

網走湖における内部ケルビン波と 風応力の影響評価

EVALUATION OF WIND STRESS EFFECT ON INTERNAL KELVIN WAVES IN LAKE ABASHIRI

中山恵介¹・堀松大志²・清水健司³・丸谷靖幸⁴・角谷和成²・
早川博¹・岡田知也⁵・鯉目淑範⁶

Keisuke NAKAYAMA, Taishi HORIMATSU, Kenji SHIMIZU, Yasuyuki MARUYA, Kazunari SUMIYA,
Hiroshi HAYAKAWA, Tomonari OKADA and Yoshinori YONOME

¹会員 博(工) 北見工業大学工学部教授 社会環境工学科 (〒090-8507 北見市公園町165番地)

²学生会員 北見工業大学大学院 土木開発工学専攻 (〒090-8507 北見市公園町165番地)

³修(工) 西オーストラリア大学 (〒6009 35 Stirling Hwy, Crawley, WA, Australia)

⁴学生会員 北見工業大学工学部 社会環境工学科 (〒890-0065北見市公園町165番地)

⁵正会員 博(工) 国土技術政策総合研究所主任研究官 沿岸海洋研究部 (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

⁶会員 工修 北見工業大学工学部助教 社会環境工学科 (〒090-8507 北見市公園町165番地)

This paper describes the influence of wind stress on the occurrence of internal waves in Lake Abashiri. Since Lake Abashiri is assumed to have two-layer system due to strong stratification, mode analysis was applied to investigate period and type of internal waves. In order to evaluate the wind effect on internal waves, salinity-water temperature chain was deployed at the depth of 11 m with and without ice cover during Nov. in 2007 and Feb. in 2008. As results, internal Kelvin waves may be predominant in Lake Abashiri, which has possibility of the causal of horizontal circulation. Field experiment demonstrated that internal waves are mainly caused by wind effect compared to the other effect, such as tide, which was confirmed by using a three-dimensional numerical computational model.

Key Words: *Internal Kelvin waves, Brackish lake, wind effect, mode analysis, two-layer system*

1. はじめに

オホーツク沿岸域は、冬季に流水によって輸送されてくる栄養塩等によって代表されるように、水生生物および水生植物にとって豊かな環境を形成しており、水産業の観点から重要な地域であると言える。網走湖は、そのオホーツク沿岸に位置する上流からの淡水の流入、河口からの塩水流入により明確な塩淡水境界層が発達する汽水湖であり、シジミを主として、鮭、ワカサギなどの水産資源を有している。

豊かな水産資源の存在とは裏腹に、網走湖は水質環境に関して大きな問題を有しており、その一つとして、貧酸素水塊の湧昇による青潮現象が挙げられる。夏季、網走湖ではアオコが頻繁に発生することもあり、湖央の底層には1mを越えるへドロ状の底泥が存在している。そのため、その底泥は水中におけるDO濃度を減少させ、

明確に存在する界面により、上下層におけるスカラー量の輸送が妨げられるため、結果として下層全域に貧酸素水塊が存在することとなる。そして、一般的な閉鎖性水域で見られるように大きな風応力が与えられると、下層の貧酸素水塊が湧昇し、いわゆる青潮現象を生じさせる。

このような状態を改善してゆくためには、どのようにして塩淡水境界が存在しており、如何なる機構により物質が輸送され、底泥が堆積されているかを解明する必要がある。過去の研究で、風応力によって吹送流や内部セイシュ^{1) 2) 3) 4)}が引き起こされることが指摘されている。吹送流や内部セイシュの存在は、湖内の流れを生み出し、水平循環を生み出している可能性^{3) 4)}も指摘されている。また、連行モデルを利用した概念モデルが提案されており、界面の長期変動解析を目的とした研究^{5) 6)}も存在する。過去の研究において示された循環流などの発生機構の解明を行うためには、より詳細な3次元モデルによる検討

