

II-260

成層した水域における内部モードの解析について

京都大学大学院 学生員 申 輝華
 京都大学工学部 正 員 岩佐 義朗
 京都大学大学院 学生員 広瀬 昌由

1. はじめに： 本研究は、成層した湖沼における種々の流れの解析を目指すもので、本報ではその第1段階として、成層した単純な水域を対象に、3次元的なオペレータ・スプリットング法を用いて、代表的な内部モードの解析を行うとともに、その特性について考察を行ったものである。

2. 基礎式および差分化： 浅水近似およびブシネスク近似を用いる。すなわち、水平面内の2方向の運動方程式、鉛直方向の運動方程式の近似としての静水圧分布式、連続式及び密度に関する保存式を適用する。ただし、水域の外部との熱交換はないものとしておく。コリオリの因子、水平方向の渦動粘性係数および水平方向の渦動拡散係数は定数とし ($f=8.34 \times 10^{-5}/s$, $A_h=10m^2/s$, $K_h=30m^2/s$)、鉛直方向の渦動粘性係数および渦動拡散係数は成層の安定を表わすリチャードソン数 (Ri) の関数として与える。つまり、

$$A_v = A_{v0} e^{-1.5 Ri}, \quad K_v = K_{v0} e^{-3.0 Ri} \quad \text{ただし} \quad Ri = (-g \frac{\partial \rho}{\partial z}) / (\rho (\frac{\partial \bar{u}}{\partial z})^2)$$

ここで、 A_{v0} および K_{v0} は非成層時の渦動粘性係数および渦動拡散係数で $A_{v0}=2.0 \times 10^{-3} m^2/s$, $K_{v0}=1.0 \times 10^{-4} m^2/s$ とする

本報では、取り扱う流れが長周期の大規模流れなので、数値解析するにあたり比較的计算時間の短いと期待されるオペレータ・スプリットング法による差分式を適用する。

3. 数値解析結果とその考察： 数値解析として、40mの様な水深を持つ1辺30kmの正方形の水域を考える。初期条件として、水深15m付近に水温躍層が存在するような連続的な水温分布を与える。計算時間は120時間とし、空間的にも時間的にも様な風を計算の最初の12時間にわたり吹送させる。図1は、中央域における水位の時間的变化と、水温躍層付近での水温の時間的变化を表わしたものである。この図より、これらはほとんど同位相で振動していることがわかる。温度躍層付近の水温上昇は躍層面の低下を意味するから、水表面の振動と躍層面の振動が逆位相であることを示しており成層のある場合の振動として妥当なものであろう。この図において水温が徐々に上昇しているのは、時間とともに鉛直混合が進み、成層が破壊されつつあることを表わしている。また、水温変化については、慣性周期 $T = 2\pi/f = 20.88$ 時間よりやや短い約17時間の周期の変動が含まれている。2層モデルにおける内部ボアンカレ波の基本モードの周期 T_0 を与える次式、

$$T_0 = \frac{2\pi}{\sqrt{f^2 + \frac{K^2 C^2}{b^2}}}$$

$$C = \sqrt{\frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1} \frac{g h_1 h_2}{h_1 + h_2}}$$

c: ケルビン波の波速
 b: 湖の幅 f : コリオリの因子
 h_1, h_2 : それぞれ上層下層の水深
 ρ_1, ρ_2 : それぞれ上層下層の密度

より、18.8時間と計算される。この結果は先の計算より求められる周期とほぼ一致しており、水域の中央域においてみられる水温変動は内部ボアンカレ波によるものと考えられる。図2は、風が止んだ直後の躍層付近の水温の平面的な分布である。この図より、水温の高い部分(図の濃淡の淡い部分)が沿岸域を反時計回りに伝播していることがわかる。この伝播が水域を1周するのに要する時間は約80時間と見積られる。Casanadyらの2層モデルにの理論¹⁾よれば内部ケルビン波の周期 T_k は、

