布形が認められる。図-2(b)は複合因擾乱が作用する場合の平均水温分布である。機械的擾乱の強度をあらわすパラメーター $u_{s0} l_{s0} / \nu$ ($u_{s0} = f s$, $l_{s0} = \sqrt{sM}$, M は格子のメッシュ長)が大きいほど底面付近の逆列成層部が削りとられてやせてゆき、水温偏差が減少してゆくことがわかる。

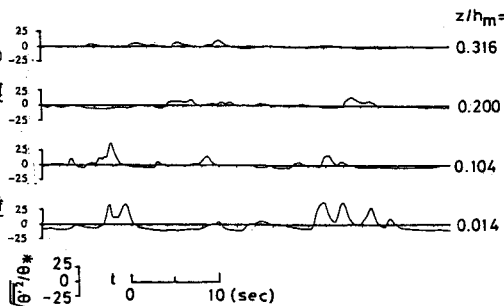


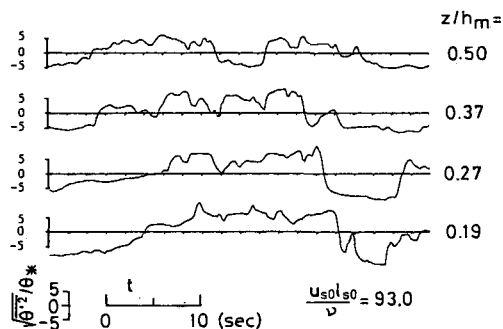
図-3 水温変動の時系列

4. 水温変動の特性

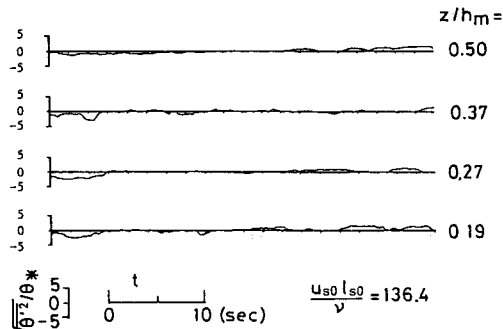
(1) 水温変動の時系列

(熱的擾乱のみが作用する場合)

図-3,4は水温時系列の計測例を示す。縦軸は T_* で無次元化された水温を示す。横軸は時間をあらわし走査速度(0.8(cm/s))を乗ずれば水平方向の位置に読み替えることができる。熱的擾乱のみが作用する場合



(a) 機械的擾乱が弱い場合 ($u_{s0} l_{s0} / \nu = 93.0$)



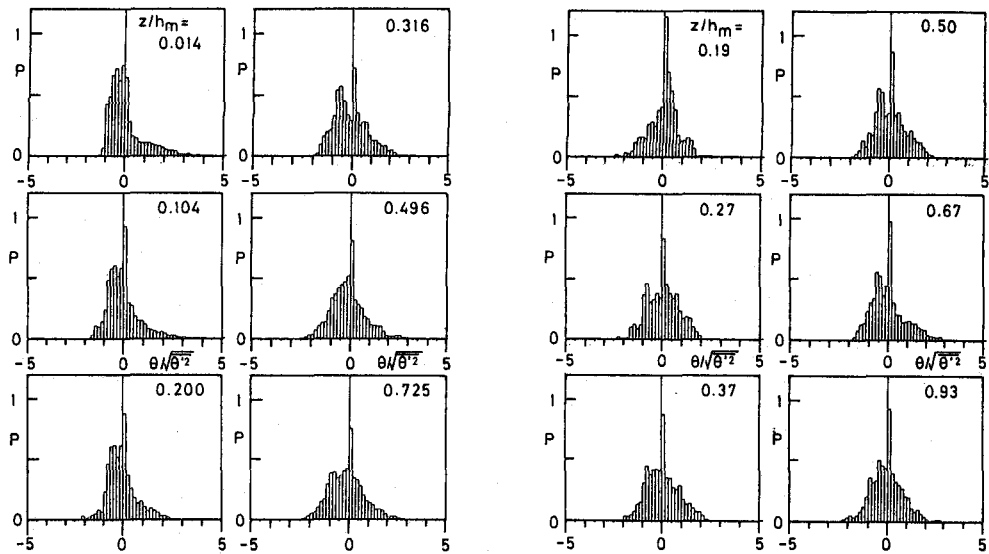
(b) 機械的擾乱が強い場合 ($u_{s0} l_{s0} / \nu = 136.4$)

図-4 水温変動の時系列 (複合因擾乱が作用した場合)