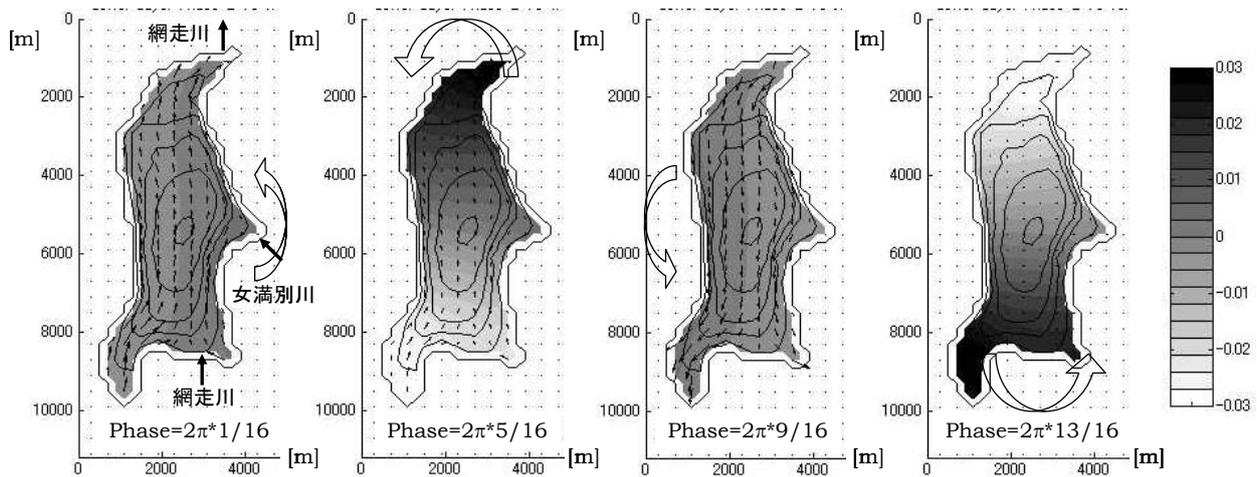


図-2 上層厚さ6m, 上下の密度差比0.015とした場合におけるモード解析結果.

第1内部波モードの内部波のみ抜粋. コントは下層厚さ10mで無次元化され値を使用して描かれている.

が必要であることが指摘されており, 3次元モデルによる検討の試み⁷⁾が存在する.

そこで本研究では, 湖内における物質輸送機構の解明を行うことを最終目的とし, 外力としての潮汐および風応力の寄与度を解明し, それらの応力により発生する内部波の挙動をモード解析, 現地観測, 及び3次元モデルを利用することにより考察する.

2. モード解析

網走湖では, 網走川からの淡水の流入, 河口からの塩水の浸入により, 常時, はっきりとした密度界面が形成されており, 上層と下層の塩分濃度の差は20 (psu) 以上にも及び, 界面厚さは薄いときで50cm以下になることもある. そのため, 網走湖の流動を考える上で, 2層近似は妥当な近似であると考えられる.

そこで本章では, 2層近似に基づいたモード解析⁹⁾を利用し, 内部波の挙動に関する検討を行う. 上下層の相対密度に対する下層密度の比($=(\rho_2 - \rho_1) / \rho_2$, ρ_1 : 上層密度, ρ_2 : 下層密度), 上層厚さ, 下層厚さの代表値として0.011, 5m, 10mをとると, 長波近似された内部波の波速は0.6m/sとなる. 地球の自転の効果を示すコリオリパラメータは 10^{-4} rad/sのオーダーであるため, 内部変形半径は約6kmであることが分かる. 網走湖は長軸方向約10km, 短軸方向約4kmの湖であり, 内部変形半径と比較して, 決して湖のスケールが小さいとは言えず, コリオリ力を考慮した検討が重要であると考えられる(図-1).

なお, コリオリ力を考慮したモード解析の詳細については, Shimizuら⁹⁾をご参照いただきたい.

モード解析を用いて内部波モードを計算した結果, 第1~3モードの周期として, 7.7時間, 5.0時間, 4.1時間が得られた. その内, 第1モードは, 上記と同様の成層条件において平野ら¹⁾が観測した8時間から9時間周期の内部波の変動に近い. 本研究における解析は内部波を内部

