

ダム貯水池の内部静振と定常的往復流のメカニズムに関する研究

A STUDY ON INTERNAL SEICHE AND STEADY OSCILLATING CURRENT IN A RESERVOIR

横山勝英¹・新谷哲也²

Katsuhide YOKOYAMA, Tetsuya SHINTANI

¹ 正会員 博(工) 首都大学東京准教授 都市環境学部都市環境学科都市基盤環境コース (〒192-0397 八王子市南大沢 1-1)

² 正会員 修(工) 首都大学東京助手 都市環境学部都市環境学科都市基盤環境コース (〒192-0397 八王子市南大沢 1-1)

A field measurement of an internal seiche induced current was undertaken in the Shichigasyuku reservoir. The vertical temperature profiles were monitored at seven stations; further, the current profile was obtained using bottom-mounted ADCP in the period between May to November, 2004. The period of thermocline oscillations matched the theoretical period of the internal seiche. The reciprocating motion of the water current was explained by the righting movement of the inclined water body. The reciprocating current was moved to upper layer. The 3-D numerical simulation explained that the wave motion occur when the lower water run up the sloping bottom that becomes narrow in upstream. The stationary reciprocating current reached 0.2 m/s during spring and 0.05 m/s during summer, and the cumulative transport distance of water particles over one week reached 6000 m during spring and 1000 m during summer. It is considered that the seiche-induced stationary current influences the circulation of the reservoir water.

Key Words: Field measurement, Internal seiche, sloping bottom

1. はじめに

大都市圏の周辺に建設された大型ダム貯水池は水道水源としての役割を担うことが多いが、近年は安全で美味しい水道水が求められる傾向が強く、貯水池の水質を良好に保つことが重要視されている。貯水池では水温密度構造や流れによって溶存酸素や栄養塩、懸濁土砂の動きが規定されるため、水質を制御するためには流入水質の改善だけではなく、貯水池内の密度構造や流動を制御する必要がある。

自然要因による流動現象としては吹送流¹⁾や濁水の貫入流動²⁾³⁾などがあり、人工的な強制流動としては曝気循環⁴⁾や選択取水⁵⁾、分画フェンスによる流入水の深層誘導⁶⁾などが挙げられ、それぞれ室内実験や現地観測に基づく詳細な研究が実施されている。

一方、琵琶湖⁷⁾や猪苗代湖⁸⁾などの大規模湖沼では内部静振とコリオリ力による循環流の存在が明らかにされているが、日本のダム貯水池は規模が小さいため

に定常的な流れの存在についてはほとんど着目されていない。内部静振等の傾圧運動に伴う流動は吹送流に比べて微少であるが、長期間継続するために貯水池内の濁質・栄養塩の水平方向輸送に深く関わっている。そこで本研究では、ダム貯水池において水温分布と流動に関する現地観測を行い、強風作用後に発生する内部静振を駆動力とした定常的な流れの存在を明らかにするとともにその流動メカニズムを検討し、物質循環に影響を及ぼすような有意な流れであるかどうかについて考察した。

2. 観測方法

研究対象地は宮城県南部の七ヶ宿ダム貯水池である。七ヶ宿ダムは1989年に湛水を開始した多目的ダムであり、仙台市及び周辺地域への重要な水道水源ともなっている。総貯水容量は約1億m³、最大水深は55m、湛水面積は4.1km²であり、常時表層放流が行われている。

流域人口は約 2,000 人と少なく下水道も整備されていることから流入水の栄養塩濃度は低く、貯水池は中栄養状態で維持されている。しかし、1995 年頃から淡水赤潮の発生が見られるようになり、水質管理上の課題となっている。

観測項目は水温鉛直分布と流速鉛直分布であり、図-1 に示す地点に測定機器を設置した。貯水池の水面形状は直線的で比較的単純であるが、湖盆は図-2 に示すように旧河道の澁筋と旧河岸段丘の浅瀬から構成された複断面形状をしている。そのため、地形的な特徴を考慮してサーミスターチェーンを澁筋に 4 点、浅瀬に 3 点設置し、超音波流速計を湖心部に設置した。水温計は Onset 製 Tidbit (精度 0.2 度) を使用し、これらをロープに 2.5 ~ 5m 間隔で取り付けたサーミスターチェーンを 7 本作成した。水温計の使用数は 69 個であり、10 分間隔で計測した。超音波流速計は RDI 製 WH-ADCP600kHz を用い、層厚 0.4m、精度 0.8mm/s に設定して 20 分間隔で計測した。超音波流速計は湖底から上方を計測するように設置したが、湖底と表層のそれぞれ 3.5m が不感帯となった。観測期間は 2004 年 5 月 15 日から 11 月 25 日までの約 6ヶ月間であるが、計測上のトラブルにより全てのデータセットが揃って得られたのは 3.5ヶ月分であった。

