

貯水池の水温成層で観測される内部波動の解析

Analysis on Internal Wave Motions Observed
in a Thermally Stratified Reservoir

神田 徹*・道奥康治**・小川修隆***・重村誠一***

By Tohru KANDA, Kohji MICHIOKU

Nobutaka OGAWA and Seiichi SHIGEMURA

Field survey of internal wave motions in a stratified reservoir was carried out to examine their dynamics under the wind action on water surface. Stochastic analysis on internal behaviors in the stratified water body was performed to find out relationship between wind shear mechanism and internal wave reaction. A theoretical consideration based on the internal wave dynamics was also made to describe the internal wave motions. The observed modal structure and stochastic properties of wave fields were successfully reproduced by our analysis.

Keywords: reservoir dynamics, internal wave, field survey

1. はしがき

密度成層場においては平均流・外部波・内部波・乱流, など大小様々なスケール・異なる力学機構を有する現象が共存し, 複雑な流動場を構成している. 湖沼・貯水池水理に関するこれまでのモデルでは, 如何に平均流と乱流をモデル化し物質輸送過程を再現するかという点に注意が払われすぎてきた. しかし, 密度成層水域では, 中間スケールを有する様々な大きさの内部波が「平均流-乱流」間のエネルギー・運動量交換を担い湖内の動力学に重要な役割を果たしている. このように内部波動が卓越する場合には, 既成の概念に基く乱流モデルは適用しない. 現時点では, 「平均流と長周期内部波」, 「乱れと短周期内部波」, の区別も明確にされていない.

著者らは, 内部波の諸特性を明らかにしその知見を流れのモデル化に反映させることを目的として, 成層型貯水池における水温変動の現地観測を行った. まず, 観測時系列に各種統計解析を施して内部波を検出し, 風応力に対する内部波の応答諸特性を考察する. 次に, 観測時の密度分布に対する内部波の理論解析を行い, 基本解から構成される内部波の級数解を求め, 貯水池で観測された内部波時系列やスペクトルとの比較・検

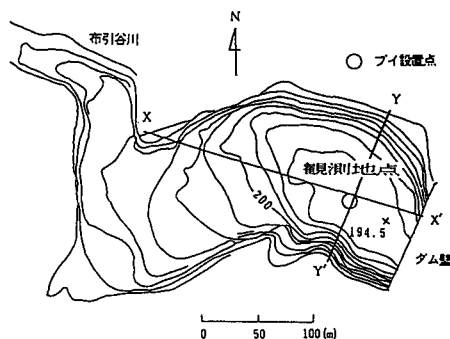
*	正会員	工博	神戸大学教授	工学部建設学科
			(〒657 神戸市灘区六甲台町 1-1)	
**	正会員	工博	神戸大学助教授	工学部建設学科
***	学生会員		神戸大学大学院工学研究科	

討を行った。観測値と理論値はモードの空間構造・振動特性などに関して良好に一致し、ここで提示した内部波解析手法が、「平均流－内部波－乱流」という階層構造の共存する密度場の流れを解析する上で有効な情報を与えることが示された。

2. 対象貯水池と観測方法

2.1 対象貯水池の概要

図－1 は研究対象とした布引貯水池の平面形状と水温計測点(図中の○印)を示す。同貯水池は、南北長170(m)、東西長350(m)、周囲長約2(km)、最大水深約16(m)、最大貯水量 $4.2 \times 10^6(\text{m}^3)$ の上水専用貯水池で、 $2.0 \times 10^4(\text{m}^3/\text{day})$ の最大給水能力を有する。また、貯水池の上流には取水堰堤が設けられ、布引谷川からの流入量を $2,000 \sim 30,000(\text{m}^3/\text{day})$ に調整し、残りの流量はバイパス水路を通して観光放流されている。



図－1 布引貯水池の平面図と観測点

2.2 現地観測の方法

1988年10月より現在まで水温と流速の連続観測を行っている。水温に関しては、(1)水温鉛直分布の観測(水深水温計により2週間に1回)、(2)表層(水深1.5m)と水温躍層部での水温の定点計測(メモリー式水温計2台による。測定間隔は45(sec))、(3)サーミスターチェーンによる多点連続計測(表－1に示す鉛直方向11点にセンサーが埋め込まれている。測定間隔は5(min))、の三種類の計測を行っている。また、二次元電磁流速計を表層部1.5(m)の水深に設置し、2(min)毎の水平流速成分を観測している。

