

貯水池での水温計測に基づく 内部波・自然対流の抽出

SAMPLING OF INTERNAL WAVES AND NATURAL CONVECTION IN A RESERVOIR BASED ON WATER TEMPERATURE MEASUREMENTS

道奥康治¹・神田徹¹・石川勝久²

Kohji MICHIOKU, Tohru KANDA and Katsuhisa ISHIKAWA

¹正会員 工博 神戸大学工学部建設学科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

²正会員 工修 鹿島建設関西支店 (〒550 大阪市西区阿波座1-3-15)

Reservoir water temperature was measured simultaneously at vertical multi-points using a thirty-channel thermistor chain. Data were collected every 10.5-second in order to detect even short time-scale motions. The objective is to make investigation on internal waves and natural convective motions that are much responsible for turbulent energy transfer as well as for water mass transport. Internal wave propagation was examined by filtering time series of water temperature and a cross-correlation analysis. A propagation diagram in a space-time coordinate system successfully described scales, modes and propagation characteristics of internal waves. Natural convection was investigated by analyzing dataset collected during winter nights. A conditional sampling, VITA - Variational Interval Time Averaging - was applied to detect organized motions due to nocturnal cooling. From conditionally averaged time series of temperature, a velocity scale of natural convection was obtained, which well agreed with the Deardorff's velocity scale. Entrainment rate and vertical turbulent heat flux were evaluated, which were well correlated to those found in small-scale experimental models.

Key Words : *reservoir hydrodynamics, water temperature, internal waves, entrainment, natural convection, conditional sampling*

1. はじめに

閉鎖水域においては、風と熱のエネルギーが水質過程に対し支配的である。

風エネルギーの大半は、吹送流の生成と造波に消費される。しかし、成層水域ではかなりの割合で内部波の生成にも使われるため、エネルギー収支に果たす内部波の役割は重要である。

熱エネルギーは、成層の安定化と、逆に放熱にともなう自然対流の促進に貢献する。やはり、エネルギー収支において重要な因子である。

ここでは、成層貯水池における内部波と自然対流を抽出するために水温を多点で連続計測した。成層期には、主として内部波動を抽出した。冬季循環期には、自然対流の抽出を試みた。

2. 観測方法

A-貯水池（兵庫県）は、総貯水量が $1.95 \times 10^6 \text{ m}^3$ 、最大水深が31mである。底層では、電気伝導度が非

常に高く、1年間を通して貧酸素水塊が消えない¹⁾。本観測の発端は、冬季循環期において自然対流により全層が循環状態に至るのか、部分循環状態を維持したまま安定に滞留するのかを確認することであった。

1996年9月～1996年12月まで計9回にわたって、貯水池最深部に30チャンネルのサーミスタチェーンを係留し、1週間程度の連続観測を行った。上層では0.5m間隔、中、底層では1m間隔に水温センサーを配置し、水面上0.5mでは気温を計測した。計測精度は $\pm 0.05^\circ\text{C}$ 以内、時定数0.8sec、サンプリング間隔は10.5secである。

風速・風向は水面上約30mのダム管理所屋上で自動観測されている。

3. 内部波の観測

(1) 水文・気象量と水温時系列

1996年9月27日13:00～9月30日13:00の観測から内部波を抽出した。図-1は、対象期間内における水文・

気象量と水温の時系列である。9月30日の7:00～12:00の降雨時（2～3mm/hr程度）を除いて晴天が続き、貯水位はほぼ常時満水位(EL.207m)に保たれていた。貯水池は南北に走る急峻な谷間に位置し、風は南北方向に卓越する。期間内では最大4m/s程度の風が断続的に吹いていた。

図-2は、平均水温分布である。水深約2.5mの位置に一次躍層が、約13mの位置に二次躍層がそれぞれ存在している。23m以深には「逆転水温層」が形成されている。

(2) 水温変動特性

変動成分を抽出するために、360min移動平均を時系列に施した。移動平均値からの偏差の時系列を図-3に示す。水面から2～3mまでの表層内の水温変動は、気象因子の日周変化に起因している。一方、二次躍層の周辺に見られる規則的な変動は躍層の上下方向に伝播しており、内部波の存在を示唆している。図-4は、1時間毎に算定された水温変動のr.m.s.である。二次躍層付近に大きな水温変動が認められる。