3. 水温変動と静振

図-3 に春期 (5 月) の風速と水温分布状況を、図-4 に夏期 (8 月) の状況を示す。七ヶ宿ダム貯水池では湖面の長軸方向に卓越風が吹くため、長軸に沿った方向

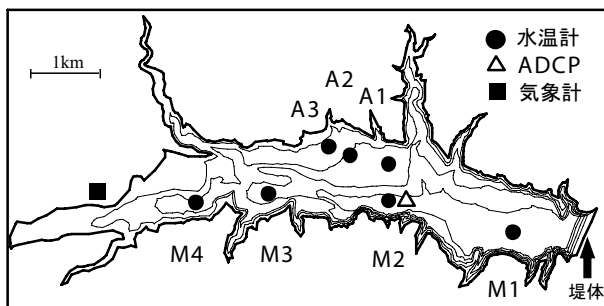


図-1 測定機器設置地点

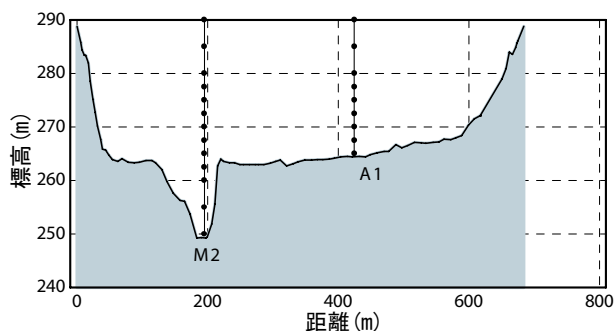


図-2 複断面形状 (湖心付近の横断面図)