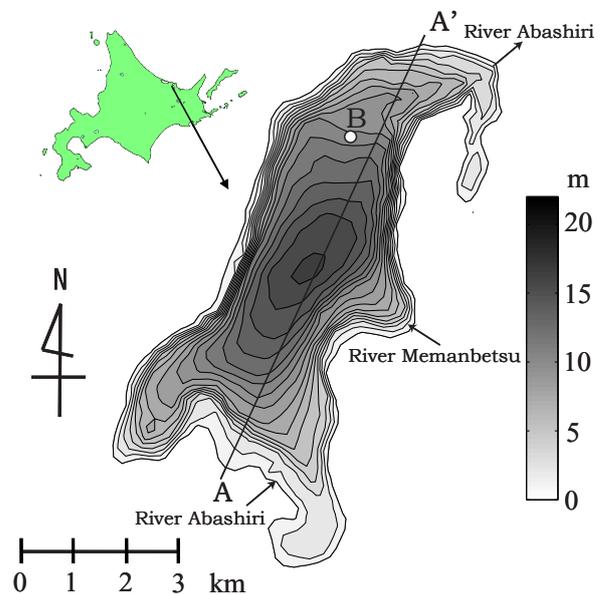


図-1 網走湖の水深図.

セイシュでなく内部ケルビン波として扱っている点で平野ら¹⁾の解析と異なる. ケルビン波の周期はコリオリ力を無視した場合の内部セイシュの周期にほぼ等しいため, 内部セイシュとしての取り扱いでも周期の推定に対して妥当な値を与えたと考えられる. 一方, 第1内部波モードの密度界面・流速の動きから, この波は岸を右に見て反時計回りに進行する内部ケルビン波としての挙動を示しており, 内部波の空間構造に対してはコリオリ力の影響を無視できないことが分かる(図-2).

非回転系の波と回転系の波では, その物質輸送に対する影響が異なる. 例えば, 内部ケルビン波は, ストークスドリフト¹¹⁾, 底面摩擦¹²⁾, baroclinic効果¹³⁾, 斜面上での砕波¹³⁾などによって, 水平循環を生み出すと予想される. 今後, 長期的な物質循環機構を解明するためには, コリオリ力を考慮した解析を行う必要があることが, あらためて確認された.

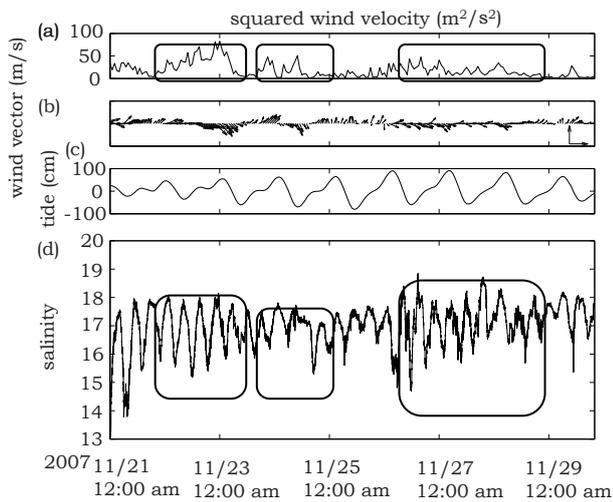


図-3 2007年11月21日から30日にかけての時系列データ。(a) 網走における風速の2乗。(b) 風ベクトル(代表10m/s)。(c) 網走における潮汐。(d) 網走湖点B水深約7mにおける塩分。

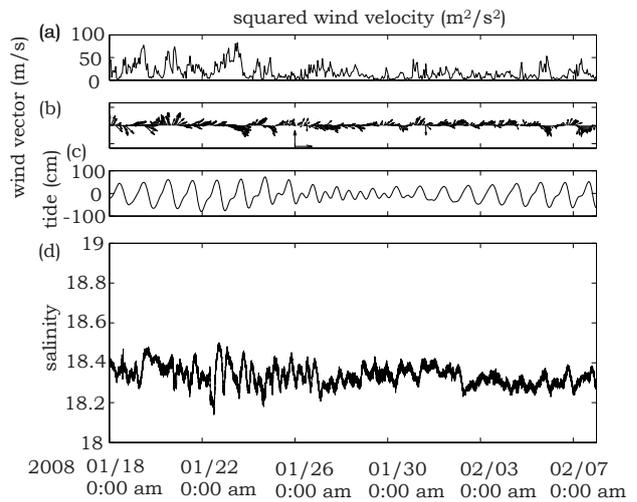


図-4 2008年1月18日から2月8日にかけての時系列データ。(a) 網走における風速の2乗。(b) 風ベクトル。(c) 網走における潮汐。(d) 網走湖点B水深約5mにおける塩分。

