

猪苗代湖における内部静振観測

FIELD OBSERVATION OF INTERNAL SEICHE IN LAKE INAWASHIRO

戸塚 康則¹・田中 仁²・藤田 豊³・山路 弘人⁴

愛川 薫⁵・多久和 学⁶・沢本 正樹⁷

Yasunori TOTSUKA, Hitoshi TANAKA, Yutaka FUJITA, Hiroto YAMAJI,
Kaoru AIKAWA, Manabu TAKUWA and Masaki SAWAMOTO

¹学生会員 東北大学大学院工学研究科 土木工学専攻 (〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻青葉06)

²正会員 工博 東北大学教授 大学院工学研究科 土木工学専攻

³正会員 工修 日本大学助教授 工学部 土木工学科
(〒963-8642 福島県郡山市田村町徳定字中河原 1 番地)

⁴正会員 東北大学教務職員 大学院工学研究科 土木工学専攻

⁵ 福島県 県中建設事務所 (〒963-8540 福島県郡山市麓山1-1-1)

⁶学生会員 東北大学工学部 土木工学科

⁷フェロー 工博 東北大学教授 大学院工学研究科土木工学専攻

Lake Inawashiro is a typical deep acid lake in Japan. The water from Nagase river is the cause of acid water in this lake. Deep lakes have a possibility of occurring internal seiche, which is very important in terms not only of hydraulics but also of water quality, because it is involved water purification and mixture.

A field observation was carried out in autumn season meanwhile the thermal structure was overturned. From the result of water temperature observation, internal seiche was successfully detected. The wave height and difference of water temperature variation reached to about 15m and 8 degree, respectively and internal seiche continued about 6 days. After this event the thermocline was disappeared. It suggests that the internal seiche promoted lake water mixing in full depth scale.

Key Words : Lake Inawashiro, stratification, thermocline, internal seiche

1. はじめに

水深の深い湖沼では、春季から夏季にかけての気温上昇に伴い水温躍層が形成され、霞ヶ浦に代表されるような浅い湖とは異なる流動を示す。特に秋季は、成層の衰退と季節風の影響により、内部波の発生頻度が高まる。内部波に関しては、例えば村岡らが中禅寺湖での内部波観測を行っている^{1) 2) 3)}。表層の混合層がある厚さ以上に達すると強い風が長時間連風しても、ごく表層付近の等温線が破壊されるにとどまり、風によるエネルギーの大部分は界面の傾きによるポテンシャルエネルギーに変換されてしまう¹⁾。風外力による水温躍層の侵食効果が小さいならば、水温躍層場に起因する内部波の役割が重要な位置を占める²⁾。しかし、内部波はある程度は伝播するが、部分的な領域に影響を及ぼす程度にすぎない。

これに比べて内部静振は、湖全域にわたる変動であり湖内の水質を大きく変化させる効果を持つ。ゆえに、内部静振の諸特性・湖水に与える影響を解明することは非常に重要である。中禅寺湖においても内部静振の観測はなされている³⁾が、まだ観測例が多いとは言えないのが現状である。

日本でも有数の面積と水深を誇る湖として、猪苗代湖が挙げられる。水質的な調査は藤田ら⁴⁾によってなされているが、水理学的な観測が具体的に行われた例は大正時代にさかのぼる。当時の資料⁵⁾には、表面静振に関しては周期19分・9分の2つの特徴的な振動が存在すること、さらに、湖東における水深14m付近で一日の間に水温が10℃以上も変化したことが記録されている。この水温変動は内部静振の存在を示唆しており、それもかなりの規模であることが分かる。そこで本研究では、猪苗代湖に注目し、数点において多層にわたり水温計を設置し