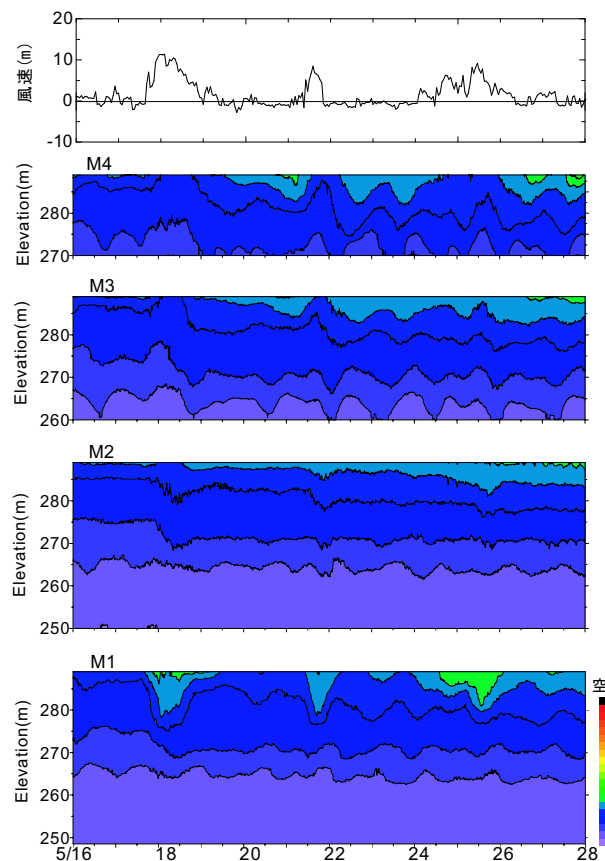


図-3 春期 (5 月) の風速と水温分布

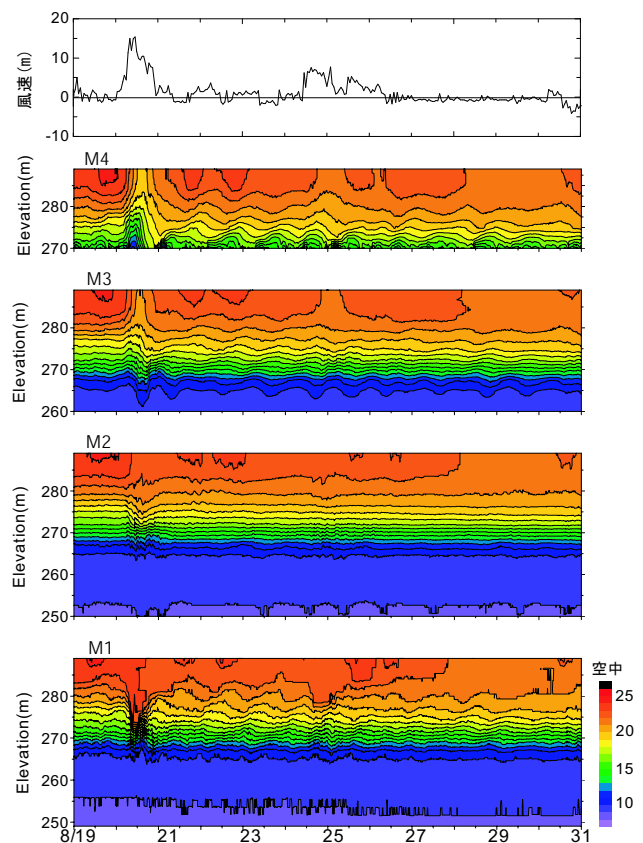


図-4 夏期 (8 月) の風速と水温分布

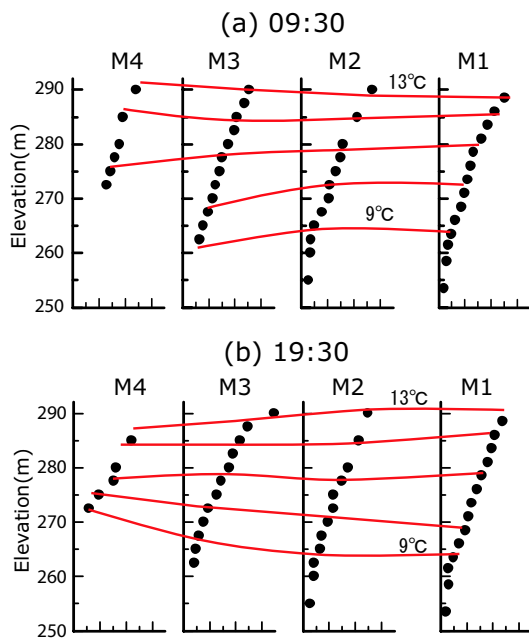


図-5 水温縦断分布図

で風の強さを示し、上流から堤体に向かって順方向と定義する。また、図中の空中部分（黒）は、水位変動を示すために描いてある。春期（図-3）は湖底が8度、表層が13度であり弱い連続成層となっている。5月18日、21日、25日にそれぞれ風速8m以上の順風が吹いており、それによって水温が大きく変動している。5月17日から19日にかけての強風時には、貯水池上流部のM3とM4において等温線が上昇し、中・下層水が表層に持ち上がるような挙動をしており、その後等温線に周期的な振動が発生している。貯水池中央部のM2では成層構造の変動は見られず、下流のM1では上流とは逆に温水が表層に現れる。

夏期（図-4）は表層が25度に達して成層が強化されているため、風に起因する成層構造の振動は春期ほどには顕著ではない。しかし、風速15mを越える風が吹いた8月20日には上流のM4において水深13m（標高275m）に存在した水温20度の水が表面に持ち上がり、下流のM1では表層水が水深13mまで潜り込む現象が見られ、風に起因するダイナミックな運動が発生していることが伺える。

水温成層の空間的な振動の一例として、図-5に5月27日の水温縦断分布図を示す。9:30には上層では等値面が上流側（M4）で2mほど高く、9度～10度の下層水が上流部（M3）で潜り込んでいる。一方、12時間後の19:30には逆に上層の等値面が上流側で3mほど下がり、下層水が上流側で湧き上がっており、等値面の上昇高さは12mにも及んでいる。