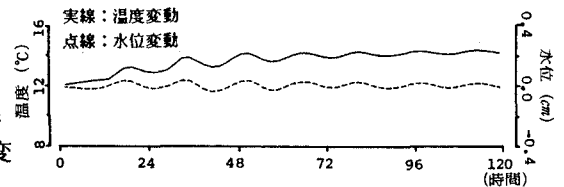


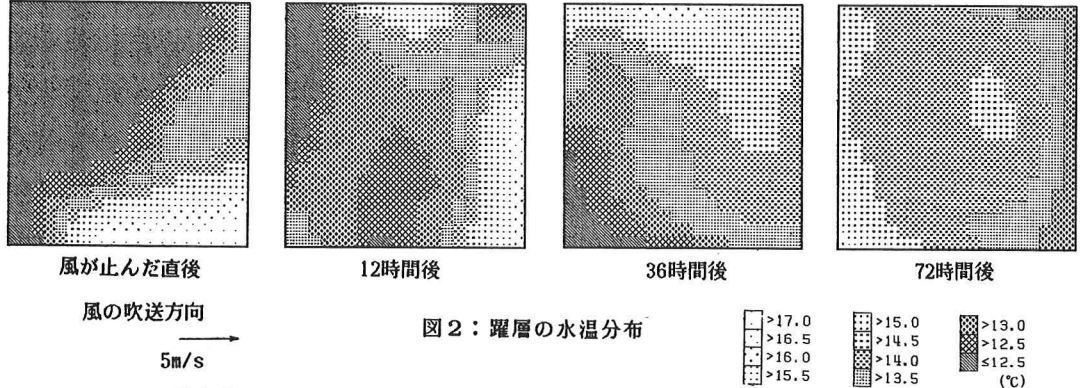
図1：中央域での水位変動と躍層の温度変動

$$T_k = \frac{2\pi r_e}{C}$$

r_e : 等価半径

C : ケルビン波の波速

と与えられており、この計算に用いた条件よりいまの場合 T_k は、76.8時間と計算される。これは先の計算結果より求められる周期とほぼ一致している。このことから、この高水温域の伝播は内部ケルビン波によるものと考えられよう。



これら2つの代表的な内部モードが表面流速に及ぼす影響は図3にみられる。図3の沿岸域にみられる岸に平行な方向に卓越し、さらに反時計回りに伝播している流れは、図2と比較して内部ケルビン波によって引き起こされたものと考えられよう。また、水域の中央域では、流れは内部ポアンカレ波とほぼ同じ周期で時計回りに回転しており内部ポアンカレ波とつながりがあるものと考えられる。

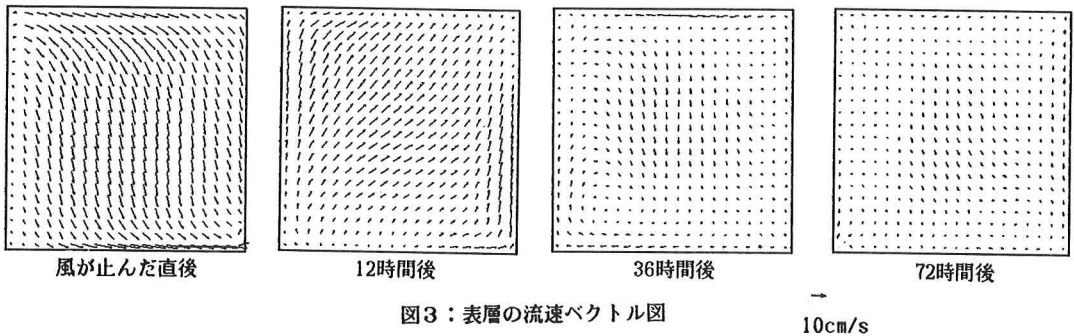


図4は比較のため成層していないときの風が止んだ直後の表層の流速ベクトルを求めたものである。この図は図3と大きく異なっており、図3にみられるような流れの特性は成層の存在によってもたらされたものであることは明らかである。

4. おわりに： 成層した水域における代表的な内部モードである、内部ポアンカレ波および内部ケルビン波が再現された。また、成層の有無によって流れの方向および大きさが大きく異なり、特に内部ケルビン波によって引き起こされる水平方向の流れは大きく、物質輸送に対しても大きな影響を及ぼすことが予想される。

《参考文献》(1)Csanady, G.T.: Hydrodynamics of large lakes, Annual Rev. of Fluid Mech., vol.50, No2, 1953