(3) 時空間相関と内部波動

内部波の時間スケールを絞り込むために、MEMによるスペクトル解析を実施した。躍層（水深13m）付近で検出される水温変動には、図-5のように45～60min.、25～35min.、21min.の卓越成分がそれぞれ検出されている。躍層の上下でも同様のスペクトルピークが見られ、内部波の伝播が示唆される。そこで、余分な変動成分を除去するために、所定の周波数バンドパスフィルターを水温時系列に施す。次に、躍層部の時系列に内部波動が敏感に反映されていると考えられるので、これを検出信号とする。フィルター処理された $z=13\text{m}$ における水温変動 $\theta(-13,t)$ と、同じくフィルター処理された水深 z の水温時系列 $\theta(z,t)$ との相互相関係数 $C(z,\tau)$ を次のように算定する。

$$C(z,\tau)=\frac{1}{\sqrt{\theta_{-13}^2}\sqrt{\theta_z^2}}\frac{1}{T}\int_0^T\theta(-13,t)\theta(z,t-\tau)dt \quad (1)$$

ここで、 $\sqrt{\theta_{-13}^2}$ ： $z=13\text{m}$ での水温時系列 $\theta(-13,t)$ のr.m.s.、 $\sqrt{\theta_z^2}$ ：水深 z での水温時系列 $\theta(z,t)$ のr.m.s.、 T ：観測時間、 τ ：遅れ時間、である。

図-6～8には、周期幅10-30min.、30-60min.、60-120min.のバンドパスフィルターを施した場合の相互相関係数 $C(z,\tau)$ を示す。

定義より $z=13\text{m}$ の $\tau=0\text{min.}$ において、 $C(-13,0)=1$ である。時間軸方向に濃淡パターンの周期性が見られ、これより内部波の周期が読みとれる。検出された内部波の周期は、用いたバンドパスフィルターに

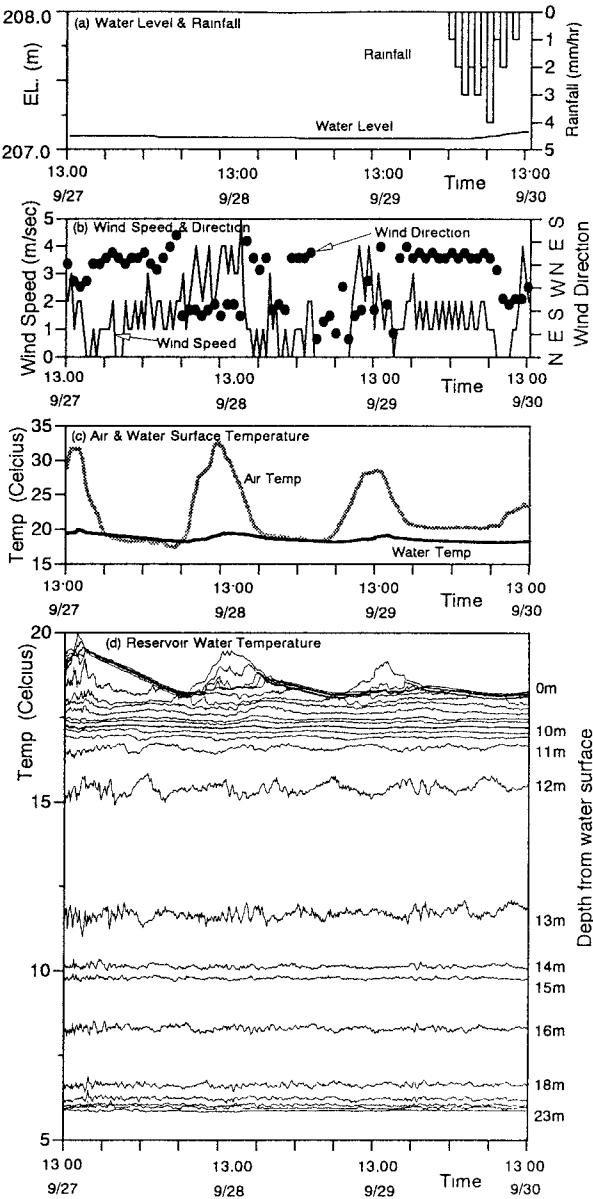


図-1 水文・気象量および水温の時系列
(1996年9月27日～9月30日)