て内部静振の観測を試みた。水温鉛直分布の変動から、本湖における内部静振の特性と水温構造に与える影響を明らかにする事を目的とする。

2. 観測概要

(1) 観測地の概要

福島県中央に位置する猪苗代湖(図-1)は日本で第四の面積(105km²)を誇り、強酸性の水質を有する清澄な湖として有名である。しかし近年、湖北部地域の観光市街化に伴い、水質汚濁の進行が問題となっている。猪苗代湖の水は福島県における重要な水源として多くの人に利用されており、良好な水質の維持は必要不可欠なものである。本湖の水質を決定付ける主な要因として、北部観光市街地からの排水、及び湖北部から流入する強酸性水質の長瀬川流入水の二つが考えられる。長瀬川の上流には沼尻温泉地帯の湧・排出地帯があり、これが酸性水質の源である⁶⁾。流入水の大部分が長瀬川によるものであり、滞留時間がおおよそ5.4年である⁷⁾ことから、かなり閉鎖的な湖であると言えよう。加えて、最大水深が94.6mに達するため、夏季には顕著な水温躍層が形成される。

(2) 観測項目

a) 鉛直水温分布時系列観測

気温の低下により成層が弱まった湖内に強風が吹き付けた場合、内部静振の発生が予想される。内部静振の振動は長軸方向の動きが卓越するであろうと考え、1999年は図-2(等深線は水深10mごと)に示すSt.1, St.2, St.3の湖内3点に、2000年6月は短軸方向St.4, St.5を含めた5点に自動記録式小型IC水温計MDS-T(アレック電子社製)を設置したが、St.2, St.3が欠測となってしまった。水温計は鉛直方向に、水深40mまでは5mごとに、40m以深は10mごとに設置した。測定時間間隔は10分である。