表－1 測定センサーの設置水深

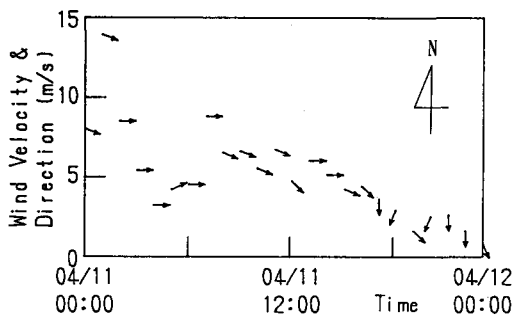
センサーNo	位置(m)	センサーNo	位置(m)
1	1.0	7	8.5
2	2.0	8	10.0
3	3.0	9	11.5
4	4.0	10	13.0
5	5.5	11	14.5
6	7.0		

3. 観測データ及び解析手法

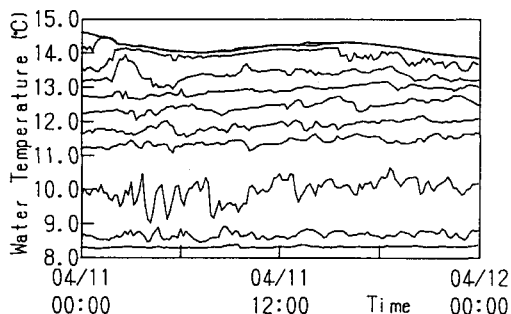
3.1 対象時系列

連続的に密度成層が発達し水温変動が大きな春先から初夏の受熱期における観測値を対象とする。内部変動の起動力となる風の特徴を調べるために、貯水池とこれより西方約2.5kmに位置する神戸海洋気象台の両地点において、2週間にわたり風向風速の比較観測を行った。その結果、特に強風時には貯水池での風向は周辺地形の影響を受けてNW方向(ほぼダム軸と直角方向)が卓越し気象台での風向と独立であること、風速の絶対値は気象台と貯水池での観測値間の相関が非常に高いこと、などが明らかとなった¹⁾。そこで、内部波動と対応させる対象風として、海洋気象台の風速データを参照とすることとし、強風時の現象に重点を置いて解析を行う。

一例として、1992年4月11日に観測された風向・風速とサーミスターチェーンで計測された水温の時系列をそれぞれ図－2, 3に示す。風応力と水温変動との有意な相関性が見られる。この時の水温鉛直分布は、図－4のようであり、表層と底層に弱い躍層



図－2 風向・風速の時系列



図－3 水温の時系列

が認められるがほぼ連続的に成層化している。

3.2 水温変動から鉛直変位への換算

水温変動から内部波の鉛直方向変位 η を算定するために式(1)を用いる。

$$\eta = T' / (\partial T / \partial z) \quad (1)$$

ここで、 T' はサーミスターチェーンの各センサーで得られた生の水温時系列とその240(min)移動平均値との水温偏差である。水温勾配($\partial T / \partial z$)は移動平均された時々刻々の水温鉛直分布より求める。この方法で得られた η の時系列を図-5に示す。風応力に対する応答特性や内部波の鉛直方向への伝播の様子が図-3の水温時系列の場合より明確にわかる。

3.3 内部波の統計解析

各センサーの計測値から求めた η の時系列について、MEMを用いてスペクトル解析を行った。図-6に示す通り、10~200(min)程度の周期を持つ各種の内部波が各水深で発生している。そこで、主要な内部波動成分と考えられる周期20~120(min)の中間周波数帯の変動成分に注目し、 η の時系列をバンドパスフィルターに通す。これより得られた η の時系列および η の瞬間鉛直分布の重ね合わせ