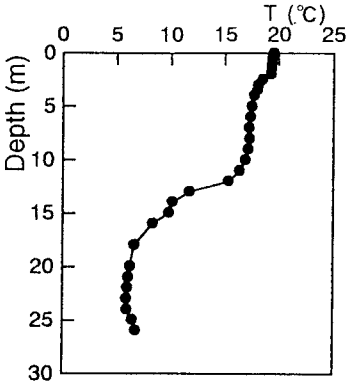


図-2 観測期間（1996年9月27日～9月30日）
における平均水温分布

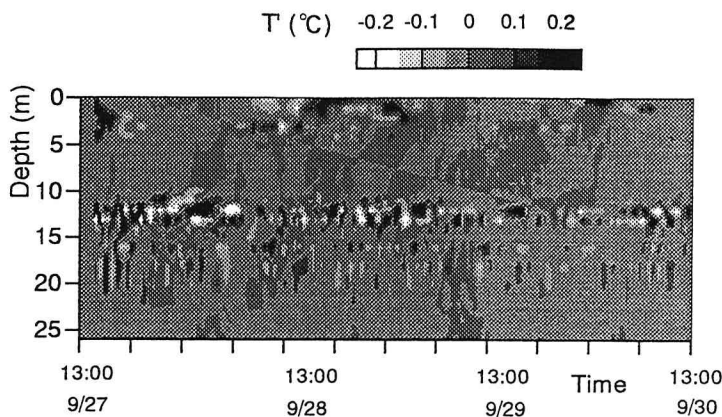


図-3 水温変動の時空間分布
(1996年9月27日～9月30日)

応じた時間スケールを有している。濃淡パターンが水深方向に伝播する内部波の走時曲線を反映していると考えれば、パターンの勾配は波速の鉛直方向成分に相当する。図-6で検出された内部波は図-7,8に比べて周期が短く、水深方向の構造も5～6層くらいに細かく分かれている。すなわち、水深方向に5～6次くらいの内部波モードが検出されている。これに対し、図-7では3～4次、図-8では2～3次と、長い時間スケールほど低次数（低波数）の内部波が検出される。

このような相関構造が内部波であることを検証する。躍層を有する密度分布を次式のようなHolmboe-typeの関数で表わす。

$$\rho = \rho_0 \exp\{-\alpha \tanh[(z + h_m)/h]\} \quad (2)$$

ここで、 ρ_0 : 基準密度、 α : 躍層面の密度差、 h : 躍層厚さ、 h_m : 躍層の深さである。この場合、内部波の分散関係は次式で与えられる²⁾。

$$\frac{\Gamma(1+m)}{\Gamma(1-m)} e^{2k(h_1+h_2)} = \frac{B_- + A_+ e^{2kh_2}}{B_+ + A_- e^{2kh_2}} \quad (3)$$

ここで、

$$A_{\pm} = \frac{\Gamma(\pm m)}{\Gamma(1+n)\Gamma(-n)}, \quad B_{\pm} = \frac{\Gamma(\pm m)}{\Gamma(\pm m-n)\Gamma(1\pm m+n)}$$

$\Gamma(x)$: Gamma関数、 $\pm$: 複合同順、 $m=kh$ 、 $k=q\pi/L$: 水平方向波数、 L : 貯水池の水平長、 $C_h=\{\alpha gh/n(n+1)\}^{1/2}$: 水平方向波速、 $T=2L/qC_h$: 周期、 $C_z=2H/pT$: 鉛直方向波速、 $H=h_1+h_2$: 全水深、 h_1, h_2 : 上下層の厚さ、 p, q : 鉛直・水平方向のモード数（正の整数）、である。水平・鉛直方向には、ともに重複波を想定している。