b) 水位測定

湖北部と南部に水位計を設置し、水面変動の動きを捉える。水位計設置位置を図-2に示す。測定時間間隔は1分とする。

c) 風速測定

長瀬川河口東部に風速計を設置し、10分ごとのデータを採取する。風速データは、5秒ごとに測定した風速を10分間移動平均した値として得られる。

3. 観測結果と考察

(1) 1999年10月の水位・水温時系列変化

はじめに述べた通り、本湖には2つのモードの表面静振が存在していることが分かっている。しかし、あまり

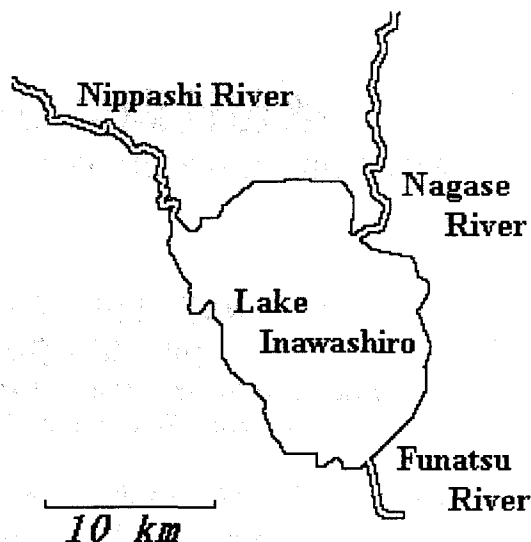


図-1 猪苗代湖全体図

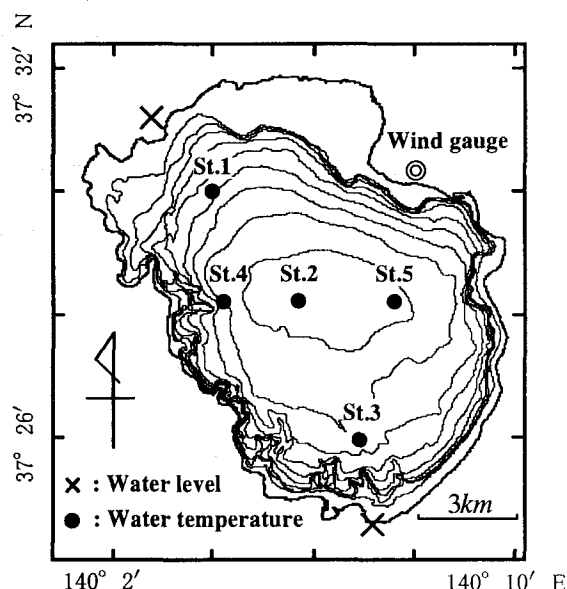


図-2 水温計・水位計設置位置

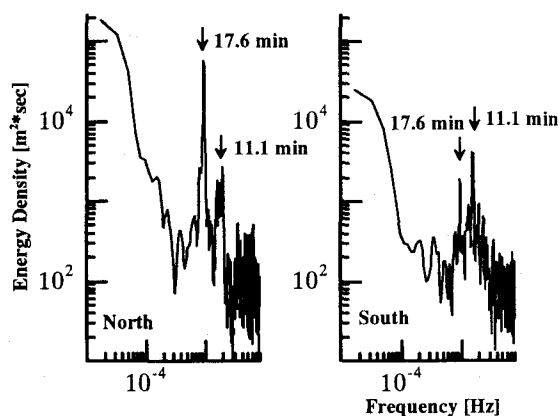


図-3 湖北・湖南水位スペクトル

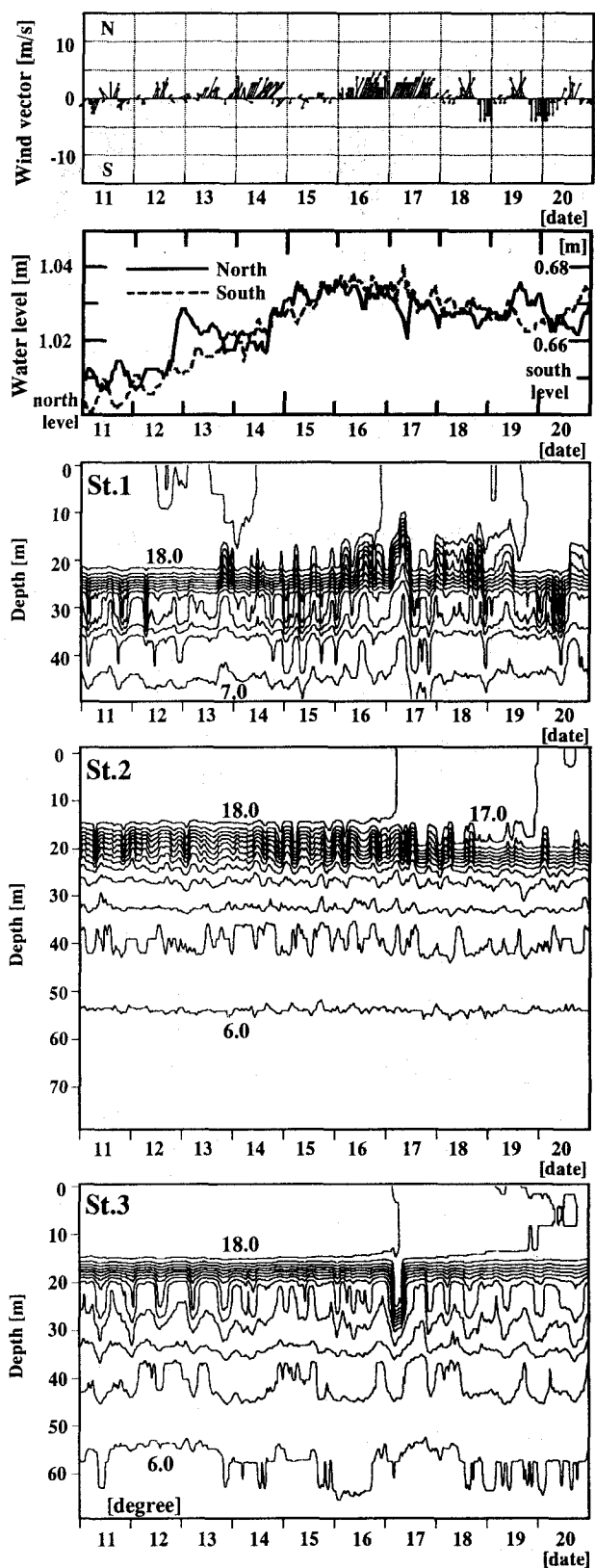


図-4 1999年10月，風速・水位・水温
(湖北・湖心・湖南) 分布データ