水温躍層付近に存在する等温線の上下変動をスペクトル解析すると図-6が得られた。等温線の変動周期は5月には28時間と18.7時間が、8月には24時間と14時間

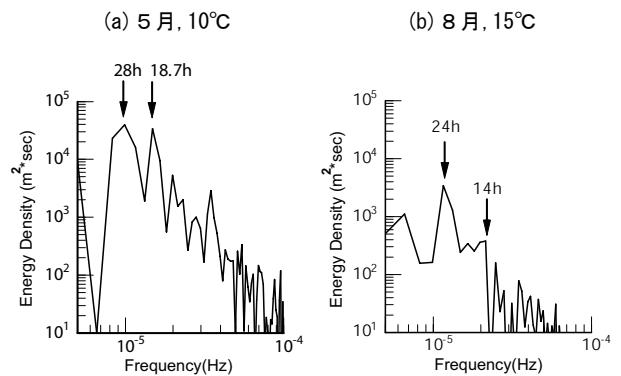


図-6 等温線のスペクトル解析結果

表-1 静振周期の理論計算

基本振動数（Brunt-Vaisala frequency） N

$$N^2 = -\frac{g}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z}$$

角振動数 ω （水平方向波数 k ，鉛直方向波数 m ）

$$\omega = N \sqrt{\frac{k^2}{k^2 + m^2}}$$

水平・鉛直方向波数 k, m （水平・鉛直方向波長 L_x, L_z ）

$$k = \frac{2\pi}{L_x}, \quad m = \frac{2\pi}{L_z}$$

周期 T

$$T = \frac{2\pi}{\omega}$$

表-2 成層の振動モードと周期

	5 月		8 月	
水平モード	1 次	1 次	1 次	1 次
L_x (m)	3400	3400	3400	3400
k	0.0009	0.0009	0.0009	0.0009
鉛直モード	1 次	2 次	2 次	3 次
L_z (m)	30	30	30	30
m	0.1047	0.2093	0.2093	0.314
ω	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
T (hour)	18.2	36.4	15.7	23.6

間が卓越していた。一方、連続成層場における内部静振の理論的な周期は表-1のように表される。これらの式に各季節の成層状態に関する値を代入すると表-2が得られた。この表において、基本振動数を計算する際には、5月、8月共に表層と底層における水温を直線的に結んだ温度分布（連続成層）を仮定して計算を行った。

成層の振動周期は長軸方向の内部静振で概ね説明され、鉛直方向に見ると5月は1次モード（2層状態）、8月は2次モード（3層状態）と3次モード（4層状態）の2つで運動していると言える。なお、5月のスペクトルでは28時間周期が卓越しているが、これは内部静振では説明が付かない。そこで、長軸方向の風速についてスペクトル解析を行うと、12時間周期が卓越していた。これは昼間に風が強く、朝夕は弱くなる状態を表しており、風によって誘起される吹送流の周期と内部静振の理論周期が一致しないために生じた現象ではないかと推測される。8月は風の周期と静振の周期が一致しているため、日周変動成分が最も強く表れている。ま

た、短軸方向には静振が発達していないことが分かった。これは山間の貯水池では谷筋方向に卓越風が吹くためである。

4．静振と流動

図-7 に湖心部 (M2) における 5 月の流速分布図を、図-8 に 8 月の流速分布を示す。5 月 18 日と 21 日、8 月 20 日には強い順風が吹き、水面下 5m までは吹送流が発達し、それよりも深い場所で補償流として強い逆流が生じている。さらにその後、周期的な往復流が発生している。5 月は 100mm/s 程度の往復流が、8 月は 50mm/s 程度の流れが見られる。また、標高 267m から湖底にかけては単純な往復流であるが、それよりも上部の連続成層場では、正負の流速 (赤色と青色) の分布が、下層部分の様に鉛直方向に一様ではなく、時間と共に上方に伝搬するような波動性の現象が見られる。

図-9 に残差流と水温の鉛直分布を示す。残差流の平均期間は静振周期の 2 倍にとり、5 月は 36 時間、8 月は 48 時間とした。5 月は水温は連続的であるが流速場は 2 ないし 3 成層ようになっており、上層も下層も堤体側に向かう残差流が現れている。8 月の流速場は 4 成層をなしており、残差流は弱いながらも堤体側に向かっている。