3. 風応力の影響評価

過去の研究で、風応力に対する内部界面の変動の対応がよいことが示されている¹⁾。しかし網走湖は、網走川により沿岸域とつながっており、そのため潮汐のエネルギーによる変動も大潮時において5cm程度であるが存在していることが知られている。そこで本研究では、風エネルギーと潮汐エネルギーのどちらが卓越して内部界面を変動させているかを検討した。

まず、2007年11月20日から30日にかけて、塩分水温計(ACT-HR：ALEC電子)を1m毎に水深10mまで設置した。前節で示した通り、界面厚さは50cm以下になることがあり、1m間隔での塩分水温計の設置では、詳細な変動までを観察することが出来ないが、界面から1m程度下における計測器は、界面以下におけるなだらかな塩分変化ゆえ、内部界面の動きを代表して示すことが出来る。そこで、界面中心やや下部である水深7m付近における計測器の値を用いて解析を行うこととした。

風に関しては、長軸方向だけ卓越してエネルギーが与えられるとすると、エクマン輸送による影響を無視することになるので、二乗風エネルギーとして潮汐エネルギーと比較することとした(図-3)。結果、風エネルギーの方が、潮汐エネルギーに比較して卓越して塩分濃度の変動に対応していることが確認された(図中の四角枠参照)。しかし、このデータだけからでは、風エネルギーと潮汐エネルギーを完全に分離して考慮することは困難であり、続いて、結氷下における同様な観測を行うこととした。

網走湖は、冬季結氷することで知られており、ワカサギ釣りなど、レジャーとしても楽しまれている。結氷すると、湖内への風エネルギーの供給は完全に絶たれ、残る大きなエネルギー供給は、潮汐エネルギーのみとなる。河川流入もあるが、冬季間、洪水による出水はなく、ほ



図-5 2008年1月17日の塩分・水温(CT)チェーン設置の様子。開けた穴は自然に閉じるため、そのままにしてCTチェーンの係留は終了。協力：網走開発建設部、網走市、国際航業(株)、西網走漁業組合。

ぼ無視できる。結氷すると、風エネルギーを完全に無視することが出来、水面における抵抗の条件が変化するため完璧にはないが、潮汐エネルギーによる影響を取り出すことが出来る。

塩分水温計の係留は、2008年1月16日から31日にかけて行われた。前回係留を行った位置と同位置に係留計を配置するため、スノーモービルにて機材を運搬し、氷に穴を開けて係留計を設置した(図-4、図-5)。塩分濃度の測定水深については、図-3で設置された場所と条件が一致するように、密度分布が急激に変化している躍層中心を選んだ。潮汐エネルギーによる影響を見ると、大潮・小潮の影響をうけて変動していることが確認された。しかし、その変動の大きさは非常に小さく、前回の観測と比較して無視できる程度であることが分かる。成層の状