図-9のように、密度分布を式(2)へ回帰して h_1, h_2, α, h などを求める。

今、躍層深さにおける貯水池湖盆の長手方向距離を $L=250\text{m}$ と概算する。まず、ある水平モード数 q に対して m が定義され、分散関係を満足する n の値が式(3)より求まる。これより、水平波速 C_h 、周期 T が計算

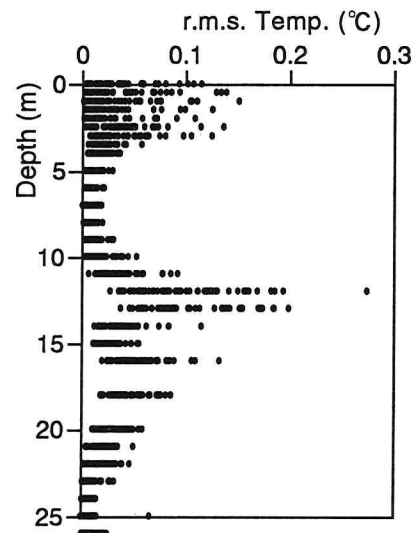


図-4 時系列から1時間毎に算定された水温変動強度r.m.s.の鉛直分布

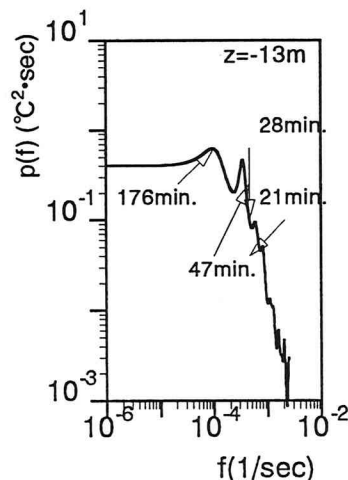


図-5 躍層部($z=-13\text{m}$)における水温変動スペクトル
(1996年9月27日15:00～9月28日3:00)

され、鉛直方向波速 C_z と鉛直方向モード数 p の関係が決定する。

図-10は水平モード $q=1\sim 5$ に対して算定された C_z と p の関係を実測値とともに示したものである。ここで、実測の C_z と p は図-6～8に示した相互相関係数の時空間分布より求めた。

30min.よりも長時間スケールの内部波は $q=1,2$ 程度の低次数であり、鉛直方向モードも高々 $p=6$ である。これらは理論値と類似しており、上記の理論で仮定するように貯水池サイズで規定される重複性内部波の可能性が高い。30min.以下の短時間スケール成分については、理論値よりも波速が大きい。すなわち、波長が短く貯水池の水平サイズとは独立に挙動する短波長の進行性内部波であると推定される。

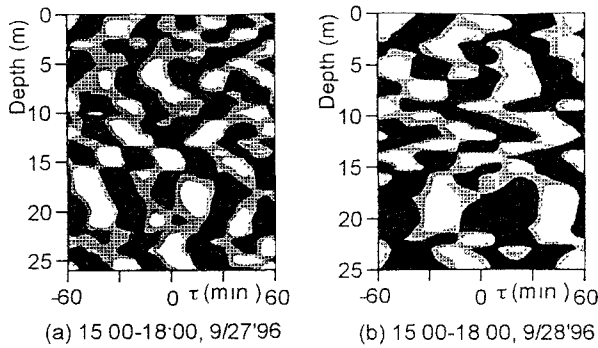


図-6 水温時系列の相互相関係数
(周期10～30min.のバンドパス・フィルター)

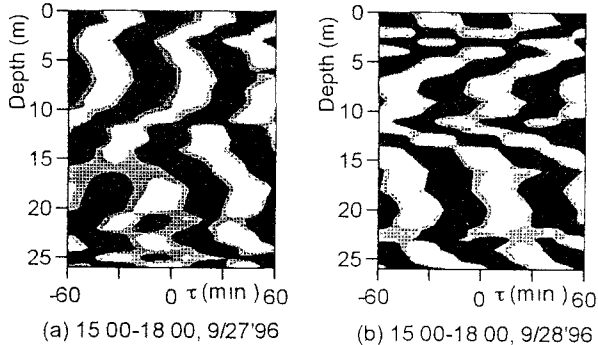


図-7 水温時系列の相互相関係数
(周期30～60min.のバンドパス・フィルター)