(図-3)には底面に近いほど、間歇的に発生したサーマルの通過に起因する上方に尖ったピークをもった時系列が見られる。これに対し複合因擾乱の場合(図-4)では、熱的擾乱の場合と同様底面に近づくほど変動が大きくなる傾向がみられるが、上に尖った変動ピークは底面近傍においても特に認められない。また図-4(a)と(b)との比較から、 $u_{s0}l_{s0}/\nu$ が大きいすなわち機械的擾乱の効果が大きいほど水温変動は小さいことがわかる。以上のことから、熱的擾乱によって発生したサーマルが機械的擾乱によって破壊され周囲水との混合によってサーマルがもたらす局所的水温偏差が減少していることが想像できる。

(2) 水温時系列の確率密度分布

以上のような時系列の特性は図-5に示す水温変動の確率密度分布においてより顕著に見られる。すなわち図-5(a)の熱的擾乱のみが作用する場合では、底面に近い位置ほど時系列が左右非対称の密度分布を示しており逆に擾乱源から遠い上方の位置ほど正規分布に近づく。これに対して複合因擾乱が作用する場合には図-5(b)のようにいずれの高さにおいても左右対称の正規分布に近い密度分布を呈し、ランダムな時系列であることが示される。



(a) 熱的擾乱のみが作用する場合 (b) 複合因擾乱が作用する場合

図-5 水温時系列の確率密度分布

(3) 乱流場の特性長

上述の水温時系列は近似的にはほぼ瞬間的な水温偏差の水平分布をあらわしていると考えられる。そこで、乱流構造が水温変動に反映されていると考えて、十分長い時系列データより zero-up-cross法で時系列の平均半波長 l を求めた。図-6はその鉛直分布の例である。複合因擾乱と熱的擾乱のみが作用する場合との大きな差異はない。これは上述の時系列波形にみられる結果と異なり、乱流構造の幾何学的スケールに対しては機械的擾乱の影響が小さいことを示している。いずれのケースについても $l/h_m=0.12$ 程度の値を示しほぼ一様な分布となっている。熱的擾乱のみが作用する場合については l/h_m が Rayleigh数 R_{af} およびPrandtl数 $Pr=\nu/\kappa_T$ の関数として次式であらわされ

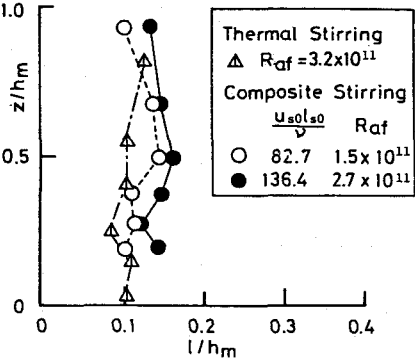
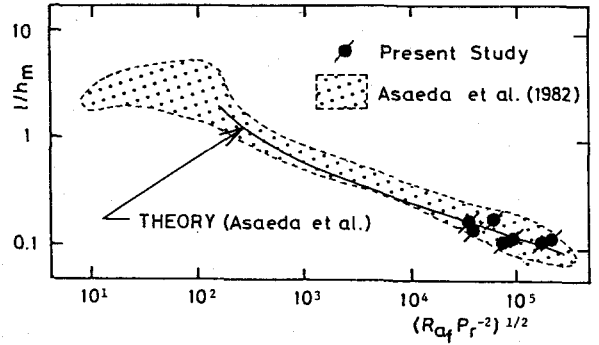


図-6 乱流場の特性長 l の鉛直分布

ることが浅枝等²⁾によって示されている。

$$1/h_m = 7.1(Ra_f \cdot Pr^{-2})^{-1/6} \quad (1)$$

図-7はこの関係を示したものであり本実験値はこれとよく一致している。また本実験値はかなり大きな $Ra_f \cdot Pr^{-2}$ の領域にあり十分に発達した乱流対流であることがわかる。



(4) 水温変動の強度

水温時系列より得られる水温変動強度の鉛直分布を図-8, 9に示す。図-8は熱的擾乱のみが作用する場合の結果を他の実験値³⁾とともに示したものである。

平均水温の場合と同じく熱対流場の温度スケール T_* によって規準化することによって相似な分布形となっておりまた他の計測値とよく一致している。図-9は複合因擾乱のケースについての結果を機械的擾乱強度に関するレイノルズ数 $u_{so} l_{so} / \nu$ 毎に整理して示したものである。実線は図-8に示した熱的擾乱の結果の包絡線であるが、 $u_{so} l_{so} / \nu$ が増加するとともに水温変動強度が減少する様子がわかる。これより熱的擾乱によって発生したサーマルは機械的擾乱の影響を受け、さらに乱流構造も変形を受けていることが推定される。