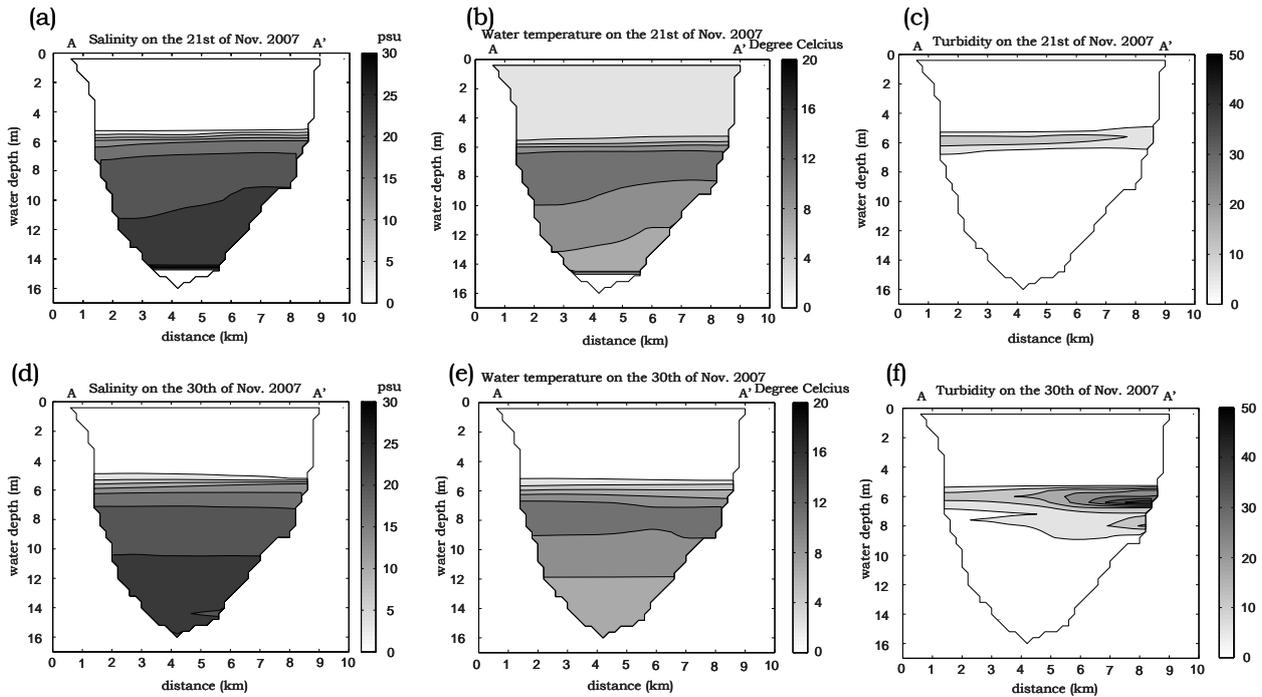


図-6 図-1に示されるA-A'断面(左端がA, 右端がA')において鉛直方向に0.1m間隔で得られた水温, 塩分, 濁度を基に作成されたA-A'における鉛直断面図. 2007年11月21日のデータは水深15mまでしか計測していない. (a) 2007年11月21日における塩分. (b) 2007年11月21日における水温. (c) 2007年11月21日における濁度. (d) 2007年11月30日における塩分. (e) 2007年11月30日における水温. (f) 2007年11月30日における濁度.

態が, 前回の観測と大きく異なり, 安定度が少し小さくなっていった. つまり, 外力が与えられると, 内部界面の変動は大きくなり易い状態であったことが分かる. 故に, それにもかかわらず1月の内部界面の変動が11月と比べて小さかったことは, 網走湖の内部界面の変動には風エネルギーによる影響が大きく卓越していることを示したと考えられる.

ここで注意しなくてはならないのは, 沿岸域から輸送される塩分は潮汐・海面水位により誘起されており, それによる塩水侵入, 界面付近への貫入により, 網走湖内における流動は大きく影響を受けている. そのため, 湖内の物質輸送を解明するためには, 総合的に風エネルギー, 潮汐エネルギー, 河川流入等の影響を考慮する必要があることを記しておく.

4. 2007年11月21日と30日における観測結果

2007年11月21日と30日において, 湖内10点において多項目水質計(AAQ1183 : ALEC電子)を用いた水温, 塩分, 濁度等の鉛直分布計測を行い, A-A'断面における各要素の鉛直断面図を作成した(図-6). 21日には塩分の急激な変化が存在しており, 界面厚さも50cm程度であった. わずか10日ではあるが, 30日には界面厚さが数10cm厚くなっていた. 冬季に向けての放射冷却による上層水の水温低下による成層の弱まり, 小潮(21日)から大潮(30日)へと変化したことによる塩水侵入などにより, 界面厚さが増加したのではないと思われる.

塩分の鉛直分布を比較すると, 水温が上下層で逆転し,

河川流入も少ない時期であるため, 僅か10日間であるが界面厚さが厚くなっていた. 11月30日は風の絶対値が3m/s以下であったため, 特に大きな界面変位を生じていなかったが, 11月21日は短軸方向に5m/s以上の風が吹いており, その影響で下層において僅かではあるが等塩分濃度面位置が変化していた. そのため網走湖では, エクマン輸送を考慮した風向に大きな風が与えられると青潮現象が発生することが報告されており, そのような風が与えられていなかったことは明らかであった.

濁度に着目すると, 小潮期であり, 沿岸域からの塩水の供給がない場合の21日でも, 濁度のピークが界面付近に存在していることが示されている. 一方, 30日の観測では, 塩水の貫入に伴うと思われる濁度のピークが下流側の界面付近を中心として発生していた. 21日の界面付近の高濁度の発生は, 内部波の発生・砕波等によって誘起されるものと考えられ, どのように発生し, どこに輸送されて堆積するかは, 物質循環機構を解明する上で重要である. 詳細に関しては, 長期的な視野に立った検討が必要であると考えられ, 今後, 月に1度ないし2度の3次元計測を行ってゆく予定である.

