

成層湖の流動に与える非静水圧の効果について

首都大学東京 新谷哲也

1. はじめに

湖・貯水池の湖盆形状は、一般的に水平スケール($L=10^1\sim^2\text{km}$)に比べて鉛直スケール($H=10^1\sim^2\text{m}$)が非常に小さい。それ故、湖盆スケールの現象を計算するには鉛直方向の慣性力を無視した静水圧近似が利用されてきた。しかしながら、湖内には非静水圧効果が無視できない現象が散在している。例えば、急変地形周辺の流れ、河川水や塩水の進入時に発生する下層密度流、短周期内部波の発生・伝播、K-H・対流不安定等が挙げられる。これらの現象は空間スケールが比較的小さいが、結果として湖全体の流動・拡散現象に大きく寄与している。一方、この非静水圧効果を数値モデルで考慮するためには、大規模な連立一次方程式を解かねばならず、静水圧モデルに比べて計算負荷の増加は著しい。本研究では、成層湖の流動に関連する非静水圧効果の検証と数値計算上の問題点に関して検討を行う。

2. 数値計算法

現在まで、計算コストの面から静水圧近似が多く用いられてきたが(POM, ROMS 等)、近年では、非静水圧効果を取り込んだ環境流体モデルが開発・適用され始めた(ELCOM, SUNTANS, UnTRIM 等)。これらの多くは、Casulliによって定式化された圧力を静水圧成分と非静水圧成分に分離して効率的に解を求める手法を基礎にしている(静水圧・非静水圧モデルの切り替えも容易)。本研究では、前年度の研究集会で紹介したオブジェクト指向型環境流体モデルにこの圧力分離手法を取り入れて検証計算を行う。

非静水圧モデルでは、圧力を分離する・しないにかかわらず圧力に関する Poisson 方程式を解く必要がある。図-1には、その行列成分の配置例(non-zero 要素)を示している。2次元、3次元ともに non-zero 要素の割合が非常に少ない疎行列となる。このような疎行列の解法には主に反復法が用いられ、定常反復法(SOR 法等)と非定常反復法(BiCGSTAB 法等)が存在する。図-2に実験室スケールの内部セイシュ計算を行った際の残差と反復回数との関係を示す。両者には収束速度に大きな違いがあり、可能であれば非定常反復法を使用すべきであることがわかる。

3. 計算結果

静水圧モデルと非静水圧モデルの差異を定量的に検証するために、内部セイシュの計算を Fringer et al. を参考に行った。計算領域は水平・鉛直方向にそれぞれ 100m の 2次元矩形水域($dx=2\text{m}$, $dz=1\text{m}$)とし、上層(50m)を淡水、下層(50m)を塩水(30ppt)の2成層場とした。この密度界面に初期振幅(振幅 1m の 1次モード変位)を与え、その後の内部流動と水面変動を抽出した。図-3は、密度界面がはじめに水平になる位相付近($t \approx T_i/4$, ここで T_i は内部セイシュ周期)における湖心での水平流速と湖端における鉛直流速の鉛直分布を示している。非静水圧モデルでは水平流速が鉛直方向に分布を持っているが、静水圧モデルでは上下層とも水平流速が鉛直方向にほぼ一定となっており、密度界面付近の速度勾配が過小に、底面・水面付近の流速が過大に評価されることがわかる。一方、鉛直方向の流速に関しても、静水圧モデルでは流速が全水深にわたって過大評価されていることがわかる。図-4は内部セイシュ発生中の水面変動の比較を行っている。静水圧モデルでは非静水圧モデルと比べて水面振動が明らかに大きくなるとともに、表面・内部セイシュ周期が短くなっていることがわかる。この周期不一致に関しては、静水圧モデルが浅水近似に基づいており、今回の計算条件のような近似が成り立たない条件($H/L \approx 1$)では適用してはならないことを示している。最後に、内部セイシュに非線形性が発生する局面における計算結果を