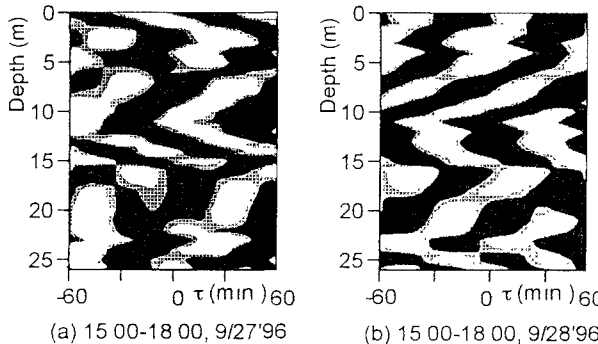


図-8 水温時系列の相互相関係数
(周期60～120min.のバンドパス・フィルター)

4. 冬季循環期における自然対流の特性

(1) 水文・気象量と水温の日変動

冬季の夜間に発生する自然対流を水温時系列から検出する。図-11～図-13には1996年11月23日～26日における気温、表面水温および水温・水温勾配の等値線を示す。

日中、日成層は発達し、表層に躍層が形成される。夕刻から早朝にかけては気温が5℃まで低下して厳し

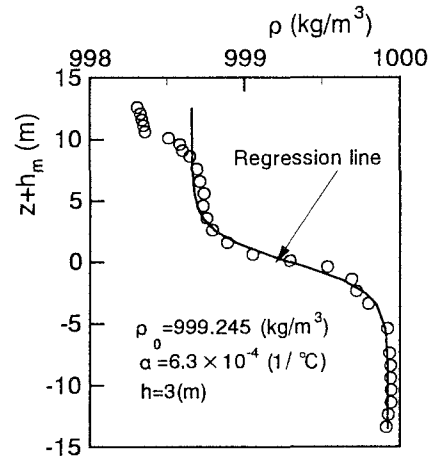


図-9 Holmboe密度モデルへのfittingの例

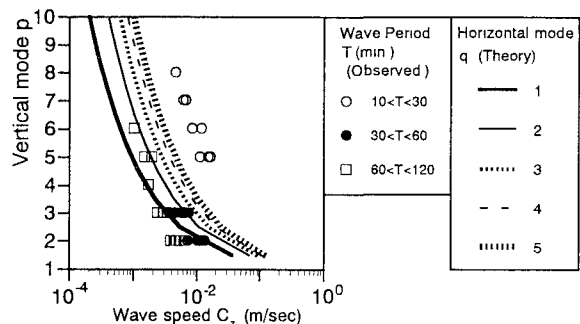


図-10 鉛直モード数 p と鉛直方向波速 C_z の
関係、Holmboe密度モデル²⁾と観測値との比較

く冷え込み、日躍層が水深12m付近の二次躍層（季節躍層）にまで低下するという連日の成層浸食が繰り返されている。

(2) 夜間冷却時に発生する自然対流の条件抽出

冷却時の水温時系列から対流速度を求めるために、VITA (Variable Interval Time Averaging) 法³⁾を適用し、熱対流サーマルを検出する。

サーマルの発生源は水面なので、水深0mでの水温変動 $\theta_0'(t)$ を検出信号とする。 $\theta_0'(t)$ を時間スケール t_a で移動平均した分散値 $\text{var}(\theta_0')$ とその長時間平均分散 $\sigma_{\theta'}^2$ との比 $V_{\theta'}(t)$ は次式で定義される。

$$V_{\theta'}(t) = \frac{\text{var}(\theta_0')}{\sigma_{\theta'}^2} \quad (4)$$

$$= \frac{1}{\sigma_{\theta'}^2} \left\{ \frac{1}{t_a} \int_{t-t_a/2}^{t+t_a/2} \theta_0'^2 ds - \left(\frac{1}{t_a} \int_{t-t_a/2}^{t+t_a/2} \theta_0' ds \right)^2 \right\}$$