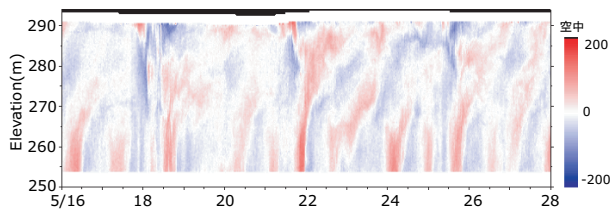


図-7 5月の鉛直流速分布 (mm/s)

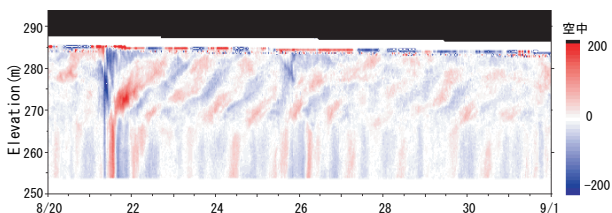


図-8 8月の鉛直流速分布 (mm/s)

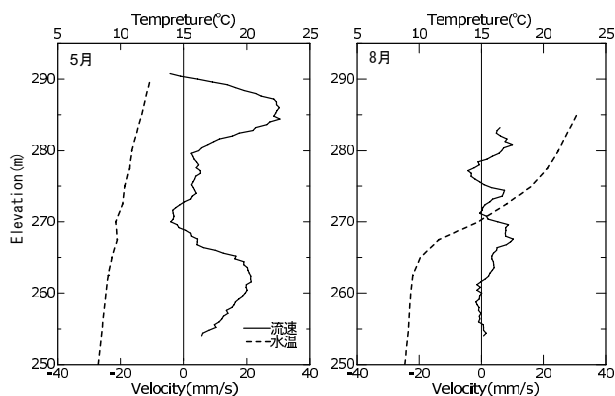


図-9 残差流と水温の鉛直分布

まず、底層の流速について検討を進める。上流 (M3) と下流 (M1) の水温躍層の傾きと湖心部の流速の関係を図-10 に示す。水温躍層の傾きは躍層下端に位置する水温 10 度の標高差で表し、上流が持ち上がった場合をプラスで表現している。両者の運動の周期性は非常に良く似ており、流速変動をスペクトル解析すると図-6 で示した成層振動の周期と完全に一致していた。

躍層の傾きと流速の相互相関を調べたところ、5 月は 4.67 時間のラグで相関が最大となり、8 月は 6.67 時間であった。これは内部静振のモードを 5 月は 1 次、8 月は 3 次とした場合の振動周期や流速周期の約 4 分の 1 に相当する。したがって、躍層が最も傾いたときに流れが停止し、水平な時に流速が最大になっており、底層水の運動が内部静振によって引き起こされていることが示された。

また、躍層の振幅について調べたところ (図-12)、上流では下流の 3.6 倍大きくなっていた。この原因は、貯水地形状にあると考えられる。すなわち、七ヶ宿貯水池はダム堤体から上流に向かって断面積が減少しており、上流では約 4 分の 1 に狭まっている。上流側と下流側に移動する下層水のフラックスが同等であると考え、断面積と振幅は逆比例の関係にあり、上流ほど振幅が大きくなるものと考えられる。上流側において断面積が減少し、さらに緩斜面となっていることにより、静振の運動は左右非対称になる。

次に、躍層よりも上部における流速変動について考察する。矩形水槽における内部静振は節の水深が固定されるため、流速変動は 8 月 (図-8) の下層のような単純な往復流しか現れないはずであるが、実際には表面に向かって上ってゆくような流速場が発生している。これは水塊が上昇しているのではなく、波の腹と節が徐々に上方に伝搬している様子を表している。そこで、このような波動の伝搬が湖底形状の影響を受けた静振の非対称性によって生じていると考え、次に数値実験を行う。