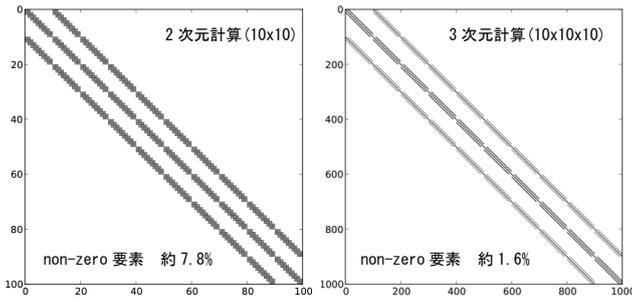


図-1 : 行列の non-zero 要素の分布

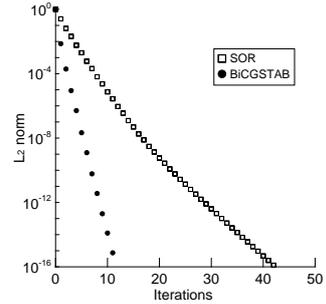


図-2 : 収束速度の比較

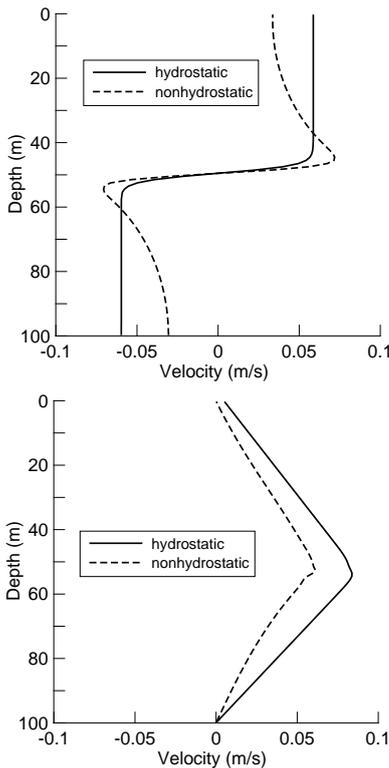


図-3 : 流速の鉛直分布(上: 水平流速, 下: 鉛直流速)

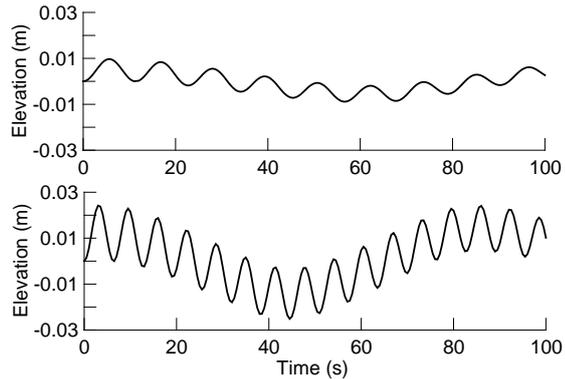


図-4 : 水面変動(上: 非静水圧, 下: 静水圧)

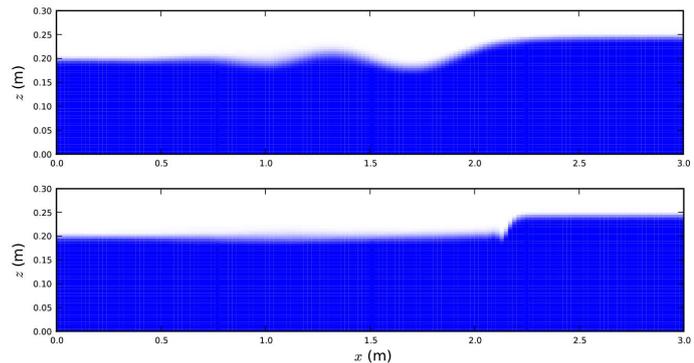


図-5 : 内部波の発生(上: 非静水圧, 下: 静水圧)

示す. 計算条件は上述の内部セイシュ計算と類似しているが, 下層厚に比べて上層厚が薄い成層構造としている(実験室スケール). 図-5は, 計算開始から $t = 1.1Ti$ 経過した際の状況を示している. 非静水圧モデルの結果を見ると水域スケール L (3.0m) よりも小さな短周期内部波(内部ソリトン)が発生していることがわかる(Horn et al.). 一方, 静水圧モデルでは鉛直方向の慣性力が表現できないため, 非線形性で発生した密度フロント部はソリトンに分裂することなく急峻化(steeptening)を続け, 数値粘性によって非物理的に運動エネルギーが失われる.

4. まとめ

本研究では, 成層湖の流動・混合現象を解析する際非静水圧効果に着目し, その手法, 効果及び問題点の考察を行った. 今後は, オブジェクト指向モデルの利点を生かした領域分割やネスティングの利用による非静水圧計算の効率化を試みたい.

参考文献

Casulli(1990), Journal of Computational Physics, 86, 56-74., Fringer et al.(2006), Ocean Modelling, 14, 139-278., Horn et al.(2002), Journal of Fluid Mechanics, 467, 269-287.