5. 3次元数値実験による検討

概念モデルなどによる界面位置に関する検討は重要であるが, 湖内における物質輸送, 循環を解明するためには, 3次元数値モデルによる検討を行う必要がある. 数値計算には, 西オーストラリア大学にて作成されたELCOM&CAEDYM^{14) 15)}を用いた. 生態系モデルである

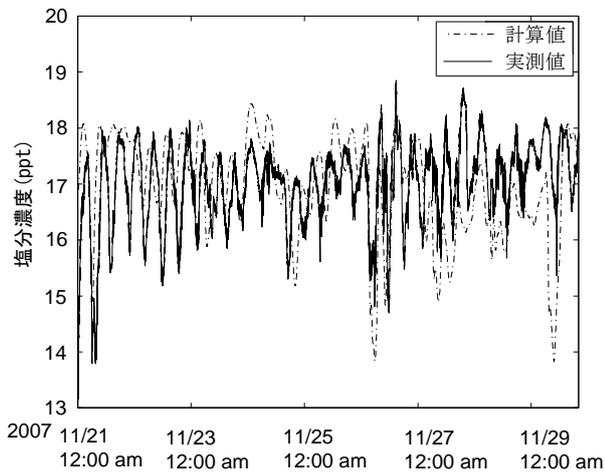


図-7 2007年11月21日から11月30日にかけての塩分時系列データの比較。実線：実測値。破線：計算値。

CAEDYMのスイッチは切り、今回は3次元静水圧のレベルモデルの流動部分のELCOMのみを用いた。

水平面内では200mの等間隔メッシュ、56×30を与え、鉛直方向には69メッシュを与えた。底層から約7mまで0.5mメッシュ、続いて水深4mまで0.1mメッシュ、そして水面まで約0.5mメッシュを与えた。鉛直方向のメッシュ数が膨大なものとなった理由としては、界面厚さが最小で0.5m程度になるため、0.5mで最低でも5ヶの計算メッシュを与えなくてはならないためである。

境界条件として、気象条件は網走のAMeDAS観測所の値を用いた。上流側河川からの淡水流入量は、雨による影響がなかったことから、平水時の一定流量を与えた。また、沿岸域からの塩水の流入に関しては、湖水位と沿岸域の海面の水位差が0.2m以上生じると発生するものとし、水位差に比例させて与えた。この塩水の流入量に関しては、今後、より詳細な検討を加えてゆく必要があることを記しておく。

計算結果の検証には、多項目水質計により得られる値は瞬時の空間分布のみであり、2007年11月21日と30日のみ計測を行ったため、計算結果との比較で十分な検討を行うことが出来ない。そこで、観測で時間変化が得られており、内部ケルビン波による変動成分も現れている、水深7mにおける2007年11月21日から30日にかけての塩分計の値を用いることとした(図-7)。実測値を数値計算結果と比較すると、両者とも非常に良く一致していることが分かる。まず、モード解析で得られた約8時間周期の内部ケルビン波による振動が計算によっても再現されていることが確認された。さらに、メッシュ間隔についても検討を加えた。界面厚さが0.5m程度であるため、メッシュ間隔を大きく与えてしまうと、実測値に示されるような大きな振幅の振動が再現できなくなってしまう。しかし、メッシュを0.1m間隔で与えたことにより、界面付近での数値拡散が抑えられ、その結果、実測値と同等の振幅の再現を行うことが出来た。この結果より、鉛直方向のメッシュ間隔について、界面厚さを5等分する程度の値を与える必要があることが分かった。