式(4)の時間積分はローパスフィルターに相当し、 t_a より時間スケールの大きな変動成分を抽出する。検出関数 $D(t)$ は次式で定義される。

$$D(t) = \begin{cases} 1 & \text{if } V_{\theta'} > V_m \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (5)$$

$D(t)=1$ の場合に秩序構造—すなわちサーマルが生起

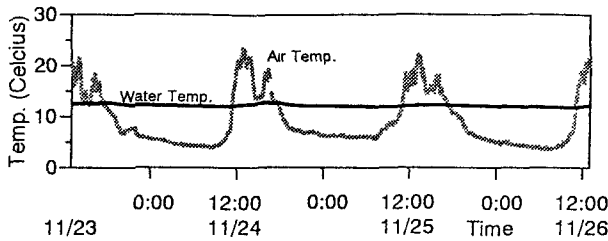


図-11 気温と表層（水深0.5m）の水温
(1996年11月23日～11月26日)

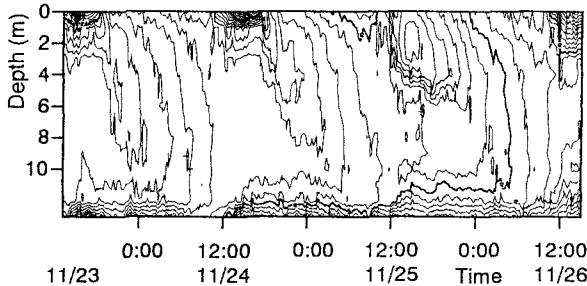


図-12 水温の等値線
(1996年11月23日～11月26日)

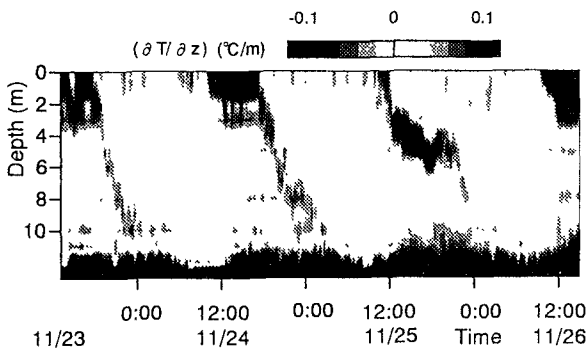


図-13 水温勾配(∂T/∂z)の等値線
(1996年11月23日～11月26日)

していると判定される。生起時間を中心に時系列をアンサンブル平均したものが抽出事象の平均時系列である。 $\theta_0'(t)$ をトリガーとして検出された水深 z における抽出事象のアンサンブル平均時系列 $\langle\theta_z'(\tau)\rangle$ は次式のように得られる。

$$\langle\theta_z'(\tau)\rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \theta_z'(t_i + \tau) \quad (6)$$

ここで、 t_i : 水面($z=0$)で事象が生起し、 $D(t)=1$ となった時刻、 N : 事象の生起回数、 $\theta_z'(t)$: 水深 z における水温変動の時系列である。

VITAでは二つのパラメーター V_m 、 t_a を決定しなければならない。このうち、閾値 V_m は抽出結果をさほど左右しない。 $V_m=0.2\sim0.8$ の範囲では、抽出時系列に大きな違いが見られなかったことから $V_m=0.6$ を採用する。

一方、観測期間における条件に基づき対流速度は

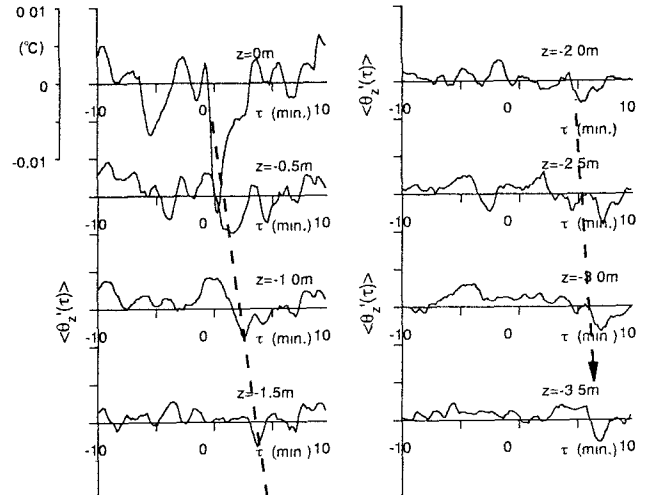


図-14 VITAによって条件抽出された各水深における水温変動 $\theta_z'(t)$ のアンサンブル平均時系列 $\langle\theta_z'(\tau)\rangle$
(1996年11月4日3:00～6:00a.m.)