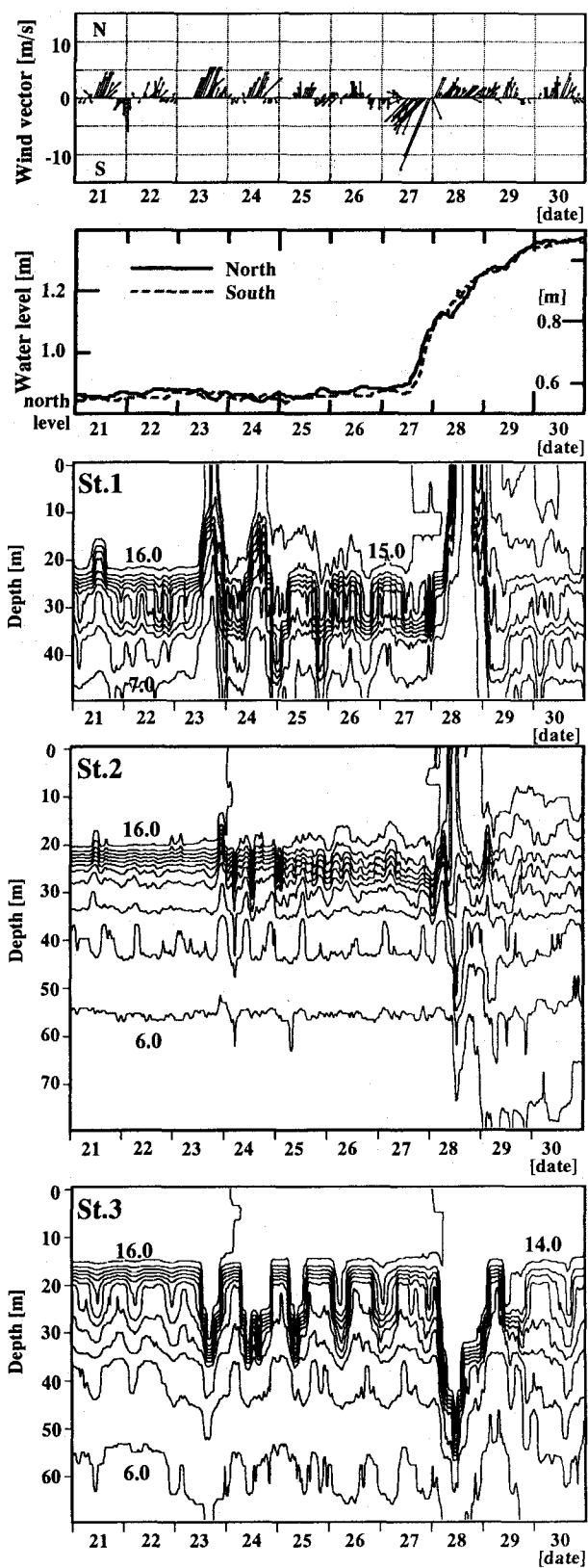


図-5 1999年10月，風速・水位・水温
(湖北・湖心・湖南) 分布データ

にも古い記録であるため計測精度が不明である。そこで、水位測定間隔を1分とし、この表面静振の抽出を試みた。内部静振に関しては後述するが、界面の変動は多少なりとも水面変動へと影響を及ぼす事が予想されるため、界面の動きが見られない10月22日の水位変動のスペクトルを計算した。図-3に湖北・湖南水位のスペクトル計算結果を示す。湖北・湖南ともに17.6分周期の表面静振が存在していることが確認できる。しかし、湖南においては17分周期の振動よりも11分周期の振動が卓越しており、同様の周期が湖北にもみられることから、本湖には17.6分・11分周期の2つの表面静振が存在することが明らかとなった。

等深長方形湖の静振理論解は式（1）で表される。

$$T = \frac{2}{c\sqrt{m^2/a^2 + n^2/b^2}} \tag{1}$$

(m = 0,1,2... n = 0,1,2...)