を 図-7に示す。

この図から、この内部波動は水深 10m付近に節のあるモード構造を有していることがわかる。

次に、異なるフィルター幅に対して求めた振

幅強度 $\sqrt{\eta'^2}$ の鉛直分布を図-8

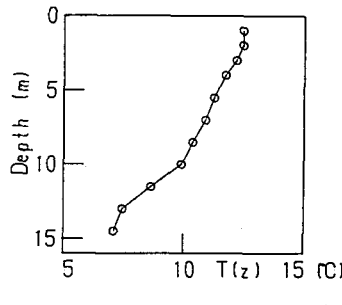


図-4 水温の鉛直分布

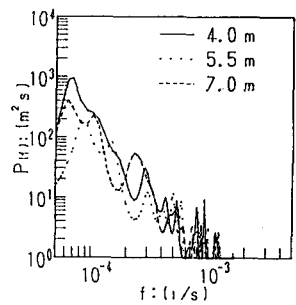
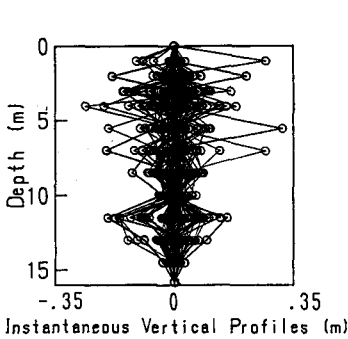
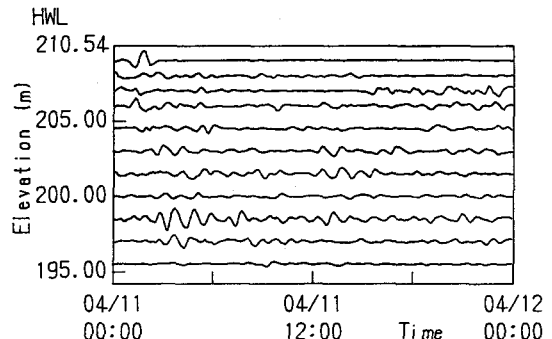


図-6 鉛直変位のスペクトル



(a)



(b) (1992.4.11 周期 20<T<120)

図-7 (a) η の瞬間鉛直分布の重ね合わせと

(b)バンドパスフィルターを通した η の時系列

に示す。周期20~120(min)の波数帯に対する分布(図中太実線)は上述のモード構造を表している。周期40~80(min)の波数帯(破線)では水深 5.5(m)と10(m)に節があらわれ、周期 20~120(min)の場合より高次の鉛直モードが検出されている。周期 20~40(min)の波数(細線)では節の数がさらに増え、より高次のモードが見られる。このように、内部波の周波数帯と鉛直方向のモード構造には何らかの相関性があることが認められ、内部変動は以上のような特性を持つ各モードの階層構造から構成されていると考えられる。次に、任意の密度分布を有する場での内部波に関する理論解析を行い、上に示した観測時系列特性との比較を行う。

4. 内部波の理論解析

4.1 内部波の基礎式²⁾

線型化された内部波の基本方程式は流れ関数 ϕ を用いて次のように表わされる。

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2}(\nabla^2 \phi - \frac{N^2}{g} \phi_z) + N^2 \phi_{xx} = 0 \quad (2)$$

$$(\nabla^2 = \partial^2 / \partial x^2 + \partial^2 / \partial z^2, \phi_{xx} = \partial^2 / \partial x^2, \phi_z = \partial / \partial z)$$

ここで、 $N = \sqrt{-g(\partial \rho_0 / \partial z) / \rho_0}$ は密度分布 $\rho_0(z)$ に対する浮力振動数である。流速各成分は、 $u = -\partial \phi / \partial z, w = \partial \phi / \partial x$ 、で与えられる。 ϕ の特解として次式を仮定する。

$$\phi(x, z, t) = \frac{1}{\sqrt{\rho_0}} X(z) \exp[i(kx - \sigma t)] \quad (3)$$

ここで、 k : 水平方向波数、 σ : 角周波数である。式(3)を式(2)に代入して、 $X(z)$ に関する方程式を得る。

$$\frac{d^2 X}{dz^2} + k^2 \left(\frac{N^2}{\sigma^2} - 1 \right) X = 0 \quad (4)$$

4.2 境界条件

図-9のような密度分布 $\rho_0(z)$ をもつ水域の内部波を考える。境界条件は次のようである。

$$w=0 \text{ or } X(z)=0 \quad \text{at } z=H(\text{水面}) \text{ and } z=0(\text{水底}) \quad (5)$$