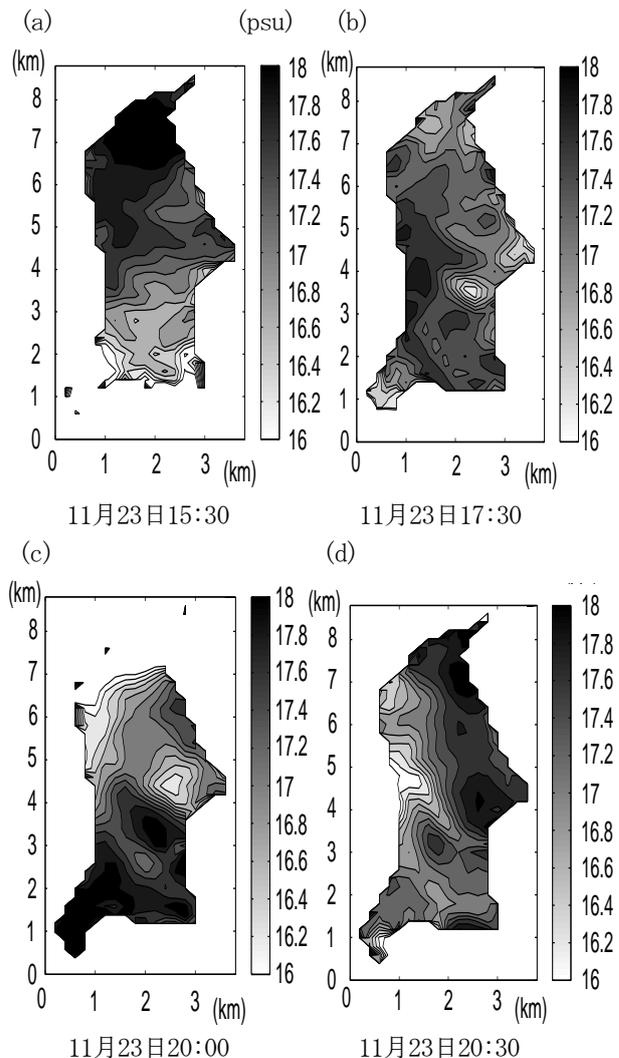


図-8 水深7mにおける2007年11月23日15:30から20:30までの水平面内塩分分布の再現計算結果。

実際に、時系列データで得られた振動が内部ケルビン波であることを確認するために、水深7mにおける塩分の水平面分布について検討を行った(図-8)。内部ケルビン波の周期を約8時間とすると、約2時間毎で約 $2\pi*1/16$, $2\pi*5/16$, $2\pi*9/16$, $2\pi*13/16$ における図を得ることが出来る。モード解析で得られた結果を裏付けるように、塩分濃度の濃い部分と薄い部分が反時計回りに移動しており、内部ケルビン波の発生が確認された。

第3章で示された通り、結氷あり(1月)・なし(11月)における躍層中央における塩分の実測値から風応力の影響評価を行ったが、潮汐や風等の外的な条件が異なるため、完璧に風の影響のみを取り除いた比較とは言えない。そこで、数値計算モデルが良好な再現計算結果を示すことが確認されたので、数値的に風応力に関する検討を行った。2007年11月21日から30日における計算において、風応力をゼロとし計算を行った。そのため、顕熱による熱収支に影響がでるが、成層形成機構の解明ではなく、内部界面が形成された後の内部波の変動への影響評価を行うことが目的であり、無視出来るものとした。その結果、

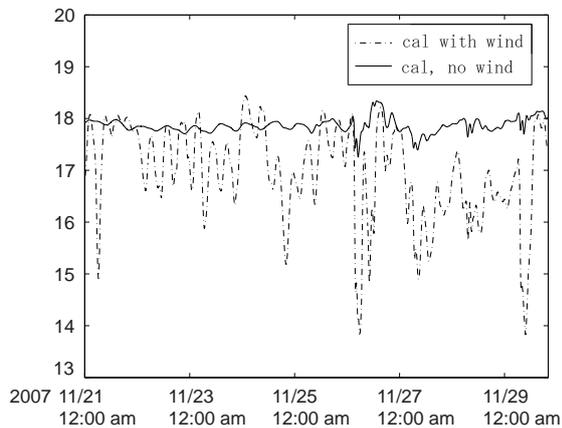


図-9 2007年11月21日から11月30日にかけての塩分時系列データの比較。実線：実測値。

結氷あり・なしの実測値からの検討で得られた結果と同様に、内部界面の変動は小さく、風応力による内部波の発生が卓越していることが確認された(図-9)。

6. おわりに

網走湖における内部ケルビン波の発生、および風応力による影響評価を行い、以下のような結論を得た。

- (1) モード解析を用いて、これまで内部セイシュとして扱われていた内部波が、内部ケルビン波であることが分かった。これにより、物質輸送を検討しやすく上で、コリオリ力の影響を考慮しなくてはならないことが確認された。
- (2) 結氷あり・なしにおける界面直下の塩分時系列データから、風応力の影響を比較し、内部波の発生には潮汐よりも風によるエネルギーが卓越していることが確認された。
- (3) 観測結果を利用し、3次元数値計算モデルによる再現計算を行い、内部ケルビン波の発生を確認した。また、風応力の影響評価も数値的にを行い、内部ケルビン波の発生には、風応力が重要であることが示された。