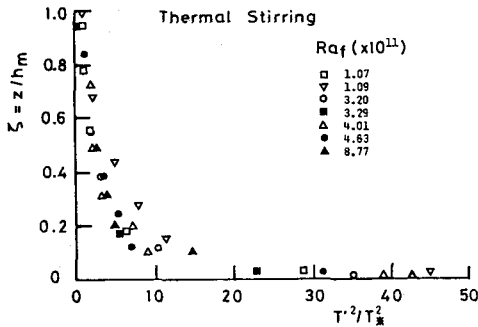


図-8 水温変動の分散 T'^2/T_*^2 の鉛直分布
(熱的擾乱のみが作用する場合)

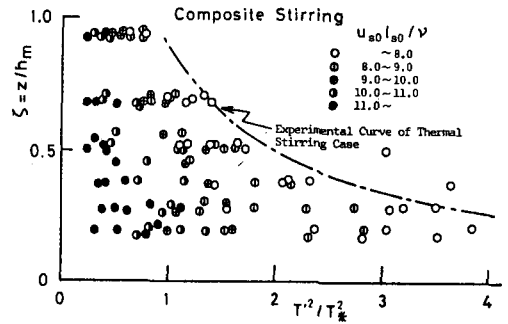


図-9 水温変動の分散 T'^2/T_*^2 の鉛直分布
(複合因擾乱が作用する場合)

5. 流速変動の特性

(1) 解析方法

流速はトレーサー粒子のビデオ画像をデジタイザーによって座標解析し求められる。その際、領域を水深方向に10分割し、各領域内の流速データはその領域中間点の値として処理される。また、できる限り水平方向に一樣にトレーサー画像を採択するとともに各領域内の流速データ個数が50以下になる場合についてはデータを棄却した。

(2) 機械的擾乱が作用する場合の流速変動特性

図-10は流速変動の二乗平均値($\sqrt{u'^2}/u_{so}$, $\sqrt{w'^2}/u_{so}$, ここで $u_{so}=fs$:振動格子の特性速度)の鉛直分布をあらわす。図中の曲線はHopfingerとToly(1976)⁴⁾によって提案された半経験式

$$\sqrt{u'^2} = cfs^{3/2}M^{1/2}(z-d)^{-1} \quad (2)$$

をあらわす。ここで、 d は格子と底面との距離であり本実験では $d=3.9$ (cm)である。本実験は格子の振幅を $s=1$ (cm)に固定しており上式において $c=0.2$ の場合の曲線⁴⁾(図中の点線)に一致するはずであるが、実験値はこれよりやや大きくなっており、むしろ実線で示した $c=0.4$ 程度が適合するようである。この原因としては、(a)Hopfinger等の実験に比べて水深が小さく、乱れエネルギーが水面によって上方に発散することをさえぎられ系内に蓄積されること、および(b)微流速測定における画像処理精度の問題が考えられる。

(3) 熱的擾乱が作用する場合の流速変動特性

図-11は流速変動の強度を熱対流の代表流速 $u_f=(\alpha g H_s h_m)^{1/3}$ で無次元表示したものである。他の計測結果³⁾も同時に示しているが、本実験値は全体に小さい値を示しこれらとの適合度は良くない。特に熱供給量が小さく流速が小さいCase-2では水平・鉛直成分とも同程度の値しか示しておらず、一般に $w' > u'$ となる熱対流場の特徴的な乱流構造があらわれていない。これは、流速の絶対値が小さいことによる画像処理精度の限界による誤差であると考えられる。

(4) 複合因擾乱が作用する場合の流速変動特性

図-12に機械的擾乱の代表流速 $u_{sg}=fs$ で無次元された流速変動強度の分布を示す。また図-10で示した機械的擾乱の場合の半理論曲線(2)式も同図中に併記する。機械的擾乱のみが作用する場合に比べ全体的に大きな値を示しているが、その関数形はむしろ機械的擾乱のみが作用する場合のものに類似している。また、本来的には熱的擾乱の強度 u_f の増加にともない流速変動が増大すると予想されるが、本実験ではデータのばらつきの方が大きく顕著な傾向は認められない。計測精度をより向上させなければ断言できないが、いずれにしても熱的擾乱が乱流構造におよぼす影響は機械的擾乱のそれに比べるとかなり小さいものと推察される。