ここに、T：周期[sec]，c：波速[m/s]，m,n：振動モード，a,b：湖の長さ・幅員[m]である。猪苗代湖の平均水深は約60mであるので、h=60として式（2）より波速を求め、周期を計算した。

$$c = \sqrt{gh} \tag{2}$$

a=13000[m]（長軸方向），m=1, n=0の時、周期は17.8分であることから、観測で得られた17.6分周期の静振は基本モードの表面静振であるといえる。また、m=1, n=1, b=11000[m]（短軸方向）とすると、周期が11.5分となり、11分周期の振動はは長・短軸方向基本モードの表面静振が重複した重複波モードであると考えられる。

図-4に1999年10月11日～20日の風速・水位・水温分布データを、図-5に10月21日～30日の同データを示す。風速データはこの期間欠測であったため、猪苗代湖北部に位置するアメダス観測所にて得られたデータを使用する。今回は、内部静振に対応した数時間オーダーの水位変化を見るため1時間移動平均した水位を図示した。

10月中旬は明確な水温躍層が存在している。湖北（St.1）の水温時系列変化を見ると、定期的な界面変動を示しているが、湖南（St.3）ではほとんど変化が見られない。ゆえに、この動きは湖長軸方向の内部静振ではない。北部の湖棚で発生した擾乱が内部波となってSt.1へと到達した様子を捉えたものであると予想される。16・17日にはまとまった南風が吹いており、湖南（St.3）でも一度大きな界面変動が発生したが、持続的なものではなく、すぐに安定した状態へと移行している。内部静振が発生するにはまだ成層が強いようである。

10月21日～30日にかけての水温分布によると、湖内の界面には大きな変化が見られる。10月中旬の変動とは異なり、北部の界面と南部の界面とが逆位相で変位している様子がわかる。逆に、湖心（St.2）での水温は湖北・

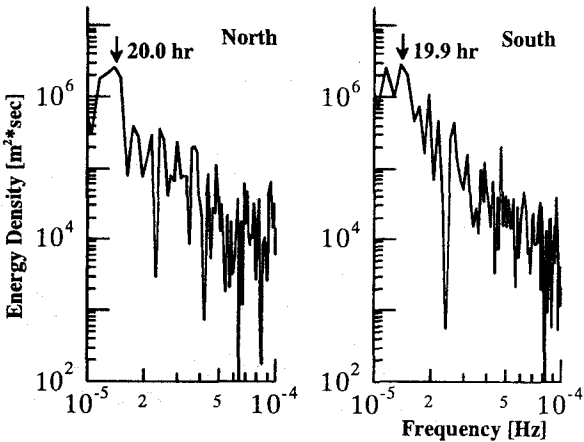


図-6 湖北・湖南界面変位スペクトル

表-1 内部静振周期計算パラメータ及び結果

	ε	h ₁ [m]	h ₂ [m]	T [hr]
St.1	0.000842	22	43	20.8
St.3	0.000847	18	52	21.6

湖南の水温変動に比べるとほとんど変化していない。以上3点の水温変動結果より、湖心を振幅の腹とした大規模な内部静振が発生していたことが予想される。この時期は躍層上の水温が徐々に低下して、成層が次第に弱まっている。そこにまとまった風が吹き付けたためこのような内部静振が発生したと考えられる。特に、27・28日東北地方は台風の影響で大荒れの天気であり、27日深夜の風速は14m/sに達する。水位は28日から30日にかけて20cmも上昇しており、河川からの流入水、及び降雨による湖水量の増加はかなりの量に達する。湖面面積は105km²であるので、湖水増加量はおよそ2.1×10⁷ tonと算定される。23日に発生した内部静振に台風によるさまざまな条件が寄与し、28日に湖北では水深40mの低層水が水面にまで湧昇している。水温変化が約8℃にも達する大規模な内部静振であった。

この10月末に発生した内部静振後は水温の等温線間隔が大きく広がりつつある。つまり、この内部静振によって湖内の鉛直循環が促進されたわけである。28日に発生した内部静振は降雨や流入水などの影響を受けているため偶発的な現象であろう。しかし、23日から27日の内部静振は成層の衰退と季節風によって引き起こされたものであり、例年降温期に発生していると思われる。ここで、温度勾配がもっとも大きな13℃の等温線を界面の動きとみなしてスペクトルをとり周期を計算した。結果を図-6に示す。湖北と湖南での周期を平均すると、20.0時間となった。表面静振と同様に、理論解との比較をしてみる。式（1）における、波速 c を式（3）に置き換えると内部静振の振動周期を表す式となる。