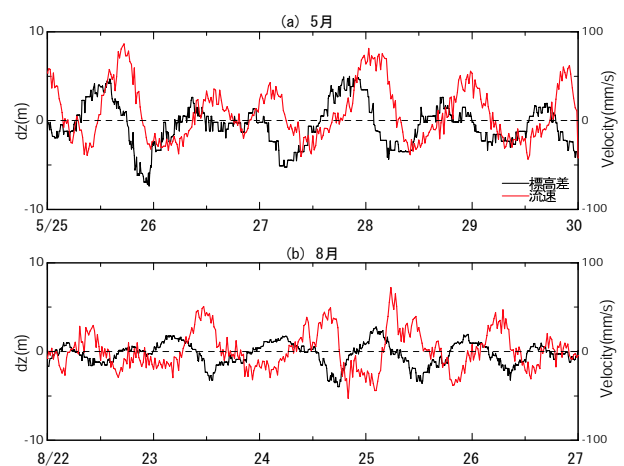


図-10 水温成層の傾きと湖心部流速

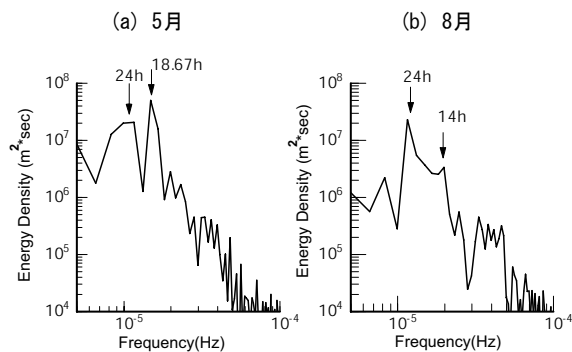


図-11 流速変動のスペクトル

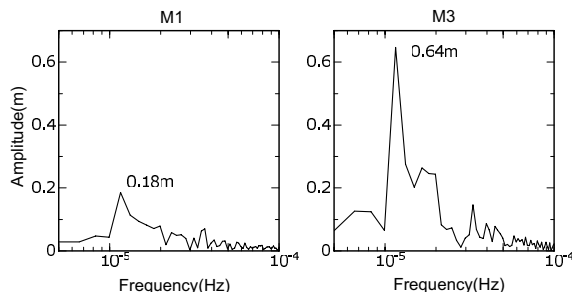


図-12 M1 と M3 における等温線 11 のスペクトル

5. 数値実験

数値モデルは新谷ら⁹⁾が密度成層場の水槽実験用に開発したものをを用いる。基礎方程式は連続式，3次元Navier-Stokes式，密度の輸送方程式であり，デカルト座標スタagger格子上で離散化した。数値解法にはFractional-Step法を用い，支配方程式の移流項の差分には有理関数CIP法を用いている。また，圧力補正值に関するPoisson方程式の解法には残差切除法を用いた。

このモデルを用いて，通常の矩形水路と貯水地形状を模擬した斜面水路において内部静振の運動の違いを検証する。矩形水域の大きさは長さ120cm(x)，幅30cm(y)，深さ30cm(z)とした。また，斜面水路では片側に上流断面積が勾配1/3で線形的に縮小してゆくV字谷を設けた。

成層構造は，深さ15cm以下が一定密度(1004kg/m^3)，上層は水面に向かって密度が線形的に減少する連続成層とし，成層内の最大密度差は 4.0kg/m^3 とした。水域内に内部静振を引き起こすために成層を静止状態で15度ほど水平から傾かせて計算を開始した。なお，躍層の変動モードを確認することを目的としているため，乱流モデルは用いていない。

湖心部分($x=60\text{cm}$, $y=15\text{cm}$)における流速の計算結果を図-13に示す。矩形水路(a)では水深15cmの躍層を境にした単純な往復流しか発生しておらず，理論的な内部静振の運動を表現出来ている。一方，斜面水路(b)では現地観測で見られたような上方に流速が伝搬してゆく様子が捉えられている。