謝辞：本研究を進めるにあたり、3次元計測および結氷なしにおける水温・塩分計測の実施については網走開発建設部治水課、結氷下における水温・塩分計測の実施については西網走漁組・網走市・網走漁組・国際航業にご協力いただきました。記して感謝の意を記します。本研究は、科学研究費補助金(基盤研究(C):中山恵介)および科学研究費補助金(基盤研究(C):古川恵太)の助成を受けました。

参考文献

- 1) 平野道夫, 山田正: 井出康郎, 網走湖における流動と成層界面の挙動に関する観測, 水工学論文集, 第35巻,

pp. 609-614, 1991.

- 2) 池永均, 山田正, 内島邦秀, 大島伸介, 向山公人, 平野道夫, 井出康郎, 田村圭司: 網走湖における塩淡二成層の形成と挙動に関する研究, 水工学論文集, 第40巻, pp. 589-594, 1996.
- 3) 池永均, 山田正, 内島邦秀, 向山公人, 平野道夫, 井出康郎: 網走湖における吹送流の発生と成層界面の挙動に関する研究, 水工学論文集, 第41巻, pp. 481-488, 1997.
- 4) 池永均, 向山公人, 大島伸介, 内島邦秀, 山田正: 汽水湖成層界面の挙動と吹送循環流の形成に関する研究, 土木学会論文集, 第614巻, pp. 77-96, 1999.
- 5) 栗島知哉, 高橋克人, 宮島滋近, 平野道夫, 山田正: 塩淡二成層を形成している網走湖の塩水の流出入に関する研究, 水工学論文集, 第37巻, pp. 305-312, 1993.
- 6) 池永均, 向山公人, 大島伸介, 山田正: 塩淡二成層を形成する汽水湖沼の長期的な界面変動予測手法の開発, 土木学会論文集, 第628巻, pp. 77-96, 1999.
- 7) 赤堀良介, 清水康行: 閉鎖性水域における密度流現象に関する3次元乱流モデルによる数値計算, 土木学会論文集, 第684巻, pp. 113-125, 2001.
- 8) Fujiwara, T.: Buoyancy-driven current during cooling periods in Ise Bay, Japan, *J. Geophys. Res.*, 108, 32-1-11, 2003.
- 9) Shimizu, K., J. Imberger, and M. Kumagai: Horizontal structure and excitation of primary motions in a strongly stratified lake, *Limnol. Oceanogr.*, 52(6), 2007, 2641-2655.
- 10) Wunsch, C.: On the mean drift in large lakes, *Limnol. Oceanogr.*, 18(5), 2007, 793-794.
- 11) Ou, H. W. and J. R. Bennett: Theory of the mean flow driven by long internal waves in a rotating basin with application to Lake Kinneret, *J. Phys. Ocean.*, 9(6), 1979, 1112-1125.
- 12) Schwab, D. J. and D. Beletsky: Relative effects of wind stress curl, topograph, and stratification on large scale circulation in Lake Michigan, *J. Geophys. Res.*, 108, 2003, 3044.
- 13) Nakayama K., T. Miyazawa, Y. Yamashiki and K. Furukawa: Mixing due to the breaking of internal Kelvin waves on a uniform slope, *Stratified flow*, Vol.3, GFD1, 2006, 1-6.
- 14) Hodges, B. R.: Estuary, lake and coastal ocean model (ELCOM): user manual, University of Western Australia, Centre for Water Research Reference WP 1386 BH, 2000.
- 15) Hodges, B.R., J. Imberger, A. Saggio and K. B. Winters: Modeling basin-scale internal waves in a stratified lake, *Limnology and Oceanography*, 45(7), pp.1603-1620, 2000.

(2008. 9. 30受付)