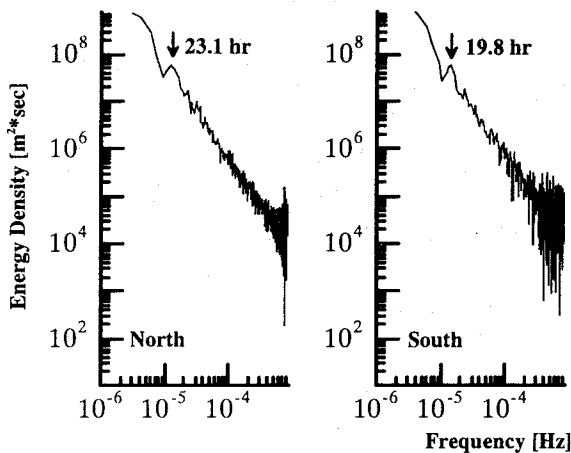


図-7 内部静振発生時における水面変動スペクトル

$$c_i = \sqrt{\frac{\varepsilon g h_1 h_2}{h_1 + h_2}} \quad (3)$$

ここに、 ε ：水温2層系の相対密度、 h_1 、 h_2 ：それぞれ躍層から水面までの深さ[m]、躍層から湖底までの深さ[m]である。各パラメーター及び計算結果は表-1の通りである。湖北と湖南の周期を平均すると、21.2時間となった。実測から得られた周期と理論解から計算された周期はほぼ一致している。この界面変動が単に風の吹き寄せ現象であった場合、界面の変動周期が風の変動周期に対応するはずである。図-5の風速ベクトル図より、風はほぼ24時間周期の変動を示しており、界面変動周期とは対応していない。さらに、風応力と界面傾斜の関係を Kajiura⁸⁾ に倣って計算したところ、観測期間に吹いていた5m/sの風に対する界面傾斜は約1.5mに過ぎない。ゆえに、これらの界面変動は、吹き寄せではなく内部静振によるものであると結論付けられる。

内部静振が発生している期間（21日から27日）における水位の変動に関してスペクトルを計算した結果が図-7である。卓越する周期として、湖北・湖南それぞれ23.1時間・19.8時間の振動が発生していることが分かる。湖北での水面変動周期は内部静振のそれよりも大きな値となったが、これは本湖北部に広がる浅瀬の影響により局部的に振動モードが変化したためであると思われる。以上の結果から、内部静振が発生している期間には微小ではあるがそれと同程度の卓越周期が水面変動にも現れることが確認された。

界面は約5時間（1/4周期）で15m前後変位する事から、鉛直方向の流速は概算で 8.3×10^{-4} m/sと算定される。非常にゆっくりとした動きではあるが、湖水混合の観点からすると、十数mもの鉛直変動を引き起こす内部静振は、猪苗代湖のように水深の深い湖において、吹送流による混合に比べて非常に効果的である。