観測点がダム壁近傍であることから、波動を完全重複波と仮定する。水域の水平長を L とすれば、 $x=0, L$ において $u=0$ であることより、波数は、 $k=m\pi/L$ ($m=1, 2, \dots$)で与えられる。ここに、 m は水平方向のmode数である。 k と密度分布 $\rho_0(z)$ (あるいは $N^2(z)$)が与えられると式(4)より固有値 σ とこれに対する固有解 $X(z)$ を得る。

4.3 固有値と固有解

ある水平モード m (波数 $k_m=m\pi/L$)に対する式(4)を満足する σ の固有値を σ_{mn} ($n=1, 2, \dots$)とおく。ここで、 n は周波数モードである。固有値問題を数値的に解くために、式(4)を次のように離散化する。

$$\frac{X_{j+1} - 2X_j + X_{j-1}}{\Delta z^2} + k_m^2 \left(\frac{N_{mn}^2}{\sigma_{mn}^2} - 1 \right) X_j = 0 \quad (6)$$

ここで、図-9のように深さ方向を J 個の層に分割し、 $\Delta z=H/J$ 、 $X_j=z=(j-1)\Delta z$ における $X(z)$ の値($j=1, 2, \dots, J+1$)とする。境界条件式(5)より、 $X_1=X_{J+1}=0$ 。よって、式(6)は、 $X_2 \sim X_J$ を未知数とする $(J-1)$ 元連立方程式となる。式(6)を変形し行列表示すると

$$([A]_{J-1} - \sigma_{mn}^{-2}) [X]_{J-1} = 0 \quad (7)$$

となる。ここで、 $[A]_{J-1}$: 式(7)の係数行列、 $[X]_{J-1}$: 未知数 X_j の行列、 σ_{mn} : 角周波数、である。まず、行列式 $|A_{J-1} - \sigma_{mn}^{-2}| = 0$ の解として σ_{mn} ($n=1, 2, \dots, (J-1)$)を求め、次に、各々の σ_{mn} に対して、式(6)を式(5)の境界条件のもとに解けば、 (m, n) モードに対する固有解、 $X_{mn}(z)$ を得る。これを用いて ϕ の基本解 ϕ_{mn} が次のように得られる。

$$\phi_{mn}(x, z, t) = \frac{1}{\sqrt{\rho_0}} X_{mn}(z) \sin(k_m x) \sin(\sigma_{mn} t) \quad (8)$$

これらをモード (m, n) に関して線形的に重ね合わせることによって ϕ の一般解が次式のように得られる。

$$\phi(x, z, t) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^{J-1} \frac{C_{mn}}{\sqrt{\rho_0}} X_{mn}(z) \sin(k_m x) \sin(\sigma_{mn} t) \quad (9)$$

ここで、 C_{mn} は基本解 ϕ_{mn} に対する係数である。鉛直流速は、運動学的条件の第1近似をとれば、

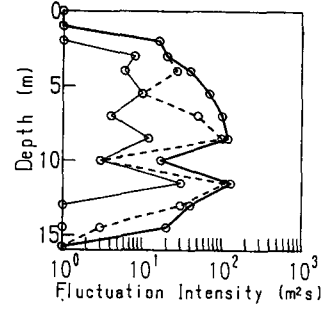


図-8 各波数帯に対する振幅強度分布
(20-120(min):太線, 40-80(min):破線,
20-40(min):細線)

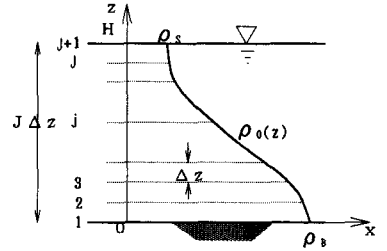


図-9 連続成層系の模式図

$w=(\partial \eta / \partial t)$ となるから、上式より η の解が次のように求まる。

$$\eta(x, z, t) = - \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^{J-1} \frac{C_{mn} k_m}{\sqrt{\rho_0 \sigma_{mn}}} X_{mn}(z) \cos(m \pi x / L) \cos(\sigma_{mn} t) \tag{10}$$