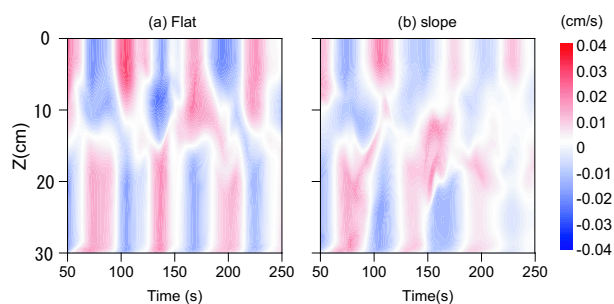


図-13 湖心部の鉛直流速分布（数値実験結果）

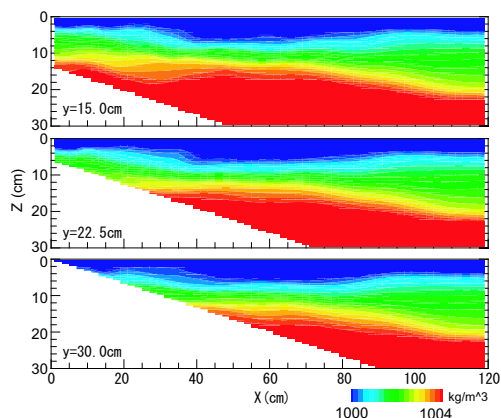


図-14 3次元密度変動状況（数値実験結果）

図-14は斜面水路における密度成層場の変動状況を $y=15\text{cm}$ （中央）， $y=22.5\text{cm}$ ， $y=30\text{cm}$ （側面）の鉛直断面で示している。中央断面における密度分布から，上流側($x=0\text{cm}$)のV字谷斜面において下層水が湧昇し，躍層上部の成層構造に影響を及ぼしている様子が見取れる。これらの結果は，現地観測で得られた特徴的な流動現象の原因が斜面の存在で生じた可能性を示しており，湖底に存在する斜面地形と内部波（内部静振）の干渉及び斜面の存在による断面積の縮小が湖内の流動に顕著な影響を及ぼしていることが明らかとなった。

6. 水塊の移動量

貯水池の流れが物質輸送に及ぼす影響を考察するために，湖心部(M2)の水塊の移動距離を調べた。図-15は5月と8月の上層(EL.280)中層(EL.270)下層(EL.260)の累積移動距離を示している。これより，5月は上層では正味の移動量がわずかにプラスであるが，これは期間の取り方によって異なるため，有意な移動があるとは言いきれない。しかし，中層と下層では明らかにダム堤体に向かう流れが卓越しており，中層では1週間で1,500m，下層では6,000mの移動が見られた。湖心部は標高267m以深が狭窄部となっているため，下層での移動が顕著になったものと考えられる。8月も同様の傾向であるが，中下層では1日に500～800mずつ振動して，一週間で堤体方向に1,000～2,000mの移動