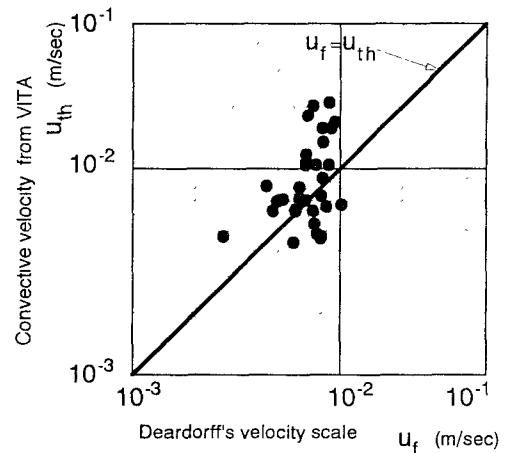


図-15 VITAによって得られたサーマルの伝播速度 u_{th} と自然対流速度のDeardorff scale, u_f の比較

おおよそ $10^{-2}\sim10^{-3}$ m/secであること、センサー間の鉛直間隔が最大1mであることから、サーマルがセンサー間を通過する時間を1～10min.と概算して $t_a=60$ sec.を採用する。

条件抽出された水温時系列の例を図-14に示す。水深0mで発生した負の水温変動ピークが図中の矢印のように下方へと伝播している。これをサーマルの鉛直移動と考えて、その位相伝播速度を求める。

一方、自然対流の速度は次式のDeardorff Scaleで与えられる。

$$u_f = (\beta g H_s h_m)^{1/3} \quad (7)$$

ここに、 β : 体積膨張係数($1/^\circ\text{C}$)、 H_s : 水面での温度フラックス($^\circ\text{Cm/sec}$)、 h_m : 表層混合層の厚さ(m)である。VITAより得られたサーマルの移動速度 u_{th} と式(7)より算定される u_f との比較を図-15に示す。ここで、式(7)の H_s は熱の移動を近似的に鉛直一次的であると考

え、観測点での水柱貯熱量の変化から算定されている。同図より、両者の相関は良好であり、水温時系列から条件抽出された水温変動が自然対流を反映していると判定される。

(3) 自然対流の速度スケールと鉛直混合量

夜間に顕著な躍層低下が観測された7つの時系列を対象にして、躍層での連行速度 $W_e = (dh_m/dt)$ を求めた。図-16は、連行係数 $E_f = W_e/u_f$ とリチャードソン数 $R_{if} = \varepsilon gh_m/u_f^2$ の関係をあらわす。観測値は $10 < R_{if} < 100$ の範囲に分布しており、 -1 乗則を支持している。ただし、観測から得られた連行係数は、その他の実験⁴⁾や数値解析⁵⁾よりもやや大きい。差異の原因として、鉛直一次元性を仮定して評価された熱フラックスの誤差、水温分布より評価される躍層密度差の誤差、などが考えられる。以上を勘案すれば、自然対流の連行量が本観測により妥当に評価されたと考えてよい。

(4) 熱輸送量

図-17は水温の鉛直一次元構造を仮定し、時々刻々の水温計測値を次式の熱保存式に代入することにより算定された乱流熱フラックス（鉛直上向きを正とする）の分布である。

$$\overline{w'\theta'} = -\int_0^z \frac{\partial T}{\partial t} dz + H_S + \kappa_T \frac{\partial T}{\partial z} \quad (7)$$

同図より、混合層厚さが0～4m程度で薄い場合には、混合層内で負の連行フラックス ($\overline{w'\theta'}/H_S \leq 0$) が見られ、低温水の連行が顕著に認められる。混合層が5～10mまで厚くなると、負の熱フラックス—すなわち連行フラックス—は減少し、混合層のほぼ全域で $\overline{w'\theta'}/H_S \geq 0$ となる。