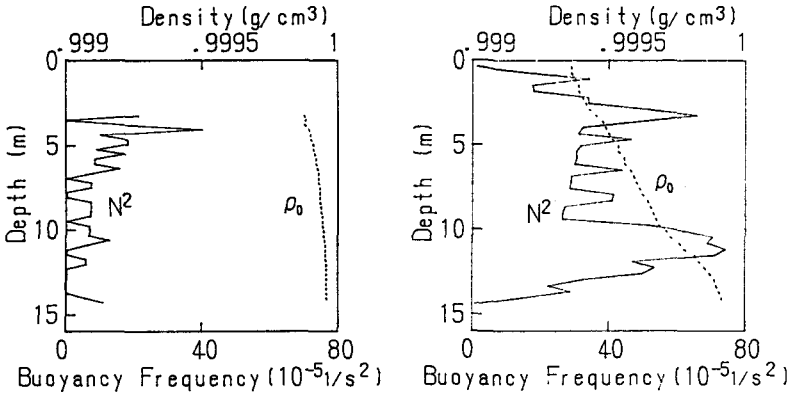
ある点 (x_1, z_1) で観測された鉛直変位時系列 $\eta_o(x_1, z_1, t)$ を時間についてFourier積分すると、上式より係数 C_{mn} が次のように決定される。

$$C_{mn} = - \frac{2 \sqrt{\rho_0 \sigma_{mn}}}{k_m X_{mn}(z_1) \cos(k_m x_1)} \cdot \frac{1}{T} \sum_{t=0}^T [\eta_o(x_1, z_1, t) \cos(\sigma_{mn} t) \Delta t] \tag{11}$$

ここで T は十分長い観測時間である。式(11)で与えられる C_{mn} を用いて式(9)、(10)から、任意の場所における流速・鉛直変位・水温変動の理論解を得ることができる。

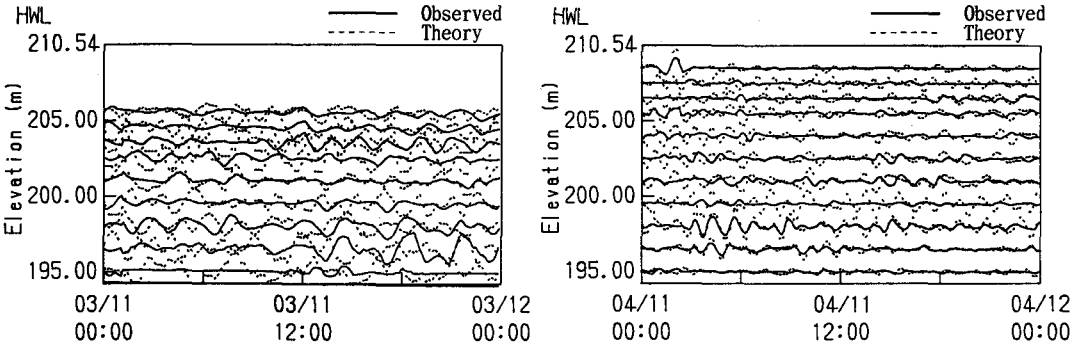
今回の解析の対象と

した 1992. 3. 11および
1992. 4. 11の 24時間の
平均密度 $\rho_o(z)$ 、浮力
振動数 $N(z)$ の鉛直分布
を図-10に示す。 η -
時系列の観測値と 式
(10)による理論値との
比較を図-11に示す。
ここで、4月11日のデ
ータに関しては水面よ
り1.9, 10番目のセンサ
ーで得られた観測時系
列 η_o をパイロット時
系列として、式(11)よ