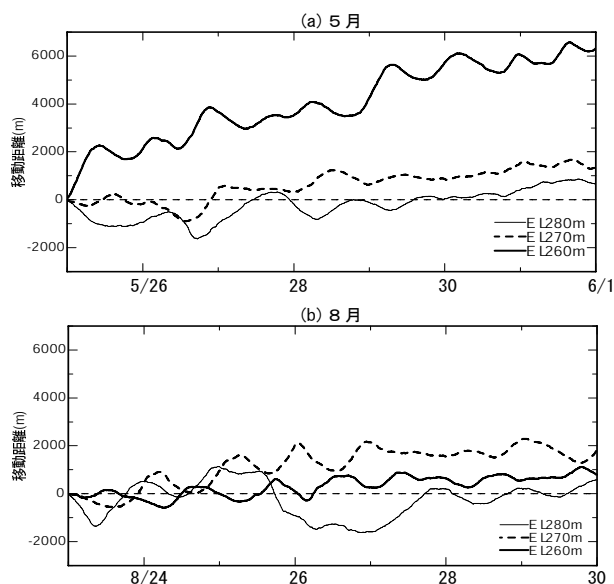


図-15 5月と8月の累積移動距離

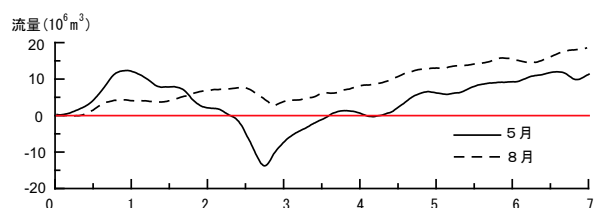


図-16 断面通算流量 (a) 5月, (b) 8月

があるものと推定された。湖心から堤体までの距離は約1.5kmであるから、活発な輸送が生じていると言える。次に、湖心部の流速鉛直分布が貯水池の横断方向にも均一に分布していると仮定して断面通過流量を算定したところ、図-16が得られた。一週間で1000～1500万 m^3 の順流が生じている結果となった。しかし、河川水の流入量と貯水池放流量は、5月が554万 m^3 , 698万 m^3 , 8月が278万 m^3 , 367万 m^3 であり、推定された断面通過流量とかけ離れている。したがって、横断方向に流速が均一とした仮定が間違っており、実際には流速の横断分布があると見るべきである。断面通過流量の推定値が実際の値の2倍以上であることや、図-16の累積移動量が貯水池の湛水延長(4000m)の半分程度にも及ぶことから、湖心部の流速が全体に及んでいるのではなく、水平循環流が生じている可能性が高い。この水平循環流発生は、本貯水池の湖盆形状が長軸方向に湾筋(深部)と河岸段丘(浅瀬)を持つ複断面を形成していることが一要因であると予想される。

7. まとめ

本研究では、七ヶ宿ダム貯水池を対象として水温と流速の現地観測を行い、内部静振によって日常的に生じる流動現象が貯水池内の物質循環に寄与する可能性について検討した。まず、多点水温観測の結果から、貯

水池内には内部静振が長期にわたって継続していることが確認できた。また、等温線の変動解析結果から成層変位の非対称性が明らかとなり、成層運動が斜面から構成される湖底地形の影響を強く受けることが明らかとなった。ADCPによる流動観測の結果からは、最大約200mm/sの水平流速が湖心において生じることが明らかとなった。また、流速の鉛直分布の時系列から、上方へ内部波運動が伝播していると予想される現象を見つけることができた。この結果の原因を究明するために、湖底形状を模擬した水路の3次元数値解析を行った。その結果、斜面形状の湖底地形が湖内の流動を大きく変化させる効果を持つことが明らかとなった。最後に、ADCPの結果から水塊の累積移動距離と断面通算流量を算出した。累積移動距離からは、湾筋に沿って堤体に向かう活発な水平輸送が確認され、内部静振による定常的な流れが物質輸送に影響を及ぼす可能性があることがわかった。また、断面通算流量の推定値は、実際の貯水池の流入量と一致せず、貯水池内に水平循環流が存在することを示唆する結果となった。

謝辞 本研究を実施するにあたり東京工業大学大学院石川忠晴教授には多くの助言及び協力をいただいた。現地観測の際には七ヶ宿ダム管理所、アレック電子(株)三木聖彦氏に多大なるご助力をいただいた。首都大学東京都市基盤環境コース水工学研究室の学生諸氏にはデータ整理及び作図を協力していただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 矢島啓, 道上正則, 檜谷治, 宇田康弘: 浅い汽水湖における密度成層破壊の数値解析, 水工学論文集, 第44巻, pp.993-998, 2000
- 2) 福岡捷二, 福島祐介, 村田和夫, 荒井健: 成層化した二次元貯水池に流入する密度流の実験的研究, 土木学会論文集, No.293, pp.65-77, 1980
- 3) 梅田信, 横山勝英, 石川忠晴, 銭新, 高橋迪夫: 七ヶ宿貯水池における濁質の流入・流動・堆積過程に関する観測と数値シミュレーション, 土木学会論文集, No.656, pp.255-268, 2000.8
- 4) 梅田信, 宮崎貴紅子, 富岡誠司: 曝気式循環施設により生じる貯水池内流動の現地観測, 土木学会論文集, No.775, pp.55-68, 2004.11
- 5) 有田正光: 選択取水効率向上の一手法に関する研究, 水工学論文集, 第41巻, pp.289-294, 1997
- 6) 秋山壽一郎, 西恭太, 浦勝: 潜り密度流の流動特性とフェンス工による流動制御, 水工学論文集, 第47巻, pp.1177-1182, 2003
- 7) M.Kumagai, Y.Asada, and S.Nakano: Gyres Measured by ADCP in Lake Biwa, Coastal and Estuarine Studies Volume 54, pp.199-208, 1998
- 8) 戸塚康則, 田中仁, 藤田豊, 山路弘人, 愛川薫, 多久和学, 沢本正樹: 猪苗代湖における内部静振観測, 水工学論文集, 第45巻, pp.1177-1182, 2001
- 9) 新谷哲也, 梅山元彦: 風応力による三成層水域の応答に関する数値解析, 水工学論文集, 第46巻, pp.1007-1012, 2002

(2005.9.30 受付)