5. むすび

エネルギー収支は成層水域の水質輸送と深い関わりをもつ。本研究では、エネルギー収支に重要な役割を果たす内部波と自然対流に着目して、水温の多点連続観測を実施した。受熱期に観測された水温時系列に相互相関解析を施すことによって内部波が抽出された。冬季循環期に観測された水温時系列に乱れの条件抽出を施すことによって、自然対流が抽出され、その速度スケールと連行量が評価された。今回は、基準点のみでの観測であったが、水平方向の複数点で同時計測を行えば、池内における内部波の伝播状況、サーマルサイフォンなど自然対流の三次元的構造を捉えることも可能となる。

水温計の製作には、岡山大学大久保賢治助教授から貴重なアドバイスを頂き、観測に際しては兵庫県姫路土木事務所のご協力を得た。記して謝意を表する。

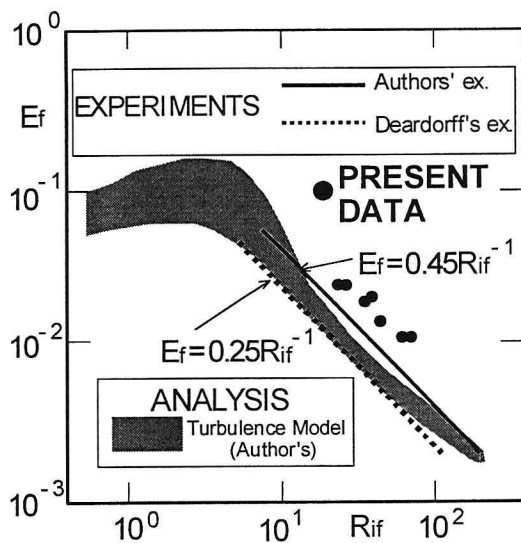


図-16 連行係数 E_f と Richardson 数 R_{if}

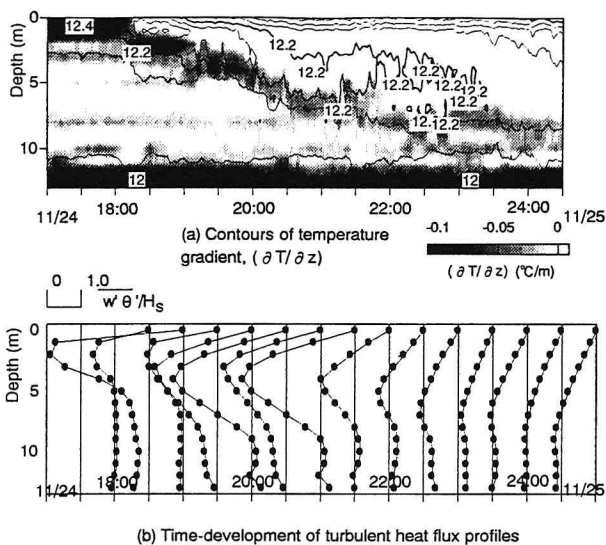


図-17 夜間冷却時における水温勾配 ($\partial T / \partial z$) と熱フラックス $\overline{w'\theta'}/H_S$ の鉛直分布の経時変化

参考文献

- 1) 道奥・神田・伊藤・西川・石川・東野：底部に逆転水温層を有する部分循環貯水池の水質構成に関する研究，土木学会論文集，第572号/Ⅱ-40，pp.33-48，1997.
- 2) 富永正英：海洋波動，共立出版，1976.
- 3) Schols, J.L.: The detection and measurement of turbulent structures in the atmospheric surface layer, *Boundary Layer Meteorology*, Vol.29, pp.139-58, 1984.
- 4) 室田・道奥：機械的擾乱と熱的擾乱が複合的に作用する水温成層場の鉛直混合量に関する研究，土木学会論文集，第369号/Ⅱ-5，pp.61-70，1986.
- 5) 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研究，土木学会論文集，第393号/Ⅱ-9，pp.67-76，1988.

(1998. 9.30受付)