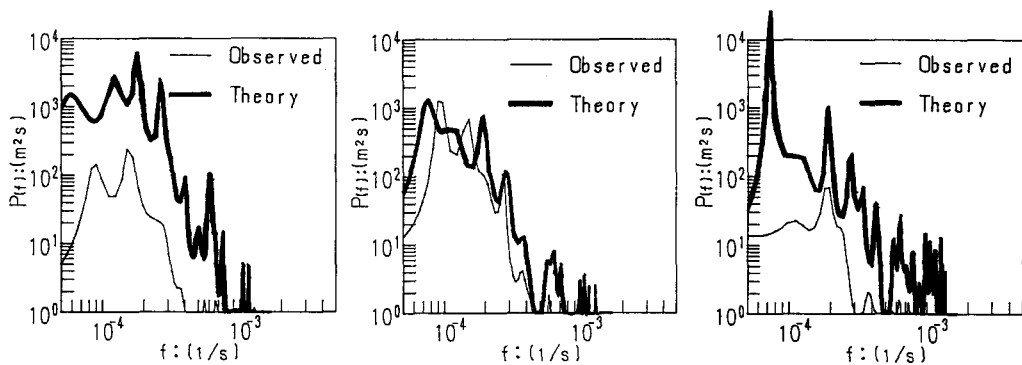


(a) 1992年3月11日 (b) 1992年4月11日
図-10 解析対象期間の平均密度と浮力振動数の2乗の鉛直分布

り係数 C_{mn} を決定した。3月11日の時系列に関しては第5番目のセンサーの観測値をパイロット時系列 η_o として C_{mn} を求め、理論解を得た。理論解は時間方向、水深方向の内部変動特性に関して観測値を良好に再現している。さらに、内部波の周波数特性を理論的に確認するために、各点での η のスペクトルを観測値、理論値に関して求めた。その数例を図-12、13に示す。理論値は観測値よりやや大きめのエネルギーを与えているが、周波数特性を概ね良好に再現しているといえる。

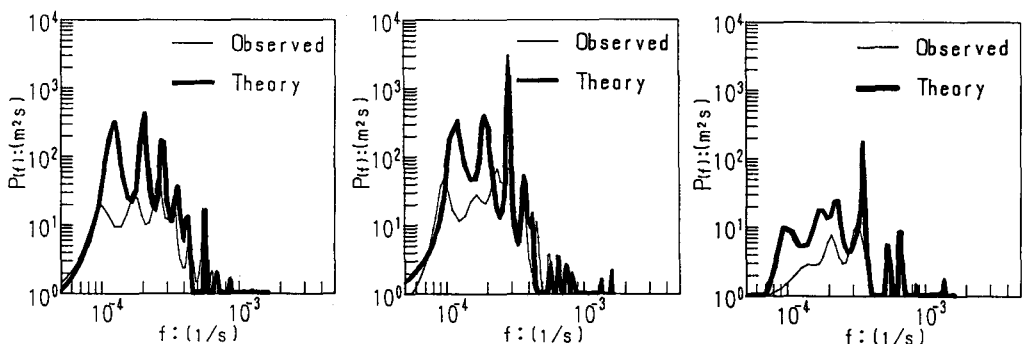


(a) 1992年3月11日 (b) 1992年4月11日
図-11 内部波の鉛直変位 η の時系列に関する理論値と観測値との比較



(a) 水深4.0(m) (b) 水深8.5(m) (c) 水深11.5(m)

図-12 η の周波数スペクトルに関する理論値と観測値との比較(1992年3月11日)



(d) 水深4.0(m) (e) 水深8.5(m) (f) 水深14.5(m)

図-13 η の周波数スペクトルに関する理論値と観測値との比較(1992年4月11日)

5. むすび

成層期の貯水池で観測された内部波の統計的特性を明らかにした。その結果、内部波の周波数帯と鉛直方向のモード構造にはかなり高い相関性が認められた。観測結果に基づいて内部波の理論解析を行い、内部波の空間構造・時系列特性・スペクトル特性などに関する理論値と観測値との比較を行った。本解析は自由振動重複波に限定したが、理論値は観測値をほぼ良好に再現している。今後は部分重複波・進行波さらに強制波を考慮して解析を進展させ、風応力にもなう内部波動の応答特性を検討する予定である。内部波の理論的記述を組み入れた流れのモデルを構築すれば、密度成層水域における諸現象の再現精度が向上するものと考えられる。

本観測にあたり神戸市水道局奥平野浄水管理事務所の関係各位のご協力を得た。研究の遂行に際し、平成4年度文部省科学研究費補助金試験研究(B)(1)(代表者：神戸大学 神田徹)の援助を受けた。本学前田浩之技官には調査・解析に協力頂いた。以上、記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 神田・道奥・重村：貯水池表層の流速変動特性に関する観測調査，土木学会第47回年次学術講演会，1992。
- 2) 富永正英：海洋波動，共立出版，pp.528-536，1976。