(2) 2000年6月の水位・水温時系列変化

図-8に2000年6月21日～30日の風速・水位・水温分布

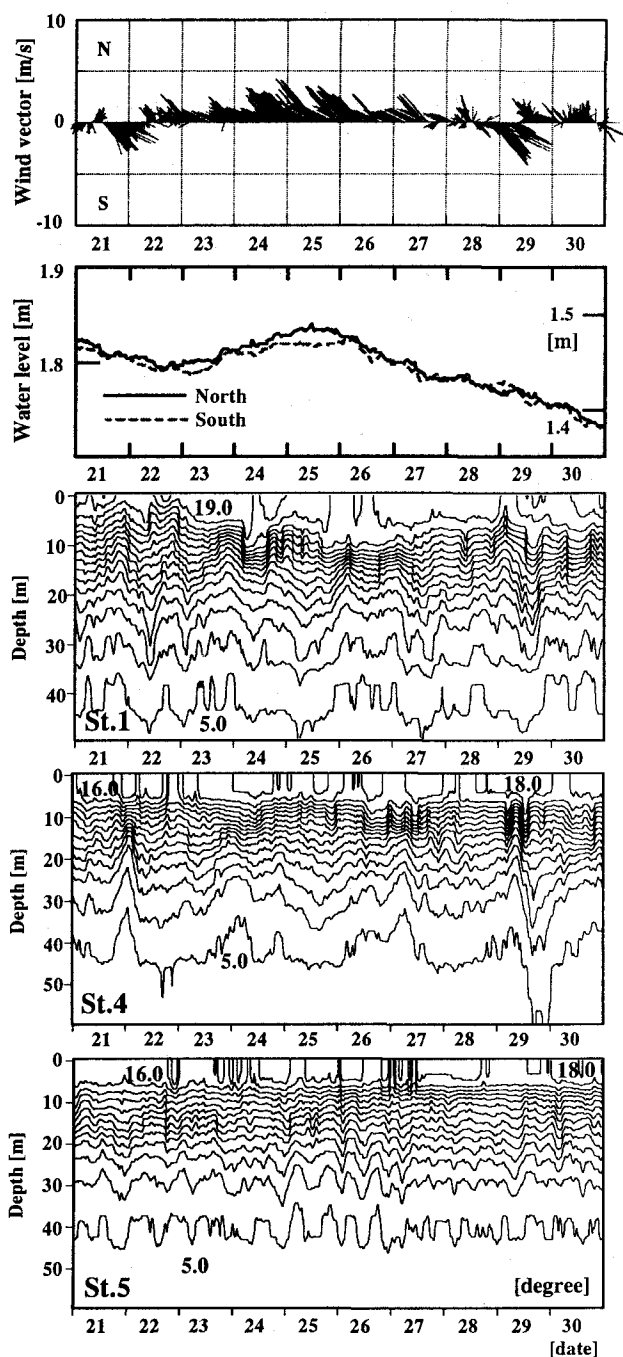


図-8 2000年6月、風速・水位・水温(湖北・湖西・湖東)分布データ

(湖北・湖西・湖東) データを示す。風速データは現地観測により得られたものである。まだ明確な水温躍層は存在していないが、水面付近はかなり温度が上昇しており、強成層期へと遷移している。昨年10月の内部静振に比べるとかなり小規模ではあるが、短軸方向（東西方向）に周期的振動が発生している。過密等温層の中間値である12℃を界面の動きとみなし、図-9にSt.4, 5における12℃等温線経時変化を示す。湖東と湖西の等温線が逆位相で変動しており、界面全体にわたる振動であることがわかる。図-10は12℃等温線の変動スペクトル図である。3地点に共通した卓越周期として24.3時間が挙げら