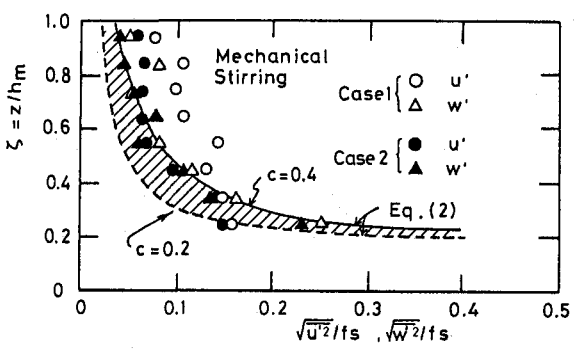


図-10 機械的擾乱が作用した場合の流速変動強度 $(\sqrt{u'^2}, \sqrt{w'^2})$ の鉛直分布

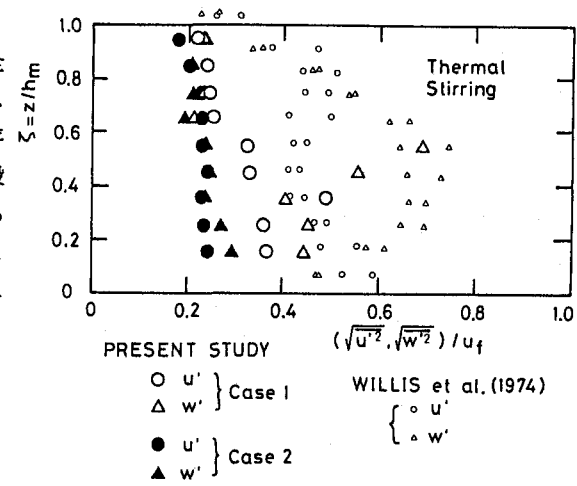


図-11 熱的擾乱が作用した場合の流速変動強度 $(\sqrt{u'^2}, \sqrt{w'^2})$ の鉛直分布

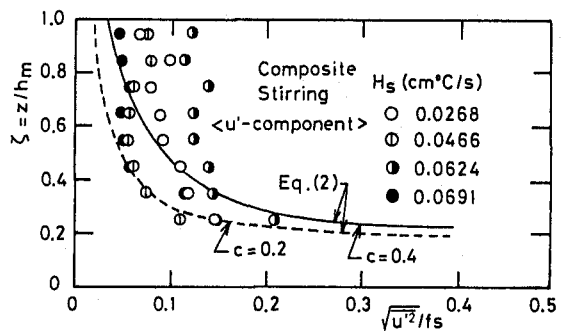


図-12(a) 複合因擾乱が作用した場合の水平方向流速の変動強度 $(\sqrt{u'^2})$

6. むすび

本研究では複合因擾乱によって生ずる乱流場の特性を実験的に検討した。熱的擾乱に加えて機械的擾乱が相乗的に作用した場合には平均水温場および変動水温場の双方に対して顕著な変化があらわれる。すなわち、機械的擾乱がより強く作用するほど底面の熱境界層はやせてゆくとともにサーマルの発生によって誘起された水温変動が減少する。流速変動については十分な精度が得られなかったが、やはり乱流構造に対して機械的擾乱の効果が相対的に大きいことが明らかにされた。以上の結論は水温成層場を対象として行われた著者らの実験的・数値解析的研究¹⁾を通して事前に予想された結果を裏付けるものである。本研究を開始するにあたっては、乱流モデルによる再現が困難な乱れの二次・三次相関項についても実験的な知見を得ることを目標としていたが、流速の解析精度が十分ではなく当初の目的を達したとは言い難い。今後はこのような微流速の乱流場を対象とした乱流計測の精度向上が課題である。

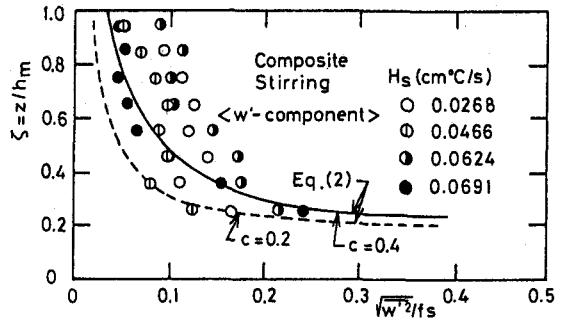


図-12(b) 複合因擾乱が作用した場合の鉛直方向流速の変動強度 ($\sqrt{w'^2}$)

参考文献

- (1) 室田・道奥・口田：複合因擾乱により誘起される鉛直混合現象の数値解析，土木学会論文集，第393号/II-9，pp.67～76，1988.
- (2) 浅枝・玉井・高橋：大水深および大きなRayleigh数における熱対流の性質について，土木学会論文報告集，第323号，pp.121～131，1982.
- (3) Willis, G.E. and Deardorff, J.W. : A laboratory model of the unstable planetary boundary layer, J. Atmos. Sci., Vol.31. pp.1297～1307, 1974.
- (4) Hopfinger, E.J. and Toly, J.A. : Spatially decaying turbulence and its relation to mixing across density interfaces, J. Fluid Mech., Vol.78, pp.155～175, 1976.