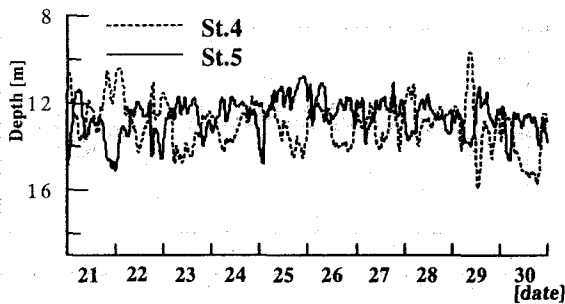


図-9 12℃等温線変動

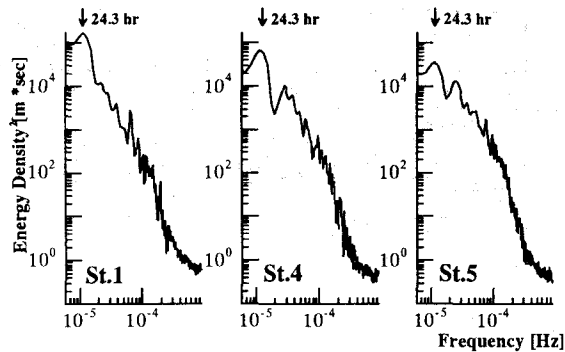


図-10 12℃等温線スペクトル

表-2 内部静振周期理論解

	ε	h_1 [m]	h_2 [m]	T [hr]
St.1	0.00106	15	50	20.9
St.4, 5	0.00106	15	70	17.0

れる。表-2に理論周期の計算結果を示す。表中のSt.1は長軸方向、St.4,5は短軸方向に対応した理論解を算出した結果である。長軸方向・短軸方向ともに、観測の結果得られた周期に相当する振動ではない。ゆえに、この24時間周期の振動は単一方向の内部静振であるとは考えられない。そこで、内部ケルビン波の回転モードについて検討してみる。式(3)から、界面の伝播速度を求める。水温躍層が明確でないため、上下層水温を決定するのは困難であるが、平均的な値として $h_1=15[m]$ 、 $h_2=45[m]$ 、 $\varepsilon=0.00106$ を用いて波速を求めると $c=0.342 [m/s]$ と算出される。北部の浅瀬を考慮して、本湖を半径5kmの円形湖と仮定し、水平方向の回転周期を求めると25.5時間となり、図-10に示される卓越周期に相当する値となった。

今回得られたデータからは、具体的な回転の様子や回転方向を捉える事はできなかったが、これらの結果は、猪苗代湖程度の面積を有する湖にも、回転性の内部ケルビン波の動きが見られるという可能性を示唆したものである。

4. おわりに

本研究では、福島県猪苗代湖を対象として成層の弱い

時期に水温変動の現地観測を行い、成層の衰退と強い季節風の影響により、長軸方向の大規模な内部静振が発生することを確認した。この内部静振後には水温躍層が破壊され、全層にわたる湖水混合が促進された。このように、内部静振による水温躍層への影響を具体的なデータとして捉えることができた。また、受熱期においても界面の変動が見られ、数mの内部静振が発生した。本湖の静振は長軸方向のみではなく、短軸方向にも振動しており、より複雑なモードで変動していると考えられる。また、受熱期に湖内3点における水温変動のスペクトルを計算した結果、内部ケルビン波の回転周期に相当する周期が抽出され、回転性の動きが存在する可能性が示された。

今回の観測により得られた大規模内部静振は、平常時の気象条件によって発生したため、毎年この時期に発生する可能性があると考えられる。今後も継続的に観測を続け、発生条件や湖水に対する影響をさらに詳細に検討し、さらに、今回は欠測のため不可能であった内部静振時の三次元的な構造を捉える必要がある。

謝辞：本研究を行うにあたり御協力頂いた福島県県中建設工事事務所、福島県猪苗代土木事務所、福島県喜多方建設工事事務所、マリーナ・レイク猪苗代(株) 翁島港マリーナに深謝する。

参考文献

- 1) 村岡 浩爾, 平田 健正: 中禅寺湖の内部波, 第27回水理講演会論文集, pp.179-184, 1983.
- 2) 村岡 浩爾, 平田 健正: 中禅寺湖の内部波(2), 第28回水理講演会論文集, pp.327-332, 1984.
- 3) 平田 健正, 村岡 浩爾: 中禅寺湖の岸付近における水温変動特性, 第29回水理講演会論文集, pp.377-382, 1985.
- 4) 藤田 豊, 田中 仁, 坂本 優, 志田 敬, 武田 忠良, 田坂 嘉識, 渡辺 寿之, 渡辺 善朗: 猪苗代湖の長軸方向3水域における水質観測, 土木学会東北支部技術研究発表会, pp.276-277, 2000.
- 5) 東北帝国大学理科報告, 仙台出版, 第1巻, 第5号, 1913.
- 6) 小野寺 英也: 猪苗代湖の酸性化と生息魚類について, 学報, 野口英世記念会, 第2巻 第1号, pp.2-8, 1980.
- 7) 千葉 茂: 猪苗代湖の水質, 学報, 野口英世記念会, 第6巻 第1号, pp.7-9, 1984.
- 8) Kajiura, K: The effect of winds on the stratified lake water, Journal of Oceanographical Society of Japan, Vol.8, No.2, pp.67-71, 1952.

(2000.10.2受付)